

山口 靖 教授

退職記念誌

2021 年 3 月

名古屋大学 大学院 環境学研究科

目 次

山口 靖教授の業績	1
履歴	3
チャンスの神の前髪をつかめ ^{*1}	4
資源探査用衛星搭載センサの開発：ASTER 開発秘話 ^{*2}	7
光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング 第1回 ^{*3}	20
光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング 第2回 ^{*4}	27
光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング 第3回 ^{*5}	36
受賞歴	44
研究業績	
I. 原著論文	46
II. 総説など	58
III. 著書	58
IV. 国際学会論文集	60
V. 国際学会発表（山口が発表したもの；**基調講演、*招待講演）	70
VI. その他	79
非常勤講師（集中講義など）	83
特別講義・一般向け講演など	83
名古屋大学での指導学生と論文題目	87
博士学位論文審査の副査	93

*1：東北大学理学部内地質学古生物学教室同窓会誌：IGPS 同窓会ニュース 45 号

（2014 年 7 月発行）「特集・Message 5 一同窓生からのメッセージ」より転載

*2：産工会 WEB サイト：AIST 研究秘話（2019 年 3 月 26 日受理、No. 76、p. 1-14）より
一部修正して転載 https://sankoukai.org/?page_id=433

*3, *4, *5：日本リモートセンシング学会誌（Vol. 39, No. 2, pp. 141-147; Vol. 39, No. 3,
pp. 241-249; Vol. 39, No. 4, pp. 315-322, 2019）より同学会の許諾を得て転載

山口 靖教授の業績



山口 靖教授は、昭和30年5月8日、静岡県に生まれ、昭和53年3月東北大学理学部を卒業、昭和55年3月東北大学大学院理学研究科修士課程を修了し、昭和55年4月通商産業省工業技術院地質調査所研究員に採用、昭和55年10月～同57年4月新エネルギー総合開発機構に出向、昭和62年10月地質調査所主任研究官を経て、平成8年4月名古屋大学大学院理学研究科助教授に転任、平成13年4月同環境学研究科教授に就任、地球環境システム学講座を担当し、名古屋大学に25年余の永きにわたり在職し、令和3年3月定年により退職する。

この間、同氏は、平成20年4月から名古屋大学大学院環境学研究科副研究科長として、研究科の運営に貢献した。平成21年4月からは名古屋大学大学院環境学研究科長として、総合地球環境学研究所との教育研究に関する協力協定の締結、「しんきん環境事業イノベーション寄附講座」の設置、減災連携研究センターの設置の実現など、大学の管理運営に貢献した。また平成30年4月からは、同研究科附属持続的共発展教育研究センター長として、大学院生向けの統合環境学特別コース、自治体や企業等を対象としたコンサルティングファームなどの活動の実施を支援してきた。

同氏は、永年にわたって、地球惑星科学とリモートセンシングの教育、研究に努め、特にリモートセンシングによる地表面マッピングおよび環境変動解析の研究に取り組んできた。鉱物・岩石の可視～近赤外～短波長赤外域での分光反射スペクトルに基づき、光学センサデータによる地質マッピングのための岩相識別法を検討し、直交変換の一種であるスペクトル指標を用いた多バンドデータから効率的に岩相マッピングを行う手法を開発した。この研究により平成元年11月に東北大学から理学博士の学位を授与され

た。航空機搭載合成開口レーダによる画像を使ったリニアメント解析の研究では、マイクロ波の照射方向により、特定方向のリニアメントの選択的強調効果が生じることを明らかにし、この研究成果により平成2年5月に日本リモートセンシング学会論文奨励賞を受賞した。また宇宙航空研究開発機構が平成19年9月に打ち上げた月周回衛星「かぐや (SELENE)」に搭載された月レーダサウンダー (LRS) の副 PI を務め、LRS の中波による能動観測の結果、月の海の地下に玄武岩溶岩による層状構造が存在し、それが月の冷却史に制約を与えることを明らかにした。さらにリモートセンシングを活用した様々な利用分野での研究に力を入れ、光学センサ観測によるグローバルからリージョナルな植生の経年変化と、その変化の気候変動と人為的な要因との関係の解析、植生の光合成活動による二酸化炭素固定量の経年変動の見積もり、光学センサデータによる干ばつ監視のための指標の開発、熱収支に基づく都市域でのヒートアイランド化の実態解明、世界各地の都市の経年的な拡大パターンの比較、合成開口レーダによる地すべりの動きの観測、衛星搭載光学センサの地上ターゲットによる代替校正方法の提案などの研究を行った。これらの研究成果により、平成11年に日本リモートセンシング学会論文賞、平成8年、12年、19年、27年、29年に日本リモートセンシング学会優秀論文発表賞を受賞した。同氏は、これまでに約150本の学術論文を発表し、国際学会での招待講演・基調講演は約20件以上に上る。

また同氏は、米国航空宇宙局 (NASA) の Terra 衛星搭載の地球観測センサ ASTER の日本側サイエンスチームリーダーとして、機器開発、運用シナリオ策定、解析アルゴリズム開発等にも中心的に係ってきた。ASTER は、平成11年12月に打ち上げられ、当初の運用予定であった5年間で大きく超えて現在も運用中である。ASTER による観測データは、同氏らが研究に用いるのみではなく、世界中の研究者や一般人に無償で公開されており、森林・氷河・サンゴ礁などの環境変化の監視、都市・農地などの土地被覆変化の解析、火山噴火・洪水・大規模地滑りなどの自然災害の被害把握、地質マッピングや地下資源探査など、世界中のユーザにより様々な応用分野で利用されている。これらの実績に対して、同氏を含む ASTER および Terra チームは、令和元年6月に NASA から Group Achievement Award を、同年10月に米国内務省および NASA から William T. Pecora Award (Group Award) を受賞した。

教育面では、同氏は25年間の名古屋大学在任中に、延べ47名の学士、43名の修士、21名の博士の指導を行った。このうち留学生は、修士5名、博士12名に上る。また社会人博士3名を含む。同氏の指導を受けた卒業生・修了生は、大学教員、国立研究機関の研究員、民間企業の研究所などで活躍している者も多い。

また同氏は、日本リモートセンシング学会会長、IEEE 地球科学とリモートセンシング学会 (GRSS) 日本支部長、地球観測データ利用ビジネスコミュニティ会長などを歴任し、日本リモートセンシング学会編集委員長、International Journal of Geoinformatics の Associate Editor、Remote Sensing 誌の Editorial Board Member などを務めた。また日本リモートセンシング学会、台湾写真測量とリモートセンシング学会、韓国リモートセンシング学会の三者が共同運営している International Symposium on Remote Sensing (ISRS) の2017年大会の実行委員長を務め、名古屋大学を会場として11ヶ国から計516名の参加者と340件の発表により、日本での2回目の開催を成功させた。さらに科学技術振興機構 (JST) の地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) 研究主幹、宇宙システム開発利用推進機構 (JSS) の探査基盤技術高度化支援事業の事業評価委員長、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の金属資源探査技術開発研究会委員などを歴任し、学外における社会活動にも積極的に尽力した。

以上のように、同氏は、地球惑星科学とリモートセンシングに関する多方面の研究・教育の発展に貢献してきた。

履 歴

1955 年 5 月 8 日 静岡県引佐郡引佐町（現浜松市北区引佐町）で出生
1974 年 3 月 静岡県立浜松北高等学校卒業
1974 年 4 月 東北大学理学部地学科入学
1978 年 3 月 同上卒業
1978 年 4 月 東北大学大学院理学研究科地学専攻修士課程入学
1980 年 3 月 同上修了
1980 年 4 月～1987 年 9 月 通商産業省工業技術院地質調査所研究員
1980 年 10 月～1982 年 4 月 新エネルギー総合開発機構出向
1984 年 11 月～1986 年 3 月 スタンフォード大学応用地球科学部客員研究員
1987 年 10 月～1996 年 3 月 通商産業省工業技術院地質調査所主任研究官
1988 年 4 月～1996 年 3 月 早稲田大学教育学部非常勤講師
1989 年 11 月 理学博士（東北大学）
1996 年 4 月～2001 年 3 月 名古屋大学大学院理学研究科助教授
2001 年 4 月～2021 年 3 月 名古屋大学大学院環境学研究科教授
2008 年 4 月～2009 年 3 月 名古屋大学大学院環境学研究科副研究科長・名古屋大学評議員
2009 年 4 月～2011 年 3 月 名古屋大学大学院環境学研究科研究科長・名古屋大学評議員
2012 年 5 月～2014 年 5 月 日本リモートセンシング学会会長
2014 年 5 月～2020 年 7 月 地球観測データ利用ビジネスコミュニティ会長
2016 年 1 月～2017 年 12 月 IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS)
All Japan Chapter Chair
2018 年 4 月～2021 年 3 月 名古屋大学大学院環境学研究科
附属持続的共発展教育研究センター長
2020 年 4 月～ 科学技術振興機構 (JST)
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) 研究主幹
2021 年 3 月 名古屋大学定年退職

チャンスの神の前髪をつかめ

山口 靖（昭和 53 年卒業）

〔名古屋大学大学院環境学研究科 教授〕

私は、リモートセンシングという手段を用いて様々な観測対象を研究しています。日本地質学会の会員でもあります。主な学会活動の場は日本リモートセンシング学会です。学生時代とはかなり異なる研究分野に進んだ一例として、こういう道もあるということをご紹介させていただきます。振り返ってみると、現在の私があるのは、多くの方々に様々な場でチャンスを与えていただいたお陰だと思っています。

私の卒論・修論のテーマは北部北上山地の地質構造発達史でした。修士課程の頃は、このまま博士課程に進学して調査範囲を広げ、この研究テーマの延長で博士学位を取るのかなと漠然と考えていました。一方で別の研究テーマにも興味は持っていましたが、それに踏み出す機会はずかしくてモヤモヤした気持ちでいました。そんな状況で受けた国家公務員試験に幸運にも合格することができました。当時は第 2 次オイルショックの影響で石油代替エネルギー開発の重要性が叫ばれており、地質調査所に地熱資源に関する新部門が出来たところでした。地質調査所の面接に行くと「地熱資源をやって貰うので、中古生界の研究は続けられないが良いか」と言われました。中古生界に未練はありましたが、研究職としての就職のチャンスでしたし、新しいことを始めたいという気持ちもあって就職を決めました。修士課程を修了して 1980 年 4 月に入所したら、配属先の上司はリモートセンシングを研究している長谷紘和さんで、地質学古生物学教室の先輩でした。ただ私にはリモートセンシングは馴染みのない分野でした。

1980 年の夏頃、10 月に設立される新エネルギー総合開発機構（NEDO）への出向を打診されました。4 月採用の新人が 10 月から出向というのは異例で、不安もありましたが、何となく面白そうだと思って出向を受諾しました。NEDO での仕事内容は国への予算要求や業者への発注など研究とは程遠いものが主でしたが、今まで全く知らなかった世界は楽しくもありました。担当になったレーダ映像法（リモートセンシングの一つ）の勉強も、仕事の合間に少しずつしました。

1982 年 4 月に出向を終えて地質調査所に戻り、地熱資源の研究と同時に、ちょうど通産省が開発を進めていた地球資源衛星 1 号（JERS-1）に関連するリモートセンシングの研究に参加しました。そんな中の 1984 年の 6 月、地質リモートセンシングの権威であるスタンフォード大学の Ronald Lyon 教授が来日しました。Lyon 教授からは、1 年間勉強に来ないかという打診が来日前にあったので、かなり期待していましたが、実際に会ってみると予想していた条件とは相当に隔たりがあり、一度は留学を諦めました。その当時は日本政府派遣の留学制度で海外に行けるのは 35 歳直前の人と相場が決まっていた、しかも留学できる人数も極めて限られていました。条件は良いが行ける確率の低い 6 年後の留学機会を待つか、それとも条件は悪くてもこの機会に留学するか、考えた末に後者を選びました。

ある人から聞いた「チャンスの神の前髪をつかめ」という言葉が、私の背中を押してくれたのです。1984年11月に米国に着いた時、私は29歳でした。1ドル250円の時代で経済的には厳しい生活を強いられましたが、若いうちにリモートセンシングの基礎を勉強できたことは幸運でした。留学期間は結局約1年5ヶ月間となり、1986年3月末に帰国しました。

帰国すると JERS-1 の開発が進んでいましたが、さらに JERS-1 の後継センサ ASTER を米国 NASA の EOS 計画に提供するプロジェクトが、通産省によって開始されました。地質調査所はこのプロジェクトに協力することになり、私は米国側との連絡役になりました。まず ASTER の観測性能要求（観測波長、空間分解能など）を取り纏めることが大きな仕事で、日米の研究者やセンサ製作メーカーなどとの議論と交渉が延々と続きました。次は地上データ処理システムの設計、データ処理アルゴリズムの開発、データ取得のための運用計画の策定など、やるべき事は次々に出てきました。人工衛星の開発には時間が掛かります。ASTER が NASA の Terra 衛星で打ち上げられたのは1999年12月で、データが入手できるようになったのは2000年からです。それ以来、ASTER データを私自身が様々な研究で活用していますし、世界中で多くの人たちに利用していただいています。ASTER の設計寿命は5年ですが、ASTER も Terra もまだ健在で、今年3月に第44回の日米 ASTER サイエンスチーム会議を行ったところです。この ASTER プロジェクトに関われたことは、私にとって非常に幸運だったと思っています。

また1995年頃、月レーダサウンダー（LRS）の搭載を JAXA（当初は宇宙科学研究所）の月探査計画に提案したことも忘れられません。リモートセンシングでは地下が見えないことが大きな欠点ですが、表面に水のない月で電波を使えば、ある程度まで地下構造が見えるはずだと考えたのです。私には地下探査レーダの装置開発の知識も経験も無かったのですが、東北大地物の小野高幸先生と巡り会うことができ、プラズマ圏観測用のサウンダー技術が LRS に生かせることがわかったため、共同で提案書を作りました。それから約12年、LRS を搭載した月周回衛星「かぐや（SELENE）」は2007年9月に打ち上げられ、2009年までデータ取得を続けました。そして、波長約60mの電波により月の海の地下約2kmまでの地質構造の検出に成功し、この研究成果を2009年に Science 誌に発表しました。時間はかかりましたが、私にとっては夢が実現した研究プロジェクトでした。

一方、1995年の春、名古屋大学の小川克郎教授（元地質調査所長）から突然お電話があり、大学院重点化に伴って新しい講座を作るので来ないかというお誘いを受けました。地質調査所での仕事は忙しくも充実していたのですが、新たな環境に移ることも魅力的に思い、1996年4月に名古屋大学の理学研究科地球惑星理学専攻に異動しました。さらに2001年4月には大学院環境学研究科が設立され、地球惑星理学専攻は全員揃って環境学研究科地球環境科学専攻に移りました。環境学研究科は、理学系（地球惑星科学と大気水圏科学）、工学系（土木、建築など）、文系（環境政策、社会学、地理学、心理学など）の3専攻から成っています。私の講座は「地球環境システム学講座」という名称で、研究科の設立理念である文理連携を中心的に進めることがミッションです。幸いなことに私が専門としているリモートセンシングは、様々な分野で観測ツールとして利用できるため、他の研究分野

と連携しやすいという利点があります。このため、地質マッピングへの適用だけでなく、陸域植生による炭素収支の定量評価、都市のヒートアイランド化や都市成長パターンの解析などといった研究テーマにも手を広げています。

これまでの私の研究履歴を振り返ってみると、長期的な展望を持って一つの方向に進んで来たというよりは、場当たりの面白そうだった方向に舵を切って来たと言えます。結果として学生時代とはかなり異なる分野を研究対象としていますが、それなりに楽しく研究をさせていただいています。周囲を見渡してみると、学生時代とは研究分野が変わった研究者は案外大勢います。新たな分野に挑戦するのは、不安を感じることも多いですが、思い切ってやってみたら案外上手くいったり、それまで知らなかった知識に刺激を受けたりということもあります。また新たな分野に挑戦するチャンスは、自分から意図的に作ることもあるでしょうし、周囲から与えていただくこともあります。後者のような場合、チャンスは本人が予期していない時に訪れ、直ぐに通り過ぎてしまうこともあるでしょう。そうしたチャンスを逃がさないよう普段から心の準備をしておき、チャンスだと思ったら、チャンスの神様の前髪をつかめると良いと思います。

東北大学理学部内地質学古生物学教室同窓会誌：IGPS 同窓会ニュース 45 号（2014 年 7 月発行）「特集・Message 5 一同窓生からのメッセージ」より転載

資源探査用衛星搭載センサの開発：ASTER 開発秘話

山口 靖・津 宏治

要 旨

NASA の地球観測衛星 Terra に搭載されている画像センサ ASTER の構想、開発、運用の歴史を紹介した。ASTER の開発は、日米の ASTER サイエンスチームを中心に進められ、ユーザ側からの声が強く反映された。ASTER と Terra は、設計寿命の 5 年を大きく超えて運用中であり、2019 年 12 月には 20 周年を迎える予定である。

1. はじめに

最近、テレビやパソコン、スマホなどで地球の様々な場所の衛星画像を見る機会が多くなった。朝の天気予報で見ている雲の動きも、静止気象衛星から送られてきた画像である。こうした画像は、リモートセンシング技術によって取得されている。リモートセンシングは、電磁波を用いて非接触でデータを取得する技術と定義されているが、データを取得するセンサが人工衛星や航空機、最近ではドローンなどに搭載されるため、一度に広域を観測することができる、繰り返し観測ができる、現場に行く前にデータを入手できる等の利点があり、様々な分野で利用されている。産総研傘下の地質調査総合センターが守備範囲としている地質マッピングや地下資源探査においても、リモートセンシングは遠隔地の地質情報収集や探査の初期段階などで活用されている。一方、衛星搭載センサの開発は、ハイテク分野であり、取得・蓄積されたビッグデータからの情報抽出は、IT 分野でもある。筆者らがリモートセンシングに係るようになったのは、工業技術院傘下の地質調査所に勤務していた頃、衛星搭載センサの開発にユーザ側から参加する機会を得られたためである。その当時から、衛星搭載センサの開発やデータ利用は、当時の通商産業省（以下、通産省と略）や工業技術院の関心の対象でもあった。

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer（ASTER）は、NASA の地球観測衛星 Terra に搭載された日本製の画像センサである（図 1）。1999 年 12 月に打ち上げられ、当初の設計寿命は 5 年間であったが、現在もデータ取得を続けており、今年の 12 月に打ち上げ 20 周年を迎える。これまでに日本が打ち上げた人工衛星のうち、20 年以上の運用実績を持つのは、1986 年打ち上げのあじさい、1989 年打ち上げのあけぼの、1992 年打ち上げの GEOTAIL しかなく、いずれもスピン安定の科学衛星である。Terra は NASA の衛星ではあるが、3 軸制御の低高度極軌道衛星として、これまで大きなトラブルなしに 20 年近く運用を続けて来られたのは、衛星設計や運用の優秀さの賜物であろう。また Terra に搭載されている 5 つのセンサ（ASTER、MODIS、MISR、MOPITT、CERES）も、一部に不具合は発生したものの、いまだに貴重な観測データを取得し続けていることは、賞賛に値する。本稿は、ASTER 打ち上げ 20 周年という節目を捉え、ASTER の構想から開

発、運用段階に至るまでの様々な逸話をご紹介するものである。

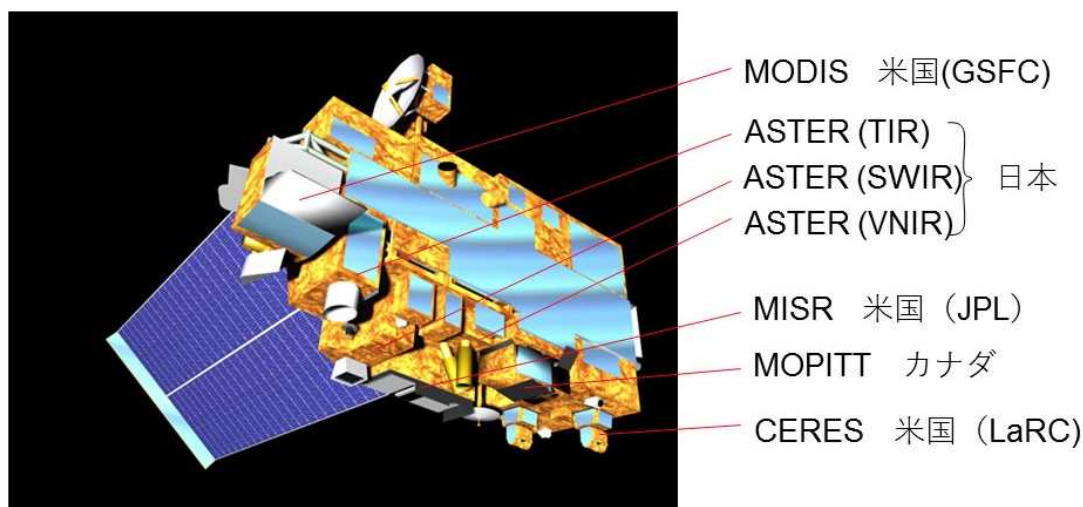


図1 Terra 衛星と搭載されている観測センサ

2. OPS から ITIR、そして ASTER へ

通産省が、地球観測センサの開発に本格的に取り組むようになったのは、1992 年に打ち上げられた地球資源衛星 1 号 (JERS-1) の時からである。JERS-1 の衛星本体は、宇宙開発事業団 (当時) が開発を担当したが、光学センサ (OPS) と合成開口レーダ (SAR) という 2 つの観測センサの開発は、通産省が担当した。これらのセンサの開発段階にあった 1986-1987 年頃、通産省では既に JERS-1 の後継センサの検討が始まっていた。手元にある資料では、その後継センサの候補として Intermediate Thermal Infrared Radiometer (ITIR: 日本語名では中間熱赤外放射計) が出てくるのは 1987 年 1 月からであるが、その前年から検討は始まっていた。ITIR は、JERS-1 搭載センサの EM (Engineering Model) フェーズの開発を担当した資源リモートセンシングシステム技術研究組合 (RRSS) から、米国 NASA の極軌道プラットフォーム (POP) 搭載用センサとして提案されたものである。その後、1987 年 5 月にカナダのオタワで開催された第 5 回宇宙ステーション極軌道プラットフォームの地球観測利用に関する調整会議 (POP 調整会議) には、日本側出席者として科学技術庁研究開発局宇宙開発課及び宇宙開発事業団宇宙実験グループからの参加者に加えて、通産省機械情報産業局宇宙産業室長が加わっている。この会議の議事メモを見ると、米国が打ち上げ予定の POP へ搭載する地球観測センサの候補として、日本側からは AMSR (マイクロ波放射計) と ITIR が挙げられている。

1987 年 9 月付の通産省と資源探査用観測システム研究開発機構 (JAROS) の共同での提案書によれば、ITIR の構成は近赤外域に 1 バンド、短波長赤外域に 5 バンド、熱赤外域に 5 バンドとなっているが (表 1)、熱赤外域の 1 つのバンドは $3.5\ \mu\text{m}$ 帯であり、地表面からの放射を捉えるのに一般的に使われる $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 帯には 4 バンドが配置されていた。

表 1 ITIR の諸元。1987 年の通産省と JAROS の提案書の一部を編集・和訳。

項目			
観測バンド	波長域	バンド数	空間分解能
	近赤外域: 0.85 – 0.92 μm	1	15 m
	短波長赤外域: 1.60 – 2.36 μm	5	15 m
	熱赤外域: 3.53 – 11.7 μm	5	60 m
重量	290 kg		
消費電力	650 W		

同じ頃、米国側では NASA のジェット推進研究所 (JPL) の Anne Kahle 氏をリーダーとして、Thermal Infrared Ground Emission Radiometer (TIGER) というセンサが、POP への搭載候補として提案されていた。このセンサは、1 本の望遠鏡を画像センサとプロファイラ (画像は取得せず、波長方向の詳細なスペクトルデータを取得) が共有し、画像センサは波長 3~5 μm に 4 バンド、8~13 μm に 10 バンドを配置し、空間分解能は 90 m という仕様であった。このように TIGER と ITIR は、どちらも高い空間分解能を持つ熱赤外域の画像センサであり、観測目的や機器仕様に共通性があった。このため NASA 本部は、Kahle 氏に対して日本側と協議し、ITIR と TIGER を統合した提案とするよう働きかけた。

一方、日本側では ITIR の仕様の検討が進み、1989 年 2 月頃には可視・近赤外域に 3 バンド、短波長赤外域に 6 バンド、熱赤外域に 3 バンドという改訂案が示された。可視・近赤外域と短波長赤外域のバンドが増え、熱赤外域のバンドが減っている。特に短波長赤外域のバンドは、鉱物の識別に有効な波長域に設定された。こうした中、Kahle 氏をはじめとする米国側の TIGER チームの 3 名が、1989 年 3 月 8 日につくばの工業技術院を訪問し、TIGER と ITIR の協力について議論を行った。Kahle 氏は熱赤外リモートセンシングの世界的権威であり、TIGER も熱赤外域を売りにしたセンサであった。ところが日本側の仕様検討によれば、上記のように ITIR の熱赤外域のバンド数が減り、それ以外の波長域のバン

表 2 ASTER の観測性能要求 (Yamaguchi et al., 1998)

項目			
観測バンド	波長域	バンド数	空間分解能
	可視・近赤外域: 0.52 – 0.86 μm	3	15 m
	短波長赤外域: 1.60 – 2.43 μm	6	30 m
	熱赤外域: 8.125 – 11.65 μm	5	90 m
重量	406 kg		
消費電力	726 W		

ド数が増えていたため、来日した Kahle 氏は不満を隠さず、「あなたたちの検討は、誤った方向に行っている」と主張した。結局、Kahle 氏からの強い要求もあり、ITIR は熱赤外域のバンド数を 5 つに増やし、最終的には表 2 のような観測性能要求となった。その後、ITIR は、ASTER に改称され現在に至っている。

3. ASTER センサの特長

ASTER の最大の特長は、可視・近赤外～短波長赤外～熱赤外域にわたる幅広い波長域を高い空間分解能でカバーしていることであるが、同じ観測センサのカテゴリーに含まれる米国の Landsat 衛星の TM センサとは、大きな違いがある。TM は基本的に一つの観測センサであり、一つの焦点面に検出器が並んでいるのに対して、ASTER は可視・近赤外放射計 (VNIR)、短波長赤外放射計 (SWIR)、熱赤外放射計 (TIR) の 3 つの独立したサブシステムからなり、各サブシステムの焦点面に検出器が並んでいる。このため、広い波長域をカバーするデータセットとして最終的にユーザに提供する際には、各サブシステムの観測バンド間での位置合わせ (レジストレーション) を行わなければならない。これは、データ取得後に地上データ処理で行うことになり、その分だけ ASTER のほうが地上データ処理の負担が大きいことを意味する。しかし、一方でそれぞれの波長域毎にサブシステムを独立させたことによって、各波長域に応じた最適なハードウェア設計とすることが可能となった (表 3 ; Fujisada et al., 1998)。

表 3 ASTER のサブシステムの構成 (Fujisada et al., 1998)

Subsystem	VNIR	SWIR	TIR
Scan	Pushbroom	Pushbroom	Whiskbroom
Telescope optics	Reflective	Refractive	Reflective
Spectrum separation	Dichroic and band pass filter	Band pass filter	Band pass filter
Focal plane	Si-CCD 5000 x 4	PtSi-CCD 2048 x 6	HgCdTe (PC) 10 x 5
Cryocooler	not cooled	Stirling cycle, 77 K	Stirling cycle, 80 K
Cross-track pointing	Telescope rotation $\pm 24^\circ$	Pointing mirror rotation $\pm 8.55^\circ$	Scan mirror rotation $\pm 8.55^\circ$

VNIR は、直下視の 3 バンドに加えて後方視の 1 バンドを持っており、地表面の立体視観測 (BH 比 0.6) が可能である。フランスの SPOT 衛星などの複数軌道からの側方視方式ではなく、JERS-1/OPS を継承した同一軌道内立体視であり、直下視と後方視間の撮像時間差は 55 秒しかないため、地表面の時間変化がほとんどなく、雲のない画像ペア取得確率

も高い。立体視データは、肉眼による地形・地質判読に役立つだけでなく、デジタル地形モデル (DEM) の作成に使うことができ、後述する GDEM (全球 DEM) の作成・提供に繋がった。また VNIR は、クロストラック方向に $\pm 24^\circ$ のポインティング機能を有しており、自然災害などに対する緊急観測を行う際に、観測までの時間短縮に貢献している。

図 2 に名古屋周辺の ASTER の画像例を示す。VNIR 画像では植物の分布が良く分かり、TIR 画像では表面温度が分かる。これらの異なる波長域の画像が同時に取得できるのが、ASTER の大きな利点である。二つの画像を比較すると植物の分布域は、葉からの水分の蒸発散により、表面温度が周囲よりも低くなっており、都市のヒートアイランド化をある程度抑制していることが理解できる。

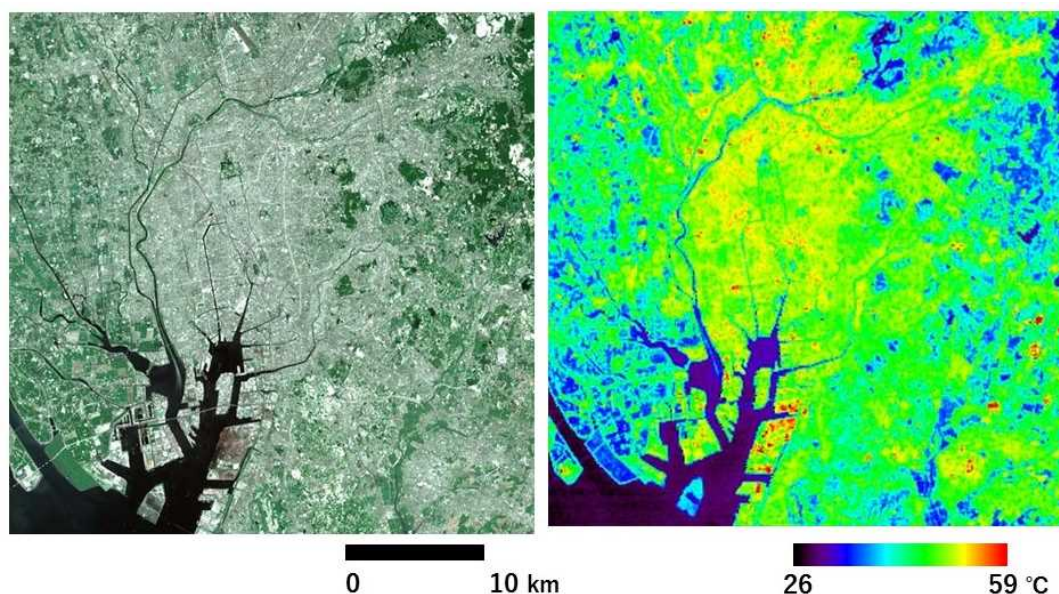


図 2 ASTER の名古屋市周辺の画像例。左：VNIR 画像、右：TIR 画像による表面温度 (imagery courtesy "NASA/METI/AIST/JSS ASTER")。

4. ASTER サイエンスチームの役割

前述のように ASTER センサの仕様は次第に固まっていたが、その過程で重要な役割を果たしたのは、日米の科学者からなる ASTER サイエンスチームである。衛星搭載センサに対応したサイエンスチームを組織するのは、今では日本でも普通になっている。しかし、ASTER の開発が始まった 1990 年頃、少なくとも日本の地球観測分野では、センサに対応したサイエンスチームを明確に決め、ハードウェア製作側と連携して開発を進める体制は、前例が無かった。一方、米国では科学者が中心となったサイエンスチームが衛星搭載センサの開発・搭載を NASA に対して提案し、その提案が認められればサイエンスチームが中心となってハードウェア製作側と連携しながらセンサを作り上げてゆく体制となっている。ASTER の開発においては、センサ製作は日本側で行うものの、センサを搭載するのは

NASA の衛星であることから、NASA の開発体制に倣って日米の科学者からなる ASTER サイエンスチームを組織することとなった。

前述した JERS-1 の開発においては、当時の通産省が資源探査という目的のためにセンサ開発を担当したため、ユーザ側からの様々な要求を出すことができた。しかし、資源探査分野のユーザが衛星プロジェクトにまだ不慣れであったこと、既に当時の宇宙開発事業団による開発がある程度進んでいて、ユーザ側が関われる範囲が限られていたことなどの反省点があった。このため、ASTER プロジェクトでは、開発当初の通産省の担当者のご理解もあり、ユーザ側からの声を最大限に生かそうという方針が、当初から徹底されていた。

ASTER サイエンスチームのリーダーは、日本側が地質調査所（当時）の津 宏治、米国側がジェット推進研究所（JPL）の Anne B. Kahle 氏が務めた。現在は、日本側が名古屋大学の山口 靖、米国側が JPL の Michael Abrams 氏に交代している。ASTER サイエンスチーム会議は、原則として年に 2 回、そのうち 1 回は日本、もう 1 回は米国で開催していたが、この数年間は日本側の予算不足のため、年に 1 回だけ日本で開催している。ASTER サイエンスチームの活動は、既に約 30 年の歴史があり、今年 6 月には第 50 回のサイエンスチーム会議を開催する予定である。この ASTER サイエンスチームの活動が、日本側の若手の研究者を育て、その後の様々な衛星プロジェクトを中心となって推進してゆく人材を造ったことは事実であり、人材育成面での貢献も大きい。

サイエンスチームの中には WG がいくつか設けられ、サイエンスチーム会議で活発な議論を行う場となった。WG は、プロジェクトの進行に伴って新設されたり、統合・廃止されたりしてきたが、1995 年頃と 2018 年現在の WG は以下の通りである。

1995 年の第 10 回 ASTER サイエンスチーム会議での WG ; 運用・ミッション計画 WG、レベル 1 処理 WG、放射補正 WG、幾何補正 WG、DEM WG、温度・放射率分離 WG、大気補正 WG、地質 WG、エコシステム・海洋 WG、高次レベルデータプロダクト WG、航空機センサ WG、スペクトルライブラリー委員会、STAR 委員会

2018 年の第 49 回 ASTER サイエンスチーム会議での WG ; 運用・ミッション計画 WG、レベル 1 処理・DEM WG、放射補正 WG、温度・放射率分離 WG、応用（地質、エコシステム、海洋）WG、STAR 委員会

サイエンスチームの最初の仕事は、前述したようにセンサの観測性能要求を決めることで、それに基づいてセンサの開発仕様書が作成された。それまで日本の地球観測ユーザは、大まかな観測性能要求を作ることはあったが、ASTER の開発のように詳細な観測性能要求や校正計画まで立ち入って決める経験は乏しかった。従来は、観測性能要求を聞かれた際に例えば空間分解であれば「高ければ高いほど良い」といった要求を出すことが多く、それによって SN 比や量子化ビット数など他の重要な観測性能が犠牲になり、総合的にみてユーザが満足できるデータとならない場合もある。それに対して ASTER の開発では、ユーザ側も様々な観測性能間のトレードオフを考慮しながら、重量・電力・データ量・予算・開発期間などの制約内で許される最善の観測性能要求として取り纏めた。これが可能であったの

は、JERS-1 での開発経験がある程度役立ったこともあるが、ハードウェア開発についての知識と経験が豊富な電子技術総合研究所の藤定広幸氏と計量研究所の小野 晃氏のお二人が、サイエンスチームのメンバーとして加わっていたことが大きかった。また、基本的にユーザ要求を重要視するという、プロジェクトとしての姿勢が最大の鍵であった。観測性能要求を議論する会議は、藤定氏と小野氏のリーダーシップのもと、ハードウェア製作側とユーザ側との間で何度も開催され、長時間の議論となることが常であった。また日本側と米国側との間の議論も、サイエンスチーム会議の場などで盛んに行われた。

例えば、観測バンド数と波長位置の決定には、日米 ASTER サイエンスチーム内で長く活発な議論があった。米国側サイエンスチームにはリモートセンシングの世界的な権威が何名も揃っているのに対して、日本側はまだ若いメンバーが多く、最初の頃は全く歯が立たないのではないかと気後れした。しかし、米国側はこれまでの実績や権威を笠に着て頭ごなしに主張することは無く、しっかりしたデータを基にして議論すれば、実績の乏しい日本側の話も真剣に聞いてくれた。前述のように熱赤外域のバンド数については、米国側の強い主張を受け入れた面があったが、可視・近赤外域と短波長赤外域のバンド数と波長位置については、日本側の検討結果と主張を受け入れてくれた。最終的に観測性能要求が日米のサイエンスチーム間で合意できた時のホッとした気持ちは、今でも良く憶えている。

5. 地上データ処理と運用シナリオについて

センサの観測性能要求が固まりセンサの開発が本格的に開始されると、次は地上データ処理システムの検討が始まった。日米間での役割分担としては、まず米国側の受信施設で Terra 衛星からの生（レベル 0）データを受信し、それを日本側に送り、日本側がユーザに提供する最も基本的なレベル 1 データ（センサ入口での放射輝度に対応）に処理する。処理済のレベル 1 データのコピーは、全て米国側にも送り返し、日米双方がさらに進んだレベル 2 以上の高次処理データを作成する。これらのデータプロダクトは、日米のデータセンターから、世界中のユーザに提供される（図 3）。

その当時は、衛星データの地上処理は、メインフレームと呼ばれる大型のコンピュータで行うのが普通であったが、ASTER の地上データ処理は性能向上が著しいワークステーションで行うとの方針になった。今では誰も驚かないが、その当時としては斬新であったと思う。また、米国から日本へのデータ伝送も大きな課題であった。これも今ではネットワーク経由で問題なく送れるが、ASTER プロジェクトの開始当時は、緊急観測データのみが日米間のネットワーク（海底光ケーブル）経由で送られて来て、その他の大部分のデータは、磁気テープに収められ、航空機便で定期的に送られてきていた。

ASTER の運用が順調に進み、データが蓄積されてくると、その蓄積されたデータを活用したデータプロダクトの作成も始まった。代表的なものが、全球 DEM（Global Digital Elevation Model: GDEM）である。ASTER のような光学センサは、雲があるとその下は観測できないが、雲の位置は時間変化する。このため、撮像時期の異なる立体視データから作

成した DEM を多数蓄積し、雲のない部分の DEM を重合することにより、雲被覆による抜けの少ない高精度の DEM を作ることができる。このデータプロダクトを GDEM と名付け、2009 年 6 月から無償でユーザに配布している。GDEM の配布前に広く使われていたのは、スペースシャトル搭載の合成開口レーダによる Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) で作成した DEM であった。ASTER GDEM も SRTM DEM も空間分解能は 30 m と同じであるが、SRTM DEM の対象範囲は緯度約 60 度までに限定されるのに対して、GDEM は緯度約 83 度までカバーしている。

ASTER のデータプロダクトのユーザへの配布は、2016 年 3 月までは少額の課金 (Marginal cost) がなされていたが、2016 年 4 月以降は、日米いずれからのデータ配布も無償となり、ユーザ数やダウンロードされたデータ数・量が爆発的に増えた。例えば、2016 年から 2018 年 4 月までの 2 年間で、ASTER のレベル 1～3 データプロダクトは、米国側からだけで 2,400 万ファイル以上がユーザに配布された。また ASTER GDEM は、この約 2 年間に 5,500 万ファイル以上が配布されたとのことである。世界的にも政府が関連した地球観測衛星のデータは、無償でユーザに配布される “Open and free” が主流となっており、ASTER のデータ配布も、その潮流に乗っていると言える。

