

(文化財科学研究の最前線 文化財科学一般)

高精度航空測量技術による 3 次元計測

— 航空測量の発展と赤色立体地図による高密度 3 次元データの可視化 —

藤井 紀綱¹⁾・西藤 清秀²⁾・千葉 達朗³⁾

●キーワード：航空写真測量 (aerial photogrammetric survey), 航空レーザ計測 (LiDAR), 赤色立体地図 (red relief image map), モバイルマッピングシステム (mobile mapping system), 3次元モデル (3D model)

1. はじめに

近年、測量技術の進歩による高精度な 3 次元計測や地図作成が実現可能となった。特に高密度な 3 次元計測によるリアルな 3D モデル表現や解析手法が進歩した。文化財の記録や管理においても高精度な測量技術の応用が取り込まれてきた。本編では、地図作成に用いられた航空測量技術の紹介から GPS や航空レーザ計測による 3 次元計測とそのデータの表現法の技術と文化財計測の活用場面を紹介する。3 次元の計測技術には、広範囲を測量する従来手法として、航空測量があげられる。まずは、航空測量の技術発展について説明する。

航空測量とは、航空機による空中からの写真等を用いた地図作成などの測量をいう。航空測量の始まりは、1858 年フランスのナダールによる熱気球からの写真、いわゆる航空写真から始まったとされている。小型の航空機から鉛直下を撮影する航空写真により地図が作成されたのは、1920 年代からであり (図 1), 戦後の米軍写真が日本の国土の変遷を鑑みることのできる遺産である。日本では、1952 年 11 月に戦後初の機体であるセスナ C170 に K-8 型航空カメラを使用して試験撮影が実施された。1954 年にはチャータ機による本格撮影が始まり、

1956 年には航測会社も使用事業免許を申請し、続々と自社機の運航が開始されるようになり、この時代の主力撮影機材は、DC-3 などであった。その後、航空機は、新しい機体に順次入れ替わり、現在までには、固定翼機では、エンジンが単発動機のセスナ 206, 同 207, 同 208 が主力機となり、双発動機であるエアロコマンダー 695 も使用されている。現在の撮影機材は、アナログ航空カメラ (図 2)+GPS・航空レーザ計測機器・航空デジタルカメラ等を主に使用している。また低空では、ヘリコプターに航空計測の機材を搭載してデータ取得して



図 1 手持ち航空カメラによる撮影 (堀江延韶氏提供)
Fig. 1 Aerial photogrammetry by a hand held camera (courtesy of Nobutsugu Horie)

¹⁾ アジア航測株式会社 航空事業部 〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺 1-2-2

²⁾ 奈良県立橿原考古学研究所 〒634-0065 奈良県橿原市畝傍町 1

³⁾ アジア航測株式会社 社会基盤開発センター 〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺 1-2-2

いる。

航空写真測量は、航空写真を実体視（物を立体的に見ること）し、同じ場所を違う角度から撮影した2枚の写真を幾学的にかつ精密に解析することによって、航空写真に写っているさまざまな地物を正確に計測する測量手法である。人の立ち入りが困難な場所や広大な範囲の地形や面積を測量することが可能で、主にセスナ機等の固定翼機を使用して写真撮影を行い、空中三角測量に基づいて、図化機を使用して測量図面や地図を作成する（図3）。空中三角測量とは、オーバーラップされて撮影する写真中に座標が既知である三角点を配点し、そこから複数の基準点を設置して、2枚の写真の撮影位置と3軸の傾きを計算で算出する技術である。3次元の立体モデルを再現して計測するため、現地に対空標識という白板を設置して写真上に示さなければならなかった。しかしながら、最近では、GPS（Global Positioning System）やIMU（Inertial Measurement Unit）の開発と発展により、撮影時の空間位置や航空機の傾きが計測、記録可能となったため、対空標識の設置作業が 航空測量は、都市計画、総合開発、河川測量、水路調査、森林開発、耕地整理、環境調査、道路調査、現況調査、緑地調査、遺跡調査、地域開発などを目的とした、諸計画の推進に威力を発揮している。また今日では、GPS/IMU の発展により、レーザスキャナを航空機に搭載する新技術も開発された。そこで本稿では航空測量により収集した3次元情報等を文化財の分野への利活用した例を測量技術とともに紹介する。

