

JERS-1衛星画像から見たインドネシア, ヌサテンガラ・チムールの地熱有望地域

浦井 稔¹⁾・村岡洋文²⁾・高橋正明²⁾・アズナヴィア ナスティオン³⁾

1. はじめに

インドネシアは赤道を挟んで分布する17,000以上の島々からなる群島国家である。島々が分布する範囲は南北1,700km, 東西5,100kmにもおよぶ。インドネシアの人口は世界第5位の1億9千万人であるが, その分布は著しく偏っており, 面積では7%に満たないジャワ島とスマタラ島に全人口の6割が集中し, 現在もこれらの島へ多くの人々が移動している。

インドネシア政府は人口の少ない島々の経済的發展や教育水準の向上を目的として, 道路や交通機関の整備, 電話などの通信網の整備, 水道・電気の普及などを推進している。その一環として, 水力・地熱エネルギーなどを利用した地域電化計画が進められている(笹田・高橋, 1996)。

ヌサテンガラ・チムール地域とはコモド島からチモール島の西側にいたるフローレス島, レンバータ島, アロール島などの島々を含む地域である。この地域には多数の活火山が存在し, 豊富な地熱エネルギーを有すると期待されている。すでに, フローレス島のウルクンでは地熱発電所の建設に向けた探査・開発が進行中である(笹田・高橋, 1996)。地質調査所と新エネルギー・産業技術総合開発機構はインドネシア火山調査所と協力して, ヌサテンガラ・チムール地域の5ヶ所の地熱有望地域を研究対象地域として, 「遠隔離島小規模地熱の探査に関する共同研究」を開始した。本年度はこの研究の初年度として5地域の予察調査とJERS-1の衛星画像を使用した地質構造解析を実施した。

インドネシアでは, 地形図を入手することが難し

い。我々は25万分の1地形図を入手したが, 内容が古く, 精度についても疑問が残るものであった。このような地域では, 衛星画像を地図の代わりとしても使用できる。また, 衛星画像から熱源の一つである火山の存在や熱水の通り道となる地質構造を解析することが可能である(Yamaguchi *et al.*, 1992)。以下ではこれらの地域の衛星画像から得られた地質構造について述べる。各地域で採取された温泉水の分析値や現地の写真などについては本誌の高橋ほか(1998)を, 本共同研究の概要については同じく本誌の村岡ほか(1998)を参照されたい。

2. JERS-1衛星の特徴

JERS-1は1992年2月11日に日本が打ち上げた地球観測衛星である(山口ほか, 1992)。JERS-1はSARと呼ばれるマイクロ波センサとOPSと呼ばれる光学センサを搭載している。

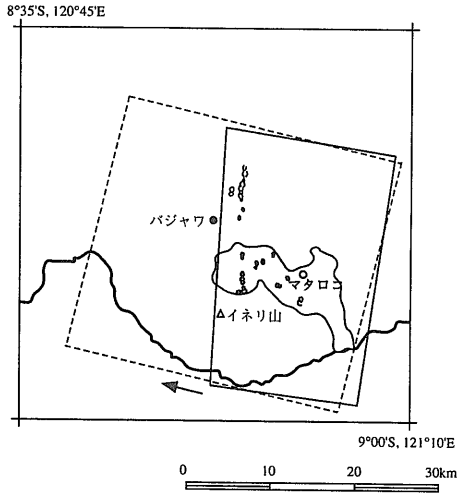
SARは自らマイクロ波を地表に照射し, その反射強度を観測するものであるが, 夜間や雲がかかっている場合でも地表を観測することができる。SAR画像は, 光学センサによる画像と比較して地形起伏を強調するため, 地質構造の解析に有効である(山口ほか, 1985)。図2にマタロコ地域のSAR画像を示す。中央部下側のイネリ火山は右側に倒れ込んで見えるように見えるが, これは標高の高い地点の位置がマイクロ波照射方向(第1図の矢印の方向)の反対方向に移動するというSAR画像特有の現象(フォワーショートニングと呼ばれる)のために生じた幾何学的歪みであり, 実際にはほぼ円錐形の火山である。また, マイクロ波照射方向に向いた