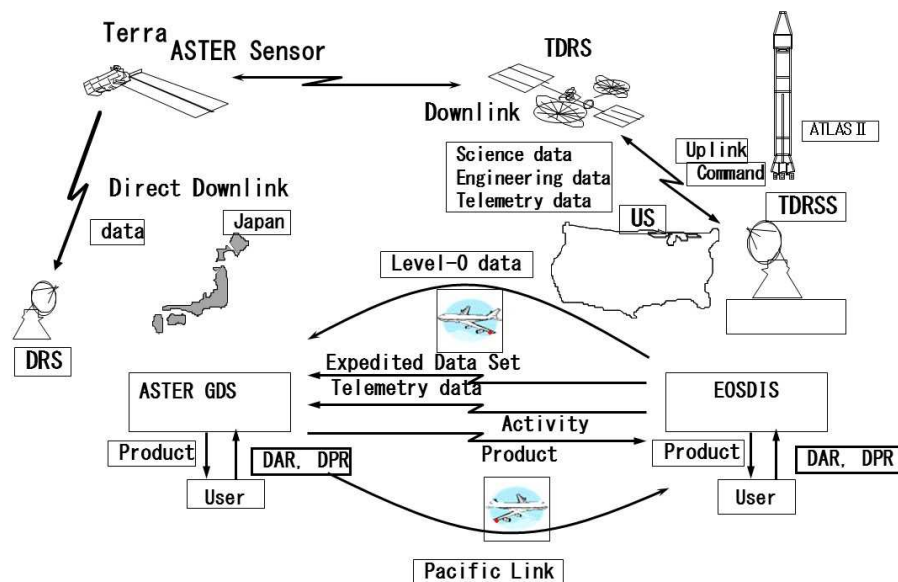


図 3 ASTER データ処理に関する日米間での役割分担。2002 年頃。

ASTER の運用計画の立案も、大きな課題であった。ASTER は、Terra に搭載された 5 つの観測機器の中では画像の空間分解能が最も高く、取得データ量が大きいため、平均して約 8% の運用率に相当するデータ取得のみが許された。このため、運用率 100% の MODIS

などとは異なり、撮影対象域を軌道毎に決め、それに応じて ASTER の各サブシステムの運用を行わなければならない。そのために予めユーザから撮像希望対象の地理的範囲、撮像頻度、撮像モード、ゲイン設定などのデータを集め、データベースに格納した。そのデータベースに基づき、様々な基準によって予め決めておいた撮像優先度の計算を行い、各観測日の観測スケジュールを自動的に計算して作成することにした。さらに自然災害や地上校正などの直前の観測要求や、雲被覆の予報なども取り込むことが出来るよう、観測要求は数日前に作成するバックアップ用のものと、観測直前にアップデートしたものの2種類を作成し、2つのタイミングで NASA に毎日送る仕組みを作った。こうした運用シナリオ造りは、基本的な方針から細かい運用ルールまで、決めるべきことやプロジェクトの進行に応じて見直すべきことが多く、実際の運用の最初の 2、3 年間は試行錯誤の連続であった。その結果、今では安定して ASTER を運用できており、1 日当たり約 600 シーン（1 シーンは 60 km 四方）のデータを取得し続けている。図 4 に示したように、世界の陸地のほとんどは、ASTER によって最低 1 回は撮像済みであり、ほとんどの地域は複数回撮像されている。

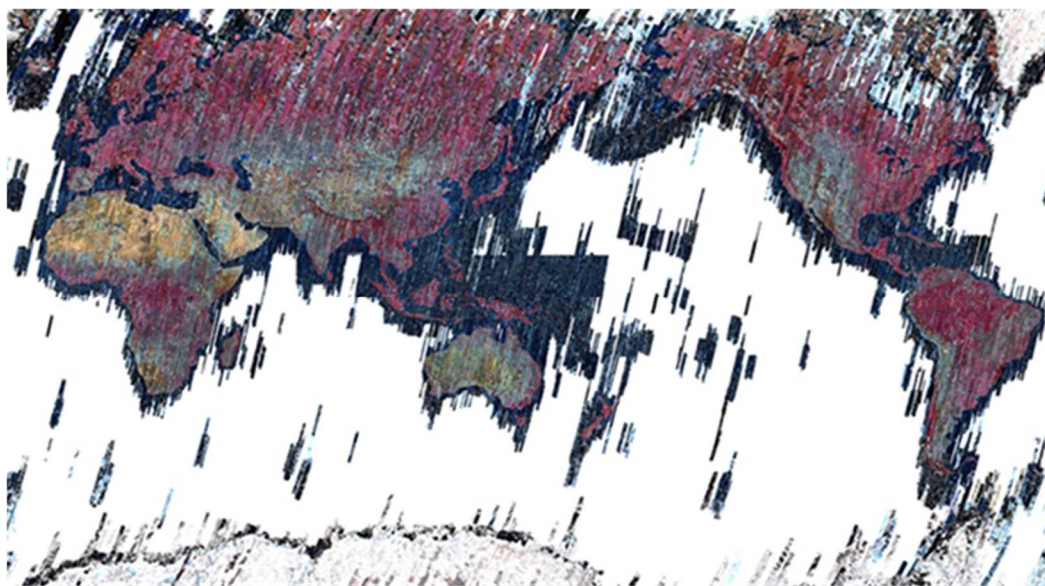


図 4 ASTER のレベル 1 データのブラウザ画像のモザイク。陸域はほぼ網羅した。

6. ASTER 後継機について

ユーザにとっての大きな関心事は、データの継続性である。NASA の EOS 計画が最初に立案された頃、大型の地球観測衛星を合計 6 機打ち上げる計画であった。いずれも太陽同期の低高度極軌道衛星で、そのうち 3 機は赤道上空通過地方時が午前の衛星、3 機は午後の衛星で、それぞれ EOS-AM1, 2, 3、EOS-PM-1, 2, 3 と呼ばれていた。各衛星の寿命は 5 年間で、合計して 15 年間の観測を継続する計画であった。EOS 計画の主要な目的は地球環境変動の衛星による観測・監視であるが、環境変化の多くは僅かであり、短い観測期間では捉

えるのが難しいため、出来るだけ観測期間を延ばすことにより、変化や変動を捉えようという目論見である。結果的に EOS 計画で打ち上げられた大型の地球観測衛星は、午前軌道の Terra (EOS-AM1 に相当) と午後軌道の Aqua (EOS-PM1 に相当) の 2 機になってしまったが、この 2 機が当初の設計寿命を大幅に超えて今でも観測を継続しているのは、予想外の喜ばしい状況である。そして観測期間が延びたことにより、地球環境の変化や変動が捉えられた事例が増えてきている。

しかし、Terra も ASTER も永久に動き続けることはあり得ず、いずれかのタイミングで運用停止になることは必然である。従ってユーザとしては、観測の継続性を担保するため、後継となる観測センサの開発を望むことになる。ASTER の後継センサについても、当初の設計寿命が終わる前の 2004 年頃には関係者の間で議論が始まった。ちょうど同じ頃、米国の陸域リモートセンシングの代表である Landsat シリーズの後継についても、米国内で議論が行われていたが、その時点では後継がどうなるのか、米国政府の方針は固まっていなかったように思われた。このため、日米の ASTER サイエンスチームのメンバーを中心として、様々な国々のリモートセンシングデータのユーザや研究者を巻き込み、ASTER と Landsat を統合した後継ミッションの提案を短時間で取り纏めた。そして「Landsat/ASTER 後継ミッションの日米共同開発／打ち上げ／運用に関する提案書」として 100 名以上の賛同者の署名を付け、2004 年 4 月 16 日付で NASA 本部地球科学担当副長官、経済産業省宇宙産業室長、米国地質調査所所長、資源・環境観測解析センター専務理事宛に提出した。後日、NASA 副長官と米国地質調査所所長からは、提案内容は興味深いが、残念ながら採択することは難しい旨の回答が届き、Landsat/ASTER の共同開発は実現しなかった。その後、Landsat 計画は、米国が独自に後継機の開発を進め、現在も Landsat Data Continuity Mission (LDCM) として継続していることは、周知のとおりである。

ASTER と類似した観測バンドを持つ地球観測衛星として、民間企業の Digital Globe 社が 2014 年 8 月に打ち上げた World View-3 がある (<http://worldview3.digitalglobe.com/>)。この衛星は、可視・近赤外域に 8 バンド、短波長赤外域に 8 バンドを持つが、特に波長 2.1 ~ 2.4 μm に配置された 4 つのバンドは、ASTER の SWIR のバンド 5~8 に対応し、粘土鉱物や炭酸塩鉱物の識別・マッピングを目的としている。実は、WorldView-3 の設計段階において、筆者の一人 (YY) は、地質リモートセンシングの専門家として観測バンドの波長位置についてのコメントを求められたことがある。その際には「ASTER の観測バンドの波長域は、かなり詳しい検討をして決めたので、ASTER の仕様が最適である」と返答した記憶がある。結果的に WorldView-3 の観測バンドは、ASTER のバンド 9 相当のバンドが無い点を除いて、他のバンドの波長位置はほとんど同じである。ただ ASTER の SWIR の空間分解能が 30 m であるのに対して、WorldView-3 は 3.7 m であり、その高い空間分解能の故に WorldView-3 のほうが鉱物の識別能力は高いという研究結果が、いくつか報告されている。ASTER は 1990 年代に製作されたセンサであるのに対して、WorldView-3 は 2010 年代のセンサであり、20 年間の技術進歩を考えれば致し方ないが、もし ASTER 後継セン

サがもう少し早く実現していれば、WorldView-3 と勝負できたかもしれないと思うと残念でならない。なお経済産業省は、ASTER よりも観測バンド数が圧倒的に多い Hyperspectral Imager Suite (HISUI; Iwasaki et al., 2011) の国際宇宙ステーションへの取り付けを 2019 年度後半に計画しており、これが ASTER 後継センサとなる。

7. ASTER に対するユーザからの高い評価

ASTER データは、多くのユーザに配布され、世界中で活用されている。利用分野としては、地下資源探査、地質マッピング、火山噴火・洪水・大規模地滑りなどの自然災害の被害把握、森林・氷河・サンゴ礁などの環境変化の解析、都市・農地などの土地被覆変化の監視など多岐に亘る。前述のように ASTER の観測バンドのいくつかは、岩石・鉱物の識別やマッピングを念頭に設定されている。図 5 に筆者らが提案した ASTER データの表現法の例を示すが、地下資源探査に役立つ様々な岩石・鉱物の情報が、ASTER データから得られることが分かる。

筆者が 2016 年にイギリスのロンドンで開催された地質リモートセンシングの学会に参加した際には、ある民間の資源探査会社の方々から「ASTER の出現はこの分野では画期的で、

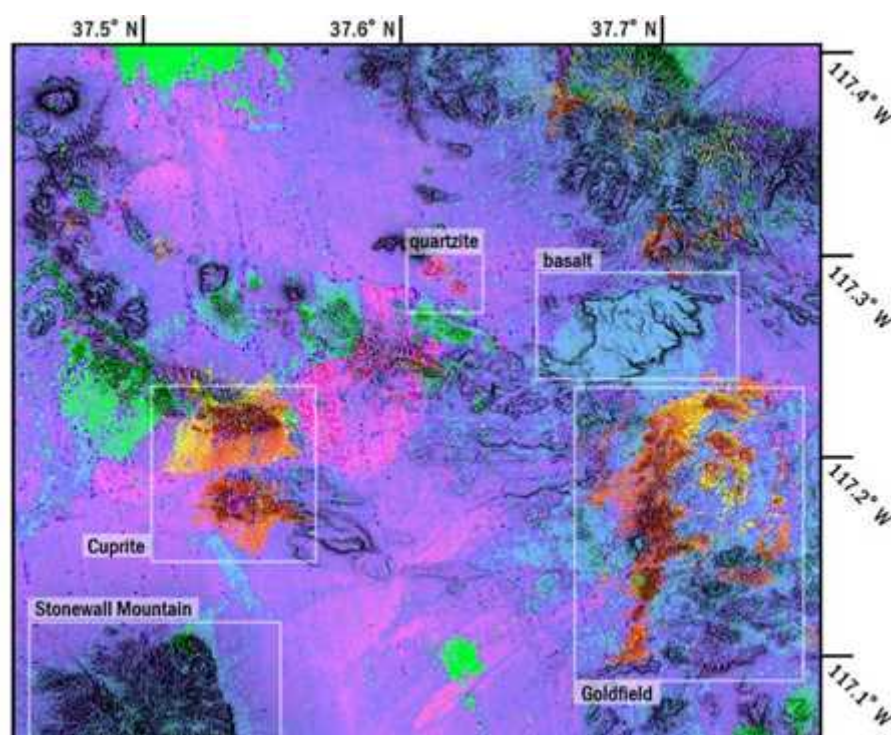


図 5 ASTER 画像により岩石・鉱物分布を見易く表示した例 (右が北方向)。米国ネバダ州 Cuprite 地域。赤～黄色は熱水変質帯、緑色は石灰岩、水色は玄武岩、赤紫色は珪化帯または珪岩。画像の明るさが地形を表現している (Kurata and Yamaguchi, 2019)。

まさに”Game Changer”だった」との言葉を掛けていただいた。米国、イギリス、カナダ、南アフリカ等の参加者からも、ASTER データに対する謝意を表していただき、ASTER の当初の目的が達成されたことを実感した。また 2019 年 2 月にサウジアラビアで開催された国際学会で ASTER についての基調講演を行った際には、地元の国営石油会社であるサウジアラムコの方々から、ASTER データは探査に役立っていると伺った。オーストラリアでは、全国土を対象として様々な鉱物の分布を示す「ASTER Geoscience Map」を出版している (Cudahy, 2012)。このデータプロダクトは地下資源探査に活用されており、2013 年の Orion Gold 社によるクイーンズランド州での新たな金鉱床探査ターゲットの発見 (<https://hotcopper.com.au/threads/ann-aster-interpretation-identifies-new-target-a.2066859/>) や、2014 年の Kentor Gold 社による金鉱床の発見などに結びついたとされている (WASTAC, 2014)。民間会社による資源探査は、社外に情報が公表されないことが多く、ASTER が実際の探査にどこまで役立ったのか表になかなか出て来ないが、時々こうした現場の声を聴けると、ASTER の開発に係わった者としては嬉しい限りである。

8. おわりに

ASTER サイエンスチーム会議は、この 6 月に東京で開催される会合が、ちょうど 50 回の節目となる。この間にメンバーの入れ替わりもあり、第 1 回から欠かさず参加している人は、居なくなってしまったが (筆者の YY は 1 回だけ都合で欠席)、これだけ長い間一緒に活動しているとお互いに気心も知れ、運命共同体のような感じになっている。打ち上げ前に運用シナリオを策定していた頃には、日米間の利害が対立し、机を叩いて激しい議論をしたことも何度かあった。しかし、米国側メンバーはディベート慣れしていて、議論は議論と割切っており、激しいやり取りが感情的に後まで尾を引くことはなく、会議後には仲良く食事をしに行ったりした。また、何かを決めなければならない場面では、米国側は割とすんなり決めるのに対して、日本側は日本に戻ってから検討して返事するという回答が多かったように思う。こうした様々な場面で日米間の文化の違いを感じることも多かった。Plafcan (2011) は、日米間の科学技術協力プロジェクトの好例として ASTER プロジェクトを取り上げ、その経緯や成功の原因などを米国コーネル大学の博士論文のテーマとして研究対象とした。ASTER データを使った研究や実利用の成果が世に出ることも嬉しいが、ASTER プロジェクト自体が研究対象となったことに対しては、関係者の一人として誇らしい思いである。

ASTER も、それを搭載した Terra も、今年の 12 月に打ち上げ 20 周年を迎える。NASA としては、Terra の軌道制御用の燃料が確保できる間は運用を継続する方針とのことであり、ASTER チームとしてもこの方針に従って出来るだけ長くデータ取得を継続したいと心から願っている。最後に、経済産業省、産業技術総合研究所、宇宙システム開発利用推進機構、NASA の担当者、ASTER センサや地上処理システムの開発に携わって来られた民間企業の方々、日米の ASTER サイエンスチームのメンバー、会議での通訳など、ASTER プロジェ

クトに係わって来られた全ての皆様方にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

9. 参考文献

- Cudahy, T. (2012): Satellite ASTER Geoscience Product Notes for Australia. *Australian ASTER Geoscience Product Notes, Version 1*. CSIRO ePublish, EP-30-07-12-44.
- Fujisada, H., Sakuma, F., Ono, A., and Kudoh, M. (1998): Design and preflight performance of ASTER instrument protoflight model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (4), 1152-1160.
- Iwasaki, A., Ohgi, N., Tanii, J., Kawashima, T., and Inada, H. (2011): Hyperspectral Imager Suite (HISUI) -Japanese hyper-multi spectral radiometer, *Proc. IGARSS 2011*, 1025-1028.
- Kurata, K. and Yamaguchi, Y. (2019): Integration and visualization of mineralogical and topographical information derived from ASTER and DEM data. *Remote Sensing*, 11, 162.
- Plafcan, D. (2011): Technoscientific Diplomacy: the practice of international policies in the ASTER collaboration. In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, Chapter 4, R. Ramachandran, Justice, C., Abrams, M., eds., Springer: New York, 2011, pp. 483-508.
- Western Australia Satellite Technology and Applications Consortium (WASTAC) (2014): Annual Report, 56pp, www.wastac.wa.gov.au.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Tsu, H., Kawakami, T., and Pniel, M. (1998): Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (4), 1062-1071.

産工会 WEB サイト : AIST 研究秘話 (2019 年 3 月 26 日受理、No. 76、p.1-14) より一部修正して転載

https://sankoukai.org/?page_id=433

連載講義

光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング

第1回

山口 靖*

Lithological and Mineralogical Mapping by Using Optical Sensor Images

Yasushi YAMAGUCHI*

1. はじめに

本連載講義は、地質リモートセンシング分野の中で、光学センサ画像による岩石・鉱物のマッピングについて、その原理や実例を紹介することが目的である。地質分野は、リモートセンシングの様々な応用分野の中でも、歴史的に早くからリモートセンシングの実利用を行ってきた分野であり、新たなセンサ開発にも密接に関わってきた。リモートセンシングのデータ解析においても、いくつかの重要な解析手法は、岩石・鉱物の識別やマッピングをするための手法開発において提案されたものである。このように地質分野がセンサ開発や手法開発の両方において、重要な役割を果たして来たのは、まず観測対象とする岩石・鉱物が、可視～近赤外～短波長赤外～熱赤外域において特徴的な反射スペクトルや放射スペクトルのパターンを示し、それらのスペクトル特徴がリモートセンシングによって比較的観測しやすいことがある。もう一つは、地下資源探査が各国の政策の中で重要視されてきたこと、また地下資源探査に携わる関連業界が比較的資金に恵まれていたことなどが挙げられる。こうした背景を基にして、地質分野では光学センサが取得した画像データから、いかに正確かつ効率的に鉱物・岩石の識別とマッピングを行うかが研究され、また実用的に利用されてきた。

地下資源探査は、広域から狭域、概査から精査へという流れで行われる。単位面積当たりの探査費用から見ると低コストから高コストへとなるのが一般的である。リモートセンシングデータ、特に衛星搭載センサで取得されたデータは、LANDSAT や ASTER データのように無償で配布されているものがあり、他の地下資源探査のデータよりも格段に安く、その広域概観能力と相まって概査に適した探査手法である¹⁾。一方、航空機を使ったリモートセンシングは、後述するハイパースペクトルセンサによる詳細な鉱物

識別・同定・マッピングが可能となってきたため、概査段階だけに留まらず、さらに進んだ探査段階での利用も広まっている。

2. 鉱物・岩石のスペクトル特徴

2.1 可視～近赤外～短波長赤外域での反射スペクトル

様々な鉱物が、可視～近赤外～短波長赤外域で特徴的な反射スペクトルを持つことは、例えば Hunt らの基礎的な研究²⁾³⁾ によって知られるようになった。Fig. 1 は、代表的な鉄酸化鉱物である赤鉄鉱 (Hematite)、鉄ミョウバン石 (Jarosite)、針鉄鉱 (Goethite) の反射スペクトルを示す。鉄イオンのため、波長 $0.4\sim0.6\mu\text{m}$ と $0.8\sim1.0\mu\text{m}$ 付近で波長方向に幅の広い吸収を起こすことが分かる。Fig. 2 は、代表的な粘土鉱物と炭酸塩鉱物の反射スペクトルを示す。粘土鉱物は水酸イオンのため波長 $2.1\sim2.4\mu\text{m}$ 付近、炭酸塩鉱物は炭酸イオンのため波長 $2.3\sim2.4\mu\text{m}$ 付近で鋭い特徴的な吸収を起こす。Fig. 2 には NASA の Terra 衛星に搭載されている日本製センサの ASTER の観測バンドも示してあるが、ASTER の観測バンド 5～9 は、粘土鉱物と炭酸塩鉱物の吸収特徴の検出を狙って設定されていることが分かる⁴⁾。

2.2 熱赤外域での放射スペクトル

岩石の熱赤外域の放射スペクトルは、岩石中のシリカ (SiO_2) 含有率と関係があることが知られている⁵⁾。シリカを含むケイ酸塩岩は、地球表面で最も広く分布している岩石であり、その識別・マッピングは地質図作成や地下資源探査などにおいて重要である。Fig. 3 に示したように $8\sim12\mu\text{m}$ の熱赤外域では、シリカ含有率の高いフェルシックな岩石の放射率パターンは波長の短い側に極小値があるのに対して、シリカ含有率の低い苦鉄質の岩石の放射率パターンは波長の長い側に極小値がある。Fig. 3 には ASTER のバンド 10～14 の観測波長範囲も示したが、後述するよ

(2019. 2. 26 受付, 2019. 4. 16 改訂受理)

* 名古屋大学大学院環境学研究科

〒464-8601 名古屋市千種区不老町

* Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies

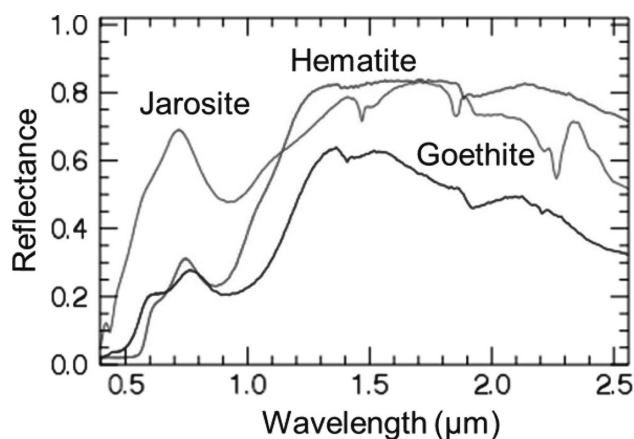


Fig. 1 Reflectance spectra of typical iron oxide minerals.

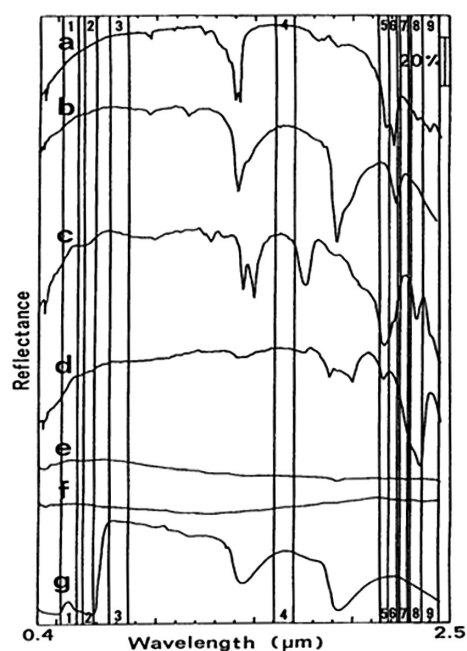


Fig. 2 Reflectance spectra of some minerals and rocks. Numbers show the spectral bandpasses of the ASTER VNIR and SWIR bands. a: kaolinite, b: montmorillonite, c: alunite, d: calcite, e: granite, f: andesite, g: green leaves.

うにこれらのバンドは正確な表面温度の計測だけでなく、放射率パターンによるケイ酸塩岩の識別・マッピングを目的としている。

3. 地質リモートセンシングとセンサ開発の歴史

地質分野での広義のリモートセンシング技術の利用は、衛星リモートセンシングの時代が始まる前から、航空機で撮影した空中写真の利用から始まった。岩相や地質構造が地形に表れることは、その以前から知られていたが、第一次世界大戦を契機として航空機が急速な発展を遂げ、航空

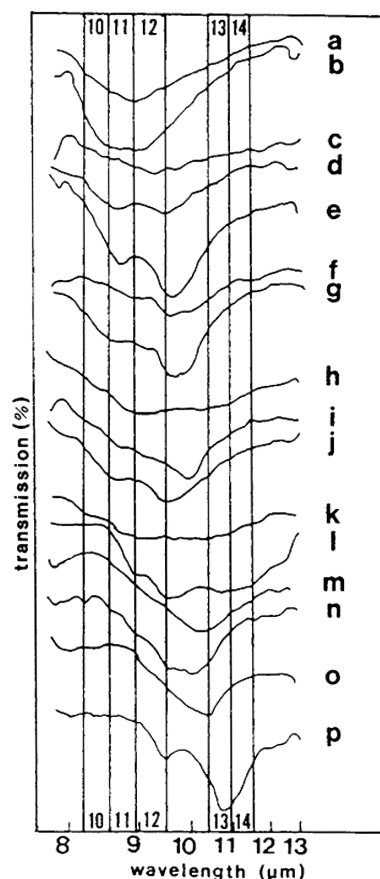


Fig. 3 Transmission spectra of various rocks in the thermal infrared region⁵⁾. Please note that the transmission spectra were regarded to correspond to the emission spectra of these rocks. Numbers indicate the ASTER spectral bands. a: dacite, b: granite, c: pumice, d: trachyte, e: quartz diorite, f: andesite, g: nepheline syenite, h: hypersthene andesite, i: quartz diorite, j: augite diorite, k: basalt, l: plagioclase basalt, m: peridotite, n: serpentinite, o: linbergite, p: dunite.

機搭載のカメラで撮影した空中写真が偵察や測量などで利用されるようになると、空中写真の地質調査や地下資源探査での有効性が認識されるようになった。こうして地質を広域的に効率よく解析できる手段として空中写真の利用が広まり、写真地質学として体系化されていった⁶⁾。

衛星リモートセンシングの本格的なスタートは、1972年のERTS（後にLANDSATに改称）1号の打ち上げである。これを契機として、それまでの肉眼による写真地質判読に加えてコンピュータによるデジタル画像処理も始まった。その初期の代表例であるRowanの研究⁷⁾は、Multi-Spectral Scanner (MSS) のバンド比によって、米国ネバダ州の著名な金属鉱床を含むGoldfield地域での熱水変質帯マッピングを行った。変質帯の識別は、鉄酸化鉱物の可視～近赤外域の反射スペクトルにおける吸収特徴を利用したものであった。1984年に打ち上げられたLANDSAT 4号のThematic Mapper (TM) には、MSSにはなかった短波長

赤外域のバンド 5 と 7 が設けられた。特にバンド 7 は、米国の地質関係者のリモートセンシング利用者グループである Geosat Committee が重要な役割を果たした⁸⁾。地下資源探査において重要な情報を与えてくれる粘土鉱物と炭酸塩鉱物は、波長 2.1~2.4 μm において特徴的な吸収を示すため、これらの特徴を捉えることが目的であった。わが国が 1992 年に打ち上げた地球資源衛星 1 号 (Japanese Earth Resources Satellite-1: JERS-1) の光学センサ (Optical Sensor: OPS) は、TM のバンド 7 の波長域をさらに三分割した観測バンドを持ち、石油貯留岩として重要な炭酸塩岩や金属鉱床と関連する粘土鉱物などの識別を目的としていた⁹⁾。さらに OPS の後継センサとしての性格を持つ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) は、Fig. 2 に示したように波長 2.1~2.4 μm に 5 つのバンドが設けられ、これらの鉱物のさらに詳細な識別とマッピングを目指すものであった⁴⁾。民間企業である Digital Globe 社が運用している World View-3 衛星にも、鉱物・岩石の識別を目的として短波長赤外域に 7 つのバンドを持つセンサが搭載されている¹⁰⁾。

こうしたスペクトルバンド数が 20 程度までのマルチスペクトルセンサに対して、バンド数が 100 を超えるようなセンサをハイパースペクトルセンサと呼ぶ。ハイパースペクトルセンサは、観測対象の連続的なスペクトルパターンが得られるため、鉱物のように短波長赤外域に比較的鋭い (波長幅が狭い) 吸収特徴を持つ物質の識別・同定に威力を発揮する。衛星搭載のハイパースペクトルセンサとしては、NASA がニューミレニアム計画の一環として 2000 年 11 月に打ち上げた Earth Observing-1 (EO-1) 衛星に搭載されていた Hyperion がある¹¹⁾。Hyperion は、波長 0.4~2.5 μm に 220 のバンドを持ち、スペクトル分解能は約 10 nm であるが、SN 比が低くノイズが大きかったことと、観測刈幅が 7.5 km と狭かったことのため、目立った研究成果は示されていない。2018 年 11 月にはインド宇宙研究機構 (ISRO) が、Hyperspectral Imaging Satellite (HySIS) を打ち上げた¹²⁾。この衛星には 0.4~2.4 μm をカバーするハイパースペクトルセンサが搭載されている。わが国は 2019 年度後半に Hyperspectral Imager Suite (HISUI) の国際宇宙ステーションへの取り付けを計画している¹³⁾。HISUI は、波長 0.4~2.5 μm をカバーするハイパースペクトルセンサで、鉱物・岩石の識別が重要な目的の一つである。今後、衛星搭載のハイパースペクトルセンサの打ち上げが進めば、ハイパースペクトルデータによる岩石・鉱物の識別・マッピングの利用例が増えてゆくであろう。

一方、航空機搭載センサでは、衛星搭載センサよりも早くからハイパースペクトルセンサが出現している。NASA が 1980 年代に開発した Airborne Imaging Spectrometer (AIS) は、当初は波長 1.0~2.5 μm のみを観測対象としており、鉱物・岩石の識別・同定が主な目的であった¹⁴⁾。AIS の後継として開発された Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) は、可視域と 1 μm よりも短波長側

の近赤外域も観測対象に加え、全体として可視~短波長赤外域の波長 0.4~2.5 μm をカバーするように改良された¹⁵⁾。観測対象波長域の拡大により、植生や都市域なども重要な観測対象に加わった。航空機搭載のハイパースペクトルセンサは、この他にも HyMap, HYDICE などが開発されており、その取得データは実際の地下資源探査などにも利用されている。しかし、航空機搭載センサであるため、データ取得済の地域が限定されているうえ、新たなデータ取得に制約がある。民間企業が所有するハイパースペクトルセンサの場合には、データの販売価格や新規データの取得費用がかなり高額となる場合が多く、衛星搭載のマルチスペクトルデータと比較すれば、ユーザ数や利用例は限定されている。

4. 反射または放射スペクトルへの変換

4.1 反射または放射スペクトルへの変換の必要性

前述のように鉱物や岩石は、その種類や組成に応じて反射スペクトルや放射スペクトルに特徴を持つ。一方、人工衛星や航空機に搭載されたセンサが観測しているのは、地表面からセンサに届いた放射輝度 ($\text{W}/\text{sr m}^2$) であり、ユーザがデータとして入手するのは多くの場合、センサ入口での放射輝度に対応した Digital Number (DN) という整数値である。放射輝度は、観測対象の地表面物質の反射率や放射率だけでなく、太陽光の放射照度、大気による吸収や散乱、対象物質の温度などにも依存する。このため、スペクトル特徴に基づいて鉱物や岩石の識別・同定やマッピング、定量化などを行う場合には、観測値である DN 値 (または放射輝度値) を鉱物や岩石の特徴量である反射スペクトルや放射スペクトルに変換し、そのスペクトルパターンを用いる必要がある。

ただし、広く用いられている教師付き分類などのように、各バンドの DN 値の相対的な大小関係に基づいて識別や分類を行う方法もあり、そうした場合には反射スペクトルや放射スペクトルへの変換は、必ずしも必須ではない。また敢えて DN 値 (または放射輝度値) のままで、岩石などの識別を行う方法も提案されている¹⁶⁾¹⁷⁾。

以下では DN 値を地表面での反射スペクトルや放射スペクトルに変換するための代表的な方法を紹介する。また近年では、センサ入り口での放射輝度データに対応する DN 値のみでなく、センサチームが開発したアルゴリズムによって大気補正などの処理を施し、地表面での放射輝度や反射率、放射率に変換したデータプロダクトが、ユーザに提供されるようになってきている。こうしたデータプロダクトを入手すれば、ユーザが自ら地表面反射率や放射率に変換する手間が省ける。例えば ASTER の場合、米国側 LPDAAC から提供されるデータプロダクトとしては、AST_L1B と AST_L1T がセンサ入り口での放射輝度であるが、AST_07 は可視・短波長赤外バンドの地表面反射率である。また AST_05 と AST_08 は、熱赤外バンドの温度・放射率分離

を行った後の地表面放射率および地表面温度、AST_09 が地表面での放射輝度である。反射スペクトルや放射スペクトルに基づいた地表面物質の識別や同定を行う場合には、これらの地表面反射率や地表面放射率のデータプロダクトを入手すれば良い。

ただしデータプロダクトの精度は、データ提供側に依存することになるため、注意が必要である。データプロダクトの精度が悪い場合には、そのデータプロダクトを使った地表面物質の識別やマッピングに悪影響を及ぼすからである。例えば ASTER の場合、地表面反射率のデータプロダクトである AST_07 において、短波長赤外域のバンド 9 の反射率変換の精度が悪いことが知られており、バンド 8 に吸収を持つ炭酸塩岩の識別において問題となる場合がある。

4.2 現地での測定データを用いた方法

提供された DN 値（または放射輝度値）と、現地で実測した反射率との間で線形回帰を行い、DN 値を反射率に変換する方法である。反射率の実測を行うターゲットとしては、衛星画像の空間分解能（画素サイズ）に対して十分な広さの平坦な場所に、同じ反射スペクトルを持った物質が均質に分布していることが望ましい。また各スペクトルバンドに対して複数の実測データを用いて線形回帰式を作成するため、その際に回帰直線の精度が高くなるよう、対象とするターゲットの反射率の値は、低いものから高いものまで広範囲に分散していることが望ましい。こうした条件を満たすターゲットとしては、反射率の高いターゲットでは乾燥地域のブラヤ（干上がった湖）や雪原、反射率の低いターゲットでは水域や均質な植生、塩基性の岩石（例えば玄武岩）などが使われる。Fig. 4 は、LANDSAT TM のバンド 1 の DN 値と 5ヶ所の地上ターゲットで実測した反射率との線形回帰を行った例で、DN 値は以下の式で地表面反射率に変換される¹⁸⁾。

$$\text{地表面反射率} = -7.13 + 0.188 \times \text{DN 値}$$

この方法は、大気補正も変換の中に含んでいる。適当な地上ターゲットが存在し、撮像時の大気による散乱・吸収の影響がそれほど大きくない場合には、それなりに高い精度の変換結果を得ることができる。ただし、変換された反射率は、各画素についての地形傾斜などの効果も含んだ見掛けの反射率であり、物質自体の反射率ではないことに注意する必要がある。また、現地で実測データを取得することが前提であり、現地に行かなくても、あるいは現地に行く前に情報を得られるというリモートセンシングの大きな利点が失われている。このため、ある特定の地域について、現地調査も含めて精密に解析を行う場合には優れた方法であるが、使用できる条件はある程度限られる。

4.3 フラットフィールド (flat field) 法

空間的に均質で画素サイズに対して十分大きな広がりを持ち、解析対象とする波長範囲内での反射率が一定 (flat) とみなせる物質が分布している場合には、それに対応する

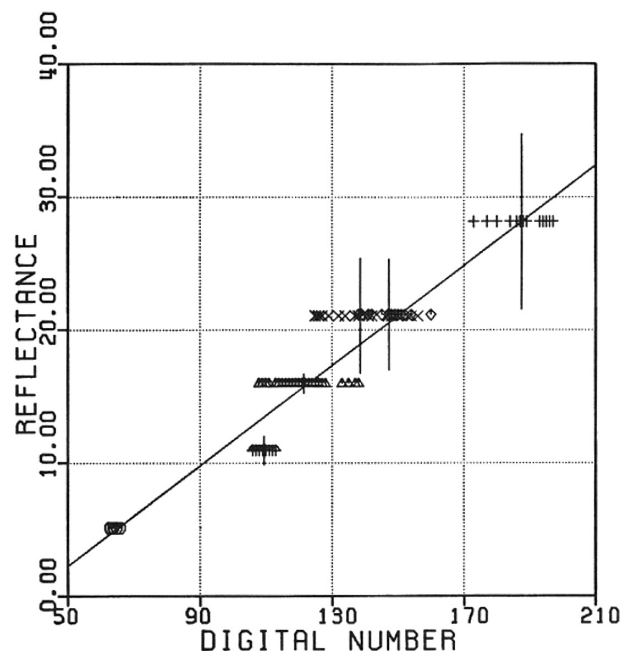


Fig. 4 An example of a linear regression between the digital numbers of LANDSAT TM data (x-axis) and reflectance measured at ground (y-axis)¹⁸⁾. Five ground targets were used to determine the regression line; $\text{Reflectance} = -7.13 + 0.188 \times \text{DN}$, $R^2 = 0.97$.

画素の DN 値で他の画素の DN 値を割ることにより、見掛けの反射率を得ることが出来る¹⁹⁾。これは、野外用のスペクトロメータでの測定において、標準反射板を用いて測定対象の分光反射係数を求める場合と同様である。対象とする画像内での大気の状態が均質であるとみなせるなら、画像全体の見掛けの反射率を得られる。この方法をフラットフィールド (flat field) 法と呼ぶ²⁰⁾。

Fig. 5 は、米国ネバダ州西部の Cuprite 地域の AIS データに対して、フラットフィールド法による地表面反射率への変換を行った例である。生データは、太陽光の放射照度に対応したパターンを示し、全体として長波長側に向かって放射輝度値が低下するとともに、波長 1.4 と 1.9 μm 付近では大気中水蒸気の吸収による放射輝度値の落ち込みが顕著である。これに対してフラットフィールド法による見掛けの地表面反射率への変換結果では、そうした放射照度に対応したパターンは除去されており、代わって波長 2.0~2.4 μm の範囲では対象地域の鉱物が持つ反射スペクトルパターンが観察されるようになっている¹⁹⁾。

4.4 ログレシデュアル (logarithmic residual) 法および派生法

画像データとして提供された放射輝度値（または DN 値）を、画像データのみから地表面での見掛けの反射スペクトルパターンに変換する方法として、ログレシデュアル法²⁰⁾がある。地表面の放射輝度値の観測値を D_{ij} (i 番目の画素における j 番目のスペクトルバンドでの観測値) としたとき、地表面物質の反射率を R_{ij} (i 番目の画素におけ

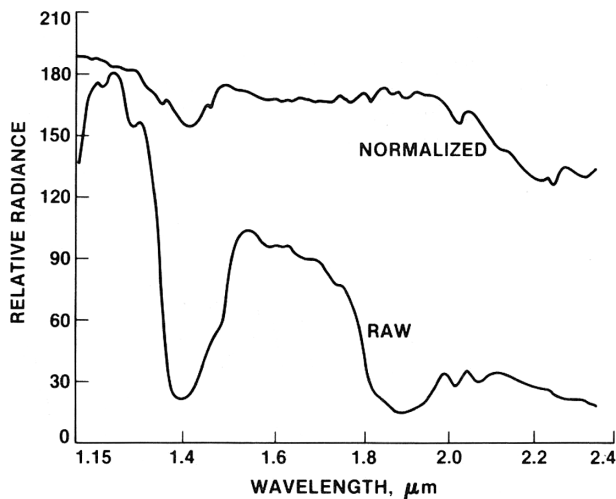


Fig. 5 Raw (lower) and normalized (upper) spectra in the Cuprite, western Nevada, U.S.A.¹⁹⁾ The raw spectrum shows a solar irradiance pattern, while the normalized spectrum by the flat filed method can be regarded as an apparent surface reflectance spectrum and indicates mineral features in 2.0-2.4 μm region.