2. GPS から GNSS

2.1 GPS

GPS とは、Global Positioning System の略で、日本語では、全地球位置観測システムと呼ばれている。GPS はアメリカ国防総省により軍事目的で開発され、1990 年代からは、民間利用も可能となった。GPS 衛星は、地球を6つの軌道で地上 20,000 m の高度を周回し、各軌道には最低 4 個の衛星が等間隔で回り、全地球を 24 個の衛星でカバーしている。よって、地球上どこの場所でも GPS 電波が受信可能となった。

GPS は、カーナビゲーション、携帯電話の位置探索

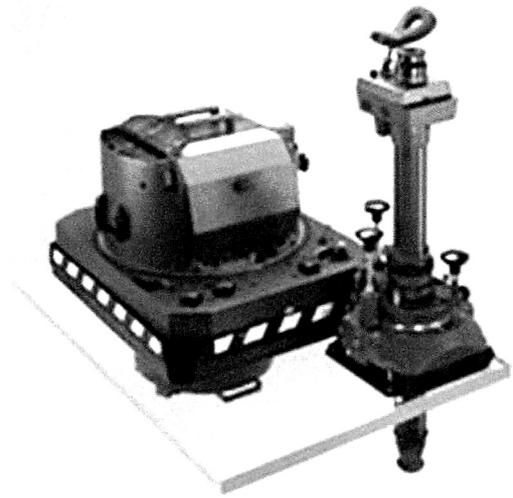


図2 アナログ航空カメラ (Leica RC30)
Fig. 2 Aerial film camera (Leica RC30)



図3 PC 図化機による地図作成
Fig. 3 Mapping by PC stereo plotter

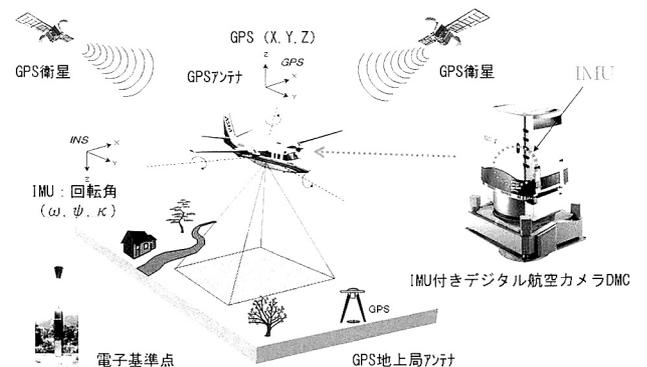


図4 GPS/IMU とデジタルカメラによる航空写真測量
Fig. 4 Photogrammetry by GPS/IMU & digital camera

に利用されるようになり、より生活に身近なものとなった。測量で使用するGPSは、携帯電話の単独測位方式とは解析方法が異なる。単独測位方式では、平面位置誤

差が数 m から 10 数 m 程度であるのに対し、測量の GPS は、座標値がわかっている基準点での GPS 受信電波と計測したい場所での GPS 受信電波を相対的に解析することで、数 cm の精度で観測することが可能である。樹林の中やビルディングが多く、天空が開けていない地域など、GPS 電波を良好に受信できない場所では利用できない。GPS の観測には、表 1 のようにいくつか測位方式がある。(長谷川・川端：2010)

2.2 電子基準点

電子基準点とは、国土地理院が全国に 1,200 地点以上の GPS アンテナを設置した、24 時間連続位置情報を観測している基準点を云う(図 5)。それにより、予め座標がわかっている三角点などの既知点にアンテナを設置しなくとも、計測したい地点でアンテナによる GPS 電波を受信し、座標を算出することが可能となった。また、携帯電話の普及に広まり、モバイル環境が好転したことから電子基準点を基地局として、携帯電話で電子基準点の補正情報を移動局へ転送してリアルタイムに解析する方式の RTK-GPS 測量 (Real Time Kinematic GPS) が可能となった。本方式により、移動局アンテナを持って計りたい場所を移動するだけで、リアルタイムにその場所の座標を読み取ることができる。航空機搭載の航空デジタルカメラで撮影する写真や航空レーザ計測では、機体の上部に GPS アンテナを取り付け、写真の撮影箇所の座標やレーザ計測点の座標算出に地上の電子基準点データを用いたキネマティック方式で面的な広域測量を実現している。

