

モホス平原の水域の抽出とその空間分布

宮坂 春規* 岡田 尚樹**
今井 厚太*** 小川 進**

キーワード：アマゾン、画像処理、南米考古学、リモートセンシング、JERS-1

1. はじめに

考古学研究において野外調査、とりわけ発掘調査が重要である。しかし、一度調査された遺跡は再発掘によって同じ状況を再現できるものではなく、発掘調査もまた遺跡の破壊行為となる^[1]。したがって、事前の入念な調査を経て、最適と判断した遺跡と調査地点とが決定される。考古学研究において衛星データは、1972年にナスカの地上絵が観測されてから、デジタル画像処理技術の向上に伴い、遺跡の探査に用いられている^[2]。また、現地調査に先立つ概査マップも衛星データをもとに作られている。

本研究の目的は、リモートセンシングを用いることにより事前の調査を短時間で効率的に行い、広範な土地に数多く点在する遺跡の中から発掘調査に最適な遺跡の決定を検討することにある。

本研究の対象地はボリビア北部のモホス平原である。平原には数多くの人造湖（図1）が散在しており、その数は2000箇所以上ともいわれる^[3,4]。この人造湖には治水、利水、魚介の養殖などに利用されていたと考えられており、人間生活と密接に関係していたと推測できる。またその機能から、人造湖と居住地は互いに近隣に存在していたとも推測できる。本研究では発掘調査に最適な遺跡の決定の検討のために、この点在している人造湖を衛星画像から抽出し、その分布の重心を算出することにより、モホス文明の中心地として、発掘調査の適地とした。すなわち、文明の中心地ならば発掘時に得られる情報の質、量ともに良好であると期待され、発掘に適した調査地点といえる。また、湖の水源である河道も抽出し、人造湖の分布との関連性も見た。



図1 モホス平原の人造湖

2. 研究対象地および使用データ

2.1 モホス平原

モホス平原はボリビアの広大な熱帯低地である。ここには、ベニ川、マモレ川、グアボレ川という3つの大きな河川が流れている。ベニ川は平原の西側、マモレ川は中央、ブラジルとの国境のグアボレ川は東側を流れている。モホス平原は巨大な氾濫原であり、雨季になるとマモレ川を中心に多くの地域が氾濫する。

2.2 モホス文明

モホス平原に栄えたとされるモホス文明は、高度な土木技術・水利技術を持っていたとされる。その起源は数千年前に遡り、その痕跡と思われるロマ（人工の丘）、ロマ同士を繋ぐテラプレ（道路）、運河跡、耕作地跡、そして人造湖が多数存在している。これらは平原全体からアマゾン熱帯雨林内部にまで分布している。ロマは雨季の水害から古代人が身を守るために造られた人工的な丘陵であり、古代人はその上で生活していたと考えられ

* 東京大学大学院農学生命科学研究科

** 東京大学空間情報科学研究センター

*** 東北大学大学院農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター

ている。また、発掘調査では、土器に加え人骨も発見されていることから、墓地としても使用されていたと考えられる。テラレンもまた雨季の水害に備え盛土されたものであり、ロマ同士を繋ぐ道路として機能し、テラレンに併設された水路は交通網、農業用水路として機能していたと推測されている。

2.3 人造湖

人造湖はこの地域に2千箇所以上も存在するとされ、多くがほぼ北東-南西を向いており、長方形や、アヒルの足型と言われる形状のものである。湖の中心部は広範囲に2m前後の一定水深を示している。この湖は自然の湖では考えられないほど、水深が一定している。また、湖岸から非常に滑らかに水深が変化している。湖岸は堤防のようにわずかに盛り上がっていて、湖の周囲を囲んでいる。人造湖は治水、乾季の水の確保、魚介類の養殖に使用されていたと推測されている。

2.4 使用データ

本研究で使用したデータは、JERS-1/SARのPath 412 - 425, Low319 - 329の約700km × 1000kmの136シーンである。図2に研究対象範囲を示す。

SARの原画像にはスペckルノイズと呼ばれるノイズが含まれているが、SARは能動的なセンサなので太陽光を必要としない^[5]。このため季節、昼夜、時間を問わず安定した観測が可能である。また、SARで用いているマイクロ波は大気の透過率が高く、雲の影響もほとんどないので、全天候型のセンサとして用いることができる。従来のリモートセンシングでは観測の難しかった晴天率が低い赤道近くの熱帯の観測も可能である。また、作物成長モニタのように季節的な変動データが必要な場合も、SARがあれば雲の影響で周期的観測ができない可視、近赤外データを補間することもできる。