る j 番目のスペクトルバンドでの反射率) は画素毎およびバンド毎に変化するが、地形傾斜による効果 T_i (i 番目の画素での地形効果) は画素毎には変化するがバンド毎には一定で、一方、地表面への太陽光の入射エネルギー I_j (j 番目のスペクトルバンドでの入射エネルギー) はスペクトルバンド毎には変化するが各バンド内では画素毎に変化しないと仮定する。さらに D_{ij} は R_{ij} 、 T_i 、 I_j の三者の積で表現されると仮定すれば、次式のように書き表せる；

$$D_{ij} = R_{ij} \cdot T_i \cdot I_j$$

この式から、各画素における全スペクトルバンドの放射輝度観測値の幾何平均値 (D_i)、各スペクトルバンドにおける全画素の放射輝度観測値の幾何平均値 (D_j)、全スペクトルバンドの全画素の放射輝度観測値の幾何平均値 ($D_{..}$)、各画素における全スペクトルバンドの反射率の幾何平均値 (R_i)、各スペクトルバンドにおける全画素の反射率の幾何平均値 (R_j)、全スペクトルバンドの全画素の反射率の幾何平均値 ($R_{..}$) の間には、次のような関係が導かれる；

$$(D_{ij}/D_i)/(D_j/D_{..}) = (R_{ij}/R_i)/(R_j/R_{..})$$

この式の右辺には地形傾斜による効果 T_i も太陽光の入射エネルギー I_j も含まれていないため、ある画素について、これら 2 つの効果が除去された見掛けの (相対的な) 反射スペクトルパターンを表している。すなわち放射輝度観測値に対して左辺の計算を行えば、地形や入射光の効果を除去した各画素の相対的な反射スペクトルパターンが得られることになる。この方法では、幾何平均や割り算など乗法および除法のみを用いるので、計算は対数で行われ、そのためにログレシデュアル法と呼ばれている。

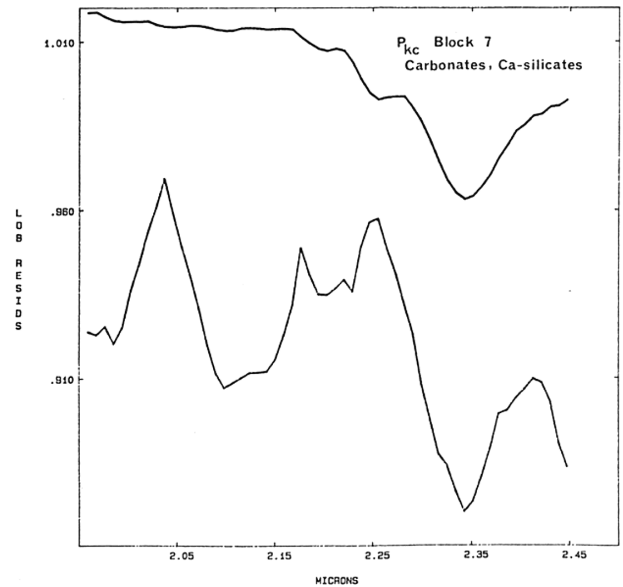


Fig. 6 Log residual (upper) and upper least bound (lower) spectra for an area of carbonates and calc-silicate in Australia. The log residual spectrum shows a diagnostic absorption at 2.35 μm by carbonate mineral, while the LUB residual spectrum shows a dominant vegetation curve²¹⁾.

この方法は、 D_i 、 D_j 、 $D_{..}$ の 3 つの幾何平均値を使って、各スペクトルバンドにおける各画素の放射輝度観測値をノーマライズしていると捉えることができる。しかし、ノーマライズに用いる D_i 、 D_j 、 $D_{..}$ が、平坦な反射スペクトルパターンに対応していない場合には、変換結果は対象の反射スペクトルパターンを正しく表現しないものとなる。こうした場合には、幾何平均の代わりに放射輝度値が取りうる上限値 (Least Upper Bound) を使ってノーマライズする方法も提案され、LUB レシデュアル法と呼ばれている²¹⁾。

Fig. 6 は、航空機搭載センサによりオーストラリアのテストサイトで取得されたデータに対して、ログレシデュアル法によるデータ処理を行った結果である。対象地域は、粘土鉱物を含む土壌と乾燥した草本が混在していた。ログレシデュアル法による変換結果では、全体の平均スペクトルが乾燥した草本のスペクトルを示すため、炭酸塩鉱物を含む画素では、草本のスペクトルは打ち消されて現れず、炭酸塩鉱物による波長 2.35 μm 付近の吸収特徴のみが目立つ。一方、LUB レシデュアル法による変換結果では、同じく 2.35 μm 付近の炭酸塩鉱物の吸収も見られるが、乾燥した草本の反射率パターンが顕著に現れている。このため、この例ではログレシデュアル法のほうが、鉱物による吸収特徴を良く捉えたと言われた²¹⁾。しかし、LUB レシデュアル法のほうが、実際の反射スペクトルに忠実な変換結果を与えたと言うべきであろう。

さらにログレシデュアル法や LUB レシデュアル法の改良法として、反射スペクトルに波長依存性がない物質の画

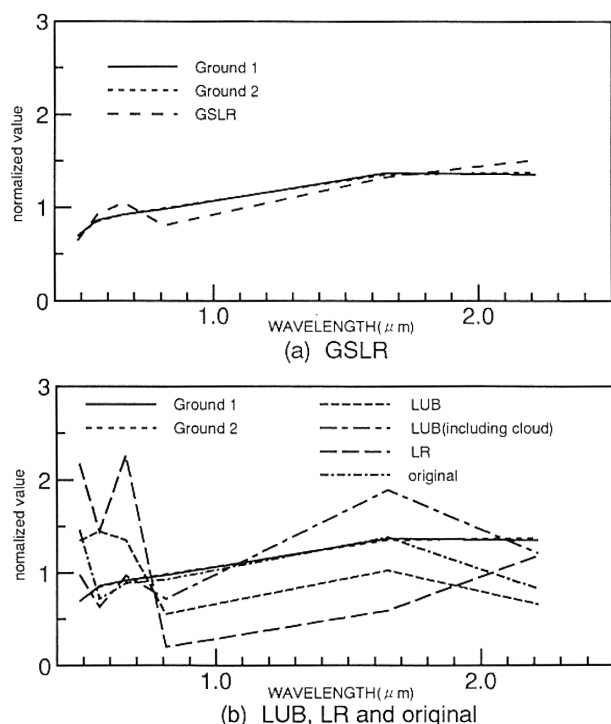


Fig. 7 Comparison of reflectance patterns at the ground of the junior high school derived from various methods. Ground 1 and 2: ground truth data, GSLR: Gray Scale Log Residual, LUB: Least Upper Bound residual, LR: Logarithmic Residual, original: raw satellite data²²⁾.

素を用いてノーマライズを行う方法が、Gray Scale Log Residual (GSLR) 法として提案されている²²⁾。このような条件を満たす物質の候補としては、雲（特に積雲）、蒸発岩（特に岩塩）、沖積扇状地などが推奨されている。Fig. 7 は、北海道の中学校のグラウンドを対象として、LANDSAT TM データに対して複数の方法による反射率変換を行い、その結果の比較を示したものである。ログレシデュアル法、LUB レシデュアル法、GSLR 法による変換結果の中では、GSLR 法が最も現地実測結果に近い反射率パターンを与えることが出来た。一方、ログレシデュアル法による変換結果は、可視域で高く、近赤外域で低いパターンを示しており、このパターンは典型的な植生の反射率パターンの逆パターンとなっている。これは対象地域では植生被覆が多いため、ログレシデュアル法がノーマライズに用いた対象地域の平均スペクトルが、植生のスペクトルに近かったためである。

4.5 大気補正コードを用いた方法

DN 値から地表面反射率や放射率への変換には、大気補正コードを用いた方法も多くあり、最近では商用の画像処理ソフトウェアに組み込まれている場合もある。また前述したように大気補正済みの地表面反射率や放射率のデータプロダクトがユーザに提供される場合もあり、そうした場合には大気補正コードによる変換が行われている。ここでは、これらの詳細な説明は省略するが、使用した画像処

理ソフトウェアや入手したデータプロダクトが、どのような大気補正コードを使っているかは、知っておく必要があるであろう。

4.6 温度・放射率分離

熱赤外域では、センサで観測された放射輝度が、温度と放射率の両方の情報を含んでいるため、両者の分離が必要である。これを温度・放射率分離と呼び、いくつかのアルゴリズムが提案されている。熱赤外域のリモートセンシングでは、表面温度を正確に求めたいという要求が様々な利用分野であり、温度・放射率分離は観測センサによる表面温度の計測精度を向上させる目的で開発・適用されてきた。これに対して地質リモートセンシング分野では、前述したように放射率パターンがケイ酸塩岩の識別・マッピングに有効なため、温度よりも放射率のほうに対する関心が高い。

N 個のバンドを持つマルチスペクトルセンサによる観測結果があった場合、観測値は N 個の DN 値（または放射輝度値）である。一方、未知数は、観測対象の温度と N 個のバンドそれぞれにおける放射率であり、未知数の総数は N + 1 個となる。このため、このままでは観測値から未知数である放射率と温度を求めることはできず、何らかの仮定または経験則を導入することが必要である。

最も簡単な温度・放射率分離の方法として、モデルエミッタンス法²³⁾がある。この方法は、「代表的な地表面物質の放射率は、波長 11.5 μm 付近では比較的ばらつきが少なく、0.98 程度であることが多い」との経験則に基づく。具体的には、NASA の航空機搭載熱赤外マルチスペクトルセンサである TIMS (Thermal Infrared Multispectral Scanner) のバンド 6 (波長 11.2~12.2 μm) や ASTER のバンド 14 (波長 10.95~11.65 μm) での放射率を 0.98 と仮定することにより、これらの観測バンドでの放射輝度から表面温度が得られる。さらに得られた表面温度を他のバンドに適用することにより、他のバンドの放射率が得られる。

松永 (1994)²⁴⁾ は、様々な物質の放射率パターンから「放射率の変化の大きい物質の平均放射率は低く、変化の小さい物質の平均放射率が高い」という経験則を導き出し (Fig. 8)、この関係を使うことによって未知数の数を実質的に減らし、観測データから放射率と温度を分離するアルゴリズムを提案した。この方法は、Mean-Maximum Difference Method (MMD 法) と呼ばれ、ASTER の温度・放射率分離アルゴリズム²⁵⁾ の中核をなすものである。

経験則を使わない方法として、同じ対象地域に対して異なる時刻で 2 回データ取得することにより、温度と放射率を求める方法がある²⁶⁾。2 回のデータ取得は、例えば表面温度が大きく異なる昼間と夜間に行い、その間に放射率は変化しないと仮定する。N 個のバンドを持つマルチスペクトルセンサを用いるとすれば、観測データは 2N 個、未知数は昼夜の温度の 2 個と放射率が N 個の合計 2+N 個である。N が 2 なら観測データ数と未知数はともに 4 で等しくなり、N が 3 以上なら観測データ数が未知数を上回るため、観測値から昼夜の温度と各バンドの放射率が求められる。

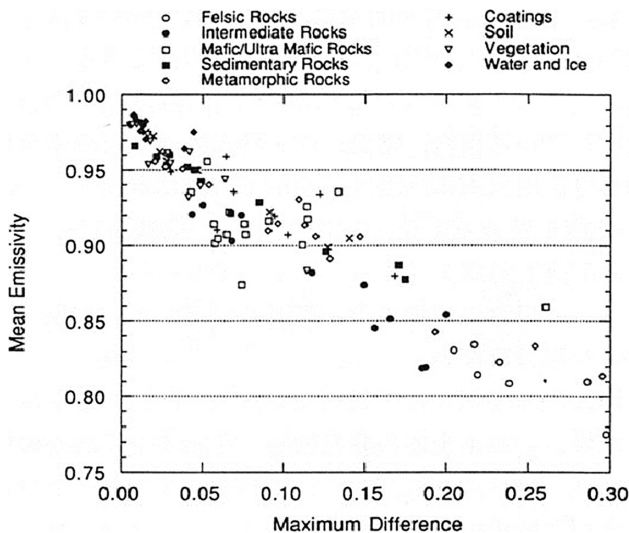


Fig. 8 The mean and maximum difference of emissivity spectra of various terrestrial materials from laboratory measurements²⁵⁾.

ただし欠点として、同じ地域に対して放射率が変化しないうちに2回データ取得するというのは、データ取得の面から大きな負担または制約となることがある。

引用文献

- 山口 靖, 丸山裕一, 地質リモートセンシングの歴史と現状, 日本リモートセンシング学会誌, 19(5), 2-12, 1999.
- G. R. Hunt, J. W. Salisbury: Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals, *Modern Geology*, 1, pp. 283-300, 1970.
- G. R. Hunt: Near-infrared (1.3-2.4 μm) spectra of alteration minerals -potential for use in remote sensing, *Jour. Geophys. Res.*, 44, pp. 1974-1986, 1979.
- Y. Yamaguchi, A. B. Kahle, H. Tsu, T. Kawakami, M. Pniel: Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36(4), pp. 1062-1071, 1998, doi:10.1109/36.700991.
- R. S. Vickers and R. J. P. Lyon: Infrared sensing from spacecraft -a geologic interpretation-, *Proc. Thermophys. Special Conf.*, American Institute of Astronautics, Paper 67-284, 1967.
- 松野久弥, 写真地質, 実業広報社, 284 pp., 1965.
- L. C. Rowan, P. H. Wetlaufer, A. F. H. Goetz, F. C. Billingsley, J. H. Stewart: *Discrimination of Rock Types and Detection of Hydrothermally Altered Areas in South-Central Nevada by the Use of Computer-Enhanced ERTS Images*, Geological Survey Professional Paper, 883, 35 pp., 1976.
- F. B. Henderson III, G. A. Swann: *Geological Remote Sensing from Space*, LBL Publication 110, Lawrence Berkeley Laboratory, Livermore, California, U. S. A., 1976.
- 山口 靖, 津 宏治, 浦井 稔, 佐藤 功, 宮崎芳徳, JERS-1 ユーザ要求仕様の画像データによる予察的評価, 日本リモートセンシング学会誌, 12(3), pp. 93-98, 1992.
- http://worldview3.digitalglobe.com/ (accessed on February 22, 2019)
- J. Pearlman, C. Segal, L. Liao, S. Carman, M. Folkman, C. Browne, L. Ong, S. Ungar: Development and operation of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer, *Proc. SPIE*, 4135, pp. 243-253, 2000.
- https://www.isro.gov.in/pslv-c43-hysis-mission/pslv-c43-hysis-mission-press-kit (accessed on February 22, 2019)
- A. Iwasaki, N. Ohgi, J. Tani, T. Kawashima, H. Inada: Hyper-spectral Imager Suite (HISUI) -Japanese hyper-multi spectral radiometer, *Proc. IGARSS 2011*, pp. 1025-1028, 2011.
- G. Vane, A. F. H. Goetz, J. B. Wellman: Airborne Imaging Spectrometer (AIS): a new tool for remote sensing, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 6, pp. 546-549, 1984.
- G. Vane, R. O. Green, T. G. Chrien, H. T. Enmark, E. G. Hansen, W. M. Porter: The airborne visible infrared imaging spectrometer (AVIRIS), *Remote Sens. Environ.*, 44(2-3), pp. 127-143, 1993.
- Y. Ninomiya, B. Fu, T. Cusack: Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote Sens. Environ.*, 99, pp. 127-139, 2005.
- T. Yajima, Y. Yamaguchi: Geological mapping of the Francistown area in northeastern Botswana by surface temperature and spectral emissivity information derived from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared data, *Ore Geology Review*, 53, pp. 134-144, 2013.
- C. D. Elvidge: *Separation of Leaf Water and Mineral Absorption in the 2.22 μm Thematic Mapper Band*. Ph. D. dissertation, Stanford University, 182 pp., 1985.
- A. F. H. Goetz, V. Srivastava: Mineralogical mapping in the Cuprite mining district, Nevada, *Proc. Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, pp. 22-31, 1985.
- D. A. Roberts, Y. Yamaguchi, R. J. P. Lyon: Comparison of various techniques for calibration of AIS data, *Proc. 2nd Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, pp. 21-30, 1985.
- A. A. Green, M. D. Craig: Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals, *Proc. Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, pp. 111-119, 1985.
- 土田 聡, 小田島高之, 田中壮一郎, Gray Scale log Residual 法 -反射率パターン解析のための一手法-, 日本リモートセンシング学会誌, 12(3), pp. 29-43, 1992.
- A. B. Kahle: Surface emittance, temperature, and thermal inertia derived from Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) data for death valley, California, *Geophysics*, 52, pp. 858-874, 1987.
- 松永恒雄, 熱赤外分光放射率の平均及び最大, 最小値の経験的關係を用いた温度-放射率分離手法, 日本リモートセンシング学会誌, 14(3), pp. 28-39, 1994.
- A. R. Gillespie, S. Rokugawa, T. Matsunaga, J. S. Cothren, S. Hook, A. B. Kahle: A temperature-emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36(4), pp. 1113-1126, 1998.
- K. Watson: Two-temperature method for measuring emissivity, *Remote Sens. Environ.*, 42, pp. 117-121, 1992.

連載講義

光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング

第2回

山口 靖*

Lithological and Mineralogical Mapping by Using Optical Sensor Images Part2

Yasushi YAMAGUCHI*

5. 岩石・鉱物の識別・マッピングの方法

5.1 はじめに

本連載講義第1回で述べたように岩石や鉱物は、その組成に応じて特徴的なスペクトルパターンを持つ。実験室で行う分光反射率測定やハイパースペクトルセンサによる観測では、Fig. 1左のように波長分解能が高く、波長方向に連続な反射率スペクトルを得ることができるため、そこに現れた吸収特徴などから鉱物の識別・同定を行うことが可能である。しかし、波長方向のバンド数が限られるマルチスペクトルセンサでは、Fig. 1右のような反射率パターンしか得ることができず、こうした波長方向に単純化されたデータから岩石や鉱物の識別を行うことになる。また第1回で述べたように、衛星搭載センサなどで実際に観測するのは、地表面から反射または放射された分光放射輝度であり、その観測値や変換されたDN値は対象とする岩石や鉱物の組成だけでなく、大気による散乱・吸収、地形傾斜、粒度などの影響も受ける。特に地形傾斜は、地質マッピングでは起伏のある山岳地域を対象とすることが多いため、その影響を解析において考慮する必要がある。

ここでは、光学センサ画像データから岩石・鉱物を識別・マッピングする方法として、カラー合成、デコリレーションストレッチ、バンド比、直交変換（主成分分析やスペクトル指標）、SAM法、テトラコーダなどを取り上げ、それぞれの方法の概要と注意点などについて説明する。ただし広く用いられている教師付き分類については、ここでは取り上げない。

5.2 カラー合成

岩石や鉱物のスペクトルの違いを表現する最も簡単な方法は、RGB3原色を用いた加法混色によるカラー合成である。カラー合成では、本連載講義第1回で述べたDN値から反射率や放射率への変換は不用で、簡便に行うことがで

きる。伝統的に広く用いられているフォールスカラー画像では、可視域の波長 $0.5\sim0.6\mu\text{m}$ 付近のバンド（例えばETM+のバンド2やASTERのバンド1）をB、同じく $0.6\sim0.7\mu\text{m}$ 付近のバンド（ETM+のバンド3やASTERのバンド2）をG、 $0.8\sim0.9\mu\text{m}$ 付近の近赤外域のバンド（ETM+のバンド4やASTERのバンド3N）をRに割り当ててカラー合成する。この場合、肉眼で緑色に見える植生は、可視域でのクロロフィルによる吸収と近赤外域での強い反射のため、フォールスカラー画像上では赤色で表現される。一方、鉄酸化鉱物は、可視域の波長 $0.4\sim0.6\mu\text{m}$ と近赤外域の $0.8\sim1.0\mu\text{m}$ 付近で吸収を起こすため、肉眼では赤っぽい色に見えるが、フォールスカラー画像上では緑～黄緑色で表現される。すなわち植生と鉄酸化鉱物は、肉眼で見た時の色とフォールスカラー画像上での色が入れ替わっているため、注意が必要である。

岩相識別を行いやすいカラー合成画像を作るための観測バンドとRGB3原色の組み合わせは、いくつか提案されている。例えばASTERの短波長赤外域のバンド4, 6, 8にRGBをそれぞれ割り当てたカラー合成画像では、米国ネバダ州Cuprite周辺において粘土鉱物を含む熱水変質帯が赤～ピンク色、石灰岩が緑色、非変質の火山岩類が青～灰色で表現された¹⁾。またASTERの熱赤外域のバンド14, 12, 10にRGBをそれぞれ割り当てたカラー合成画像では、ボツワナ北東部で花こう岩類が明るい赤色、塩基性～超塩基性岩類が白色、片麻岩類が明るい緑色で表現された²⁾。対象とする岩相のスペクトルが分かっているならば、それをカラー合成画像上でどのような色で表現したいかによって、RGBの割り当てを決めることもできる。例えばASTERデータを使って石灰岩を水色（シアン）で表したければ、石灰岩は短波長赤外域のバンド8に吸収を持つため、RGBにバンド8, 7, 9の順で割り当てれば良い。

5.3 デコリレーションストレッチ

前節のカラー合成画像は、そのままでは明度が低くて肉

（2019. 5. 31 受付, 2019. 6. 26 改訂受理）

* 名古屋大学大学院環境学研究科
〒464-8601 名古屋市千種区不老町

* Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies

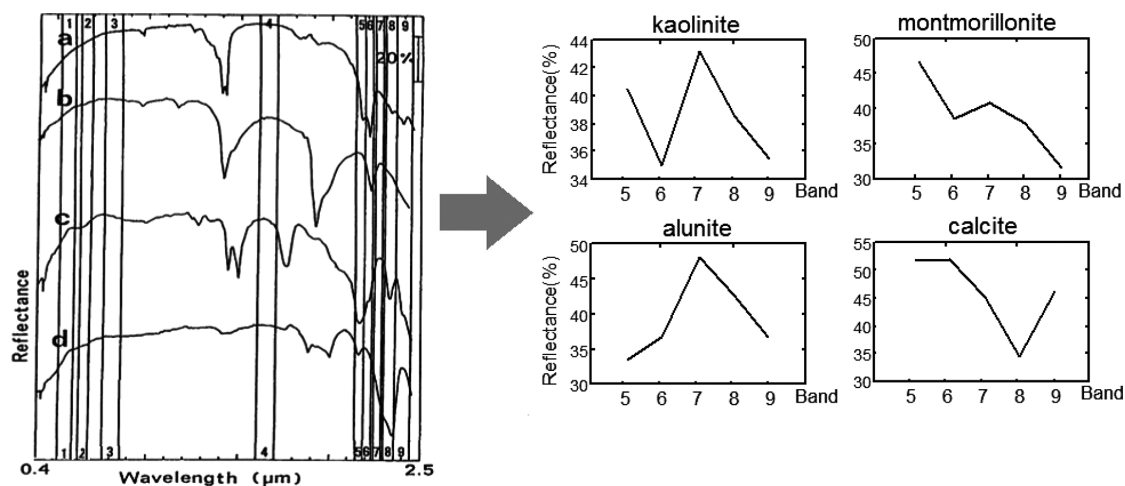


Fig. 1 Left: reflectance spectra of four minerals measured in laboratory, a: kaolinite, b: montmorillonite, c: alunite, d: calcite. The vertical bands with numbers indicate the ASTER spectral bandpasses. Right: simulated response patterns of the same minerals in the ASTER bands 5 to 9.

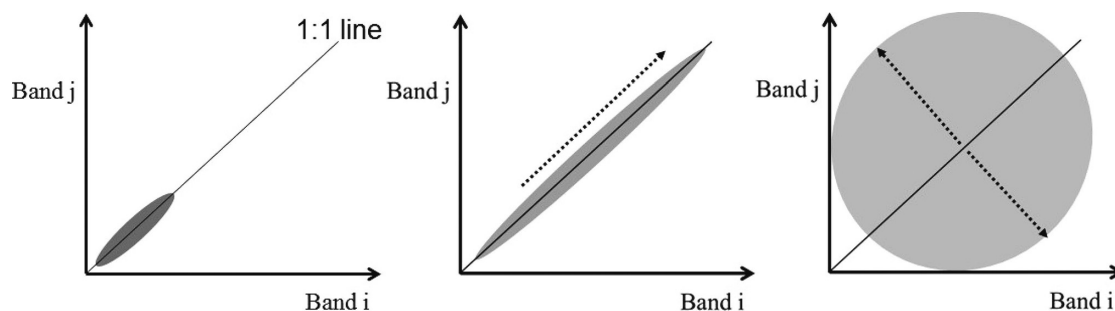


Fig. 2 Schematic diagram of the decorrelation stretch. Left: a scatter plot of highly correlated original data of 2 spectral bands. Middle: linearly stretched data. Right: decorrelation stretched data.

眼では判読が困難な場合があり、各バンドの DN 値を濃度変換することによって見やすい画像に改善する。この際に良く用いられるのが、線形関数による濃度変換で、リニアストレッチ (linear stretch) と呼ばれる。一般にマルチスペクトルセンサのデータは、2つのバンド間の波長距離が近いほど、その2バンドのデータ間での相関が高い。これは、多くの物質の反射または放射スペクトルの波長方向での変化が緩やかなためである。このため、2バンドのデータを Fig. 2 左のようにプロットすると、傾きが1で原点を通る1:1の直線付近に集中する。これが3バンドの場合には、1:1:1の直線付近にデータが集中することになるが、3つのバンドを RGB に割り当ててカラー合成すると、この1:1:1の直線上の点はカラー合成画像上では黒色～灰色～白色に対応するため、カラー合成画像は色彩に乏しい灰色に近いものとなる。こうしたデータに対してリニアストレッチをかけると、各バンドの DN 値のダイナミックレンジは広がって明度は上がるが、相関は高いままであり、画像は依然として灰色に近いままである (Fig. 2 中央)。HSV 表色系で表現すると、色相 (H) と彩度 (S) はそのまま、明度 (V) のみを変換されたことになる。

これに対して、1:1:1の直線から少しでも外れているデータは、平坦ではない何らかのスペクトルパターンを持っているため、それを色の違いとして強調し、判読しやすい画像を作り出すのが、デコリレーションストレッチ (decorrelation stretch)³⁾ (略して D-ストレッチ) 法である。この方法は、DN 値のままに使うことができるため広く用いられており、画像処理ソフトウェアに組み込まれている場合もある。D-ストレッチされた画像は、元データが持っていた色相は保存したまま、彩度と明度が変換されてダイナミックレンジが広がっており、鮮やかで明るい色彩の画像となる (Fig. 2 右)。その結果、元画像ではいずれも灰色に近くて違いが明瞭でなかった複数の岩相が、D-ストレッチ法によって鮮やかな異なる色彩で表現され、その境界が認識しやすくなる。

5.4 バンド比

バンド比は、2つ (以上の) 波長での DN 値や反射率の比を取ることで、スペクトル特徴を強調したり定量化したりする方法で、計算が簡単であること、2バンド分のデータを1バンド分に縮約できること等の利点を持つため、マルチおよびハイパースペクトルデータの処理法とし

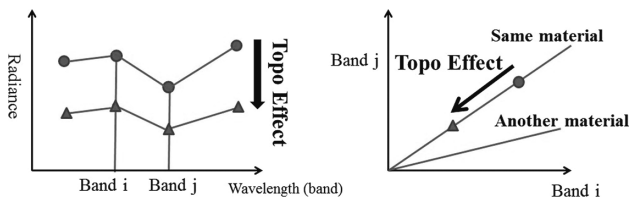


Fig. 3 Topographic effect. Left: we assume that the topographic effect is multiplicative and constant over a whole wavelength region. Right: based upon this assumption, pixels of the same material on different slope angles are plotted on a straight line from the origin.

て広く用いられている。岩石・鉱物の識別やマッピングを行う場合には、対象とする物質が吸収特徴を持つバンドを分母に、吸収を持たないバンドを分子として割り算を行う（バンド比をとる）ことにより、吸収特徴を持つ画素が相対的に大きな比の値を示すため、それらを抽出することができる。例えば鉄酸化鉱物は、可視域の波長 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 付近で吸収を持つため、LANDSAT TM のバンド 3/1 の比を取ることで、鉄酸化鉱物が多く分布する場所をマッピングできる。また TM のバンド 7 は粘土鉱物や炭酸塩鉱物の吸収特徴を捉えることを目的に設定されており、バンド 5/7 の比演算により熱水変質帯を抽出する方法が提案された⁴⁾。

バンド比は、地表面物質の識別の障害となる地形効果を抑制できるという利点も持つ。センサで観測される放射輝度は、地表面を構成する物質の組成だけでなく、その地表面の傾斜の影響も受ける。斜面が太陽からの直達光が届かない陰影になれば、そこからセンサに到達する光の放射輝度も低くなる。陰影とならなくても、斜面傾斜によって放射輝度は変化する。この斜面傾斜による放射輝度の変化を地形効果と呼ぶことにする。地形効果は、入射する太陽光（放射照度）に対して乗法的に作用し、波長に拘わらず同じ割合で働くとして仮定する。つまりセンサで観測される放射輝度は、入射する太陽光の放射照度に対して観測対象の反射率と地形効果を掛け合わせたものと考え、Fig. 3 左に示したように同じ物質のバンド i での放射輝度（丸）が地形効果によって α 倍になって観測された（三角）とすると、バンド j でも同様に α 倍になる。これを Fig. 3 右のようにバンド i とバンド j の間のスカッタプロットにすると、丸と三角は、原点を通る 1 つの直線上にプロットされる。同じ物質であれば、地形効果によってこの直線上を動くだけであり、斜面傾斜が変化しても常にこの直線上に乗っている。つまり同じ物質であれば、バンド i とバンド j の比は常に同じであることを意味する。従って、バンド比により、地形効果を抑制して物質の識別ができることになる。

実際の衛星データでは大気による散乱などの加法的因子も加わるため、バンド比を取る前に加法的な因子を除去しておく必要がある⁵⁾。Fig. 3 右では加法的因子を考慮して

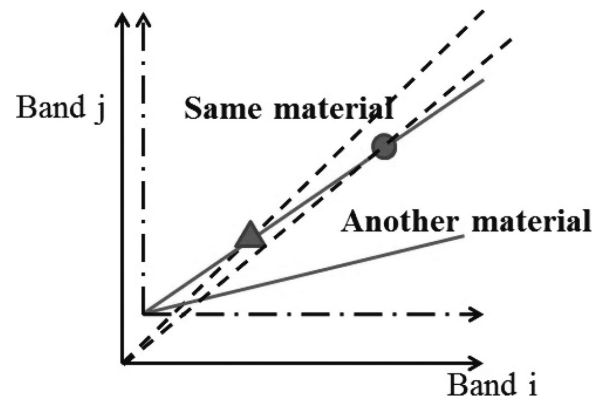


Fig. 4 The effect of an additive term such as the atmospheric scattering in band ratios. If we do not remove the additive term, same materials are plotted on different dashed lines with different slopes from the origin.

いないため、同じ物質は原点を通る 1 つの直線上にプロットされた。しかし、Fig. 4 に示したように、加法的因子がない場合（一点鎖線の軸のグラフ）に対して、加法的因子が 2 つのバンドに異なる大きさに働いた場合（実線の軸のグラフ）、加法的因子を除去しないでバンド i とバンド j で比を取ると、異なる斜面傾斜の同じ物質（丸と三角）に対しては、原点と結んだ直線（点線）の傾きが異なっており、異なる比の値をとる。つまりバンド比によって地形効果は抑制できないことが分かる。

Fig. 5 は、実際の画像データでのバンド比演算の結果である。左の画像は、加法的因子を除去せずに、生データからバンド比（ASTER のバンド 3/バンド 2）を取ったもので、植生の密度を示すことが期待される。しかし、この比演算画像では、日向と日陰の斜面で比の値が異なり、植生密度が正しく表現されていない。一方、右の画像は、加法的因子（具体的にはそれぞれのバンドの最小値）を除去した後、バンド比を取ったもので、日向と日陰の斜面の間で比の値の違いは見られない。従って、右の画像では、バンド比が地形効果を抑制して植生密度を表現していると解釈される。

地質マッピングにバンド比とカラー合成を初めて適用した Rowan et al. (1974)⁶⁾ は、米国ネバダ州の Goldfield 周辺を対象として、LANDSAT MSS のバンド 4/5 を青色、5/6 を黄色、6/7 をマゼンタ色に割り当ててカラー合成することにより、熱水変質帯を緑～茶色で示すことに成功した。これは、鉄酸化鉱物が MSS のバンド 4 と 7 の波長域に吸収特徴があることを利用している。この研究では様々なバンド比とカラー合成を試行し、結果的に上記の組み合わせが最も良い結果を示すとされた。しかし、画像上の色と識別したい鉱物・岩石との関係は、直感的に理解することが難しい。バンド比とカラー合成には多くの組み合わせが可能であり、バンド数が増えればさらに組み合わせの数は増えるため、最適な組み合わせを試行錯誤的に探すには限界

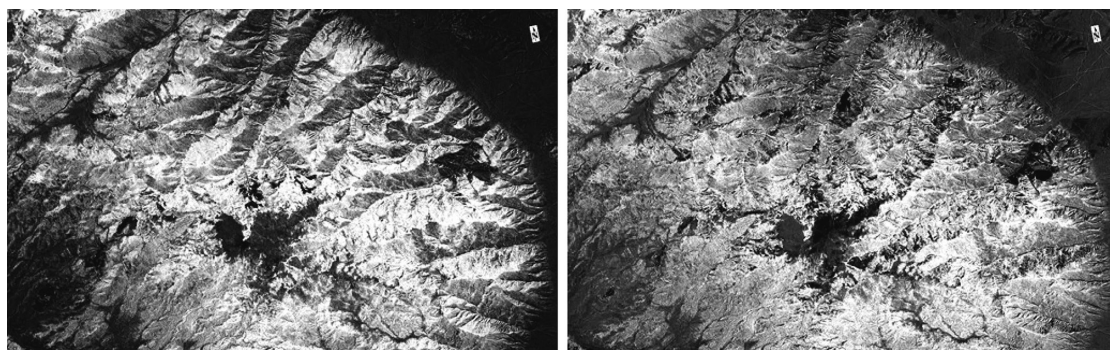


Fig. 5 Left: a band ratio image (ASTER band 3/band 2) without removing the additive term. The topographic effect still remains, as slopes with different orientations are recognizable due to different ratio values. Right: a band ratio image after removing the additive term. The topography effect was successfully suppressed.

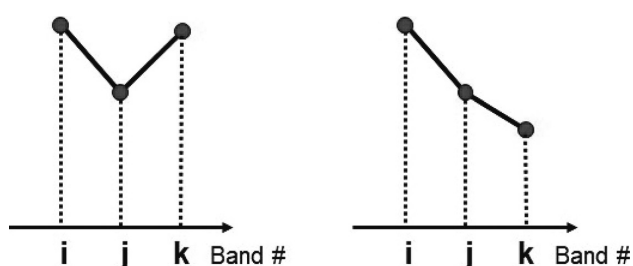


Fig. 6 Concept of relative absorption band-depth (RBD)⁷⁾. A simple band ratio of band i/j can not distinguish these two cases, but RBD of band $(i + j)/k$ can distinguish them.

がある。また、この場合には MSS の 4 つのバンド全てを上記のカラー合成で用いているが、バンド比とカラー合成の組み合わせでは一度に扱うことのできるバンド数は 6 個が限界である。バンド比とカラー合成の組み合わせは、簡便であるため広く用いられているが、こうした欠点も認識しておく必要がある。

前述のようにバンド比は、対象とする物質が吸収特徴を持つバンドを分母に、吸収を持たないバンドを分子として割り算を行うのが基本であった。しかし、Fig. 6 のように 3 つの観測バンドが波長方向に連続する場合、バンド i/j の比からは、バンド j が吸収の中心に位置するのか（左）、長波長側に下がってゆく斜面の途中なのか（右）の識別はできない。このため、吸収の中心波長のバンド j と両側のバンド i と k を使い、これら 2 つのケースを識別できる方法として、relative absorption band-depth (RBD)⁷⁾ という方法が提案された。RBD もバンド比の一種である。

$$\text{RBD} = (\text{band } i + \text{band } k) / \text{band } j$$

具体的な RBD の例として、ASTER の短波長赤外域の連続する 3 つのバンドを用いて、次の 3 つの RBD が提案されている⁸⁾。

$$\text{Ca-CO}_3 \text{ RBD} : (\text{Band } 7 + \text{Band } 9) / \text{Band } 8$$

$$\text{Ca, Mg-CO}_3 \text{ RBD} : (\text{Band } 6 + \text{Band } 8) / \text{Band } 7$$

$$\text{Al-OH RBD} : (\text{Band } 5 + \text{Band } 7) / \text{Band } 6$$

熱赤外域においては、本連載講義第 1 回で述べたように岩石の放射スペクトルが岩石中のシリカ含有率と関係があるため、ASTER データのバンド比によってケイ酸塩岩の識別・マッピングを行う指標として、石英指標 QI (Quartz Index)、炭酸塩鉱物指標 CI (Carbonate Index)、 SiO_2 含有量指標 SI (SiO_2 content Index)、マフィック指標 MI (Mafic Index) が提案されている⁹⁾¹⁰⁾。下式において D_i は、全画素の平均 DN 値で除することによって規格化された、ある画素における ASTER バンド i (i は 10~14 のバンド番号) の DN 値である。

$$QI = (D_{11} \times D_{11}) / (D_{10} \times D_{12})$$

$$CI = D_{13} / D_{14}$$

$$SI = D_{13} / D_{12}$$

$$MI = D_{12} / D_{13}$$

Cudahy et al. (2012)¹¹⁾ は、可視～近赤外～短波長赤外～熱赤外域の ASTER のバンド比を用いて、オーストラリア全域の鉱物分布図を作成した (Table 1)。この他にも様々なセンサのデータに対して様々なバンドが提案されている。

5.5 直交変換

直交変換 (orthogonal transformation) は、 n バンドのマルチまたはハイパースペクトルデータを n 次元直交座標系での値とみなし、この座標系の軸を回転させることにより、新たな直交座標系での値に変換する方法である。ここでは、岩石・鉱物マッピングで良く使われる直交変換として、主成分分析 (principal component analysis : PCA) とその派生法ならびにスペクトル指標について説明する。

n バンドのデータ R_{nij} を直交変換によって mY_{ij} に変換する場合を考えると ($m \leq n$)、 i, j 番目の画素についての m 番目の成分 mY_{ij} は、以下の式のように n バンドの値の線形結合によって計算される。このとき、変換係数 mA_n は、バ

Table 1 Band ratios for the ASTER geoscience products¹¹⁾.

Product name	Band ratio	Product name	Band ratio
ferric oxide content	B4/ B3	FeOH group content	(B6+B8)/B7
ferric oxide composition	B2/B1	MgOH group content	(B6+B9)/(B7+B8)
ferrous iron index	B5/B4	MgOH group composition	B7/B8
opaque index	B1/B4	ferrous iron content in MgOH/carbonate	B5/B4
AlOH group content	(B5+B7)/B6	silica index	B13/B10
AlOH group composition	B5/B7	quartz index	B11/(B10+B12)
kaolin group index	B6/B5	gypsum index	(B10+B12)/B11

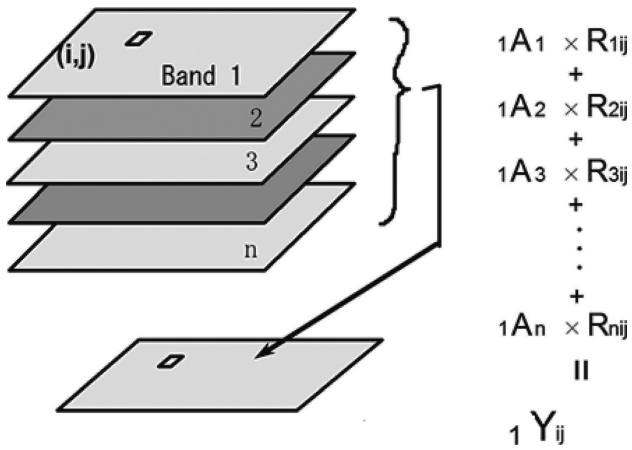


Fig. 7 Schematic diagram of a calculation process of the orthogonal transformation.

