

近赤外衛星画像による島嶼・火山の地形 －南西諸島・箱根火山・伊豆大島－

坂本昌弥*・木下紀正**

Topographies of islands and volcanos observed by near-infrared satellite images
- Nansei islands, Hakone volcano and Izu-Oshima -
Masaya SAKAMOTO* and Kisei KINOSHITA**

キーワード：ランドサット, リモートセンシング, カルデラ, 数値標高データ

はじめに

日本列島の地形学・地質学的特徴の一つに島弧が挙げられる。日本列島付近におけるこの島弧は、千島弧・東北日本弧・伊豆小笠原弧・西南日本弧・琉球弧の5つに分けることができ(酒井, 2003), それぞれに島弧-海溝系の地形学・地質学的特徴をみることができる。

この島弧のひとつである琉球弧は、多くの島嶼が九州から台湾にかけて東北-南西方向に連なり、その弧状は南東側に少しふくらんだ形状をしている。そして総距離は1,200kmにもなり、東側の琉球海溝と西側の沖縄トラフの間において、火山フロントを境に非火山性の特徴を持つ琉球外弧と火山性の琉球内弧を形成している。この琉球弧は、小藤(1897)による南西諸島の地形学・地質学的視点からみた研究から、現在では地球物理学や生物分類学等の研究分野も取り込み、そのテクトニクスが総括的に解明されつつある。

この琉球内弧に存在する諏訪之瀬島は御岳火山を有し、その東斜面には特徴的な馬蹄形カルデラが存在する。この諏訪之瀬島火山は200年間で8回以上の大きな噴火をしており(井村, 1991), 現在の北部琉球弧の中で最も活動的な火山である。

伊豆・小笠原弧に属する伊豆・小笠原地域にもさまざまな島嶼が存在する。この島弧の大部分は、水深9,000mを超える場所もある小笠原海溝に並列して存在し、その西側で3列の海嶺が帯状に連なっている。ここでも火山フロントを境界として東側に非火山性の特徴を持つ外弧(前弧)と、西側に火山性のそれを持つ内弧(背弧)に分けることができる。ここでみられる島嶼は、海嶺の山頂付近が海面上へ出ることによって島嶼となり、そこでは火山や急崖が形成されている場

合も多い。この伊豆・小笠原弧は南北方向に伸びており、その総距離は1,500km, 幅は400kmにもなる。そしてこの大きさは東北日本弧にも匹敵するとされる(西村・湯浅, 1991)。

箱根火山で総称される多くの火山群は、伊豆・小笠原島弧の北端に位置し、火山フロントとプレートの境界が交わる特異な地点に存在する。この箱根火山は、1辺が10km程度の三角形のカルデラ内に存在し、平田(1999)・高橋・長井(2007)・長井・高橋(2008)の研究によると、このカルデラ内に存在する前期中央火口丘から後期中央火口丘が形成されるまで約9ステージに分類され、そこで形成された火山はカルデラ内を北西-南東の方向性を持って列状に並んでいる。

伊豆大島は、伊豆・小笠原弧の火山フロント上に位置し、現在も活発に活動中の大島火山を有する。この大島火山の活動は数万年前から続き、カルデラを形成し多くの火山噴出物による地層を形成している(富樫・一色, 1983; 一色, 1984)。

こうした島弧-海溝系に属する島嶼や火山には、多様な地形・地質の特徴があるが、これらをリモートセンシングによって俯瞰・調査する研究はまだ緒に就いたばかりである。

ところで、リモートセンシング工学や宇宙情報工学の急速な進歩と情報機器の急速な発展・普及により、一般的なユーザーがこれまで入手困難とされてきた人工衛星画像が、さまざまな場所で安価で容易に入手でき、それらが多様な用途に用いられるようになってきた。例を述べると、カシミール3D(杉本, 2002)やGoogle Earth (<http://www.google.co.jp/intl/ja/earth/index.html>), そして鹿児島大学 SiPSE グループが開

