

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

SELENE(かぐや)搭載地形カメラステレオペアデータから得られた数値地形モデル(DTM)ならびに数値標高モデル(DEM)プロダクトの標高値の検証報告

坪内 彩音, 篠田 玲奈, 郭 哲也
後藤 祐紀, 春山 純一, 三宅 亙

2016年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

| | |
|--|---|
| 概要 | 2 |
| 1. はじめに | 2 |
| 2. データと解析方法 | 3 |
| 2.1 SELENE 地形カメラ (TC) ステレオペア画像から得られた DTM と DEM | 3 |
| 2.2 LRRR と ALSEP | 4 |
| 2.3 LRO 狭角カメラ (NAC) | 5 |
| 2.4 標高値検証方法 | 5 |
| 3. 結果 | 6 |
| 4. 考察 | 6 |
| 5. まとめ | 7 |
| 参考文献 | 7 |
| 参照サイト | 8 |

SELENE(かぐや)搭載地形カメラステレオペアデータから 得られた数値地形モデル (DTM) ならびに数値標高モデル (DEM) プロダクトの標高値の検証報告

坪内彩音^{1,2)}, 篠田玲奈^{1,2)}, 郭哲也^{1,2)}, 後藤祐紀^{1,2)}, 春山純一¹⁾, 三宅亙²⁾

by

Ayane Tsubouchi^{1,2)}, Reina Shinoda^{1,2)}, Tetsuya Kaku^{1,2)}, Yuki Goto^{1,2)}
Junichi Haruyama¹⁾, Wataru Miyake²⁾

Abstract

We performed verification of the accuracy of Digital Terrain/Elevation Model (DTM/DEM) derived from the data obtained by the 10m/pixel resolution Terrain Camera (TC) onboard the SELENE (Kaguya), for the locations where the Lunar laser Ranging Retro Reflectors (LRRR) and the Apollo Lunar Surface Experiment Packages (ALSEP) were settled on Apollo missions. We compared the elevations of the locations from TC DTM/DEM with those from long-term laser ranging and very long baseline interferometry (VLBI) measurements published in Davies and Colvin (2000). We identified the locations of LRRRs and ALSEPs using 0.5m/pixel resolution images from the Narrow Angle Camera onboard the Lunar Reconnaissance Orbiter. For the ALSEP locations, the differences between the elevations from TC DTM/DEM and those in Davies and Colvin (2000) exceed dozens of meters. On the other hand, they are within 13 meters for the LRRR locations.

Keywords : SELENE, Kaguya, Terrain Camera, TC, DTM, DEM, elevation, LRRR, ALSEP, LRO, NAC, Moon

* 平成 28 年 1 月 4 日受付 (Received January 4, 2016)

1) 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系

2) 東海大学 工学部 航空宇宙学科

概 要

JAXA が 2007 年に打ち上げた月周回衛星 SELENE (愛称：かぐや)には、高度 100km から 10m/画素の水平解像度でステレオペアデータが取得可能な「地形カメラ：Terrain Camera (TC)」が搭載された。本稿では、その TC ステレオペアデータから作成される数値地形モデル Digital Terrain Model (DTM)/数値標高モデルと Digital elevation Model (DEM)の標高精度の検証を行った結果を報告する。検証は、アポロミッションにおいて月面に設置された Lunar laser Ranging Retro Reflector (LRRR)と Apollo Lunar Surface Experiment Package (ALSEP)の地点について、地上からのレーザ測距や Very Long Baseline Interferometry (VLBI)観測によって得られている標高値と、TC DTM/DEM での標高値とを比較することで行った。TC 画像内の LRRR と ALSEP の位置は、米国探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)に搭載された Narrow Angle Camera (NAC：高度 50km から 50cm/画素解像度)により得られた画像を参照して定めた。その結果、ALSEP 地点では TC DTM/DEM の標高値と、地上からの計測標高値との差が数十mであった。一方、LRRR 地点では、与えられているその標高値差は 13m 以内に収まっていることが分かった。

Keywords：SELENE, かぐや, 地形カメラ, TC, DTM, DEM, 標高, LRRR, ALSEP, LRO, NAC, 月

1. はじめに

天体の地形標高データは、その天体の起源と進化を含む諸相の理解をするために必須のものである。月においては過去に、ルナ計画やアポロ計画において設置された Lunar laser Ranging Retro Reflector (LRRR)についてレーザ測距により^{1, 2)}、また、アポロ計画において設置された Apollo Lunar Surface Experiment Package (ALSEP)については、ALSEP からの送信波の very long baseline interferometry (VLBI)測定により、それぞれの位置の標高データ取得が行われている³⁾。しかし月の場合、裏側は地球から見えないことなどから、全球の地形標高データを得るのが困難であった。初めて月全球の高度データが得られたのは、1994 年に米国が打ち上げた月探査機クレメンタイン衛星に搭載されたレーザ高度計 LIDAR によってであり³⁾、LIDAR 観測データから作られた地形モデル GLTM2 の空間解像度は 2.5° (軌道赤道で、約 70km 相当)、標高精度は 100m程度である⁴⁾。

2007 年 JAXA が打ち上げた月周回衛星 SELENE (Selenological and ENgineering Explorer (SELENE))には、月面の標高値を得ることを目的として、地形カメラ Terrain Camera (TC)

が搭載された⁵⁾。地形カメラにより、衛星高度 100km から 10m/画素のステレオペア画像が取得され、それら画像に対して立体視処理を行うことで、月の全球の標高値データが得られた。地形カメラによる標高値データは、月表面について、陰が多い極地方を除き、カメラ画像の水平位置分解能で密に得られている、という点で、クレメンタイン LIDAR データを元にした地形モデルに対して利点がある。

地形カメラデータから得られた標高値データは、今後、科学的解析にも、また将来の探査計画検討においても使用される機会が、より増していくであろう。従って、得られた標高値データの精度を確認しておく必要がある。これまで、地形カメラデータによる標高値データは、SELENE アーカイブシステムに、登録されている。そこで今回、最新の登録データについて、標高値精度の検証を試みた。その結果を本稿は速報するものである。

2. データと解析方法

2.1 SELENE 地形カメラ(TC)ステレオペア画像から得られた DTM と DEM

SELENE 搭載地形カメラ (Terrain Camera : TC) は、衛星直下視方向から衛星進行方向 $\pm 15^\circ$ の傾斜角をもつ 2 つの望遠鏡から成り、それぞれの望遠鏡に取り付けられた可視域 430-850nm の波長帯をもつ一次元の CCD 検知器によって、プッシュブルーム方式撮像で月面の 2 次元画像を得ることができる⁵⁾。刈幅については三つのモード（月表面から 100km の衛星高度時に、フル 40km, ハーフ 17km, 通常 35km）が用意されており、いずれかの刈幅によって撮像が行われた。また、二本の望遠鏡による斜め前方と斜め後方の「両眼視」撮像をすることにより水平方向解像度 10m/pixel の月面立体視用の「ステレオペア」画像が取得され、取得したペア画像データから、立体視処理を行う事で、標高値データが得られる。

地形カメラで得られた標高値データは、「数値地形モデル Digital Terrain Model (DTM)」または、「数値標高モデル Digital elevation Model (DEM)」と言われる⁶⁾。DTM は、TC のステレオペアから得られた標高値データである。DTM と、ステレオペア画像からの立体処理によって DTM と一緒に作成される正射化画像（オルソ画像）とは、一緒にまとめられた形でアーカイブされており、「DTM/TC オルソ プロダクト : DTM_TCOrtho product」と名付けられている。SELENE の観測期間は約 1 年半にわたり、その間に地形カメラは月面を複数回撮影している。したがって、月面の同一地点について、異なった時期の DTM/TC オルソ プロダクトが複数存在することがある。また、DTM/オルソプロダクトを、全球についてモザイクしたものは、DTM マップ(DTM_map)と TC オルソマップ(TCOrtho_MAP)として登録されている。なお、2015 年 12 月現在、DTM マップは ver2、DTM/TC オルソプロダクトは ver3 である。DTM/TC オルソ プロダクトのほうが、より新しい LRO 高度計データの参照しつつ補正している。今回、DTM マップの標高値検証は行っていない。

TC ステレオペア画像による DTM は、更に、米国探査機 LRO に搭載された高度計データや、SELENE 搭載マルチバンドイメージャデータ（可視域バンドで、20m／画素分解能）^{5,7)}からの DTM により補完された上でモザイクされ、新たなプロダクトとして、データアーカイブサイト（参考サイト[1]）に「SLDEM2013」として登録されている⁶⁾。

ところで地形カメラの二つの望遠鏡システムを同時に運用してステレオペア画像を取得する両眼視観測以外に、一本の望遠鏡システムだけを運用して行う「単眼視」観測も行われた⁵⁾。単眼視観測では、画像はペアとして取得されないため、標高データが得られず、そのため単眼視観測画像について画像周辺部の「見かけの倒れ込み」を補正する正射化（またはオルソ化）が通常できない。しかし、別途標高データがあれば、単眼視観測データは正射化される。そこで SELENE TC チームは、SLDEM2013 を利用して TC 単眼視画像の正射化を行った。SLDEM2013 からの標高データと正射化画像とは、まとめて「DEM/オルソプロダクト；DEM_TCOrtho product」として登録している。ところで、ステレオペアデータでも陰となった部分や輝度が大きく飽和してしまった画像部分については、立体視ができず、従って標高値が得られていなかった。こうした「DTM/TC オルソ プロダクト；DEM_TCOrtho product」の標高データが出来ていなかったものについても、SLDEM2013 により標高データの補完と、画像の正射化が TC チームにより行われている。この際、SLDEM2013 からの標高データと、ステレオペア画像から作成される標高データがつながるように SLDEM2013 の位置がずらされた上で、画像の正射化がなされている。このようにして補完され得られた正射化画像データと標高値データは、「DTM/オルソプロダクト」と同様の対のデータとして「DEM/TC オルソプロダクト：DEM_TCOrtho product」として登録されている。

2.2 LRRR と ALSEP

LRRR とは、月面に置かれた反射板のことで、旧ソビエト社会主義連邦共和国（ソ連）のルノホート 2 号や、アメリカ合衆国（米国）のアポロ 11 号、14 号、15 号のミッションにて設置された^{1,2)}。LRRR に対して、地球上からレーザを照射測定することで、設置地点の絶対位置が決定されている²⁾。

ALSEP とは、自律運用可能な地球物理学的観測ステーションのことで、6 カ所のアポロ着陸点のうち 11 号以外の 5 カ所の着陸点付近に設置されている^{1,2)}。これらからの送信波を、地上で very long baseline interferometry (VLBI) 測定することで、ALSEP の設置点の標高値が得られた¹⁾。Davies and Colvin (2000)¹⁾は、LRRR 測距測定結果とも合わせて、ALSEP 設置点の標高値精度を上げている。

2.3 LRO 狭角カメラ (NAC)

米国月探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)搭載の狭角カメラ Narrow Angle Camera (NAC)は、二本の望遠鏡から構成されており、探査機高度 50km から 0.5cm/pixel の高解像度で月面画像を撮像できるカメラである⁸⁾。二本の望遠鏡は、刈幅を広くするために、立体視用では無い。NAC 画像にはアポロで使用された Lunar Module (LM)やローバの轍などが明らかに写っていることが確かめられる(例えば Wagner et al. (2012)⁹⁾)。本論文の比較地点である LRRR や ALSEP の設置位置も確認できる。

2.4 標高値検証方法

検証は、アポロ 11, 14, 15 号によって設置された LRRR と、アポロ 16 号, 17 号によって設置された ALSEP について行った。LRRR については、Williams(2008)²⁾で、位置標高精度の良い計測結果が得られている。一方、Davies and Colvin (2000)¹⁾内に示された LRRR の標高値は、Williams(2008)でそれと差があることがわかっており、Davies and Colvin (2000)¹⁾の内に示された標高精度が十分でない可能性が高い。実際、後に示すように、結果をみても ALSEP の標高精度は TC データからの標高データと 30m 近く差がある。そこで、今回は、アポロ 16 号と 17 号によって設置された ALSEP の場所についてのみ検証を行っている。

「かぐや(SELENE)データアーカイブ」(参照サイト[1])で公開されている DTM/DEM TC オルソプロダクトデータについて行った。データは、Simple Cylindrical (SC)地図投影法で表示されており、高緯度になるほど画像に歪みが生じる。画像に歪みが生じていると正しく距離の測定ができず、LRRR/ALSEP 地点の緯度経度値や標高値が正確に求められない可能性がある。そこで、使用するすべての画像を Transverse Mercator (TM)地図投影法に変換し解析を行った。

DTM/DEM TC オルソプロダクトのオルソ画像(正射化画像)上の LRRR/ALSEP 地点は、TC オルソ画像と LRO NAC 画像とを計算機モニタ上で重ね合わせて一致させることにより、確定した。この際、Figure 1 に簡易的に示すように大きなクレータのリムの形状を一致させることで LRRR/ALSEP 位置のより正確な一致を図る。そして、定めた LRRR/ALSEP 地点の標高を読み取る。重ね合わせる NAC 画像は Figure 2 のように一部を拡大したものを使用した。

LRRR/ALSEP 地点の水平位置座標は、DTM/DEM TC オルソプロダクトのオルソ画像の 4 隅の各緯度経度データを参照して、画像上で内挿法により決定した。このようにして決定された緯度経度値と、LRRR については Williams (2008)²⁾, ALSEP については Davies and Colvin (2000)¹⁾に示された緯度経度値 (Table 1 に示す)とを比較し、水平方向の緯度経度情報の差異を調べた。

また、DTM/DEM TC オルソプロダクトの「オルソ画像データ」上の LRRR/ALSEP 地点

について、DTM/DEMTC オルソプロダクトの「DTM/DEM データ」から、標高値を求め、この値と LRRR の標高値とを比較して検証を行った。

Figure 3～Figure 42 に、LRRR/ALSEP 地点の DTM/TCO, DEM 両眼, DEM 単眼の各図を示す。それぞれの使用したデータ ID, 中心緯度, 経度, データ取得日については、付録の Table 1～3 にまとめる。これらの図中に書かれている①～③の番号は、重ね合わせを行う際にポイントとして注目したクレータである。この際に重ね合わせた NAC 画像は Figure 43～Figure 47 である。拡大図は、Wagner et al. (2012)⁹⁾を引用した。