バンド毎に異なるが、同じバンド内の全ての画素について同じ値である (Fig. 7)。

$${}_mY_{ij} = {}_mA_1 \times R_{1ij} + {}_mA_2 \times R_{2ij} + \cdots + {}_mA_n \times R_{nij}$$

この変換係数の行列 ${}_m A_n$ は、PCAでは元データの分散共分散行列から、各主成分の分散が最大となるよう、また各主成分が無相関となるように求められる。5.3節で述べたようにマルチまたはハイパースペクトルデータは、一般にバンド間での相関が高いため、PCAによる変換後、寄与率が高い主成分のみを選ぶことによってデータ次元の圧縮を行うことができる。また第1主成分は、地形による陰影や傾斜による放射輝度の変化を示すことが多く、その結果、第2主成分以下では、バンド比と同様に地形効果が抑制されている。さらに各主成分間の相関が取り除かれているため、第2主成分以下から3つの主成分を選んでカラー合成することにより、色相と彩度が高い鮮やかな色の画像となり、異なる鉱物・岩石の分布の境界線を認識するのに役立つ。

PCAでは、上述のように元データの分散共分散行列から変換係数を求めるため、変換結果は対象データに依存する。従って、同じ対象地域であっても撮像条件の違いによって m 番目の主成分は変化する。また異なる地域間で、各主成分間の定量的な比較は困難である。このようにPCAは、数学的理論に基づいてはいるが、変換された各主成分の持つ物理的な意味付けが不明であることが、大きな欠点として挙げられる。

この欠点のある程度まで補う方法として、feature-oriented principal component selection (FPCS) という方法が提案された¹²⁾。この研究で識別対象とした鉄酸化鉱物は、LANDSAT TMのバンド1で吸収を、バンド5と7で相対的に強い反射を示す。TMの6つのバンド（熱赤外域のバンド6を除く）に対してPCAをかけ、その各主成分に対する各バンドの係数を調べると、第4主成分ではバンド1の係数が負の値で小さく、バンド5と7の係数が正の値で大きいことから、第4主成分が鉄酸化鉱物の分布を示すと解釈し、カラー合成画像上で第4主成分に割り当てた色が鉄酸化鉱物の分布を示すと解釈した。Loughlin (1991)¹³⁾はこの方法を改良し、鉄酸化鉱物を対象とする場合にはその吸収特徴を含むTMのバンド1, 3, 4, 5を、粘土鉱物を対象とする場合には同様にバンド1, 4, 5, 7を選んでPCAを適用する方法を提案した。さらにCrosta et al. (2003)¹⁴⁾は、ASTERデータを用いて鉱物の識別・マッピングを行う場合には、対象とする鉱物に応じてTable 2のようなバンドを選択し、それらに対してPCAをかけることを提案した。これらの方法は、Crostaの方法 (Crosta technique) と呼ばれ、計算が簡単であること、PCAの結果の物理的な解釈がある程度可能であることから、広く用いられている。しかし、Crostaの方法は、その変換係数が対象データに依存している点はPCAから変わっておらず、前述したPCAの問題点を完全に解決したわけではない。

これに対して直交変換の結果の物理的な意味付けが可能な方法として、スペクトル指標と呼ばれる手法が提案され

ている。この方法は、主として植生の解析に用いられていたタッセルドキャップ変換 (tasseled cap transformation)^{15)~17)} に着想を得て、それを鉱物の識別・マッピングに応用したものである。タッセルドキャップ変換では、LANDSAT MSS データに対して直交変換を行う場合、変換後の第 1 軸で求められる指標を brightness, 第 2 軸の指標を greenness, 第 3 軸の指標を yellowness, 第 4 軸の指標を non-such と名付けた。各軸は、PCA と同様に互いに直交している。これらの軸は、解析したい対象、greenness ならば緑の植生が示すスペクトルパターンのベクトル方向を選び、他の指標の軸とは直交するように決められる。このように変換軸は、分散共分散行列によって数学的に決められるのではなく、解析したい対象によって決められるため、各軸の持つ意味合いが決まっており、変換後のデータの持つ物理的な意味も理解できることになる。また変換に用いる係数はセンサに対して決められており、異なるシーンでも同じ係数を適用する。

こうしたタッセルドキャップ変換の考え方に基づき、JERS-1 OPS と ASTER の短波長赤外域バンドのデータから粘土鉱物や炭酸塩鉱物を識別するため、スペクトル指標が提案された^{18)~20)}。Table 3 に ASTER の 5 つの短波長赤外域のバンドに対するスペクトル指標の変換係数を示す²⁰⁾。第 1 軸は、PCA の第 1 主成分と同様に対象とした全スペクトルバンドの平均的な明るさ (brightness) を示しており、地形を表していると考えられる。従って、第 2 軸以下の指標では、地形効果が抑制されている。第 2 軸から第 4 軸までの指標は、それぞれ alunite, kaolinite, calcite の実験室で測定した反射率スペクトルを使って、それらを ASTER の観測バンドでの応答に変換し、そのスペ

クトルパターンの方向に軸が決定された。この場合は合計 5 バンドでデータは 5 次元であるため、直交変換の軸は最大 5 つである。最後の 5 番目の軸はタッセルドキャップ変換の non-such と同様に自動的に決まるため、residual と呼ばれる。各スペクトル指標の値は、Fig. 7 に示したように各バンドの値の線形結合によって求められる。Table 3 の変換係数を見ると、例えば alunite はバンド 5 で低くバンド 7 で高く、これは Fig. 1 右で示した alunite の応答パターンと一致する。他の鉱物についても同様である。このことは、前述した FPCS¹²⁾ の考え方と同じである。変換係数は、各鉱物の反射スペクトルから求めているため、変換の対象となるデータは、DN 値から地表面反射率に変換されていることが条件である。

Fig. 8 に実際の ASTER データから作成したスペクトル指標の画像を示す²⁰⁾。明るい画素が、各スペクトル指標の値が高い場所を示しており、その画素のスペクトルが、変換軸を決めるのに用いた鉱物の反射率パターンに近いことを意味している。スペクトル指標は、対象とするデータが地表面反射率に変換されていれば、常に同じ変換係数を使うことができる。最近では ASTER をはじめ多くの地球観測衛星のデータが、地表面反射率に変換されたデータプロダクトとしてユーザに配布されているため、そうした場合にはこの方法は有効である。

Table 2 ASTER bands to generate mineral abundance maps by the Crosta technique (Crosta et al., 2003).

Alteration minerals	ASTER bands
alunite	1, 3, 5, 7
illite	1, 3, 5, 6
kaolinite + smectite	1, 4, 6, 9
kaolinite	1, 4, 6, 7

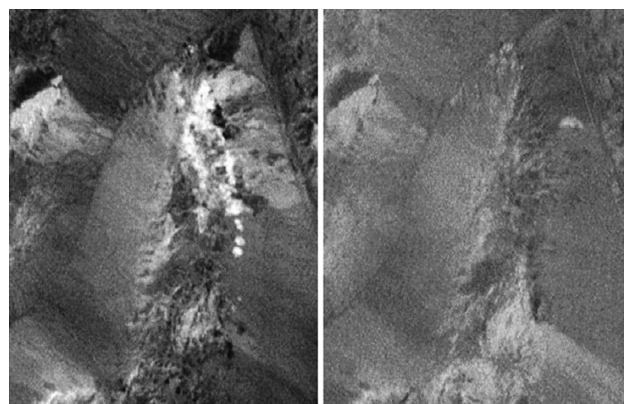


Fig. 8 Spectral index images generated from the ASTER data of Cuprite, Nevada, U. S. A. Left: alunite index image, right: calcite index image²⁰⁾.

Table 3 Coefficient of the spectral indices for the ASTER SWIR bands²⁰⁾.

Index	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
brightness	0.460	0.452	0.427	0.458	0.438
alunite	-0.511	-0.003	0.802	0.059	-0.304
kaolinite	0.663	-0.336	0.387	-0.511	-0.191
calcite	-0.232	0.478	0.072	-0.723	0.436
residual	0.184	0.674	-0.141	-0.050	-0.699

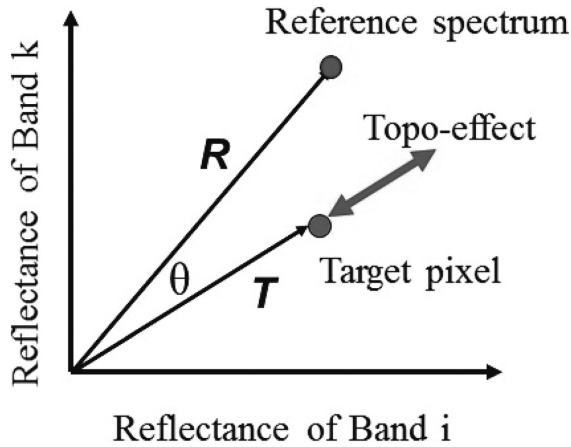


Fig. 5 Schematic diagram of the spectral angle mapper (SAM) method (Kruse et al., 1993). The angle θ between two vectors representing a target pixel (T) and a reference spectrum (R) is a criterion to identify or distinguish material of the target pixel. It is assumed that the topographic effect does not change the vector direction of a target pixel.

5.6 SAM 法および派生法

spectral angle mapper (SAM) 法²¹⁾ は、 n バンドのマルチまたはハイパースペクトルデータを n 次元のベクトルとみなして、対象画素のベクトル T と、同定対象鉱物の反射スペクトルの参照ベクトル R (対象とするリモートセンシングデータの観測バンドに合わせておく) がなす角度を求め (Fig. 5)、それが閾値以下であれば、その画素をその鉱物に分類する方法である。2つのベクトル間の角度 θ は、次式のように内積計算で求められる。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{T \cdot R}{\|T\| \|R\|} \right)$$

地形効果は、5.4 節のバンド比演算で述べたように、入射する太陽光 (放射照度) に対して乗法的に作用し、波長に拘わらず同じ割合で働くと仮定すると、対象とする画素のベクトルの長さは変化させるが、方向は変化させない (Fig. 5)。従って、同じ物質であれば、地形効果が働いても参照ベクトルとなす角度は不変であり、SAM 法は地形効果を抑制して鉱物の同定・識別・マッピングができることを意味する。ただし SAM 法を適用するためには、解析するデータが地表面反射率に変換されていることが条件である。SAM 法は、同定・識別したい鉱物の反射スペクトルさえあれば、どのような鉱物でも解析対象にできること、結果の物理的解釈が容易であること、バンド数が多いハイパースペクトルデータに対しても計算負荷が小さいことから、ハイパースペクトルデータの解析で多く用いられているが、マルチスペクトルデータでも使用可能である。SAM 法は、画像処理ソフトウェアに組み込まれている場合もある。

SAM 法では、地形効果が対象とする画素のベクトル方

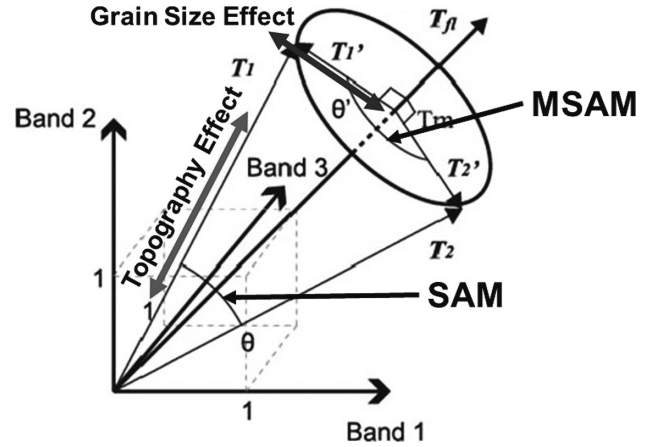


Fig. 6 Schematic diagram of the modified SAM (MSAM) method (Kodama et al., 2010). The SAM method measures the angle θ , while the MSAM method measures the angle θ' on a plane perpendicular to the target vector.

向を変化させないことを仮定していた。しかし、ベクトル方向を変化させる要因は、地形効果の他にもある。例えば異なる粒度の方解石の可視～短波長赤外域の反射スペクトルは、試料の粒度が小さくなるにつれて反射率が波長域全般で上昇し、吸収特徴の深さは小さくなる²²⁾。この異なる粒度の反射率データを多次元空間でのベクトルと考えると、ベクトルの方向は粒度によって変化することになる。従って、実際の地表面のように様々な粒度の鉱物が存在している場合、SAM 法では鉱物の同定・識別が正しく行えない可能性がある。こうした問題点を解決するため、SAM 法を改良した modified SAM (MSAM) 法が提案された²³⁾。MSAM 法は、各画素のベクトル T_{ij} (i はバンド番号, j は画素番号, Fig. 6 中では T_1) から各画素の波長方向での平均ベクトル T_{mj} を引くことにより、 T_{ij}' (Fig. 6 中では T_1') を求める。

$$T_{ij}' = T_{ij} - T_{mj}, \quad \left(T_{mj} = \frac{\sum T_{ij}}{N} \right)$$

比較対象の鉱物の参照スペクトル R (Fig. 6 中では T_2) についても、同様の処理を行って R_i' (Fig. 6 中では T_2') を求め、 T_{ij}' と R_i' のベクトル間の角度を計算する。地形効果は、各画素のベクトル方向に働くのに対して、粒度の効果は各画素のベクトルの直交方向に働く。SAM 法では Fig. 6 中の θ の角度 (T_1 と T_2 のなす角度) を測るのに対して、MSAM 法では θ' の角度 (T_1' と T_2' のなす角度) を測るため、各画素に対する地形効果と粒度効果の両方が抑制されることがわかる。さらに各画素のスペクトルパターンに対して連続体除去 (continuum-removal)²⁴⁾ を前処理として施し、その後で MSAM 法を適用することにより、鉱物の同定精度が改善したとの報告がある²⁵⁾。

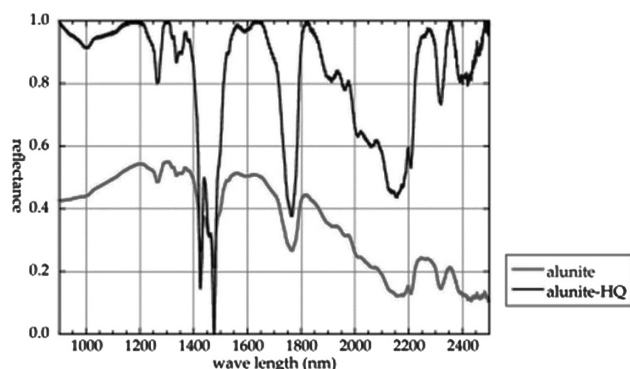


Fig. 7 Lower: an original reflectance spectrum of alunite. Upper: a continuum removed (or hull quotient) spectrum from the lower one²⁸⁾.

5.7 テトラコーダ

Clark et al. (2003)²⁶⁾ は、ハイパースペクトルデータによる鉱物識別を目的として、テトラコーダ (Tetracorder) と呼ばれる方法を開発した。この方法は、リモートセンシングデータと、実験室で測定された鉱物の標準的な反射スペクトルとの間でパターンマッチングを行うものであるが、単純にマッチングを行うのではなく、前処理やマッチングの方法などに様々な工夫が施されている。このため、この論文には「a set of algorithms within an expert system decision-making framework」と記載され、“expert system”であることが強調されている。

マッチングを行う前に、まず前処理として連続体除去²⁴⁾を、対象とする画素のスペクトルとスペクトルライブラリの参照スペクトルの両者に対して行う。この処理は、包絡線指数 (hull quotient)²⁷⁾と同様である。これにより、Fig. 7に示すように、鉱物の反射スペクトルが1200~1600 nm 付近を中心としてその両側の波長域に向かって反射率が全般的に下がってゆくのを補正するとともに、鉱物の組成に由来する特徴的な吸収を強調することができる。

次に連続体除去後のスペクトルが、スペクトルライブラリの参照スペクトルと最も良くフィットするようにスペクトルの“正規化”処理を行う。さらにスペクトルライブラリに収納されている各種鉱物の標準的な反射スペクトルとのマッチングを行うが、全ての波長域について行うのではない。対象とする鉱物毎に吸収特徴が現れる波長域が予めわかっているため、その波長域に対してのみマッチングを行い、スペクトル間での最小二乗フィッティングによる相関係数を求め、最も相関係数の高い鉱物に対象画素を分類する。テトラコーダによる実際の鉱物マッピングの結果の例は、Swayze et al. (2014)²⁹⁾を参照されたい。

テトラコーダを適用するためには、SAM法と同様に、対象とするリモートセンシングデータが、地表面での反射率に変換されていることが条件である。またスペクトル分解能が高いことが必要であり、ハイパースペクトルセンサまたは実験室での測定データに対しては有効であるが、マル

チスペクトルデータには適さない。

引用文献

- 1) M. Abrams, S. Hook, B. Ramachandran: *ASTER User Handbook*, ver. 2, Jet Prop. Lab., 135 pp., 2002, http://ftp.glc.f.umd.edu/library/pdf/aster_user_guide_v2.pdf (accessed on May 23, 2019).
- 2) T. Yajima, Y. Yamaguchi: Geological mapping of the Francistown area in northeastern Botswana by surface temperature and spectral emissivity information derived from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared data, *Ore Geol. Rev.*, **53**, pp. 134-144, 2013.
- 3) A. R. Gillespie, A. B. Kahle, R. E. Walker: Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HIS contrast stretches, *Remote Sens. Environ.*, **20**, pp. 209-235, 1986.
- 4) M. H. Podwysoki, D. B. Siegal, M. J. Abrams: Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysville, Utah, mining area, *Econ. Geol.*, **78**, pp. 675-687, 1983.
- 5) W. S. Kowalik, R. J. P. Lyon, P. Switzer: The effect of additive radiance terms on ratios of Landsat data, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **49** (5), pp. 659-669, 1983.
- 6) L. C. Rowan, P. H. Wetlaufer, A. F. H. Goetz, F. C. Billingsley, J. H. Stewart: *Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of the computer-enhanced ERTS images*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 883, 35 pp., 1974.
- 7) J. K. Crowley, D. W. Bricey, L. C. Rowan: Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: mineral discrimination using relative absorption band-depth images, *Remote Sens. Environ.*, **29**, pp. 121-134, 1989.
- 8) L. C. Rowan, J. C. Mars: Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, *Remote Sens. Environ.*, **84**, pp. 350-366, 2003.
- 9) 二宮芳樹, 傳 碧宏, ASTER 熱赤外データのバンド間演算による石英指標, 炭酸塩指標, および SiO₂ 含有量指標, 日本リモートセンシング学会誌, **22** (1), pp. 50-61, 2002.
- 10) Y. Ninomiya, B. Fu, T. J. Cudahy: Detecting lithology with Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data, *Remote Sens. Environ.*, **99**, pp. 127-139, 2005.
- 11) T. Cudahy, M. Caccetta, I. Lau, A. Rodger, C. Laukamp, C. Ong, J. Chia, S. Collings, T. Rankine, R. Fraser, R. Woodcock, J. Vote, P. Warren, M. Thomas, I. Tyler, A. Mauger, D. Close, M. Jones, M. Abrams: *Satellite ASTER Geoscience Map of Australia ver. 1*, CSIRO Data Collection, 2012. <https://data.csiro.au/collections/#collection/CICsiro:6182v1> (accessed on May 23, 2019)
- 12) A. P. Crosta, J. M. Moore: Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain, *Proc. 9th Thematic Conf. Remote Sens. Explor. Geol., Environ. Res. Inst. Michigan*, pp. 1173-1187, 1989.

- 13) W. Loughlin: Principal component analysis for alteration mapping, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **57**, pp. 1163–1169, 1991.
- 14) A. P. Crosta, C. R. de Souza, F. Azevedo, C. Brodie: Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis, *Inter. Jour. Remote Sens.*, **24** (21), pp. 4233–4240, 2003.
- 15) R. J. Kauth, G. S. Thomas: The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, *Proc. Symp. Machine Process. Remotely Sensed Data*, Purdue Univ., West Lafayette, IN, U. S. A., pp. 4B41–4B51, 1976.
- 16) E. P. Crist, R. C. Ciccone: A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM tasseled cap, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **22** (3), pp. 256–263, 1984.
- 17) E. P. Crist, R. J. Kauth: The Tasseled Cap de-mystified, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **52** (1), pp. 81–86, 1986.
- 18) Y. Yamaguchi: Possible techniques for lithologic discrimination using the short-wavelength-infrared bands of the Japanese ERS-1, *Remote Sens. Environ.*, **23** (1), pp. 117–129, 1987.
- 19) Y. Yamaguchi, C. Naito: Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands, *Inter. Jour. Remote Sens.*, **24** (22), pp. 4311–4323, 2003.
- 20) Y. Yamaguchi, I. Takeda: Mineralogical mapping by ASTER in Cuprite, Nevada, U. S. A., *Asian Jour. Geoinform.*, **3** (3), pp. 17–24, 2003.
- 21) F. A. Kruse, A. B. Lefkoff, J. W. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, A. F. H. Goetz: The Spectral Image Processing System (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data, *Remote Sens. Environ.*, **44**, pp. 145–163, 1993.
- 22) G. R. Hunt, J. W. Salisbury: Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates, *Modern Geol.*, **2**, pp. 23–30, 1971.
- 23) S. Kodama, I. Takeda, Y. Yamaguchi: Mapping of hydrothermally altered rocks using Modified Spectral Angle Mapper (MSAM) method and ASTER SWIR data, *Inter. Jour. Geo-inform.*, **6** (1), pp. 41–53, 2010.
- 24) R. N. Clark, T. L. Roush: Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications, *Jour. Geophys. Res.*, **89**, pp. 6329–6340, 1984.
- 25) S. Oshigami, Y. Yamaguchi, T. Uezato, A. Momose, Y. Arvelyna, Y. Kawakami, T. Yajima, S. Miyatake, A. Nguno: Mineralogical mapping of southern Namibia by applying the continuum-removal MSAM method to the HyMap data, *Inter. Jour. Remote Sens.*, **34** (15), pp. 5282–5295, 2013.
- 26) R. N. Clark, G. A. Swayze, K. E. Livo, R. F. Kokaly, S. J. Sutley, J. B. Dalton, R. R. McDougal, C. A. Gent: Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems, *Jour. Geophys. Res.*, **108** (E12), 5131, 2003.
- 27) A. A. Green, M. D. Craig: Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals, *Proc. Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, pp. 111–119, 1985.
- 28) S. Tanaka, H. Tsuru, K. Someno, Y. Yamaguchi: Identification of alteration minerals from unstable reflectance spectra using a deep learning method, *Geosciences*, **9**, 195, doi:10.3390/geosciences9050195, 2019.
- 29) G. A. Swayze, R. N. Clark, A. F. H. Goetz, K. E. Livo, G. N. Breit, F. A. Kruse, S. J. Sutley, L. W. Snee, H. A. Lowers, J. L. Post: Mapping advanced argillic alteration at Cuprite, Nevada using imaging spectroscopy. *Econ. Geol.*, **109**, pp. 1179–1221, 2014.

連載講義

光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング

第3回

山口 靖*

Lithological and Mineralogical Mapping by Using Optical Sensor Images Part3

Yasushi YAMAGUCHI*

6. 鉱物や化学成分の含有率を求める方法

6.1 はじめに

本連載講義第2回では、光学センサ画像データから岩石・鉱物を識別・マッピングする方法を紹介した。岩石や鉱物は、その組成に応じた特徴的なスペクトルパターンを持つため¹⁾、それを利用して異なる岩石・鉱物の識別が可能である。こうしたスペクトルパターンから、岩石・土壌中の鉱物や化学成分の量（または含有率）を求めるのは、識別やマッピングよりも難しい。その理由は、反射スペクトルなどに現れる吸収の深さは、求めたい鉱物や化学成分の量だけでなく、地形効果や粒度、風化などの影響も同時に受けるためである。この章では、こうした様々な効果を抑制して、鉱物や化学成分の含有率を定量的に求める方法の例を紹介する。

6.2 酸化鉄含有率を求める方法

鉄酸化鉱物の反射スペクトルは、波長 400~600 nm と 800~1000 nm 付近で波長方向に幅の広い吸収特徴を示す¹⁾。鉄酸化鉱物を含む岩石では、この吸収の深さは岩石に含まれる酸化鉄の量を示すが、リモートセンシングで求めた吸収深さは、地形効果や鉱物の粒度による影響も受ける。Noda and Yamaguchi (2017)²⁾ は、航空機搭載ハイパースペクトルセンサが取得したデータから、この2つの効果を抑制して酸化鉄含有率を求める方法を提案した (Fig. 1)。鉄酸化鉱物の反射率 R は、粒度が小さくなるに従って高くなるが、波長 900 nm 付近の吸収の深さは粒度が変わっても一定である。つまり粒度の効果は、この吸収特徴付近の反射スペクトルに対して加法的である。また波長 550 nm での反射率 550R から、波長 760 nm での反射率 760R への傾斜を $Slope$ とすると、 $Slope$ の値は鉄酸化鉱物を含む岩石試料の粒度に比例する。このため、元の反射率スペクトルから $Slope$ の値を引いた反射スペクトル Modified-R では、粒

度の影響が抑制されている。

$$Slope = 760R - 550R$$

$$\text{Modified-R} = R - Slope$$

次に地形効果は、5.4 節で述べたように放射輝度または反射スペクトルに対して乗法的であり、バンド比によって抑制できる。このためバンド比と同じ効果を持つ包絡線指数 (hull quotient)³⁾ または連続体除去 (continuum-removal)⁴⁾ によって地形効果を抑制した。

$$\text{MCR-900D} = 1.0 - \text{M900R} / \text{M900C}$$

MCR-900D が、粒度効果と地形効果の両方を抑制した波長 900 nm 付近での吸収深さ、M900R は Modified-R における波長 900 nm での反射率、M900C は Modified-R の包絡線（または連続体）の波長 900 nm での反射率である。この MCR-900D と酸化鉄含有率との間の関係式を 3 種類の鉄酸化鉱物（赤鉄鉱、鉄ミョウバン石、針鉄鉱）について作成しておき、900 nm 付近での吸収特徴の波長によって対象画素の鉱物を識別し、各画素での酸化鉄含有率を求めた (Fig. 1)。この方法では、まず加法的な粒度の効果を抑制し、次に乗法的な地形効果を抑制した。5.4 節のバンド比の項で述べたように、加法的な処理を乗法的な処理の前に行わなければならない点は、全く同じである。

6.3 シリカ含有率を求める方法

ケイ酸塩岩は、地球表面に最も広く分布する岩石タイプで、その岩石分類はシリカ (SiO_2) 含有率に基づいている。岩石の熱赤外域の放射スペクトルは、シリカ含有率と関係があることが知られているため⁵⁾、これを利用して TIMS や ASTER のような熱赤外のマルチスペクトルデータからシリカ含有率を見積る試みが Ninomiya (1995)⁶⁾ によって行われた。この研究では実験室で測定した岩石の熱赤外域での反射スペクトルを正規化して入力として用いたが、反射スペクトルのパターンは放射スペクトルのパターンと相

(2019. 7. 16 受付, 2019. 8. 20 改訂受理)

* 名古屋大学大学院環境学研究科
〒464-8601 名古屋市千種区不老町

* Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies

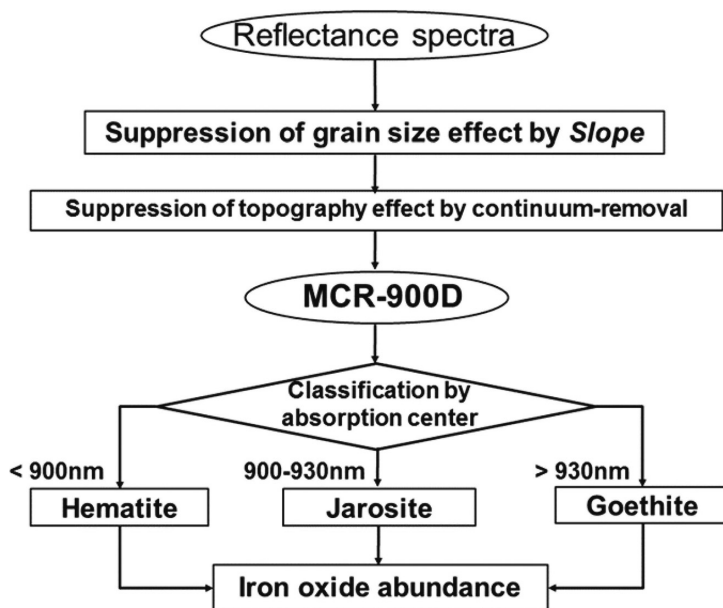


Fig. 1 Processing sequence of the method to estimate iron oxide contents²⁾

関があることを仮定した。反射スペクトルからのシリカ含有率の推定にはニューラルネットワークを使用し、化学的に測定したシリカ含有率との相関を調べたところ、両者間の相関係数は TIMS の観測バンドで 0.914, ASTER の観測バンドで 0.915 に達し、シリカ含有率の誤差は 90% の試料において 7% 以内であった。

大岡ほか (2002)⁷⁾ は, ASTER の熱赤外バンドの放射率から岩石中のシリカ含有率を求めるため, 以下の推定式を提案した。E_i は, ASTER のバンド i の放射率である。

$$\text{岩石新鮮面} \quad \text{SiO}_2 = 56.97 - 247.29 \times \log((E_{10} + E_{11} + E_{12}) / 3 / E_{13})$$

$$\text{ケイ酸塩鉱物} \quad \text{SiO}_2 = 60.64 - 411.29 \times \log(E_{10} / E_{13})$$

$$\text{新鮮面 + 鉱物} \quad \text{SiO}_2 = 57.05 - 286.73 \times \log((E_{10} + E_{11} + E_{12}) / 3 / E_{13})$$

$$\text{岩石風化面} \quad \text{SiO}_2 = 54.66 - 297.93 \times \log(E_{12} / E_{13})$$

$$\text{全試料} \quad \text{SiO}_2 = 57.11 - 286.88 \times \log((E_{10} + E_{11} + E_{12}) / 3 / E_{13})$$

このように熱赤外域のマルチスペクトルデータは、ケイ酸塩岩のシリカ含有率に関する情報を提供してくれる。現時点では ASTER の熱赤外データの利用は、岩石の識別・マッピングに留まっている例が多いが、このようにシリカ含有率の定量的な推定もある程度まで可能と思われる。

6.4 月表面の鉄・チタン含有率を求める方法

月や小惑星など大気のない天体の表面では、宇宙風化という作用が働くことが知られている。宇宙風化の原因は、太陽風や宇宙線、微小隕石の衝突とされ、可視～近赤外域の反射スペクトル中の鉄イオンによる吸収特徴などが浅くなる。また全体的に反射率が低下する (darkening) が、特

に波長の短い側の反射率が低下する現象を“赤化 (reddening)”と呼ぶ⁸⁾。月の表面の岩石・土壌中の鉄やチタンの含有率の見積りでは、この宇宙風化の影響を除くことが重要である。Lucey et al. (2000)⁹⁾ は、1994 年打ち上げのクレメンタイン衛星の取得データを使って、月表面の鉄とチタンの含有率を見積る方法を開発した。Fig. 2 で示したように波長 750 nm の反射率 $R_{750\text{nm}}$ に対して、鉄の場合は波長 950 nm/750 nm の反射率の比、チタンの場合は波長 415 nm/750 nm の反射率の比をプロットすると、様々な組成の岩石・土壌は宇宙風化作用が進行するに従って一点 (図中の apparent origin) に向かって収束するような分布を示す。この収束方向での位置が、宇宙風化の相対的な強さ (maturity) を表す。これに対して鉄とチタンの含有率は、Fig. 2 中の角度 θ_{Fe} または θ_{Ti} から次式で求めることができる。

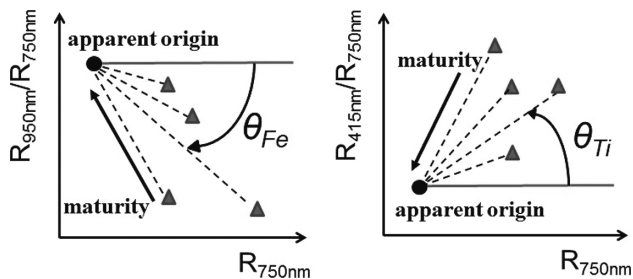


Fig. 2 Schematic diagrams to estimate Fe and Ti concentrations from the Clementine reflectance data⁹⁾. $R_{750\text{nm}}$ means reflectance at 750 nm. The arrows of “maturity” indicate directions of spectral change (maturation) due to space weathering, while the angles of θ_{Fe} and θ_{Ti} are related to Fe and Ti concentrations, respectively.

$$\text{wt \% FeO} = (17.427 \times \theta_{\text{Fe}}) - 7.565$$

$$\text{wt \% TiO}_2 = 3.708 \times [\theta_{\text{Ti}}]^{5.979}$$

この方法では、宇宙風化の影響を取り除いて、鉄とチタンの含有率を見積もっていることになる。しかし、Fig. 2の横軸の $R_{750\text{nm}}$ には地形効果が残っており、地形効果は抑制されていない。この方法では、主に研究対象とされた月の海では衝突クレータ周辺を除いて地形は比較的平坦であること、月全体での広域的な鉄とチタンの含有率分布を対象としたことなどから、地形効果よりも宇宙風化の影響の除去に重点が置かれた。

7. 植生の影響の軽減・除去

7.1 Elvidge and Lyon (1985)¹⁰⁾ の方法

スペクトル特徴に基づく岩石・鉱物の識別・マッピングは、経験的に植生被覆が凡そ 30% 程度を超えると困難になる。これより植生被覆が厚い地域では、地質が地形に反映されることを利用した写真地質判読や、地植物学 (geobotany) に基づいて地質のマッピングを行う。地植物学とは、植物の種類や生育状況がその下の岩石の影響を受けるという考え方で、例えば金属硫化物を含む土壌に生育する樹木は、そのストレスのために可視～近赤外域で特異な反射スペクトルを示す例が報告されている (Labovitz et al., 1983)¹¹⁾。植生被覆が 30% 程度を超えない地域では、本連載講義で解説した方法が岩石・鉱物マッピングに適用できるが、植生が結果に影響を与える場合がある。ここでは、そうした植生の影響を軽減・除去する方法を紹介する。

5.4 節で紹介したように、LANDSAT TM のバンド 5 (中心波長 1.65 μm) とバンド 7 (中心波長 2.22 μm) のバンド比 5/7 は、熱水変質帯を抽出するのに使われる。しかし、バンド比 5/7 は、植生に対しても大きな値を示すため、植生と熱水変質帯の識別が難しいという問題がある。このため Elvidge and Lyon (1985)¹⁰⁾ は、バンド比 5/7 における植生による貢献割合をバンド 4 (中心波長 0.83 μm) とバンド 3 (中心波長 0.66 μm) のバンド比 4/3 から求め、バンド比 5/7 からその分を差し引くことにより、変質帯に由来するバンド比 5/7 の値を求めた。バンド比 4/3 は、代表的な植生指数の一種である。まず Fig. 3 中の回帰直線で示したように、バンド比 4/3 と 5/7 の間の関係を、様々な種類と密度の植生の画素 (A) から下式のように求める。その際に変質帯の岩石・土壌を含めないよう注意する。CVEG は、バンド比 4/3 から推定される、植生に由来するバンド比 5/7 の値である。

$$\text{CVEG} = a + b \cdot (\text{Band } 0.83 \mu\text{m} / \text{Band } 0.66 \mu\text{m})$$

次に各画素のバンド比 5/7 (CRAW) から、上式で求めた植生による貢献分 (CVEG) を差し引き、変質帯に由来するバンド比 5/7 の値 (CSUB) を求める。

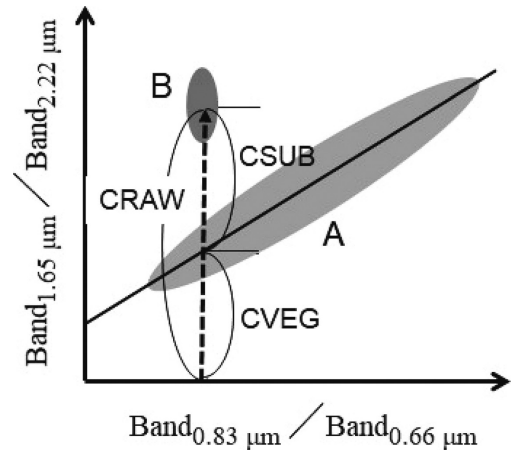


Fig. 3 Schematic diagram of the relation between the 0.83 / 0.66 μm versus 1.65/2.22 μm band ratios. The regression line was derived from the pixels of different vegetation types (A) excluding the pixels of altered rock and soil (B). Modified from Elvidge and Lyon (1985)¹⁰⁾.

$$\text{CSUB} = \text{CRAW} - \text{CVEG}$$

変質帯の画素 (B) の CSUB は、CVEG を示す直線から B までの y 軸方向での距離である (Fig. 3)。CSUB を用いれば、植生の影響を除去して変質帯を抽出できることになる。しかし、この方法は、変質帯以外の画素を用いて 2 つのバンド比の間の関係式を求めているが、変質帯がどこにあるのか未知の場合には、正確な CVEG の式を得ることができない。つまり変質帯の分布を知りたいという課題に対して、現地情報に基づいて変質帯以外の画素を選び、それから式を作るという作業自体が矛盾している。

7.2 DPCA 法

Fraser and Green (1987)¹²⁾ は、Elvidge and Lyon (1985)¹⁰⁾ の方法を改良し、現地情報を使わない方法として directed principal component analysis (DPCA) 法を提案した。この方法も LANDSAT TM のバンド比 4/3 と 5/7 を用いる。植生が存在する画素では、この 2 つのバンド比は、ともに高い値を示す。植生と変質帯、変質していない岩石の 3 者が混在する地域を対象として、Fig. 4 のようにこれら 2 つのバンド比の値を各画素に対してプロットすると、植生の量に応じて 2 つの比の値が増減するため、全体として正の相関を示す。このデータに対して主成分分析 (PCA) をかけると、第 1 主成分はこの相関方向となり、植生の量を示す。第 2 主成分は、それに直交する方向であり、植生の量とは無関係な情報を与えるが、一方で 5.4 節で述べたように熱水変質帯の粘土鉱物の量は、バンド比 5/7 と相関があるため、第 2 主成分は、植生の影響を抑制して変質帯の情報を与えると解釈される。DPCA は、Elvidge and Lyon (1985)¹⁰⁾ の方法とは異なり、変質帯の現地情報は不用であり、その意味では適用しやすい方法である。ただし 5.5 節で述べたように、一般に PCA の結果はシーンに依存しており、ここ

で述べた解釈が必ずしも成り立つとは限らない。特に植生の少ないシーンを対象とした場合、Fig. 4 のような関係が成り立たず、従って第2主成分が変質帯の情報を与えないことがある。こうした植生の少ないシーンでは、まずバンド比 4/3 を使って植生がある程度多い画素のみを抜き出し、それらの画素に対して DPCA 法を適用して軸方向を決めるのが有効であるとされている¹³⁾。

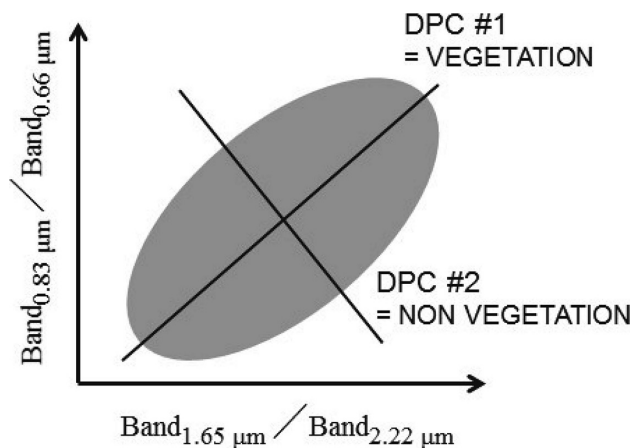


Fig. 4 Schematic diagram of the directed principal component analysis (DPCA)¹²⁾.

