

E-2 森林火災による自然資源への影響とその回復の評価に関する研究

(1) リモートセンシングデータなどによる森林火災の影響と回復過程の解析と総合化

独立行政法人国立環境研究所

生物圏環境領域	領域長	渡辺 信
国際室		清水英幸

独立行政法人森林総合研究所

四国支所	流域森林保全研究グループ	平田泰雅
森林管理領域	資源解析研究室	斎藤英樹

独立行政法人通信総合研究所

電磁波計測部門	環境データシステムグループ	小林達治、梅原俊彦、浦塚清峰、 佐竹 誠、灘井章嗣、前野英生、 黒須隆志
---------	---------------	--

<研究協力者> 自然環境研究センター 鋤柄直純

インドネシア国科学研究所生物研究センター Herwint Simbolon

インドネシア国ボゴール農科大学 Lilik Budi Prasetyo

平成12～14年度合計予算額 59,027千円

(うち、平成14年度予算額 16,686千円)

〔要旨〕1997-1998年のエルニーニョ南方振動現象に起因する異常乾燥は、焼き畑や産業造林のための火入れ等からの延焼を増大させ、ボルネオ島やスマトラ島で大規模な森林火災を引き起こした。森林火災の影響及び回復過程の程度は、局地的に異なり、また被災地域は広範にわたる。この状況をモニタリングのために衛星観測は有効な手段の一つである。そこで本研究では、大規模森林火災の影響及びその回復過程を、リモートセンシングデータを用いて評価する手法を開発した。また、本研究の位置づけを明らかにするため森林火災に関する既存の研究事例を整理した。

まず、森林火災の状況及びその要因と拡大の機構、森林構造への影響と回復過程、動物への影響についてのこれまでの知見を整理した。次に、高分解能衛星データを用いて、火災発生前の研究対象地域の土地被覆分類を行い、被災前の天然林を抽出した。また、現地において被災の程度に応じてプロットを設定し、林分因子の測定を行った。被災の程度は、1m地上分解能の衛星データを用いて判定した。現地での測定値と高分解能衛星データから算出された植生指数との関係を調べた結果、天然林の被災地ではLAIと植生指数は負の相関を示すことが明らかになり、植生指数を介して広域での被災程度の評価を行うことが可能となった。また、火災発生時に観測を行っていたJERS-1衛星合成開口レーダ(SAR)は、雲を透過することで熱帯降雨林の観測に適していると期待されたが、単偏波であること等が影響し、被災地抽出において良い結果は得られなかった。そこで、より高性能である航空機搭載SARを用いて森林火災エリアの抽出解析を行った。その結果、森林火災エリアの同定・観測にはLバンドの交差偏波が有効であることが確認できた。最後に、高頻度衛星による観測データから、広域にわたる被災地マッピングと植生回復過程のモニタリング手法を開発した。その結果、1998年前半に東カリマンタン州全域にわたり広く火災の被害を受けており、回復のスピードは被災直後に比べ、現在は緩やかになっていることが明らかになった。

[キーワード] リモートセンシング、高分解能衛星データ、高頻度衛星データ、合成開口レーダ、広域モニタリング

1. はじめに

国連環境開発会議により採択された生物多様性条約、地球憲章、アジェンダ21および森林原則声明では、森林減少の防止、生物多様性の保全、持続可能な森林管理の必要性が提唱され、その後モントリオールプロセスやヘルシンキプロセス等により持続的な森林管理基準と、具体的な指標の策定が求められている。しかし、世界的に森林減少は依然として進んでおり、熱帯地域、特にインドネシアでは焼き畑や産業造林、開発などに起因する森林火災が、森林資源の焼失、生物多様性の減少、森林環境の劣化、さらには国境を越えた煙害をもたらし、社会、経済、健康、生活に深刻な影響を及ぼしている。同国では、これまでに1987年、1991年、1994年に異常乾燥に見まれ、大規模な森林火災と煙害が発生したが、1997年から1998年にかけては、エルニーニョの影響と思われる記録的な異常乾燥が続き、過去最大規模の森林火災が発生した。

大規模森林火災は、森林のバイオマス・物質生産性ばかりでなく、森林に生息する多くの生物の種や個体数、遺伝的多様性などに多大な影響を及ぼしたと考えられるが、基準となる火災前および回復期の生物種データなどが未整備であるため、生態系・生物多様性への影響評価が不可能であり、森林管理に重大な支障をきたしている。そこで森林火災が森林生態系・生物多様性に及ぼす影響を評価するための指針を早急に策定し、生物多様性的観点からも健全性の高い森林を再生するために具体的な方策を提示することが求められている。

これらの被害を把握し、その回復過程をモニタリングすることは、森林に依存して生活する動植物の保護、あるいは、地元の人々の生活環境保全等を考える上で非常に重要である。森林火災による影響の程度は、局地的に異なり、また被災地域は広範にわたる。そこで森林火災の影響及び回復過程の評価において、広域観測に適した衛星リモートセンシングは有効な手段の一つである。

リモートセンシングを用いて森林火災の状況とその影響を抽出する研究は、Landsat衛星TMデータ等の地上分解能20～30mの高解像度衛星を用いたローカールスケールの研究と高頻度観測低解像度衛星であるNOAA衛星やSPOT衛星VEGETATIONデータを用いたリージョナルスケールの研究がある。

ローカールスケールの研究では、まず、Pattersonらが、Landsat衛星TMデータをKauth-Thomas法と主成分分析の2つの線形変換で強調した上で分類し、その結果を比較して、Kauth-Thomas法が森林火災跡地の検出に適していると報告した⁴⁶⁾。マイクロ波を用いた研究では、SiebertらがERS-2衛星SARデータを用いて東カリマンタン州において森林火災跡地のマッピングを行っている^{57),58)}。この研究の中でC-bandでは森林火災による植生の消失により、土地被覆タイプにかかわらず2-5 dBのレーダ後方散乱の低下が認められた。また多時期のレーダ画像の主成分分析で強調されたカラー合成画像により、火災跡地が視覚的に確認できることも報告されている。また、これらの結果は、NOAA衛星データから抽出されたホットスポットによってもその妥当性が確認されている。

リージョナルスケールでの研究では、Domenikiotisらが、NOAA衛星を使ってマッピングを行っている。この際、マッピングに用いたのは植生指数（NDVI）の値であり、これをLandsat衛星TM

カラー合成画像から作成した参照地図と比較を行っている。その結果、NOAA衛星データから得られる火災跡地画像は実用上利用可能なものであるとした⁸⁾。またBarbosaらは、森林火災マッピングに適したNOAA衛星データの画像合成法の検討を行い、アルベドを用いた最大値合成法が最も火災跡地と非被災地域との分離度が高く、また天底に近いピクセルを選択して、放射量歪みの影響が少ない画像合成が可能であると報告している²⁾。

SPOT衛星VEGETATIONデータを用いた火災跡地マッピングでは、まず、Eastwoodらが、カナダ北方林生態系－大気実験サイトにおいてその適用可能性を検討し、中間赤外域のバンドを用いることによって従来のNOAA衛星データを用いる方法よりも信頼性の高い結果が得られることを示した¹⁰⁾。Fraserらは、同じく降雨林において森林火災跡地のマッピング、更新林齢およびバイオマス量の推定を行っており、火災跡地の判別にはSWVI (Short-Wave based Vegetation Index) が有効であること、更新林齢は比較的高い精度で推定できたがバイオマスの推定精度は高くなかったことを報告している¹²⁾。Stroppianaらは、オーストラリアのウッドランドサバンナを対象にSPOT衛星VEGETATIONデータの森林火災に関する解析を行った。その結果、近赤外域バンドは火災発生に対して最も感度が高くその反射率の低下は数週間持続していた。一方で短波長赤外域バンドの信号は火災後の経過年数に依存していた。またGEMIが対象地の植生域における火災による変化抽出能力が最も優れていると報告した⁶²⁾。Phulpinらは、ブラジルの熱帯降雨林を対象に火災跡地のマッピングと、それに相当する大気への炭素放出量の推定を行った⁴⁷⁾。Evaらはリモートセンシングデータの火災プロダクト作成のための総合的利用法を提案しており、その中でリージョナルスケールのバイオマスバーニング推定において最も信頼性の高い方法は低解像度衛星の結果を高解像度衛星データによって補正するマルチセンサアプローチであるとしている¹¹⁾。

火災後の森林の回復過程のモニタリングでは、ViedmaらがLandsat衛星TMデータを用いて解析を行った。その結果、NDVI差分画像は火災跡地マッピングに適しており、またNDVI値は火災後の経過時間と非線形関数で当てはめることができるとした。そしてそのパラメータは、生態系プロセスにおける火災の影響の定量化に有効だと報告した⁷⁴⁾。

NOAA衛星データの時系列植生指数データ解析では、李らが、主成分分析およびフーリエ変換を用いた方法によってその特性値を解析している。その結果、主成分分析においては、その第1主成分は年間の植生指数の平均値、第2、第3主成分は季節変化であるとし、フーリエ変換では0次の振幅が年間の平均植生指数、主成分分析では、第2と第3主成分に分かれていた季節変化は1次の振幅で表され、その違いは位相情報に含まれることを明らかにした^{51), 52)}。

高頻度観測衛星データの取り扱いに関しては、沢田らが局所最大値と周期関数の当てはめ、最適な周期関数の組み合わせの自動判定などを繰り返し行う手法を開発し、NOAA衛星データやSPOT衛星VEGETATIONデータの10日間合成データに残っている雲やヘイズの影響を取り除く手法を開発した⁵³⁾。このように多くの報告がなされているが、高頻度観測衛星を用いた森林の回復過程のモニタリングについては十分な研究がなされていないのが現状である。

リモートセンシングセンサの中でも、雲や霧等天候に左右されずに地上を観測可能である電波を用いたセンサは、特に雲で覆われることが多く晴天率も低い熱帯地方では有効な手段である。その中でも合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)はパルス圧縮、開口合成処理によって高分解能なデータを得ることができる。また、位相情報を用いることにより2時期のデータの比較が詳細に行える利点がある。これらの解析により、森林火災エリアの同定、さらには映像上での回

復過程の変化等が確認されれば1つの大きな指標になることが期待される。

SARは天候によらず晴天でなくても観測できるという点で、熱帯地域のような晴天率の低い地域の観測に適している。また、周波数によって散乱の対象となる構造が異なり、樹冠と幹のように森林の異なる情報を周波数の異なるセンサで観測できる。さらに、波長が長くなると森林の中に浸透する割合が高くなり、森林の内部情報を取り出せるという点で非常にユニークである。

このような利点を持つ衛星搭載SARは、各国から打ち上げられて、地球規模での観測が行なわれてきた。現在、観測中のものはCバンドのカナダのRADARSAT衛星と欧州のERS衛星がある。過去のデータとしては日本の宇宙開発事業団によるLバンドのJERS-1衛星がある。しかし、そのどれもが単偏波・単周波の合成開口レーダであった（唯一多周波、多偏波での観測はスペースシャトルで行われている）。これに対し、2004年度打ち上げを目指したALOS衛星には、日本のLバンド多偏波のPALSARが搭載される。

また、東西冷戦構造崩壊後の1994年、軍事技術の民生転用の一環として米国政府が偵察衛星技術の商業利用を許可して以来、開発が進められてきた商業用高分解能衛星は、IKONOS衛星が1999年9月に、またQuickBird衛星が2001年10月に打ち上げられ、地上分解能1mといったこれまでになく解像度で宇宙からの観測が行われるようになった。これにより衛星リモートセンシングによる森林観測は、それまでの林分レベルでの間接推定から、単木レベルでの直接観測の時代を迎えることになった。その結果、森林火災によって被害を受けた森林の状況を、視覚的に正確に捉えることが可能となった²¹⁾。

商業用高分解能衛星の特徴としては、地上分解能はもちろんのこと、その観測センサの感度の高さが挙げられる。これまでの光学センサにおいては地表面からの光の反射を8ビット、すなわち256階調で観測していたが、商業用高分解能衛星においては、11ビット、すなわち2048階調で観測している。そのため、より鮮明な画像が再現できるだけでなく、これまで判読できなかった山や雲の陰影部や、ヘイズ（薄い霞）の覆った部分についても、画像強調処理を施すことによって、可視化することができる。

このように単木レベルでの観測が可能で、林分の詳細な構造の把握に期待のかかる商業用高分解能衛星であるが、現在のところ、打ち上げられてからの期間が短く、また、その観測幅が11kmで、これまでの高分解能衛星と比較して（Landsat衛星：180km、SPOT衛星：60km）狭いことにより、同一地域でのデータの蓄積が十分でない。そのため、熱帯地域、とりわけ森林火災への適用の事例は報告されていない。しかしながら、今後何機もの1m地上分解能の高分解能衛星の打ち上げが予定されていることから、熱帯地域への応用の可能性は広がると考えられる。そのため、この解像度レベルでの、林分構造の抽出手法を早急に確立することが必要である。

2. 研究目的

本研究は、森林火災の全体的な影響について、これまでの研究事例をレビューすると共に、既存の衛星データによる影響地域の把握とその回復過程を捉える手法を整理し、現時点での森林生態系や生物多様性研究推進のための基盤的情報を整備・提供することを目的とする。また先駆的リモートセンシング手法の開発、および、それらの手法の森林火災地域での利用についての検討を行い、森林火災の生態系・生物多様性への影響評価と回復過程の評価を行う。さらに、森林火災の影響の可視化、マップ化を図り、地上観測を、高分解能衛星データを介して広域観測衛星デ

一タにスケールアップするための手法を開発することを目的とする。

まず、世界各地で発生している森林火災についての、既存の研究成果をレビューし、何が判明しており、何が不明であるかを明らかにする。特に、火災の影響把握・火災からの回復促進のために、重要な項目を明らかにする。これらを本研究計画・実施手法に反映させる。

次に、高分解能衛星データを用いて、研究対象地域における森林火災発生前の、土地被覆状況を捉える。ここで得られた天然林の被災の程度を抽出する手法を開発し、被災状況の可視化を図る。また、地上分解能1mの商業用高分解能衛星データを用いて、対象地域の森林が火災によって、どのように分断化されたかを抽出し、森林のパッチ構造を表すGISデータを作成する。併せて、それぞれのパッチにおける林冠構造を捉える手法を開発する。

次に、現在入手可能な衛星搭載合成開口レーダ(SAR)による森林火災エリアの同定の可能性を検討すると共に、そのために必要な観測パラメータを特定する。パラメータの特定には、通信総合研究所と宇宙開発事業団が共同で開発した航空機搭載多機能合成開口レーダ (Pi-SAR) のデータを利用する³⁰⁾。航空機SARでは衛星SARと異なり、観測方向、観測入射角が自由に設定可能である上に、異なる観測パラメータで同じ日に観測可能であり最適観測パラメータを決定するのに便利である。さらに、衛星ではまだ実現されていない多周波、多偏波データが取得可能であり、干渉SARによる標高測定も可能である。これらの多機能の上に、1.5mという高分解能を実現しており、今までのマイクロ波センサでは分類できなかった詳細な識別が可能である。これをもとに、2002年打ち上げ（現在2004年に延期）予定のALOS衛星に搭載されるPALSARによる森林火災観測時の最適パラメータについての提言をまとめる。

最後に、広域を高頻度で観測可能なSPOT衛星VEGETATIONデータを用いて森林火災の被害地を把握し、その植生の回復過程をモニタリングする手法を開発する。

3. 森林火災に関する既存の研究事例の整理

(1) 研究方法

平成9年度緊急調査時より洗い出しを続けた既存文献について、インドネシアをはじめ、主に東南アジアにおける森林火災の状況、森林構造・生物多様性に与える影響、それらの回復過程についての文献・情報を収集し、これらの文献・情報から得られた知見を整理した。

(2) 結果・考察

① 森林火災の発生状況についての既存の知見

森林火災は長い地球の歴史の中で生じてきたものであり、植生の遷移を進め、また生態系を安定に保つための自然プロセスとされている。しかし、火の不適切な管理や利用は環境や多大な影響を与える。

森林火災は、世界各地で見られ、シベリアからインドネシアにかけての地域、アマゾン、アフリカ、オーストラリア、カナダ、メキシコ、アメリカなどで被害が拡大している³⁴⁾。ヨーロッパ、北アメリカについては年間火災被害面積が推定されている⁷¹⁾が、森林火災に関する世界的な統計データは残念ながら存在していない。しかし、Andreae et al.の燃焼バイオマス量の推定によると、乾重量でサバンナにおいて年間3,690 Tg (Tg;テラグラム、1テラグラム=106メートルトン)、農耕地で2,020 Tg、熱帯林で1,260 Tg、温帯・寒帯林で280 Tg が焼失しているとされている¹⁾。また、

Goldammerは、温帯・寒帯林は年間1,000-1,500万haが、熱帯雨林は2,000-4,000万haが農耕地からの延焼や開拓によって焼失していると推定している¹⁹⁾。

熱帯雨林はリターの分解速度が速いことや湿潤な環境を保っていることなどから、森林火災の影響を受けることはほとんどないと思われてきた^{77),18),6),69)}。しかし近年では熱帯雨林の火災が増加しており、インドネシアやアマゾンにおいて大規模な森林火災が報告されている。ブラジルでは、Setzer and Pereiraの衛星画像解析により、1987年の1年だけで、アマゾンの $2.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ が焼失したと言われている⁵⁵⁾。

インドネシアでは、1982-83年の大規模火災で東カリマンタンだけで3.5百万haが焼失したとされ、その内わけは、低地熱帯雨林が80万ha、湿地性林が55万ha、択伐林が1.2百万ha、移動耕作地75万ha³⁷⁾と推定されている。(Lennertz and Panzerも被害の推定を行っており、一次林が80万ha、択伐林が1.4百万ha、二次林が75万ha、泥炭湿地林が55万haとの試算を出している³³⁾。) その後も1987、1991、1994、1997-98年と断続的に大規模な森林火災が生じている^{16),61)}。特に1997-98年に生じた森林火災の被害は大きく、東カリマンタンでは約54万haが焼失したと報告されている^{39),61)}。火災によって被害をうけた土地利用の内訳は、天然林(5.1%)、二次林(31.3%)、低木林(25%)、植林地(5.9%)、農地(11.5%)、草原(16.4%)、湿地(4.8%)と報告されている³¹⁾。