3. 結果

以下に、緯度経度および標高の地上からの計測値標高値 (Table 1: LRRR については Williams(2008)²⁾, ALSEP については Davies and Colvin (2000)¹⁾) との差 ($\Delta \phi$: 緯度値の差異, $\Delta \lambda$: 経度値の差異, Δh : 標高値の差異) を Table 2,3 に示す。ここで、TC DTM オルソの標高値は 1m 単位までを、緯度, 経度は、 10^{-6} 度単位までを計測しているが、差異の比較は、標高値は 1m 単位で、緯度, 経度は 10^{-4} 度単位で行った。なお、月の平均半径は 1737.4km としている。

LRRR 設置地点における標高値差 Δh は 13m 以内に収まっている (Table 2,3)。一方、ALSEP 設置地点における Δh は、数十 m オーダであった。

4. 考察

ALSEP 地点については、Davies and Colvins (2000)¹⁾で与えられた標高値と TC DTM/DEM の標高値の差 Δh は数十 m 程度である (Table 2,3)。一方、LRRR 地点における Δh は、13m 以内に収まっていた (Table 2,3)。LRRR 設置地点の標高値の取得にはレーザ測距が用いられているため、精度の高い標高が得られていると考えられる。従って、TC DTM/DEM の標高値は、精度よく求まっているといえる。一方、ALSEP 設置地点の標高は、ALSEP 送信波の VLBI 測定を元にしており、Davies and Colvins (2000)¹⁾によって LRRR の測距データとの総合で標高値の精度向上が図られていたとしても、やはりその精度は、LRRR 設置地点の標高値精度に比べ、必ずしも高いとは言えなかった可能性が高い。TC DTM/DEM の標高値の精度が高いとすれば、ALSEP の位置について Davies and Colvins (2000)¹⁾で与えられた標高値と TC DTM/DEM の標高値の差異が大きいということは、調和的である。

5. まとめ

本稿では、JAXA によって 2007 年に打ち上げられた月周回衛星 SELENE (SELENE, 愛称「かぐや」) に搭載された「地形カメラ : Terrain Camera (TC)」によって得られたステレオペアを元に作成された数値地形モデル Digital Terrain Model (DTM)/数値標高モデルと Digital elevation Model (DEM) の標高精度の検証を行った結果を速報した。検証は、アポロ計画において月面に設置された Lunar laser Ranging Retro Reflector (LRRR) と, Apollo Lunar Surface Experiment Package (ALSEP) の設置地点について, TC の DTM/DEM の標高値を, LRRR に対するレーザ測距にからの標高値 (Williams 2008²⁾) と, ALSEP 送信波の Very Long Baseline Interferometry (VLBI) 測定から得られている標高値 (Davies and Colvin, 2000¹⁾) と比較することで行った。LRRR または ALSEP の位置は, 米国探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) に搭載された Narrow Angle Camera (NAC : 高度 50km から 50cm / 画素解像度) により得られた画像から定めた。その結果, ALSEP 設置地点では, Davies and Colvin (2000)¹⁾ 内に示された標高値と, TC DTM/DEM の標高値の差は数十 m 程度であった。一方, LRRR 地点では, Davies and Colvin (2000)¹⁾ が求めている標高値と, TC DTM/DEM の標高値の差は 13m 以内に収まっていた。したがって, TC DTM/DEM の標高値誤差が 10m 程度以内であるとすると, Davies and Colvin (2000)¹⁾ によって与えられた ALSEP の設置地点の標高値は, 数 10m の誤差を多く含むといえる。

参 考 文 献

- [1] Davies, M.E. and Colvin T.R., 2000, "Lunar coordinates in the regions of the Apollo landers", J. Geophys. Res. 105, 20,277-20,280.
- [2] Williams, J. G., et al., 2008, "DE421 Lunar Orbit, Physical Librations, and Surface Coordinates", Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology Interoffice memorandum, IOM 335-JW,DB,WF-20080314-001.
- [3] Zuber, M.T. et al., 1994, "The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission.", Science 266 (5192), 1839-1843.
- [4] Smith D.E. et al., 1997, "Topography of the Moon from the Clementine lidar", J. Geophys. Res. 102(E1), 1591-1611.
- [5] Haruyama, J. et al., 2008, "Global lunar surface mapping experiment using the lunar Imager/Spectrometer on SELENE", Earth, Planets and Space 60, 243-255.
- [6] Haruyama J. et al., 2012, "Lunar global digital terrain model dataset produced from SELENE (Kaguya) Terrain Camera stereo observation", 43rd Lunar planet. Symp. abst#1200.

[7] Ohtake, M. et al., “Performance and scientific objectives of the SELENE (KAGUYA) Multiband Imager”, Earth Planets and Space 60, 257–264.

[8] Robinson, M.S., et al., 2010, “Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview”, Space Science Reviews 150 (1-4) , 81-124.

[9] Wagner, R.V., et al., 2012, "REVISED COORDINATES FOR APOLLO HARDWARE", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXIX-B4.

参 照 サ イ ト

[1] 「SELENE (かぐや) データアーカイブ」 <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp>

Table1. アポロ計画で設置された LRRR と ALSEP の標高，緯度，経度の文献値

(a)標高値[m]

| | 文 献 値 [m] | | 文 献 値 - 1 7 3 7 4 0 0 [m] | |
|-----------|-------------|---------|-----------------------------|-------|
| | LRRR | ALSEP | LRRR | ALSEP |
| Apollo-11 | 1735472 | ----- | -1928 | ----- |
| Apollo-12 | ----- | 1736014 | ----- | -1386 |
| Apollo-14 | 1736335 | 1736343 | -1065 | -1057 |
| Apollo-15 | 1735476 | 1735477 | -1924 | -1923 |
| Apollo-16 | ----- | 1737453 | ----- | 53 |
| Apollo-17 | ----- | 1734814 | ----- | -2586 |

(b)緯度 [° N] ,経度[° E]

| | 文 献 値 | | | |
|-----------|----------|----------|---------|----------|
| | LRRR | | ALSEP | |
| | 緯度[° N] | 経度[° E] | 緯度[° N] | 経度[° E] |
| Apollo 11 | 0.6734 | 23.4729 | ----- | ----- |
| Apollo 12 | ----- | ----- | -3.0094 | 336.5754 |
| Apollo 14 | -3.64421 | 342.5212 | ----- | ----- |
| Apollo 15 | 26.1333 | 3.6284 | ----- | ----- |
| Apollo 16 | ----- | ----- | -8.9754 | 15.4981 |
| Apollo 17 | ----- | ----- | 20.1921 | 30.7649 |

文献値：LRRR については，Williams (2008)²⁾ の mean Earth/mean rotation axis frame での値，ALSEP については，Davies and Colvin (2000)¹⁾ 内 Mean-Earth/Polar Axis Coordinates での値。

Table2. アポロ 11,14,15 号による LRRR と ALSEP 設置地点における, TC DTM/DEM の標高値と, Davies and Colvin (2000) ¹⁾ (Table1)による標高値との比較

| Apollo 11 | | 計測値 | | LRRR | | ALSEP | |
|------------|----------------------------|----------|----------|--------|---------|---------|-------|
| | ファイル名(使用したデータID) | 緯度φ[° N] | 経度λ[° E] | 標高h[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] |
| DTM/TCO | DTMTCO 03_02668N009E0239SC | 0.6735 | 23.4737 | -1921 | 0.0000 | 0.0007 | 6 |
| DEM/TCO(両) | DTMTCOw01_02668N009E0239SC | 0.6719 | 23.4740 | -1919 | -0.0015 | 0.0009 | 8 |
| DEM/TCO(単) | DTMTCOs01_03002N001E0231SC | 0.6729 | -1929 | -1929 | -0.0005 | 0.0001 | -2 |
| | DTMTCOs01_05674N020E0235SC | 0.6656 | 23.4700 | -1918 | -0.0078 | -0.0031 | 9 |
| | DTMTCOs01_05168N005E0237SC | 0.6429 | 23.4733 | -1914 | -0.0305 | 0.0002 | 13 |
| | DTMTCOs01_03500N006E0234SC | 0.6709 | 23.4735 | -1924 | -0.0026 | 0.0005 | 3 |

| Apollo 14 | | 計測値 | | LRRR | | ALSEP | |
|------------|----------------------------|----------|----------|--------|---------|---------|-------|
| | ファイル名(使用したデータID) | 緯度φ[° N] | 経度λ[° E] | 標高h[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] |
| DTM_TCO | DTMTCO 03_02706S040E3423SC | -3.6449 | 342.5203 | -1053 | -0.0007 | -0.0010 | 10 |
| | DTMTCO 03_05207S040E3425SC | -3.6452 | 342.5204 | -1057 | -0.0010 | -0.0010 | 7 |
| DEM_TCO(両) | DTMTCOw01_02706S040E3423SC | -3.6440 | 342.5207 | -1054 | 0.0001 | -0.0006 | 10 |
| | DTMTCOw01_05207S040E3425SC | -3.6452 | 342.5201 | -1056 | -0.0010 | -0.0012 | 8 |
| DEM_TCO(単) | DTMTCOs01_03039S031E3426SC | -3.6439 | 342.5212 | -1058 | 0.0002 | -0.0002 | 6 |
| | DTMTCOs01_03538S042E3430SC | -3.6464 | 342.5198 | -1057 | -0.0022 | -0.0015 | 7 |
| | DTMTCOs01_03539S029E3419SC | -3.6465 | 342.5275 | -1059 | -0.0023 | 0.0062 | 5 |
| | DTMTCOs01_03539S042E3419SC | -3.6467 | 342.5275 | -1058 | -0.0025 | 0.0062 | 6 |
| | DTMTCOs01_07106S041E3423SC | -3.6625 | 342.5289 | -1054 | -0.0184 | 0.0076 | 10 |
| | DTMTCOs01_03538S029E3430SC | -3.6465 | 342.5199 | -1058 | -0.0024 | -0.0015 | 6 |

| Apollo 15 | | 計測値 | | LRRR | | ALSEP | |
|------------|----------------------------|----------|----------|--------|---------|---------|-------|
| | ファイル名(使用したデータID) | 緯度φ[° N] | 経度λ[° E] | 標高h[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] |
| DTM_TCO | DTMTCO 03_01686N258E0033SC | 26.1347 | 3.6269 | -1919 | 0.0013 | -0.0016 | 4 |
| DEM_TCO(両) | DTMTCOw01_01686N258E0033SC | 26.1339 | 3.6284 | -1918 | 0.0005 | -0.0001 | 5 |
| DEM_TCO(単) | DTMTCOs01_03020N260E0039SC | 26.1337 | 3.6292 | -1921 | 0.0003 | 0.0007 | 2 |
| | DTMTCOs01_05186N265E0040SC | 26.1332 | 3.6279 | -1921 | -0.0002 | -0.0006 | 2 |
| | DTMTCOs01_03518N268E0037SC | 26.1346 | 3.6214 | -1914 | 0.0012 | -0.0071 | 9 |

Table3. アポロ 16,17 号による LRRR と ALSEP 設置地点における, TC DTM/DEM の標高値と, Davies and Colvin (2000) ¹⁾ (Table1)による標高値との比較

| Apollo 16 | | 統計値 | | | | LRRR | | | | ALSEP | | | |
|------------|----------------------------|----------|----------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | ファイル名(使用したデータID) | 緯度φ[° N] | 経度λ[° E] | 標高h[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] |
| DTM/TCO | DTMTCO_03_00837S085E0161SC | -8.9758 | 15.4986 | 12 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0004 | 0.0005 | -41 |
| | DTMTCO_03_05176S093E0154SC | -8.9763 | 15.4979 | 13 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0009 | -0.0002 | -40 |
| | DTMTCO_03_02676S084E0151SC | -8.9749 | 15.4984 | 18 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0005 | 0.0003 | -35 |
| | DTMTCO_03_07074S087E0155SC | -8.9680 | 15.5064 | 13 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0070 | 0.0083 | -40 |
| DEM/TCO(両) | DTMTCow01_00837S085E0161SC | -8.9758 | 15.4986 | 14 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0003 | 0.0005 | -39 |
| | DTMTCow01_05176S093E0154SC | -8.9760 | 15.4973 | 13 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0006 | -0.0008 | -40 |
| | DTMTCow01_02676S084E0151SC | -8.9755 | 15.4980 | 19 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0001 | -0.0001 | -34 |
| | DTMTCOs01_03009S095E0154SC | -8.9750 | 15.4976 | 9 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0004 | -0.0005 | -44 |
| DEM/TCO(単) | DTMTCOs01_03507S088E0160SC | -8.9771 | 15.4987 | 10 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0017 | 0.0006 | -43 |
| | DTMTCOs01_03508S088E0149SC | -8.9768 | 15.4982 | 10 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0014 | 0.0001 | -43 |

| Apollo 17 | | 計測値 | | | | LRRR | | | | ALSEP | | | |
|------------|----------------------------|----------|----------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | ファイル名(使用したデータID) | 緯度φ[° N] | 経度λ[° E] | 標高h[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] | Δφ[° N] | Δλ[° E] | Δh[m] |
| DTM_TCO | DTMTCO_03_00823N200E0310SC | 20.1919 | 30.7671 | -2624 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0002 | 0.0022 | -38 |
| | DTMTCO_03_05161N207E0311SC | 20.1975 | 30.7639 | -2620 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0054 | -0.0010 | -34 |
| | DTMTCO_03_02662N205E0306SC | 20.1922 | 30.7668 | -2623 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0001 | 0.0019 | -37 |
| DEM_TCO(両) | DTMTCow01_00823N200E0310SC | 20.1919 | 30.7675 | -2624 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0002 | 0.0026 | -38 |
| | DTMTCow01_05161N207E0311SC | 20.1983 | 30.7634 | -2619 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0062 | -0.0015 | -33 |
| | DTMTCow01_02662N205E0306SC | 20.1918 | 30.7666 | -2630 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0003 | 0.0017 | -44 |
| DEM_TCO(単) | DTMTCOs01_02995N205E0308SC | 20.1922 | 30.7666 | -2626 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.0001 | 0.0017 | -40 |
| | DTMTCOs01_03493N206E0308SC | 20.1912 | 30.7656 | -2627 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0009 | 0.0007 | -41 |
| | DTMTCOs01_05667N205E0312SC | 20.1791 | 30.7773 | -2637 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | -0.0130 | 0.0124 | -51 |