* 鹿児島県立博物館：〒892-0853 鹿児島市城山町1-1

** 鹿児島大学教育学部附属教育実践総合センター

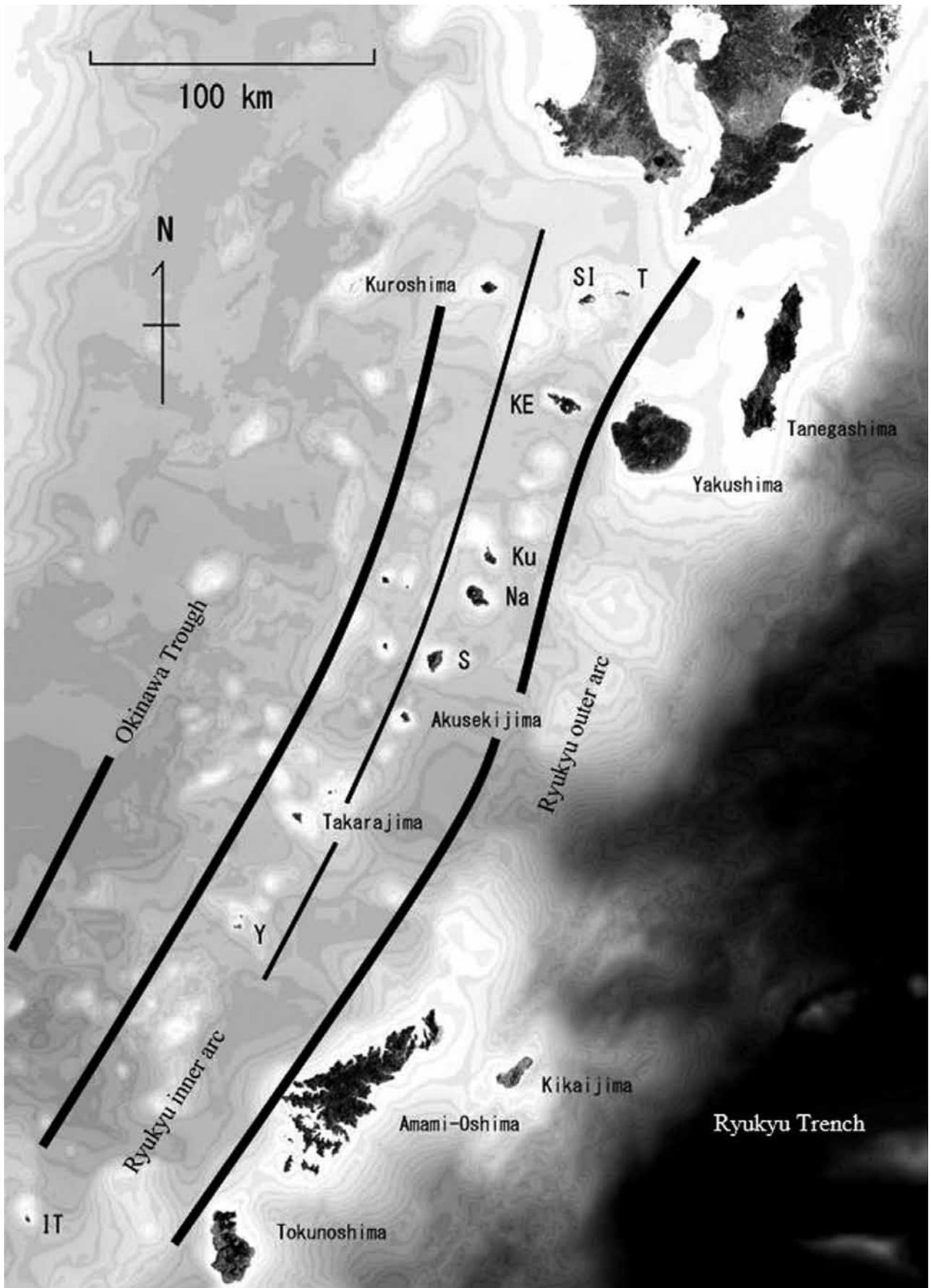


図1 南西諸島の地形・地質概略図。SI；薩摩硫黄島，T；竹島，KE；口之永良部島，Ku；口之島，Na；中之島，S；諏訪之瀬島，Y；横当島，IT；硫黄鳥島。

発したソフトウェアである教育用衛星画像表示システム SiPSE (Satellite image Presentation System for Education) (戸越ほか, 2000; 木下ほか, 2005) 等を用いた教育活用やさまざまな調査研究, 各種報道メディアの利用が挙げられる。学術的にもこれらのソフトウェアはさまざまな領域で利用されている。地形学・地質学研究, そしてそれらに対応する地学・地理・防災といった分野の教育学研究でも積極的に活用され (例えば, Sakamoto et al., 2007; Sakamoto and Kinoshita, 2010; 坂本ほか, 2013), 現在その学術成果が徐々に積み上がりつつある。

人工衛星画像を波長域ごとに処理したものの中で, 近赤外画像 (Near Infrared Ray images, 以下 NIR 画像) は, 火山地形や断層地形などの理解に適していることが明らかになっており (Kinoshita et al., 1997), さらにそれに数値標高データ (digital elevation model data, 以下 DEM data) と結合した 3D 画像を用いることによって, 火山地形, 断層地形, 河岸段丘, 海岸段丘等を検討する場合において, 効果的に活用できることがわかっている (例えば Sakamoto et al., 2007)。SiPSE を用いた NIR 画像および NIR 3D 画像に関する詳しい工学的特徴や解説 (金柿ほか, 2004; 坂本ほか, 2013) は本報告では述べない。

島弧-海溝系に伴うさまざまな特徴的な地形に関して, NIR 画像および NIR 3D 画像を用いて考察した研究報告は少なく (たとえば坂本・木下, 2010; Kinoshita and Sakamoto, 2013), こうした観点から本研究報告では, 日本に特徴的にみられる島弧-海溝系にみられる代表的な地形を NIR 画像およびその 3D 画像で俯瞰し, そこから見えている地形・地質の特徴について言及したい。