2.3 GNSS

GNSS とは、Global Navigation Satellite System の略で、GPS は、アメリカの打ち上げた衛星のみを使用しているシステムであるのに対し、GNSS は、ロシアの Glonass、イタリアの Galileo 衛星他を合わせた、全ての衛星を使用した位置観測システムである。より多数の衛星の電波を受信することで、精度を確保するものである。よって最近では、従来の GPS 技術のことは、GNSS と呼ばれるようになった。

表 1 GPS の測位方式と特徴

Table 1 GPS positioning methods and their features

測位方式	精度	特徴
単独測位	±10 m	カーナビ、携帯の地図で利用
DGPS	±1 m	固定局の変異量で移動局を補正
STATIC	±10 mm	最も高精度な測位
Kinematic	±数 cm	RTK 機能で工事測量に利用

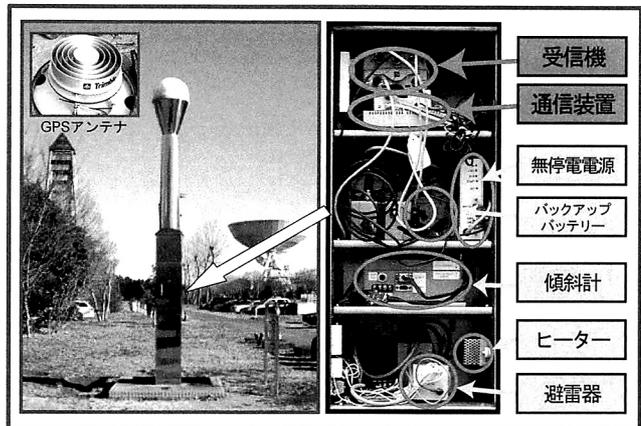


図 5 電子基準点と機器構成 (国土地理院 HP より引用)

Fig. 5 Electronic reference point and configuration (quoted from the Geographical Survey Institute HP http://terras.gsi.go.jp/gps/gps-based_control_station.html)

2.4 今後の展開

わが国では、2011 年に準天頂衛星「みちびき」が打ち上げられ、試験的に運用されている。8 の字軌道で地球上を周回し、特定の地域の上空に留まる時間が長い。準天頂衛星の主な目的は、「補完機能」と「補正機能」であり、準天頂衛星を天頂付近に配置させ、GPS 衛星の互換信号を送信することで、都市部や山岳地形の谷間などの測位において、衛星の幾何学的配置を改善することが目的であり、この衛星を特徴づける機能である。

3. 航空レーザ計測 (Airborne LiDAR: Light Detection and Ranging)

航空レーザ計測は、航空機から地上に向けて照射したレーザパルスによって地表面の 3 次元データを高精度に取得する技術である。近年、防災、環境など、測量以外の多方面の分野で利用されるようになった。本技術の原理と特徴を紹介する。

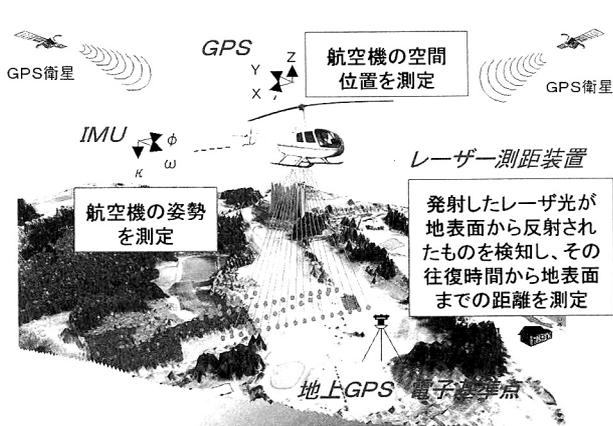


図6 航空レーザー計測の概略
Fig. 6 Outline of Airborne LiDAR Survey

3.1 計測原理

航空レーザー計測は、航空機搭載型のスキャン式レーザー測距装置を用いて計測される。航空機に搭載された装置は、GNSS受信機を内蔵しており、地理座標が既知である電子基準点など地上基準局で受信したGNSSデータと照合することで、航空機の位置を高精度に算出することができる。また、航空レーザーはIMU (Inertial Measurement Unit) を内蔵しており、航空機の姿勢を計測することでレーザー光の照射方向、照射位置を高精度に把握することができる。一方、レーザー光は高頻度で発射されながら反射ミラーにより左右にスキャンするため、航空機の進行にともないフットプリント (レーザー光が地上に当たった点) がジグザグに並ぶことになる。この1発ごとの計測点を座標化することで、地表面や地形の形状データを取得することができる。さらにデジタルカメラも搭載可能で、画像撮影時の航空機位置での座標と姿勢 (回転要素) が取得できるため、オルソフォトの作成や図化作業を簡便に行うことが可能である。図6に航空レーザー計測の概略を示す。