前処理として、画像のサイズを縦、横それぞれ1/2に間引きした。

図3に解析対象地のSAR画像に前処理を施した画像を示す。



図2 研究対象地

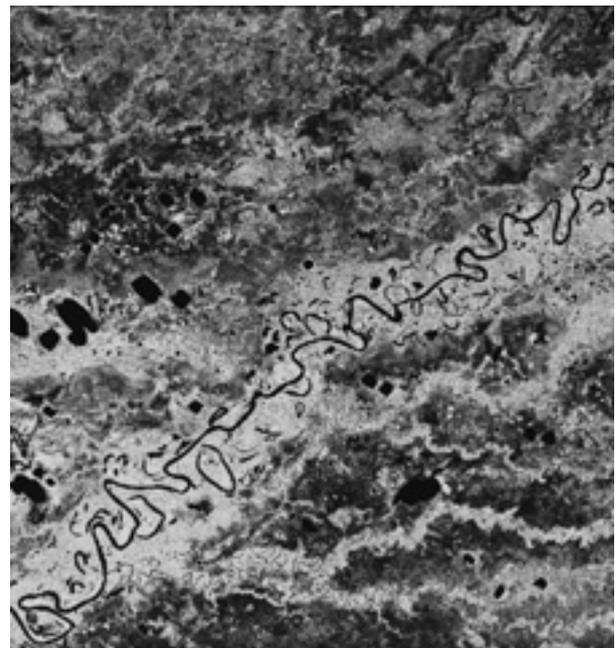


図3 対象地のSAR画像

3. 方法

3.1 人造湖の抽出

SAR原画像に含まれているスペckルノイズを軽減し、2値画像を作成した。2値画像のノイズを収縮・膨張処理により減少させ、特徴量から湖を抽出し、最終的に目視により人造湖の抽出を行った。

図4に本研究で用いた人造湖抽出の処理手順を示す。

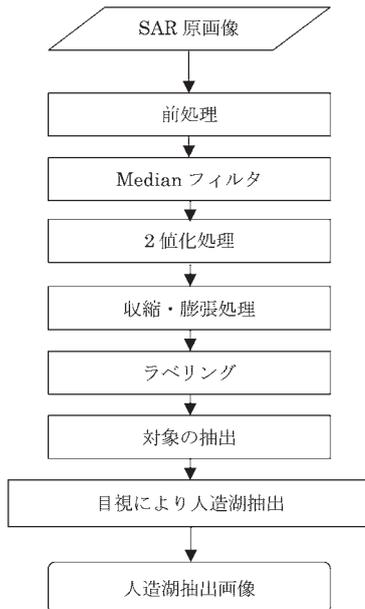


図4 人造湖抽出の処理手順

3. 1. 1 スペックルノイズの軽減

スペックルを軽減するには、Median フィルタや Lee フィルタ等のさまざまな方法が提案されている。Median フィルタは、局所領域でのメディアン（中央値）を出力する。濃淡画像において、エッジなどの画像の重要な情報をそこなくなくノイズをとり除くことができる。

本研究では、 3×3 ウィンドウで Median フィルタを適用し、スペックルノイズの軽減を行った。

3. 1. 2 2 値化処理

画像全体の画素値の平均を算出し、その0.4~0.6倍の値を閾値として2 値化処理を行った。

3. 1. 3 収縮・膨張処理

ノイズの除去として、収縮処理を3回、膨張処理を8回、そして収縮処理を5回繰り返し行った。

3. 1. 4 ラベリング、対象の抽出

次にラベリングを行い、各対象の特徴量（面積、周囲長、SF2）を求め、面積1000pixels 以上かつ SF2が25以下の対象を湖として抽出した。

3. 1. 5 人造湖抽出

目視により、SAR 原画像と照らし合わせ、ノイズを削除し、長方形、アヒルの足形といった人造湖に特有の形から人造湖を判別し抽出した。

河道はその川幅から蛇行の形態に違いが生じる。したがって、抽出の際に用いる特徴量も異なるので、川幅の大小で2つにわけそれぞれ抽出し、最後に合成した。図5に本研究で用いた河道網抽出の処理手順を示す。