1 衛星画像による島嶼域の検討

1.1 琉球弧の北部域

琉球弧は, 東側の太平洋側から西側の大陸棚に向かって, 琉球海溝, 琉球外弧, 火山フロント, 琉球内弧, 沖縄トラフとなり, 更にその西側の海底には東シナ海大陸棚が広がっている (図 1)。そしてこれらを形成する主な地層・岩石は, (a) 先第三紀層および先第三紀岩類, (b) 第三紀層, (c) 第三紀および第四紀火山岩, (d) 第四紀石灰岩の四種に大別できる。この中で, (c) 第三紀および第四紀火山岩によって形成される琉球内弧は, 東側の新期火山列である口之永良部島・口之島・中之島・諏訪之瀬島・悪石島・横当島・硫

黄鳥島と, 西側の旧期火山列の島々である黒島・臥蛇島・小臥蛇島・平島・宝島・小宝島に細分することができる (木崎, 1985; Matsumoto, 1943; 波多江, 1955; 小西, 1965; 松本, 1983)。さらにこの旧期火山列は, 安山岩が主体となってできた黒島・臥蛇島・小臥蛇島, そして平島と隆起サンゴ礁による段丘地形が発達している宝島・小宝島に分けることができる (木庭ほか, 1979)。図 1 によって南西諸島の北部域を概観すると, 島嶼の列は, 全体的に北東-南西の方向に延びている。そして琉球海溝の西側に琉球外弧にあたる非火山性で比較的大きな面積を有する島嶼である種子島・屋久島・奄美大島・徳之島が並び, さらにその西側に琉球内弧の島嶼が並んでいる。この琉球内弧は二分することができ, 琉球弧の火山フロントにあたり, 現在でも活動的な火山活動を続けている場合が多い新期火山列と, 火山フロントの西側に位置し, 現在では大規模な火山活動が見られない旧期火山列に分けて認識することができる。ただし一部の島嶼では噴気活動等が報告されており, その K-Ar 年代から 1 万年以内に噴火している可能性も考えられている (中野・下司, 2008)。

1.2 諏訪之瀬島

諏訪之瀬島は鹿児島市の南南西約 230km の地点に位置し, 琉球弧の火山フロント上に存在する。その形状は長軸約 8km, 短軸約 6km である。そして諏訪之瀬島は 4 つの火山体が存在しており, それらは北北東-南南西方向に連なっている。1813 年の文化噴火 (文化 10 年) による堆積物が広く地表を覆っており, この噴火については嶋野・小屋口 (2000) によって詳細に研究されている。さらに近年の特徴的な活動として, 2013 年 12 月 26 日~31 日に御岳火口において爆発的噴火が 247 回記録されたことが挙げられる。この期間のうち 12 月 29 日にはそれが 125 回記録されており, 火山災害が懸念される火山である (福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台, 2014)。これまでも諏訪之瀬島は「近年, 噴火活動が繰り返している火山」として指定された 23 火山のひとつであり, 内閣府によってその防災対策が進められている (火山防災対策の推進に係る検討会, 2012)。

図 2- (a) の NIR 画像によって諏訪之瀬島 (噴煙の無い 1997 年 5 月 26 日観測) を視ると, 植生が欠如しているため, 御岳山頂部から西側の海岸までが黒

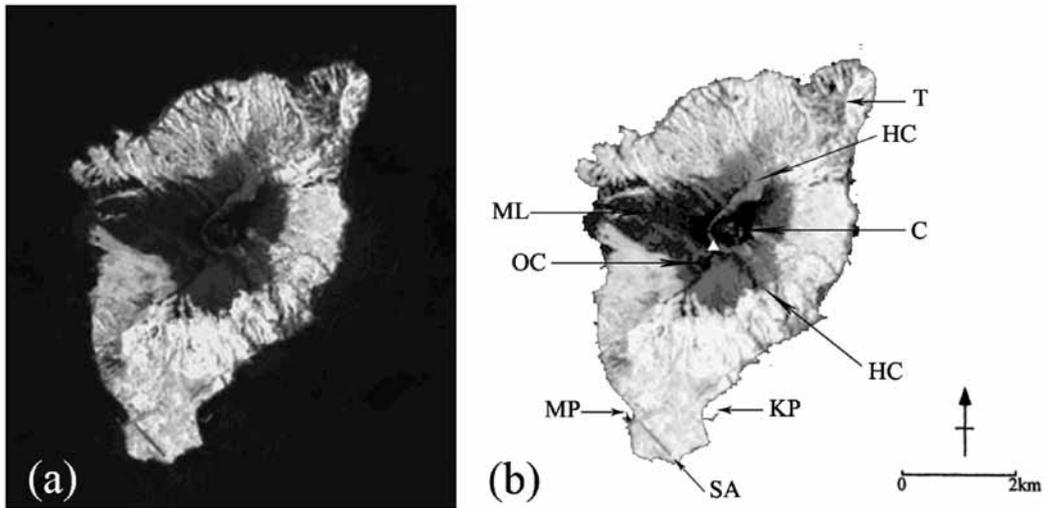


図2 諏訪之瀬島の (a)NIR 画像, (b) 説明図. T: 富立岳, HC: 馬蹄形カルデラ, C: 御岳火口, ▲: 御岳山頂, KP: 切石港, SA: 諏訪之瀬島飛行場, MP: 元浦港, OC: 旧火口, ML: 明治溶岩