3.2 レーザパルス

地表までの距離は、航空機から地上に向けてレーザー光を照射し、反射して返ってくるレーザー光を検知し、その往復の時間を測定することにより求める。発射されたレーザー光の一部が樹木や植物などの地物に、残りが地表面に当たった場合、反射パルスは複数となる。その最初に当たったパルスをファーストパルス、最後をラストパルス、

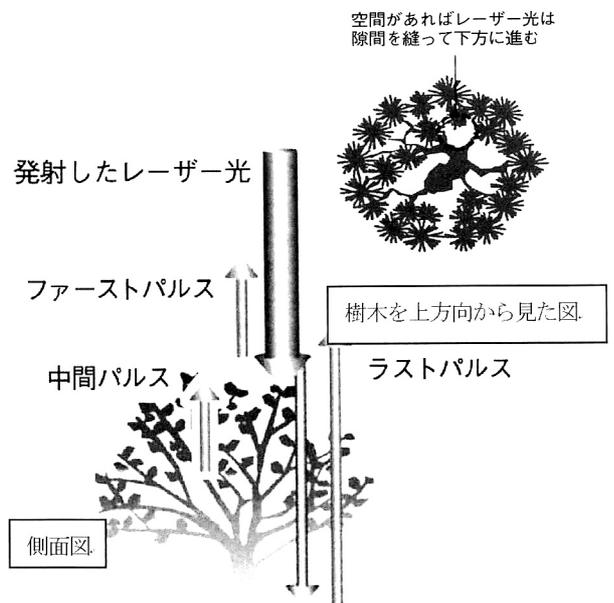


図7 レーザパルスの反射概略図
Fig. 7 Various reflections of emitted laser pulse



図8 航空機レーザー計測のコントロールユニット (奥) とセンサーヘッド (手前)
Fig. 8 Control unit (back side) and sensor head (near side) of airborne LiDAR

その間を中間パルスという (図7)。樹冠や建造物等の被覆物を計測する場合はファーストパルスを使用して座標値を算出する。地形を計測する場合は、ラストパルスを使用して座標値を算出する。

3.3 システム構成

計測システムの基本的構成は、レーザー本体とデジタルカメラ、IMUを組み込んだセンサーヘッド部、信号処理装置及びナビゲーション装置からなる。図8にセンサーヘッドとコントロールユニットを示す。最新のレーザーの発射頻度は一秒間に10万発のパルスを発射するこ

表2 航空レーザ計測装置 ALS60 (Leica) の仕様

Table 2 Specifications of Leica ALS60 airborne laser scanner

形式	ALS60
運用高度	200~5,000 m
観測幅	1610 m (対地高度 2000 m, 走査角 44 度)
最大パルス数	200,000 Hz
高さ精度(1σ)	10 cm(対地高度 2,000 m)
水平精度(1σ)	25 cm(対地高度 2,000 m)
走査角	最大 75°
パルスモード	ファースト/ラスト/中間パルス同時取得
レーザ反射強度	取得可
搭載カメラ	カラー・赤外デジタルカメラ (3,900 万画素)
製造会社	Leica Geosystems (スイス)

とができ、対地高度も 3,000 m 以上で測定可能である。例として航空レーザ計測装置 (Leica ALS60) の仕様を表 2 に示す。

3.4 航空レーザ計測の特徴

(1) DSM と DEM

レーザ計測点群データには、地表面以外にも樹木・構造物など様々な地物が含まれている。すべての計測点データからノイズや樹木等の被覆物のデータを除去して地形を抽出する処理をフィルタリング処理という。地形抽出フィルタリング処理では、ラストパルスデータに統計的手法や周波数解析などによって地物を除去し、地形データを作成する。地表及び地形を示す点群データに対して内挿計算をすることにより、DSM (Digital Surface Model: 被覆物の表層メッシュデータ) と DEM (Digital Elevation Model: 地盤高のメッシュデータ) が作成される (図 9, 図 10)。