7.3 Forced invariance 法

Crippen and Bloom (2001)¹³⁾ は、植生の影響を抑制するため forced invariance 法を提案した。この方法は、バンド比によるカラー合成画像作成と、各バンドの値の変換という2つの別個の手法からなる。いずれもまず植生指数である TM のバンド比 4/3 を使って各画素内の植生の相対量を見積もり、それに対して他のバンド比や各バンドの値の相関を強制的に無くすようにデータを変換することにより、植生の影響を抑制する。

まず植生の影響を抑制したカラー合成画像を作成する方法を紹介する。ここでは4つのバンド比を用いるが、バンド比の間の指数関数的な関係を線形化するため、全てのバンド比の対数値をとる。Fig. 5 に示したように対数値をとったバンド比 4/3 に対して、対数値をとったバンド比

3/1, 5/4, 5/7 をプロットすると、図のような相関関係がみられる。次に植生指数がある程度高い場所、具体的にはバンド比 4/3 が 1.185 以上の画素のみを対象として、バンド比 4/3 に対して無相関となるまで、バンド比 4/3 と相手のバンド比を重み付けして線形に混合する。混合した結果がバンド比 4/3 と正の相関があれば、植生の影響が強すぎるのでバンド比 4/3 の混合割合を減らし、逆に負の相関があれば、植生の影響を除きすぎなのでバンド比 4/3 の割合を増やす。このようにしてバンド比 4/3 と最も相関が小さい混合割合が得られれば、それが植生の影響を除いた結果であるとみなす。Fig. 5 中の実線は、バンド比 4/3 が 1.185 以上の画素において、植生の増減に対するバンド比の変化方向を示す。矢印は、この直線に対して直交する方向であり、上述の混合によって植生の影響が除去された方向を示す。こうして得られた3つのバンド比の値に対して、地形による陰影とアルベド情報を付加するためにバンド 4 の値を掛け合わせた後、加法混色の3原色 RGB を割り当てカラー合成する。その結果、得られた画像では植生の影響は除かれている。また地形情報も付加されているため、岩石や鉱物の識別・マッピングが行い易くなっている。

もう一つの方法では、横軸は植生指数であるバンド 4/3 のままで、縦軸をバンド比ではなく各バンドの値とする (Fig. 6)。まず元データから、大気の影響などによるパスラジアン成分を差し引く。これは 5.4 節と 6.2 節で述べたと同様に、この後の乗法的な比演算処理にパスラジアンなどの加法的因子が影響するのを防ぐためである。次に Fig. 6 に示したように、バンド比 4/3 (植生指数) に対する各バンドの値のプロットにおいて、ベストフィットする曲線を描く。まず植生指数の各々の値に対応する画素のバンド i での平均値を求め、それが x 軸方向に連続するように平滑化する。プラヤ等の極端に大きな値を持つ画素は、平均値を求める際に除外すべきとされている。最後に目標とする DN 値 (例えば 64) を決め、全ての植生指数の値に対して、上述のベストフィットした曲線が目標値で一定となるようにスケーリング (平坦化) を行う。すなわち変換後の画素の値を $\text{Pixel DN}_{\text{new}}$ 、変換前の画素の値を $\text{Pixel DN}_{\text{original}}$ 、目標とする DN 値を Target DN 、ベストフィットした曲線のある植生指数に対する DN 値を Curve

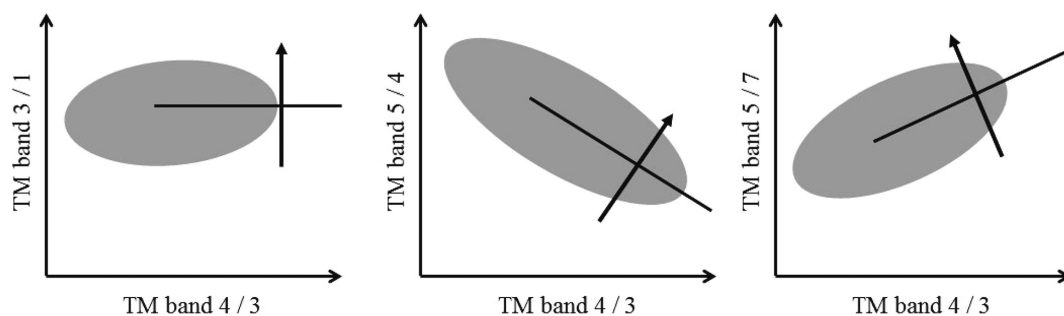


Fig. 5 Schematic diagram of the ratio-versus-index plots with logarithmic scaling by Crippen and Bloom (2000)¹³⁾. Best-fit lines show the vegetation trend, and the arrows indicate data remeasurement direction orthogonal to the vegetation trend.

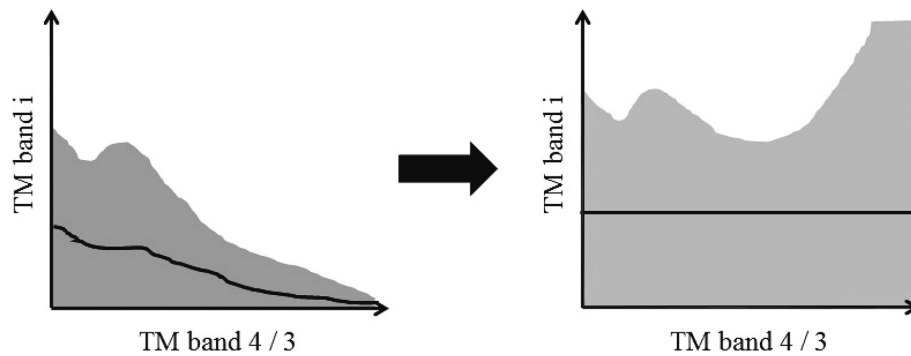


Fig. 6 Schematic diagram of the band-versus-index plots by Crippen and Bloom (2000)¹³⁾. Left: raw band data plotted against TM ratio 4/3 and a smooth best-fit curve. Right: same data after path radiance removal and multiplicative scaling of each index column to flatten the best-fit line at a constant value (e.g. 64).

$DN_{veg. Index}$ とすると、以下のような式となる。

$$\text{Pixel } DN_{new} = \text{Pixel } DN_{original} \times (\text{Target } DN / \text{Curve } DN_{veg. Index})$$

以上の処理により、各バンドの値は植生の影響が抑制されたものとなるため、これらを使ってカラー合成画像を作成したり、さらに岩石・鉱物の識別・マッピング法を適用することになる。この forced invariance 法¹³⁾ は、植生の影響を除くのに有効な方法と考えられるが、処理が複雑なのが難点であり、これまで広く利用されているとは言えない。

8. アンミキシング

リモートセンシングによる観測では、空間分解能に限界があるため、ひとつの画素内に複数の異なる物質が存在することが多い。第7章の植生の影響の軽減・除去も、この考え方に基づいている。ある対象地域において、それぞれ異なる特徴的な分光スペクトルを持つ代表的な物質のことをエンドメンバー (end member) と呼ぶ。ある画素のスペクトルは、エンドメンバーのスペクトルを画素内での存在度 (または占有率) に応じて混合したものである。各画素におけるエンドメンバーの存在度を求めることをアンミキシング (unmixing) と呼ぶが、アンミキシングは対象地域におけるエンドメンバーの決定と、各エンドメンバーの各画素内での存在度を求めることの2段階からなる。

岩石や鉱物を対象とした場合、アンミキシングには検討すべき課題がいくつかある。まずエンドメンバーの決定には、既存のスペクトルライブラリ中の鉱物の反射スペクトルを用いる方法と、解析対象の画像データからエンドメンバーを抽出する方法の2つがある。前者では解析対象地域にどのような鉱物が分布しているのか、事前に分かっている必要はない。また解析対象地域の鉱物とスペクトルライブラリの鉱物の反射スペクトルが一致している必要がある。さらに解析対象データは、地表面での反射率に変換されている必要がある。スペクトルライブラリのデータを用いる場合には、こうした条件が満たされていなければなら

ないが、全てを厳密に満たすのは困難な場合がある。

解析対象の画像データからエンドメンバーを抽出する場合、多くの方法は、エンドメンバーは特定の波長で吸収特徴を持ち、平坦ではない反射スペクトルパターンを持つと仮定している。例えば、代表的なエンドメンバー抽出法である pixel purity index (PPI) 法¹⁴⁾ や convex cone analysis (CCA) 法¹⁵⁾ は、マルチまたはハイパースペクトルデータの作る多次元空間において、エンドメンバーはデータ群の端に存在すると仮定して抽出する。しかし、例えば安山岩や花こう岩の可視～近赤外～短波長赤外域の反射スペクトルは、特徴的な吸収は持たずに平坦なことがほとんどで、データ群の中心付近に存在している。これらの岩石も、重要なエンドメンバーである可能性はあるが、従来の PPI 法などでは平坦なスペクトルを持つ岩石は、エンドメンバーとしては抽出されにくい。こうした問題点を解決するため、Ishidoshiro et al. (2016)¹⁶⁾ は、まずアンミキシング処理に適した領域と適さない領域に対象地域を2つに区分した。具体的には、変質鉱物などの短波長赤外域に特徴的な吸収を持つ物質が存在する画素と、それらが存在しない画素に分類し、前者に対しては改良した PPI 法と線形混合モデルによるアンミキシングを、後者に対しては代表的な教師なし分類法であるクラスタリング (k-means 法) を適用し、最後にこれら2つの方法による解析結果を統合した (Fig. 7)。これにより2つの方法の特徴を生かして、変質帯とそれ以外の地域の両者を適切にマッピングすることができた。

アンミキシングにおける2番目の問題は、各画素内でのエンドメンバーの存在度を求める段階において、エンドメンバーのスペクトルの混合は、それぞれの存在度に比例した線形の混合¹⁷⁾ を仮定できるかどうかである。例えば、ひとつの画素内に水面とコンクリートで覆われた陸面の2つのエンドメンバーが存在している場合、2つのエンドメンバーは互いに電磁波の反射または放射に関して干渉し合わないため、対象となる画素のスペクトルは、水面と陸面の存在度に応じてそれぞれのスペクトルを線形に混合したものとなる。一方、2つの異なる鉱物、例えばカオリナイ

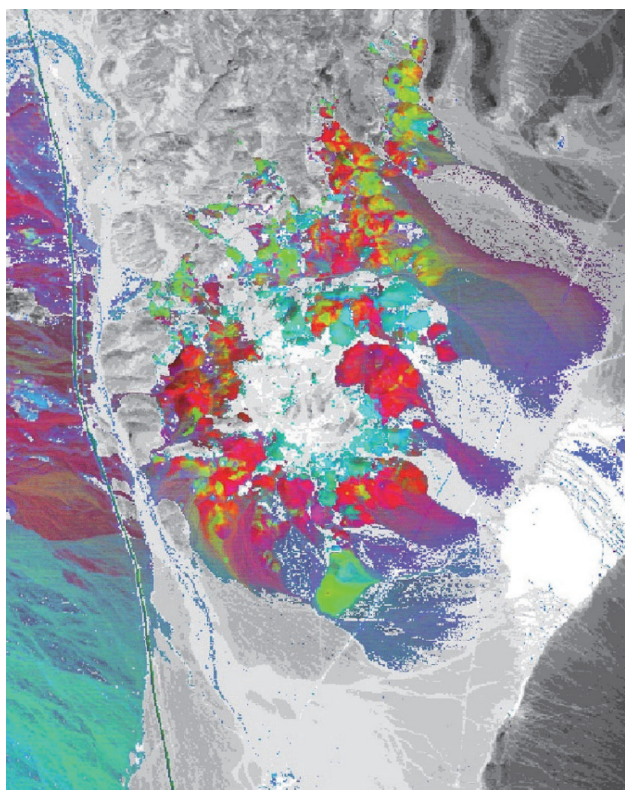


Fig. 7 Combined result of distribution map of rocks and minerals¹⁶⁾. The color composite image was generated by assigning R to alunite, G to kaolinite, and B to montmorillonite abundances derived from the unmixing analysis. The monochrome image was the k-means clustering result for unaltered rocks.

トと石英がひとつの画素内に混在していた場合、この画素のスペクトルは、これら2つの鉱物の存在度に応じてそれぞれのスペクトルを線形で混合したものにはならない。カオリナイトは、短波長赤外域で特徴的な吸収を示すのに対して、石英はこの波長域では吸収特徴は持たないが、赤外光の一部を透過させる。このため、石英を透過した赤外光は、その後で石英に隣接するカオリナイトに当たり、そこで吸収される。この過程により、赤外光は実際のカオリナイトの存在度以上にカオリナイトによる吸収を受けてしまう。複数の鉱物の混合では、このような複雑な反射・透過・吸収プロセスが起る場合があり、対象とする画素のスペクトルから単純な線形混合モデルによってエンドメンバーの存在度を求められないことが多い。このため、例えば等粒子モデルを用いたエンドメンバーの存在度の推定法¹⁸⁾などが提案されているが、こうした非線形の混合モデルには検討の余地が残されている。

9. スペクトル情報と地形情報の統合表示

本連載講義で述べてきたように、スペクトル情報に基づいた岩石・鉱物の識別・マッピングでは、地形効果の抑制が重要である。例えばバンド比演算やSAM法は、地形効果を抑制する有効な方法である。直交変換の一種であるPCAでは、第2主成分以下にRGBを割り当ててカラー合成することにより、地形効果を抑制して地表面の物質のスペクトルの違いを強調することができる。また広く用いられている教師付分類では、各画素をいずれかの鉱物や岩石種に分類し、クラス毎の色に塗りつぶして表示する場合が多く、地形は表現されていない。一方で地形は、地質に関する重要な情報を与えてくれることが多いし、野外調査で

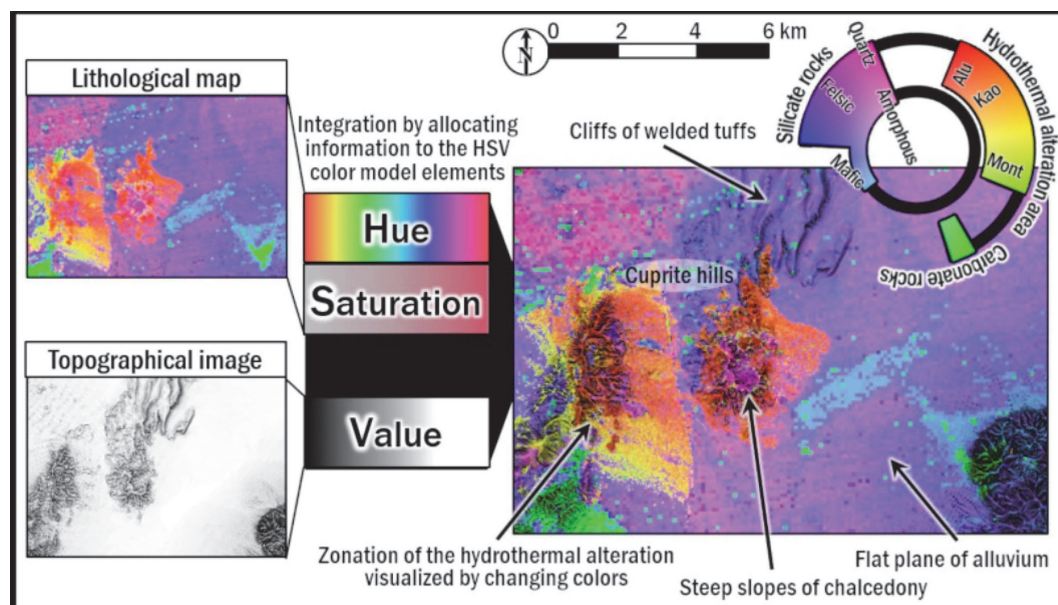


Fig. 8 The graphical abstract of the paper on integration and visualization of mineralogical and topographical information derived from ASTER and DEM data²²⁾.

は調査地点の確認の際に地形情報が不可欠である。最近では全世界を対象とした高空間分解能のデジタル地形モデル (DEM) が入手可能となっており¹⁹⁾²⁰⁾, そうした DEM データを活用できれば, 地質調査や地下資源探査に役立つ。

別の問題点として, カラー画像上の色の地質学的な意味付けがある。マルチまたはハイパースペクトルデータの各バンドやバンド比を RGB 原色に割り当てたカラー合成画像の作成では, 一度に扱えるバンド数の制約があるうえ, RGB への割り当ての組み合わせが多数あり得るため, カラー合成画像の色の解釈は容易ではない。また PCA によるカラー画像では, 変換係数がシーンに依存するため, 同様に画像上の色の地質学的な意味付けが難しい。

以上のような状況と問題点から, スペクトル情報による岩石・鉱物の識別・マッピングでは地形効果を抑制することが必要であるが, 最終的には地形情報も統合して表現できること, さらにリモートセンシングを専門としないユーザにも画像上の色の解釈が容易にできることが重要である。倉田・山口 (2018)²¹⁾ は, ASTER の幅広い波長域のスペクトルバンドの解析結果を HSV 表色系により 1 枚のカラー画像に統合して表現する方法を提案した。すなわち色相 (H) に鉱物の種類を, 彩度 (S) に鉱物の相対的な量を割り当てることでスペクトル情報による岩石・鉱物の識別結果を示し, 明度 (V) は可視域のバンド 1~3 により短波長赤外域のバンド 4 をパンシャープンすることで地形情報を表現した。Kurata and Yamaguchi (2019)²²⁾ はこの方法をさらに改良し, ASTER の熱赤外バンドを用いた新たな岩相指標によってケイ酸塩岩のマッピングを可能とした。さらに DEM データから求めた grayscale relief map (GRM) を明度 (V) に割り当てることで地形をより明瞭に表現した。Fig. 8 がこの方法による統合画像である。赤~オレンジ~黄~黄緑色は, 熱水変質帯における明バン石, カオリナイト, モンモリロナイトなどの累帯構造を, 青色は炭酸塩岩を, シアン~マゼンタ色はシリカ含有率に応じたケイ酸塩岩の違いを表している。また明度によって, 険しい山地や平坦な沖積層分布域, メサ状の火砕流台地などの地形も, 見易く表現されている。この画像を使えば, リモートセンシングの知識が十分でない地質専門家でも, 岩石・鉱物の分布と地形の判読を容易に行うことができる。ただしこの方法では, 入力となる ASTER のデータプロダクトは, 大気補正済の地表面反射率や地表面放射率を想定している。

10. おわりに

本連載講義では, 光学センサ画像による岩石・鉱物の識別・マッピングについて, 代表的な方法の原理や実例を紹介した。これまでに様々な方法が提案されているが, 残念ながらあらゆる場合に適用できる万能の方法は存在せず, 知りたい情報, 対象地域, データの特徴や制約などから最適な方法を選ぶことになる。複雑な計算を必要とする方法のほうが, 単純な方法よりも優れた結果を与えてくれると

は限らないし, 数学的に洗練された方法が, 地質学的に解釈しやすい結果を与えてくれる保証もない。また, ひとつの方法だけで目的とする岩石・鉱物の識別・マッピングが上手く行くとはい限らない。例えば第 8 章で紹介したように対象をいくつかに区分し, 各々に適した方法でデータを処理し, 最後に処理結果を統合するやり方もある。さらに観測データには, 地形傾斜, 大気による散乱, 鉱物の粒度, 植生, ミキシングなど様々な効果が影響を与えており, 岩石・鉱物の識別・マッピングの前に, 前処理でこれらの効果を軽減・抑制することが必要な場合もある。

例えば異なる岩相の境界を肉眼判読で描きたいだけなら, 提供された DN 値をデコリレーションストレッチしたカラー画像で十分なこともある。しかし, カラー画像上の色の地質学的な意味付けや, 地形も含めて判読を行いたい場合には, Kurata and Yamaguchi (2019)²²⁾ の方法が役立つが, データ処理はより複雑になり, 入力データは反射率や放射率に変換されている必要がある。反射率や放射率のデータプロダクトが提供されていない場合には, 本連載講義第 1 回で解説した方法を使って, 自ら反射率や放射率に変換することになる。以上のような点を十分に考慮し, 前処理も含めて適切な方法を選択することが重要である。

本連載講義では岩石・鉱物マッピングの手法や応用例の全ては網羅できなかったため, 手法の解説としては例えば岡田・杉田 (2003)²³⁾, 地質リモートセンシングに関するレビューとしては van der Meer et al. (2012)²⁴⁾, ASTER による地質マッピングの応用例としては Abrams and Yamaguchi (2019)²⁵⁾ などをご参照いただきたい。

引用文献

- 1) G. R. Hunt, R. P. Ashley: Spectra of altered rocks in the visible and near infrared, *Econ. Geol.*, **74**, pp. 1613-1629, 1979.
- 2) S. Noda, Y. Yamaguchi: Estimation of surface iron oxide abundance with suppression of grain size and topography effects, *Ore Geol. Rev.*, **83**, pp. 312-320, 2017.
- 3) A. A. Green, M. D. Craig: Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals, *Proc. Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, pp. 111-119, 1985.
- 4) R. N. Clark, T. L. Roush: Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications, *Jour. Geophys. Res.*, **89**, pp. 6329-6340, 1984.
- 5) R. S. Vikes, R. J. P. Lyon: Infrared sensing from spacecraft — a geologic interpretation —, *Proc. Termophys. Special Conf.*, American Institute of Astronautics, Paper 67-284, 1967.
- 6) Y. Ninomiya: Quantitative estimation of SiO₂ content in igneous rocks using thermal infrared spectra with a neural network approach, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **33** (3), pp. 684-691, 1995.
- 7) 大岡 隆, 小島和浩, 増田信行, 広瀬和世, ASTER データ利用技術の開発, *資源地質*, **52** (1), pp. 45-49, 2002.
- 8) J. B. Adams, T. B. McCord: Alteration on lunar optical properties: age and composition effects, *Science*, **171**, pp. 567-571,

- 1971.
- 9) P. G. Lucey, D. T. Blewett, B. L. Jolliff: Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images, *Jour. Geophys. Res.*, **105** (E8), pp. 20297–20305, 2000.
 - 10) C. D. Elvidge, R. J. P. Lyon: 1985, Estimation of the vegetation contribution to the 1.65/2.22 μm ratio in airborne thematic-mapper imagery of the Virginia Range, Nevada, *Inter. Jour. Remote Sens.*, **6** (1), pp. 75–88, 1985.
 - 11) M. L. Labovitz, E. J. Masuoka, R. Bell, A. W. Siegrist, R. F. Nelson: The application of remote sensing to geobotanical exploration for metal sulfides — results from the 1980 field season at Mineral, Virginia, *Econ. Geol.*, **78** (3), pp. 750–760, 1983.
 - 12) S. J. Fraser, A. A. Green: A software defoliant for geological analysis of band ratios, *Inter. Jour. Remote Sens.*, **8** (3), pp. 525–532, 1987.
 - 13) R. E. Crippen, R. G. Bloom: Unveiling the lithology of vegetated terrains in remotely sensed imagery, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **67** (8), pp. 935–943, 2001.
 - 14) J. W. Boardman, F. A. Kruse, R. O. Green: Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data, *Summaries Fifth Annual JPL Airborne Geosci. Workshop, JPL Pub. 95-1*, **1**, pp. 23–26, 1995.
 - 15) A. Ifarraguerri, C. I. Chang: Multispectral and hyperspectral image analysis with convex cones, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **37** (2), pp. 756–770, 1999.
 - 16) N. Ishidoshiro, Y. Yamaguchi, S. Noda, Y. Asano, T. Kondo, Y. Kawakami, M. Mitsuishi, and H. Nakamura: Geological mapping by combining spectral unmixing and cluster analysis for hyperspectral data, *Inter. Archives Photogram. Remote Sens. Spatial Sci.*, **XLI-B8**, pp. 431–435, 2016.
 - 17) Y. E. Shimabukuro, J. A. Smith: Fraction images derived from remote sensing multispectral data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **29** (1), pp. 16–20, 1991.
 - 18) T. Hiroi, H. Takeda: A method to determine silicate abundances from reflectance spectra with applications to asteroid 29 Amphitrite associating it with primitive achondrite meteorite, *Icarus*, **88**, pp. 205–227, 1990.
 - 19) H. Fujisada, M. Urai, A. Iwasaki: Technical methodology for ASTER global DEM, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **50**, 3725–3736, 2012.
 - 20) <https://www.aw3d.jp/> (accessed on July 8, 2019)
 - 21) 倉田夏菜, 山口 靖, ASTER データから得られた岩相指標の HSV 表色系による統合, 日本リモートセンシング学会誌, **38** (2), pp. 163–173, 2018.
 - 22) K. Kurata, Y. Yamaguchi: Integration and visualization of mineralogical and topographical information derived from ASTER and DEM data, *Remote Sensing*, **11** (2), 162, 2019.
 - 23) 岡田和也, 杉田幹雄, スペクトル解析, 資源・環境リモートセンシング実用シリーズ③ 地球観測データからの情報抽出, (財)資源・環境観測解析センター, pp. 63–128, 2003.
 - 24) F. D. van der Meer, H. M. A. van der Werff, F. J. A. van Ruitenbeek, C. A. Hecker, W. H. Bakker, M. F. Noomen, M. van der Meijde, E. J. M. Carranza, J. B. de Smith, T. Woldai: Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review, *Inter. Jour. Applied Earth Observ. Geoinform.*, **14**, pp. 112–128, 2012.
 - 25) M. J. Abrams, Y. Yamaguchi: Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration, *Remote Sens.*, **11** (11), 1394, 2019.

〔著者紹介〕

●山口 靖 (ヤマグチ ヤスシ)



所属：名古屋大学大学院環境学研究科教授。1980 年東北大学大学院理学研究科地学専攻修士課程修了。同年工業技術院地質調査所入所。1980～82 年新エネルギー総合開発機構出向。1984～86 年米国スタンフォード大学応用地球科学部客員研究員。1996 年名古屋大学大学院理学研究科

助教授。2001 年より現職。2012～14 年日本リモートセンシング学会会長。2016～17 年 IEEE GRSS Japan Chapter Chair, ASTER サイエンスチーム日本側リーダー。

受賞歴

1. 日本リモートセンシング学会 論文奨励賞, 1990 年
山口 靖, リニアメント解析における低俯角 SAR 画像の照射方向の効果. 日本リモートセンシング学会誌, 4 (1), 5-15, 1984.
2. 日本リモートセンシング学会 優秀論文発表賞
 - 1) 1995 年: 土田 聡・山口 靖・佐藤 功, 雪原を用いた可視・近赤外センサの軌道上相互校正. 日本リモートセンシング学会第 18 回学術講演会, 習志野, 1995.
 - 2) 1996 年: 山口 靖・小野高幸・山路 敦・佐々木晶・岡田達明・浦塚清峰, 月レーダサウンダー検討グループ, 月周回衛星搭載レーダーサウンダーによる月表層テクニクスの観測計画. 日本リモートセンシング学会第 20 回学術講演会, 東京, 1996.
 - 3) 1999 年: 市井和仁・松井洋平・山口 靖・小川克郎, 高 NDVI 域と砂漠を用いた NDVI データセットの補正とその経年変化. 日本リモートセンシング学会第 27 回学術講演会, 熊本, 1999.
 - 4) 2000 年: 猪飼純二・山口 靖・森山雅雄, NOAA-AVHRR Split-window Data と NCEP-GDAS Data の回帰による可降水量の見積り. 日本リモートセンシング学会第 28 回学術講演会, つくば, 2000.
 - 5) 2007 年: 赤池隆直・山口 靖, ASTER データによる森林域での潜熱フラックスの推定. 日本リモートセンシング学会第 41 回学術講演会, 那覇, 2006.
 - 6) 2015 年: 石 玉勝・山口 靖・松永恒雄, High-resolution mapping of biomass burning emissions in Southeast Asia during 2001-2010. 日本リモートセンシング学会第 46 回学術講演会, つくば, 2014.
 - 7) 2017 年: 倉田夏菜・山口 靖, ASTER データから得られた岩相指標の HSV 表色系による統合. 日本リモートセンシング学会第 60 回学術講演会, 習志野, 2016.
3. 日本リモートセンシング学会 論文賞, 1999 年
土田 聡・佐藤 功・山口 靖・新井康平・高島 勉, 北海道・雪原域を用いた可視・近赤外域センサの Reflectance-Based Method による放射輝度軌道上絶対校正. 日本リモートセンシング学会誌, 18 (1), 12-31, 1998.
4. Environmental Research Institute of Michigan, Thirteenth International Conference on Geologic Remote Sensing, Best of Session, Vancouver, Canada, 1999 年: Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Odajima, T., Tsuchida, S., and Kamai, T., Detection of landslide movement using SPOT HRV and ADEOS AVNIR data in Azumayama area, Japan.
5. 日本リモートセンシング学会 功績賞, 2015 年

6. アメリカ合衆国航空宇宙局 (NASA) Group Achievement Award, Terra Lunar Deep Space Calibration Team, 2019 年
7. アメリカ合衆国内務省および航空宇宙局 (NASA) William T. Pecora Award (Group Award), Terra Team, 2019 年
8. 指導学生の受賞
 - 1) 渡辺志穂：物理探査学会 優秀ポスター賞, 2010 年
対象発表：渡辺志穂・渡辺俊樹・押上祥子・山口 靖・山路 敦・小野高幸・熊本篤志・中川広務・小林敬生, 月の地下エコー検出のための LRS データ解析方法の検討. 物理探査学会第 121 回 (平成 21 年度秋季) 学術講演会, 名古屋, 2009.
 - 2) 陳 学泓：ISPRS Commission VIII Best Paper Award, 2010 年
対象発表：Chen, X., Yamaguchi, Y., and Chen, J., A new measure of classification error: designed for landscape pattern index. ISPRS Technical Commission VIII Symposium, Kyoto, Japan, 2010.
 - 3) Hemu Kafle：The World Academy of Science (TWAS) Award for the year 2014 in Physics; For developing model of land surface heat fluxes in complex terrain at regional scale useful for water management and sustainable agriculture production, 2014 年
対象論文：Kafle, H. and Yamaguchi, Y., Effect of topography on the spatial distribution of evapotranspiration over a complex terrain using two-source energy balance model with ASTER data. Hydrological Processes, 23 (16), 2295-2306, 2009.
 - 4) Natsagdorj Batbayar：Best Presentation Award (second place), 2019 年
対象発表：Batbayar, N., Yamaguchi, Y., and Oidov, M., Lithological mapping by using ASTER data in the Ih-Ulziit area, Umnugobi province. 15th International Conference of Geology and Geography of Young Researchers' "KHURELTGOOT 2019", Ulaanbaatar, Mongolia, 2019.
 - 5) 倉田夏菜：日本リモートセンシング学会 論文奨励賞, 2020 年
対象論文：倉田夏菜・山口 靖, ASTER データから得られた岩相指標の HSV 表色系による統合. 日本リモートセンシング学会誌, 38(2), 163-173, 2018.

研 究 業 績

I. 原著論文

1. 山口 靖・津嶋春秋・北村 信, 北上山地”田老帯”および”岩泉帯”南部の地質構造発達史. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 80, 99-117, 1979.
2. 山口 靖, 北部北上山地東部の地質構造 –とくに地質構造帯区分に関する諸問題について–. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 83, 1-19, 1981.
3. 川村政和・山口 靖, 宮城県鬼首地域における赤外線熱映像調査. 物理探鉱, 35 (6), 13-29, 1982.
4. 陶山淳治・石井吉徳・山口 靖・鎌田浩毅・長谷紘和・小川克郎, 合成開口レーダによる日本全国の地熱資源調査. 日本リモートセンシング学会誌, 2 (4), 57-66, 1982.
5. 山口 靖・長谷紘和, 多様な画像によるリニアメント頻度の解析 –レーダ画像の屋久島地域への適用例について–. 写真測量とリモートセンシング, 22 (3), 4-13, 1983.
6. 村岡洋文・山口 靖・中澤 敏, 南八甲田と八甲田カルデラの相互関係 –レーダー画像判読とその現地検証–. 地質学雑誌, 89 (11), 661-664, 1983.
7. 山口 靖・長谷紘和・矢野雄策・衣笠善博, レーダー画像による豊肥地域のリニアメント解析と土壌ガス法による現地検証. 日本地熱学会誌, 6 (2), 101-120, 1984.
8. 山口 靖, リニアメント解析における低俯角 SAR 画像の照射方向の効果. 日本リモートセンシング学会誌, 4 (1), 5-15, 1984.
9. 長谷紘和・野田徹郎・山口 靖, 土壌ガス法による「豊岡―宮原線」西半の調査結果とその地熱探査上の意義. 地質調査所報告, 264, 153-165, 1985.
10. Yamaguchi, Y., Hase, H., Yano, Y., and Kinugasa, Y., Lineament analysis of radar images and associated soil gas surveys in Hohi geothermal area. *Energy Developments in Japan*, 7, 369-391, 1985.
11. Yamaguchi, Y., Image scale and look-direction effects on the detectability of lineaments in radar images. *Remote Sensing of Environment*, 17 (2), 117-127, 1985.
12. 山口 靖, 福島県南会津郡田島町周辺の火砕流堆積物の K-Ar 年代. 北村信教授退官記念地質学論文集, 629-636, 1986.
13. 曾屋龍典・阪口圭一・宇都浩三・中野 俊・星住英夫・鎌田浩毅・角井朝昭・金子信行・山元孝広・土谷信之・須藤 茂・山崎晴雄・山口 靖・奥村晃史・富樫茂子, 伊豆大島火山 1986 年の噴火の経過と噴出物. 地質調査所月報, 38 (11), 609-630, 1987.
14. Yamaguchi, Y., Possible techniques for lithologic discrimination using the short-wavelength-infrared bands of the Japanese ERS-1. *Remote Sensing of Environment*, 23 (1), 117-129, 1987.
15. 土田 聡・山口 靖・長谷紘和, リニアメント抽出過程におけるサイズ分布の変化. 写

- 真測量とリモートセンシング, 28 (2), 4-13, 1989.
16. 山口 靖・浦井 稔・Honey, F.R., スペクトル指標による岩相識別. 日本リモートセンシング学会誌, 9 (3), 19-29, 1989.
 17. 山口 靖, 航空機搭載多バンドスキャナデータによる岩相識別ー西オーストラリア州マーブルバーでの例ー. 中川久夫教授退官記念地質学論文集, 319-324, 1991.
 18. 高倉伸一・山口 靖, 南会津地域の岩石密度. 地質調査所報告, 275, 165-181, 1991.
 19. 山口 靖, 南会津地域の地熱系モデルと地熱資源量評価. 地質調査所報告, 275, 199-227, 1991.
 20. 村岡洋文・山口 靖・長谷紘和, 八甲田地熱地域で見出されたカルデラ群. 地質調査所報告, 275, 99-111, 1991.
 21. 浦井 稔・佐藤 功・二宮芳樹・古宇田亮一・宮崎芳徳・山口 靖, 可視～短波長赤外域における粘土・炭酸塩岩の反射スペクトルとその特徴. 地質調査所報告, 285, 11-26, 1992.
 22. 山口 靖・津 宏治・浦井 稔・佐藤 功・宮崎芳徳, JERS-1 ユーザ要求仕様の画像データによる予察的評価. 日本リモートセンシング学会誌, 12 (3), 93-98, 1992.
 23. Yamaguchi, Y., Discrimination of lithology using remote sensing data in the visible to near-infrared regions. *The Geological Survey of Japan, Report*, 278, 39-127, 1992.
 24. Tsu, H., Miyazaki, Y., Yamaguchi, Y., and Sato, I., Current status and science objectives of ASTER Project. *Advances in Space Research*, 14 (3), 141-145, 1994.
 25. Arai, K., Ono, A., and Yamaguchi, Y., In-flight test site calibration of EOS-AM1/ASTER/TIR with MODIS. *Advances in Space Research*, 14 (3), 227-230, 1994.
 26. Moon, W.M., Li, B., Singhroy, V., So, C.S., and Yamaguchi, Y., Note on JERS-1 SAR data characteristics for geological applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20 (3), 329-332, 1994.
 27. Slater, P.N., Thome, K.J., Arai, K., Fujisada, H., Kieffer, H.H., Ono, A., Sakuma, F., Palluconi, F.D., and Yamaguchi, Y., Radiometric calibration of ASTER data. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 15 (2), 16-23, 1995.
 28. Ono, A., Sakuma, F., Arai, K., Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Slater, P.N., Thome, K.J., Palluconi, F.D., and Kieffer, H.H., Preflight and inflight calibration plan for ASTER. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13 (2), 321-335, 1996.
 29. Sano, I., Mukai, S., Takashima, T., and Yamaguchi, Y., Retrieval algorithms for photopolarimetric properties of aerosols. *Advances in Space Research*, 17 (1), 63-66, 1996.
 30. 浦井 稔・山口 靖, 地球科学における SAR 差分インターフェロメトリの応用例と地熱リザーバモニタリングへの適用可能性, 地質調査所月報, 47 (1), 3-31, 1996.
 31. Ninomiya, Y., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., Ogawa, K., Rokugawa, S., Uchida, K., Muraoka, H., and Kaku, K., Comparison of TIR emissivity spectra measured in situ, in the

- laboratory, and derived from TIMS data in Cuprite, Nevada. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (7), 1571-1582, 1997.
32. 大竹正巳・佐藤比呂志・山口 靖, 福島県南会津, 後期中新世木賊カルデラの形成史, 地質学雑誌, 103 (1), 1-20, 1997.
 33. 土田 聡・山口 靖・浦井 稔・佐藤 功, 可視・近赤外域センサ軌道上校正用ターゲットとしての雪原の適性. 日本リモートセンシング学会誌, 17 (1), 36-53, 1997.
 34. 丹羽雄輔・山口 靖・小川克郎, SAR 画像判読による中部地域のリニアメントと活断層の比較. 日本リモートセンシング学会誌, 17 (2), 35-50, 1997.
 35. 山路 敦・佐々木晶・山口 靖・小野高幸・春山純一・岡田達明, 月の海におけるテクトニクスと熱史. 月刊地球, 19 (11), 730-733, 1997.
 36. Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Tsu, H., Kawakami, T., and Pniel, M., Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4), 1062-1071, 1998.
 37. 土田 聡・佐藤 功・山口 靖・新井康平・高島 勉, 北海道・雪原域を用いた可視・近赤外域センサの Reflectance-Based Method による放射輝度軌道上絶対校正. 日本リモートセンシング学会誌, 18 (1), 12-31, 1998.
 38. 山路 敦・佐々木晶・山口 靖・小野高幸・春山純一・岡田達明, 月の起源・進化・テクトニクス. 地質学論集, 50, 213-226, 1998.
 39. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., Tsu, H., Kahle, A.B., and Pniel, M., ASTER instrument characterization and operation scenario. *Advances in Space Research*, 23 (8), 1415-1424, 1999.
 40. Zhang, W.C., Zhang, Y.S., Ogawa, K., and Yamaguchi, Y., Observation and estimation of daily actual evapotranspiration and evaporation on a glacierized watershed at the headwater of the Urumqi River, Tianshan, China. *Hydrological Processes*, 13 (11), 1589-1601, 1999.
 41. Islam, M.R., Begun, S.F., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., The Ganges and Brahmaputra rivers in Bangladesh: basin denudation and sedimentation. *Hydrological Processes*, 13 (17), 2907-2923, 1999.
 42. 浦井 稔・福井敬一・山口 靖・Pieri, D.C., ASTER による火山観測の可能性とグローバル火山観測計画. 火山, 44 (3), 131-141, 1999.
 43. Kimura, H. and Yamaguchi, Y., Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (3), 337-344, 2000.
 44. Islam, M.R., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Reflectances in the Ganges and Brahmaputra Rivers and in the adjacent coastal sea. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (11), 2213-2224, 2000.