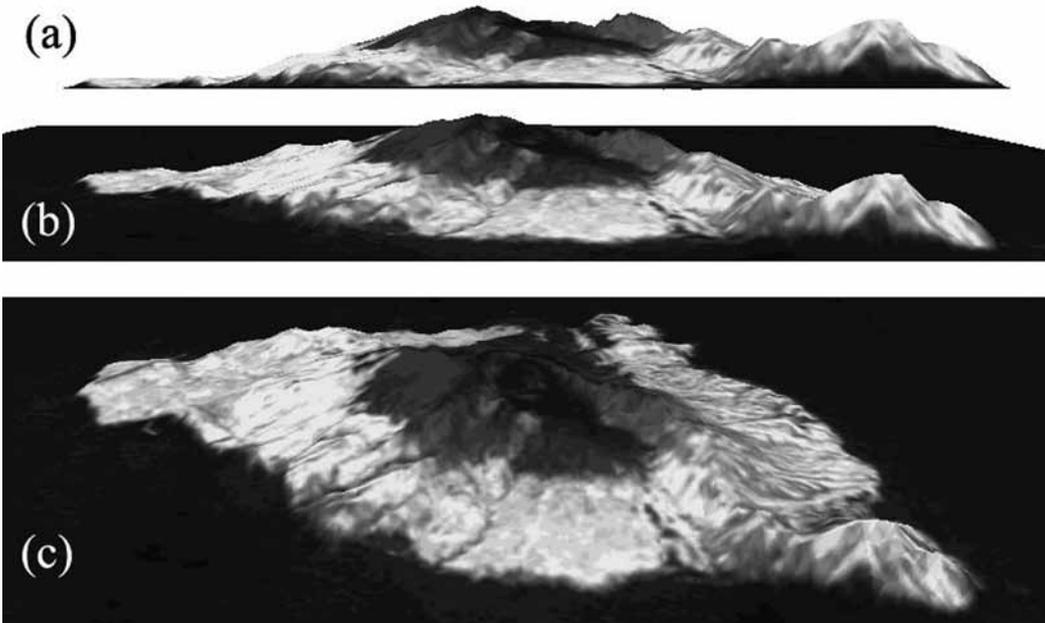


図3 諏訪之瀬島の NIR 3D 画像. (a) 東の水平線上から俯瞰, (b,c) 上空から俯瞰

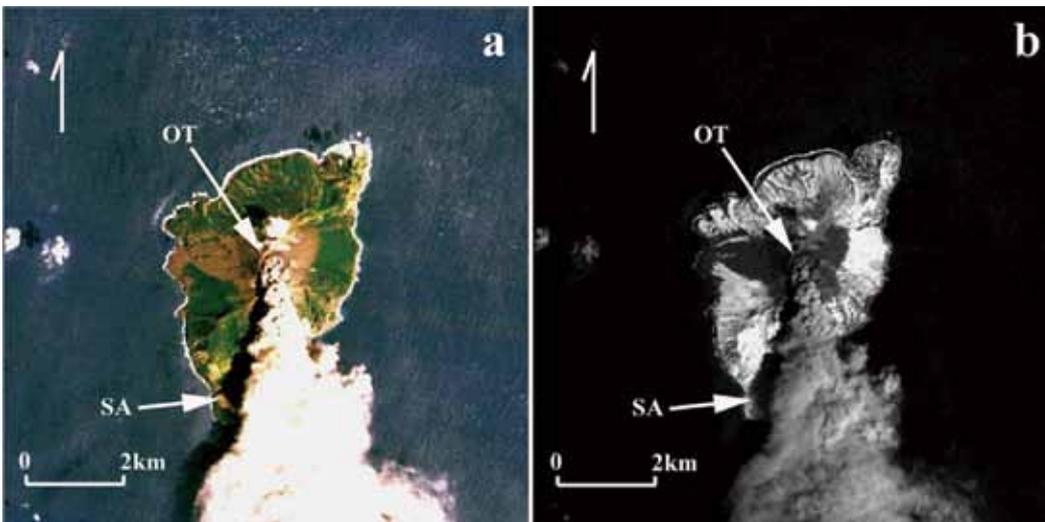


図4 諏訪之瀬島の Landsat-5 TM 画像 (1988年4月15日観測). (a) 可視画像と (b) 諏訪之瀬島の NIR 画像
OT: 御岳, SA: 諏訪之瀬島飛行場