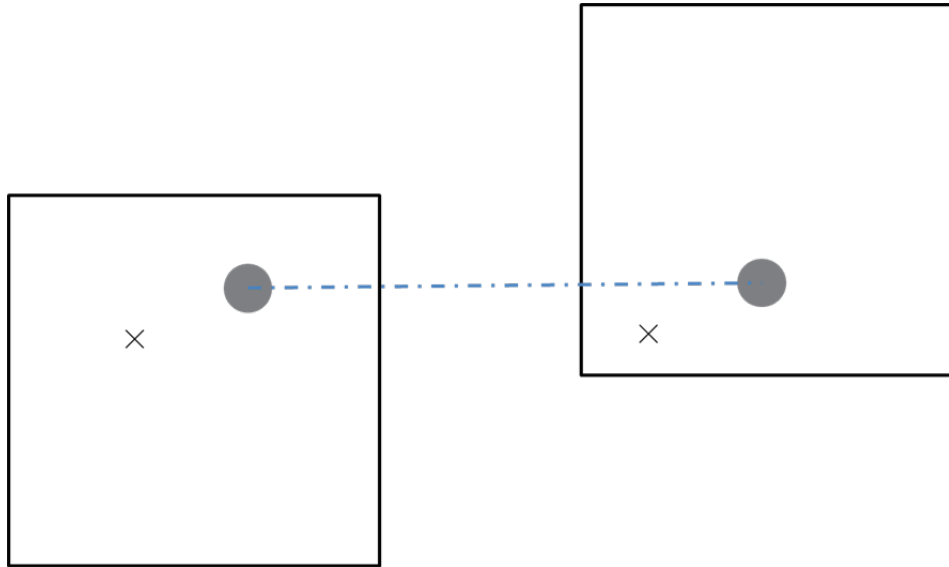


Figure1. 重ね合わせ方法

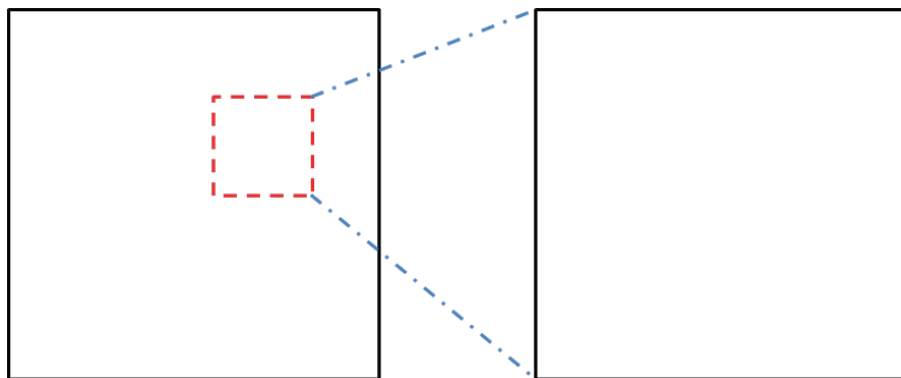


Figure2. 画像の使用部分（拡大図）

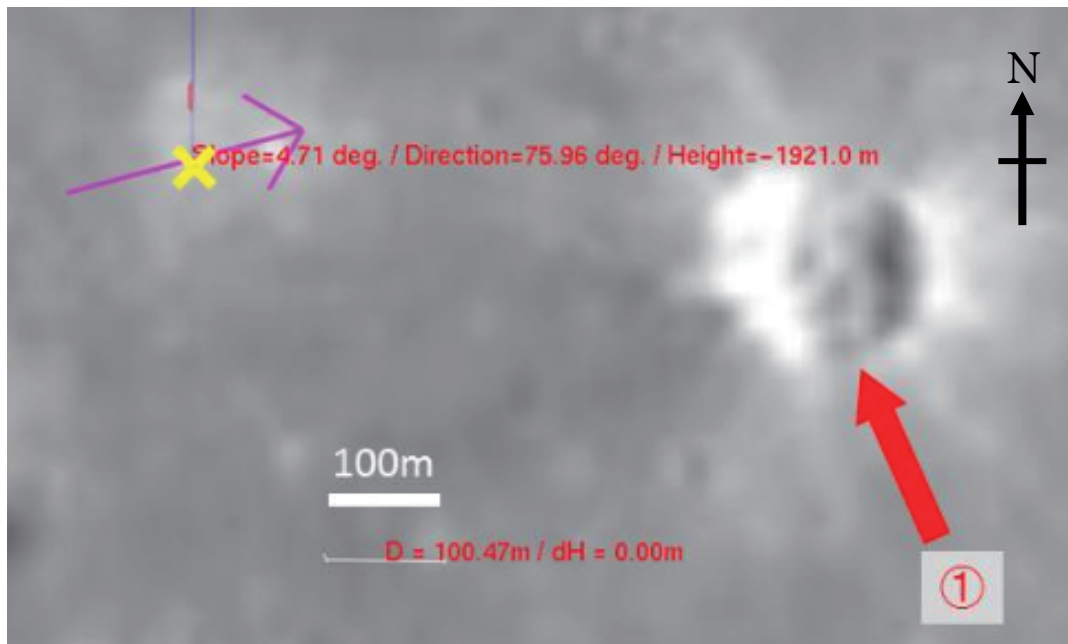


Figure3. アポロ 11 号の LRRR 地点 TC オルソ画像(①は Little West crater.)

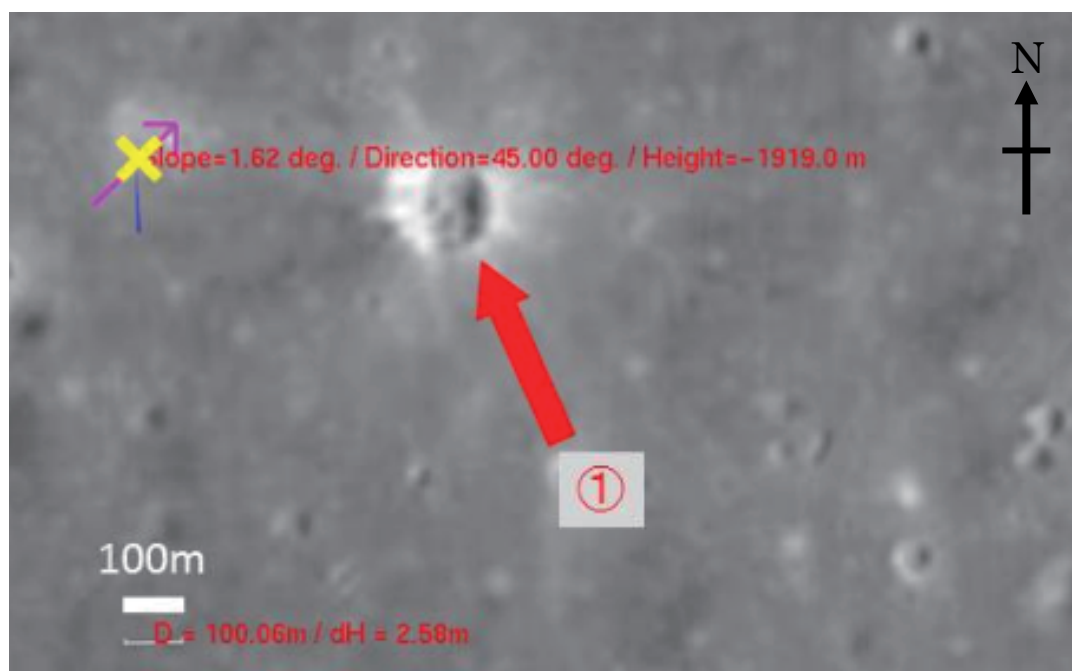


Figure4. アポロ 11 号の LRRR 地点 DEM 両眼視画像 TC オルソ画像(①は Little West crater.)

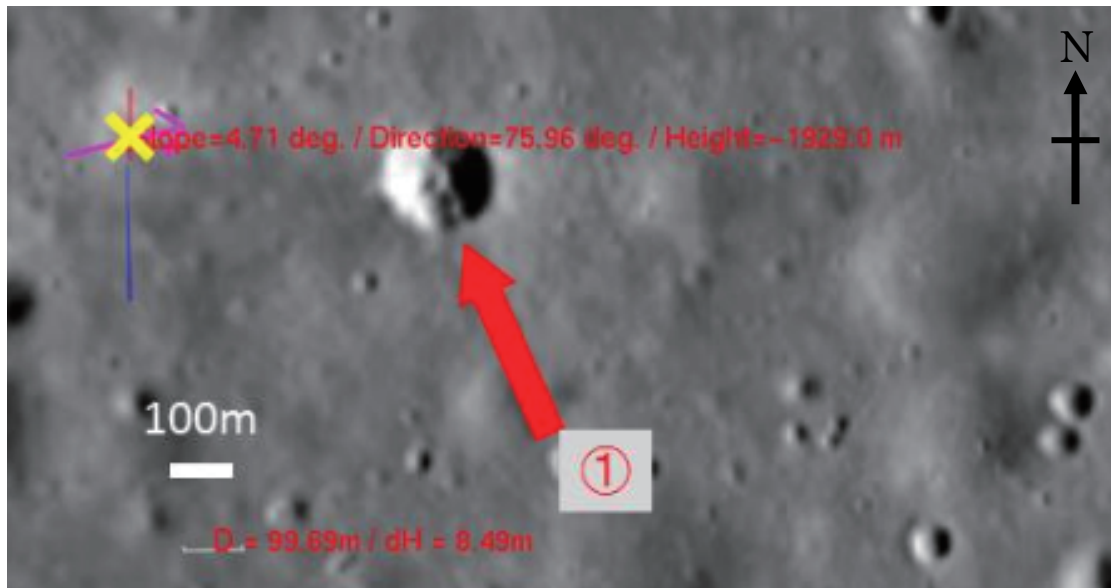


Figure5. アポロ 11 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(a) TC オルソ画像(①は Little West crater.)

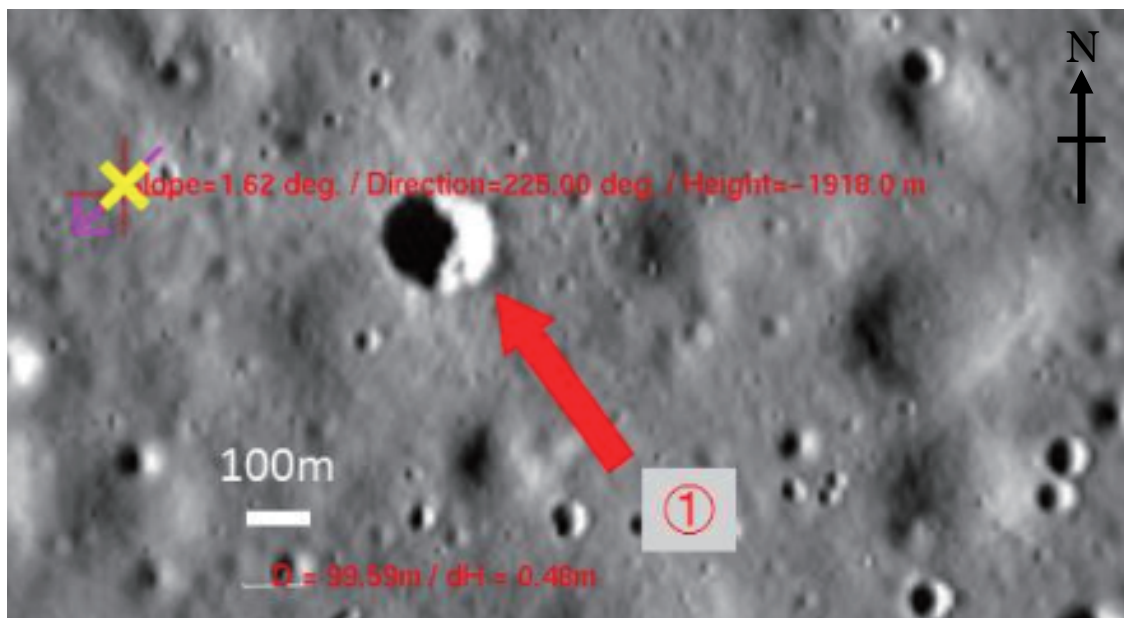


Figure6. アポロ 11 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(b) TC オルソ画像(①は Little West crater.)



Figure7. アポロ 11 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(c) TC オルソ画像(①は Little West crater.)