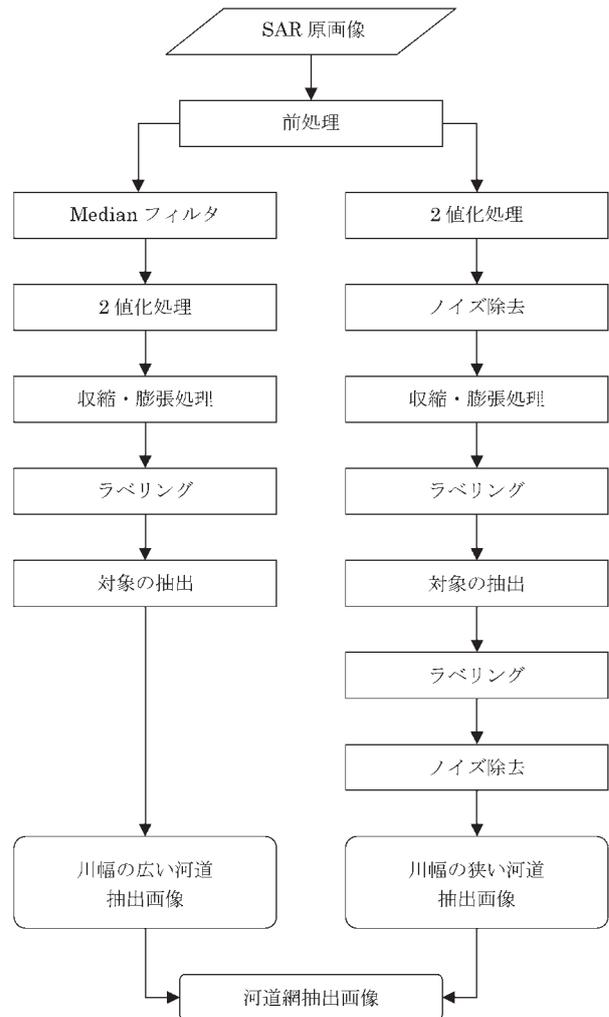


図5 河道網抽出の処理手順

3. 2 川幅の広い河道の抽出

前処理された画像を2 値化し、ノイズを収縮・膨張処理によって除去した。その後ラベリングを行い川幅の広い河道を抽出した。

3. 2. 1 スペックルノイズの軽減

本研究では、 3×3 ウィンドウで Median フィルタを適用し、スペックルノイズの軽減を行った。

3. 2. 2 2 値化処理

本研究では、 3×3 ウィンドウで Median フィルタを適用し、スペックルノイズの軽減を行った。

3. 2. 3 収縮・膨張処理

ノイズの除去として、収縮処理を1回、膨張処理を3回、収縮処理を4回、そして膨張処理を2回繰り返し行った。

3. 2. 4 ラベリング、対象の抽出

ラベリングを行い、各連結成分の密度を算出し、密度が0.12以下の対象を抽出した。

ここでの密度とは、連結成分の面積を、その連結成分

に外接する矩形の面積で割ったものとした^[6]。

図6では、外接する矩形の面積が48pixelsであり、連結成分の面積が13pixelsであるから、密度は0.27となる。

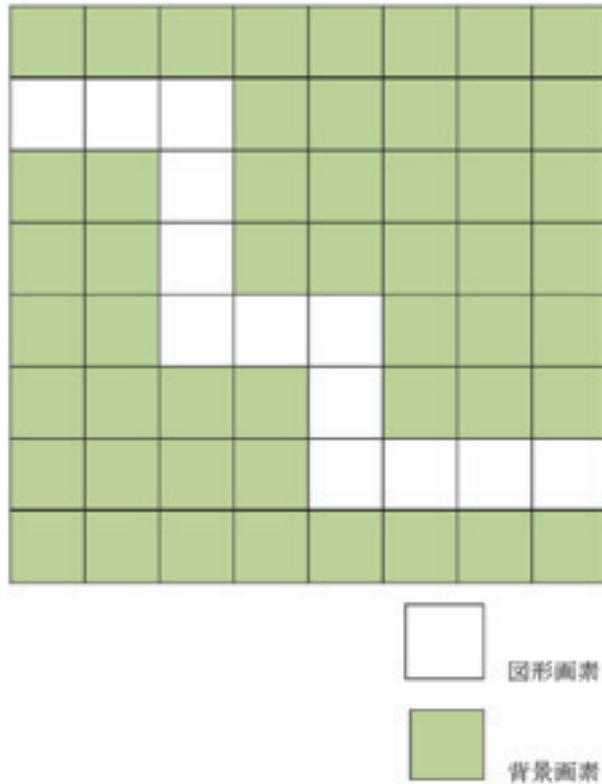


図6 密度の算出例

3.3 川幅の狭い河道の抽出

前処理された画像に2値化処理を行い、ノイズを除去し、対象の連結性を高めるために収縮・膨張処理を行った。ラベリング後、さらにノイズを減らし、川幅の狭い河道の抽出とした。