1) 地質調査所 環境地質部

2) 地質調査所 地殻熱部

3) インドネシア火山調査所 地熱研究部

キーワード: JERS-1, SAR, OPS, インドネシア, ヌサテンガラ・チムール, 地熱資源



第1図 マタロコ地域の地質構造。●：地方都市，○：予察調査実施地域，△：山頂，←：マイクロ波照射方向，δ：火口，太線：海岸線，点線の四角：SAR画像の範囲，実線の四角：OPS画像の範囲，山頂や火口の位置はSAR画像上の位置であるため地図上の位置とは異なる。

斜面はマイクロ波の反射が大きいため明るく見える。逆に反対の方向を向いている斜面は暗く見える。このようにSAR画像には光学センサには見られない特徴があるので、SAR画像を解釈する場合には注意が必要である。

一方、OPSは太陽に照射された地表の明るさを、7つの異なる波長で観測する。このため、夜間や雲がかかっている場合は地表を観測することはできない。OPSのバンド1, 2, 3をそれぞれ青, 緑, 赤に割りあてたマタロコ地域のOPS画像を口絵3に示す。植物は近赤外域の光を強く反射するため、赤く見える。白く見える地域は裸地、黒く見える地

119°E, 7°S



第2図

ヌサテンガラ・チモール地域の地熱有望地域。●：地方都市，○：予察調査実施地域，◎：地熱開発地域。

第1表 予察調査を実施した地熱有望地域の位置。座標系はWGS84を使用。

地域名	緯度	経度
ワイサノ	S8° 43.038'	E120° 00.195'
ワイペシ	S8° 23.329'	E120° 29.375'
マタロコ	S8° 50.246'	E121° 03.661'
ワトゥクバ	S8° 30.192'	E123° 32.087'
ブカビティン	S8° 10.336'	E124° 48.446'

域は水田もしくは植物を焼き払った地域であると思われる。太陽高度が71°と高いため起伏の乏しいのっぺりとした画像となっている。

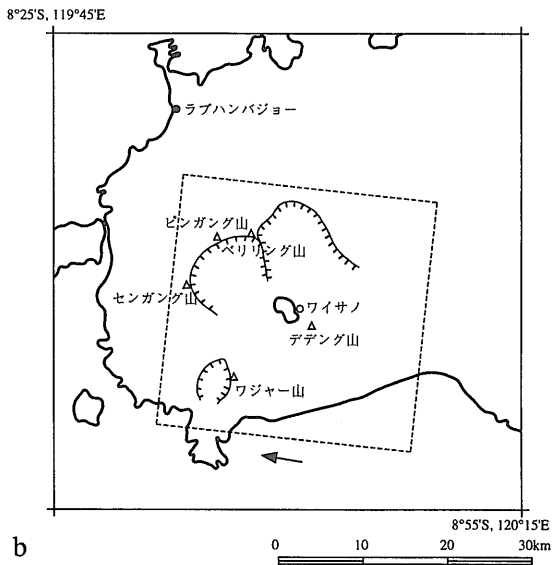
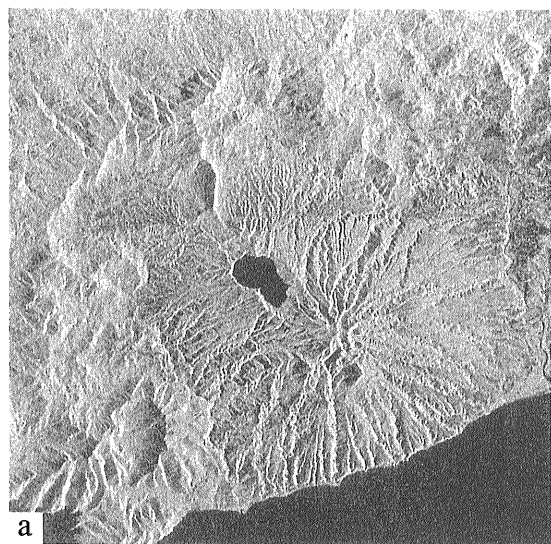
3. ヌサテンガラ・チモール地域の衛星画像

ヌサテンガラ・チモール地域の地熱有望地域として以下の5ヵ所を選定し、97年7月に予察調査を実施した。第2図にこれらの地熱有望地域の位置を示す。SAR画像はすべての地域で入手することができたが、雲のないOPS画像はマタロコ地域でしか入手できなかった。