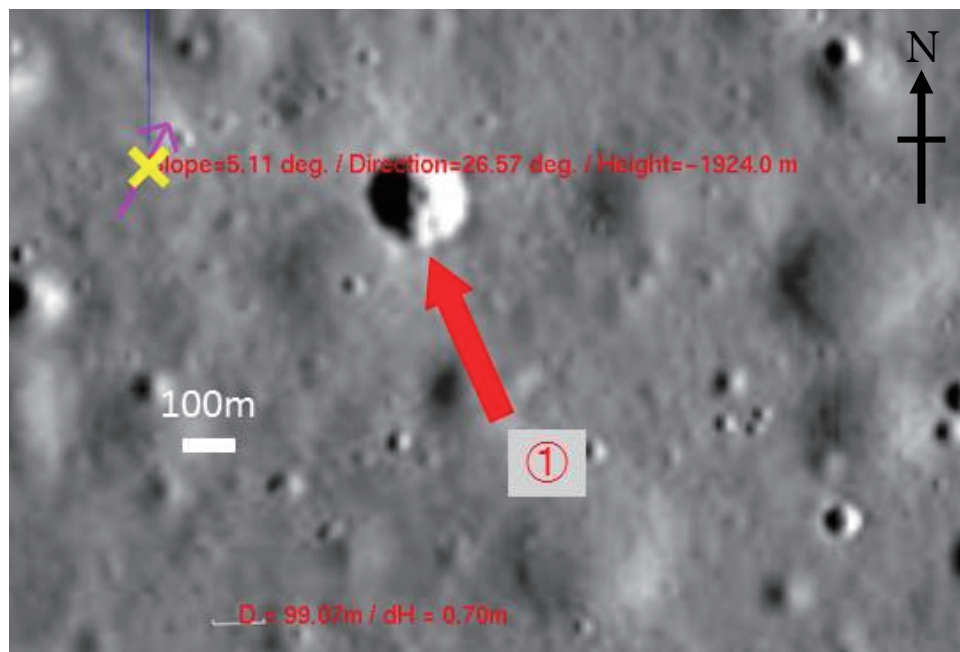


Figure8. アポロ 11 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(d) TC オルソ画像(①は Little West crater.)