3.3.1 2値化処理

21×21ウィンドウで分散を算出し、平均値から標準偏差を引いた値を閾値として、2値化処理を行った。

3.3.2 ノイズ除去

ノイズを除去するために、孤立点除去を行い、さらに3×3ウィンドウ中に4個以上の図形画素がなければノイズとして削除する処理を行った。

3.3.3 収縮・膨張処理

連結性を高めるために、収縮処理を4回、膨張処理を2回繰り返した。

3.3.4 ラベリング、対象の抽出

ラベリングを行い、各対象の特徴量(面積、周囲長、SF2)を求め、しきい値として面積1300pixels以上かつSF2の値が30以上の対象を抽出した。

3.3.5 ラベリング、ノイズ除去

さらにノイズを除去するためにラベリングを行った。ノイズは河道に比べ、離散的に存在するので、面積2800pixels以下の対象に対し、50pixels以内に別の対象がなければその対象をノイズとし、除去した。

最終的に残ってしまうノイズは目視により除去し、川幅の狭い河道の抽出を行った。

3.4 人造湖分布の重心の算出

人造湖を抽出した画像を幾何補正し、モザイク処理を行った。データサイズを小さくするためにモザイクした画像をリサイズし、各人造湖の重心を算出し、人造湖分布の面積の重みつき重心を算出した。

ラベリング

計算機上では、連結成分ごとに区分された記号(ラベル; label)を各画素に入れた画像によって個々の連結成分を区別する。これをラベル画像と呼ぶ。入力の2値画像からラベル画像を生成する処理をラベリングと呼ぶ。

ラベリングアルゴリズムの構成

基本的考え方として、以下の2方式がある。

- (i) ラスタ走査を前提として、1 - 画素に走査の進行方向と一致させてラベルを順に伝播していく方式(逐次型アルゴリズム)。
- (ii) 適当な初期画素を選び、そこに適当にラベルを与えた後そのラベルを隣接する全1 - 画素に伝播していく方式(並列型アルゴリズム)。

本研究の処理では上記の(i)を使用している。

SF2

SF2とは、物体の凹凸度を示す特徴であり、以下の式で求められる特徴量である^[7]。

$$SF2 = \frac{PERI}{AREA} \frac{(PERI)^2}{AREA} \times \frac{1}{4\pi} \quad (1)$$