GPS受信機 (Trimble Navigation 社製 ENSIGN GPS) で測定した各地域の位置を第1表に示す。しかし、これらの位置は既存の25万分の1地形図上の位置から数100mずれている場合がある。これは、地形図で採用されている座標系とGPSの座標系 (今回はWGS84を使用した) が異なるためだと考えられる。

3.1 ワイサノ地域

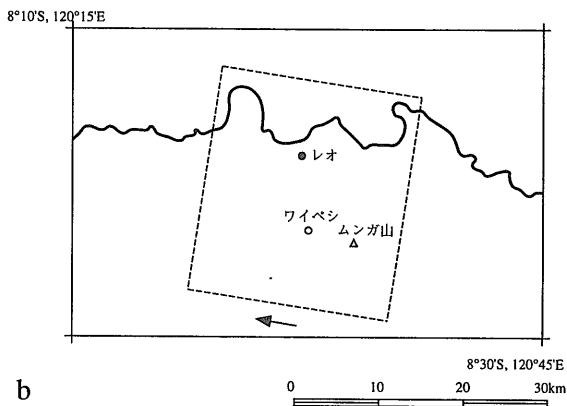
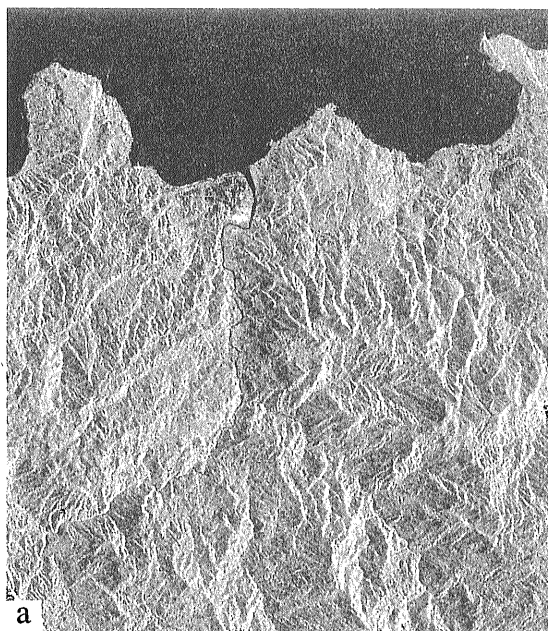
ワイサノ地域はフローレス島の西海岸の港町ラブハンバジョウの南東28kmに位置する (第3図b)。第3図aにワイサノ地域のSAR画像を示す。ワイサノ



第3図 ワイサノ地域の衛星画像。(a) 1996年2月4日に撮影されたSAR画像 (Copyright MITI/NASDA, Data provided by ERSDAC). (b) ワイサノ地域の地質構造。●：地方都市，○：予察調査実施地域，△：山頂，←：マイクロ波照射方向，(---)：陥没地形，太線：海岸線，点線の四角：SAR画像の範囲。

は、デデング山の北西側山腹，北西-南東の長さが約2km，幅1.5kmの火口湖の南東岸にある。ワイサノ地域の北西にはベリリング火山，ピンガング火山およびセンガング火山に囲まれた直径約9kmの陥没地形およびその東側に同様の規模の陥没地形が見られる。また，ワイサノ地域の南西約15kmには直径約4kmのワジャー火山の陥没地形が見られる。

ワイサノ湖の南東湖岸にはいくつかの温泉が湧出しているほか，酸性変質帯やシリカシンターが見られる。その温泉の一つは83.9℃の間欠泉であり，村人の話では1日3回，50cm程度吹き上げるとのことであったが，この温泉水の地化学温度は231.8℃と求められた(高橋ほか，1998)。



第4図 ワイペシ地域の衛星画像。(a) 1996年2月4日に撮影されたSAR画像 (Copyright MITI/NASDA, Data provided by ERSDAC). (b) ワイペシ地域の地質構造。●：地方都市，○：予察調査実施地域，△：山頂，←：マイクロ波照射方向，太線：海岸線，点線の四角：SAR画像の範囲。

3.2 ワイペシ地域

ワイペシ地域はフローレス島西部の地方都市レオの北約25km, レオの南約10kmに位置する(第4図b). ワイペシ地域の周辺には, 東約6kmに標高1,122mのムンガ火山があるほかには, SAR画像から火山地形を読み取ることはできない(第4図a).

ワイペシ地域では76.8℃と89℃の2ヶ所の温泉湧出が見られた.