Figure9. アポロ 14 号の LRRR 地点 DTM 画像(a)TC オルソ画像

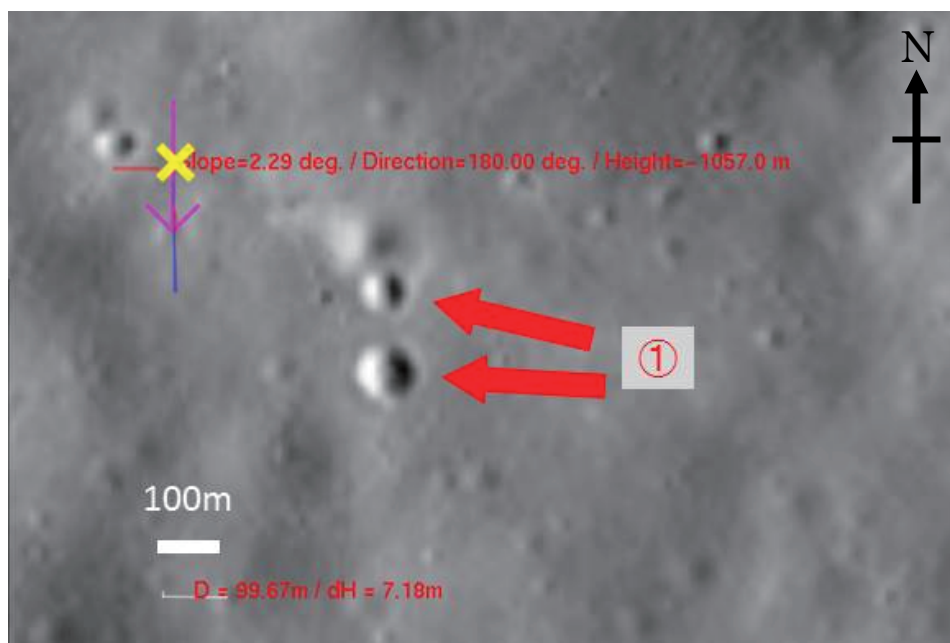


Figure10. アポロ 14 号の LRRR 地点 DTM 画像(b)TC オルソ画像

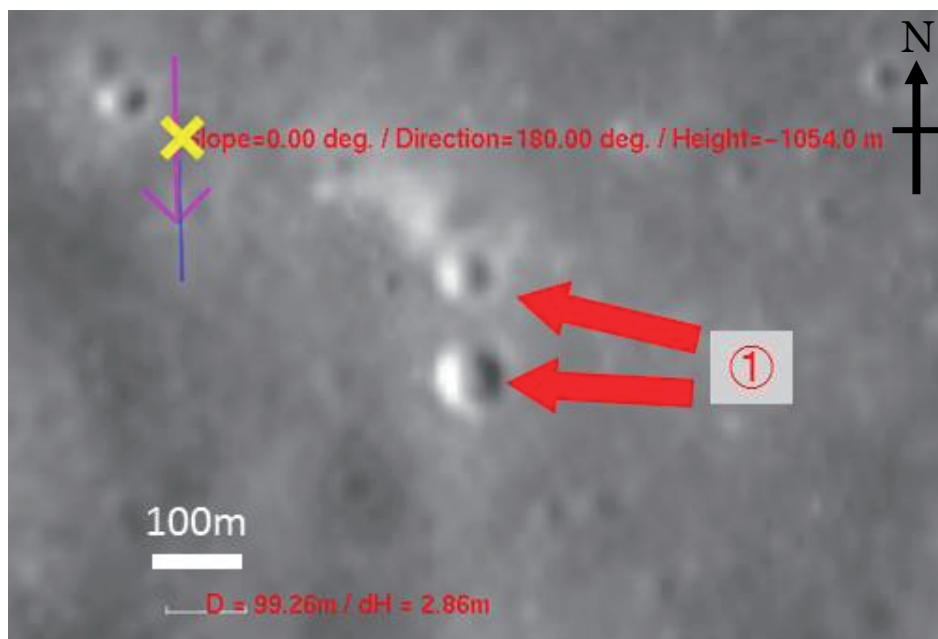


Figure11. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 両眼視画像(a)TC オルソソ画像

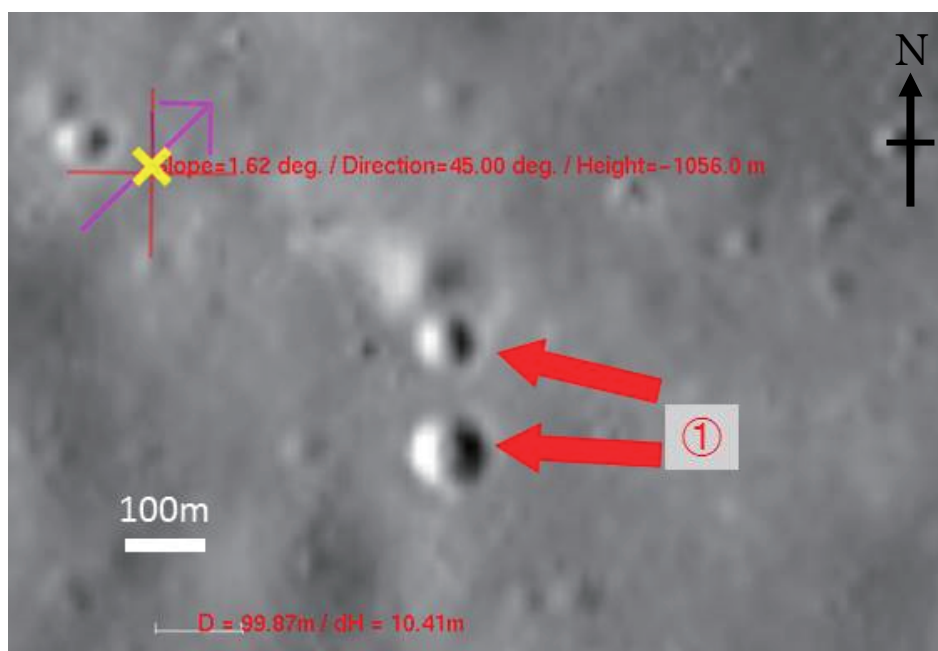


Figure12. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 両眼視画像(b)TC オルソソ画像

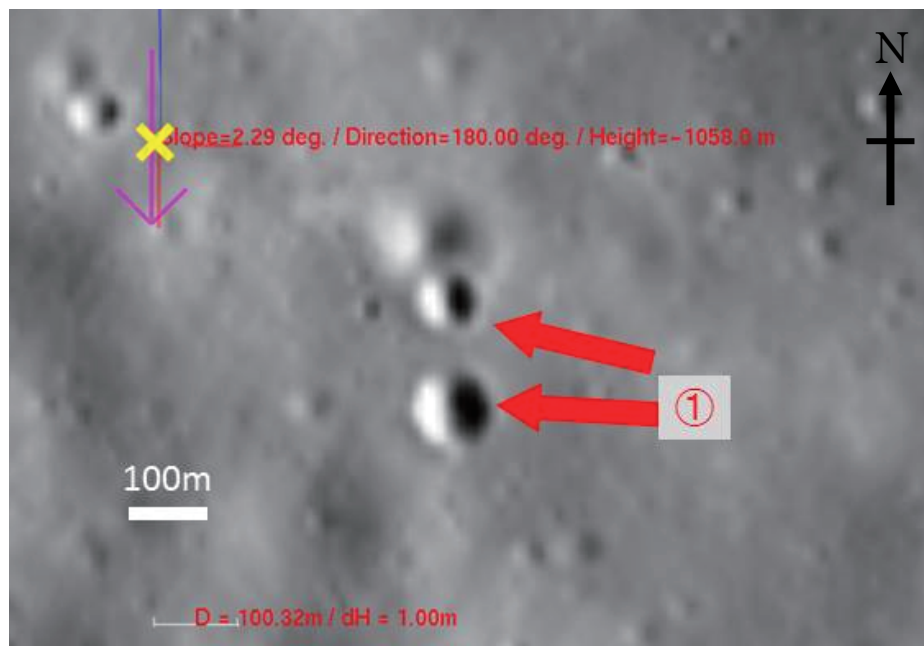


Figure13. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(a) TC オルソ画像

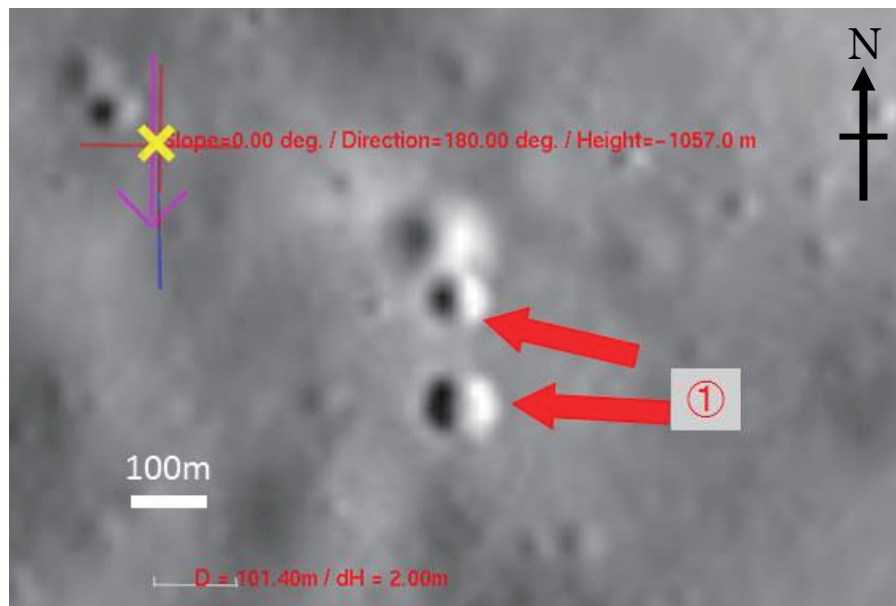


Figure14. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(b) TC オルソ画像



Figure15. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(c) TC オルソ画像

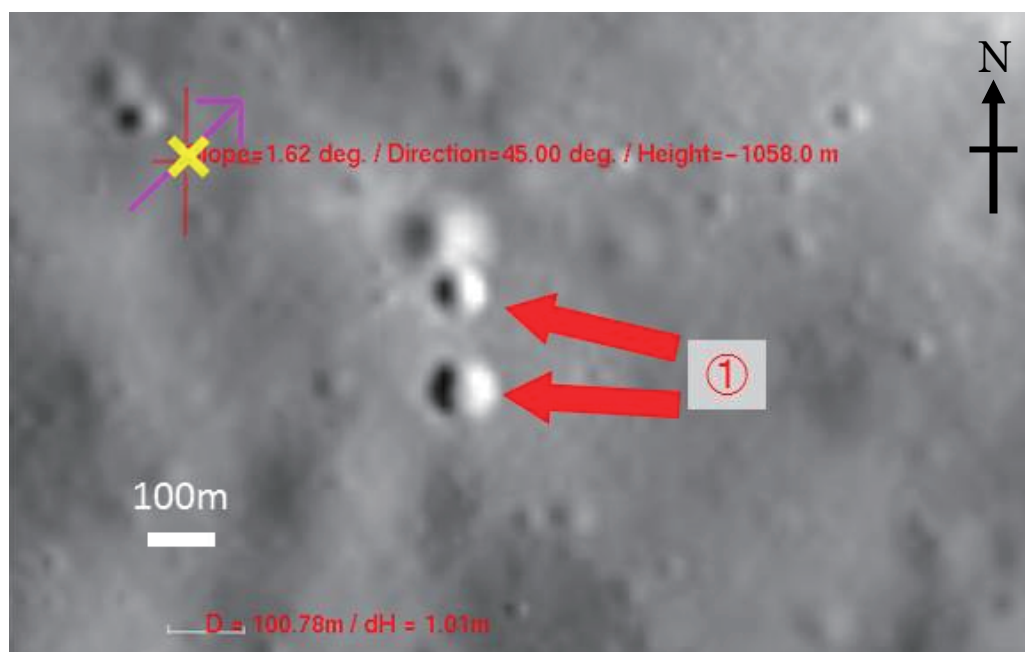


Figure16. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(d) TC オルソ画像

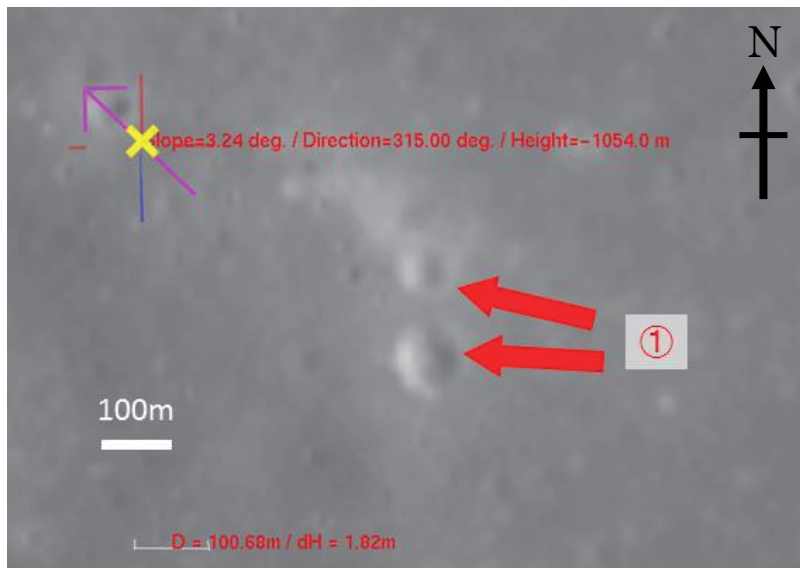


Figure17. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(e) TC オルソ画像

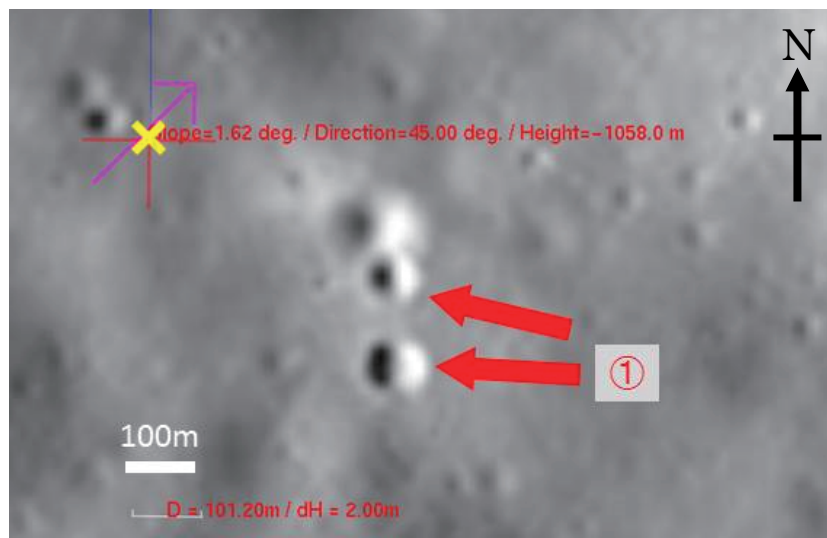


Figure18. アポロ 14 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(f) TC オルソ画像

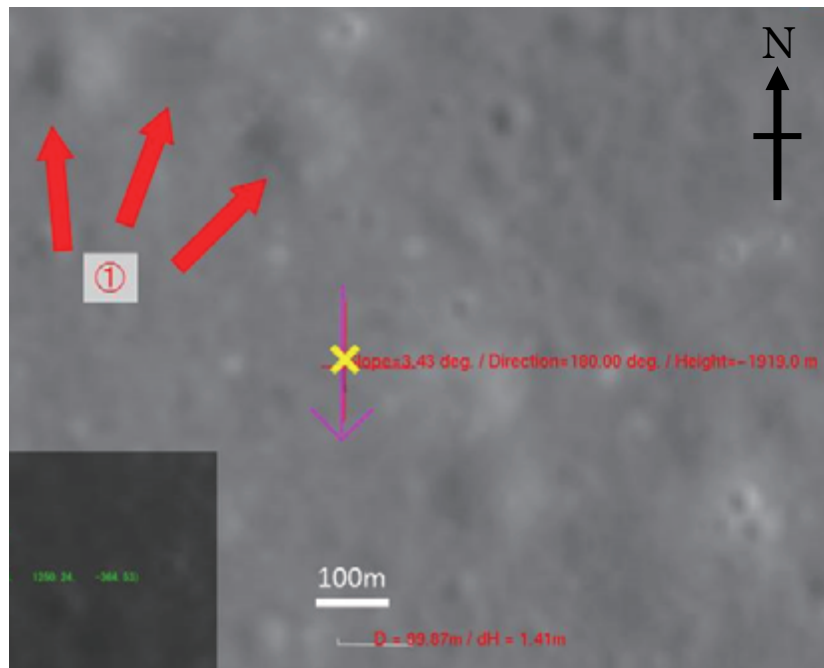


Figure19. アポロ 15 号の LRRR 地点 DTM 画像 TC オルソ画像

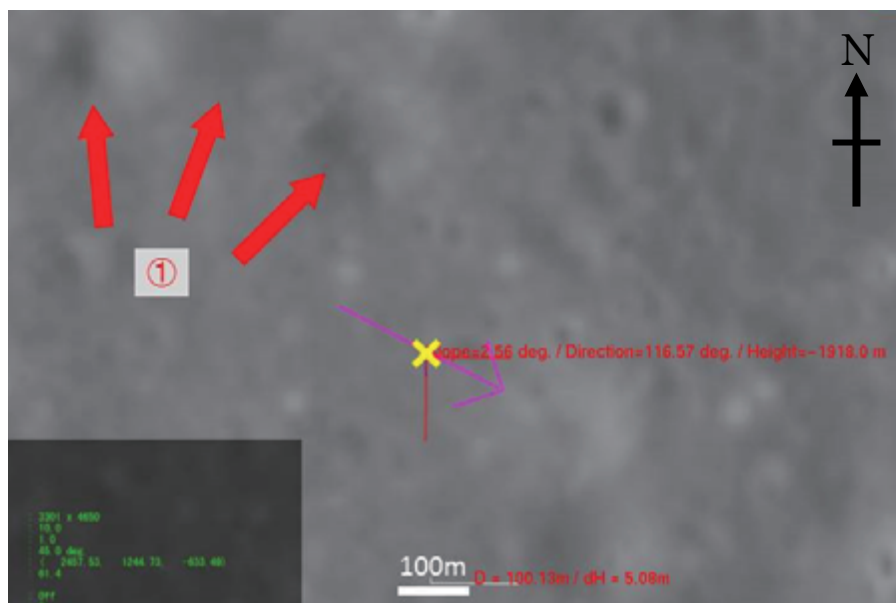


Figure20. アポロ 15 号の LRRR 地点 DEM 両眼視画像 TC オルソ画像

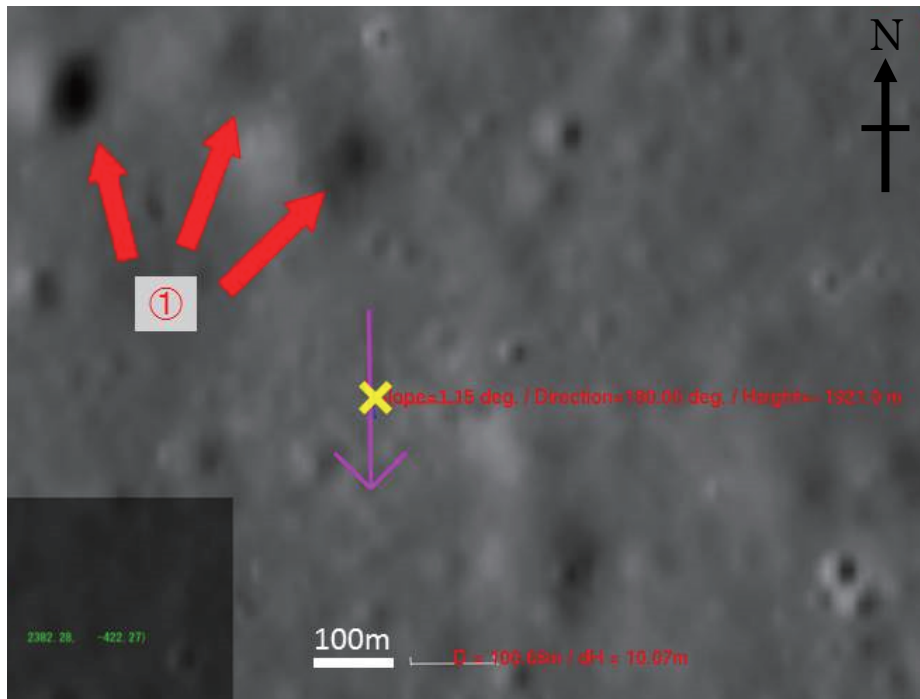


Figure21. アポロ 15 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(a)TC オルソ画像

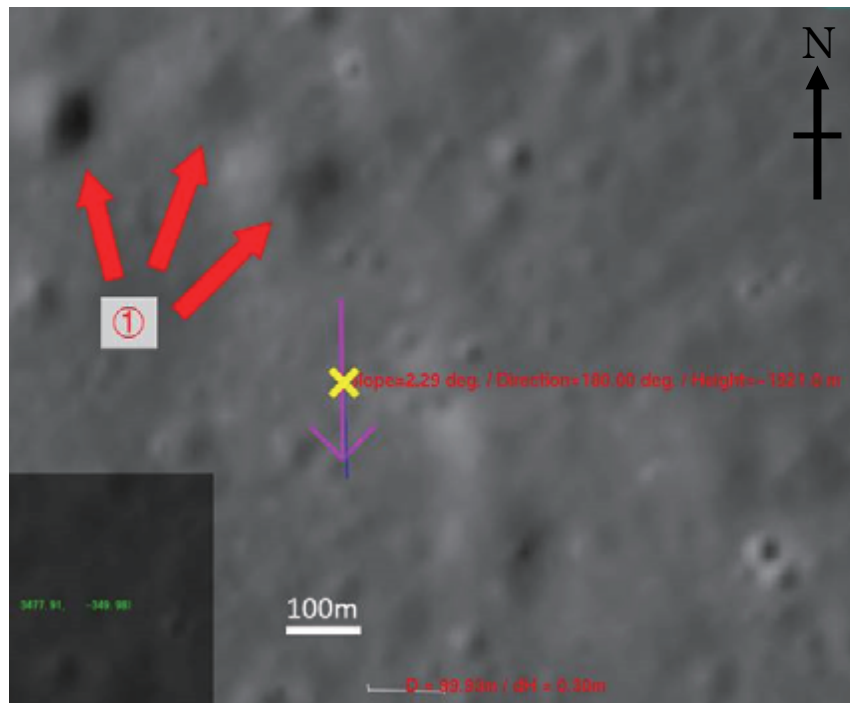


Figure22. アポロ 15 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(b)TC オルソ画像