45. Zhang, W.C., Ogawa, K., and Yamaguchi, Y., A monthly streamflow model for estimating the potential changes of river runoff on the projected global warming. *Hydrological Processes*, 14 (10), 1851-1868, 2000.
46. Zhang, W.C., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Evaluation of the effect of pre-processing of the remotely sensed data on the actual evapotranspiration, surface soil moisture content mapping by an approach using Landsat TM, DEM and meteorological data. *Geocarto International*, 15 (4), 57-67, 2000.
47. 児玉信介・山口 靖, クレメンタイン UV-VIS データによる月の海の地質解析. 日本リモートセンシング学会誌, 20 (4), 12-23, 2000.
48. Islam, M. R., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Suspended sediments in the Ganges and Brahmaputra Rivers in Bangladesh: observation from TM and AVHRR data. *Hydrological Processes*, 15 (3), 493-509, 2001.
49. Kawabata, A., Ichii, K., and Yamaguchi, Y., Global monitoring of the interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (7), 1377-1382, 2001.
50. Ichii, K., Matsui, Y., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Comparison of global NPP trends obtained from satellite based NDVI and carbon cycle model. *Global Biogeochemical Cycles*, 15 (2), 351-363, 2001.
51. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Tsu, H., Sato, I., Watanabe, H., Kato, M., Kudoh, M., Kahle, A.B., and Pniel, M., ASTER early image evaluation. *Advances in Space Research*, 28 (1), 69-76, 2001.
52. Islam, M.R., Begum, S.F., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Distribution of suspended sediment in the coastal sea off the Ganges-Brahmaputra River mouth: observation from TM data. *Journal of Marine Systems*, 32 (2), 307-321, 2002.
53. Ichii, K., Kawabata, A., and Yamaguchi, Y., Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982 to 1990. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (18), 3873-3878, 2002.
54. Adhikary, S., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Estimation of snow ablation under a dust layer covering a wide range of albedo. *Hydrological Processes*, 16 (14), 2853-2865, 2002.
55. Sasaki, S., Kubota, T., Okada, T., Saiki, K., Kuroda, Y., Kunii, Y., Shibamura, E., Akiyama, N., Ohtake, M., Ichikawa, M., Higa, M., Hirata, N., Sugihara, T., Haruyama, J., Ohtake, H., Yoshioka, N., Terazono, J., Yamada, M., Yamaguchi, Y., and Kodama, S., Scientific exploration of lunar surface using a rover in Japanese future lunar mission. *Advances in Space Research*, 30(8), 1921-1926, 2002.
56. 市井和仁・松井洋平・村上和隆・山口 靖・小川克郎, 人為的二酸化炭素排出による地球環境の将来予測: シンプルな炭素循環-気候モデルと地球観測衛星データによる解析.

- 日本リモートセンシング学会誌, 22 (5), 625-636, 2002.
57. Adhikary, S., Ogawa, K., and Yamaguchi, Y., Concurrent analysis on dirt aggregation and albedo changes on a melting snow surface. *Journal of Environmental Hydrology*, 10, 1-14, 2002
 58. Begum, S.F., Islam, M.R., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Studies on surface temperature using remote sensing technique in the NW part of Bangladesh. *Geocarto International*, 18 (3), 41-49, 2003.
 59. Kodama, S. and Yamaguchi, Y., Lunar mare volcanism in the eastern nearside region derived from Clementine UV/VIS data. *Meteoritics & Planetary Science*, 38 (10), 1461-1484, 2003.
 60. Yamaguchi, Y. and Naito, C., Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (22), 4311-4323, 2003.
 61. Ichii, K., Maruyama, M., and Yamaguchi, Y., Multitemporal analysis of deforestation in Rondonia State in Brazil using Landsat MSS, TM, ETM+, and NOAA AVHRR imagery, and its relationships to changes in the local hydrological environment. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (22), 4467-4479, 2003.
 62. Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Odajima, T., Kamai, T., and Tsuchida, S., Detection of landslide movement as geometric misregistration in image matching of SPOT HRV data of two different dates. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (18), 3523-3534, 2003.
 63. Yamaguchi, Y. and Takeda, I., Mineralogical mapping by ASTER in Cuprite, Nevada, U.S.A. *Asian Journal of Geoinformatics*, 3 (3), 17-24, 2003.
 64. Ichii, K., Matsui, Y., Murakami, K., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., A simple global carbon and energy coupled cycle model for global warming simulation: Sensitivity to the light saturation effect. *Tellus Ser. B*, 55B, 676-691, 2003.
 65. Matthews, J.P., Wallis, S.R., and Yamaguchi, Y., ASTER views a high altitude Tibetan lake in stereo. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 85 (43), 435-440, 2004.
 66. Zhang, W.C., Chen, J., Ogawa, K., and Yamaguchi, Y., An approach to estimating evapotranspiration in the Urumqi River basin, Tianshan, China, by means of remote sensing and a geographical information system technique. *Hydrological Processes*, 19 (9), 1839-1854, 2005.
 67. Sasai, T., Ichii, K., Yamaguchi, Y., and Nemani, R., Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model BEAMS: Biosphere model integrating Eco-physiological And Mechanistic approaches using Satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 110, G02014, 2005.
 68. Kato, S. and Yamaguchi, Y., Analysis of urban heat island effect using ASTER and ETM+

- data –separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation in sensible heat flux-. *Remote Sensing of Environment*, 99 (1-2), 44-54, 2005.
69. Liu, Y., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sensing of Environment*, 105 (2), 115-128, 2006.
 70. Liu, Y., Hiyama, T., Kimura, R., and Yamaguchi, Y., Temporal influences on Landsat-5 Thematic Mapper image in visible band. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (15), 3183-3201, 2006.
 71. Kato, S. and Yamaguchi, Y., Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 110 (1), 1-17, 2007.
 72. Sasai, T., Okamoto, K., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., Comparing terrestrial carbon fluxes from the scale of a flux tower to the global scale. *Ecological Modelling*, 208 (2-4), 135-144, 2007.
 73. Kawakami, Y., Hoshi, H. and Yamaguchi, Y., Mechanism of caldera collapse and resurgence: observations from the northern part of the Kumano Acidic Rocks, Kii Peninsula, southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167 (1-4), 263-281, 2007.
 74. Liu, Y., Yamaguchi, Y., and Ke, C., Reducing the discrepancy between ASTER and MODIS land surface temperature products. *Sensors*, 7, 3043-3057, 2007.
 75. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Use of remote sensing to monitor urbanization of Hanoi city center. *International Journal of Geoinformatics*, 3 (4), 55-61, 2007.
 76. Dewan, A.M. and Yamaguchi, Y., Effect of land cover changes on flooding: example from Greater Dhaka of Bangladesh. *International Journal of Geoinformatics*, 4 (1), 11-20, 2008.
 77. Noda, A. and Yamaguchi, Y., Characterizing urban sprawl using remote sensing, GIS and a spatial metric for a medium-sized city in Japan. *International Journal of Geoinformatics*, 4 (1), 43-50, 2008.
 78. 山口 靖, 名古屋大学環境学研究科における文理連携型コースワーク ー体系理解科目の改革例ー. 名古屋高等教育研究, 8, 59-70, 2008.
 79. Ono, T., Kumamoto, A., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kasahara, Y., and Oya, H., Instrumentation and observation target of the Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. *Earth, Planets and Space*, 60 (4), 321-332, 2008.
 80. Kato, S., Yamaguchi, Y., Liu, C.C., and Sun, C.Y., Surface heat balance analysis of Tainan city on March 6, 2001 using ASTER and Formosat-2 data. *Sensors*, 8, 6026-6044, 2008.
 81. Kafle, H.K. and Yamaguchi, Y., Surface heat fluxes estimated from the two-source energy balance model using ASTER data in a heterogenous area. *International Journal of*

- Geoinformatics*, 4 (4), 1-7, 2008.
82. Liu, C., Chang, Y., Huang, S., Wu, F., Wu, M., Kato, S., and Yamaguchi, Y., First space-borne high-spatial-resolution optical imagery of Amundsen-Scott Station from Formosat-2. *Antarctic Science*, 20 (6), 605-606, 2008.
 83. Liu, C., Chang, Y., Huang, S., Yen, K., Wu, F., Wu, M., Kato, S., and Yamaguchi, Y., Monitoring the dynamics of ice shelf margins in Polar Regions with high-spatial- and high-temporal-resolution space-borne optical imagery. *Cold Regions Science and Technology*, 55 (1), 14-22, 2009.
 84. Ono, T., Kumamoto, A., Nakagawa, H., Yamaguchi, Y., Oshigami, S., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kasahara, Y., and Oya, H., Lunar Radar Sounder observations of subsurface layers under the nearside maria of the Moon. *Science*, 323, 909-912, 2009.
 85. Liu, Y., Noumi, Y., and Yamaguchi, Y., Discrepancy between ASTER- and MODIS-derived land surface temperature: terrain effect. *Sensors*, 9, 1054-1066, 2009.
 86. Dewan, A.M. and Yamaguchi, Y., Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960-2005. *Environmental Monitoring and Assessment*, 150 (1-4), 237-249, 2009.
 87. Kafle, H.K. and Yamaguchi, Y., Effect of topography on the spatial distribution of evapotranspiration over a complex terrain using two-source energy balance model with ASTER data. *Hydrological Processes*, 23 (16), 2295-2306, 2009.
 88. Dewan, A.M. and Yamaguchi, Y., Land use and land cover changes in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 29 (3), 390-401, 2009.
 89. Ohtake, M., Matsunaga, T., Haruyama, J., Yokota, Y., Morota, T., Honda, C., Ogawa, Y., Torii, M., Miyamoto, H., Arai, T., Hirata, N., Iwasaki, A., Nakamura, R., Hiroi, T., Sugihara, T., Takeda, H., Otaka, H., Pieters, C.M., Saiki, K., Kitazato, K., Abe, M., Asada, N., Demura, H., Yamaguchi, Y., Sasaki, S., Kodama, S., Terazono, J., Shirao, M., Yamaji, A., Minami, S., Akiyama, H., and Josset, J., The global distribution of pure anorthosite on the Moon. *Nature*, 461 (7261), 236-241, 2009.
 90. Oshigami, S., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Ono, T., Kumamoto, A., Kobayashi, T., and Nakagawa, H., Distribution of the subsurface reflectors of the western nearside maria observed from Kaguya with Lunar Radar Sounder. *Geophysical Research Letters*, 36, L18202, 2009.
 91. Kodama, S., Takeda, I., and Yamaguchi, Y., Mapping of hydrothermally altered rocks using Modified Spectral Angle Mapper (MSAM) method and ASTER SWIR data. *International Journal of Geoinformatics*, 6 (1), 41-53, 2010.
 92. Shakya, N. and Yamaguchi, Y., Vegetation, water and thermal stress index for study of

- drought in Nepal and central northeastern India. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (4), 903-912, 2010.
93. Ono, T., Kumamoto, A., Kasahara, Y., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Oshigami, S., Nakagawa, H., Goto, Y., Hashimoto, K., Omura, Y., Imachi, T., Matsumoto, H., and Oya, H., The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the KAGUYA (SELENE) spacecraft. *Space Science Reviews*, 154 (1-4), 145-192, 2010.
 94. Murakami, K., Sasai, T., and Yamaguchi, Y., A new one-dimensional simple energy balance and carbon cycle coupled model for global warming simulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 101 (3-4), 459-473, 2010.
 95. Dewan, A.M., Yamaguchi, Y., and Rahman, M.Z., Dynamics of land use/cover changes and the analysis of landscape fragmentation in Dhaka Metropolitan, Bangladesh. *GeoJournal*, 77 (3), 315-339, 2010.
 96. Pham, H.M., Yamaguchi, Y., and Bui, T.Q., A case study on the relation between city planning and urban growth using remote sensing and spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, 100 (3), 223-230, 2011.
 97. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Urban growth and change analysis using remote sensing and spatial metrics from 1975 to 2003 for Hanoi, Vietnam. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (7), 1901-1915, 2011.
 98. Sasai, T., Saigusa, N., Nasahara, K.N., Ito, A., Hashimoto, H., Nemani, R.R., Hirata, R., Ichii, K., Takagi, K., Saitoh, T.M., Ohta, T., Murakami, K., Yamaguchi, Y., and Oikawa, T., Satellite-driven estimation of terrestrial carbon flux over Far East Asia with 1-km grid resolution. *Remote Sensing of Environment*, 115 (7), 1758-1771, 2011.
 99. Liu, Y., Noumi, Y., and Yamaguchi, Y., Quantifying variability of satellite data in the reflective band for long-term monitoring of the Earth's surface: inference from a multi-temporal relationship between remotely sensed pixels. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (22), 7717-7730, 2011.
 100. Chen, X., Yamaguchi, Y., and Chen, J., Weighted misclassification rate: a new measure of classification error designed for landscape pattern index. *Remote Sensing Letters*, 3 (1), 57-65, 2012.
 101. Oshigami, S., Okuno, S., Yamaguchi, Y., Ohtake, M., Haruyama, J., Kobayashi, T., Kumamoto, A., and Ono, T., The layered structure of lunar maria: Identification of the HF-radar reflector in Mare Serenitatis using multiband optical images. *Icarus*, 218, 506-512, 2012.
 102. Kobayashi, T., Kim, J.H., Lee, S.R., Kumamoto, A., Nakagawa, H., Oshigami, S., Oya, H., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., and Ono, T., Synthetic aperture radar processing of Kaguya Lunar Radar Sounder data for lunar subsurface imaging. *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing*, 50 (6), 2161-2174, 2012.
103. Chen, X., Yamaguchi, Y., Chen, J., and Shi, Y., Scale effect of vegetation index based spatial sharpening for thermal imagery: a simulation study by ASTER data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9 (4), 549-553, 2012.
 104. Shi, Y., Xiao, J., Shen, Y., and Yamaguchi, Y., Quantifying the spatial differences of landscape change in the Hai River Basin, China in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (14), 4482-4501, 2012.
 105. Chen, X., Chen, J., Shi, Y., and Yamaguchi, Y., An automated approach for updating land cover maps based on integrated change detection and classification methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 86-95, 2012.
 106. Kato, S., Liu, C., Sun, C., Chen, P., Tsai, H., and Yamaguchi, Y., Comparison of surface heat balance in three cities in Taiwan using Terra ASTER and Formosat-2 RSI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 263-273, 2012.
 107. Ho, L.T.K., Yamaguchi, Y., and Umitsu, M., Rule-based landform classification by combining multi-spectral/ temporal satellite data, and the SRTM DEM. *International Journal of Geoinformatics*, 8 (4), 27-38, 2012.
 108. Oshigami, S., Yamaguchi, Y., Uezato, T., Momose, A., Arvelyna, Y., Kawakami, Y., Yajima, T., Miyatake, S., and Nguno, A., Mineralogical mapping of southern Namibia by applying the continuum-removal MSAM method to the HyMap data. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (15), 5282-5295, 2013.
 109. Ho, L.T.K., Yamaguchi, Y., and Umitsu, M., Delineation of small-scale landforms relative to flood inundation in the western Red River delta, northern Vietnam using remotely sensed data. *Natural Hazards*, 69 (1), 906-917, 2013.
 110. Ishiyama, K., Kumamoto, A., Ono, T., Yamaguchi, Y., Haruyama, J., Ohtake, M., Katoh, Y., Terada, N., and Oshigami, S., Estimation of the permittivity and porosity of the lunar uppermost basalt layer based on observations of impact craters by SELENE. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118, 1-15, 2013.
 111. Yajima, T. and Yamaguchi, Y., Geological mapping of the Francistown area in northeastern Botswana by surface temperature and spectral emissivity information derived from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared data. *Ore Geology Reviews*, 53, 134-144, 2013.
 112. 加藤伸祐・諸田智克・山口 靖・大嶽久志・大竹真紀子, 月の海の玄武岩組成が示唆する月マントルの進化史. 日本惑星科学会誌 (遊星人), 22 (4), 194-199, 2013.
 113. Shi, Y., Sasai, T., and Yamaguchi, Y., Spatio-temporal evaluation of carbon emissions from biomass burning in Southeast Asia during the period 2001-2010.

- Ecological Modelling*, 272, 98-115, 2014.
114. 石山 謙・熊本篤志・小野高幸・山口 靖・春山純一・大竹真紀子・加藤雄人・寺田直樹・押上祥子, かぐや衛星観測データに基づく月上旬の玄武岩質溶岩ユニットのバルク誘電率と空隙率推定. 日本惑星科学会誌 (遊星人), 23 (1), 4-14, 2014.
 115. Chen, X., Li, W., Chen, J., Rao, Y., and Yamaguchi, Y., A combination of TsHARP and thin plate spline interpolation for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing*, 6 (4), 2845-2863, 2014.
 116. Oshigami, S., Watanabe, S., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kumamoto, A., Ishiyama, K., and Ono, T., Mare volcanism: Reinterpretation based on Kaguya Lunar Radar Sounder data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119, 1037-1045, 2014.
 117. Yajima, T. and Yamaguchi, Y., Application of inverted slope images for geological mapping - reduction of artifacts in digital elevation models by filtering in the frequency domain. *International Journal of Geoinformatics*, 10 (2), 1-11, 2014.
 118. Zhang, X. and Yamaguchi, Y., Characterization and evaluation of MODIS derived Drought Severity Index (DSI) for monitoring the 2009/2010 drought over southwestern China. *Natural Hazards*, 74, 2129-2145, 2014.
 119. Shi, Y. and Yamaguchi, Y., A high-resolution and multi-year emissions inventory for biomass burning in Southeast Asia during 2001-2010. *Atmospheric Environments*, 98, 8-16, 2014.
 120. Yamamoto, S., Matsunaga, T., Nakamura, R., Sekine, Y., Hirata, N., and Yamaguchi, Y., Rotational pixel swapping method to detect circular features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53 (2), 710-723, 2015.
 121. Sakai, T., Hatta, S., Okumura, M., Hiyama, T., Yamaguchi, Y., and Inoue, G., Use of Landsat TM/ETM+ to monitor the spatial and temporal extent of spring break-up floods in the Lena River, Siberia. *International Journal of Remote Sensing*, 36 (3), 719-733, 2015.
 122. 山本 聡・松永恒雄・中村良介・関根康人・平田 成・山口 靖, 回転ピクセルスワッピング法を使ったクレーター年代学. 日本惑星科学会誌 (遊星人), 24 (1), 20-32, 2015.
 123. Oshigami, S., Yamaguchi, Y., Mitsuishi, M., Momose, A., and Yajima, T., An advanced method for mineral mapping applicable to hyperspectral images: the composite MSAM. *Remote Sensing Letters*, 6 (7), 499-508, 2015.
 124. Shi, Y., Matsunaga, T., Saito, M., Yamaguchi, Y., and Chen, X., Comparison of global inventories of CO₂ emissions from biomass burning during 2002-2011 derived from multiple satellite products. *Environmental Pollution*, 206, 479-487, 2015.
 125. Shi, Y., Matsunaga, T., and Yamaguchi, Y., High-resolution mapping of biomass

- burning emissions in three tropical regions. *Environmental Science and Technology*, 49, 10806-10814, 2015.
126. Cudahy, T., Caccetta, M., Thomas, M., Hewson, R., Abrams, M., Kato, M., Kashimura, O., Ninomiya, Y., Yamaguchi, Y., Collings, S., Laukamp, C., Ong, C., Lau, I., Rodger, A., Chia, J., Warren, P., Woodcock, R., Fraser, R., Rankine, T., Vote, J., Caritat, P., English, P., Meyer, D., and Doescher, C., Earth observation mineral indicators for weathering, deposition, erosion and desertification. *Scientific Reports*, 6, 3702, 2016.
 127. Ishidoshiro, N., Yamaguchi, Y., Noda, S., Asano, Y., Kondo, T., Kawakami, Y., Mitsuishi, M., and Nakamura, H., Geological mapping by combining spectral unmixing and cluster analysis for hyperspectral data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences*, XLI-B8, 431-435, 2016.
 128. Sakai, T., Matsunaga, T., Maksyutov, S., Gotovtsev, S., Gagarin, L., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., Climate-induced extreme hydrologic events in the Arctic. *Remote Sensing*, 8 (11), 971, 2016.
 129. Zhang, X., Yamaguchi, Y., Li, F., He, B., and Chen, Y., Assessing the impacts of the 2009/2010 drought on vegetation indices, normalized water index, and land surface temperature in southwestern China. *Advances in Meteorology*, Article ID 6837493, 2017.
 130. Noda, S. and Yamaguchi, Y., Estimation of surface iron oxide abundance with suppression of grain size and topography effects. *Ore Geology Reviews*, 83, 312-320, 2017.
 131. Yamamoto, S., Matsunaga, T., Nakamura, R., Sekine, Y., Hirata, N., and Yamaguchi, Y., An automated method for crater counting using rotational pixel swapping method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55 (8), 4384-4397, 2017.
 132. Kato, S., Morota, T., Yamaguchi, Y., Watanabe, S., Otake, H., and Ohtake, M., Magma source transition of lunar mare volcanism at 2.3 Ga. *Meteoritics & Planetary Science*, 52 (9), 1899-1915, 2017.
 133. Shi, Y., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., Li, Z., Gu, X., and Chen, X., Long-term trends and spatial patterns of satellite-retrieved PM2.5 concentrations in South and Southeast Asia from 1999 to 2014. *Science of The Total Environment*, 615, 177-186, 2018.
 134. Zhou, X., Yamaguchi, Y., and Arjasakusuma, S., Distinguishing the vegetation dynamics induced by anthropogenic factors using vegetation optical depth and AVHRR NDVI: A cross-border study on the Mongolian Plateau. *Science of The Total Environment*, 616-617, 730-743, 2018.
 135. Arjasakusuma, S., Yamaguchi, Y., Hirano, Y., and Zhou, X., ENSO- and rainfall-sensitive vegetation regions in Indonesia as identified from multi-sensor remote sensing data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 103, 2018.
 136. 倉田夏菜・山口 靖, ASTER データから得られた岩相指標の HSV 表色系による

- 統合. 日本リモートセンシング学会誌. 38(2), 163-173, 2018.
137. Shi, Y., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., Zhao, A., Li, Z., and Gu, X., Long-term trends and spatial patterns of PM2.5-induced premature mortality in South and Southeast Asia from 1999 to 2014. *Science of The Total Environment*, 631-632, 1504-1514, 2018.
 138. Arjasakusuma, S., Yamaguchi, Y., Nakaji, T., Kosugi, Y., Shamsuddin, S. A., and Lion, M., Assessment of values and trends in coarse spatial resolution NDVI datasets in South East Asia landscapes. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 863-877, 2018.
 139. Zhou, X. and Yamaguchi, Y., Relative importance of climatic and anthropogenic drivers on the dynamics of aboveground biomass across agro-ecological zones on the Mongolian Plateau. *Sustainability*, 10 (10), 3435, 2018.
 140. Shi, Y., Zhao, A., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., Zang, S., Li, Z., Yu, T., and Gu, X., Underlying causes of PM2.5-induced premature mortality and potential health benefits of air pollution control in South and Southeast Asia from 1999 to 2014. *Environmental International*, 121 (1), 814-823, 2018.
 141. Yoshida, H., Hasegawa, H., Katsuta, N., Maruyama, I., Sirono, S., Minami, M., Asahara, Y., Nishimoto, S., Yamaguchi, Y., Ichinnorov, N. and Metcalfe, R., Fe-oxide concretions formed by interacting carbonate and acidic waters on Earth and Mars. *Science Advances*, 4 (12), eaau0872, 2018.
 142. Kurata, K. and Yamaguchi, Y., Integration and visualization of mineralogical and topographical information derived from ASTER and DEM data. *Remote Sensing*, 11 (2), 162, 2019.
 143. Shi, Y., Zhao, A., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., Zang, S., Li, Z., Yu, T., and Gu, X., High resolution inventory of mercury emissions from biomass burning in tropical continents during 2001-2017. *Science of The Total Environment*, 653, 638-648, 2019.
 144. Guha, A., Yamaguchi, Y., Chatterjee, S., Rani, K., and Kumar, K.V., Emittance spectroscopy and broadband thermal remote sensing applied to phosphorite and its utility in geoexploration: a study in the parts of Rajasthan, India. *Remote Sensing*, 11 (9), 1003, 2019.
 145. Tanaka, S., Tsuru, H., Someno, K., and Yamaguchi, Y., Identification of alteration minerals from unstable reflectance spectra using a deep learning method. *Geosciences*, 9(5), 195, 2019.
 146. Shi, Y., Zang, S., Matsunaga, T., and Yamaguchi, Y., A multi-year and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001-2017 based on satellite observations. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122511, 2020.
 147. Asano, Y., Yamaguchi, Y., and Kodama, S., Geological mapping by thermal inertia derived from long-term maximum and minimum temperatures of ASTER data. *The*

II. 総説など

1. 山口 靖, 地質リモートセンシング. 情報地質, 1 (1), 31-39, 1990.
2. 宮崎芳徳・山口 靖, 地質・資源分野におけるリモートセンシングの現状と将来動向. 日本リモートセンシング学会誌, 11 (1), 59-65, 1990.
3. Yamaguchi, Y., Hase, H., and Ogawa, K., Remote sensing for geothermal applications. *Episodes*, 15 (1), 62-67, 1992.
4. 山口 靖, ASTER の地質分野への応用, 日本リモートセンシング学会誌, 15 (2), 50-55, 1995.
5. 山口 靖, ASTER による地球観測. 写真測量とリモートセンシング (日本写真測量学会誌), 35 (1), 52-57, 1996.
6. 山口 靖・丸山裕一, 地質リモートセンシングの歴史と現状. 日本リモートセンシング学会誌, 19 (5), 2-12, 1999.
7. 山口 靖, 光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング第1回. 日本リモートセンシング学会誌, 39 (2), 141-147, 2019.
8. 山口 靖, 光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング第2回. 日本リモートセンシング学会誌, 39 (3), 241-249, 2019.
9. 山口 靖, 光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング第3回. 日本リモートセンシング学会誌, 39 (4), 315-322, 2019.
10. Abrams, M.J. and Yamaguchi, Y., Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11 (11), 1394, 2019.
11. 山口 靖・児玉信介・野田周帆, 資源・地質分野におけるリモートセンシング利用の現状と課題, 展望. 日本リモートセンシング学会誌, 41 (2), 印刷中, 2021.

III. 著書

1. 理科年表読本「宇宙から見た地球」: 分担執筆, 丸善, 1988.
2. 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ別冊「用語辞典」: 分担執筆, 資源観測解析センター, 1988.
3. 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ第2巻「宇宙からの地球観測システム」: 分担執筆, 資源観測解析センター, 1990.
4. 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ第6巻「資源探査への応用(1) 石油・天然ガス」: 分担執筆, 資源観測解析センター, 1991.
5. 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ第5巻「合成開口レーダー(SAR)」:

- 分担執筆, 資源観測解析センター, 1992.
6. 日本地質アトラス第2版「日本地熱資源図」: 共著, 朝倉書店, 1992.
 7. 特殊地質図 31-1, 50 分の 1「新潟」地熱資源図及び同説明書: 共著, 地質調査所, 1993.
 8. *The Use of EOS for Studies of Atmospheric Physics*: 分担執筆, Societa Italiana di Fisica, 1993.
 9. 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ第 7 巻「資源探査への応用(2) 鉱物資源・その他」: 分担執筆, 資源観測解析センター, 1993.
 10. 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ第 1 巻「資源リモートセンシング概論」: 分担執筆, 資源観測解析センター, 1995.
 11. 新編リモートセンシング用語辞典: 分担執筆, 資源観測解析センター, 1996.
 12. 科学技術用語大辞典第 3 版: 分担執筆, 日刊工業社, 1996.
 13. リモートセンシングハンドブック: 分担執筆, 宇宙開発事業団, 1997.
 14. 物理探査ハンドブック 手法編: 分担執筆, 物理探査学会, 1998.
 15. リモートセンシング通論: 分担執筆, 日本リモートセンシング研究会, 2000.
 16. リモートセンシング応用事例: 分担執筆, 日本リモートセンシング研究会, 2001.
 17. 宇宙からの地球観測: 編・分担執筆, 資源・環境観測解析センター, 2001.
 18. 地球観測データの処理: 編・分担執筆, 資源・環境観測解析センター, 2002.
 19. 地球観測データからの情報抽出: 編・分担執筆, 資源・環境観測解析センター, 2002.
 20. はじめてのリモートセンシング～地球観測衛星 ASTER で見る～: 監修, 古今書院, 2004.
 21. 地球観測データの利用(1): 編・分担執筆, 資源・環境観測解析センター, 2004.
 22. 地球観測データの利用(2): 編・分担執筆, 資源・環境観測解析センター, 2005.
 23. 環境学研究ソースブック 伊勢湾流域圏の視点から: 分担執筆, 藤原書店, 2005.
 24. 宇宙から見た地質—日本と世界—: 編・分担執筆, 朝倉書店, 2006.
 25. *Water and Carbon Cycles in Terrestrial Ecosystems -The Textbook for Fifteenth IHP Training Course in 2005-*: 分担執筆, Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University (HyARC), United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2006.
 26. 新しい地球学: 分担執筆, 名古屋大学出版会, 2008.
 27. 宇宙から見た地形—日本と世界—: 編・分担執筆, 朝倉書店, 2010.
 28. 社会環境学の世界: 分担執筆, 日本評論社, 2010.
 29. 地球化学講座 8「地球化学実験法」: 分担執筆, 培風館, 2010.
 30. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*: 分担執筆, Springer, 2010.
 31. 基礎からわかるリモートセンシング: 分担執筆, 理工図書, 2011.
 32. *The Kaguya Mission to the Moon*: 分担執筆, Springer, 2011.
 33. *Remote Sensing, An Introductory Textbook*: 分担執筆, Maruzen Planet, 2013.
 34. 古地図で楽しむなごや今昔: 分担執筆, 風媒社, 2014.

35. シベリア 温暖化する極北の水環境と社会：分担執筆，京都大学出版会，2015.
36. *Global Warming and Human – Nature Dimension in Northern Eurasia*：分担執筆，総合地球環境学研究所，2018.
37. リモートセンシングの応用・解析技術 農林水産・環境・防災から建築・土木，高精度マッピングまで：分担執筆，NTS，2019.
38. ASTER 20th Anniversary：編・分担執筆，MDPI，2020.

IV. 国際学会論文集

1. Hase, H., Muraoka, H., Yamaguchi, Y., and Kamata, H., Fracture and geothermal fluid induced collapse of volcanic body defined by radar remote sensing. *Proc. MMAJ / AusIMM Joint Symposium Session JA*, 1-14, 1983.
2. Yamaguchi, Y. and Lyon, R.J.P., A comparative field study of spectro-radiometers and radiometers as used in geologic mapping of porphyry copper at Yerington. *Proc. 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 523-532, 1985.
3. Lyon, R.J.P. and Yamaguchi, Y., Field analysis of AIS imagery for over late-stage hydrothermal alteration of the Ann Mason porphyry copper deposits, Yerington, NV. *Proc. 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 619, 1985.
4. Roberts, D.A., Yamaguchi, Y., and Lyon, R.J.P., Calibration of Airborne Imaging Spectrometer data to percent reflectance using field spectral measurements. *Proc. 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 679-688, 1985.
5. Roberts, D.A., Yamaguchi, Y., and Lyon, R.J.P., Comparison of various techniques for calibration of AIS data. *Proc. 2nd Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, 21-30, 1986.
6. Yamaguchi, Y. and Lyon, R.J.P., Identification of clay minerals by feature coding of near-infrared spectra. *Proc. Fifth Thematic Conference International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 627-636, 1986.
7. Muraoka, H., Yamaguchi, Y. and Sakaguchi, K., Andean-type volcanism in the Late Cenozoic Northeast Japan arc, *International Symposium on Andean volcanism Abstracts*, 380-382, 1987.
8. Yamaguchi, Y., Spectral indices for vegetation and rock type discrimination using the optical sensor of the Japanese ERS-1. *Proc. 6th Thematic Conference International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 159-168, 1988.
9. Yamaguchi, Y., Sato, I., and Ohkura, T., Development of a field radiometer as a ground truth equipment for the Japanese ERS-1. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27 (B7), 718-727, 1988.

10. Tsuchida, S., Yamaguchi, Y., and Hase, H., Investigation of lineaments from remote sensing data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27 (B7), 619-628, 1988.
11. Sato, I., Yamaguchi, Y., Deng, Z.L., Wang, P.Q., Urai, M., and Ninomiya, Y., Application of TM data to a geologic structure study of eastern Liaoning Province, China. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27 (B10), 424-434, 1988.
12. Yamaguchi, Y., Urai, M., and Honey, F.R., Application of Geoscan AMSS MKI data to lithologic mapping in Queensland, Australia. *Proc. 7th Thematic Conference International Symposium on Remote Sensing for Exploration Geology*, 395-409, 1990.
13. Yamaguchi, Y., Origin of Luoquangou circular structure in Xiuyan. *Report on International Research and Development Cooperation ITIT Project*, 8713, 73-81, 1990.
14. Yamaguchi, Y., Tsu, H., and Sato, I., Japanese mission overview of JERS and ASTER Programs. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 1490, 324-334, 1991.
15. Yamaguchi, Y., Tsu, H., and Fujisada, H., Scientific basis of ASTER instrument design. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 1993, 150-160, 1993.
16. Yamaguchi, Y., Geologic application of JERS-1 SAR data. *Proc. Asia-Pacific International Space Year Conference*, 2, 27-30, 1993.
17. Arai, K., Ono, A., and Yamaguchi, Y., An accuracy assessment of the interactive calibration on ASTER / TIR and MODIS. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1993*, 3, 1303-1305, 1993.
18. Rokugawa, S., Sato, I., Yamaguchi, Y., Watanabe, H., Kannari, Y., Mills, F., Ezaka, T., Narita, T., Sano, M., and Chang, S., Estimation of land surface characteristics using data from an airborne ASTER simulator. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1993*, 1, 123-125, 1993.
19. Takashima, T., Kawata, Y., Ueno, S., and Yamaguchi, Y., Polarimetric investigation of oceanic aerosol over the West Pacific. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1993*, 4, 1925-1927, 1993.
20. Yamaguchi, Y., Tsu, H., Fujisada, H., Kahle, A. and Nichols, D., ASTER instrument design and science objectives. *Proc. 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 94-0597, 1-10, 1994.
21. Yamaguchi, Y., Ooka, T., Inoue, T., and Ohkura, T., Automatic field identification of alteration minerals using a new portable infrared spectroradiometer. *Proc. 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, 2, 73-77, 1994.
22. Yamaguchi, Y., Tsuchida, S., Matsunaga, T., and Lyon, R.J.P., Evaluation of JERS-1/OPS data for lithologic mapping in Yerington, Nevada. *Proc. 10th Thematic Conference on*

- Geologic Remote Sensing*, 2, 91-96, 1994.
23. Moon, W.M., Singhroy, V., Kouda, R., Yamaguchi, Y., and Lamontagn, M., Integrated imaging of JERS-1 and ERS-1 SAR data for earthquake tectonic investigation of the Nahanni Earthquake Area in Northwest Territories, Canada. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1994*, 2, 707, Pasadena, U.S.A., 1994.
 24. Mukai, S., Sano, I., Takashima, T. and Yamaguchi, Y., Aerosol retrieval based on photopolarimetry. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1994*, 4, 1898-1900, Pasadena, U.S.A., 1994.
 25. Yamaguchi, Y., Tsu, H., Kawakami, T., Watanabe, H., Kahle, A.B., Nichols, D.A., and Morrison, A.D., ASTER data acquisition scenario. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 2583, 41-50, 1995.
 26. Yamaguchi, Y., Tsuchida, S., Matsunaga, T., Sato, I., Urai, M., Ninomiya, Y., Miyazaki, Y., and Lyon, R.J.P., Evaluation of OPS capability for lithologic mapping. *Final Report of JERS-1/ERS-1 System Verification Program*, 1, 510-520, 1995.
 27. Moon, W. M., Singhroy, V., Yamaguchi, Y., and Kouda, R., JERS-1 SAR data characteristics and application to earthquake tectonic study in Nahanni, Northwest Territories, Canada. *Final Report of JERS-1/ERS-1 System Verification Program*, 1, 240-265, 1995.
 28. Urai, M., Sato, I., and Yamaguchi, Y., Texture classification of rock facies using JERS-1 SAR images. *Final Report of JERS-1/ERS-1 System Verification Program*, 1, 521-528, 1995.
 29. Urai, M., Yamaguchi, Y., and Sato, I., Texture classification of rock facies using ERS-1 AMI images. *Final Report of JERS-1/ERS-1 System Verification Program*, 1, 573-580, 1995.
 30. Yamaguchi, Y., Rowan, R.C., Tsu, H., and Kahle, A.B., Application of ASTER data to geological studies. *Proc. 11th Thematic Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 1, 77-86, 1996.
 31. Ninomiya, Y., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., Muraoka, H., Kaku, M., and Uchida, K., TIR spectral measurement at Cuprite, Nevada, and comparison with TIMS data. *Proc. 11th Thematic Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 1, 169-178, 1996.
 32. Tsuchida, S., Yamaguchi, Y., and Matsunaga, T., Lithologic mapping using the SWIR bands of JERS-1/OPS and Landsat/TM. *Proc. 11th Thematic Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 1, 448-450, 1996.
 33. Tsuchida, S., Yamaguchi, Y., and Sato, I., Uncertainty estimate of snow fields for in-flight calibration of satellite sensors. *Proc. 11th Thematic Conference on Applied Geologic*

- Remote Sensing*, 2, 49-58, 1996.
34. Tsu, H., Yamaguchi, Y., and Kahle, A.B., ASTER science mission overview. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 2817, 52-59, 1996.
 35. Tsuchida, S., Sato, I., and Yamaguchi, Y., Vicarious calibration with doubling-adding method at the snow field. *Proc. 12th International Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing*, 119-128, 1997.
 36. Yamaguchi, Y., Recent progress in remote sensing for earth and planetary exploration. *Proc. First Saudi-Japanese Symposium on Remote Sensing Application*, 1-9, 1997.
 37. Moon, M.W., Ristau, J., Vachon, P., Tanaka, A., and Yamaguchi, Y., Investigation of Nahanni earthquake tectonics using space-borne SAR techniques. *Proc. The Second Workshop on SAR Interferometry*, 209-219, 1997.
 38. Kimura, H., Yamaguchi, Y., and Todo, M., Detection of landslide-prone areas from SAR interferometry. *Proc. The Second Workshop on SAR Interferometry*, 237-241, 1997.
 39. Ninomiya, Y., Matsunaga, T., and Yamaguchi, Y., Estimation of SiO₂ content using simulated TIR remote sensing data generated from spectra measured on the sawed surfaces of rocks at Cuprite, Nevada, U.S.A. *Proc. International Geological Congress (IGC)*, 10, 49-62, 1997.
 40. Odajima, T., Tsuchida, S., Yamaguchi, Y., Kamai, T., Siagian, Y.O.P., and Sugalang, GIS and remote sensing based analysis of landslide hazards in Cianjur, West Java, Indonesia. *Proc. International Symposium on Application of Remote Sensing and Geographic Information System to Disaster Reduction*, 185-190, 1998.
 41. Yamaguchi, Y., Kawakami, T., Kahle, A.B., Pniel, M., and Tsu, H., ASTER mission planning and operation concept. *Proc. Fifth International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems (Space Ops 98)*, 2b006, 1-8, 1998.
 42. Yamaguchi, Y., Odajima, T., Tsuchida, S., Kamai, T., Tanaka, S., Siagian, Y.O.P., Sugalang, and Sugiharto Nitihardjo, Landslide susceptibility assessment and movement monitoring using remote sensing and GIS techniques. *Proc. JUST Workshop on the Utilization of Remote Sensing Technology to Natural Disaster Reduction*, 109-123, 1998.
 43. Yamaguchi, Y. and Naito, C., Spectral indices for lithologic discrimination using the ASTER SWIR bands. *Proc. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 1, 151-158, 1999.
 44. Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Odajima, T., Tsuchida, S., and Kamai, T., Detection of landslide movement using SPOT HRV and ADEOS AVNIR data in Azumayama area, Japan. *Proc. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 2I, 97-103, 1999.
 45. Islam, M.R., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., Remote sensing analysis of spatial and