3.3 マタロコ地域

マタロコ地域はフローレス島中央部の地方都市バジャワの東南東約10kmに位置する(第1図). マタロコ地域の周辺には火口の直径が1km以下の単成火山が多数存在することがSAR画像からわかる(口絵2). これらの単成火山の一部は南北方向に並んでいる. また, 火口の形が南北方向に長軸を持つ楕円形であるものも多い. 第1図でハッチを掛けた部分は, 新しい堆積物で覆われた地域と考えられるが, この地域の地下に比較的古い火山地形が埋没している可能性がある. マタロコの西約13kmには標高2,130mのイネリ火山がある.

OPS画像口絵3では標高の高い地域ほど赤く見える. これは, 標高の高い地域ほど雨量が多いた

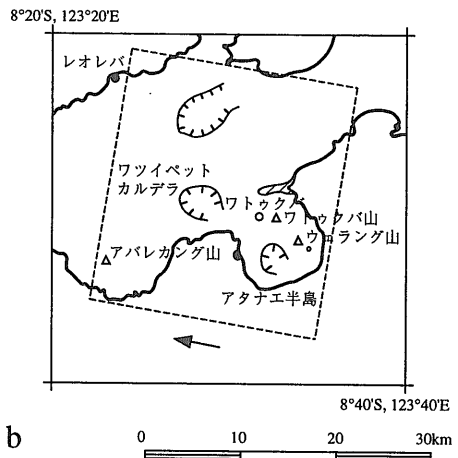
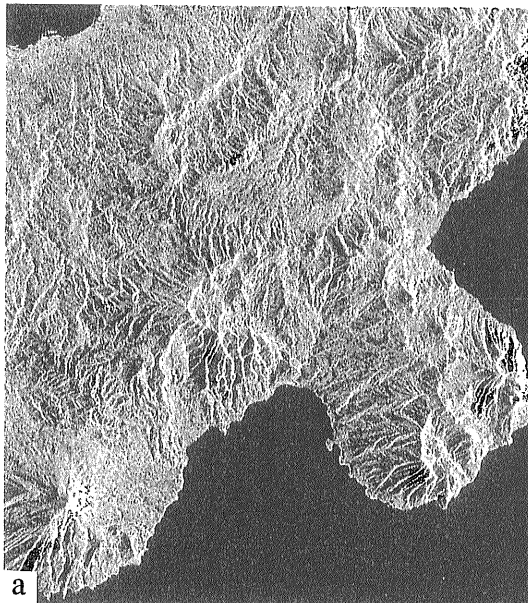
め植物が密に繁茂しているためであると考えられる. マタロコ近傍のOPS画像には東西400m南北200m程度の広さの植物密度が小さい地域が見られる. これはマタロコの噴気地帯に関連する変質帯であると思われる.

マタロコの噴気地帯では90℃以上の温泉水が採取された.

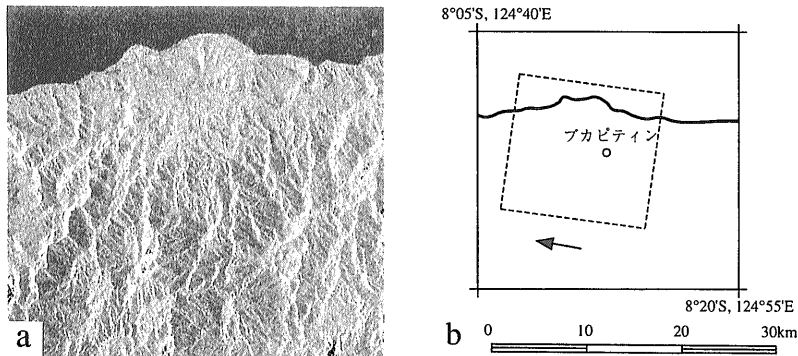
3.4 ワトゥクバ地域

ワトゥクバ地域はレンバータ島の南部のアタナエ半島にあるワトゥクバ火山の西に位置する(第5図b). ワトゥクバ地域の西約5kmには直径約4kmのワツイベット・カルデラ(村岡, 1989)が見られる(第5図a). ワトゥクバ地域の南約5kmには直径約2kmの陥没地形が, 南東約5kmにはウェラング火山が見られる. ウェラング火山の南東斜面には直径約300mの新しい火口が見られる. この火口付近の植生は噴火のために失われ, まだ回復していないことがSPOT衛星画像からわかる(村岡, 1989). また, SAR画像でははっきりしないが, SPOT衛星画像ではアタナエ半島の付け根部分に大規模な地すべりの跡が見られる.