ただし、AREAは面積、PERIは周囲長である。

4. 結果

4.1 人造湖抽出の結果

抽出された人造湖を図7に示す。136シーンの画像で人造湖を258点、それ以外の湖を220点抽出できた。対象地域全体の人造湖および河川の抽出画像を図8に示す。

人造湖は、対象地中央を流れるマモレ川に沿うように

南北に数多く確認できた。面積の大きい人造湖はマモレ川上流およびベニ川付近に分布している。グアボレ川北

側のブラジルでは人造湖は確認できず、ベニ川西側ではわずかに確認できた (図9、図10)。



図7 抽出した人造湖

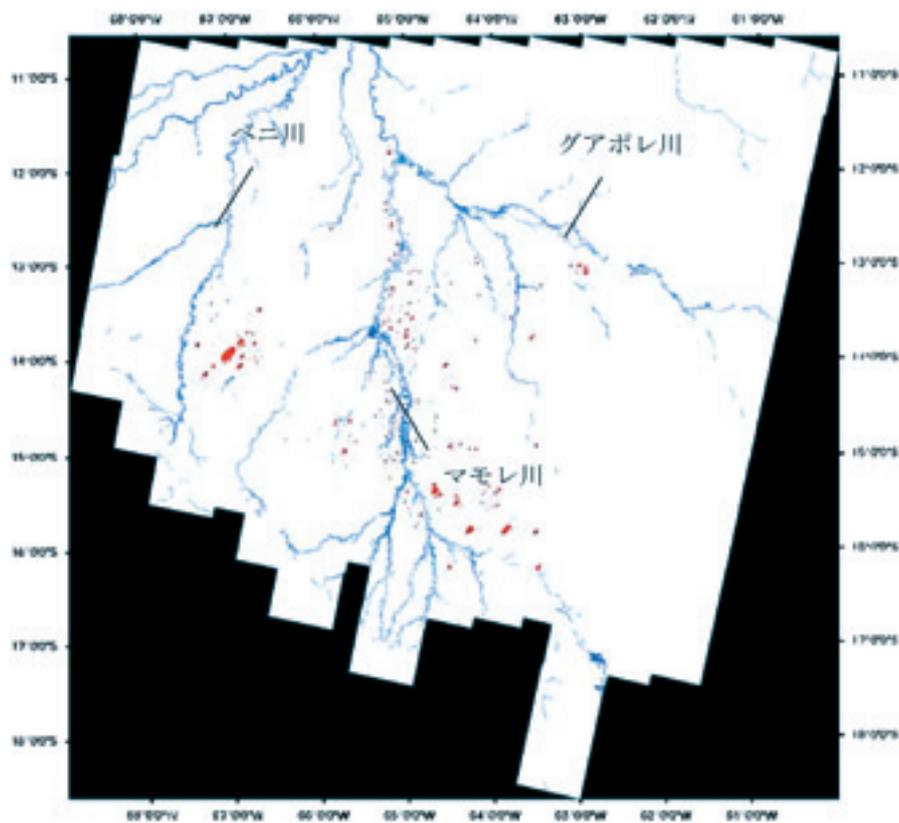


図8 136シーンの抽出結果

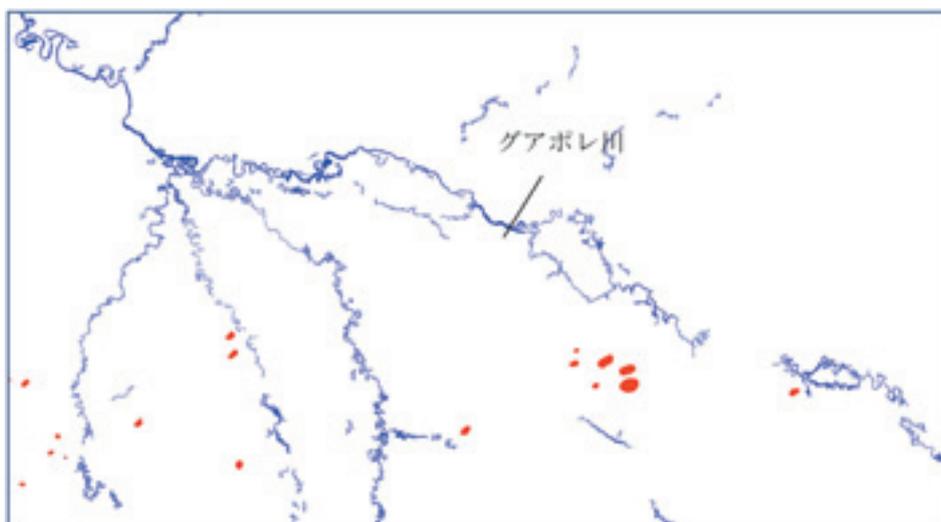


図9 グアボレ川とその周辺