ボルネオ島では古代(1万年から7千年前にかけて)にも森林火災があったことが、土壌中の石炭層からわかっており、熱帯雨林の森林火災がエルニーニョによる乾燥に伴い生じていたことがわかってきているが¹⁸⁾、人為の及ぶ範囲が広がっていることによって森林火災の発生頻度は近年増加している^{77),22),69)}。

② 森林火災の発生原因に関する既存の知見

熱帯雨林における森林火災は、火災自体を引き起こすきっかけとなった直接的原因と森林火災を拡大させた間接的原因とにより、発生し影響を及ぼしている。この両者に分けて知見を整理した。

ア．直接的原因

(ア) 人為的原因

インドネシアを中心とする熱帯雨林火災の直接的な原因は、農園や産業造林地などの地拵えのための火入れ、住民による焼畑、森林内外での火の不始末、放火などの人為による火からの延焼であるとされている^{38),66),16),31),67),13)}。Tsuyuki and Yamaguchiは、1997-98年の火災による東カリマンタンのBukit Soeharto Education ForestとSungi Wain Protection Forestにおける森林の焼失を集落との距離から解析を行った。その結果、集落から1kmにおいて50%以上の森林が焼失していることが確認された⁷⁰⁾。

(イ) 自然原因

東カリマンタン州には広い範囲にわたって石炭層が地表近くに分布している。石炭は700万年前に生成された比較的新しいもので、揮発性成分を多く含むため、引火しやすい。これらの石炭層の中には、長年にわたって燃え続けているものがあり、石炭火と呼ばれている⁶⁶⁾。石炭火は一旦火がつくと、降雨によっても鎮火しない。そのため乾燥が長期化すると、石炭火が周辺の可燃物に広がり森林火災の原因となることがある^{18),66)}。このほかに、落雷、噴火も原因としてあげられる。

イ．森林火災拡大の間接的原因

(ア) 異常乾燥

インドネシアにおいて1982-83年、1997-98年にかけて生じた大規模森林火災の際も、エルニーニョによって100mm以下の月が3ヶ月以上続くという異常乾燥が記録されている^{66),39),79)}。エルニーニョが長引くと、乾燥によって落葉し、林内の可燃物が増加すると同時に、堆積した可燃物の乾燥も進む。これによって火災が広がりやすい環境が形成されることになる^{18),39)}。

インドネシアでは以前にも著しい乾燥が観測されていたが、100万haを越える大規模森林火災が発生したのは、82-83年と97-98年だけである。そのため、乾燥による林床の可燃物の増加は火災拡大を助長する働きはあっても、直接的原因とは言えない。82-83年、97-98年に見られるような大規模森林火災が生じるようになったのは、火元の分布域が拡大したためであるとの報告もある^{39),67)}。

一方、森林火災が近年頻繁に生じるようになった一つの理由として、エルニーニョの頻度・程度の近年の増大によって火災が拡大しやすい環境が設定されていることをあげている研究も見られる¹⁴⁾。

泥炭湿地は、長期の乾燥が続いた場合、それ自体が燃料となって火災拡大の原因になる。通常、泥炭湿地の土壌は水に覆われているが、1982-83年の大規模火災の際には、泥炭湿地内の有機堆積物層が1-2mにわたって乾燥・燃焼したという報告もある²³⁾。

(イ) 伐採

これまでの研究で天然林と択伐林とでは、択伐林の方が火災の影響を受けやすいことが報告されている^{37),54),77),72),16),17),68)}。択伐によって林床に可燃物が増大すること、林冠が疎になることで林床の乾燥が進みやすいことなどが、火災拡大を助長すると考えられている。

③ 森林火災の影響

森林火災の植生（林木）への影響に関する研究と、そこに生息・生育する生物への影響とにわけて知見を整理した。あわせて、基盤となる森林土壌への影響についての研究結果をまとめた。

ア．植生への影響

火災の植生への影響に関する研究は、主に一次林と二次林の被害の比較や火災直前の伐採の有無による被害の違いに関して成されている。

(ア) 一次林と二次林と影響の違い

1982-83年、1997-98年の火災の両方において、一次林と二次林の火災の影響が調査された。Riswan and Yusufは1976年に東カリマンタンLempakeにおける低地フタバガキ林の一次林(1.6ha)と35年生の二次林(0.8ha)にプロットを設置し、DBH>10cmの個体の位置を地図に示すと共に、ラベリングを行った⁵⁰⁾。これは82年の火災の影響を追跡調査することができた稀な例である。一次林の主要構成樹種はフタバガキ科の*Shorea polyandra*、*S. parvifolia*、*S. johorensis*、*Hopea rudiformis* などに加え、*Eusideroxylon zwageri*、*Baccaurea macrocarpa*、*Pentace laxiflora* などであった。また二次林の優占種はトウダイグサ科の*Macaranga gigantea*、*M. conifera*、*M. pruinosa*、*Nauclea orientalis*などであった。これらのプロットは1983年の火災で部分的に焼失している。火災後、DBH>10cmの木本樹種の毎木調査とその位置(新規更新木を含む)を再度計測し、個体数の減少程度の比較を行った。その結果、一次林では132個体/ha、二次林では197個体/haが死亡しており、火災によって個体数が大きく減少したことがわかった。また二次林の方がより火災の影響を大きく

受けていることを明らかにした。また、火災から6ヶ月で一次林では23%、二次林では35%が萌芽していることがわかった。萌芽しているものの多くがIron Wood (*Eusideroxylon zwageri*)であったため、この樹種については耐火性が強いのではないかと、との考察を行っている。

1997-98年の火災でも、二次林においてより多くの個体数の減少することが同様に観察された(藤間、1998)。一方、樹種の減少は一次林(フタバガキ林)で77%、二次林(オオバギ林)で57%の減少と、一次林の方が大きかった。個体の枯死は火災の鎮火以後も観察されている。1982-83年の火災においても、火災後5年の間にわたり、立木がしだいに枯死していく例が報告されている⁶⁸⁾。

近年の断続的な火災により、一度火災の被害をうけた地域が10数年で再び火災の影響をうけている。このように繰り返し火災の被害をうけることは森林全体を小型化させ、中・小径木が多くなり、ますます火災に弱い構造になっていくと考えられている。また、種構成も火災に強い樹種に転換し、種多様性が低下すると考えられている^{17),39),16)}。実際、1997-98年の火災の被害を受けた林分の種多様性が一次林と比べて著しく低い値を示したという報告もある⁶⁹⁾。

(イ) 択伐の有無による影響の違い

火災の数年前に択伐された林分と非択伐林(天然林)において、火災の影響が異なるという報告は数多く存在する^{37),77),17),40),39),16),68)}。

Woodsでは、1983年におけるサバの火災の影響を若木や大径木の樹冠面積の減少と死亡率によって把握している⁷⁷⁾。調査プロットは自然林、2年前に択伐された林分、6年前に択伐された林分に設けられ、それぞれ火災の影響を受けたところと受けなかったところに設置することで、乾燥のみによる被害と乾燥・火災による被害を区別できるようにした。その結果、乾燥による死亡率は12-28%、乾燥と火災の両方による死亡率は38-72%であり、乾燥と火災による死亡率は乾燥のみによる死亡率の2.5倍であった。乾燥と火災による死亡率は小さい木で高く、高木の方が低かった。小径木の方が大径木より火災の影響を受けやすいことはWirawan'sにおいても報告されている⁷⁶⁾。Wirawan'sはまた、乾燥のみによる被害は大径木の方が大きいとしている。残存する立木密度は、火災の影響をうけた択伐林で最も低く、自然林で最も高かった。Woodsは火災の林冠に与える影響も検討しており、林冠の縮小が択伐林において大きく、非択伐林において小さいことを明らかにしている⁷⁷⁾。

Toma et al.は、同様の研究を1997-98年の火災の影響を受けた東カリマンタンBukit Soeharto Education Forestにおいて行っている⁶⁸⁾。Woodsと異なる点は、死亡率、木の生存数に加え現存量を用いたことにある。火災後7ヶ月経過した11月に択伐区(6ha)と非択伐区(3ha)にプロットを設け、毎木調査を行い、現存量を相対成長関係によって推定した。その結果、非択伐区は死亡率、バイオマスの減少共に択伐区より小さく、木の生存数と現存量は共に択伐区より多いことが分かった。

これらの択伐された林分と択伐されなかった林分の被害の違いは、火災の程度の違いではなく、火災前の立木密度の違いや林分構造の違いによるものと考えられている^{39),68)}。択伐されなかった林分では大径木が密に生え、林床植生が少ない。そのため林床の可燃物が少なく、林冠も閉じて高湿度な環境になることから、火災被害は少ないと考えられる。一方、択伐林は択伐によって林冠が開き林床が乾燥しやすくなる上、生育層にある中・小径木が多い林分、下層植生が繁茂する林分、あるいはつる性植物が多い林分を形成し、可燃物が多く存在するため、火災の被害が大きくなると言われている。

(ウ) 水系、周辺の土地利用など

上記以外に森林への火災の影響と深く関係する要因として、水分保持能力があげられる。

Goldammer et al.は、1982-83年に被害を受けたMahakam basinの衛星データを解析した結果、水分保持能力の低い林分が火災の被害を最も受けていることを明らかにした¹⁷⁾。これらの林分は泥炭湿地林、ヒース林、石炭層に形成している森林、土壌の薄い立地に形成している森林などである。LeightonやMalingreau et al.も同様のことを明らかにしており^{32),37)}、Goldammer et al.は衛星データの解析でこの事実を再確認した。

また、Goldammer et al.は住宅、河川、道路に隣接している森林の被害が多いことも示し、火災と人間活動の関係の深さを改めて述べている¹⁷⁾。人間の生活形態や森林管理形態によっても森林火災の被害は異なるとされている。移動耕作を中心に営んでいる集落と漁業を中心に営んでいる集落とでは、後者の方が森林の焼失面積が少ないことがわかっている。

また土地の所有者がはっきりしている森林としていない森林では、はっきりしている森林の方が火災による被害が少ないことが指摘されている。同様に適切な森林管理が実行されているか、否かでも火災の影響は異なる。Tsuyuki and Yamaguchiは、適切な森林管理が行われていたSungai Wain Protection Forestと適切な管理が行われていなかったBukit Soeharto Education Forest (BSEF)では、後者の方の被害が大きかったことを報告している⁷⁰⁾。

イ. 動物相・菌類相への影響

森林火災の影響は地表性の動物に特に影響が大きいと考えられる。また、直接の個体の焼失以外に乾燥や火災で葉が多量に落葉し、果実や種子生産量が皆無になるため、食葉性・食果実性の動物類の数の減少が考えられる。しかし、火災の生物相への影響に関する研究事例は非常に少ないのが現状である。これまで、哺乳類、鳥類、昆虫、菌類に関する研究がそれぞれ数例認められているに留まっている。以下では、これらの具体的な研究事例を紹介する

(7) 哺乳類の行動への影響

熱帯雨林における代表的な哺乳類としてテナガザルがいる。Okaは、Bukit Soeharto Education Forestにおける97-98年の森林火災のテナガザルへの影響を個体数やなわばりの分布状況から把握している。その結果、個体数の減少とともに、1家族が3グループに分断されていることが観察された。また火災前には明確に分かれていたなわばりが、火災後には2、3倍に拡大し、それらのなわばりに重複する地域も見られた⁴¹⁾。

(1) 鳥類への影響

哺乳類と同様に火災による個体数の減少や食物である果実の減少によるなわばりの変化の報告がみられる²⁸⁾。サイチョウ(Red-knobbed Hornbill、*Aceros cassidix*)の営巣と産卵への影響も最近Cahill and Walkerによって報告されている⁵⁾。それによると火災の被害を受けた1997年は、例年(80%)に比べて孵化と巣立ちを無事に迎えた巣の率は低くなっていた(62%)。また、巣立ちを迎えられた雛の数は例年より47%の減少となった。

(ウ) 昆虫類への影響

Bukit Soeharto Education Forestにおける森林火災前後の甲虫類の捕獲個体数の変化が楨原らによって研究されている^{35),36)}。対象昆虫は樹皮下、樹上生活をするゴミムシ科、乾燥材加害のナガシクイムシ科、多様な状態の木を食害するカミキリムシ科、比較的新鮮な樹皮付き材に穿孔するナガキクイムシ科、クイムシ科など生活型の異なる森林甲虫類で、マレーズトラップを用いて捕獲している。森林火災後は種数・個体数ともに減少がみられ、半年して火災前の状態までに両

者が回復していたのはナガシクイムシ科のみであった。続いて回復が速かったのはカミキリムシ科であった。このカミキリムシ科は高木林上部の個体数・種数が火災前より増加を示していたことから、これは火災時に林床から高木に避難し生活空間として利用したためと考えられている。

(I) 菌根菌への影響

菌根菌への影響については、Rashid et al.の研究がある⁴⁹⁾。この研究はイスラマバート近くの Margalla Hillsにおける森林火災(1994年7月)の菌根菌の数と生存率への影響と植生回復における菌根菌の役割を検討したものである。土壌サンプルを火災区とコントロール区から採集し、比較した結果、火災区もコントロール区も孢子の数は変わらなかったが、そのうち生存しているものは火災区で少なかった。火災区に多く見られた *Dodonaea viscosa* と *Aristida adscensionis* の根には菌根菌がついており、根の長さが徐々に伸びており、植生の根の回復に貢献していると考えられた。

ウ. 土壌への影響

Tagawa et al.によれば、水の浸透率は非火災区が火災区より高い値を示しており、火災によって土壌の有機物が燃焼し、A0層、A層が薄くなっていることを示していた。また、有機物量が少ないことによって土壌の団粒構造が発達せず、熱帯雨林の回復過程にも大きな影響を与える可能性があることを示唆している。侵食速度も火災区の方が2-3倍速く、これも林床の植生や有機物が火災によって失われたためと考えられた⁶⁵⁾。

土壌の理化学性への影響とは別に、森林火災による埋土種子が死亡する^{4),73)}、攪乱後に萌芽能力を低下させる²⁵⁾、有機物の燃焼により栄養塩が減少し、土壌肥沃度が低下する⁴⁸⁾という影響が指摘されている。Singhは、土壌中の栄養塩について、火災の程度によってはリンや硫黄、その他のイオンが失われること示している⁵⁹⁾。一方、火災によって土壌有機物内の窒素がアンモニウムに変換され、植物や硝化細菌に利用可能となり、その結果植物の成長が促進される^{7),9)}との報告もある。

④ 森林火災の影響を受けた自然林の回復

自然林の森林火災からの回復過程は、火災の規模、地形条件によって異なる。それらについての研究と、特にフタバガキ科の回復に関する研究を整理した。

ア. 火災の被害程度による違い

森林火災後の植生回復は、その火災の被害程度によって異なるとされている。フタバガキ科 (Dipterocarpaceae) が 優占する Bukit Soeharto Education Forest では、1982-83年の森林火災の被害を受けた。その回復過程を被害程度によって比較するため、軽い被害を受けた地域 (Light Disturbed Forest: LDF)、中程度の被害を受けた地域 (中・下層植生が被害を受けた; Moderate Disturbed Forest: MDF)、相当の被害を受けた地域 (Heavily Disturbed Forest: HDF) にプロットが設置され、1988年に最初の調査を行っている^{42),45),29)}。その結果、LDFではhaあたり320本 (DBH>=10cm) あり、樹種は32科130種、そのうちフタバガキ科の樹種は13種37本であった。これを胸高断面積でみると全体 25.5m²の43%をしめており、フタバガキ科が優占していると言えた。樹高5-10mの若齢木が少なく、火災で焼失したものと思われた。MDF、HDFのプロットではLDFと比べ、種数が著しく少ない傾向を示した。MDFでは高木層の半数は一次林樹種であったが、残りの半分はトウダイグサ科の *Macaranga gigantea*、*M. triloba* やマルバオオバギ (*Homalanthus Populneus*)、ウドノキ (*Leea indica*)、

カンコノキ(*Glochidion* sp.)をはじめとする先駆性樹種に交替していた。先駆性樹種は林冠の大きくかけた所に進出しているが、面的な優占はまだ小さいと言えた。また林床には一次林樹種の実生が多く、先駆性樹種は少ないことから、一旦破壊された中-下層部に先駆性樹種が成立しても、被陰される環境のもとでは、先駆性樹種の更新は行われず、残存した一次林高木種から供給された実生が生育することがわかった。HDFでは201本の高木個体数のうち89%が先駆性樹種であり、特にトウダイグサ科の*Macaranga gigantea*が優占した林分に変化していた。林相も単一化し、林床には全くフタバガキ科や一次林樹種の実生がない観察されなかった。この地域ではその後も継続調査が行われており、Ghozali and Tomaは、97年の時点でLDFは現存量、基底断面積ともにフタバガキ科が依然優占していることをしめしている¹³⁾。その一方HDFは単位面積あたりの木本樹種数がLDFに比べて少ないが、立木密度はLDFを大きく上回っていること、基底断面積は91年まで増加傾向を示したがその後LDFより遙かに下回る値で頭打ちになったことなどを示している。先駆性樹種は成長は非常に速いが、火災前のフタバガキ科の現存量や基底面積に達するには時間がかかると言える。

本地域は97-98年にも再び被害を受けており、LDFで43%、HDFで91%の死亡率を示し、大きな被害をうけたあとに形成された森林が火災の被害を受けやすいことを示唆した。このように火災による被害が短期間に繰り返されると、フタバガキ科の森林に比べて、立木密度が高く、現存量が小さい先駆性樹種が優占する林分となると考えられている。熱帯雨林で優占するフタバガキ科の樹種は樹皮が薄く、含有樹脂量が多い、萌芽能力がないなどの理由で火災の影響を受けやすく、複数回の火災の影響下では回復が困難であるといえる。