ワトゥクバ地域の噴気地帯では, 地温が40℃以



第5図 ワトゥクバ地域の衛星画像. (a) 1995年6月23日に撮影されたSAR画像 (Copyright MITI/NASDA, Data provided by ERSDAC). (b) ワトゥクバ地域の地質構造. ●: 地方都市, ○: 予察調査実施地域, △: 山頂, ←: マイクロ波照射方向, δ: 火口, (〰): 陥没地形, 斜線: 地すべり跡, 太線: 海岸線, 点線の四角: SAR画像の範囲.



第6図 ブカピティン地域の衛星画像。(a) 1995年2月9日に撮影されたSAR画像 (Copyright MITI/NASDA, Data provided by ERSDAC). (b) ブカピティン地域の地質構造。○：予察調査実施地域，←：マイクロ波照射方向，太線：海岸線，点線の四角：SAR画像の範囲。

上の地域が70m×20mに亘って広がっていたが，温泉水を採取することはできなかった。

3.5 ブカピティン地域

ブカピティン地域はアロール島中央部の北側に位置する(第6図b)。地質図(Noya *et al.*, 1991)によれば，ブカピティン地域には更新世の火山岩類が分布するとのことであるが，SAR画像(第6図a)からは目立った火山地形を確認することはできなかった。

ブカピティン地域では数ヵ所で温泉が吹き上げていた。吹き上げる高さが5mに達するものもあった。

4. まとめ

JERS-1の画像は今回の予察調査を実施するにあたって，火山地形の判読，変質帯の抽出，地形図の代替などにおいて役に立った。SARデータはほとんどの地域で入手可能であるが，インドネシアのように雲がかかりやすい地域では，JERS-1衛星が打ち上げられてから5年以上経過していても，雲の掛かっていないOPSデータを入手することは容易でなかった。

1998年6月にはASTER(Yamaguchi *et al.*, 1993)と呼ばれるセンサがEOS-AM1衛星に搭載されて打ち上げられる。ASTERは地表の温度を観測できるため，地熱地帯の熱異常を抽出できる可能性がある。

謝辞：財団法人資源・環境観測解析センター(ERSDAC)には，地質調査所との「JERS-1データによるインドネシア地熱資源評価に関する共同研究」に基づき，本研究で使用したすべてのJERS-1データを地質調査所に提供して頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 村岡洋文(1989)：南海の小スンダ列島に地質と金鉱を探る。地質ニュース，no.423，35-42。
- 村岡洋文・アズナヴィア ナスティオン・浦井 稔・高橋正明(1998)：インドネシア・日本による「遠隔離島小規模地熱の探査に関する研究協力」の開始。地質ニュース，no.521，34-48。
- Noya, N., Burhan, G. and Koesoemadinata, S. (1991)：Geological map of the Alor and West Wetar quadrangle, Nasutenggara (1:250,000), Geological Research and Development Centre.
- 笹田政克・高橋正明(1996)：インドネシアの地熱資源—とくに東部地域における今後の探査に関連して—。地質ニュース，no.502，54-58。
- 高橋正明・村岡洋文・浦井 稔・アズナヴィア ナスティオン(1998)：インドネシア東部島地域の熱水系。地質ニュース，no.521，54-64。
- 山口 靖・村岡洋文・長谷絃和(1985)：レーダーで見た日本の地形・地質。地質ニュース，no.373，14-24。
- 山口 靖・津 宏治・浦井 稔・佐藤 功・宮崎芳徳(1992)：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)，343-348。
- Yamaguchi, Y., Hase, H. and Ogawa, K. (1992)：Remote sensing for geothermal applications. Episodes, 15 (1)，62-67。
- Yamaguchi, Y., Tsu, H. and Fujisada, H. (1993)：Scientific basis of ASTER instrument design. SPIE Proceedings, 1939，150-160。
- URAI Minoru, MURAOKA Hirofumi, TAKAHASHI Masaaki and NASUTION Asnawir (1998)：JERS-1 Satellite Images of Promising Geothermal Fields in the Nusa Tenggara Timur, Indonesia.

<受付：1997年12月12日>