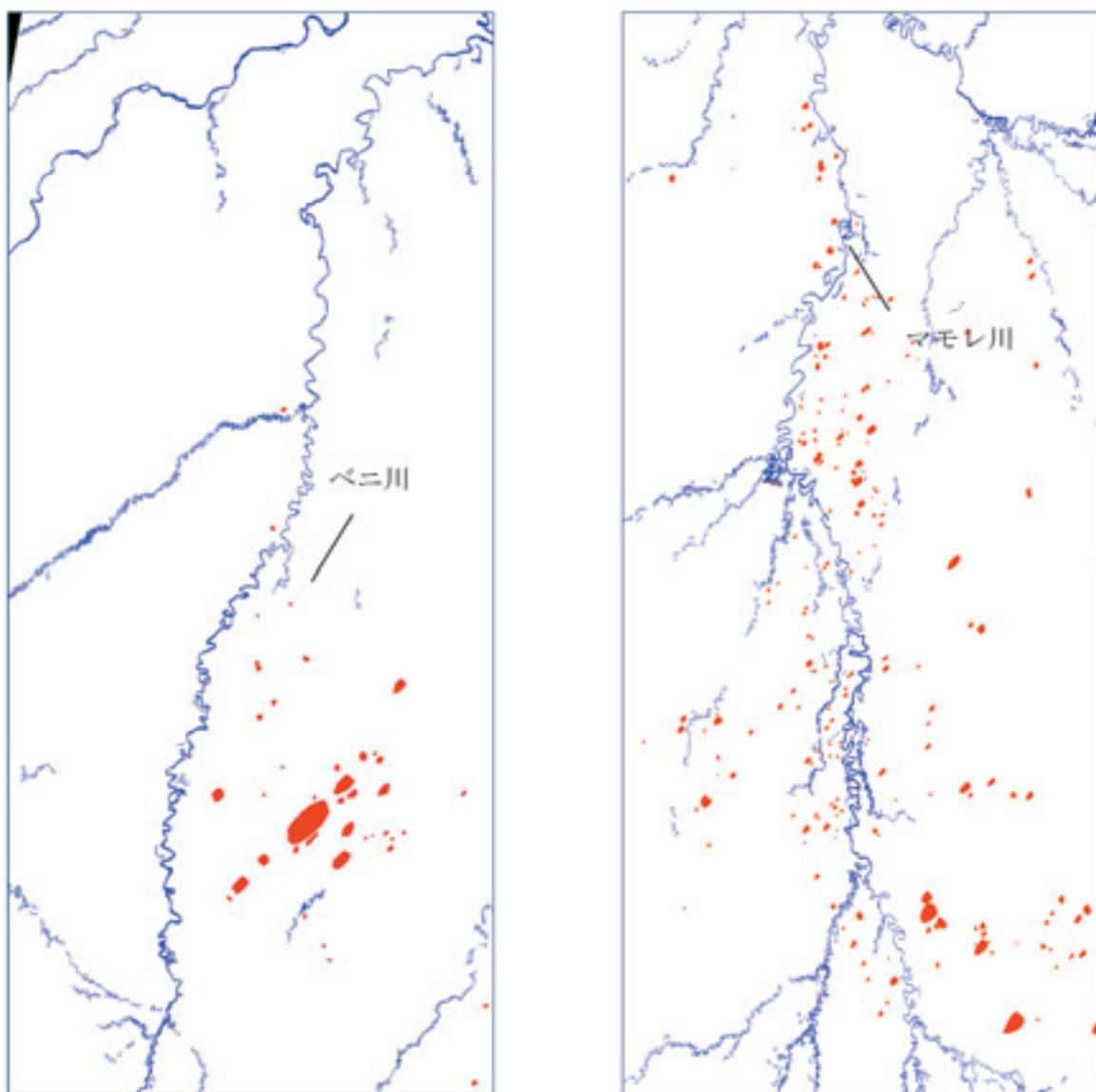


図10 ベニ川 (左) およびマモレ川 (右) とその周辺

4.2 河道網の抽出

河道の抽出結果を図11に示す。太い河川は精度よく抽出できたが、細い河川は部分的に途切れる個所が数多く生じた。

4.3 人造湖分布の重心の算出結果

図12に人造湖分布の重心を示す。人造湖分布の重心は現在のボリビア・ベニ州の州都トリニダードから北西に約60km、南緯14度25分、西経65度15分を示した。

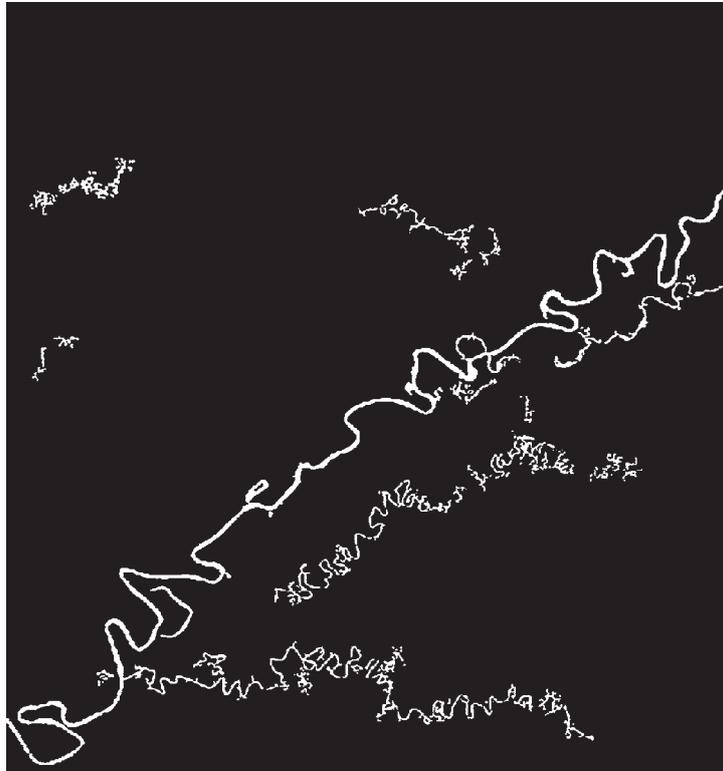


図11 抽出した河道網

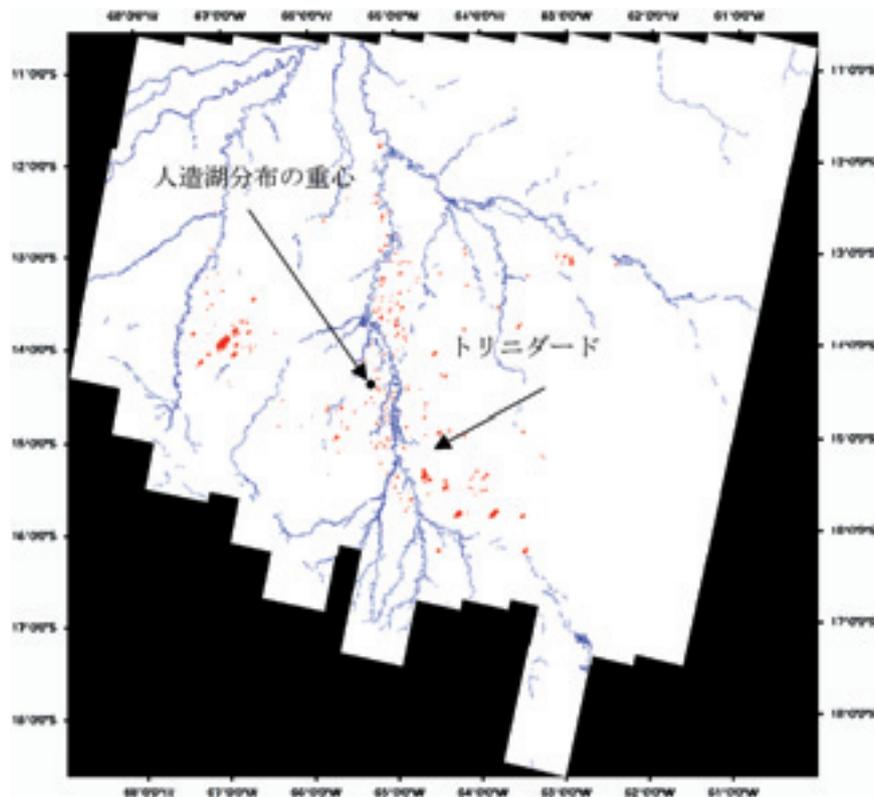


図12 人造湖分布の重心位置

5. 考 察

人造湖の分布状況を得るための衛星画像からの人造湖の抽出では、黒い特徴として表れた人造湖の大部分を抽出できた。

今回の処理で抽出できなかった湖は、図13に示すような周囲の画素値が低いものであった。湖が膨張処理により周囲の画素と連結し、凹凸係数が大きくなったことにより抽出できなかったと考えられる。

川幅の広い河道はうまく抽出できた。これは、河道、湖などの水域ではマイクロ波が鏡面反射を起こし暗い特

徴として表れる SAR の特徴のために、陸域と水域を区別し易いことによる。一方、川幅の狭い河道では十分に暗くなっていない箇所の抽出は困難であった。

また、河道を人造湖とともに抽出したことによって、モホス平原における人造湖分布の特徴を確認することができた。人造湖が分布している地域はマモレ川を中心とした氾濫原と重なる。このことから、人造湖は洪水に依存していたと考えられる。