同様に別の場所で火災被害の軽い地点の調査を行ったLeightonは、火災の半年後にはフタバガキ科の実生が観察されるようになったことを報告している³²⁾。またSuyonoは、1984年の残っていたフタバガキ科が花をつけたあとに実生が観察されるようになったことを示している⁶³⁾。木本樹種と基底面積から回復状況を把握したBoer et al.は、火災から4、5年でDBH10cm以上の木本樹種の数と基底断面積が共に10%増加して、火災前の半分まで回復していることを示している³⁾。

イ. その他の条件による回復の違い

森林火災後の植生回復過程は、被害程度以外にも様々な要因によって異なると考えられている。田川は、地形、土壤水分、火災前の伐採の有無、伐採した場合でも林床に伐採木が残存していたか、などのわずかな違いでその後形成される二次林が異なるとしている。田川の報告によれば、東カリマンタンのクタイ国立公園において、1982年の火災の3年後に植物調査をおこなったところ、以下の回復パターンを確認した⁶⁴⁾。

- ・完全に表土を削った林道では何も生えないか、ノボタン(*Melastoma malabathricum*)やカギカズラ(*Uncaria attenuata*)の低木林、
- ・完全に焼失した独立峰ではマルバオオバギ(*Homalanthus populneus*)林、
- ・林道沿いで伐採後放置してあった樹木が燃えた部分にはタマハナ(*Anthocephalus chinensis*)林、
- ・伐採後樹木片がなかった林道沿いにはトベラモドキ(*Tristania whittiana*)林、
- ・乾燥した尾根部分で完全に焼失した所にはカンコノキ(*Glochidion capitatum*)林、
- ・土壤水分の多い焼失部にはヒロハオオバギ(*Macaranga gigantea*)林、
- ・時々冠水する低地ではハズ(*Croton argyrateus*)林、
- ・斜面にはケミオオバギ(*Macaranga trichocarpa*)林、

・礫の多い斜面にはハッポウジュ(*Duabanga moluccana*)林

これに不完全に焼けた森林であるラワン(*Shorea leprosula*)の低木林、ボルネオテツボク(*Eusideroxylon zwageri*)林を入れると、その立地条件などによって実に多様な森林型に変化することがわかった。

更に、1997-98年の火災の被害を受け、適切な管理が成されていなかったBukit Soeharto Education Forestと管理されていたSungi Wain Protection Forestでは、後者の方が前者より6.1倍の植生回復がみられたとの報告も最近紹介されている⁷⁰⁾。

ウ．一次林性樹種の回復の遅い理由

火災後、フタバガキ科などの一次林性樹種が回復しにくいのは、萌芽樹種が少ないこと³⁹⁾(萌芽が観察された樹種は*Pternandra* sp.、*Eurycoma longifolia*、*Nauclea subdita*、*Crypteronia paniculata*、*Urophyllum* sp.、*Aporosa* sp.などであった)、埋土種子を形成しないこと、種子の風散布の種が少なく重力散布の樹種が多いことなどがあげられる。重力散布植物は暗い林床でも発芽できるように非常に大きい果実と種を付ける。火災が生じたときにこれらの種子が林床におちていなければ、残存木の結実を待つ以外になく、回復に時間がかかるとされている^{66),65)}。Kartawinata et al.は、実験的に0.5haの一次林を焼き、その回復過程を観察した結果、6ヶ月経過した時点で先駆性樹種が多く見られた一方、萌芽している樹種は全体の29%と比較的高い値を示したことを報告している²⁴⁾。しかし、このような報告は例外的であり、多くは火災によって一次林性樹種の実生の種数、密度の減少と草本・シダ植物の増加、先駆性樹種の増加をあげている^{40),77)}。

エ．フタバガキ林を形成するまでにかかる期間

植生の回復過程の研究により、先駆性樹種が定着し、森林の様相を呈するようになるまでにはそれほど時間はかからないことが分かっている。しかし、先駆性樹種から極相樹種への遷移が進み、フタバガキ科樹木が優占する林分になるまでには長い時間がかかると予想される。藤間は、Bukit Soeharto Education Forestの継続調査のうち、火災の被害が軽かった地域のデータから、胸高直径10cmのフタバガキ科樹木が100cmまでに成長するには最短でも80年、平均で130年かかると試算している。実生の定着から胸高直径10cmの若木になるまでの時間を考慮すれば、100年から200年かかるとしている⁶⁷⁾。

Tagawa et al.は、土壌調査によって200年前に形成された石炭層を発見した⁶⁵⁾。これは、そのころに大規模な森林火災が生じ、その後現在みられる熱帯雨林が形成されたことを示す。この200年前という予測が正しければ、熱帯雨林の再生には約200年は必要であるということになる。

⑤ 本研究での取り組む課題の整理

以上から、本研究での前提と取り組むべき課題を整理した。

ア．森林火災の発生状況

- ・基本的には繰り返されてきた自然現象。
- ・拡大の原因に人為、地球環境の変化が影響している。

イ．森林火災の発生原因

- ・人為的なもの(土地利用転換に伴う焼き払いなど)が原因としては大きい。
- ・火災の拡大には、異常乾燥(地球環境変化)・伐採等(人為的攪乱)の影響がある。

ウ．森林火災の植生への影響

- ・二次林、施業を行った林分で影響が大きい。林床等の可燃物が多いことによる。
- ・森林管理の効果は大きい。
- ・種構成は単純化の方向へ向かう。特にフタバガキ科は脆弱な傾向がみられる。
- ・林冠構成樹種については、ある程度の研究の蓄積があるが、植生を構成する重要な要素である低木・草本類、コケ類・地衣類などに関する研究は殆どない。多様性への影響の点からは、十分な知見の集積が必要。

エ. 森林火災の生息・生育する生物相への影響

- ・脊椎動物では、爬虫類・両生類に関する研究が見られない。（淡水魚類は直接火災による影響は少ないものと考えられるが、集水域の環境の変化という視点から、考慮が必要。）
- ・哺乳類・鳥類とも特定種のbiologyの変化に焦点が当てられた研究が多く、多様性の視点からの知見の蓄積は不十分。
- ・特に陸生貝類は、移動能力が小さく、火災の生物多様性に対する影響をはかる指標として優れていると考えられるが、研究事例は少ない。
- ・昆虫類は、食材性の甲虫類について研究が進んでいる。しかし、その他の分類群については情報が少ない。
- ・菌類はその分布拡大手段が孢子によるため、回復が早いことが確認されている。
- ・土壌への影響は、理化学性の変化と埋土種子の焼亡による等の影響が研究されている。しかし、土壌微生物の動態への影響は、研究事例が少ない。

オ. 森林火災の影響を受けた自然林の回復

- ・火災の入り方と土地条件によって、様々な回復パターンが認められている。広域における、それら条件の把握は、回復を予想する上で重要な条件となる。このためには、衛星画像による広域的な把握は、地表面でのデータとの十分な連携を前提に、有効であると考えられる。
- ・微細な地形などの条件に応じた個体レベルの動態の追跡は十分とはいえない。樹種ごと、個体ごとの、個別の土地条件に応じた動態を追跡する必要がある。

カ. 総括

既存研究結果をレビューした結果、本研究で新たに焦点を当てるべき課題は以下の点であると考えた。

- ・菌類、蘚苔類などへの森林火災の影響の把握：水分条件などの反映として、樹木などより脆弱なため、指標として有効、過去に研究が殆ど行われていない。
- ・動物種組成への森林火災の影響の把握：多様性の観点から、生息地の多様性の指標として重要
- ・土壌細菌類の多様性への森林火災の影響の把握：森林の基盤としての土壌の機能が、火災によりどれだけ影響を受けているか、回復の過程はどのようなものかを把握することは、生態系回復把握のポイントとなる。
- ・衛星画像による火災の履歴の把握：衛星画像による情報と地上の情報の総合化により、より広範囲についての評価が可能。

⑥ シンポジウムの開催

研究成果の発信と、関連する分野の研究者・行政担当者と研究成果の総合的な整理・今後の利用・発展を協議するため、シンポジウムを実施した。会議は2003年1月22日より24日の3日間、ボゴール近郊のブンチャクにて開催された。日本側から、研究参加機関メンバー、インドネシア側から、インドネシア科学院（LIPI）議長を始め、LIPI研究者、林業省森林火災総局長、環境省、国際林業研究センター（CIFOR）など多くの参加が得られ、研究成果の交流と今後の展開、活用について議論がなされた。

シンポジウムでは、以下の6セッションにわけ、討論を行った。

セッション1：森林火災の植物相と生態系に与える影響：林木動態、草本相、蘚苔類、地衣類、泥炭地植生への影響

セッション2：森林火災の動物相に与える影響：小型哺乳類相、甲虫相への影響

セッション3：森林火災の微生物に対する影響：腐朽菌類、菌根菌類、バクテリア多様性への影響

セッション4：生物多様性研究とその応用の必要性：日本の多様性保全への取り組み、DNAバンクの設立、アジアゾウ・酵母の遺伝的多様性

セッション5：リモートセンシングによる森林火災影響の評価：高解像度衛星画像、開口合成レーダー画像などによる、火災影響の把握と被害の評価

セッション6：森林火災の社会経済的側面と管理：林業会社における森林火災対策、村落参加型森林保護活動、大気質への影響、一般的関心の向上のための活動

シンポジウムでの議論の結果、以下の点が成果としてあげられるとともに、今後重点的に研究を進めるべきであると結論された。

- ・菌類、哺乳類の回復は早く、各分類群の種子・孢子分散を含めた「移動能力」、萌芽能力の代償が回復しつつある生態系の様態を決めている。
- ・これまで研究の蓄積が少ない分類群では、新種・新分布が多く記録され、基礎的な多様性情報の蓄積が今後も求められている。
- ・リモートセンシングによる基礎的情報（被覆、NDVIなど）と地上の情報との総合化により、ランドスケープレベルの分析が進んだ。
- ・研究結果の実際の火災防止場面への活用、回復のための活用が重要な課題。

4. 高分解能衛星データを用いた研究対象地における森林火災の影響評価

(1) 研究方法

1972年の1号機の打ち上げ以来、Landsat衛星シリーズは現在の7号機に至るまで継続して、地球観測を行っている。そのため環境モニタリングにLandsat衛星データがよく用いられている。本研究においても、火災の前後において、同一スペックで対象地を観測していることから、このLandsat衛星データを用いた森林火災の影響を捉える評価手法を開発する。また併せて、1m分解能を有するIKONOS衛星データ及びQuickBird衛星データを用いて、林分構造を抽出する手法を開発するとともに、火災により分断化された森林のパッチ構造を抽出する。

① 研究対象地及び使用したデータ

本研究の対象地は、東カリマンタン州バリックパパンの北約25kmに位置するブキットバンキ

ライで、東西約 5km、南北 3km の範囲で天然林が、またその周辺にゴムの造林地が広がっている。この地域は、1998 年 2 月に東側の農地と接している箇所から火が入り、天然林内を東から西へと数回にわたって延焼している。

本研究において使用した衛星データはLandsat衛星TM及びETM+データである（表－1）。このうち1998年12月のデータは雲のためデジタル解析には供しないが、火災の影響の確認のために用いた。それぞれのデータは、現地調査で取得したGCPを用いて、UTM座標（Zone 50 (south), datum: Indonesian 1974）に変換した。また、森林のパッチ構造と火災による被災程度を判定するために、2002年6月24日に取得されたIKONOS衛星panchromaticデータ、及び、2002年8月26日に取得されたQuickBird衛星panchromatic/multi spectralデータを用いた。これらのデータについても、現地調査で取得したGCPを用いてUTM座標に変換した。

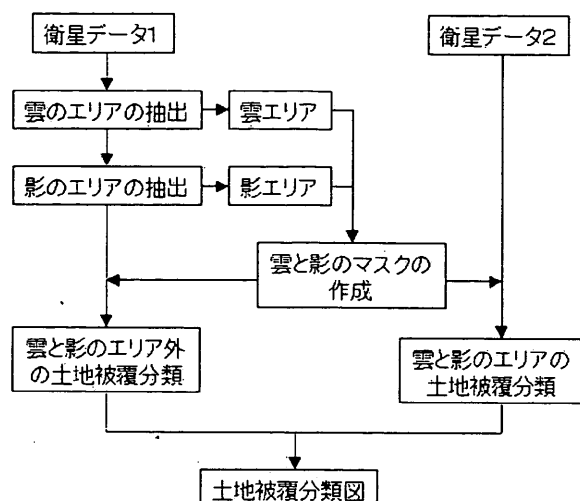
また、GPSで連続測位を行うことにより、対象地に敷設されている道路および作業道について、ベクタ型のGISデータを作成した。さらに、サブテーマ2、3と共通プロットであるHDプロット、LDプロット、Kプロットの測位を行い、これらについてもベクタ型GISデータとして、衛星データとの重ね合わせが出来るようにした。

② 火災前の土地被覆分類

まず、対象とする天然林を取り巻く環境を把握するため、火災前の衛星データを用いて、土地被覆分類を行った。研究対象地域においては、人為的要因による火が森林域に入り込み、大規模な森林火災へとつながっている。そこで対象地域の天然林の周りの土地被覆状態を把握するため、1998年1月および2月のデータを用いて土地被覆分類を行った。それぞれのデータはエルニーニョによる乾燥化のためほぼ雲のないデータではあるが、熱帯降雨林地帯であるため、完全に雲のないデータを取得するのは難しい。そこで、1998年1月のデータを用いて分類を行い、雲および雲の陰の部分については、マスク処理により解析から除外し、このマスク処理した部分については、1998年2月のデータを用いて補完する処理を行った。K-means法によりクラスタ分類を行い、グラントゥルースの結果を用いて分類クラスを割り当てた（図－1）。分類クラスとしては、グラントゥルースで得た知見から、天然林(natural forest)、二次林(secondary forest)、マングローブ林(mangrove forest)、草地（まばらに立木が存在）(grass with some trees)、まばらな植生(some vegetation)、人間の活動エリア(human activity area)、水域(water)の7つのクラスを用いた。

表－1．使用した高分解能衛星データ

衛星	号	センサ	取得年月日	パス－ロウ	状態
Landsat	5	TM	1998. 1.26	116-61	ヘイズの影響が多少あり・鱗雲あり
Landsat	5	TM	1998. 2.11	116-61	ヘイズの影響多少あり
Landsat	5	TM	1998.12.12	116-61	雲・ヘイズのためデジタル処理は不可能
Landsat	7	ETM+	2001. 7. 5	116-61	部分的に鱗雲・その他の状態はよい



図－１．雲の影響を除去した土地被覆分類

③ 商業用高分解能衛星による林冠構造の推定とパッチ構造の抽出

ア．DN値のプロファイルを用いた林冠構造の推定

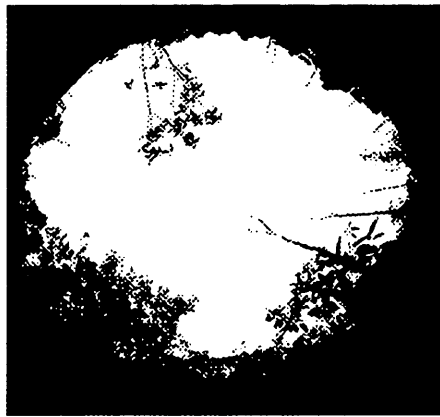
針葉樹天然林や人工林において、local maximum filterを用いた立木の梢端を抽出する手法は、林分因子やバイオマスの推定に有効である。しかしながら熱帯降雨林においては、立木の梢端が1つでない場合が多い。従って、熱帯降雨林にlocal maximum filterを適用しても林分因子を抽出することができない。そこで本研究では、林分を構成する立木の樹冠に着目することにする。樹冠のDN値に着目した場合、その幾何学的構造から、DN値は梢端付近で最大値を取り、その周辺部に向けて漸次小さな値を取る。そこで、林分を横断するラインを想定し、そのラインに沿ったDN値のプロファイルを取った場合、プロファイルが大きな樹冠の中心付近を横断する場合、プロファイルに現れる波長は長くなり、小さな樹冠及び、大きな樹冠であっても端の部分を横断する場合、プロファイルに現れる波長は短くなる。プロファイルに現れる波は注目する林分の上層樹冠の状態を表すことになる。仮想ラインは必ずしも樹冠の中心を横断しないが、林分に大きな樹冠が多く含まれる場合、プロファイルは長い波長と短い波長の組み合わせとなる。一方、小さな樹冠しかみられない林分では、短い波長の波が連続して現れることになる。このプロファイルにおいて振幅は、太陽高度、斜面方位や傾斜角といった要因により変化するため着目しない。プロファイルに出現する波長により、林冠構造を推定する。本研究では、全サブテーマを通して共通の固定プロットHD(Heavily damaged) plot、LD(Lightly damaged) plot、K(Control) plotを設定している。この共通プロットについて、DN値プロファイル法による径級構造の推定を行った。

イ．被災程度の違いによるパッチ構造の抽出

1mの地上分解能を有する高分解能衛星データから画像を作成すると、ほぼ、航空写真に近い画像が得られる。とりわけ、発展途上国のように情報の少ない、あるいは入手しにくい地域においては、非常に重要な情報源となりうる。そこで、IKONOS衛星データ及びQuickBird衛星データを用いて、被災の程度に応じて、火災前に天然林であった領域について、分断化された森林のパッチ構造を判読で抽出した。抽出されたパッチはベクタ型のGISデータに変換した。

④ 現地調査

2002年2月17～25日及び8月27日～9月8日まで、現地において森林火災後の森林の回復過程を明らかにするための調査を行った。分断化された森林のパッチ構造をもとにサンプルプロットの配置を計画し、63カ所のサンプルプロットで調査を行った。現地調査に際しては、GPSをGISに接続してナビゲーションを行いながら目標地点に到達した。調査項目としては、葉面積指数（LAI）を算出するために全天写真の撮影を行い、林分構造を把握するためにビッターリッヒ法による断面積合計の推定、プロット（半径10mの円形プロット）での枯死木のカウントおよび最大樹高の測定を行った。LAIの算出においては、Detla-T Devices社のソフトウェアHemiView 2.1を用いた（図－2）。また、GPS測位を行いプロットの位置を確定した。