く見える。これは御岳火口Cから噴出される噴煙や火山ガスの影響と、明治溶岩と火砕流堆積物が西側斜面を覆っているためである。一般にNIR画像には、陸域内の河川や湖沼、火口湖といった地形や植生の有無などを容易に認識できる特長があり、これは可視画像や地形図より優れている点と言える。図2-(b)の説明図はNIR画像の黒い海面を白色で置き換え、更に明度を上げて島の東側に開いた馬蹄形カルデラ(作地カルデラ)のカルデラ壁HCを明瞭にしたものである。その内側に現在活動中の御岳火口C、外側に旧火口OCが認められる。また島の北東部に位置する富立岳は急峻な地形を持つ古い火山体だが、図2では浸食が進み多くの谷が刻まれていることが認識できる。これらの地形的特徴は3D画像として俯瞰することによって更に明瞭になる。

諏訪之瀬島を東の水平線上と上空から俯瞰すると、図3-(a), (b), (c)のように東斜面に開いたカルデラ壁や富立岳の急峻な地形が明瞭に把握できる。作地カルデラは1813-1814年間の文化噴火の後に崩落した火山地形であり(平沢・松本, 1983; 嶋野・小屋口, 2001)、山麓では植生が回復している。

図4(1988年4月15日観測)では島の中心に位置する御岳火口から激しく噴煙を上げている様子がわかる。この噴煙は奄美大島の北をかすめて南南東に伸びている。図4-(a)と(b)を比較すると、可視画像(a)は、植生によってガリーや尾根・谷などの細かい地形が識別しづらいが、NIR画像(b)ではそれが俯瞰しやすい。

1.3 箱根火山

箱根火山は伊豆半島の最北部に位置し、1936年にカルデラ内全域が国立公園に指定された。特異な火山地形を留めており、カルデラ内にある中央火口丘には、成層火山である神山(1438m)や溶岩ドームである駒ヶ岳・浅間山といった火山が存在する(Kuno, 1950; 久野, 1972)。図5-a, bに箱根火山のLandsat-5の可視画像およびNIR画像を示す。北北西-南南東に続くカルデラ壁西縁とその東部に位置する芦ノ湖、そして中央火口丘を明瞭に認識することができる。図5-aは人工建築物や植生によって、その地形を細かく識別することが困難であるが、図5-bではNIRを湖水が吸収したため、芦ノ湖の水域と陸域の境界を明確に見分けることができ、また中央火口丘や芦ノ湖西岸に存在するカルデラ壁も明瞭

に認識することができる。カルデラ壁西縁よりさらにその西側では古期外輪山噴出物が堆積している(小林ほか, 1997)が、これが侵食され、西南西-東北東方向にガリーが発達していることが明瞭に認識できる。これらの画像は午前10時過ぎに撮影されているために太陽直射の陰影が南東から北西に向けて延び、これによって地形の凹凸が分かりやすく、火山地形学習に適している。

この図5-a, bを立体視し、東から西方向を俯瞰したNIR 3D画像が図6-a, bである。カルデラ内が明瞭に俯瞰できる。SiPSEを用いると俯瞰する方向の設定も容易に行うことができる。図6-aでは人工建築物や植生によって地形を細かく俯瞰しづらい。しかし図6-bでは、図5同様に芦ノ湖の水域と陸域の境界を明確に見分けることができ、その周囲のカルデラ壁といったカルデラ地形や、侵食によって形成されたガリーも明瞭に概観することができる。

この芦ノ湖は、火砕流によって堰き止められた地形に流水により形成された(袴田, 1981)。

1.4 伊豆大島

伊豆大島は、東京の南南西約100kmに位置し、伊豆・小笠原弧の火山フロント上に存在する。1986年の三原山および外輪山山腹の割れ目噴火によって発生した火山災害では全住民の避難に至った。この噴火では、噴出物の多くが火口から東方向に堆積した(遠藤ほか, 1987)。図7-a, bで直上から伊豆大島を概観すると、その噴火によって流出した溶岩流および噴出物によって堆積した火砕物が存在する位置では植生が回復していないため、画像が黒色に見えることがわかる。特に図7-bのNIR画像では、明確にその様子が識別でき、火山の植生の回復をみると、NIR画像が有効であることがわかる。

伊豆大島火山は活動的な火山であり、玄武岩質岩石や火砕岩によって構成され(一色, 1984)、なだらかな火山地形を有する。図7-bのNIR画像において、三原山火山の南部および西部では高所から低所に向けてガリーによる「しわ」を識別することができ、火山地形の侵食の様子を見ることができる。