- seasonal variations of suspended sediments in the Ganges and Brahmaputra River and in their estuary. *Proc. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 2, 109-116, 1999.
46. Urai, M., Fukui, K., Yamaguchi, Y., and Pieri, D.C., Global volcano monitoring plan with ASTER. *Proc. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 2, 78-83, 1999.
 47. Zhang, W., Yamaguchi, Y., and Ogawa, K., An approach for mapping the actual evapotranspiration, surface soil moisture by using Landsat TM, DEM, and meteorological data: I. Pre-processing of the image data for its application in the Urumqi River Basin, Tianshan, China. *Proc. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 2, 440-449, 1999.
 48. Zhang, W., Ogawa, K., and Yamaguchi, Y., An approach for mapping the actual evapotranspiration, surface soil moisture by using Landsat TM, DEM, and meteorological data: II. Application to the Urumqi River Basin, Tianshan, China. *Proc. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 2, 450-459, 1999.
 49. Feng, L., Moon, W.M., Kim, D.-J., Choi, K.H., and Yamaguchi, Y., Investigation of Baiktu-san (Volcano) using spaceborne SAR system. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1999*, 1, 270-272, 1999.
 50. Yamaguchi, Y., ASTER instrument design and operation concept. *Proc. International Workshop 2000 on Generation of Advanced Earth Environmental Information*, Hiroshima Institute of Technology, 239-248, 2000.
 51. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Kahle, A.B., Tsu, H., Kato, M., Watanabe, H., Sato, I., and Kudoh, M., ASTER instrument performance, operation status, and application to earth sciences. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2001*, 1215-1216, 2001.
 52. Ichii, K., Yamaguchi, Y., and Kawabata, A., Global decadal changes in NDVI and its relationships to climate variables. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2001*, 4, 1818-1819, 2001.
 53. Tsu, H., Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Kahle, A.B., Sato, I., Kato, M., Watanabe, H., Kudoh, M., and Pniel, M., ASTER early science outcome and operation status. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 4169, 1-8, 2001.
 54. Doi, N., Yamaguchi, Y., Muraoka, H., Sekine, H., Narita, T., Ohno, T., Cohen, R.H., Wenkert, D., Geller, G.N., Molloy, A.R., and Pniel, M., ASTER target observation scenario. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 4169, 67-77, 2001.
 55. Yamaguchi, Y., ASTER performance and image evaluation. *Proc. International Workshop*

- 2001 on Generation of Advanced Earth Environmental Information, Hiroshima Institute of Technology, 437-445, 2001.
56. Yamaguchi, Y., ASTER project overview. *Proc. International Symposium on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS)*, 28-33, 2002.
 57. Tsu, H., Fujisada, H., Yamaguchi, Y., Kudo, M., Kato, M., and Watanabe, H., Overview of ASTER instrument and ASTER data products. *Proc. SPIE (International Society for Optical Engineering)*, 4486, 1-13, 2002.
 58. Kodama, S. and Yamaguchi, Y., Mare volcanism in the nearside of the moon inferred from Clementine UVVIS data. *Proc. 36th ISAS Lunar and Planetary Symposium*, Japan Aerospace Exploration Agency, 149-152, 2003.
 59. Schmugge, T., Abrams, M., Kahle, A.B., Yamaguchi, Y., and Fujisada, H., The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. *Proc. SPIE (International Society for Optical Engineering)*, 4879, 1-12, 2003.
 60. Yamaguchi, Y., Kato, S., Okamoto, K., Surface heat flux analysis in urban areas using ASTER and MODIS data. *Proc. 2nd International Symposium on GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences*, 105-110, 2004.
 61. Maruyama, M., Ichii, K., Yamaguchi, Y., Land-cover analysis using Landsat imagery and deforestation influence on rainfall in Rondonia State, Brazilian Amazon. *Proc. 2nd International Symposium on GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences*, 211-216, 2004
 62. Kato, S. and Yamaguchi Y., Heat balance analysis in an urban area of the City of Nagoya using ASTER data. *Proc. ASTER Workshop*, 9-10, 2004.
 63. Yamaguchi, Y., ASTER mission and applications. *Proc. International Workshop on Applications of Remote Sensing on Geological Environment and Geohazard (ARSGEG 2005)*, 9-18, 2005.
 64. Yamaguchi, Y., Lithologic mapping by multispectral remote sensing data. *Proc. International Workshop on Applications of Remote Sensing on Geological Environment and Geohazard (ARSGEG 2005)*, 104-114, 2005.
 65. Liu, Y., Hiyama, T., Yamaguchi, Y., Higuchi, A., and Li, W., A scheme for exploring spatial scaling issues using remote sensing: A case of evapotranspiration. *Proc. 2nd International Workshop on Yellow River Studies*, 157-160, 2005.
 66. Sasai, T., Okamoto, K., Murakami, K., and Yamaguchi, Y., Estimating and evaluating terrestrial carbon fluxes using a biosphere model in Tokai region. *Proc. Seventh International Carbon Dioxide Conference*, 569-570, 2005.
 67. Murakami, K., Sasai, T., Ichii, K., and Yamaguchi, Y., Earth system response to global

- warming inferred by simulation using a one-dimensional energy and carbon cycle coupled model. *Proc. Seventh International Carbon Dioxide Conference*, 317-318, 2005.
68. Tamura, T., Sasai, T., Okamoto, K., and Yamaguchi, Y., A terrestrial biosphere model incorporating nitrogen cycles (BEAMS-N). *Proc. 1st International Symposium of 21st Century COE Program "Satellite Ecology", Linking remote sensing, ecology and meteorology for regional ecosystem studies (SATECO 2005)*, Gifu University, Gifu, 68-71, 2005.
 69. Yamaguchi, Y., Abrams, M.J., Kato, M., Watanabe, H., and Tsu, H., ASTER science outcome and operation status. *Proc. 25th International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2005*, 5578-5579, 2005.
 70. Liu, Y., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., Effect of temporal factors on satellite image in reflective band. *Proc. 25th International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2005*, 2125-2128, 2005.
 71. Kato, S. and Yamaguchi Y., Surface heat storage and anthropogenic heat discharge in an urban area estimated by ASTER data. *Proc. ASTER Workshop*, 15-16, 2005.
 72. Maruyama, M. and Yamaguchi, Y., Forest degradation and alteration of rainfall regime in the Brazilian Amazon. *Proc. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 909-918, 2006.
 73. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Monitoring land cover change of Hanoi city center under the impact of urbanization by remote sensing 1975-2003. *Proc. International Symposium on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS 2006)*, 340-345, 2006.
 74. Kato, S. and Yamaguchi, Y., Estimation of heat storage and discharge from urban surface using ASTER data. *Proc. the 13th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*, 2006.
 75. Liu, Y., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., A new approach to reduce inconsistency between MODIS & ASTER land surface temperature. *Proc. SPIE (International Society for Optical Engineering)*, 6359, 635916, 1-8, 2006.
 76. Liu, Y., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., Error analysis of scaling evapotranspiration over heterogeneous land surface. *Proc. SPIE (International Society for Optical Engineering)*, 6359, 635906, 1-8, 2006.
 77. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Change detection of the mangrove forest in Balat estuary by remote sensing. *Proc. International Conference on Natural Disaster Mitigation in the Coastal Regions of Tropical Asia-Mangroves: Important Issue for the Coastal Environment-*, 2007.
 78. Dewan, A.M. and Yamaguchi, Y., Remote sensing and GIS for mapping and monitoring

- the effect of land use/cover change on flooding in Greater Dhaka of Bangladesh. *Proc. Annual Conference on Challenges for Earth Observation- Scientific, Technical and Commercial*, 6 pp. (in CD-ROM), 2007.
79. Kafle, H.K. and Yamaguchi, Y., Estimation of regional evapotranspiration in a vegetated area using ASTER data. *Proc. 28th Asian Conference on Remote Sensing*, 6 pp. (in CD-ROM), 2007.
 80. Shakya, N. and Yamaguchi, Y., Drought monitoring using vegetation and LST indices in Nepal and northeastern India. *Proc. 28th Asian Conference on Remote Sensing*, 6 pp. (in CD-ROM), 2007.
 81. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Characterizing the urban growth from 1975 to 2003 of Hanoi city using remote sensing and a spatial metric. *Proc. 28th Asian Conference on Remote Sensing*, 6 pp. (in CD-ROM), 2007.
 82. Dewan, M.A. and Yamaguchi, Y., Flood hazard analysis in Greater Dhaka of Bangladesh using remote sensing data with geographic information system, *Proc. Water Down Under 2008*, 11 pp. (in CD-ROM), Adelaide, Australia, 2008.
 83. Kato, S., Liu, C.C., Yamaguchi, Y., Sun, C.Y., and Lin, H.T., Surface Heat Balance Analysis in Tainan City Using ASTER and Formosat-2 Data. *Proc. 6th Taipei International Digital Earth Symposium (TIDES 2008)*, 15-26, 2008.
 84. Yamaguchi, Y., Abrams, M., and Tsu, H., ASTER 8-year operation and scientific achievement. *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-n-01, 4 pp. (in CD-ROM), 2008.
 85. Ono, T., Kumamoto, A., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kasahara, Y., and Oya, H., Initial results from the Lunar Radar Sounder observation on-board the KAGUYA (SELENE) spacecraft, *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-k-47, 4 pp. (in CD-ROM), 2008.
 86. Haruyama, J., Ohtake, M., Matsunaga, T., Morota, T., Kawasaki, H., Honda, C., Yokota, Y., Torii, M., Abe, M., Otake, H., Nimura, T., Ogawa, Y., Yamaji, A., Takeda, H., Shirao, M., Asada, N., Demura, H., Hirata, N., Terazono, J., Kodama, S., Nakamura, R., Minami, S., Iwasaki, A., Miyamoto, H., Arai, T., Sugihara, T., Yamaguchi, Y., Saiki, K., Hiroi, T., Sasaki, S., Akiyama, H., Hara, S., Hiroki, K., Hashimoto, M., Kurashina, Y., Torii, K., Yoshizawa, A., Nakanotani, S., Inoue, J., Masuda, N., Yokomizo, M., Josset, J-L., and Pieters, C.M., Preliminary results of the SELENE Terrain Camera. *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-k-44, 4 pp. (in CD-ROM), 2008.
 87. Dewan, M.A. and Yamaguchi, Y., A study on the impact of humans on water resources in Greater Dhaka of Bangladesh. *Proc. 26th International Symposium on Space Technology*

- and Science*, 2008-n-11, 6 pp. (in CD-ROM), 2008.
88. Maruyama, M. and Yamaguchi, Y., Analysis of deforestation using Landsat MSS, TM and ETM+ imageries and its influence on rainfall in Amazonia. *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-n-29p, 6 pp. (in CD-ROM), 2008.
 89. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Characterizing the urban growth of Hanoi city from 1975 to 2003 by remote sensing and a spatial metric. *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-n-27p, 5 pp. (in CD-ROM), 2008.
 90. Shakya, N. and Yamaguchi, Y., Monitoring historical drought using vegetation water temperature condition index in Nepal and northeastern India. *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-n-24p, 4 pp. (in CD-ROM), 2008.
 91. Kafle, H.K. and Yamaguchi, Y., Surface heat fluxes in heterogeneous area by remote sensing, *Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science*, 2008-n-25p, 5 pp. (in CD-ROM), 2008.
 92. Dewan, A.M. and Yamaguchi, Y., Use of Historical Maps, LANDSAT and ASTER data to detect and monitor anthropogenic impacts on river environment: a case of the Ganges basin of Bangladesh. *Proc. ASTER Workshop*, 3 pp., 2008.
 93. Pham, M.H. and Yamaguchi, Y., Characterizing the urban growth of Hanoi, Nagoya, and Shanghai city using remote sensing and spatial metric. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2008*, V-9 -11, 2008.
 94. Yamaji, A., Yamaguchi, Y., Oshigami, S., Ono, T., Kumamoto, A., Nakagawa, H., Kobayashi, T., and Kasahara, Y., Subsurface geology of Mare Serenitatis and surround regions of the Moon as revealed by the Lunar Radar Sounder on-board Kaguya. *Meteoritics & Planetary Science*, 43, Supplement, A172, 2008.
 95. Dewan, A.M. and Yamaguchi, Y., Quantifying the morphological change of the Ganges in Bangladesh using geospatial data. *Proc. Fifth International Conference on Deltas (EMECS-8)*, (in CD-ROM), 2008.
 96. Yamaguchi, Y., Ono, T., Kumamoto, A., Yamaji, A., Kasahara, Y., Kobayashi, T., Oshigami, S., Nakagawa, H., and Oya, H., Lunar Radar Sounder observations of subsurface geology and natural waves. *Proc. 27th International Symposium on Space Technology and Science*, 3 pp. (in CD-ROM), 2009.
 97. Haruyama J., Ohtake, M., Matsunaga, T., Morota, T., Kawasaki, H., Honda, C., Yokota, Y., Abe, M., Otake, M., Nimura, T., Ogawa, Y., Yamaji, A., Takeda, H., Shirao, M., Asada, N., Demura, H., Hirata, N., Terazono, J., Kodama, S., Nakamura, R., Minami, S., Iwasaki, A., Miyamoto, H., Arai, T., Sugihara, T., Yamaguchi, Y., Saiki, K., Hiroi, T., Sasaki, S., Akiyama, H., Hara, S., Hioki, K., Hashimoto, M., Kurashina, Y., Torii, K., Yoshizawa, A., Nakanotani, S., Inoue, J., Torii, M., Masuda, N., Yokomizo, M., Josset, J., and Pieters,

- C.M., New Views of the Moon from the SELENE (KAGUYA)/LISM/Terrain Camera one-year observation. *Proc. 27th International Symposium on Space Technology and Science*, 2 pp. (in CD-ROM), 2009.
98. Maruyama, M. and Yamaguchi, Y., Analysis of deforestation in Mato Grosso using multi-temporal Landsat TM imageries. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2010*, 367-370, 2010.
 99. Ho, L.T.K., Yamaguchi, Y., and Umitsu, M., Automated micro-landform classification by combination of satellite images and SRTM DEM. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011*, 3058-3061, 2011.
 100. Chen, X., Yamguchi, Y., and Chen, J., Scale effect of vegetation index based thermal sharpening: simulation study based on ASTER data. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011*, 1235-1238, 2011.
 101. Ishiyama, K., Kumamoto, A., Ono, T., Terada, N., Katoh, Y., Yamaguchi, Y., and Oshigami, S., An estimation method of the lunar surface permittivity based on the observation equipment onboard Kaguya spacecraft (SELENE). *Proc. 44th ISAS Lunar and Planetary Symposium*, 2011.
 102. Aiba, K., Sasai, T., and Yamaguchi, Y., Analysis off water, heat and carbon balances over the Siberia region by using biosphere model BEAMS. *Proc. 1st International Conference on Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia*, 52-55, 2012.
 103. Ho, L.T.K, Yamaguchi, Y., and Umitsu, M., Landform classification by a rule-based approach for monitoring flood inundation in Hanoi and surrounding areas, north Vietnam. *Proc. International Conference on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth & Allied Sciences (GIS-IDEAS) 2012*, 126-131, 2012.
 104. Yamaguchi, Y., Fujita, M., Tachikawa, T., Kato, M., Tsu, H., Urai, M., Abrams, M.J., and Maldonado, L., ASTER 12-year operation status. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2012*, 536-538, 2012.
 105. Chen, X., Chen, J., and Yamaguchi, Y., Soft image segmentation model. *Proc. International Conference on Computer Vision in Remote Sensing*, 90-93, 2012.
 106. Chen, X. and Yamaguchi, Y., Discrimination between climate and human-induced change of tundra in Siberia. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013*, in CD-ROM, 2013.
 107. Ishidoshiro, N., Uezato, T., and Yamaguchi, Y., A new endmember extraction method in spectral unmixing of hyperspectral data. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013*, in CD-ROM, 2013.
 108. Sakai, T., Hiyama, T., and Yamaguchi, Y., Satellite observation of ice-jam flood of

- Lena River in Siberia. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013*, in CD-ROM, 2013.
109. Oshigami, S., Yamaguchi, Y., Mitsuishi, M., Momose, A., Yajima, T., Murakami, T., and Morozumi, H., Mineralogical mapping of Nevada using airborne hyperspectral data: applying the composite MSAM. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013*, in CD-ROM, 2013.
 110. Hiyama, T., Sakai, T., Makshutov, S., Kim, H., Sasai, T., Yamaguchi, Y., Sugimoto, A., Tei, S., Ohta, T., Kotani, A., Yamamoto, K., Yamazaki, T., Oshima, K., Park, H., Maximov, T.C., and Fedorov, A.N., Global warming and changes in Siberian terrestrial environments. *Proc. 2nd International Conference on Global Warming and Human-Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation to the Changes of the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments*, 13-15, 2013.
 111. Yamaguchi, Y., Chen, X., and Yamamoto, K., Comparison of vegetation changes in Siberia detected by SPOT-vgt and MODIS data. *Proc. 2nd International Conference on Global Warming and Human-Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation to the Changes of the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments*, 171-173, 2013.
 112. Shi, Y. and Yamaguchi, Y., A high-resolution emissions inventory for open biomass burning in Southeast Asia during 2001-2010 and their global warming potential. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2014*, in CD-ROM, 2014.
 113. Yamaguchi, Y., Remote sensing for scientific and practical applications, *Proc. Conference on Science and Technology*, Vietnam Institute of Geodesy and Cartography (VIGAC), 128-136, 2014.
 114. Kizawa, K. and Yamaguchi, Y., Urbanization analysis by using spatial metrics and remote sensing data in Nagoya, Japan and Hanoi, Vietnam. *Proc. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2015*, in CD-ROM, 2015.

V. 国際学会発表（山口が発表したもの；**基調講演，*招待講演）

1. Yamaguchi, Y. and Lyon, R.J.P., A comparative field study of spectro-radiometers and radiometers as used in geologic mapping of porphyry copper at Yerington. 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, U.S.A., 1985.
2. Yamaguchi, Y. and Lyon, R.J.P., Identification of clay minerals by feature coding of near-infrared spectra. 5th Thematic Conference International Symposium on Remote Sensing of Environment, Reno, U.S.A., 1986.
3. Yamaguchi, Y., Spectral indices for vegetation and rock type discrimination using the

- optical sensor of the Japanese ERS-1. 6th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Houston, U.S.A., 1988.
4. Yamaguchi, Y., Development of A field radiometer as a ground truth equipment for the Japanese ERS-1. 16th International Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, Japan, 1988.
 5. Yamaguchi, Y., Research activities in GSJ. 2nd Annual Meeting of IGCP 264, Tokyo, Japan, 1988.
 6. Yamaguchi, Y. and Sato, I., A new field radiometer developed by GSJ. 2nd Annual Meeting of IGCP 264, Tokyo, Japan, 1988.
 7. Yamaguchi, Y., Urai, M. and Honey, F.R., Application of Geoscan AMSS MKI data to lithologic mapping in Queensland, Australia. 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada, 1989.
 8. Yamaguchi, Y., Tsu, H. and Sato, I., Japanese mission overview of JERS and ASTER programs. SPIE 1991 International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing, Orlando, U.S.A., 1991.
 9. Yamaguchi, Y., Hase, H. and Ogawa, K., Remote Sensing for geothermal application. IUGS Workshop: Remote Sensing in Global Geo-Science Process, Boulder, Colorado, U.S.A., 1991.*
 10. Yamaguchi, Y., Overview of Japanese JERS-1 and ASTER programs. 5th Annual Meeting of IGCP 264, Pune, India, 1991.
 11. Yamaguchi, Y., Tsujimoto, T., Kubota, Y., Saeki, Y. and Ohkura, T., Development of a new field spectroradiometer for automatic field Identification of minerals in hydrothermal alteration zones. 5th Annual Meeting of IGCP 264, Pune, India, 1991.
 12. Yamauchi, Y., Tsu, H., Fujisada, H. and Ono, A., Mission and design concept of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). 29th International Geological Congress, Kyoto, Japan, 1992.
 13. Yamaguchi, Y., Kimbara, K., Tamanyu, S., Sumi, K. and Tanaka, K., Geothermal resources map of Japan at 1:3,000,000 scale. 29th International Geological Congress, Kyoto, Japan, 1992.
 14. Yamaguchi, Y., Geologic application of JERS-1 SAR data. Asia-Pacific International Space Year (ISY) Congress, Tokyo, Japan, 1992.*
 15. Yamaguchi, Y., Tsu, H., Nishidai, T. and Kawakami, T., Status of Japanese Earth Resources Satellite (JERS-1). 9th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Pasadena, U.S.A., 1993.
 16. Yamaguchi, Y., Tsujimoto, T., Inoue, T. and Ohkura, T., Portable and light-weight infrared spectroradiometer for automatic field identification of alteration minerals. 9th

- Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Pasadena, U.S.A., 1993.
17. Yamaguchi, Y., Tsu, H., Sato, I., Miyazaki, Y., Fujisada, H., Ono, A. and Kahle, A.B., Mission requirements for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). 9th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Pasadena, U.S.A., 1993.
 18. Yamaguchi, Y., Tsu, H. and Fujisada, H., Scientific basis of ASTER instrument design. International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Science and Sensing, Orlando, U.S.A., 1993.
 19. Yamaguchi, Y., Geothermal resources map of Japan at 1:3,000,000 scale. First Kamchatka Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 1993.
 20. Yamaguchi, Y., Japanese remote sensing programs. First Kamchatka Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 1993.
 21. Yamaguchi, Y., Tsu, H., Fujisada, H., Kahle, A. and Nichols, D., ASTER instrument design and science objectives. 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno, U.S.A., 1994.
 22. Yamaguchi, Y., Ooka, T., Miura, T., Tanaka, S. and Mouat, D.A., Automatic field identification of alteration minerals using a new portable infrared spectroradiometer. 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, San Antonio, U.S.A., 1994.
 23. Yamaguchi, Y., Tsuchida, S., Matsunaga, T. and Lyon, R.J.P., Evaluation of JER-1/OPS data for lithologic mapping in Yerington, Nevada. 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, San Antonio, U.S.A., 1994.
 24. Yamaguchi, Y., Tsuchida, S., Matsunaga, T., Sato, I., Urai, M., Ninomiya, Y., Miyazaki, Y. and Lyon, R.J.P., Evaluation of OPS capability for lithologic mapping. Result Reporting Meeting of JERS-1/ERS-1 System Verification Program, Tokyo, Japan, 1994.
 25. Yamaguchi, Y., Application of AVNIR panchromatic and stereoscopic data to landslide studies. The first ADEOS Symposium/Workshop, Kyoto, Japan, 1994.
 26. Yamaguchi, Y., Rowan, L.C., Tsu, H. and Khale, A.B., Application of ASTER data to geological studies. Eleventh Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Las Vegas, NV, U.S.A., 1996.
 27. Yamaguchi, Y., Recent progress in remote sensing for earth and planetary exploration. First Saudi-Japanese Symposium on Remote Sensing Application, Riyadh, Saudi Arabia, 1997.*
 28. Yamaguchi, Y., Application of AVNIR panchromatic and stereoscopic data to landslide studies. Second ADEOS Symposium / Workshop, Yokohama, Japan, 1997.
 29. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., Tsu, H., Kahle, A.B. and Pniel,

- M., ASTER instrument characterization and operation scenario. 32nd COSPAR Scientific Assembly, Nagoya, Japan, 1998.
30. Yamaguchi, Y., ASTER instrument description and data availability. Joint IGBP-DIS/LUCC/SEA START-LUCC/DIS Workshop, Environmental Research Institute of Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 1998.*
 31. Yamaguchi, Y., Odajima, T., Tsuchida, S., Kamai, T., Tanaka, S., Siagian, Y.O.P., Sugalang and Sugiharto Nitihardjo, Landslide susceptibility assessment and movement monitoring using remote sensing and GIS techniques. JUST Workshop on the Utilization of Remote Sensing Technology to Natural Disaster Reduction, Tsukuba, Japan, 1998.
 32. Yamaguchi, Y., Kawakami, T., Kahle, A.B., Pniel, M. and Tsu, H., ASTER mission planning and operation concept. Fifth International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems (Space Ops 98), Tokyo, Japan, 1998.
 33. Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Kawakami, T., Pniel, M. and Tsu, H., ASTER instrument operations overview. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 1998, Seattle, U.S.A., 1998.
 34. Yamaguchi, Y., Landslide movement analysis in Itaya area, northern Japan, using remote sensing and GPS techniques. Program of Expose on Joint Research, Geological Survey of Japan -Directorate of Environmental Geology, Bandung, Indonesia, 1998.
 35. Yamaguchi, Y., Application of AVNIR panchromatic and stereoscopic data to landslide studies. Third ADEOS Symposium / Workshop, Sendai, Japan, 1998.
 36. Yamaguchi, Y. and Naito, C., Spectral indices for lithologic discrimination using the ASTER SWIR bands. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canada, 1999.
 37. Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Idajima, T., Tsuchida, S., and Kamai, T., Detection of landslide movement using SPOT HRV and ADEOS AVNIR data in Azumayama area, Japan. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canada, 1999.
 38. Yamaguchi, Y., Application of AVNIR panchromatic and stereoscopic data to landslide studies. ADEOS and ADEOS-II Joint Symposium / Workshop, NASDA, Kyoto, Japan, 1999.
 39. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Tsu, H., Watanabe, H., Kato, M., Kudoh, M., Kahle, A.B. and Pniel, M., ASTER early image evaluation. 33rd COSPAR Scientific Assembly, Warsaw, Poland, 2000.
 40. Yamaguchi, Y., ASTER instrument design and operation concept. 1st International Workshop of Academic Frontier Research Project, Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima, Japan, 2000.

41. Yamaguchi, Y., Tsu, H., Kahle, A.B., Pniel, M., Fujisada, H., Sato, I., Kato, M., Watanabe, H., and Kudoh, M., ASTER early images and operation status. Fourteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, U.S.A., 2000.
42. Yamaguchi, Y., Detection and monitoring of landslides by satellite remote sensing. Lanzhou University, Lanzhou, China, 2000.*
43. Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Tsu, H., Fujisada, H., Sato, I., Kudoh, M., Watanabe, H., and Kudoh, M., Kato, M., and Pniel, M., ASTER instrument and data product overview. American Geophysical Union (AGU) 2001 Spring Meeting, Boston, U.S.A., 2001.*
44. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Kahle, A.B., Tsu, H., Kato, M., Watanabe, H., Sato, I., and Kudoh, M., ASTER instrument performance, operation status, and application to earth sciences. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2001, Sydney, Australia, 2001.*
45. Yamaguchi, Y., ASTER performance and image evaluation. 2nd International Workshop of Academic Frontier Research Project, Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima, Japan, 2001.
46. Yamaguchi, Y., Application of ASTER data to environmental studies. 3rd International Workshop of the 2nd Academic Frontier Research Project, Hiroshima, 2002.
47. Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Urai, M., Matsunaga, T., and Tsu, H., ASTER operation status and science result overview. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2002, Toronto, Canada, 2002.*
48. Yamaguchi, Y., ASTER project overview. 1st International Symposium on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS 2002), Hanoi, Vietnam, 2002.
49. Yamaguchi, Y., Kato, S. and Okamoto, K., Surface heat flux analysis in urban areas using ASTER and MODIS data. 2nd International Symposium on GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS 2004), Hanoi, Vietnam, 2004.
50. Yamaguchi, Y., Achievement of the ASTER science program. The 12th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference (ARSPC), Fremantle, Australia, 2004.**
51. Yamaguchi Y., Abrams, M., Kato, M., Watanabe, H. and Tsu, H., ASTER science outcome and operation status. 25th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2005, Seoul, Korea, 2005.
52. Yamaguchi, Y., ASTER mission and applications. The First International Workshop on Applications of Remote Sensing on Geological Environment and Geohazard, Tainan, Taiwan, 2005.**

53. Yamaguchi, Y., Lithologic mapping by multispectral remote sensing data. The First International Workshop on Applications of Remote Sensing on Geological Environment and Geohazard, Tainan, Taiwan, 2005.*
54. Yamaguchi, Y., Kato, S., Okamoto, K. and Kato, A., Heat flux analysis by using ASTER and MODIS data. Vietnam-Japan Scientific Cooperation Workshop on Geo-Grid, Hanoi, Vietnam, 2006
55. Yamaguchi, Y., Sasai, T., Kato, S., Murakami, K., Okamoto, K., Tamura, T., Akaike, T. and Higashijima, K., Estimation of carbon and heat fluxes in Tokai region, central Japan, by using ASTER and MODIS data. 2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRSII), Torrent, Spain, 2006.
56. Yamaguchi, Y., Estimation of carbon and heat fluxes by remote sensing. International Symposium on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS) 2006, Hochiminh City, Vietnam, 2006.**
57. Yamaguchi, Y., Kato, A. and Kato, S., Assessment of water and temperature stresses of vegetation in urban areas by ASTER. International Symposium on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS 2006), Hochiminh City, Vietnam, 2006.
58. Yamaguchi, Y., Abrams, M. and Tsu, H., ASTER 8-year operation and scientific achievement. The 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, Japan, 2008.
59. Yamaguchi, Y. and Kafle, H.K., Estimation of evapotranspiration by ASTER. 6th International Symposium on Integrated Field Science –Understanding for each and integrated eco-system using remote sensing-, Sendai, Japan, 2008.
60. Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Ono, T., Kumamoto, A., Oshigami, S., Nakagawa, H., Kobayashi, T., Kasahara, Y., Watanabe, T., Mochizuki, K. and Watanabe, S., Geologic interpretation of the lunar maria by Lunar Radar Sounder (LRS) onboard KAGUYA (SELENE). The 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway, 2008.
61. Yamaguchi, Y., Environmental monitoring by remote sensing. 2nd Shanghai Jiao Tong University – Nagoya University International Research Exchange Forum on Environmental Studies, Shanghai, China, 2008.
62. Yamaguchi, Y., Remote sensing applications to disaster monitoring -8-year experience of ASTER program and beyond-. Second International Conference on Geoinformation Technology for Natural Disaster Management and Rehabilitation, Bangkok, Thailand, 2009.**
63. Yamaguchi, Y., Ono, T., Kumamoto, A., Yamaji, A., Kasahara, Y., Kobayashi, T., Oshigami, S., Nakagawa, H. and Oya, H., Lunar Radar Sounder observations of

- subsurface geology and natural waves. The 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan, 2009.
64. Yamaguchi, Y. and Sasai, T., Carbon and heat flux analyses by remote sensing. The 1st NAFRI-Nagoya University Joint Workshop; Environmental studies in Laos and Japan: Sharing ideas and practice, Vientiane, Laos, 2010.
 65. Yamaguchi, Y., Fujita, M., Tachikawa, T., Kato, M., Tsu, H., Abrams, M.J. and Maldonado, L., ASTER operation scenario and status. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011, Vancouver, Canada, 2011.
 66. Ho, L.T.K., Yamaguchi, Y., and Umitsu, M., Automated micro-landform classification by combination of satellite images and SRTM DEM, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011, Vancouver, Canada, 2011.
 67. Yamaguchi, Y., Rapid response of the remote sensing community to the Great East Japan Earthquake. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2011, Yeosu, Korea, 2011.**
 68. Yamaguchi, Y., Fujita, M., Tachikawa, T., Kato, M., Tsu, H., Urai, M., Abrams, M.J. and Maldonado, L., ASTER 12-year operation status. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2012, Incheon, Korea, 2012.
 69. Aiba, K., Sasai, T., and Yamaguchi, Y., Analysis of water, heat and carbon balances over the Siberia region by using the biosphere model BEAMS. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2012, Munich, Germany, 2012.
 70. Uezato, T., Oshigami, S., Yamaguchi, Y., Momose, A., Arvelyna, Y., Kawakami, Y., Yajima, T., Miyatake, S., and Ngurno, A., Mapping of pegmatite in Tantalite Valley region in southern Namibia using ASTER and HyMap data. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2012, Munich, Germany, 2012.
 71. Chen, X. and Yamaguchi, Y., Discrimination between climate and human-induced change of tundra in Siberia. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013, Narashino, Japan, 2013.
 72. Yamaguchi, Y., Remote sensing applications in monitoring urban environment and landuse/landcover change. International Workshop on Sustainable Management of Red River Basin, Hanoi, Vietnam, 2013.
 73. Yamaguchi, Y., Geologic remote sensing in Japan –past, present and future-. International Conference on Earth Observations and Societal Impacts (ICEO&SI) 2013, Tainan, Taiwan, 2013.**
 74. Yamaguchi, Y., Chen, X. and Yamamoto, K., Comparison of vegetation changes in Siberia detected by SPOT-vgt and MODIS data. 2nd International Conference on Global Warming and Human-Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation to the Changes of

- the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments, Yakutsk, Russia, 2013.
75. Shi, Y. and Yamaguchi, Y., A high-resolution emissions inventory for open biomass burning in Southeast Asia during 2001-2010 and their global warming potential. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2014, Busan, Korea, 2014.
 76. Yamaguchi, Y., Remote sensing for scientific and practical applications. Scientific Conference “Cartography for Global Integration”, Vietnam Institute of Geodesy and Cartography (VIGAC), Hanoi, Vietnam, 2014.*
 77. Kizawa, K. and Yamaguchi, Y., Urbanization analysis by using spatial metrics and remote sensing data in Nagoya, Japan and Hanoi, Vietnam. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2015, Tainan, Taiwan, 2015.
 78. Yamaguchi, Y., Achievement of the ASTER program. NASA Special Session, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2015, Makuhari, Japan, 2015.*
 79. Noda, S. and Yamaguchi, Y., Estimation of surface iron oxide abundance with suppressing the effects of grain size and topography. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2016, Jeju, Korea, 2016.
 80. Ishidoshiro, N., Yamaguchi, Y., Noda, S., Asano, Y., Kondo, T., Kawakami, Y., Mitsuishi, M., and Nakamura, H., Geological mapping by combining spectral unmixing and cluster analysis for hyperspectral data. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) XXIII Congress 2016, Prague, Czech, 2016.
 81. Yamaguchi, Y., Iwao, K., Kouyama, T., Kato, S., Kashimura, O., Fujita, M. and Tachikawa, T., ASTER 17-year operation status and future activities. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2017, Nagoya, Japan, 2017.*
 82. Yamaguchi, Y., Suppressing the topography and grain size effects in multispectral and hyperspectral data processing. International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics (ICSANE) 2017, Universiti Malaysia Sarawak (UNIMAS), Sarawak, Malaysia, 2017.*
 83. Yamaguchi, Y., Kurata, K., Hirai, R., Noda, S. and Kodama, S., Extraction and integration of mineralogical and topographic information derived from ASTER and DEM data. 28th Annual International Geological Remote Sensing Group (GRSG) Conference, Lisbon, Portugal, 2017.
 84. Tanaka, S., Tsuru, H., Someno, K., and Yamaguchi, Y., Automatic identification of alteration minerals from their spectral reflectance patterns by using the deep learning method. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2018, Pyeongchang, Korea, 2018.
 85. Yamaguchi, Y., Drought monitoring by remote sensing. Kick-off Meeting of Project

- CRRP20018-07MY-Kafle, Kathmandu, Nepal, 2018.*
86. Yamaguchi, Y., Remote sensing applications to geological mapping and disaster monitoring. International Conference on Mountains in the Changing World (MoChWo) 2018, Kathmandu, Nepal, 2018.*
 87. Yamaguchi, Y., Batbayar, N., Hirai, R. and Oidov, M., Delineating hydrothermal alteration zones in the Ih-Ulziit area, Mongolia by using ASTER data. 29th Annual International Geological Remote Sensing Group (GRSG) Conference, London, U.K., 2018.
 88. Yamaguchi, Y., ASTER 20th anniversary: achievements and future plan. International Geoinformatics Conference 2019, Riyadh, Saudi Arabia, 2019.**
 89. Yamaguchi, Y. and Watanabe, S., Characterizing urban sprawl patterns by using the sprawl elasticity index derived from remote sensing and population data. International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2019, Taipei, Taiwan, 2019.
 90. Guha, A., Kumar, K.V., Rao, P. and Yamaguchi, Y., ASTER and mineral exploration - Indian experiences with few case studies on different types of mineral deposits. International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS) 2019, Yokohama, Japan, 2019*.
 91. Yamaguchi, Y., Drought monitoring by remote sensing. Asia-Pacific Network for Global Change Research, Research Coordination Meeting for APN Research Project on Improving Assessment of Drought and Its Impact on Food and Water Resources in South Asia, Dhaka, Bangladesh, 2019.*
 92. Yamaguchi, Y., Mineralogical mapping by ASTER and hyperspectral data. The 6th Geoinformation Science International Symposium, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2019.**
 93. Yamaguchi, Y. and Kafle, H., Introducing an ANP project: Improving assessment of drought and its impact on food and water resources in South Asia. Space Applications for Environment (SAFE) Workshop, Nagoya, Japan, 2019.*
 94. Asano, Y., Kodama, S. and Yamaguchi, Y., Geological mapping by thermal inertia derived from ASTER TIR data. 30th Annual International Geological Remote Sensing Group (GRSG) Conference, Frascati, Italy, 2019.
 95. Yamaguchi, Y., Remote sensing for vegetation monitoring, disaster damage assessment, and mineralogical mapping. International Conference on Mountains in the Changing World (MoChWo) 2020. Kathmandu, Nepal, 2020.**

VI. その他

1. 山口 靖・大久保泰邦・高木慎一郎・長谷紘和・正井義郎, 全国地熱資源総合調査. 地質ニュース, 330, 25, 1982.
2. 山口 靖, レーダー映像法による日本全国の地熱資源調査. 測量, 3, 12-20, 1982.
3. 長谷紘和・山口 靖・村岡洋文, 地形・地質情報としてのリニアメント. 月刊地球, 5 (11), 695-699, 1983.
4. 山口 靖, リモートセンシングによる地熱探査. 地熱エネルギー, 9 (4), 42-55, 1984.
5. 衣笠善博・山口 靖・長谷紘和, レーダで見た伊豆半島. 月刊地球, 6 (3), 141-145, 1984.
6. 山口 靖・長谷紘和・村岡洋文, レーダーで見た日本の地形・地質. 地質ニュース, 373, 14-24, 1985.
7. 山口 靖, スタンフォード大学におけるリモートセンシング教育について. 日本リモートセンシング学会誌, 6 (3), 327-329, 1986.
8. 山口 靖, オーストラリア資源リモートセンシング事情. ERSDAC ニュース, 16, 10-12, 1987.
9. 山口 靖・長谷紘和・小田博之・及川 浩・今井 修, 光ディスク画像とパソコンを用いたボーリングコア検索システム. 地質ニュース, 407, 50-58, 1988.
10. 浦井 稔・佐藤 功・山口 靖・二宮芳樹, 中華人民共和国遼寧省東部の LANDSAT TM 画像. 地質ニュース, 420, 6, 1989.
11. 山口 靖, 火山の地質および形成史に基づく火山活動の特徴の把握. 日本リモートセンシング学会誌, 9 (4), 109-111, 1989.
12. 山口 靖・浦井 稔, 活断層の検出とマッピング. 日本リモートセンシング学会誌, 9 (4), 118-119, 1989.
13. 山口 靖, 地球資源衛星 1 号. 地質ニュース, (430), 36, 1990.
14. 山口 靖, 航空機による資源探査 (4) オーストラリア (ジェオスキャン). JAROS ニュース, 14, 4, 1990.
15. 山口 靖・佐藤 功・大倉 力, 可視-短波長赤外域を対象とした野外用分光放射計. 写真測量とリモートセンシング, 29 (3), 15-17, 1990.
16. 山口 靖, 地球資源衛星 1 号 (JERS-1) の観測システムについて. 惑星地質ニュース, 2 (2), 11-15, 1991.
17. 山口 靖・川上 享, 第 8 回 ERIM 地質リモートセンシングテーマ会議及び IUGS リモートセンシングワークショップ報告. 日本リモートセンシング学会誌, 11 (2), 404-407, 1991.
18. 山口 靖, 地質構造解析への JERS-1 データの利用. 資源観測解析センター第 3 回国際シンポジウム講演集, 75-95, 1991.
19. 山口 靖, 第 29 回 IGC(万国地質学会)報告. 日本リモートセンシング学会誌, 12, (4),

- 88, 1992.
20. 山口 靖, 次期センサへの期待. 機械振興, 25 (9), 72-75, 1992.
21. Yamaguchi, Y., ASTER Science Meeting. *The Earth Observer*, 4 (4), 6-8, 1992.
22. 山口 靖, JERS-1 画像の初期評価について. JAROS ニュース, 24, 3-4, 1992.
23. Yamaguchi, Y. and Morrison, A., ASTER Science Meeting. *The Earth Observer*, 5, 17-19, 1993.
24. 山口 靖, 地球と惑星のリモートセンシング. 工業技術, 34, 26-27, 1993.
25. 山口 靖, リモートセンシングによる惑星探査. 地質調査所研究資料集「惑星探査ミッションの研究」, 185, 105-127, 1993.
26. 山口 靖, 光を用いたリモートセンシング技術の現状と将来展望. センサ技術, 13 (9), 41-44, 1993.
27. 山口 靖, 衛星利用探査. 日本地熱学会誌, 15 (4), 100-103, 1993.
28. Nichols, D., Kahle, A.B., and Yamaguchi, Y., ASTER Science Team Meeting. *The Earth Observer*, 5, (1), 8-9, 1993.
29. 山口 靖, ASTER サイエンスチーム会議報告. 日本リモートセンシング学会誌, 14, 230-241, 1994.
30. 田中明子・山口 靖, 惑星の地熱. 地熱, 31 (4), 64-71, 1994.
31. 山口 靖, 第 10 回 ERIM 地質リモートセンシングテーマ会議出席報告. 日本リモートセンシング学会誌, 14 (3), 273-274, 1994.
32. 山口 靖, OPS データによる岩相識別能力の評価. JAROS ニュース, 31, 169-196, 1994.
33. 山口 靖, JERS-1 の成果を踏まえて, 国際シンポジウム ―衛星データの産業利用と国際協力―講演集, 資源・環境観測解析センター, 27-83. 1994.
34. 山口 靖, 第 2 回衛星リモートセンシングに関する欧州シンポジウム参加報告. 日本リモートセンシング学会誌, 15 (5), 87-89, 1995.
35. 川村政和・石戸経士・中尾信典・山口 靖, カムチャッカ半島ムトノフスキー地域の地熱開発. 地熱, 32 (1), 37-35, 1995.
36. Yamaguchi, Y., Eighth Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Science Team Meeting. *The Earth Observer*, 7 (1), 25-27, 1995.
37. Yamaguchi, Y., The 10th Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Science Team Meeting. *The Earth Observer*, 8 (1), 9-11, 1995.
38. Yamaguchi, Y., Optical sensor for earth observation: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Now & Future*, 10 (37) 12-15, 1995.
39. 山口 靖, リモートセンシングによる地殻と地下資源の探査, 地殻および地下資源の調査・評価・有効利用シンポジウム論文集, 日本学術会議資源開発工学研究連絡委員会, 1-14, 1996.
40. 山口 靖, ASTER の開発に思う. ERSDAC ニュース, 54, 2, 1997.