図－2．Tr03における2値化した全天写真

⑤ 火災後の森林回復過程の解析

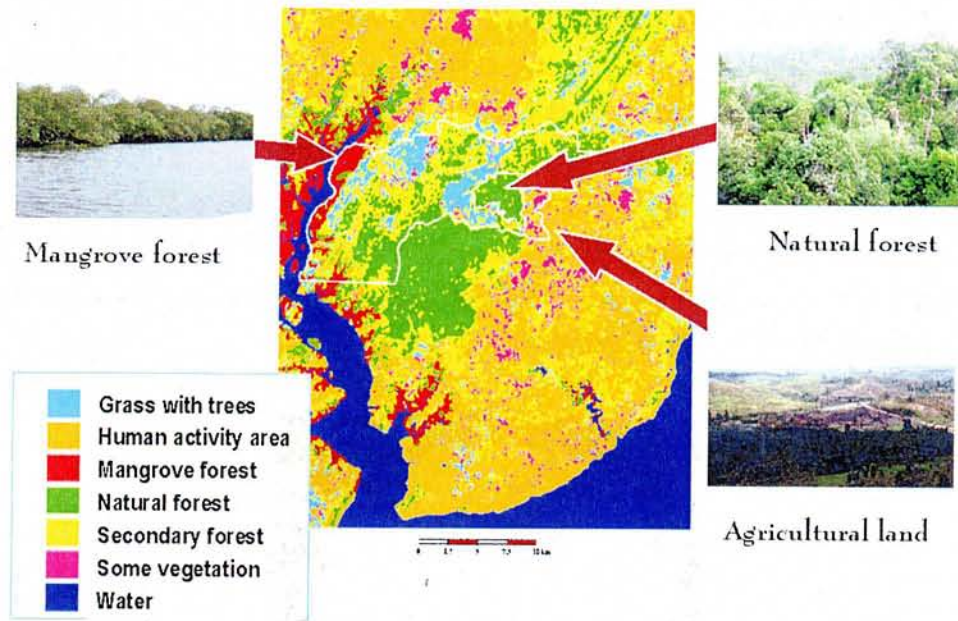
火災後の森林植生の回復を評価するため、火災前に天然林であった領域について、火災後のLandsat衛星ETM+データから正規化植生指数（NDVI）を算出した。この値と、現地調査結果及び算出したLAIの値との関係を分析し、その結果から、領域全体の評価を行った。

(2) 結果・考察

① 火災前の土地被覆分類

火災前の土地被覆分類結果を図－3に示す。この結果から対象地域の東側に広く人間の活動エリアが存在することが明らかになった。この地域では耕作のために頻繁に火入れが行われているため、森林への火の進入はここからであると考えられる。実際に1998年2月のデータでは天然林の東端が被災していることと現地でのヒアリングにより、森林火災が東端から始まったことが確認された。

熱帯域、とりわけ熱帯降雨林が生育するような地域においては、1年を通して雲量が多く光学センサによるデータの取得が難しい。しかしながら、例えば雲の多いデータであってデジタル解析に不向きなデータであっても、地上からだけではわからない多くの情報を含んでいる。リモートセンシングの実用的な利用が、このような地域における研究の発展に寄与することを期待する。



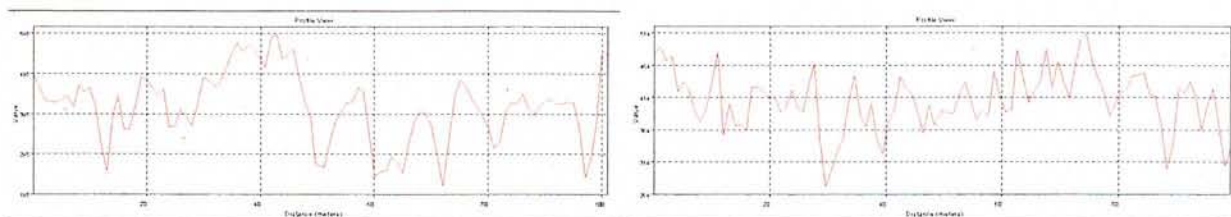
図－３．大規模森林火災前の研究対象地周辺の土地被覆分類の結果

② 商業用高分解能衛星による林冠構造の推定とパッチ構造の抽出

共通の固定プロットにおける、仮想ラインに沿ったDN値のプロファイルによる解析では、大径級の多い天然林のパッチ (K plot) では長い波長の波が現れ、被災した林のパッチ (HD plot) では短い波長が連続して出現した (図－４)。しかしながら、対象地東部の完全に草地化したパッチにおいては、植生表面が滑らかで、全体が一様であり、顕著な波形が現れなかった。そこで、抽出する因子がどのような年齢級で抽出可能かどうかを整理しておく必要がある。

商業用高分解能衛星による森林観測は、単木レベルでの判別が可能になった一方で、ヘイズや雲の陰、山の陰の影響に加えて、隣接木の陰の影響も受けるため、樹木からの反射スペクトルは同一樹種であっても大きな分散を持つことになり、これまでのピクセル単位での分類では、土地被覆を把握するのが困難である。最近では、木目やデータの均質性といった、従来、航空写真の判読に用いられていた因子により領域を分割する画像解析ソフトが開発されている。これにより森林のパッチ構造の抽出が可能である。本研究で提示した手法を用いて、このようにして抽出された各パッチの質的な評価を行うことにより、森林の現況を把握することが可能になると考える。

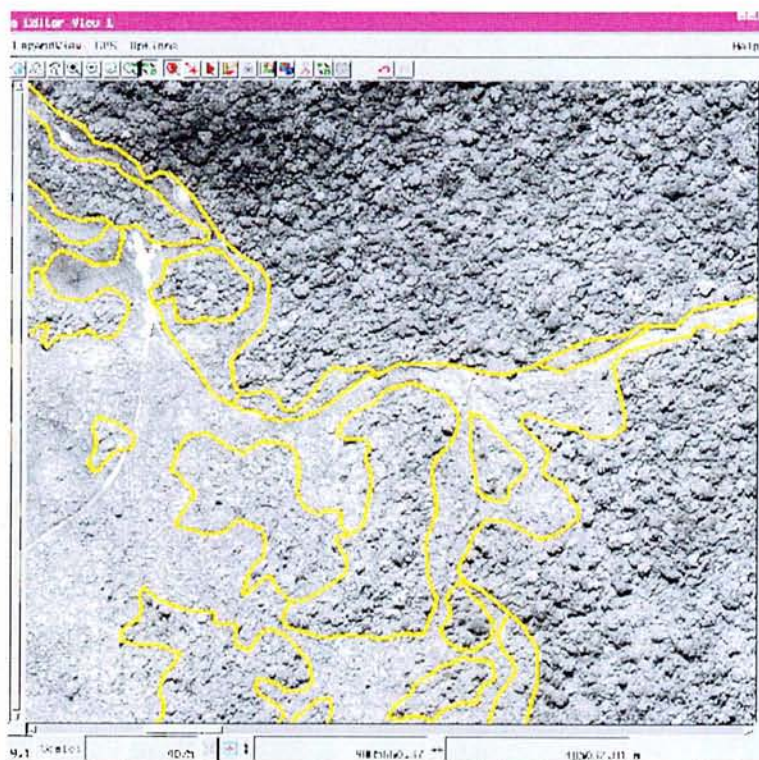
また、IKONOS衛星データを用いて、森林火災により分断化されてできた森林のパッチ構造を判読した結果を、図－５に示す。この結果を用いて、現地調査のプロット設定の計画を立てた。



K plotにおける波形

HD plotにおける波形

図－４．DN値のプロファイルによる林冠構造の把握



図－５．森林火災による分断化された森林のパッチ構造の判読

③ 現地調査

森林の被災の程度に応じて、図－６のようにサンプルプロットを配置した。各プロットで計測されたデータは、空間データベースとして、GIS上で検索できるように整備した（図－７）。

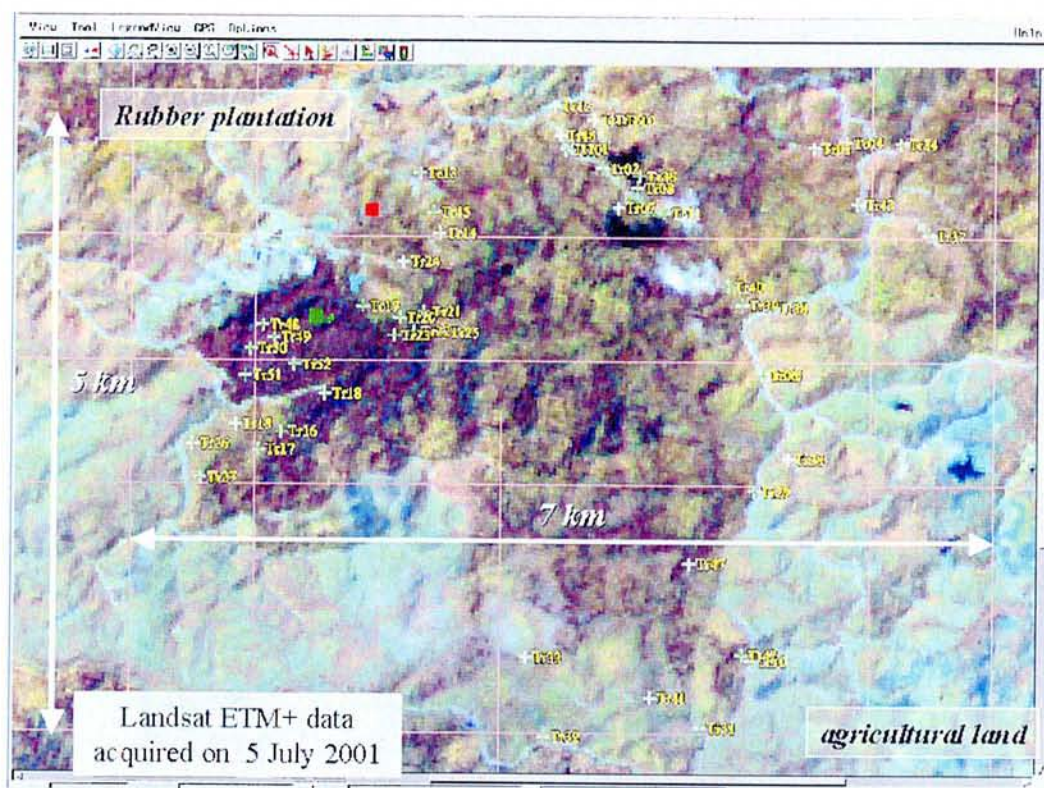


図-6. サンプルプロットの配置

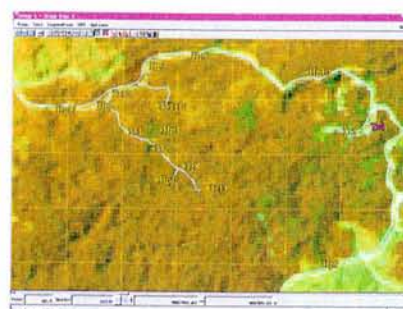
Field Survey at the point of Tr04



Hemispherical photo at Tr04

Site Description

Coordinates 489757E 9887762N
 UTM Datum: Indonesian 1974 Zone: 50 South
 Basal Area: 12(4) m² Highest tree: 26.8 m
 Number of Dead trees (within 10 m): 7 LAI: 0.492

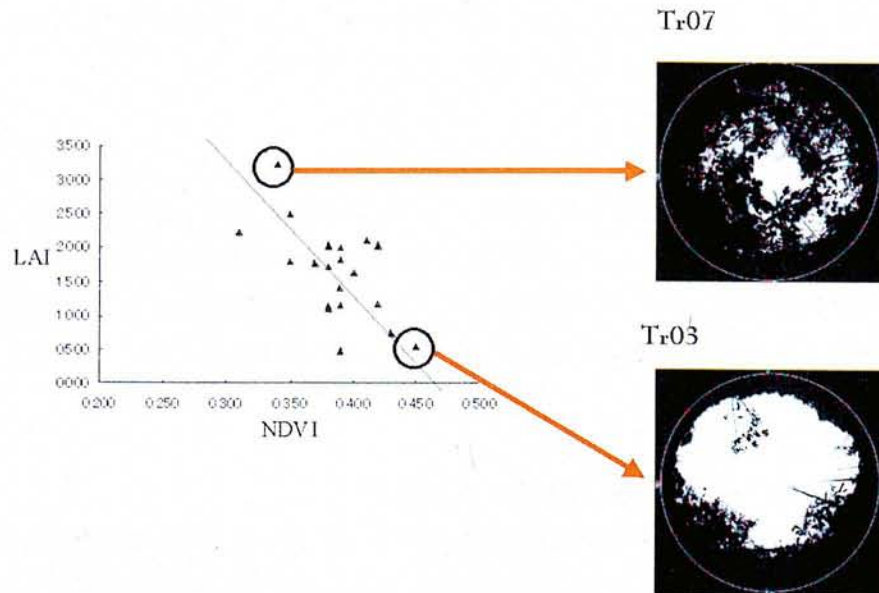


The position of Tr04 on the satellite map

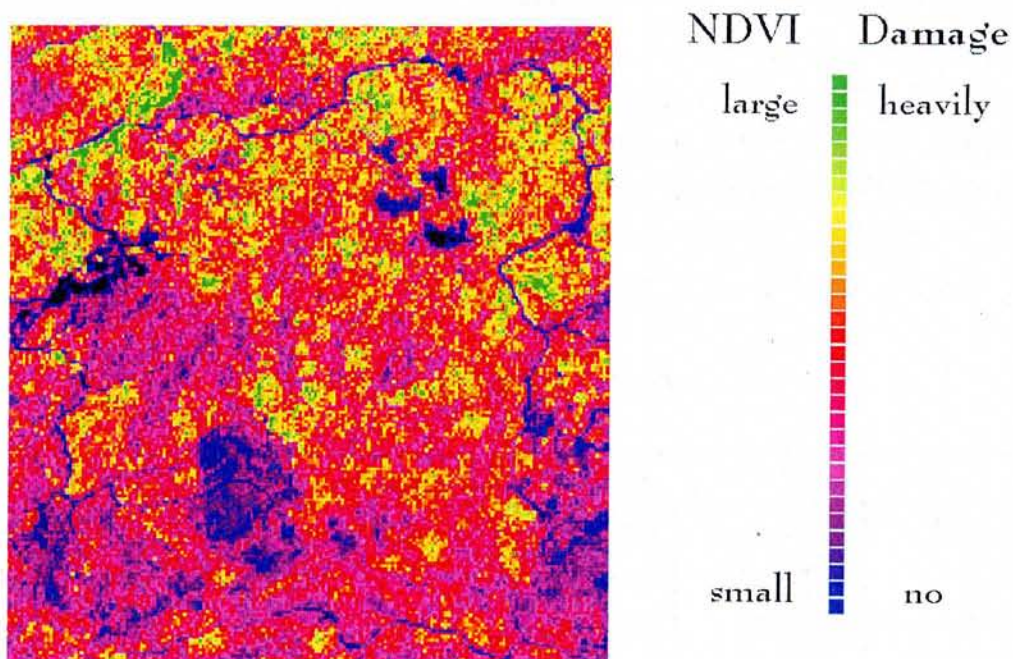
図-7. サンプルプロットに関するデータベース

④ 火災後の森林回復過程の解析

図－８に、現地で取得したLAIと高分解能衛星データから算出されたNDVIとの関係を示す。被災した天然林のみを対象とした場合、LAIとNDVIとの間には高い負の相関が見られた。これは、被害が大きくなるほど、上層の林冠があいてLAIが小さくなり、一方で、先駆樹種が下層に多く密生することによりNDVIを引き上げたためと考えられる。これにより、植生指数を介して広域での被災程度の評価を行うことが可能となった（図－９）。



図－８．NDVIとLAIとの関係



図－９．NDVIを用いた火災の被害程度の評価

5. 高分解能SARによる森林火災回復過程の解析

(1) 研究方法

① 衛星搭載合成開口レーダによる森林火災エリアの同定

1997年中旬から1998年の東カリマンタン地域の大規模火災に前後するJERS-1衛星搭載合成開口レーダのデータを解析することにより、森林火災エリアの同定を図った。火災前後では地表面の状態が変化していると考えられるため、火災前後でのデータ間の相関を取り、相関係数が低いところを同定できれば、そこが火災等で変化した場所であることが期待できる。ただし、ペアとすべき画像の軌道推定精度、基線長等に留意する必要がある。

② 森林火災の同定に適したSARの観測パラメータ等の特定

より高性能である航空機搭載多機能合成開口レーダ（Pi-SAR）のデータを用いて、森林火災の同定に適した観測パラメータについての検討を行った。航空機搭載SARによる森林域の観測データから、木々の疎なエリア、ダメージのあるエリア等での特徴を調べた。また、実際に日本国内で発生した山火事エリアの航空機SARで取得したデータを解析することにより有効性を評価した。

(3) 結果・考察

① 衛星搭載合成開口レーダによる森林火災エリアの同定

インドネシア／カリマン島東部のJERS-1衛星SARデータを使って2時期の相関を計算した。本解析では、中心ドップラー周波数を2つのペアについて合わせてから軌道推定を行った。