2 まとめと課題

衛星画像立体表示によって俯瞰した火山地形に関する研究は、まだ歴史が浅く、活用する方法等も含め、今後大いに研究されていくべき分野である。NIR画

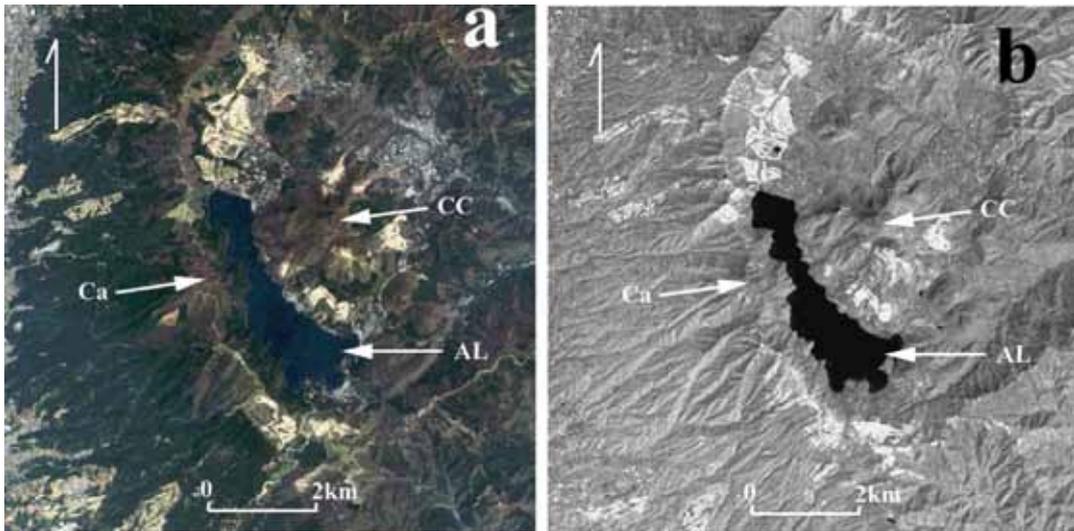


図5 箱根火山と半島の (a) 可視画像と (b) NIR 画像. AL : 芦ノ湖, CC : 中央火口丘, Ca : カルデラ壁の一部.

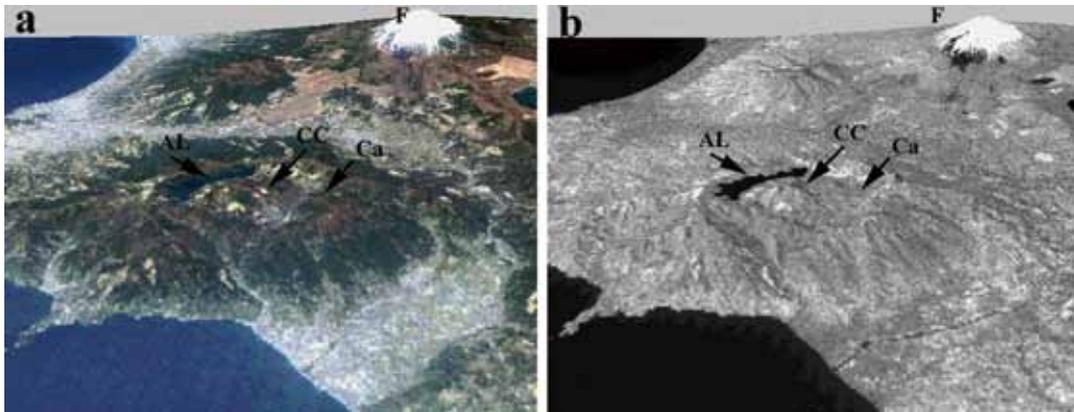


図6 東から西方向へ箱根火山とその周辺を俯瞰した (a) 可視 3D 画像と (b) NIR 3D 画像.
F : 富士火山, AL : 芦ノ湖, CC : 中央火口丘, Ca : カルデラ壁北縁.