41. 山口 靖, 第 13 回 ASTER サイエンスチーム会議報告. 日本リモートセンシング学会誌, 17 (3), 80-81, 1997.
42. 山口 靖, 岩石の分光反射特性とリモートセンシングへの応用. 日本写真測量学会北海道支部会報, 6, 4-6, 1997.
43. 山口 靖, SEA-START ワークショップ参加報告. 日本リモートセンシング学会誌, 18 (3), 80-81, 1998.
44. 山口 靖, 名古屋大学大学院理学研究科 地球惑星理学専攻地球惑星システム学講座. リモートセンシング学会誌, 19 (2), 193-194, 1999.
45. 山口 靖, 第 33 回 COSPAR Scientific Assembly 出席報告. 日本リモートセンシング学会誌, 20 (3), 127-128, 2000.
46. 山口 靖, 第 14 回応用地質リモートセンシングに関する国際会議出席報告. 日本リモートセンシング学会誌, 20 (4), 117-118, 2000.
47. 山口 靖, 国際インターネットフォーラム—リモートセンシングの現状と今後を考える. 日本リモートセンシング学会誌, 21 (1), 114-126, 2001.
48. 山口 靖, 新しくなった学会誌はいかがでしょう? 日本リモートセンシング学会誌, 21 (5), 409, 2001.
49. 山口 靖, 情報地質学に関する国際シンポジウム (GIS-IDEAS) 参加報告. 日本リモートセンシング学会誌, 22 (4), 473, 2002.
50. Gillespie, A., Abrams, M., and Yamaguchi, Y., Scientific results from ASTER. *Remote Sensing of Environment*, 99 (1-2), 1, 2005.
51. 山口 靖, 第 12 回オーストラリア・リモートセンシングおよび写真測量会議 (ARSPC) 参加報告. 日本リモートセンシング学会誌, 25 (1), 122-123, 2005.
52. 山口 靖, 第 2 回地球関連科学における空間インフラ開発のための空間情報科学国際シンポジウム (GIS-IDEAS) 参加報告. 日本リモートセンシング学会誌, 25 (1), 122, 2005.
53. 山口 靖, リモートセンシングにより地球環境の変動を探る—気候変動の将来予測に向けて—. 理フィロソフィア (名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌), 8, 10-11, 2005.
54. 並木則行・岩田隆浩・大竹真紀子・荒井朋子・杉原孝充・山口 靖・山路 敦・中村良介・荒木博志, SELENE 計画の目指す統合サイエンス. 遊星人 (日本惑星科学会誌), 15 (4), 169-177, 2006.
55. 山口 靖・渡辺浩行, 福島県下郷町の観音川岩屑なだれ堆積物中の木片の 14C 年代, 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (XVII), 名古屋大学年代測定総合研究センター, 17, 44-49, 2006.
56. 若林 愛・佐々井崇博・山口 靖, アフリカでの人為的影響による植生減少域の抽出, 生研フォーラム「宇宙からの地球環境モニタリング」第 16 回論文集, 51-52, 2007.
57. Yamaguchi, Y. and Kato, S., Using ASTER data to study the urban heat-island effect. *The*

- Earth Observer*, 19 (4), 4-7, 2007.
58. 春山純一・荒木博志・小野高幸・山口 靖, 月の地形と地下構造探査, ISAS ニュース, 318, 9, 2007.
59. 加藤創史・山口 靖, リモートセンシングデータを用いたヒートアイランドの解析, 日本リモートセンシング学会「ヒートアイランド」ワークショップ講演論文集, 8p., 2007.
60. 小野高幸・熊本篤志・中川広務・山口 靖・押上祥子・山路 敦・小林敬生・笠原禎也・大家 寛, 「かぐや」搭載月レーダサウンダ(LRS)による月地下探査及び自然波動観測. 日本惑星科学会誌 (遊星人), 18, 18-24, 2009.
61. 山口 靖・押上祥子, 「かぐや」により月の海の地下構造の観測に成功. 名大トピックス, 191, 20-21, 2009.
62. 山口 靖, 総合力を生かして. 環境学の新領域を開拓する, 環 (KWAN) (名古屋大学大学院環境学研究科広報誌), 17, 2, 2009.
63. 山口 靖, 同窓会の連携. 名古屋大学理学部同窓会報, 13, 1, 2010.
64. 山口 靖, 会長就任のご挨拶. 日本リモートセンシング学会誌, 32 (3), 1, 2012.
65. 山口 靖, 衛星リモートセンシングの継続性と公共性. 測量. 2012 年 12 月号, 4-5, 2012.
66. 山口 靖, リモートセンシングの利用促進のためのユーザコミュニティの構築. 写真測量とリモートセンシング (日本写真測量学会誌), 52(1), 1, 2013.
67. 山口 靖, チャンスの神の前髪をつかめ. IGPS 同窓会ニュース, 45, 3-5, 2014.
68. 杉原光彦・山口 靖, フェリーからの風景, 苫小牧と本州最東端の鮎ヶ崎. GSJ 地質ニュース, 5 (3), 71, 2016.
69. 山口 靖, 宇宙からの地球観測の継続性. 環 (KWAN) (名古屋大学大学院環境学研究科広報誌), 28, 9, 2015.
70. Abrams, M. and Yamaguchi, Y., 2017 ASTER Science Team Meeting Summary. *The Earth Observer*, 29 (4), 19-22, 2017.
71. Abrams, M., Nolan, T., and Yamaguchi, Y., Summary of 2018 ASTER Science Team Meeting Summary. *The Earth Observer*, 30 (5), 42-46, 2018.
72. 山口 靖・津 宏治, 資源探査用衛星搭載センサの開発: ASTER 開発秘話. AIST 研究秘話, 76, 1-14, https://sankoukai.org/?page_id=433, 2019.
73. 山口 靖, ASTER 打ち上げ 20 周年に想う. 「地球科学と私」第 13 回, 名古屋大学理学部地球惑星科学科, http://www.eps.nagoya-u.ac.jp/news/news_190717.html, 2019.
74. Abrams, M. and Yamaguchi, Y., Summary of the fiftieth ASTER Science Team Meeting. *The Earth Observer*, 31 (5), 21-27, 2019.
75. Yamaguchi, Y. and Abrams, M., Editorial for the special issue “ASTER 20th Anniversary”. *Remote Sensing*, 12, 884, 2020.
76. 山口 靖, リモートセンシング学会で取り組んだことと今後について. 日本リモートセンシング学会誌, 41 (2), 印刷中, 2021.

非常勤講師（集中講義など）

- 1) 早稲田大学教育学部，写真地質学，1988 年 4 月～1996 年 3 月
- 2) 岐阜大学工学部，ASTER 開発史 ―観測システム開発へのユーザの参加―，2003 年 12 月
- 3) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，リモートセンシングによる地球観測，2004 年 12 月
- 4) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，リモートセンシングによる都市環境の解析，2007 年 10 月
- 5) 京都大学理学部，リモートセンシングの基礎（地質学鉱物学特別講義 5），2012 年 9 月
- 6) 岐阜大学工学部，リモートセンシングを用いた陸域炭素循環の推定（リモートセンシング水環境計測学特論），2012 年 10 月
- 7) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，リモートセンシングによる都市環境の解析，2012 年 11 月
- 8) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，リモートセンシングによる都市環境の解析，2014 年 5 月
- 9) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，Analysis of Urban Environments by Remote Sensing，2015 年 5 月
- 10) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，Analysis of Urban Environments by Remote Sensing，2016 年 5 月
- 11) 東北大学理学部，地球科学におけるリモートセンシング（地圏環境科学特選科目 VI），2016 年 12 月
- 12) 大阪市立大学大学院創造都市研究科，リモートセンシングによる都市環境の解析，2017 年 5 月

特別講義・一般向け講演など

- 1) 国際協力事業団，沿海鉱物資源探査集団コース，1982 年，1983 年，1984 年，1987 年，1988 年，1989 年，1990 年，つくば
- 2) 資源リモートセンシング技術基礎講習会，レーダー画像判読特論，1986 年 11 月，東京
- 3) Scuola Internazionale di Fisica “Enrico Fermi”，Societa Italiana di Fisica，ITIR design concept and science missions，1990 年 7 月，ヴァレンナ，イタリア
- 4) 国際シンポジウム「―JERS-1 と今後のリモートセンシング―」，地質構造解析への JERS-1 データの利用，1991 年 1 月，東京
- 5) 中国地域シンポジウム「―宇宙から地球を見るリモートセンシング―」，地質構造解析

- への JERS-1 データの利用について, 1992 年 11 月, 広島
- 6) 第 13 回科学教養講座, 宇宙から地質, 資源を探る, 1992 年 7 月, つくば
 - 7) 第 71 回 ST スクエアー, 光学センサ(OPS/ASTER), 1993 年 5 月, 東京
 - 8) LEMIGAS-JICA Seminar II "Remote Sensing Technology for Development of Natural Resources", Application of JERS-1 data to geologic mapping, 1994 年 6 月, ジャカルタ, インドネシア
 - 9) 国際シンポジウム「－衛星データの産業利用と国際協力－」, JRS-1 の成果を踏まえて, 1994 年 9 月, 東京
 - 10) 日本学術会議資源開発工学研究連絡委員会「地殻および地下資源の調査・評価・有効利用シンポジウム」, リモートセンシングによる地殻と地下資源の探査, 1996 年, 東京
 - 11) 蘭州大学 (中国), Detection and monitoring of landslides by satellite remote sensing, 2000 年 8 月, 蘭州, 中国
 - 12) 1st Seminario ASTER, Datos Satelitales de Ultima Generacion, SEGEMAR – JICA, (1) Proyecto ASTER, (2) Aplicaciones de datos ASTER, 2001 年 10 月, ブエノスアイレス, アルゼンチン
 - 13) 日本リモートセンシング学会創立 20 周年記念講習会 (名古屋地区)「宇宙から地球の素顔を眺めてみよう」, リモートセンシングって何だろう? 2001 年 10 月, 名古屋
 - 14) 第 6 回国際シンポジウム「ASTER データ利用促進に向けて」, 資源・環境観測解析センター, ASTER データ取得方針, 2001 年 12 月, 東京
 - 15) 「触れる地球」シンポジウム, 日本科学未来館, 衛星リモートセンシング技術, 2002 年 1 月, 東京
 - 16) International Summer School on Atmospheric and Oceanic Sciences, ASTER instrument characteristics, performance and calibration, 2002 年 8 月, ラクイラ, イタリア
 - 17) International Hydrology Programme (IHP) Training Course "Water and Carbon Cycles in Terrestrial Ecosystems", Observation of Global Vegetation Variations by Satellite Remote Sensing, 2003 年 2 月, 名古屋
 - 18) IV Seminario ASTER - GEOSAT AR, SEGEMAR – JICA, Estado de avance del proyecto ASTER. Mapeo de litologias con datos ASTER, 2003 年 3 月, ブエノスアイレス, アルゼンチン
 - 19) 3rd Country Training Programme in Exploration and Evaluation of Underground Resources, Case study: Lithologic mapping by using ASTER data, 2004 年 5 月, アンカラ, トルコ
 - 20) 中学生・高校生向け名古屋大学公開セミナー「変動する地球環境」－温暖化によって何か起こる?－, 地球温暖化で植物はどう変わる? 2004 年 11 月, 名古屋
 - 21) 第 26 回中日工程技術研討會, Analysis of Urban Eco-Environments by satellite Remote Sensing, 2006 年 6 月, 台北・高雄, 台湾

- 22) 名古屋大学公開講座「あなたの見えない世界を探る」, リモートセンシングで宇宙から地球を見る, 2006 年 9 月, 名古屋
- 23) 国立成功大学, (1) ASTER Project Overview, (2) Estimation of carbon and heat fluxes by remote sensing, (3) Research Activities on Remote Sensing in Nagoya University, 2006 年 12 月, 台南, 台湾
- 24) 国立成功大学, (1) ASTER Project Update, (2) Geologic Analysis of the Lunar Maria by Kaguya (SELENE) Data, (3) Urban Development and Heat Balance Analysis by Remote Sensing, 2007 年 7 月, 台南, 台湾
- 25) 江南高校, 「総合的な学習の時間」, リモートセンシングにより宇宙から地球環境を観測する, 2007 年 11 月, 江南
- 26) 上海交通大学, Environmental Monitoring by Remote Sensing, 2008 年 11 月, 上海, 中国
- 27) 飛騨インタープリターアカデミー, 宇宙からのリモートセンシングを使った環境解析, 2009 年 4 月, 高山
- 28) JETRO 衛星による地質調査に関する勉強会, リモートセンシングによる地質構造解析, 2009 年 11 月, 東京
- 29) 飛騨インタープリターアカデミー, 宇宙からのリモートセンシングを使った環境解析, 2010 年 4 月, 高山
- 30) 第 13 回日本環境共生学会学術大会, 宇宙からのリモートセンシング:環境変動を観る, 2010 年 9 月, 名古屋
- 31) 大震災追悼減災連携研究センターシンポジウム「大震災これから何をすべきか?」, 東日本大震災 仙台での被災体験の報告, 2011 年 3 月, 名古屋
- 32) モンゴル科学技術大学, Image Processing Techniques for Lithologic Mapping, 2011 年 7 月, ウランバートル, モンゴル
- 33) 飛騨インタープリターアカデミー, 宇宙からのリモートセンシングを使った環境解析, 2011 年 8 月, 高山
- 34) ナミビア地質調査所, Thermal Infrared Remote Sensing, 2011 年 9 月, ウィンドフック, ナミビア
- 35) 江南高校, 「総合的な学習の時間」, リモートセンシングにより宇宙から地球環境を観測する, 2011 年 10 月, 江南
- 36) 南京大学, Combining remote sensing and models to study local and global environments, 2011 年 11 月, 蘇州, 中国
- 37) 社会環境学の夕べ, カリフォルニア大学サンタバーバラ校ブレン環境科学マネジメント研究科の訪問報告, 2012 年 6 月, 名古屋
- 38) JAXA 地球観測シンポジウム「強靱な社会構築に向けて」, 学会からのメッセージ, 2013 年 3 月, 東京

- 39) 国立中央大学, Center for Space and Remote Sensing Research, Disaster Monitoring and Rapid Damage Assessment by Remote Sensing, 2013 年 6 月, 桃園, 台湾
- 40) 名大カフェ“Science and Me”, リモートセンシング～宇宙から地球の素顔を見る～, 2013 年 6 月, 名古屋
- 41) IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Japan Chapter 講演会, マルチスペクトル及びハイパースペクトルデータによる岩相識別, 2013 年 9 月, つくば
- 42) 第 9 回宇宙政策セミナー, リモートセンシングの役割と課題, 2014 年 2 月, 名古屋
- 43) 北京師範大学, Geography Frontier Seminar, (1) Overview of geologic Remote Sensing in Japan, (2) Disaster Monitoring and Rapid Damage Assessment by Remote Sensing, 2014 年 10 月, 北京, 中国
- 44) 名東高校, 「大学・学部・学科ガイダンス」, リモートセンシングで宇宙から地球環境を観測する, 2016 年 9 月, 名古屋
- 45) ナミビア地質調査所, Geological mapping by multispectral and hyperspectral remote sensing, 2016 年 9 月, ウィンドフック, ナミビア
- 46) 国立中央大学, Center for Space and Remote Sensing Research, 2017 Capacity Building Workshop of Satellite Remote Sensing for Southeast Asian Scientists, Processing Multispectral and Hyperspectral Data for Discrimination of Surface Materials, 2017 年 9 月, 桃園, 台湾
- 47) 日本応用地質学会中部支部講演会, リモートセンシングによる地質・植生・都市の観測, 2018 年 6 月, 名古屋
- 48) カトマンズ大学, Disaster Monitoring and Rapid Damage Assessment by Remote Sensing, 2018 年 10 月, ドゥリケル, ネパール
- 49) トリブバン大学, Vegetation Monitoring by Remote Sensing, 2018 年 10 月, キルティプル, ネパール
- 50) ガジヤマダ大学, Processing Multispectral and Hyperspectral Data for Discrimination of Surface Materials, 2019 年 8 月, ジョグジャカルタ, インドネシア
- 51) BizEarth 若手ワーキンググループ 2019 年度勉強会, リモートセンシングについて思うこと, 2020 年 1 月, 東京

名古屋大学での指導学生と論文題目(1)

年度	氏 名	学位	論 文 題 目
1 1997	内藤 千鶴子	学士	Spectral indices for lithologic discrimination using ASTER simulation data
2 (H9)	深谷 康人	学士	Vegetation index of Aichi Prefecture derived from LANDSAT TM data and its implication by multivariate analysis
3	平家 勉	学士	Infrared Spectroscopy of Minerals by FT-IR
4 1998	岩田 一郎	学士	Lithologic mapping by spectral indices in a moderate vegetation area
5 (H10)	児玉 信介	学士	Lithologic mapping of the lunar surface using Clementine data
6 1999	市井 和仁	修士	Simulation of interannual and seasonal carbon cycle variations using remote sensing data
7 (H11)	内藤 千鶴子	修士	Surface weathering process of Hawaiian lava flows revealed by visible to infrared remote sensing
8	深谷 康人	修士	Detection of artificial land cover changes in Aichi Prefecture using remote sensing data
9	猪飼 純二	学士	Estimation of Precipitable Water by Regression between NOAA AVHRR Split-window and NCEP GDAS Data
10	川畑 玲	学士	Global monitoring of the interannual changes in vegetation activity using NDVI and its relationships to temperature and precipitation.
11 2000	児玉 信介	修士	Lunar Mare Volcanism in the Eastern Nearsides derived from Clementine UVVIS data
12 (H12)	Mohammad Wafid Agune	修士	Landslide Susceptibility Assessment in Cianjur Seletan, Jawa Barat, Indonesia Using Remote Sensing and Geographic Information System
13	山田 由紀江	学士	Analysis of the thermal environment in City of Nagoya using ASTER data
14 2001	市井 和仁	博士	Future global carbon cycle and climate simulation: Analysis from earth observation satellite data and a simple carbon and energy cycle coupled model.
15 (H13)	竹田 一平	修士	Development of a lithologic discrimination method using ASTER VNIR-SWIR data and its application to hydrothermal alteration in Nevada, United States
16	加藤 創史	学士	Quantitative analysis of surface heat fluxes in urban area using ASTER data
17	牧野 陽介	学士	Extraction of subsurface structures from SELENE Lunar Radar Sounder data
18 2002	Syeda Fahliza Begum	博士	Hydrological study in western Barind area of Bangladesh by numerical simulation and remote sensing
19 (H14)	佐々井 崇博	修士	Estimation of the terrestrial net primary productivity based on a biosphere model and satellite data
20	平川 由貴	修士	Estimation of CO ₂ concentration change in the tropical atmosphere by using NOAA/HIRS time sequential data
21	蜂須賀 隆友	学士	The steady state of future carbon cycle and climate: Analysis from simplified carbon cycle model
22	原田 美香	学士	Relation between global climate changes and vegetation activities from 1982 to 1998

名古屋大学での指導学生と論文題目(2)

年度	氏 名	学位	論 文 題 目
23 2003 (H15)	児玉 信介	博士	Mare volcanism on the nearside of the Moon: A geologic study of lunar maria using Clementine UVVIS data
24	村上 和隆	修士	Development of one-dimensional simplified earth system model for the future projection of carbon cycle and climate
25	加藤 創史	修士	Surface heat balance analysis in urban areas using remote sensing data
26	牧野 陽介	修士	Lunar thermal history inferred from viscous relaxation of craters
27	岡本 健	学士	Analysis of surface heat balance using MODIS data
28	香川 佳寛	学士	Global correlation analysis between satellite-based vegetation activities and climate from 1982 to 1999
29	鈴木 淳也	学士	Analysis of the relationship between LAI, Leaf optical properties and vegetation indices
30 2004 (H16)	赤池 隆直	学士	Estimation of surface energy balance and evapotranspiration in vegetation areas by using remote sensing data
31	松崎 加奈子	学士	Analysis of the Earth climate system by Atmosphere-Earth Heat Cycle model - Sensitivity to cloud optical properties -
32	渡辺 浩行	学士	Formation mechanism of Kannongawa Debris Avalanche Deposits in Shimogo, Fukushima Prefecture, North East Japan
33 2005 (H17)	佐々井 崇博	博士	Simulating global terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model (BEAMS)
34	岡本 健	修士	Development of simplified model to estimate latent heat flux by using MODIS data
35	田村 卓三	修士	Simulating terrestrial carbon fluxes using biosphere model including nitrogenous cycle
36	加藤 晃義	修士	Assessment of water and temperature influence on vegetation in urban areas by the VWTI index
37	Naresh Shykya	修士	Drought monitoring in Nepal and northeastern India using MODIS data
38	東島 可奈	学士	土地被覆分類データの炭素収支推定に与える影響

名古屋大学での指導学生と論文題目(3)

	年度	氏 名	学位	論 文 題 目
39	2006	野田 明子	博士	Characterizing urban sprawl using remote sensing, GIS and a spatial metric for a medium-sized city in Japan
40	(H18)	加藤 創史	博士	Surface heat balance analysis in an urban area using Terra ASTER and Landsat ETM+data
41		今村 雄一郎	修士	Lithologic mapping of the Lunar near side by ASTER data
42		赤池 隆直	修士	Estimation of latent heat flux in forest areas by ASTER data
43		松崎 加奈子	修士	Global warming analysis by integrating the energy circulation and cloud formation model
44		Pham Minh Hai	修士	Monitoring land cover change of Hanoi city center under impacts of urbanization by using remote sensing
45		奥野 信也	学士	Possible methods for analysis of mineral composition on the lunar surface using SELENE / MI
46		若林 愛	学士	アフリカ大陸での人為的影響による植生減少域の抽出
47	2007	川上 裕	博士	A ring dike and a subhorizontal sheet intrusion within a dissected caldera:geology of the northern part of the Kumano Acidic Rocks,kii Peninsula,Japan
48	(H19)	渡辺 志穂	学士	KAGUYA (SELENE) / LRS data processing - Surface clutter removal by migration processing -
49		川合 真一朗	学士	Future projection of the carbon cycle in the terrestrial biosphere using BEAMS model
50		永井 裕人	学士	Estimate of temperature at ice-debris boundary of debris-covered glaciers using ASTER data
51	2008	Naresh Shakya	博士	Development of vegetation, water and thermal stress index for monitoring drought in Nepal and Central Northeastern India
52	(H20)	Hemu Kharel Kafle	博士	Estimation of spatial distribution of surface energy fluxes over complex terrain using two-source energy balance model with ASTER data
53		奥野 信也	修士	Lithologic mapping of the lunar mare surface using KAGUYA(SELENE) / MI data
54		蔡 欣怡	修士	Estimation of heat fluxes in Taiwan using ASTER data
55		望月 憲悟	修士	Extraction of the lunar subsurface structures from LRS data by using the probabilistic relaxation
56		岡田 藍子	修士	Estimation of suspended solids in Lake Biwa using ALOS/AVNIR-2 data
57		曾根 啓伍	学士	衛星データを用いた気候変動と葉面積指数の解析

名古屋大学での指導学生と論文題目(4)

	年度	氏 名	学位	論 文 題 目
58	2009	村上 和隆	博士	A new one-dimensional simple earth system model for global warming simulation
59	(H21)	Pham Minh Hai	博士	Characterizing the urbanization of Hanoi by using remote sensing and spatial metrics
60		渡辺 志穂	修士	Mare volcanism in the nearside of the Moon: Reinterpretation based on Kaguya LRS data
61		川合 真一郎	修士	Future projection of the terrestrial carbon cycle by using the biosphere model BEAMS integrating vegetation dynamics scheme
62		槌井 功二	学士	Analysis of the relation between spatial distribution of air temperature and land cover by Atmosphere-Earth Heat Cycle model
63		横山 竜也	学士	Integrating LULUC process into simple earth system model
64	2010	本庄 和志	修士	Developing a new phenology model for estimation of the terrestrial carbon fluxes
65	(H22)	相庭 一輝	学士	Estimating terrestrial carbon fluxes over Siberia region by using a new biosphere model
66		仲井 沙織	学士	Simulating carbon cycle at rice paddy field by using the improved BEAMS model
67		脊戸山 祐子	学士	Analyzing an effect of climate change on temporal and spatial pattern in net ecosystem production over Japan region
68	2011	加藤 杏奈	修士	A new global land cover map by a hybrid decision tree classifier using climate zones and remote sensing data
69	(H23)	上里 達実	修士	Geologic mapping of the southern Namibia using multispectral and hyperspectral data
70		白井 嵐	修士	Validation of the methods for estimating FeO and TiO ₂ abundance in the lunar maria using Kaguya Multiband Imager data
71		横山 竜也	修士	Evaluation of an impact of the land use and land use change on climate change
72		西岡 聡	学士	リモートセンシングによるシベリアの植生変化の解析
73		水田 ゆかり	学士	Developing a new dynamic global vegetation model for future prediction of terrestrial carbon exchange
74		杉山 大祐	学士	Analyzing global water and carbon cycles using the enhanced simple earth system model

名古屋大学での指導学生と論文題目(5)

	年度	氏 名	学位	論 文 題 目
75	2012 (H24)	Chen Xuehong	博士	Application of Spatial Featyres to Classification, Segmentation and Sharpening in Remotely Sensed Images
76		Ho Thi Kim Loan	博士	Small-scale Landform Classification and Flood Susceptibility Assessment of the Aluvial Plains in Vietnam Using Remotely Sensed Data
77		相庭 一輝	修士	Evaluating an effect of permafrost degradation on terrestrial carbon cycle in Siberia
78		仲井 沙織	修士	Estimation of methane emission from rice paddy soils in Japan
79		脊戸山 祐子	修士	A multi site comparison of carbon and nitrogen dynamics using the terrestrial biosphere model, BEAMS
80		石徹白 奈央	学士	Development of an Endmebern Extraction Method in Spectral Unmixing for Hyperspectral Data
81		山田 大輔	学士	微生物成長プロセスを統合した陸域生物圏モデルによる全球土壌分解量の解析
82	2013	石 玉勝	博士	Evaluation of Carbon Emissions from Forest Fires in Southeast Asia during the Period 2001-2010
83	(H25)	矢島 太郎	博士	ASTER Data Analysis Applied to Mineral Resource Exploration and Geological Mapping
84		杉山 大祐	修士	Analyzing an impact of anthropogenic GHGs emissions on long-term climate change using the simplified earth system model
85		水田 ゆかり	修士	Prognostic-type biosphere model: developing a new phenological approach with seasonal variation of specific leaf area
86		野田 周帆	学士	Estimation of FeOx abundance by hyperspectral remote sensing
87		中元 隼	学士	Analysis of the ice jam floods in the Lena River by using the MODIS and meteorological data
88		帯川 裕基	学士	Analyzing spatial and temporal patterns in control factor of net ecosystem production in East Asia
89	2014	石徹白 奈央	修士	Geological Mapping by Combining Spectral Unmixing and Cluster Analysis for Hyperspectral Data
90	(H26)	木澤 恵一	学士	Analysis of Urban Growth Pattern Using Remote Sensing Data
91	2015	野田 周帆	修士	Estimation of surface iron oxide abundance with suppressing the grain size aand topography effects
92	(H27)	浅野 友紀瑛	修士	Development of a geological mapping method by thermal inertia using ASTER TIR data
93		倉田 夏菜	学士	Combining Multiple Lithological Indices by Using HSV Color Model for Geological Mapping
94	2016	平井 遼	学士	Discrimination of minerals with absorption features at around 2.35 um by using the ASTER VNIR and SWIR bands
95	(H28)	北川 典嗣	学士	Understanding Urban Sprawl Using Shape Indices Derived from Remote Sensing Data

名古屋大学での指導学生と論文題目(6)

	年度	氏 名	学位	論 文 題 目
96	2017	倉田 夏菜	修士	Combining and visualizing lithologic indices derived from ASTER data and topography data
97	(H29)	佐能 史紘	学士	平成26年8月豪雨による広島市土石流災害の素因の解析による土石流の危険度評価
98		渡辺 祥汰	学士	Characterizing the Urban Sprawl Patterns of Several Cities Derived from Remote Sensing Data
99	2018	Sanjiwana Arijasakusuma	博士	Assessing Vegetation Dynamics in Indonesia and Its Response to Climate Anomalies Using Multi-Sensor Satellite Imagery
100	(H30)	ZHOU Xiang (周 翔)	博士	Vegetation Responses to Climate Variability, Human Activities and Policy Shifts on the Mongolian Plateau
101		平井 遼	修士	Discrimination of minerals with absorption features at around 2.35 μm by using the ASTER data
102		Natsagdorj Batbayar	修士	Lithological mapping by using ASTER data in the Ih-Ulzit area, Mongolia
103		柝倉 芳年	学士	Integration of mineralogical and topographical information for hyperspectral data using the HSV color model
104	2019	田中 壮一郎	博士	深層学習による分光反射スペクトルからの変質鉱物同定
105	(R1)	海老原 拓	学士	Analysis of the Urban Heat Island Effect Caused by Vegetation Area Change Extracted from Satellite Remote Sensing Data
106	2020	柝倉 芳年	修士	Spatial mapping of absorption center wavelengths of minerals from hyperspectral data
107	(R2)	石橋 采己	学士	土地被覆を考慮した土石流の危険度評価

博士學位論文審査の副査（１）

年度	氏 名	博 士 論 文 題 目	主指導教員	所 属
1 1997	小田島高之	地理情報システムによる衛星データ及び数値地形モデルを用いた地すべり危険度解析	平野弘道	早稲田大学大学院理工学研究科
2 2000	Mohammad Rezwanul Islam	Sedimentation in Bengal Basin and Bengal Fan: Analysis from the coupling of remote sensing technique and numerical simulation	小川克郎	名古屋大学大学院理学研究科
3 2000	ZHANG, Wanchang (張 万昌)	Water resource and hydrological process studies on the Urumqi River basin, Tianshan, China by means of remote sensing and GIS technique	小川克郎	名古屋大学大学院理学研究科
4 2001	大谷具幸	X線CTによる葛根田花崗岩岩石組織の3次元形態解析	足立 守	名古屋大学大学院理学研究科
5 2002	Sunil Adhikary	Study on ablation processes of snow and ice under the influence of dust covering a wide range of albedo	小川克郎	名古屋大学大学院理学研究科
6 2002	澤田可洋	静止気象衛星「ひまわり」の画像による噴火噴煙の観測とその解析に関する研究	藤井直之	名古屋大学大学院環境学研究科
7 2005	FANG, Weihua (方 偉華)	Study on the Crop Phenology and Crop Irrigation Water Requirement under Climate Variability in the Yellow River Basin	井村秀文	名古屋大学大学院環境学研究科
8 2005	下山 宏	seasonal and interannual Variation in Energy and Carbon Dioxide Fluxes in a West Siberian Bog	檜山哲哉	名古屋大学大学院環境学研究科
9 2006	Mohamed Abubailb Abdalla Mohamed	Satellite-observed response of global terrestrial vegetation to climate variability	檜山哲哉	名古屋大学大学院環境学研究科
10 2007	KIM, Heon-Sook (金 憲淑)	Characteristics of Dust Events in the Taklimakan Desert -Influence of land Surface Condition and High Mountains Surrounding the Desert-	甲斐憲治	名古屋大学大学院環境学研究科
11 2007	鈴木亮平	ASTERセンサによる衛星データを利用したヒマラヤの氷河表面を覆う岩屑の熱特性分布に関する研究	上田 豊	名古屋大学大学院環境学研究科
12 2007	永井 信	衛星観測で得られた植生指数を用いた気候変動に対する植生活動の応答の評価	森本 宏	名古屋大学大学院環境学研究科
13 2008	松田好弘	降水の季節性がアジア高山域の氷河の気候感度にあたえる影響	上田 豊	名古屋大学大学院環境学研究科
14 2008	Chalermchai Pawattana	Remote sensing and GIS based sustainable water management modelling in Chi River basin	Nitin Kumar Tripathi	Asian Institute of Technology, Thailand

博士學位論文審査の副査（2）

年度	氏 名	博 士 論 文 題 目	主指導教員	所 属
15 2008	齋藤 眞	Rapid evolution of the Eocene accretionary complex (Hyuga Group) of the Shimanto Terrane in southeastern Kyushu, southwestern Japan	竹内 誠	名古屋大学大学院 環境学研究科
16 2009	CAO, Xin	Assessing Wildfire Propagation Susceptibility in Grassland of North Aais	井村秀文	名古屋大学大学院 環境学研究科
17 2009	白井 慶	月周回衛星「かぐや(SELENE)」蛍光X線分光観測装置搭載CCD検出器の基礎開発と惑星科学への応用	渡邊誠一郎	名古屋大学大学院 環境学研究科
18 2010	JANJIRAWUTTIKUL Naruekamon	Geo-environment and Pedogenesis of Acid Sulfate Soil in Thailand	横山 智	名古屋大学大学院 環境学研究科
19 2011	縫村崇行	GPS測量で補正したデジタル標高データによるネパールヒマラヤ・クンブ地域の氷河変動	藤田耕史	名古屋大学大学院 環境学研究科
20 2011	ZHANG, Yong (張 勇)	Distribution of debris mantle and its effect on changes in surface elevation of Hailuoguo glacier, southeastern Tibetan Plateau	藤田耕史	名古屋大学大学院 環境学研究科
21 2012	HOSSEN, Md. Shahadat	Micrometeorological evaluation of surface energy and carbon dioxide budgets in a double-cropping paddy ecosystem of Bangladesh	檜山哲哉	名古屋大学大学院 環境学研究科
22 2012	井筒耕平	地域での自然エネルギー普及に向けた推進組織についての研究 ―岡山県備前市の事例をもとに―	高野雅夫	名古屋大学大学院 環境学研究科
23 2012	Witheetrirong	Geospatial analysis of contributing factors on nitrate-nitrogen content in groundwater in Nakhonpathom, Thailand	Nitin Kumar Tripathi	Asian Institute of Technology, Thailand
24 2013	青山(河邑)ちひろ	並行複式無機化栽培法による種々の有機性廃棄物の効率的硝化法の開発	高野雅夫	名古屋大学大学院 環境学研究科
25 2013	Abbadi Girmay REDA	Impact of climate variability on agriculture in Ping River Basin, Thailand	Nitin Kumar Tripathi	Asian Institute of Technology, Thailand
26 2014	藤原和樹	Influence of the rhizosphere microbial community on root-borne disease suppression in the multiple parallel mineralization system	高野雅夫	名古屋大学大学院 環境学研究科
27 2014	永井裕人	ブータン・ヒマラヤにおける氷河分布および岩屑被覆域形成に対する気候と地形の影響	藤田耕史	名古屋大学大学院 環境学研究科
28 2015	WANG, Shengqiang (王 勝強)	Remote Estimation of Phytoplankton Size Structure Using light Absorption Spectra	石坂丞二	名古屋大学大学院 環境学研究科

博士學位論文審査の副査（3）

年度	氏 名	博 士 論 文 題 目	主指導教員	所 属
29	岡村鉄平	らせん水車を用いた実用的なピコ水車発電システムの開発	高野雅夫	名古屋大学大学院 環境学研究科
30	林 正能	伊勢湾における海色衛星データの検証・改善と改良された衛星クロロフィルa濃度の 時系列解析	石坂丞二	名古屋大学大学院 環境学研究科
31	2017 Sunal Ojha	Monitoring of glaciers and their regional shrinkage over Mid-eastern Himalaya using high resolution satellite observations	藤田耕史	名古屋大学大学院 環境学研究科
32	2017 Ashty Saleem	Using CORONA and landsat Data for Evaluating and mapping Long-term LULC Changes in Iraqi Kurdistan	Ashraf Dewan	Curtin University, Australia
33	2017 Rahmadya Trias Handayanto	Hybrid Multi-Criteria Evolutionary Algorithms for Optimization Problem of Sustainable land-use Planning	Nitin Kumar Tripathi	Asian Institute of Technology, Thailand
34	2018 Komal RANI	Integration use of emissivity, thermal inertia and geophysical data for geological mapping in parts of Banswara, Rajasthan, India	Arindam Guha	Indian Institute of Technology, Dhanbad, India
35	2019 YANG, Mengmeng (楊 萌萌)	Investigation of the Variability of Chlorophyll-a over the Spring-Neap Tidal Cycle in the Turbid Ariake Bay, Japan, by the Improved MODIS Ocean Color Data	石坂丞二	名古屋大学大学院 環境学研究科
36	2019 砂子崇次朗	ネパール・ヒマラヤにおける高標高域に位置する氷河の質量収支と気候条件に関する 研究	藤田耕史	名古屋大学大学院 環境学研究科
37	2019 加藤杏奈	Development of Refined Land Surface Phenology Detection Approaches for Robust Vegetation Signal Monitoring	Kimberly Carlson	University of Hawaii, U.S.A.
38	2020 Siriruk Pimmasarn	Characterizing forest succession in Khao Yai National Park using LiDAR and satellite image	Nitin Kumar Tripathi	Asian Institute of Technology, Thailand
39	2020 FENG, Chi (冯 驰)	Classification of <i>Chattonella</i> spp. and <i>Skeletonema</i> spp. blooms in Ariake Sea based on backscattering index derived from two different ocean color satellites	石坂丞二	名古屋大学大学院 環境学研究科
40	2020 土居龍成	ヒノキ人工林における細根系の次数分類を用いた形態特性の変動	平野恭弘	名古屋大学大学院 環境学研究科