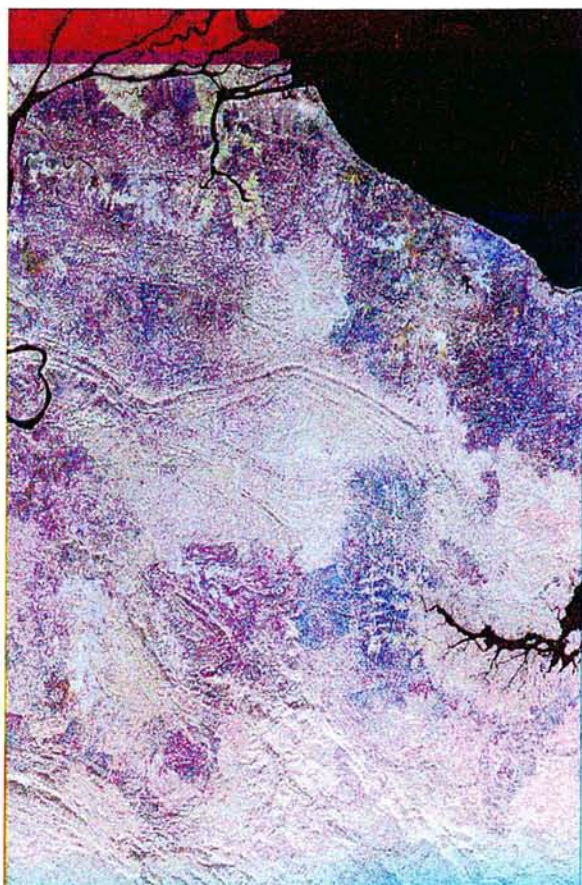
処理したSAR画像の強度データを図－10に示す。異なる時期のデータをRGBに対応させて色づけしている。図の中心位置は南緯0度50分55秒東経116度54分32秒に対応している。右図は左図の白枠内を拡大したものである。河川の形状が細かく見て取れる。

インドネシアの乾季は4月から9月、雨季は10月から3月であるが、この年はエルニーニョの活動の影響で年初からの降雨量が少なく乾燥した状態であった。白い部分はどの時期も散乱が強く戻ってきた時期で、やや青黒くみえている領域はどの時期も散乱が弱い。10月がわずかに散乱が強いことを示す。川のふちの緑の領域は雨季のなごりで川が増水して、森林に冠水して、水面と木の散乱によって比較的強い散乱が返ってきていると推定される。

コヒーレンスをとったペアについて表－4にまとめる。

表－4. コヒーレンス処理を施したペアデータ

		Mater	Slave	相関状況	Bh	Bp	日差
1	火災前後	1998/5/29	1998/1/17	○（縞あり）	1.774	2.321	132
2	火災後	1998/7/12	1998/5/29	×	-4.515	-5.489	44
3	火災前	1998/1/17	1997/10/21	○	5.957	1.169	88
4	火災後	1998/10/8	1998/7/12	△（縞あり）	2.309	2.666	88
5	火災後	1998/10/8	1998/5/29	△	-2.205	-2.822	132

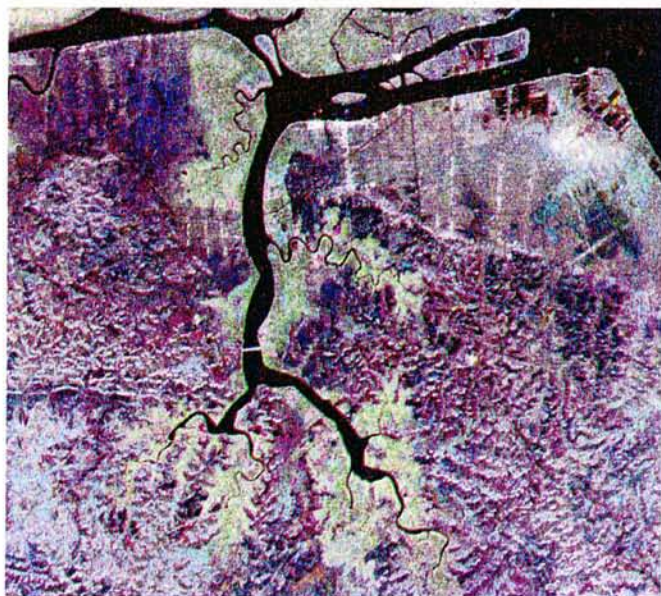


R: 98/01/17

-----fire-----

G: 98/05/29

B: 98/10/08



図－10. East KalimantanのRGB合成画像

基線の視線方向と直交する成分Bpが大きくなるとコヒーレンスは小さくなる。クリティカル・ベースラインBcp（レンジ分解能範囲内で地形縞の位相が 2π 回る）はJERS-1衛星に対しては

$$\begin{aligned} Bcp &= \text{レンジ距離} * \text{波長} * \tan(\text{入射角}) / 2 / \text{スラントレンジ分解能} \\ &= 695954 * 0.236 * \tan(35 \text{ deg.}) / 2 / 18 \\ &= 3194 \text{ (m)} \end{aligned}$$

Bcpより小さい範囲で基線が長いと標高をだすのには有利であるが、コヒーレンスとしては基線が短い方が高い相関をもつ傾向がある。また、時間的に離れるほどコヒーレンスは低下する。さらに、降水等による地表面変化や季節的な変動に影響を受ける。

ペア－2は時間的には近いがBpがBcpを超えるためにコヒーレンスは低い。火災前同士のペア－3はBpが最も小さく、コヒーレンスも高く、コヒーレンスのコントラストも大きい。この映像においてコヒーレンスが高い（白い）部分は農地、牧草地や都市であり、森林はコヒーレンスの低い（暗い）部分であると判断できる。ペア－1とペア－4についてはレンジ方向に横縞が現れた。この横縞はSNが十分高く取れないために起こっていると思われる。ペア－5については海や川はコヒーレンス上識別できるが陸上のパターンはほとんど判別できなかった。

作成したコヒーレンスを図－11に示す。全焼すれば火災後のペア－でのコヒーレンスは高くなり、火災前後でのコヒーレンスは相関がなく非常に暗くなることが期待される。そのためには、ペア－3程度の明暗を持つコヒーレンスを生成することが必要である。

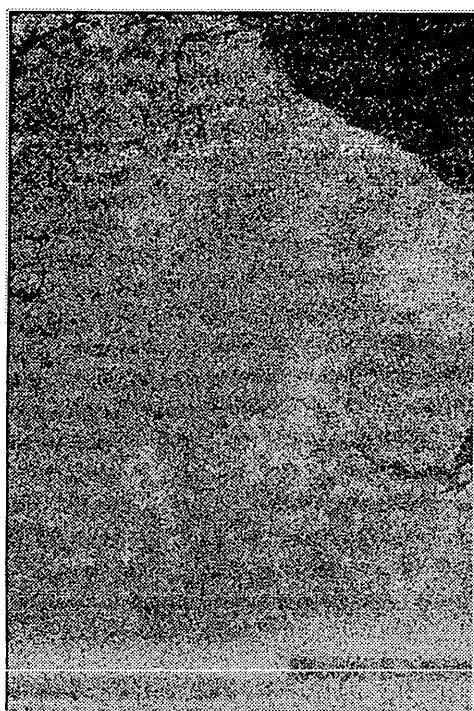


図-11. 作成されたコヒーレンス (ペア-1: 左上 ペア-3: 左下 ペア-5: 右上)

② 航空機搭載SARによる森林火災エリアの同定とパラメータの評価

ア. 対象エリアと観測データ

2002年4月5日岐阜市内で山火事が発生した。山は約2日間燃え続け、約410haの山林が焼失、大きなダメージを与えた。航空機搭載SAR(Pi-SAR)での今までの観測パスを調べたところ、2001年11月に同エリアを観測していることが確認された。そこで、比較のために2002年9月のPi-SAR観測実験時に同一パスでの観測を試み、火災前後のデータの取得に成功した。そこで森林火災エリアの同定とパラメータ等の評価は主にこのデータを用いて行った。

今回の山火事での被害地域は東海北陸自動車各務原トンネル付近の山林である。図-12に火災域を示す。航空機SARによる観測は飛行方向西から東、電波の照射は北向き、観測高度12,000mと、2回共同一パスで行った。そのほかの観測パラメータを表-5に示す。

表-5. 観測データのパラメータ

観測日時	2001/11/10	2002/09/12
観測モード	X 4ch(pol.) L 4ch(Pol.)	X 6ch(pol.In.) L 4ch(Pol.)
ゲイン設定	X AGC L MGC (28dB)	X AGC L AGC
電波の入射角度	42.5-53.0度	

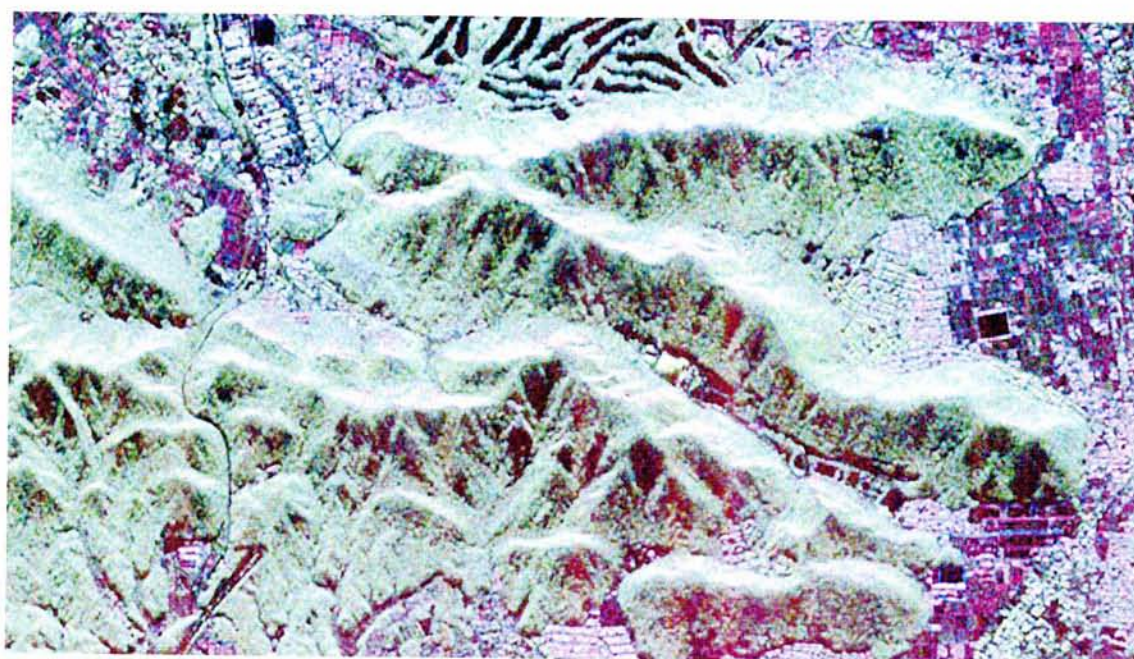
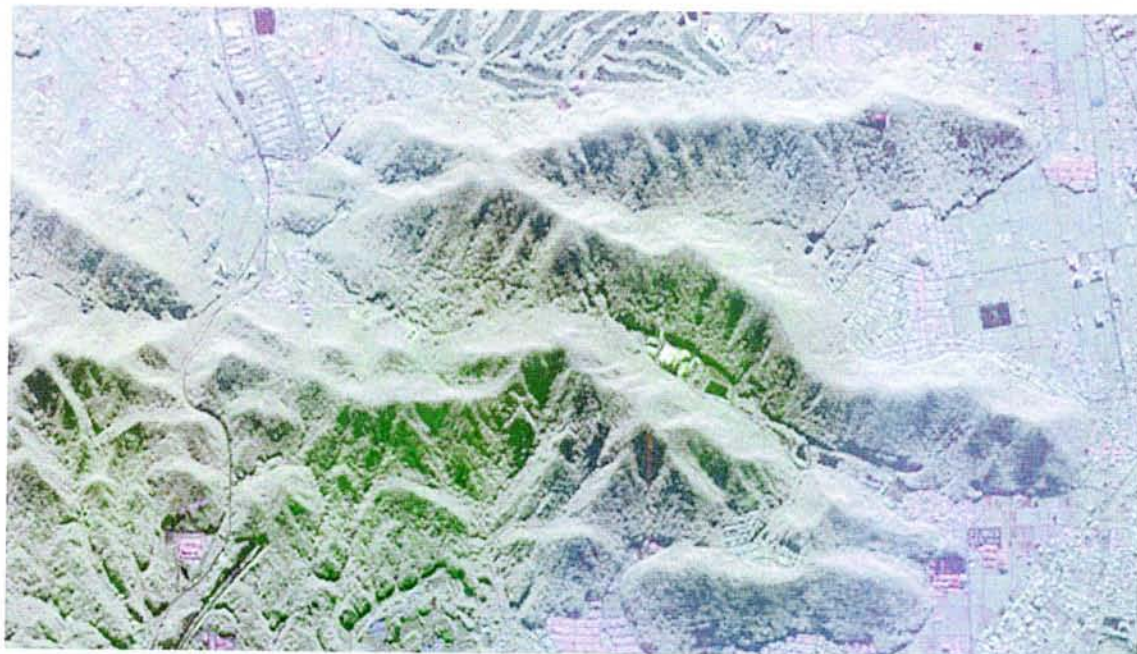
2001年の観測時に、LバンドのAGC (Auto Gain Control) 回路が不調であったため、MGCでのデータ取得となった。この場合全ての偏波で同一のゲインコントロールとなるため、クロス偏波の受信電力が低くなる欠点がある。2002年9月の観測実験後に現地調査を行った。森林内に入山した2ヶ所では火災によって低木は立ち枯れ(炭化)しているが、比較的背の高い木は、皮を焦がしているものの、枯れていないようであった。現地で撮影した写真を図-13に示す。



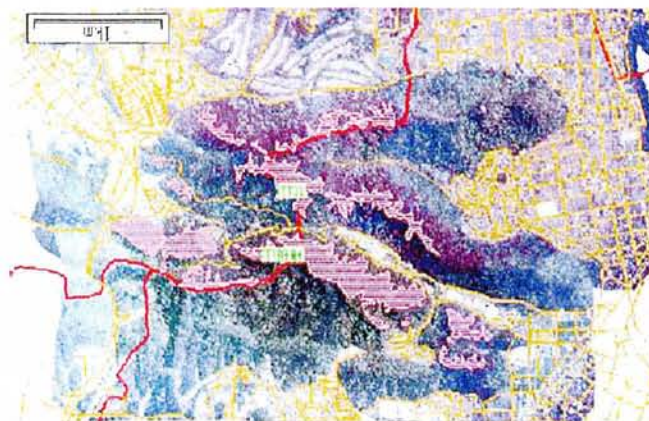
図-12. 対象とした森林火災エリア (ALPS Map) 図-13. 火災後約5ヶ月後の山の様子

イ. 解析結果

航空機搭載SARによって得られた映像を図－14に示す。上がX-band、下がL-bandである。それぞれ偏波合成によってカラー化している。



図－14．2002年9月11日に観測されたSARの画像(上：X-band 下：L-band)
火災後約5ヶ月後、偏波によるカラー化(VV:Red VH:Green HH:Blue)



図－１５．激しく燃えたと思われるエリア
(航空機SARの映像に合わせるために南北を逆にして表示)

今回の火災は、中央の3山に渡って発生した。図－１５に火災エリアのハザードマップを示す。一般的に森林からの散乱はボリューム散乱であることから、交差偏波成分が大きいと言われている。ところが、火災により葉や枝が消失した場合、この交差偏波成分が減少すると考えられる。図－１４においては交差偏波成分を緑色で表示している。Lバンドの画像では、激しく燃えたと思われる部分が正に紫色になっており、多偏波観測での森林火災エリアの同定が可能であることを示している。この観測では電波は映像の上から下に向かって照射されており、尾根の手前と奥ではローカルの入射角が変化する。映像の中心付近の入射角が約50度であり山の傾斜を15度程度と考えても手前と奥では約30度の違いが存在し、正確な火災エリアの同定のためには、この変化分を考慮する必要がある。そこで今回の解析では交差偏波成分の変化を主体として以下の解析を行った。

a 火災エリアでは交差偏波成分の減少が考えられることから、火災後のデータから、火災エリア、非火災エリアの分類を試みる。

b 火災前後の交差偏波成分の変化により分類を試みる。

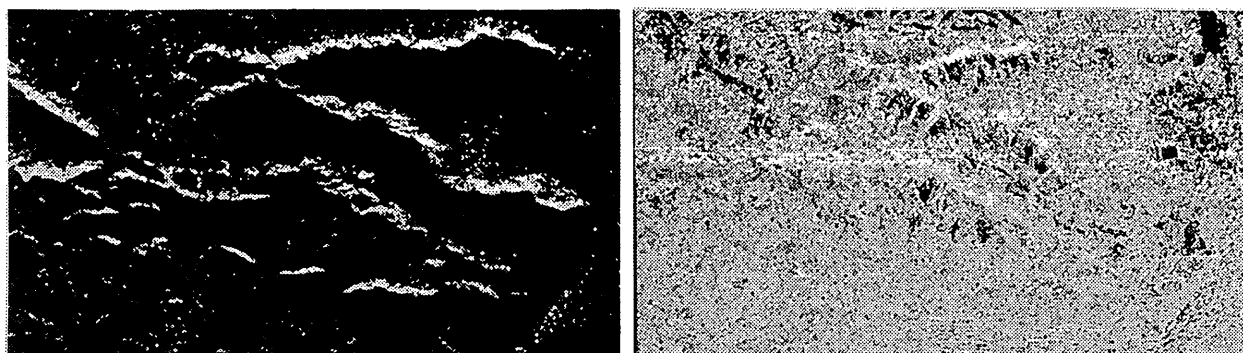
c 火災前の交差・直行偏波の比と火災後の交差・直行偏波の比の差分から火災エリアの抽出を試みる。

cについては前述した山の尾根の影響により、電波の入射角が変化してしまうことを交差・直行偏波の比を求めることにより相殺し、その後火災前後のデータを比較することでより正確なエリアの抽出を目的としたものである。

・図－１６(a)はLバンドの火災後の交差偏波のパワー画像を後方散乱の強いエリアを強調した映像である。左側に見える火災に遭っていない山と区別ができない。

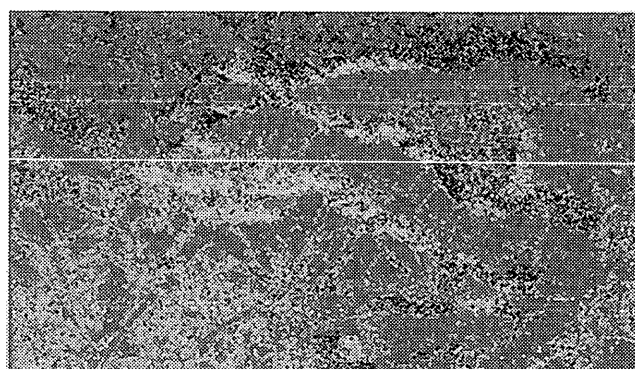
・図－１６(b) Lバンドの火災前後のクロス偏波の差である。(b)に比べて左の山と火災に遭った山で若干の差が見て取れる。