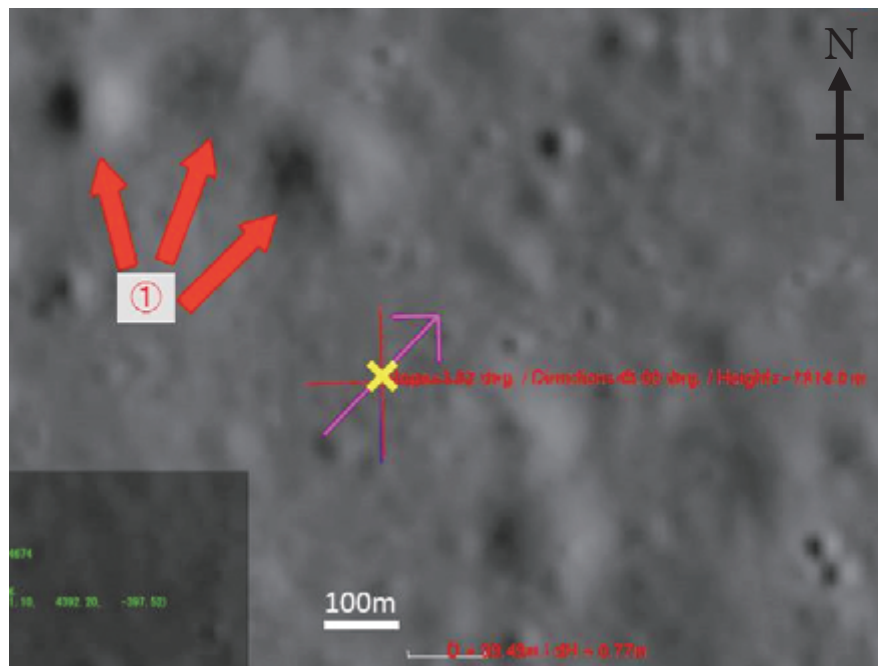


Figure23. アポロ 15 号の LRRR 地点 DEM 単眼視画像(c) TC オルソ画像

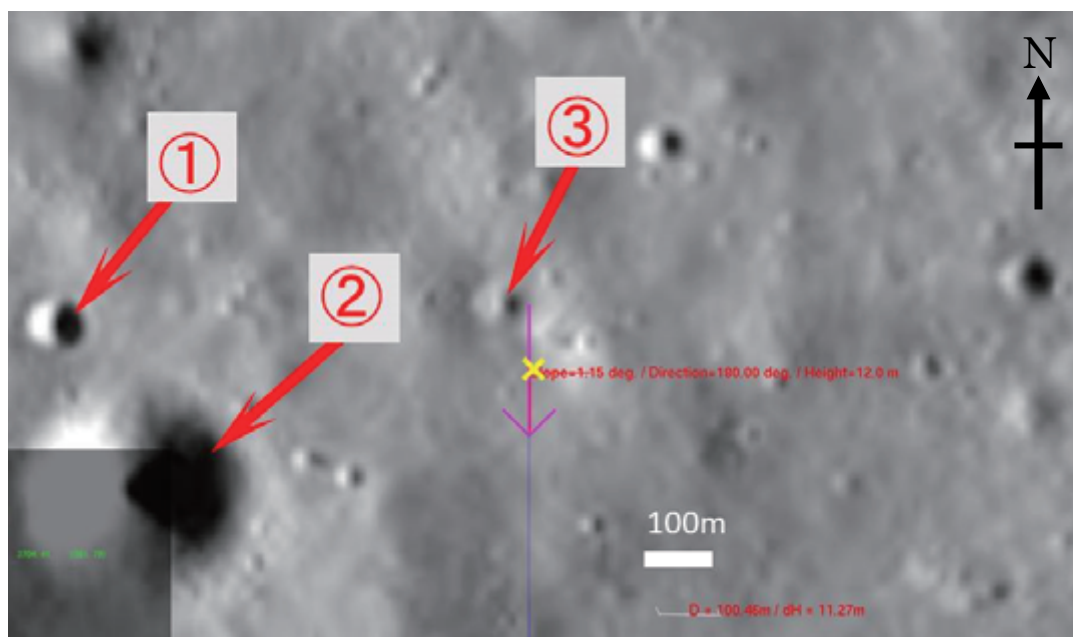


Figure24. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DTM 画像(a) TC オルソ画像

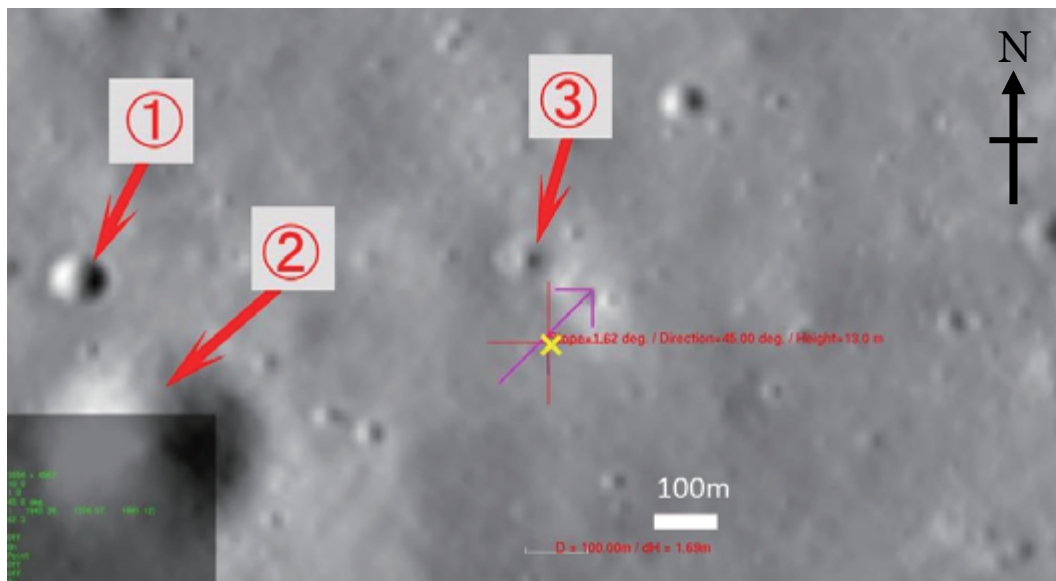


Figure25. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DTM 画像(b) TC オルソ画像

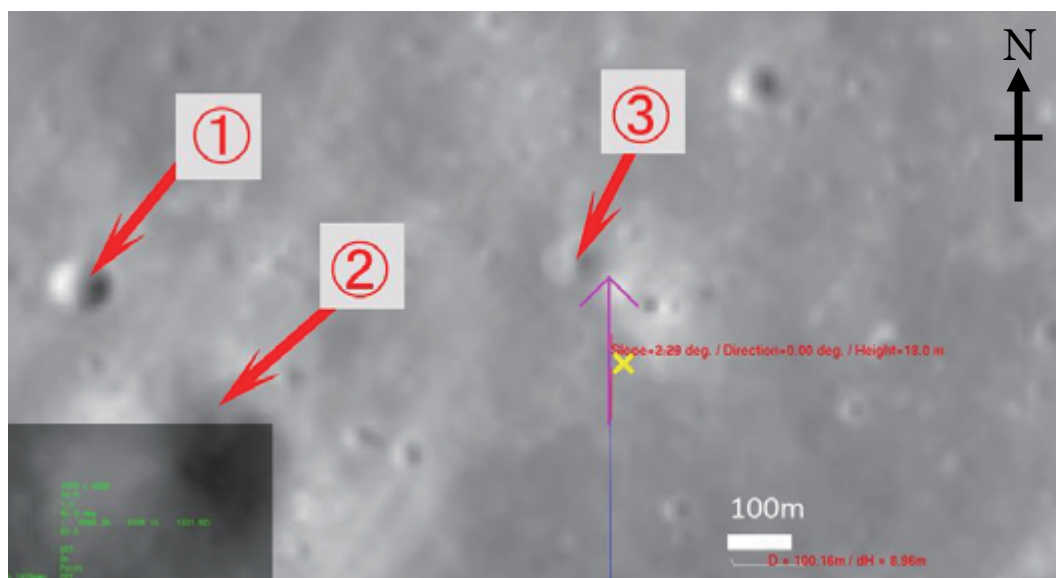


Figure26. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DTM 画像(c) TC オルソ画像

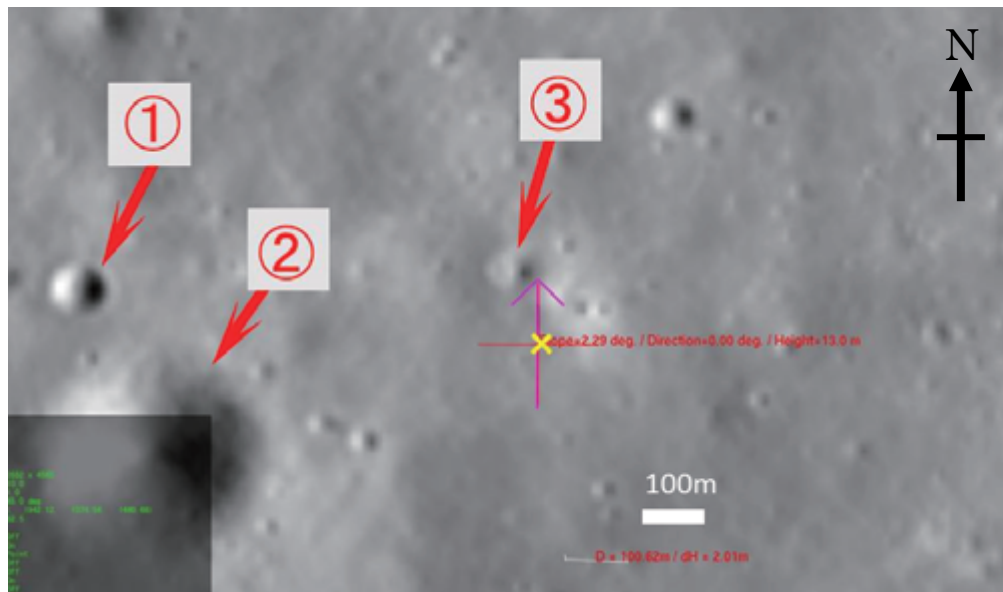


Figure29. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DEM 両眼視画像(b) TC オルソ画像

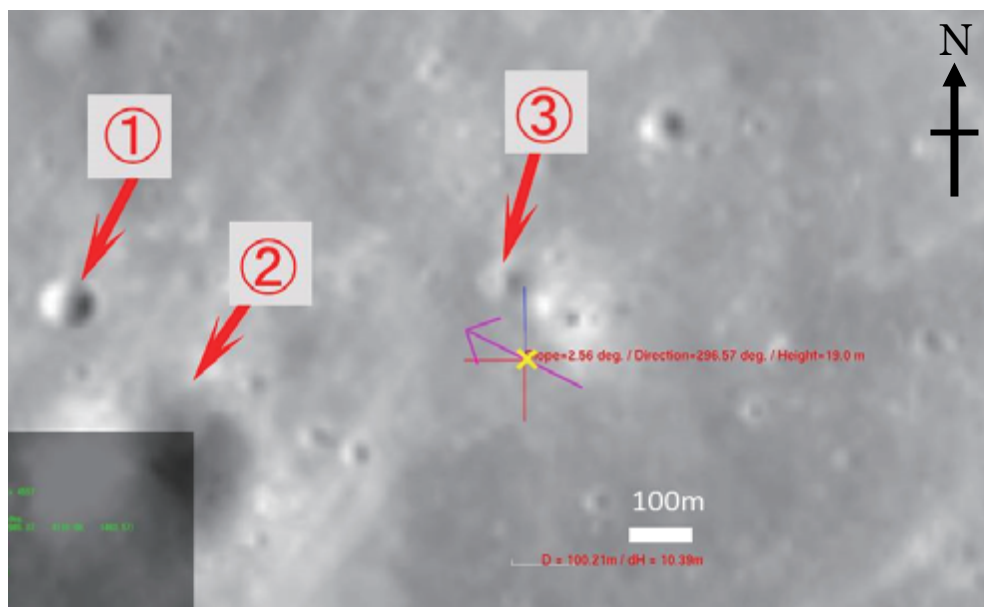


Figure30. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DEM 両眼視画像(c) TC オルソ画像

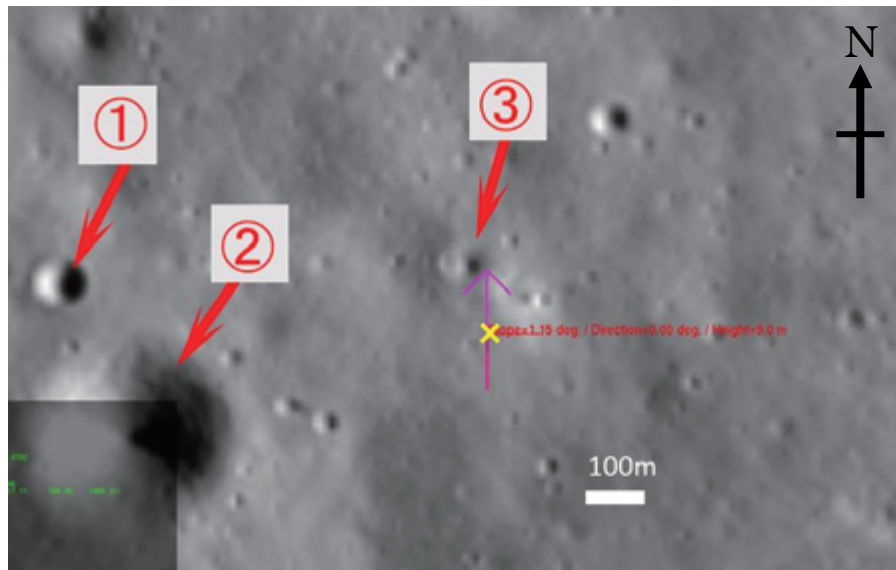


Figure31. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DEM 単眼視画像(a) TC オルソ画像

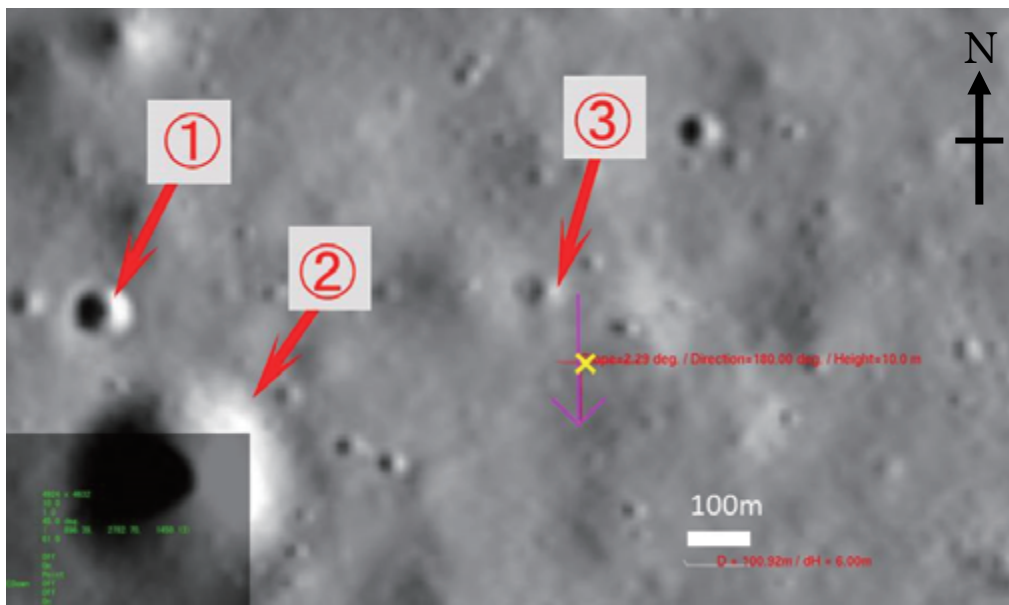


Figure32. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DEM 単眼視画像(b) TC オルソ画像