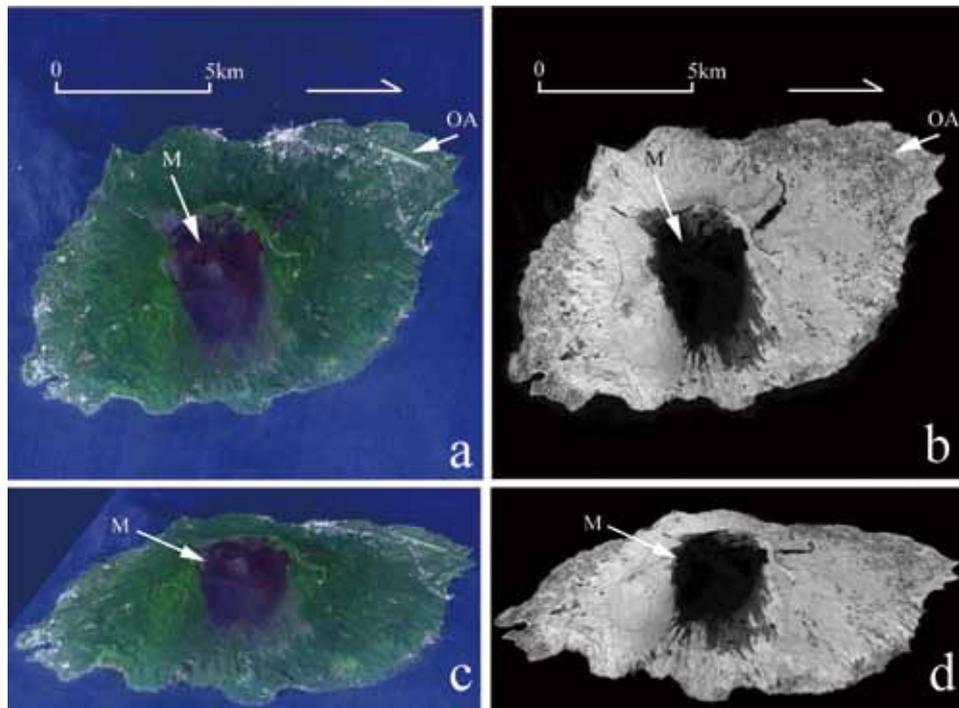


図7 直上から俯瞰した伊豆大島の (a) 可視画像, (b) NIR 画像, 東から俯瞰した (c) 可視 3D 画像, (d) NIR 3D 画像.
M : 三原山火山, OA : 大島飛行場

像は水域と陸域の境界線を明確に見分けることができ、また植物のない裸地や火口付近の裸地なども NIR の反射が少ないために黒く見え、地形を俯瞰するのに適している。さらに火山地形は、火砕流堆積物などで形成されることが多く、三次元的な侵食が、他の地質よりも著しい場合が多いが、NIR 画像はこうした地形・地質の特徴も捉えやすい。

本研究では、島弧－海溝系に見られる火山地形を例に、NIR 画像・NIR 3D 画像でその利用法を検討したところであるが、このような成果をさまざまな研究者や教育関係者などの間で共有し、データベース化していくことは、今後の大きな課題である。さらに日本全体にみられるさまざまな地形・地質構造や日本列島付近に存在する5つの島弧－海溝系の特徴、そして中央構造線などの巨大断層に対するマクロ的な画像作成とそのデータベース化が必要である。防災的な面から見ると、桜島火山・新燃岳火山・諏訪之瀬島火山をはじめとする多くの火山の活動状況をいかに素早く画像に反映するかも課題である。

鹿児島県立博物館では市民向けの野外観察教室を積極的に実施している。例えば「桜島の自然を学ぶ」「春の七草をさがそう」「セミの羽化をみよう」といった野外観察を中心とした講座である。現在、小・中・高校生が自然科学を学ぶ上で、必要とされる野外観察（宮下，1999）が、現実の教育環境の中では実施されていない場合が多いことに対して、多くの問題点が提起されている（宮下，2009；三次，2008）。こうした問題点を少しでも補完し、地球科学への興味関心を高める上でも、衛星画像を用いた教材の開発とその利用法の研究は急務である。

謝辞

本研究を行うにあたり、鹿児島大学 SiPSE グループには、画像の提供および多くのご協力をいただきました。記して深甚の謝意を表します。

引用文献

遠藤邦彦・千葉達朗・谷口英嗣・隅田まり・太刀川茂樹・宮原智哉・宇野リベカ・宮地直道(1987)：テフロクロロジーの手法に基づく1986～1987年伊豆大島噴火の経緯と噴出物の特徴。火山，**33**，伊豆大島噴火特集号，32-51。
福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台(2014)：諏訪之瀬島の火山活動解説

資料（平成25年12月）。（最終閲覧日：2014年1月26日）。http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/13m12/511_13m12.pdf

- 袴田和夫(1981)：箱根仙石原の地質と編年。大涌谷自然科学館研究報告，(1)：1-10。
波多江信広(1955)：鹿児島県宇治群島および草垣島の地質。地学雑誌，**64**：14-26。
平沢見一・松本幡郎(1983)：鹿児島県トカラ列島諏訪之瀬島の火山地質。火山，**28**：101-115。
平田由紀子(1999)：箱根火山の発達史。神奈川県立博物館調査研究報告（自然科学），**9**：153-178。
井村隆介(1991)：諏訪之瀬島火山の最近200年間の噴火堆積物－火山砂層による噴火活動の消長の評価－。地質学雑誌，**97**：865-868。
一色直記(1984)：大島地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1図幅），地質調査所，133p。
金柿主税・川野和昭・木下紀正(2004)：ビデオカメラによる近赤外画像の利用研究。鹿児島大学教育学部研究紀要，自然科学編，**55**：11-24。
火山防災対策の推進に係る検討会(2012)：火山防災対策の推進に係る検討会 とりまとめ。内閣府，16p。東京。
木下紀正・富岡乃夫也・戸越浩嗣(2005)：SiPSEによる3D衛星画像の作り方と読み方。古今書院，126p。東京。
Kinoshita, K., Ikebe, S., Isogai, K. (1997): Satellite Observation of Volcanic Phenomena in Kyushu, Japan. Bull. Fac. Ed., Kagoshima Univ., Natural Sci. **48**：37-63。
Kinoshita, K. and Sakamoto, M. (2013)：Volcanic Islands Chain South of Kyushu, Japan. The Islands of Kagoshima. K. Kawai, R. Terada and S. Kuwahara (eds). Kagoshima Univ. Res. Center for the Pacific Isls., Chap. 21. 128-135。
木崎甲子郎編(1985)：『琉球弧の地質誌』。沖縄タイムス社，278p。沖縄。
木庭元晴・中田 高・渡部佐知子(1979)：宝島・小宝島の第四紀後期離水サンゴ礁と完新世後期の海水準。地球科学，**33**：173-191。
小林 淳・奥野 充・中村俊夫(1997)：箱根古期外輪山西斜面に分布する中央火口丘起源の火砕流堆積物。名古屋大学加速器質量分析計業績報告書，**8**：172-182。