・図－１６(c)はLバンドの火災前後のクロス／パラレルの比の差分から火災エリアの抽出を試みたものである。



(a) 火災後のL-band HV画像
尾根部分からの後方散乱が大きく、抽出は困難

(b) 火災前のHV画像から火災後のHV画像
のパワーを引いた画像
火災エリアと思われる部分が白くなっている

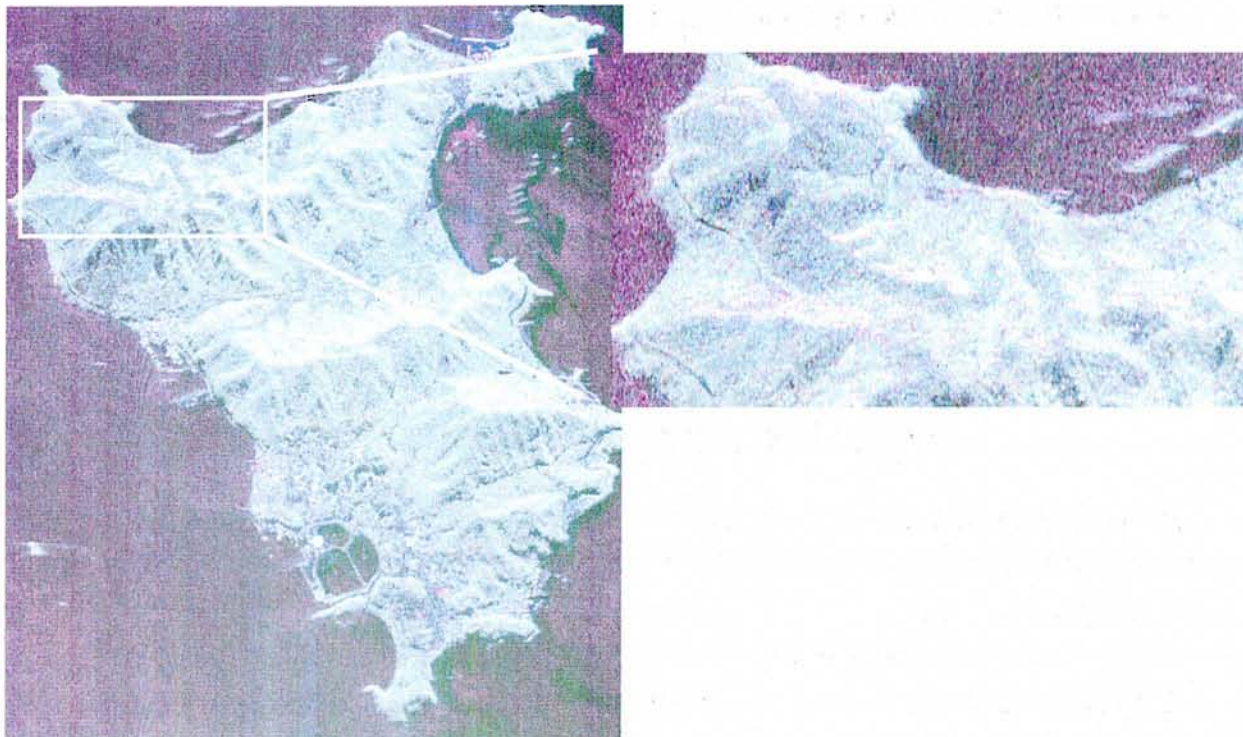


c) 火災前の HV/HH 比から火災後の HV/HH比を引いた画像
図-15のハザードマップと良い一致が見られる

図-16. L-band画像の解析結果

③ その他の事例

その他の事例として、2002年8月20日に瀬戸内海に浮かぶ香川県丸亀市本島で発生した山林火災の映像を図-17に示す。島の南西部（拡大部分）である小阪地区から生ノ浜地区にかけては、ほぼ全域にわたって被害が発生した。この部分は映像でも明らかに他のエリアとの識別が可能である。このエリアが赤紫に見えることから、緑に色を当てた交差偏波成分の散乱が小さくなっており、樹木からの散乱が小さくなったことが見て取れる。また、比較的平坦なためローカルの入射角の影響が少なく、火災エリアの同定が比較的正確に行えることが期待できる。



図－１７．香川県丸亀市本島のSAR画像（Lバンド）

Pi-SARによる森林火災エリアの観測を行い、そのデータから火災エリアの同定を試みた。現場付近の写真や空中写真から作成したハザードマップと処理結果を比較すると、火災エリアの同定には低い周波数であるLバンドSARがより有効であること、多偏波観測が重要なこと、特に交差偏波の観測データが有効であることが判った。しかし、いわゆる山岳地帯における森林火災の場合には、前述したように観測における電波の照射方向によって山の尾根の手前側と向こう側でローカル入射角が大きく異なることに注意が必要である。今回のデータ処理からローカルの入射角があまり大きくなると後方散乱が小さくなることもあり観測に適していないことが判った。

6. 高頻度観測衛星データを用いた森林火災の回復過程の解析

(1) 研究方法

高頻度衛星であるSPOT衛星VEGETATIONデータを用いて、森林火災後の植生回復の過程をモニタリングする手法を開発した。

① 対象地

インドネシア国東カリマンタン州を研究対象地とした。東カリマンタン州は北緯2度5分ー南緯4度24分、東経113度44分ー119度00分に位置しており、面積は211,400平方キロメートルである。気候は典型的な熱帯多雨林気候（ケッペン気候図）で年平均降水量は約3,000mmである。解析結果の検証地域として、バリクパパン市とサマリダ市の二つの都市に挟まれた地域を選んだ。この地域には熱帯丘陵林、マングローブ林および農地等が広がっており、共通の研究対象地を含む。

② 使用したデータ

フランスが打ち上げたSPOT衛星4、5号に搭載されたVEGETATIONセンサ（以下SPOT-VGT）によって、1998年4月から2002年6月までに観測されたデータを用いて解析を行った。SPOT-VGTは1日1回以上の観測を行っており、その観測幅は約2,000kmである。表－6に各バンドの波長、種類、分解能を示す。

表－6．SPOT-VGTの観測波長帯と分解能

センサ名	バンド	波長	種類	分解能
SPOT VEGETATION	Band1	0.45～0.52μm	青	1km
	Band2	0.61～0.68μm	赤	1km
	Band3	0.78～0.89μm	近赤外	1km
	Band4	1.58～1.75μm	中間赤外	1km

SPOT-VGTには、オリジナルデータであるPプロダクト、地図投影がなされているS1プロダクト、さらにNDVI最大値を用いた10日間合成データであるS10プロダクトがあるが、本研究ではS10プロダクトを用いた。

また地上の森林火災状況を示すデータとして、国際協力事業団森林火災予防計画プロジェクトより提供を受けたホットスポットデータを用いた。さらに森林火災跡地抽出の評価を行うためにLandsat衛星TMデータを用いた。使用したLandsat衛星TMデータを表－7に示す。

表－7．使用したLandsat衛星TMデータ

	取得年月日
大火災前	1998年 1月26日
大火災後	1998年12月12日

③ 正規化植生指数

本研究では、S10プロダクトに標準で提供されているNDVI（正規化植生指数）をもちいて解析した。NDVIは（1）式を用いて計算され、データは-1～1の間に分布する。

$$NDVI = (band3 - band2)/(band3 + band2) \quad (1)$$

実際に提供されるデータは、データレンジを-0.1～0.92の範囲を引き伸ばす形で変更することにより1byteデータとなっている。このため解析では、そのまま1byteデータを用いて解析した。解析結果のグラフ等には（2）式を用いて変換した実数で示した。

$$RealNDVI = Coefficient\ a \times Digital\ Number + Coefficient\ b \quad (2)$$

$$Coefficient\ a = 0.004$$

$$Coefficient\ b = -0.1$$

④ SPOT-VGTデータのノイズ軽減処理

SPOT-VGTデータは1日1回以上の頻度で観測が行われており、回帰周期が17日であるランドサットに比べ、高頻度での観測が期待される。しかし実際には雲やヘイズ等といったノイズの影響により解析に用いることができないエリアが生じている。このため通常10日間のデータを合成することによりこれらの影響を軽減したデータが用いられているが、雲に覆われる頻度の高い熱帯地域では十分なノイズ軽減効果が得られていない。このため本研究では、以下に示す方法を用いてノイズ軽減処理を行った。解析の対象としたのはSPOT-VGTデータのNDVIデータである。

ア．局所最大値フィッティング (LMF) 処理

これは高頻度観測衛星データから得られる植生の季節変動をモデル化することによってノイズを除去するものである²⁾。この処理は、処理後の値を観測時の前後数シーンの最大値に置き換える局所最大値フィルタと植生の季節変動を各周期関数へフィッティングさせてモデル化する局所最大フィッティングの二つのコンポーネントで構成されている。

イ．局所最大値フィルタ＋主成分分析を用いたノイズ除去

局所最大値フィルタは、先のLMFのものと同じである。同処理を施した後、対象時系列データに対して主成分分析を行い、その結果のうち第1、第2、第3主成分を用いて逆変換を行うことによってノイズ成分を除去した⁸⁾。

⑤ 森林火災被害図の作成

④によって得られたデータの最初の3シーンを用いて森林火災跡地のマッピングを行った。この画像は1998年4月上旬、中旬、下旬に取得された画像に相当し、大火災直後の画像である。まず3シーンを用いてクラスタリングを行った。これはISOdata法のクラスタ分類によってトレーニングデータを生成し、それを用いて最尤法分類を行ったものである。分類結果は4月上旬のNDVI値、SPOT-VGTカラー合成画像および火災後のランドサット画像を参考にクラス分けを行った。

⑥ 森林火災回復度地図の作成

④によって得られたデータにおいて森林火災被害地の回復過程は指数関数モデルに当てはめることができた。このことから森林火災被害地のそれぞれのピクセルを指数関数でモデル化し、それらのパラメータから植生指数が0.6を超える時期を求めてマッピングし、森林火災回復度地図とした。

(4) 結果・考察

① ノイズ除去処理について

ノイズ軽減処理については、雲およびヘイズを取り除く能力ではアの方法のほうがイの方法よりも優れていた。しかし、アの方法ではトレンドと周期変動が強調されている一方で回復の状況を示す曲線としては適切なものが得られなかった(図-18)。イの方法は山岳地域の雲が頻繁にかかる場所では十分に雲の影響を除去することができず、データにノイズが残っているものの、本研究の研究対象地域では十分に雲、ヘイズの影響が軽減されていた。また火災被害地の回復過程を示す曲線は妥当なものが得られた(図-19)。これらの結果より以降の解析は処理イの結果を用いた。

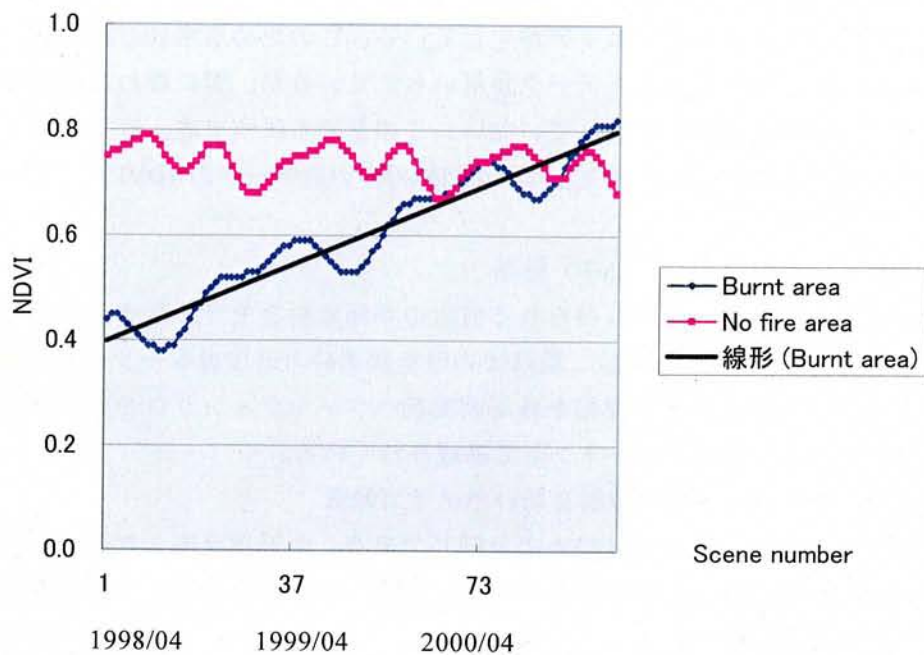


図-18. 森林火災被害地と非被害地のNDVIの時系列変化 (処理ア)

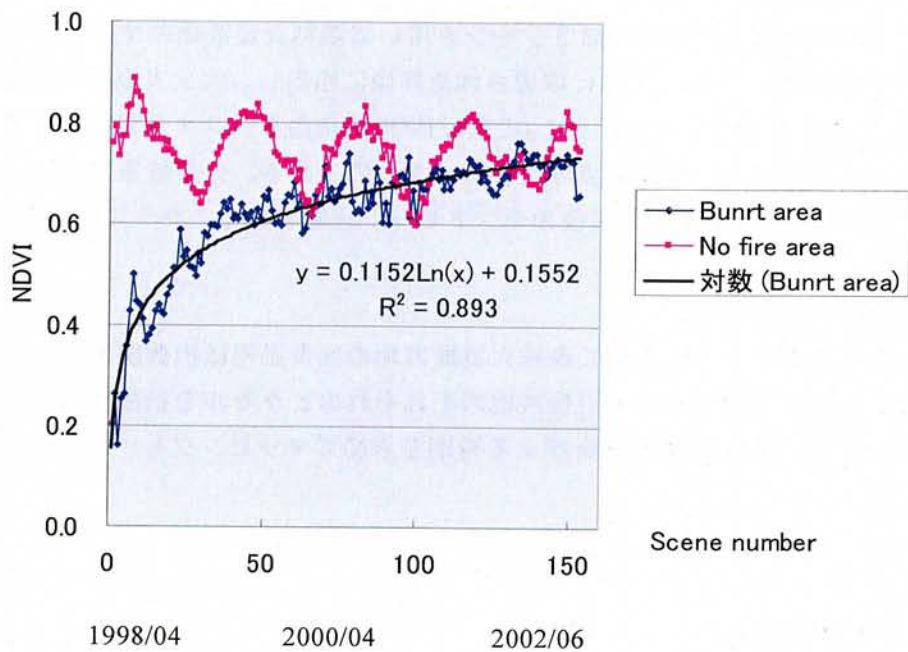


図-19. 森林火災被害地と非被害地のNDVIの時系列変化 (処理イ)

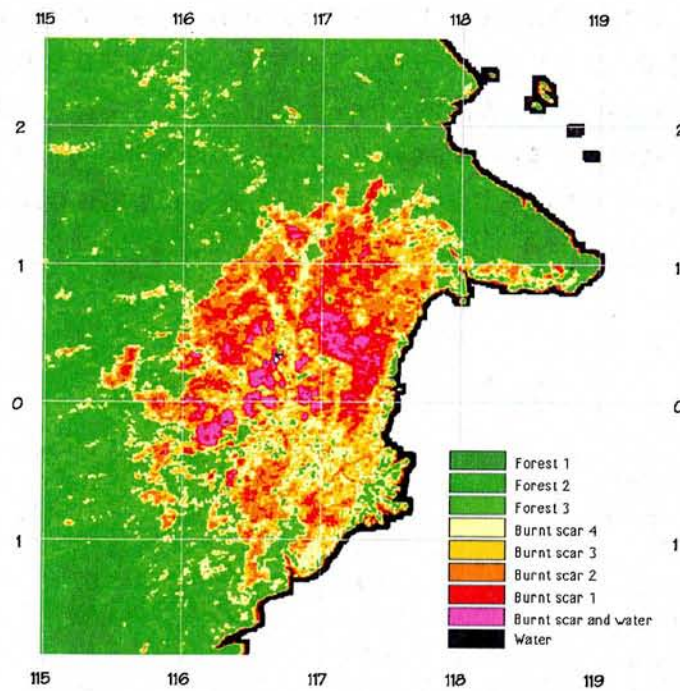
② 森林火災被害図の作成

表-8に分類結果のラベリング結果を示す。火災跡地は火災直後の植生指数によって4段階に区分した。赤い色ほど被害が大きいことを示し、オレンジ、黄色と被害に小さくなっている。森林に地域についても3つに区分したがこれは便宜的なものであり、実際の植生状況を反映しているわ