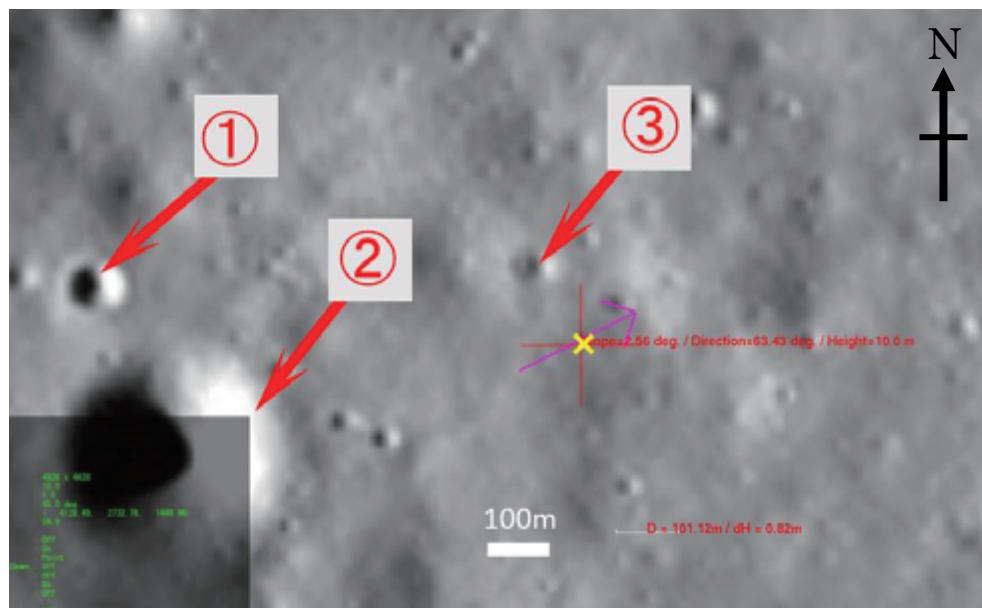


Figure33. アポロ 16 号の ALSEP 地点 DEM 単眼視画像(c) TC オルソ画像

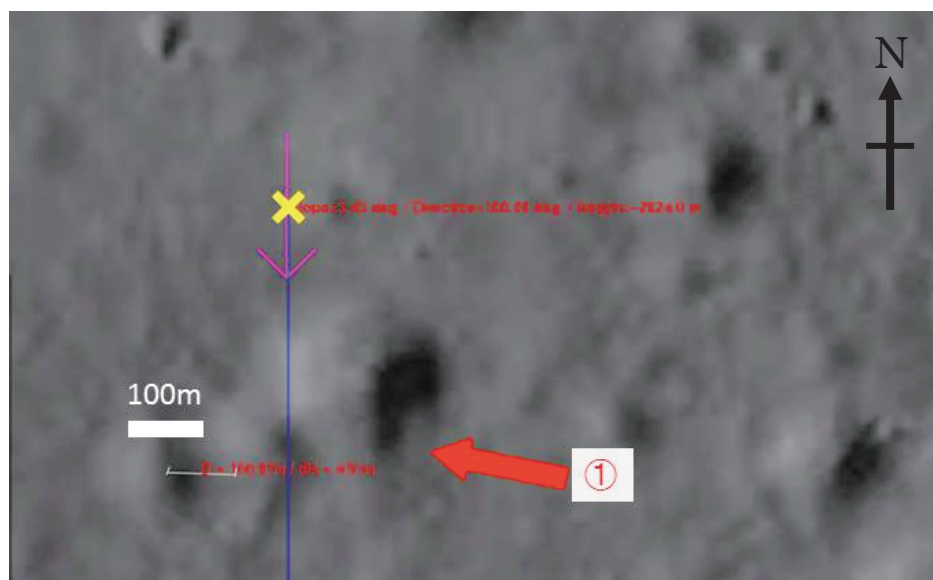


Figure34. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DTM 画像(a) TC オルソ画像



Figure35. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DTM 画像(b) TC オルソ画像



Figure36. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DTM 画像(c) TC オルソ画像



Figure37. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DEM 両眼視画像(a) TC オルソ画像

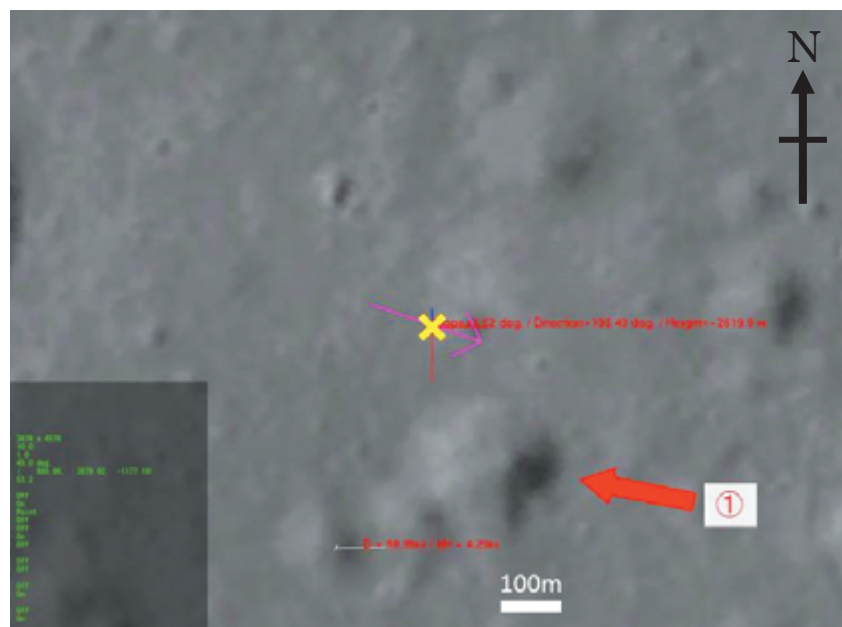


Figure38. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DEM 両眼視画像(b) TC オルソ画像



Figure39. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DEM 両眼視画像(c) TC オルソ画像

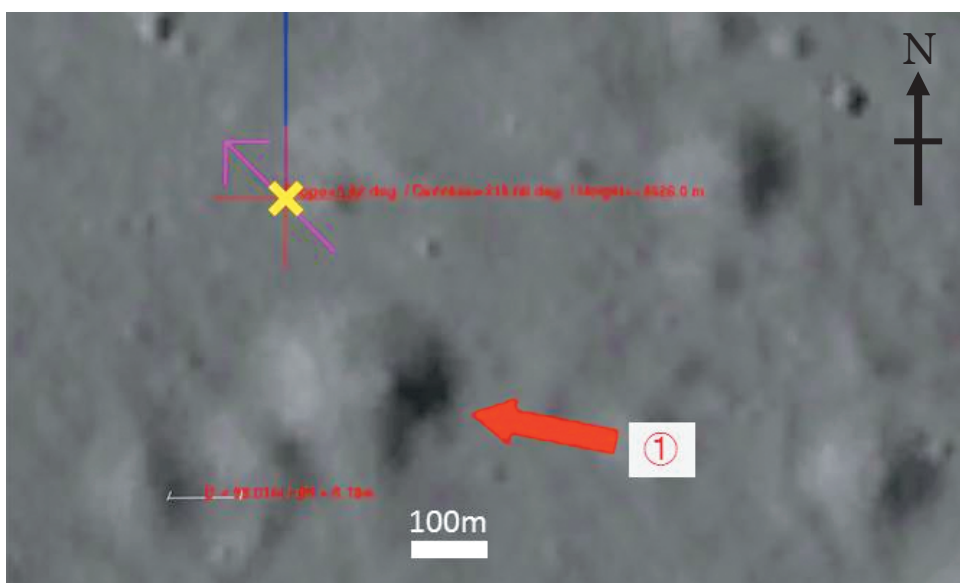


Figure40. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DEM 単眼視画像(a) TC オルソ画像

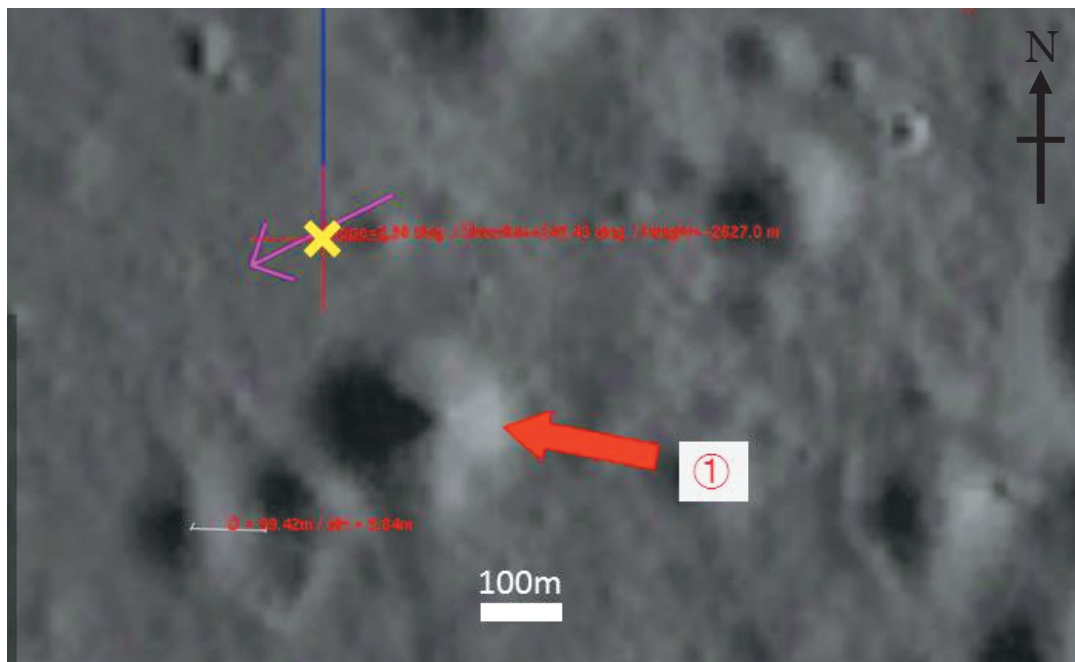


Figure41. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DEM 単眼視画像(b) TC オルソ画像