発掘適地については、現存するロマ、テラプレンなど土木構造物のネットワークも抽出することで、別な結果が期待されると考えられ、今後の課題としたい。

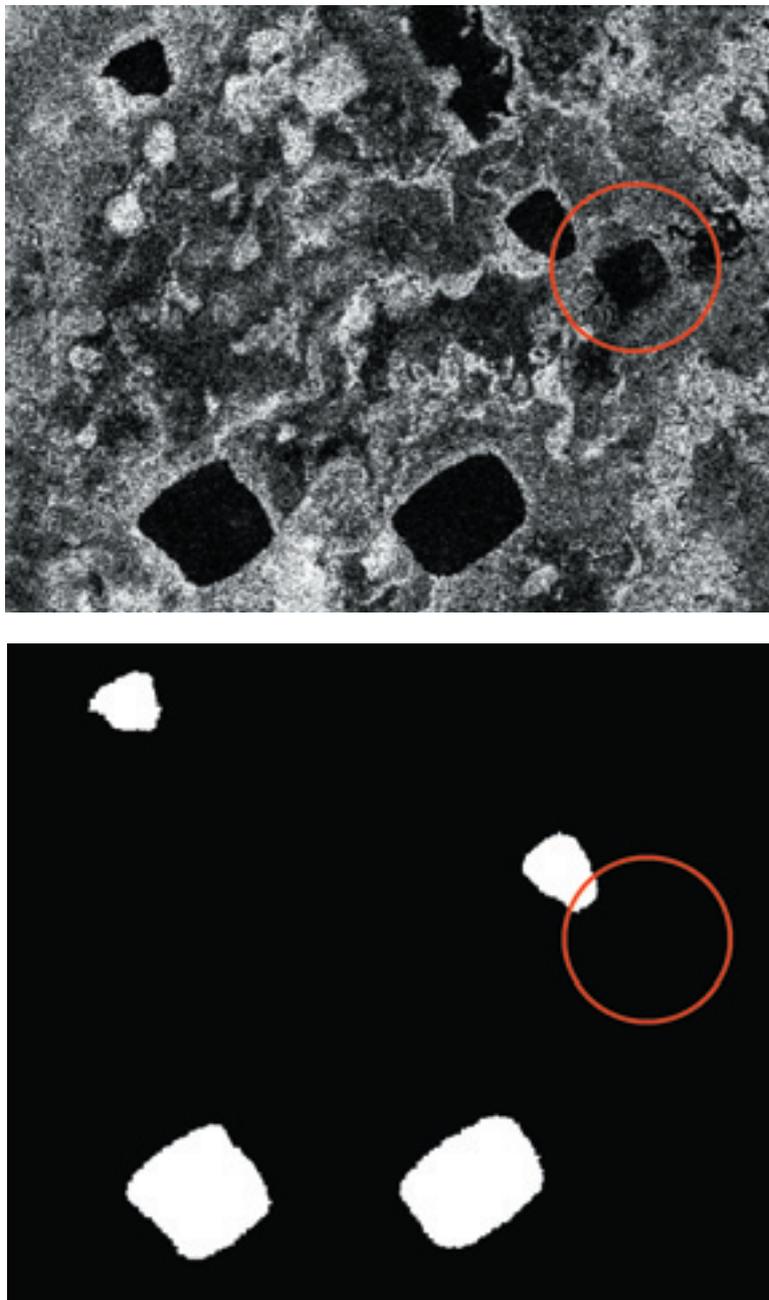


図13 抽出できなかった人造湖

6. 結 論

本研究は、広範な土地に数多く点在する遺跡の中から発掘調査に最適な遺跡の決定の検討のための事前の調査をリモートセンシングを用いることにより、短時間で効率的に行うことを目的とした。本研究では衛星画像から人造湖を抽出し、重心を算出した。結論を以下に示す。

1. SAR 画像を 2 値化し、特徴量から湖を識別した結果、衛星画像上に暗い特徴として表れている人造湖の大半を抽出でき、重心を算出することができた。
2. 川幅の広い河道の抽出は良く抽出できた。一方、川幅の狭い河道では十分に暗くなっていない箇所は抽出は困難であった。
3. 河道網の抽出も行ったことにより人造湖の分布の特徴を確認できた。このことから、人造湖の分布する地域は氾濫原と重なることがわかった。したがって、人造湖は洪水に関係していたと考えられる。

今後の課題として、衛星データを使ってロマおよびテラプレンの抽出を行い、文明全体を土木構造物のネットワークから把握し、発掘調査地点の選定の検討をしたい。それには、地形図、標高データ、ALOS の可視、近赤外、SAR 等を総合的に評価するアルゴリズムの開発が必要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、関係諸氏には資料提供およびプログラムの便宜をいただいた。厚くお礼申し上げたい。

参考文献

- [1] 岩崎卓也ほか, 考古学調査・研究ハンドブック 1, 雄山閣, 1998.
- [2] 坂田俊文, 宇宙考古学 - 人工衛星で探る遺跡と古環境, 丸善ライブラリー, 2002.
- [3] 実松克義, 衝撃の古代アマゾン文明 - 第五の大河文明が世界史を書きかえる, 講談社, 2004.
- [4] 今井厚太, SAR による南米古代文明の復元, 立正大学地球環境科学部平成18年度卒業論文, 2007.
- [5] 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 東京電機大学出版局, 2004.
- [6] 岡田尚樹ほか, SAR による古代アマゾン文明の人造湖および水路網の抽出, 日本リモートセンシング学界第42回学術講演会論文集, 2007.
- [7] 高木幹雄ほか, 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2004.

要 旨

ボリビアのモホス平原にはモホス文明とよばれる古代文明の遺構である人造湖が多数点在している。人造湖の機能は治水、利水、魚介の養殖にあったと考えられており、人間生活との密接な関係が示唆される。その機能から、人造湖と居住地は互いに近隣に存在していたとも推測できる。そこで本研究では SAR から人造湖および河道を抽出し人造湖の分布の重心を特定することにより、モホス文明の中心地として、発掘に最適な調査地点を選択した。136シーンの SAR から大半の人造湖は抽出でき、人造湖の分布と河道との関連性も確認できた。その結果、発掘調査の予備調査として調査地点の検討を行うことができた。

Abstraction of Water Area and Spatial Distribution of That in the *Mojos* Plain

Haruki MIYASAKA^{*}, Naoki OKADA^{*}, Kohta IMAI^{**}, Susumu OGAWA^{*}

^{*} University of Tokyo

^{**} Tohoku University

Abstract: In the *Mojos* Plain, Bolivia, artificial lakes distribute spatteringly as remains in the *Mojos* Culture. The artificial lakes seemed to function as fish cultivation and reservoirs, which related with a human life. Therefore, from its function, artificial lakes and residences seemed to exist in a neighborhood each other. Then, this study abstracted lakes and river systems from SAR images and identified the center in the distribution as the focus of the *Mojos* Culture. Most artificial lakes were abstracted from 136 scenes of SAR images, and the relationship between the artificial lake and the river was confirmed. From the result, the survey site was considered prior to a preliminary survey of the excavation.

Keywords: archaeology, Amazon, image processing, remote sensing, JERS-1