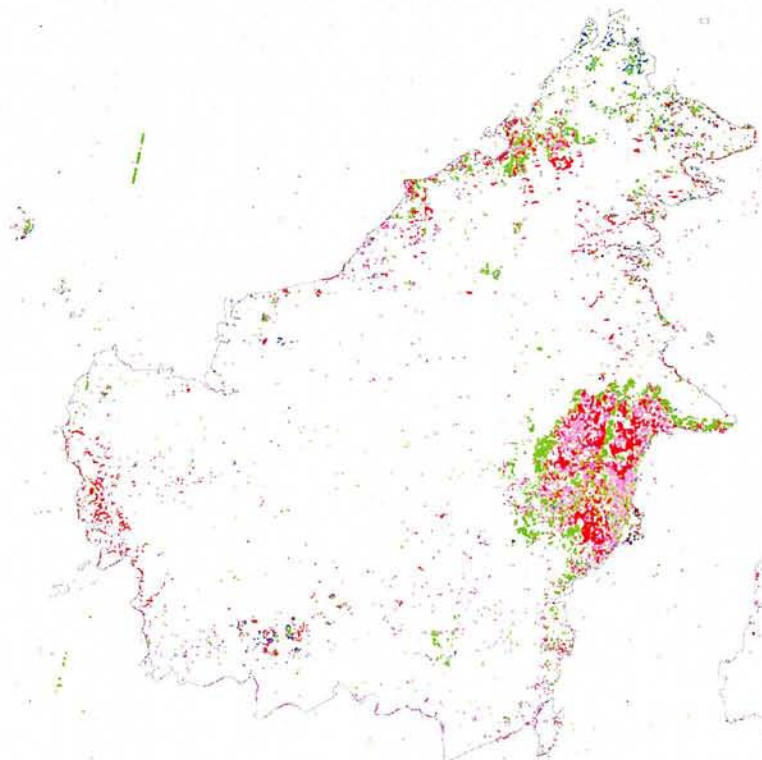
けではない。図－２０にSPOT-VGTから作成された森林火災被害図を示す。図－２１はホットスポットによる火災分布図、また図－２３に示すLandsat衛星TM画像とも大きな矛盾はなかった。図－２１を見ると火災の多くが２月と３月に発生したことがわかる。この火災発生地点と本研究で作成された森林火災被害図（図－２０）はよく一致しておりほとんど矛盾がなかった。またLandsat衛星TM画像によって観測された森林火災跡地（図－２２と図－２３で緑から紫に変化している地域）とも一致しており、衛星による観測によりリージョナルからローカルスケールでの森林火災被害地の把握が可能であることが明らかとなった。また、得られたNDVI値により火災被害規模を４段階に区分できたが、本研究では十分な地上データによる検証が行われていないため、相対的な関係を示すにとどまった。

表－８．分類結果のラベリング

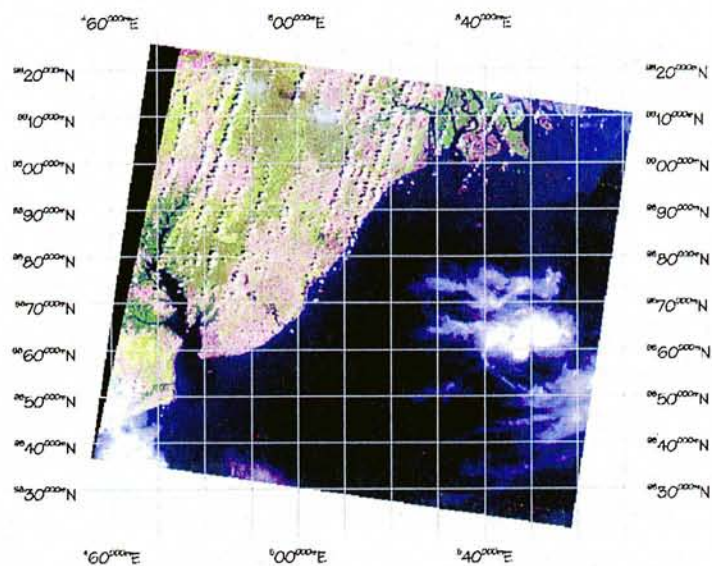
		Cluster 平均値			Cluster 標準偏差		
Cluster		４月上旬	４月中旬	４月下旬	４月上旬	４月中旬	４月下旬
1	水域	5.71	5.71	5.50	2.65	3.10	2.62
30	水域	31.59	34.03	30.94	2.82	3.02	3.18
31	水域	36.84	39.41	36.21	1.65	1.92	1.85
32	水域	41.82	44.47	40.95	1.99	2.28	2.13
25	水域	47.45	50.11	46.24	2.24	2.46	2.47
27	水域	53.42	55.82	52.09	2.34	2.20	2.23
24	水域	56.68	70.69	46.10	4.05	4.99	4.12
29	水域	59.21	61.87	57.57	2.58	2.44	2.47
28	火事跡 1	65.94	69.35	63.58	3.12	3.16	4.32
26	火事跡 1	72.07	81.83	64.97	3.96	5.47	6.68
23	火事跡 1	83.27	93.48	75.46	3.96	6.18	5.63
12	火事後 2	94.29	105.35	86.12	3.75	5.24	5.21
9	火事後 2	103.92	116.00	95.26	3.35	4.42	3.23
10	火事跡 3	110.76	113.20	108.47	5.54	4.29	5.06
11	火事跡 3	112.36	125.02	104.22	3.10	2.97	2.90
13	火事跡 3	119.99	130.99	112.85	3.42	4.04	3.70
14	火事跡 4	128.19	138.82	121.39	3.84	4.29	3.88
15	火事跡 4	137.98	147.96	131.24	4.27	4.52	3.88
17	森林 3	148.25	157.92	141.51	4.38	4.53	3.60
5	森林 3	157.42	166.74	150.67	4.19	4.04	3.03
2	森林 3	162.20	176.45	158.33	3.01	3.61	2.68
3	森林 3	169.42	172.84	159.83	3.12	3.49	3.07
4	森林 2	171.91	181.63	165.70	3.82	2.98	2.16
6	森林 2	174.51	189.61	171.54	2.84	3.12	2.36
7	森林 2	181.66	186.54	173.13	2.77	3.53	2.44
8	森林 2	184.82	194.57	179.02	3.43	3.16	2.09
19	森林 2	189.20	203.34	185.81	2.96	2.33	2.17
16	森林 2	192.81	197.64	184.76	2.68	2.82	2.17
21	森林 1	197.44	204.71	190.58	2.78	2.67	1.72
20	森林 1	201.15	210.47	195.52	3.13	2.68	1.83
18	森林 1	208.34	216.94	202.45	3.28	3.51	2.66
22	森林 1	218.83	227.80	213.52	5.53	5.52	5.49



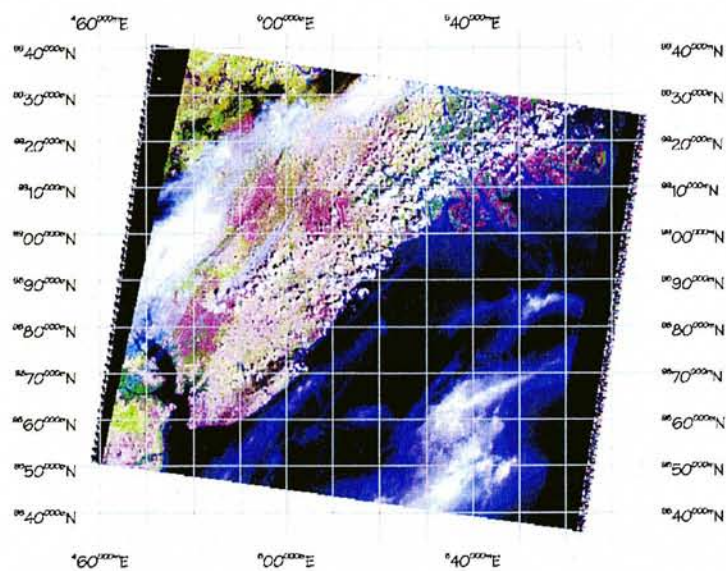
図－２０．SPOT-VGTによる森林火災被害図



図－２１．NOAA衛星から観測されたホットスポットの分布
黒：１月，ピンク：２月，赤：３月，緑：４月，青：５月



図－２２．被害前のLandsat衛星TM画像



図－２３．被害後のLandsat衛星TM画像（紫色が被害地域）

③ 森林火災回復度図

図－１９に森林火災被害地と非被害地のNDVIの時系列変化を示す。図－２４に森林回復度地図を示す。緑で表示した部分は回復が早く、黄色、オレンジ、赤と色が濃いほど回復が遅いことを示している。図－２５に被害地のNDVI値と同値が0.6に回復するまでにかかる時間の関係を示す。

また一方で高頻度観測衛星データを時系列的に解析することによる森林火災の回復過程をモニタリングすることが可能となった。図－１９はその一例である。多くの森林火災跡地は図－１９の被害地と同じような回復過程をたどっていることがわかった。このため本研究では、回復過程を対数関数式に当てはめ、この関数式よりNDVIが0.6を超えるまでの日数を計算し、マッピングすることによって森林火災回復度地図とした。NDVIが0.6を超えるのはおよそ森林の林冠が閉じたときに相当する。これは実際には草地から若い二次林が成立する過程に相当し、本当の森林回復とは言いがたいが、森林回復における初期の重要な過程を示している。さらに森林回復のスピード差がマッピングできたことにより、その土地の森林火災の影響を評価することができた。このことは森林の修復計画立案において重要な情報になると思われる。

一方で大火災後3年以上経過しているにもかかわらず、植生が回復していない地域が見られた。これは恒久的な裸地、あるいは農地と考えられる。土地利用区分を無視して解析したため、こうしたエラーが発生した。今後はより正確な森林火災回復の評価には土地利用区分図を併用することが必要と思われる。

図－２５からは火災直後のNDVI値とその後の回復スピードには一定の関係があることが示唆された。このことは火災直後のNDVI値によりその後の植生回復についてある程度予測が可能であることを示している。

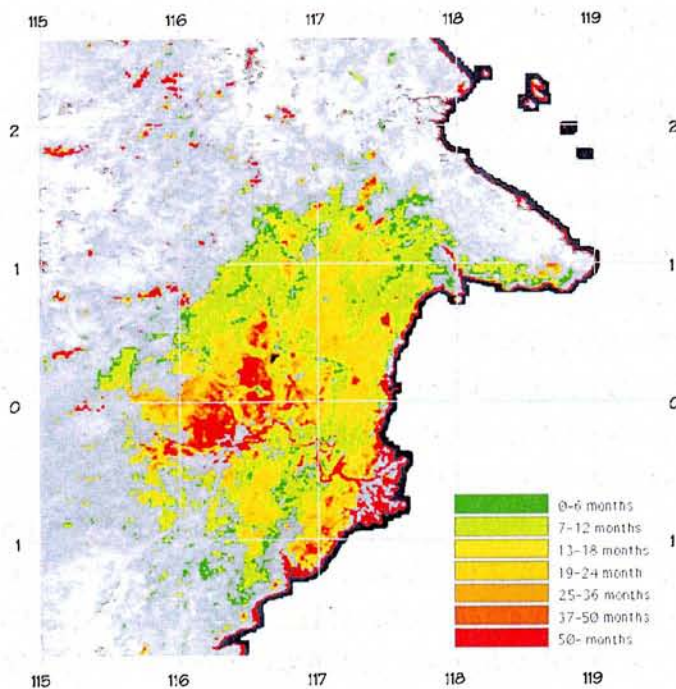


図-24. 森林火災回復度地図

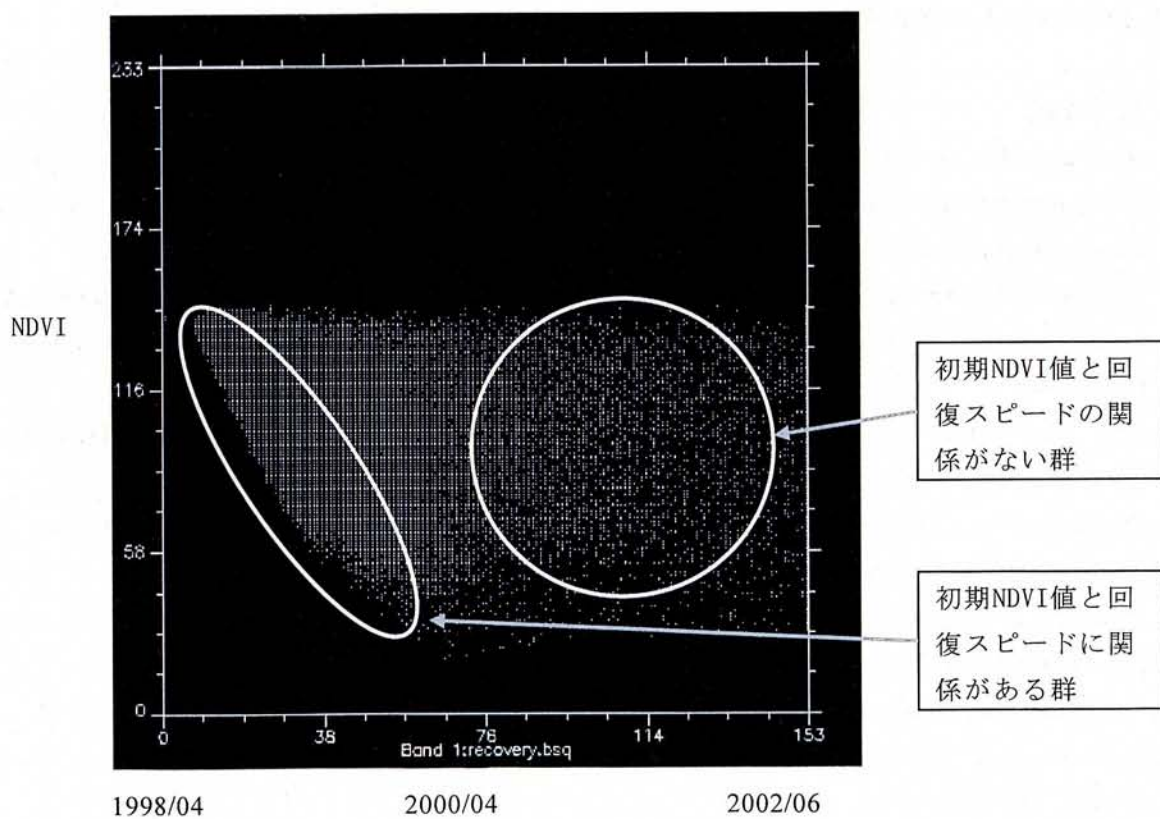


図-25. 被害地のNDVI値の同値が0.6に回復するまでにかかる時間の関係

7. 本研究により得られた成果

森林火災に関連したこれまでの研究事例が、系統的に整理され、今後の森林火災の研究の方向性が示された。

高分解能衛星データを用いた森林火災の被害の把握においては、火災前における天然林域での、火災による分断化の状況が、1m地上分解能の商業用高分解能衛星を用いてパッチ構造を抽出することにより把握出来た。また、この各パッチ構造内の林冠構造を捉えるための手法を開発した。さらに、高分解能衛星データから算出されるNDVIと、上層を占めるLAIは高い負の相関を示すことから、この指数を用いて森林火災の被害程度を表現できることが明らかとなった。

JERS-1衛星データを用いた解析では、2時期のペアのコヒーレンスが悪く良い結果が得られなかった。しかし、次期打ち上げ予定のALOS衛星PALSARセンサではL-bandの多偏波観測が可能であることから、交差偏波データを用いることにより、火災域の同定が可能であると期待できる。また、軌道決定精度がJERS-1衛星に比べて格段に向上するため、時間的に近く且つベースラインが短い、コヒーレンスの良いペアのデータが取得可能と考えられる。ALOS衛星PALSARセンサでの観測は、地球上で発生する森林火災の災害状況把握に十分有効であると考えられる。

火災直後のNDVI値を用いて森林火災被害分布図が作成され、またその被害度を相対的なものではあるものの分類できたことは、従来の研究結果を支持するものである。また局所最大値フィルタと主成分分析とその逆変換を用いてノイズ軽減画像を作成し、それを非線形関数に当てはめて森林回復図を作成したことは、ViedmaらがランドサットTMで行った研究結果¹¹⁾をローカルスケールからリージョナルスケールに拡張したものであり、広域の生態系プロセスにおける火災の影響評価に貢献するものである。

8. 引用文献

- 1) Andreae, M.O. (1991): Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications (J.S. Levine, Ed.). The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 3-21.
- 2) Barbosa, P.M., Pereira, J.M.C. and Grefoire, J.M. (1998): Compositing Criteria for Burned Area Assessment Using Multitemporal Low Resolution Satellite Data, REMOTE SENS. ENVIRON. 65:38-49.
- 3) Boer, Ch., Matius, P., and Sutisna, M. (1988): Succession after fire in the Lempake primary forest near Samarinda, East Kalimantan. GFG- Report, 11: 27-34.
- 4) Brinkman, W. & Vieira, A.N. (1971): The effect of burning on germination of seeds at different soil depths of various tropical tree species. Turrialba 21: 77-82.
- 5) Cahill, A.J. & Walker, J.S. (2000): The effects of forest fire on the nesting success of the Red-knobbed Hornbill *Aceros cassidix*. Bird Conservation International, 10:109-114.
- 6) Cochrane, M.A., Alencar, A., Schulze, M.D., Souza Jr., C.M., Nepstad, D.C., Lefebvre, P., and Davidson, E.A. (1999): Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. Science, 284:1832-1835.
- 7) DeBanno, L.F., Eberlein, G.E. and Dunn, P.H. (1979): Effect of fire on chaparral soil. I: Soil nitrogen. Soil Science Society of America Journal, 43: 504-509.