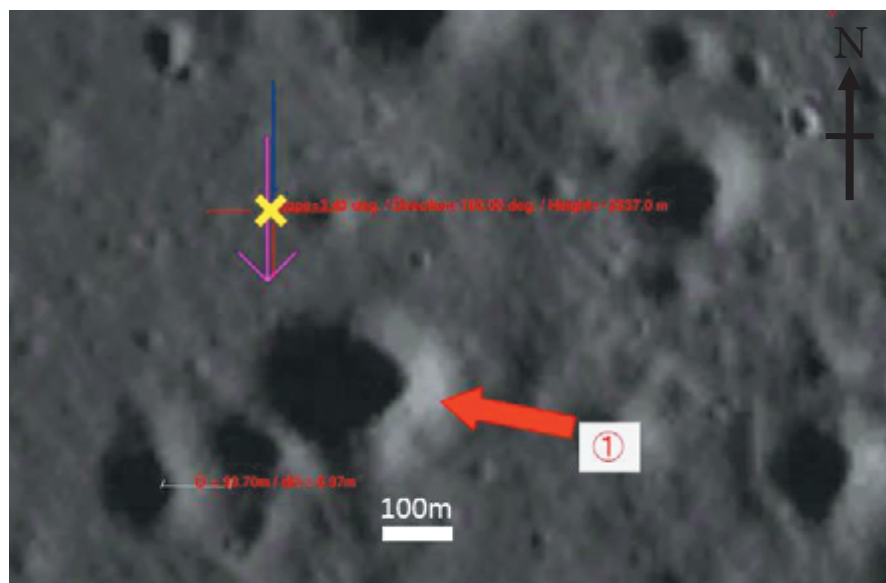


Figure42. アポロ 17 号の ALSEP 地点 DEM 単眼視画像(c) TC オルソ画像

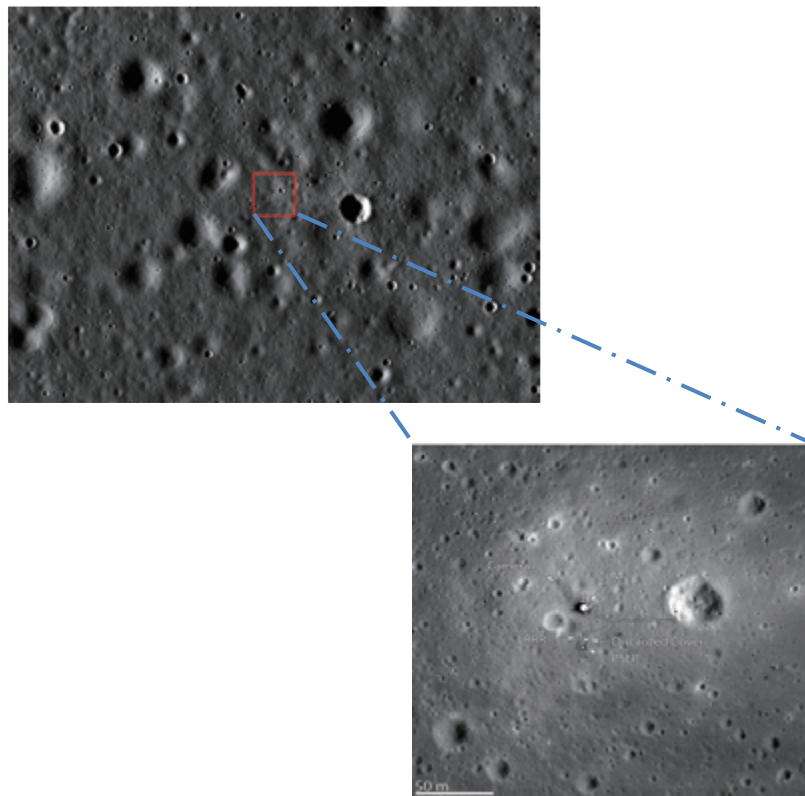


Figure43. NAC により撮像された 11 号 LRRR 設置位置と拡大図⁹⁾込

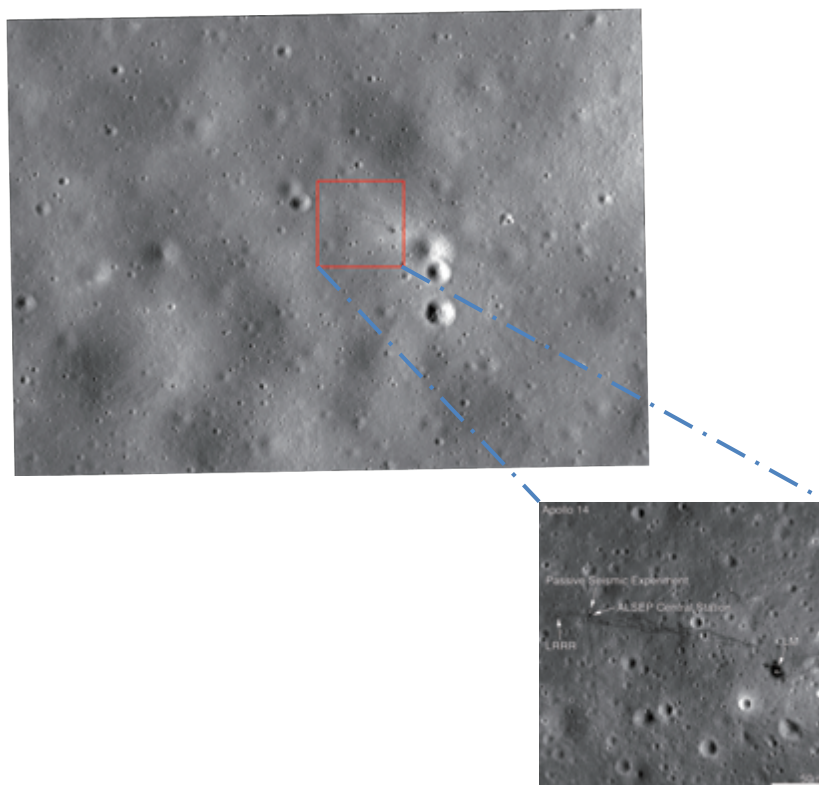


Figure44. NAC により撮像された 14 号 LRRR 設置位置と拡大図⁹⁾込

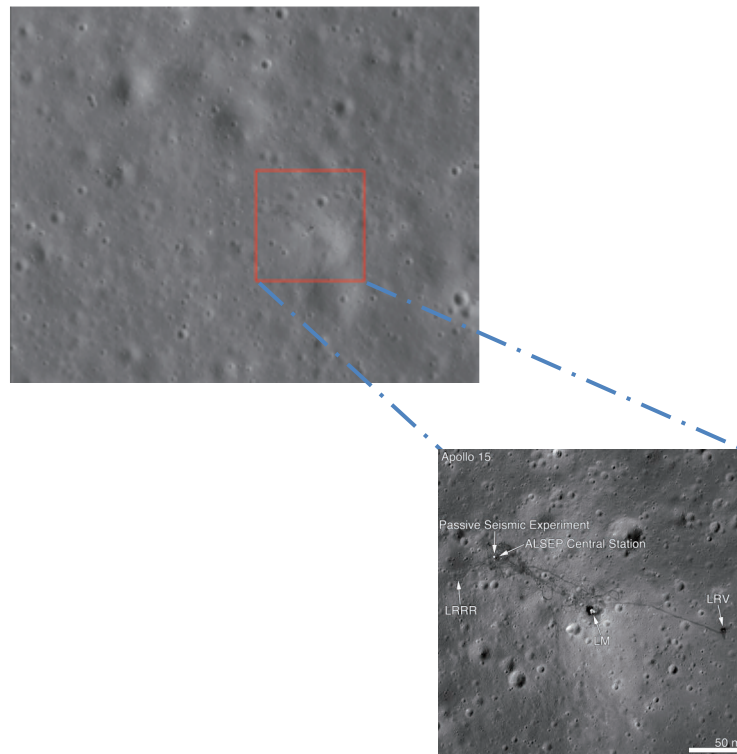


Figure45. NAC により撮像された 15 号 LRRR 設置位置と拡大図 9)込

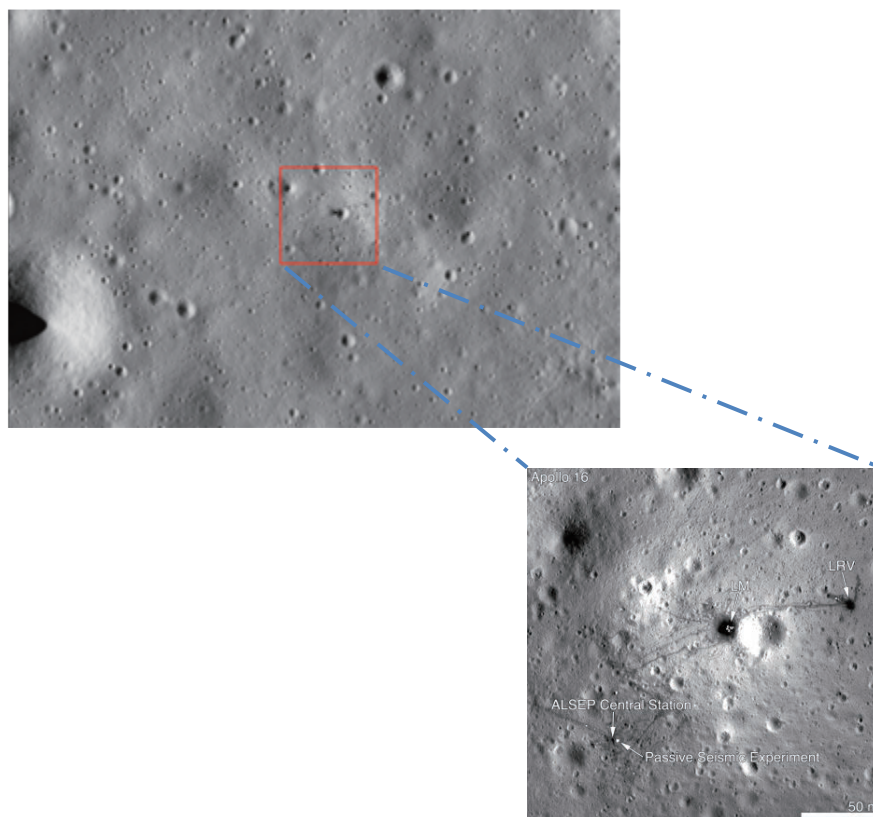


Figure46. NAC により撮像された 16 号 ALSEP 設置位置と拡大図 9)込

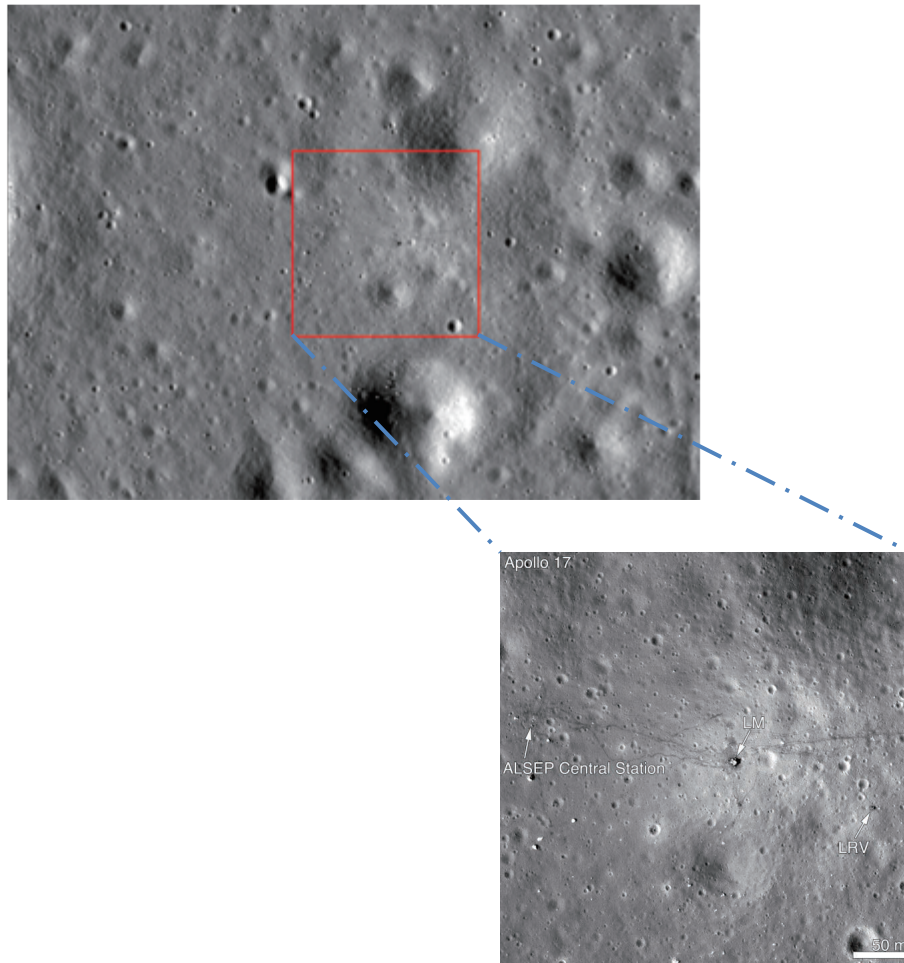


Figure47. NAC により撮像された 17 号 ALSEP 設置位置と拡大図⁹⁾込

Figure 43～47 に示した拡大図は, 参考文献 9 より. これらの図については, 著者の許可を得て掲載.

付 録

付録 Table1.使用したデータ DTM のまとめ

| <DTM> | 使用したデータ ID | 中心緯度 [° N] | 中心経度 [° E] | データ取得日 |
|--------------|--------------------------|---------------|---------------|------------|
| アポロ 11 号 | DTMTCO_03_02668N009E0239 | 0.920353 | 23.914829 | 2008/05/14 |
| アポロ 14 号 (a) | DTMTCO_03_02706S040E3423 | -4.035553 | 342.306068 | 2008/05/17 |
| (b) | DTMTCO_03_05207S040E3425 | -3.972610 | 342.531055 | 2008/12/08 |
| アポロ 15 号 | DTMTCO_03_01686N258E0033 | 25.778484 | 3.331185 | 2008/02/24 |
| アポロ 16 号 (a) | DTMTCO_03_00837S085E0161 | -8.489779 | 16.096662 | 2007/12/17 |
| (b) | DTMTCO_03_05176S093E0154 | -9.275234 | 15.442231 | 2008/12/06 |
| (c) | DTMTCO_03_02676S084E0151 | -7.620030 | 15.743312 | 2008/05/15 |
| (d) | DTMTCO_03_07074S087E0155 | -8.689931 | 15.524400 | 2009/05/05 |
| アポロ 17 号 (a) | DTMTCO_03_00823N200E0310 | 19.939098 | 30.973273 | 2007/12/15 |
| (b) | DTMTCO_03_05161N207E0311 | 20.718839 | 31.100269 | 2008/12/05 |
| (c) | DTMTCO_03_02662N205E0306 | 20.475175 | 30.586524 | 2008/05/14 |

付録 Table2.使用したデータ DEM・両眼視のまとめ

| <DEM> 両眼視 | 使用したデータ ID | 中心緯度 [° N] | 中心経度 [° E] | データ取得日 |
|--------------|--------------------------|---------------|---------------|------------|
| アポロ 11 号 | DTMTCOw01_02668N009E0239 | 0.920299 | 23.914928 | 2008/05/14 |
| アポロ 14 号 (a) | DTMTCOw01_02706S040E3423 | -4.035605 | 342.306021 | 2008/05/17 |
| (b) | DTMTCOw01_05207S040E3425 | -3.972507 | 342.531148 | 2008/12/08 |
| アポロ 15 号 | DTMTCOw01_01686N258E0033 | 25.778488 | 3.331070 | 2008/02/24 |
| アポロ 16 号 (a) | DTMTCOw01_00837S085E0161 | -8.489711 | 16.096543 | 2007/12/17 |
| (b) | DTMTCOw01_05176S093E0154 | -9.275111 | 15.442211 | 2008/12/06 |
| (c) | DTMTCOw01_02676S084E0151 | -8.371420 | 15.123084 | 2008/05/15 |
| アポロ 17 号 (a) | DTMTCOw01_00823N200E0310 | 19.939043 | 30.973182 | 2007/12/15 |
| (b) | DTMTCOw01_05161N207E0311 | 20.718622 | 31.100613 | 2008/12/05 |
| (c) | DTMTCOw01_02662N205E0306 | 20.475106 | 30.586603 | 2008/05/14 |

付録 Table3.使用したデータ DEM-単眼視のまとめ

| <DEM> 単眼視 | 使用したデータ ID | 中心緯度 [° N] | 中心経度 [° E] | データ取得日 |
|--------------|--------------------------|---------------|---------------|------------|
| アポロ 11 号 (a) | DTMTCOs01_03002N001E0231 | 0.100112 | 23.061673 | 2008/06/11 |
| (b) | DTMTCOs01_05674N020E0235 | 1.189785 | 23.512262 | 2009/01/15 |
| (c) | DTMTCOs01_05168N005E0237 | 0.433358 | 23.695621 | 2008/12/05 |
| (d) | DTMTCOs01_03500N006E0234 | 0.555745 | 23.408472 | 2008/07/22 |
| アポロ 14 号 (a) | DTMTCOs01_03039S031E3426 | -3.061986 | 342.613566 | 2008/06/14 |
| (b) | DTMTCOs01_03538S042E3430 | -4.255178 | 343.001156 | 2008/07/25 |
| (c) | DTMTCOs01_03539S029E3419 | -2.922472 | 341.913583 | 2008/07/25 |
| (d) | DTMTCOs01_03539S042E3419 | -4.247297 | 341.932922 | 2008/07/25 |
| (e) | DTMTCOs01_07106S041E3423 | -4.166298 | 342.334176 | 2009/05/08 |
| (f) | DTMTCOs01_03538S029E3430 | -2.926333 | 342.979992 | 2008/07/25 |
| アポロ 14 号 (a) | DTMTCOs01_03020N260E0039 | 26.122283 | 3.879244 | 2008/06/12 |
| (b) | DTMTCOs01_05186N265E0040 | 26.505555 | 3.946472 | 2008/12/07 |
| (c) | DTMTCOs01_03518N268E0037 | 26.811140 | 3.718669 | 2008/07/23 |
| アポロ 16 号 (a) | DTMTCOs01_03009S095E0154 | -9.505825 | 15.352038 | 2008/06/11 |
| (b) | DTMTCOs01_03507S088E0160 | -8.822152 | 16.022038 | 2008/07/22 |
| (c) | DTMTCOs01_03508S088E0149 | -8.838048 | 14.943163 | 2008/07/22 |
| アポロ 17 号 (a) | DTMTCOs01_02995N205E0308 | 20.556757 | 30.826168 | 2008/06/10 |
| (b) | DTMTCOs01_03493N206E0308 | 20.509341 | 30.766899 | 2008/07/21 |
| (c) | DTMTCOs01_05667N205E0312 | 19.534921 | 31.174423 | 2009/01/15 |
| (d) | DTMTCOs01_05667N219E0312 | 20.933546 | 31.195325 | 2009/01/15 |