- 小藤文治郎 (1897) : 琉球弧島の地質. 地質, **5** : 1-12.
- 小西健二 (1965) : 琉球列島 (南西諸島) の構造区分. 地質学雑誌, **71** : 437-457.
- Kuno, H. (1950) : Geology of Hakone volcano and adjacent areas, Part I. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. II*, **7** : 257-279.
- 久野 久 (1972) : 箱根火山地質図説明書, 久野久原著「箱根火山地質図説明書」再版委員会, 大久保書店, 52p. 東京.
- Matsumoto, T. (1943) : The four gigantic caldera volcanoes of Kyushu, Japan. *Jour. Geol. Geogr.*, **19** : 1-57.
- 松本征夫 (1983) : 琉球列島における新生代火山活動. 地質学論集, **22** : 81-91.
- 三次徳二 (2008) : 小・中学校理科における地層の野外観察の実態. 地質学雑誌, **114** : 149-156.
- 宮下 治 (1999) : 地学野外学習の実施上の課題とその改善に向けて - 東京都公立学校の実態調査から -. 地学教育, **52** : 63-71.
- 宮下 治 (2009) : 理科野外学習の実施を阻害する要因の解明と改善への提言. 人間環境学会紀要, **12** : 17-29.
- 長井雅史・高橋正樹 (2008) : 箱根火山の地質と形成史. 神奈川県立博物館調査研究報告 (自然科学), **13** : 25-42.
- 中野 俊・下司信夫 (2008) : 鹿児島県トカラ列島, 小臥蛇島火山の概要. 地質調査研究報告, **59** : 197-201.
- 西村 昭・湯浅真人 (1991) : 伊豆・小笠原弧のスミスリフト, 一海洋性島弧における背弧リフトの形成の一例. 地球科学, **45** : 333-344.
- 酒井治孝 (2003) : 『地球学入門』. 東海大学出版会, 284p. 神奈川.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2010) : 3D 衛星画像を教材とした高等学校地学教育. 平成 22 年度全国地学教育研究大会, 日本地学教育学会第 64 回全国大会鹿児島大会講演予稿集, 98-99.
- 坂本昌弥・木下紀正・森脇 広 (2013) : 近赤外衛星画像立体表示による九州の第四紀火山地形. 鹿児島県立博物館研究報告, **32** : 29-36.
- Sakamoto, M., Kinoshita, K., Tomioka, N. and Togoshi, H. (2007) : School Education for Volcanic Disaster Mitigation using 3D Satellite Image Presentation System SiPSE. Cities on Volcanoes 5 Conference, Nov. 2007, 32-P-17.
- Sakamoto, M., Kinoshita, K. (2010) : Quaternary volcanoes in Kyushu viewed with near-infrared 3D satellite images. International Field Conference and Workshop on Tephrochronology, Volcanism and Human Activity. Active Tephra in Kyushu Kirishima. Abstracts: 41.
- 嶋野岳人・小屋口剛博 (2001) : 諏訪之瀬島火山 1813 噴火 (文化噴火) の噴火様式とマグマの脱水過程. 火山, **46** : 53-70.
- 杉本智彦 (2002) : カシミール 3D 入門 山と風景を楽しむ地図ナビゲータ. 実業之日本社, 144p. 東京.
- 高橋正樹・長井雅史 (2007) : 15 万年前以降における箱根火山の浅部マグマ供給システムとテクトニクス場 一横ずれ活断層システムに切られた活火山一. 地球号外, **57** : 173-181.
- 戸越浩嗣・富岡乃夫也・木下紀正 (2000) : 数値標高モデルと衛星データを用いた教育用 3 次元動画像表示提供システムの構築. 鹿児島大学教育学部教育実践研究紀要, **10** : 85-92.
- 富樫茂子・一色直記 (1983) : 大島火山先カルデラ成層火山古期山体火砕流堆積物中の樹幹の 14C 年代. 火山, **28** : 409-410.

**Topographies islands and volcanos observed
by near-infrared satellite images**

- Nansei islands, Hakone volcano and Izu-Oshima -

Masaya SAKAMOTO¹ and Kisei KINOSHITA²

Key Words : Landsat, remote sensing,
caldera, DEM data