- 8) Domenikiotis, C., Dalezios, N.R., Loukas, A. and Karteris, M. (2002): Agreement assessment of NOAA/AVHRR NDVI with Landsat TM NDVI for mapping burned forested areas, *INT. J. REMOTE SENSING*, VOL.23, NO.20, 4235-4246.
- 9) Dunn, P.H. DeBanno, L.F., and Eberlain, G.E. (1979): Effect of fire on chaparral soil. II: Soil microbes and nitrogen mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 43: 509-514.
- 10) Eastwood, J.A., Plummer, S.E., Wyatt, B.K. (1998): The potential of SPOT-VEGETATION data for fire scar detection in boreal forests, *INT. J. REMOTE SENSING*, VOL.19, NO.18, 3681-3687.
- 11) Eva, H. and Lambin, E.F. (1998): Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions: Sampling Issues and Multisensor Approach, *REMOTE SENS. ENVIRON.* 64:292-315.
- 12) Fraser, R.H., Li, Z. (2002): Estimate fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION, *Remote Sensing of Environment* 82, 95-110.
- 13) Ghazali, D.I. & Toma, T. (2000): Wildfires in East Kalimantan: Fire sources and the effects of fire disturbance on Lowland dipterocarp forests. *Global Environmental Researches on Biological and Ecological Aspects* 1:35-41.
- 14) Goldammer, J.G. (1999): Forest on Fire. *Science*, 284:1782-1783.
- 15) Goldammer, J.G. & Seibert, B. (1989): Natural rain forest fires in Eastern Borneo during the Pleistocene and Holocene. *Naturwissenschaften* 76: 518-520.
- 16) Goldammer, J.G., Schindele, W., Sibert, B., Hoffmann, A.A., and Abberger, H. (1999): Pusrehut Special Publication No.8: Impacts of Fire on Dipterocarp Forest Ecosystem in South East Asia. In: *Impacts of Fire and Human Activities on Forest Ecosystems in the Tropics* (Suhartoyo, H. and Toma, T. Eds.). *Proceedings of 3rd International Symposium on Asian Tropical Forest Management*. Tropical Research Center, Mulawarman University and Japan International Cooperation Agency. 15-39.
- 17) Goldammer, J.G., Seibert, B., and Schindele, W. (1996): Fire in dipterocarp forests In: (Eds. Schulte, A. and Schone) *Dipterocarp Forest Ecosystems: Toward Sustainable Management*.
- 18) Goldammer, J.G., & Seibert, B. (1990): The Impact of droughts and forest fires on tropical lowland forest of East Kalimantan. In: *Fire in the Tropical biota* (Goldammer, J.G. Ed). 11-31.
- 19) Goldammer, J.P. (1995): Biomass Burning and the Atmosphere. Paper presented at *Forest and Global Climate Change: Forests and the Global Carbon Cycle*.
- 20) 平田泰雅・李雲慶・沢田治雄 (1993): ランドサットTMデータによる中国タクラマカン地域の植生状況の把握, *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集*, 14:59-62.
- 21) 平田泰雅・佐藤香織・倉本恵生・古家直行・野村奈津 (2003): 商業用高分解能衛星データを用いた森林構造の抽出, *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集*, 34:9-10.
- 22) Holdsworth, A.R. & Uhl, C. (1997): Fire in Amazon selectively logged rain forest and the potential for fire reduction. *Ecological Applications*, 7(2):713-725.
- 23) Johnson, B. (1984): The great fire of Borneo. Report of a visit Kalimantan Timur a year later. *WWF Report*, 22pp.
- 24) Kartawinata, K., Adisoemarto, S., Riswan, A., and Vayda, A.P. (1981) The Impact of Man on a Tropical Forest in Indonesia. *AMBIO*, 10(2-3):115-119.

- 25) Kartawinata, K., Riswan, S., and Soedjito, H. (1980): The floristic change after disturbance in lowland dipterocarp forest in East Kalimantan, Indonesia. In: Tropical Ecology and Development (Eds. Furtado, J.I.) 47-54. International Society of Tropical Ecology.
- 26) 和方吉信 (1992): エルニーニョと赤道波.「地球環境と流体力学」日本流体力学会(編) 朝倉出版, 123-139.
- 27) Kellman, M. (1980): Geographic patterning in tropical weed communities and early secondary successions. *Biotropica*, 12: 34-39.
- 28) Kinnaird, M.F. & O'Brien, T.G. (1998): Ecological effects of wildfire on lowland rainforest in Sumatra. *Conservation Biology*, 12:954-956.
- 29) 清野嘉之 (1996): フタバガキの択伐跡山火事跡林:インドネシア東カリマンタン州ブキットスハルト国民森林公園. 日本熱帯生態学会ニューズレター, 23:1-5.
- 30) Kobayashi, T., et al. (2000): Airborne Dual-Frequency Polarimetric and Interferometric SAR, *IEICE Trans. Commun.*, vol. E83-B, No. 9, 1945-1954.
- 31) Legg, C.A.& Laumonier, Y. (1999): Fires in Indonesia, 1997: A remote sensing perspective. *AMBIO*, 28(6):479-485.
- 32) Leighton, M. (1984): The El Nino-Southern Oscillation event in Southeast Asia: Effects of drought and Fire in tropical forest in eastern Borneo. WWF Report, 31pp.
- 33) Lennertz, R. & Panzer, K.F. (1984): Preliminary assessment of the drought and forest fire damage in Kalimantan Timur. Report by DFS German Forest Inventory Service Ltd. for Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) 45pp + annexes.
- 34) Levine, J.S., Bobbe, T., Ray, N., Witt, R.G., and Singh, A. (1999): Wildland Fires and the Environment: A Global Synthesis. UNEP, Nairobi, Kenya. 52pp.
- 35) 槇原寛・衣浦晴生・八尋克郎 (2000a): 熱帯降雨林における森林火災が各種甲虫類に与えた影響(I). 森林防疫, 581(49):2-8.
- 36) 槇原寛・衣浦晴生・八尋克郎 (2000b): 熱帯降雨林における森林火災が各種甲虫類に与えた影響(II). 森林防疫, 581(49):7-12.
- 37) Malingreau, J.P., Stephens, G., Fellows, L. (1985): Remote Sensing of Forest Fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *AMBIO*, 14(6):314-321.
- 38) Malingreau, J.P., Stephens, G., Fellows, L. (1985): Remote Sensing of Forest Fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *AMBIO*, 14(6):314-321.
- 39) 森徳典, 藤間剛, 槇原寛 (1998): 東カリマンタンの異常感動と大森林火災. 熱帯林業 43:2-13.
- 40) Nykvist, N. (1996): Regrowth of secondary vegetation after the Borneo fire of 1982-1983. *Journal of Tropical Ecology*, 12:307-312.
- 41) Oka, T. (1999): Effects of the Forest Fire 1998 on the Family of Gibbon: A Family in Needs is a Family Indeed. Pusreht Special Publication No.8 Impacts of Fire and Human Activities on Forest Ecosystems in the Tropics. Proceedings of 3rd International Symposium on Asian Tropical Forest Management.
- 42) 沖森泰行 (1990): 二次林にみる熱帯多雨林の再生過程. 熱帯林業, 19:18-25.
- 43) 沖森泰行・Matius, P. (1991): インドネシア, ダヤク族による焼畑跡地の森林の再生. 森林立

地,32(2):79-87

- 44) 沖森泰行 (1992a): 造林の大敵, 山火事の怖さ-東カリマンタン自然公園に発生した火災.熱帯林業,23:25-30.
- 45) 沖森泰行 (1992b): 劣化した熱帯雨林の二次林の再生機構.森林科学,6:48-53
- 46) Patterson, M.W. and Yool, S.R. (1998): Mapping Fire-Induced Vegetation Mortality Using Landsat Thematic Mapper Data: A Comparison of Linear Transformation Techniques, Remote Sens. Environ. 65: 132-142.
- 47) Phulpin, T., Lavenu, F., Bellan, M.F., Mougenot, B. and Blasco, F. (2002): Using SPOT-4 HRVIR and VEGETAION sensors to assess impact of tropical forest fires in Roraima, Brazil, Int. J. Remote Sensing, 23(10): 1943-1966.
- 48) Raison, R.J., Khanna, P.K. and Woods, P.V. (1985): Transfer of elements to the atmosphere during low-intensity prescribed fires in three Australian subalpine eucalypt forests. Canadian Journal of Forest Research, 15: 657-664.
- 49) Rashid,A., Ahmed, T., Ayub, N., Khan, A.G. (1997): Effect of forest fire on number, viability and post-fire re-establishment of arbuscular mycorrhizae. Mycorrhiza, 7:217-220.
- 50) Riswan, S. &Yusuf,R. (1986): Effects of Forest Fire on Trees in the Lowland Dipterocarp Forest of East Kalimantan,Indonesia. Forest Regeneration in South East Asia. BIOTROP Special Publication, Seameo-BIOTROP. Bogor.
- 51) 李雲慶, 大沼一彦, 安田嘉純(1991): 主成分分析による時系列植生指数データの総合特性値の解析, 写真測量とリモートセンシング, Vol.30, No.5, 21-28.
- 52) 李雲慶, 大沼一彦, 安田嘉純(1992): 時系列植生指数データのフーリエ解析, 写真測量とリモートセンシング, Vol.31, No.4, 4-14.
- 53) 沢田治雄, 澤田義人 (2002): 高頻度観測衛星に基づく植生季節変化のモデル化, 環境情報科学論文集 16, 181-186.
- 54) Schindele,W., Priasukmana, S., Thoma, W., and Panzer, K. (1989): The Forest Fire 1982/83 in East Kalimantan. Part I: The Fire, the Effects , the Damage and technical Solutions. FR-Report No.5.
- 55) Setzer, A.W. and Pereira, M.C. (1991): Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. AMBIO 20: 19-22.
- 56) Shimada, M., Tadono, T., and Matsuoka, M. (2002): Calibration and Validation of PALSAR, International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- 57) Siegert, F. and Ruecker, G. (2000): Use of multitemporal ERS-2 SAR images for identification of burned scars in south-east Asian tropical rainforest, INT. J. REMOTE SENSING, VOL.21, NO.4, 831-837.
- 58) Siegert, F. and Hoffmann, A.A. (2000): The 1998 Forest Fires in East Kalimantan (Indonesia): A Quantitative Evaluation Using High Resolution, Multitemporal ERS-2 SAR Images and NOAA-AVHRR Hotspot Data, REMOTE SENS. ENVIRON. 72:64-77.
- 59) Singh, G. (2000): Effects of burning on species performance and soil behaviour of arid land plantation. Journal of Tropical Forest Science,12(2):256-269.
- 60) Slik,J.W.F., Verburg, R.W., Kebler, P.J.A. (2002): Effects of Fire and Selective logging on the Tree

Species composition of Lowland Dipterocarp Forest in East Kalimantan, Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 11:85-98.

- 61) State Ministry for Environment Republic of Indonesia and UNDP. (1998): Forest and Land Fires in Indonesia: Impacts, Factors, and Evaluation. State Ministry for Environment Republic of Indonesia and UNDP.
- 62) Stroppiana, D, Pinnock, S., Pereira, J.M.C., Gregoire, J.M. (2002): Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia, *Remote Sensing of Environment* 82, 21-37.
- 63) Suyono, H. (1984): Damage of a forest stand caused by fire in the educational forest Mulawarman University in Lempake, Samarinda. SI Thesis, Mulawarman University, 59pp. (unpublished, cited by Goldammer and Sibert, 1990).
- 64) 田川日出夫 (1995): 東カリマンタンの熱帯多雨林の大規模火災後の森林回復過程. In: Eds. 田村俊和, 島田周平, 門村浩, 海津正倫, 「湿潤熱帯環境」朝倉書店.
- 65) Tagawa, H., Wirawan, N., Suzuki, E., Shimokawa, E., Oka, N.P. (1999): Pioneer Stages of the Natural Recovery of a tropical Rain Forest in Kutai National Park, East Kalimantan, Indonesia After A Great Scale Fire in 1982-82. In: Pusrehut Special Publication No.8. Impacts of Fire and Human Activities on Forest Ecosystems in the Tropics. Proceedings of 3rd International Symposium on Asian Tropical Forest Management.
- 66) 藤間剛 (1998): 大規模エルニーニョとインドネシア森林火災. *科学* 68(12): 920-924
- 67) 藤間剛 (1999): ボルネオ島東部の異常乾燥と森林火災. *TROPICS* 9 (1): 55-72.
- 68) Toma, t., Matus, P., Sutisna, M. (1999): Fire and human impacts on aboveground biomass of lowland Dipterocarp Forests in East Kalimantan. In: Impacts of Fire and Human Activities on Forest Ecosystems in the Tropics (Suhartoyo, H. and Toma, T. Eds.). Proceedings of 3rd International Symposium on Asian Tropical Forest Management. Tropical Research Center, Mulawarman University and Japan International Cooperation Agency. 297-305.
- 69) Toma, T. (1999): Exceptional Droughts and Forest Fires in Eastern Part of Borneo Island. *TROPICS*, 9(1):55-72.
- 70) Tsuyuki, S. & Yamaguchi, T. (2001): Assessing forest fire in East Kalimantan using satellite remote sensing and GIS. Abstracts linking vegetation processes with remotely sensed data on Borneo: Towards understanding the ecological consequences of land conversion in Borneo. In: Kyoto, Japan. 27-28.
- 71) UN and FAO. (1999): Timber Bulletin vol.52. no. 4: Forest Fire Statistics 1996-1998. UN, New York. 18pp.
- 72) Uhl, C. (1990): Deforestation, Fire Susceptibility, and Potential Tree Response to Fire in the Eastern Amazon. *Ecology*, 71(2):437-449.
- 73) Uhl, C., Clark, K., Clark, H. and Murphy, P. (1981): Early plant successions after cutting and burning in the upper Rio Nefro region of the Amazon basin. *Journal of Ecology*, 69: 631-649.
- 74) Viedma, O., Melia, J. and Garcia-Haro, J. (1997): Modeling Rates of Ecosystem Recovery after Fires by Using Landsat TM Data, *REMOTE SENS. ENVIRON.* 61:383-398.

- 75) Whitmore, T.C. (1983): Secondary succession from seed in tropical rain forests. *Forestry Abstracts* 44: 767-779.
- 76) Wirawan, N. (1983): Progress in the management of protected areas in Kalimantan and consequences of recent forest fires. WWF Project 1687. (unpublished)
- 77) Woods, P. (1989): Effects of Logging, Drought, and Fire on Structure and Composition of Tropical Forests in Sabah, Malaysia. *BIOTROPICA*, 21(4):290-298.
- 78) 山形俊男 (1998): 巨大エルニーニョ発生. 海の異変が世界各地に異常気象を引き起こす. 「ニュートン」, ニュートンプレス, 86-91.
- 79) 山中大学・中島映至 (1998): インドネシア森林火災と気象・気候. 火災 48(2):16-24.

9. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名：生物多様性と森林火災についての科学的かつ技術的共同研究

カウンターパート：Dr. Lilik Budi Prasetyo（インドネシア国ボゴール農科大学）

協力案件名：東カリマンタン研究対象地及び周辺におけるモニタリング，評価とマッピング

参加・連携状況：現地調査の実施，衛星データの共同解析

10. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

なし

(2) 口頭発表

- ①平田泰雅，宮本麻子，李雲慶，秋山秀幸：日本リモートセンシング学会学術講演会論文集，31, 231-232 (2001)
「IKONOS衛星データによる林分密度の抽出－ヘリ搭載LIDAR計測結果との比較－」
- ②加藤知彦・露木聡・平田泰雅・斎藤英樹：日本林学会学術講演集，112, 511 (2001)
「インドネシアにおける森林火災後の植生回復過程の解明－ブキットバンキライ周辺での調査をもとに－」
- ③平田泰雅：森林資源管理と数理モデル第2回シンポジウム-FORMATH TOKYO 2002-,5(2002)
「森林構造の把握および生態スケーリングのためのリモートセンシング」
- ④加藤智彦，露木聡，平田泰雅，斎藤英樹：日本林学会大会学術講演集，113, 353 (2002)
「衛星リモートセンシングを用いたインドネシア森林火災後の広域植生モニタリング」
- ⑤平田泰雅，佐藤香織，Darmawan, A., Prasetyo, L. B.：日本リモートセンシング学会学術講演会論文集，32, 7-8 (2002)
「Landsat TM及びETM+を用いた東カリマンタンにおける森林火災の影響評価」
- ⑥斎藤英樹：日本リモートセンシング学会学術講演会論文集，32, 113-114 (2002)
「SPOT VEGETATIONデータを用いた森林火災回復のモニタリング」
- ⑦平田泰雅：平成14年度森林総合研究所四国支所研究発表会要旨集，6-7 (2002)
「リモートセンシングとGISを用いた森林機能の評価」
- ⑧ Yasumasa Hirata, Tsutomu Enoki, Asako Miyamoto, Miki Fukuda, Tomohiro Nishizono: ForestSAT 2002-Operational Tools in Forestry using Remote Sensing Techniques-, (2002)

「Estimation of Forest Stand Parameters from IKONOS Panchromatic Data」

- ⑨梅原俊彦，小林達治，灘井章嗣，佐竹誠，前野英生，浦塚清峰：日本リモートセンシング学会第学術講演会論文集 33, 263-264(2002)

「航空機搭載SAR(Pi-SAR)による森林火災エリアの同定」

- ⑩Hideki Saito, Yoshito Sawada and Haruo Sawada, Indonesian Forest Fire and its Environmental Impacts, CGER, (2002)

「Development of the Forest Fire Risk Map」

- ⑪齋藤英樹，日本リモートセンシング学会大会講演論文集, 32,(2002)

「SPOT VEGETATIONデータを用いた森林火災回復のモニタリング」

- ⑫平田泰雅・佐藤香織・倉本恵生・古家直行・野村奈津，日本リモートセンシング学会学術講演会論文集，34:9-10. (2003)

「商業用高分解能衛星データを用いた森林構造の抽出」

- ⑬Saito, H., Prasetyo, L. B., Hirata, Y. & Darmawan M., Abstracts of "The International Symposium on Forest Fire and its Impacts on Biodiversity and Ecosystems in Indonesia," (2003)

「Recovery of Burned forest area observed by frequently observation satellite」

- ⑭Hirata, Y., Prasetyo, L.B., Sato, K. and Darmawan, A., Abstracts of "The International Symposium on Forest Fire and its Impacts on Biodiversity and Ecosystems in Indonesia," (2003)

「Evaluation of the forest fire effect on the landscape structure in East Kalimantan using high-resolution satellite data」

- ⑮Tatsuharu Kobayashi, Toshihiko Umehara, Seiho Uratsuka, and Masanobu Shimada, Abstracts of "The International Symposium on Forest Fire and its Impacts on Biodiversity and Ecosystems in Indonesia, (2003)

「Study on the detection of forest fire area with a synthetic aperture radar」

- ⑯Prasetyo, L.B., Saito, H., Hirata, Y. Saito G. Abstracts of "The International Symposium on Forest Fire and its Impacts on Biodiversity and Ecosystems in Indonesia, (2003)

「Forest fire affected area in 1998, 1999 and 2000 of Borneo: A comparison study」

- ⑰Hirata, Y., Nomura, N., Sato, K. Abstract of an international symposium "History & Forest Biodiversity", 43. (2003)

「Extraction of forest patch structure using high-resolution satellite data」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

1 1. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、JICA「インドネシア森林火災予防プロジェクト」等への協力を通じて、本研究で開発された影響評価およびモニタリング手法を提示し、成果の森林火災予防、および将来の森林火災跡地の修復計画へ貢献する予定である。