(2) 航空写真測量との比較

航空レーザ計測は、従来の航空写真測量と比較して以下の特徴がある。

- ・ 森林地帯でも樹木下の地形計測が可能。
- ・ 天候条件が緩く計測機会が増す。
- ・ 基準点不要で現地作業がほとんどない。
- ・ 直接デジタルデータを取得するので、計測後のデータ処理が迅速に行える。
- ・ 機械的誤差だけで、人為的な誤差が入らない。

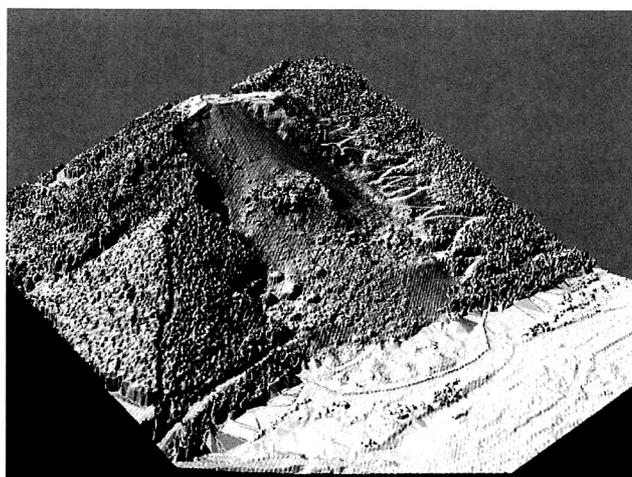


図 9 DSM の例
Fig. 9 Example of DSM

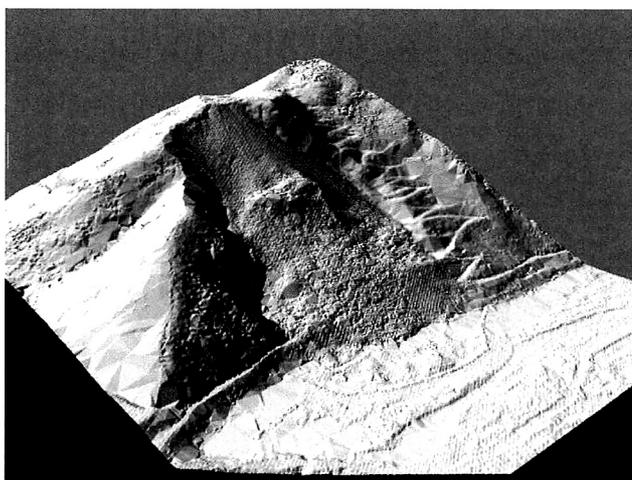


図 10 DEM の例
Fig. 10 Example of DEM

(3) 応用

航空レーザ計測は、広範囲を高密度位置形状情報として取得するため、地形測量のためだけではなく、都市計画 (構造物形状, 景観等), 災害 (地震, 火山, 津波, 地すべり等) 対策, 水資源管理 (積雪量, ダム水等), 河川管理 (内水氾濫等), 生物環境 (樹高, バイオマス等) 調査, 施設設計 (道路, 送変電所等) など, 多方面で利用されており, さらなる今後の発展が期待される。

4. 赤色立体地図 (RRIM: Red Relief Image Map)

4.1 背景

従来, 地図における地形表現手法として, 最もよく用いられるのは, 等高線であった。等高線は地形面と水平

面の交線の位置を平面図上に示したものであり、客観的に優れた方法である。さらに等高線の背景に「ぼかし」画像を重ね、地形をより立体的に表現することもしばしば行われてきた。

最近航空レーザ計測技術（Airborne LiDAR）が急速に発展し、高精度の地形データが得られるようになってきた。LiDARによる地形データのメッシュサイズは、1 m 程度と小さく、高度も数十 cm 程度の精度を持つ。このような高密度・高精度・広範囲のデータを実用的に数千分の一程度の等高線で表現するのは困難であり、また既存の地形可視化手法でも十分に表現しきれていない問題があった。

このような背景から、2002年富士山麓部の航空レーザ計測後の地形表現検討の中で「赤色立体地図」（図11）が千葉により発案された（千葉・小山：2002）。これは、コンピュータグラフィックス（CG）における、環境光の考え方を地形表現に適用したもので「ぼかし」として等高線の背景図に利用するだけでなく、地図のように利用可能な新しい地形可視化手法であった。

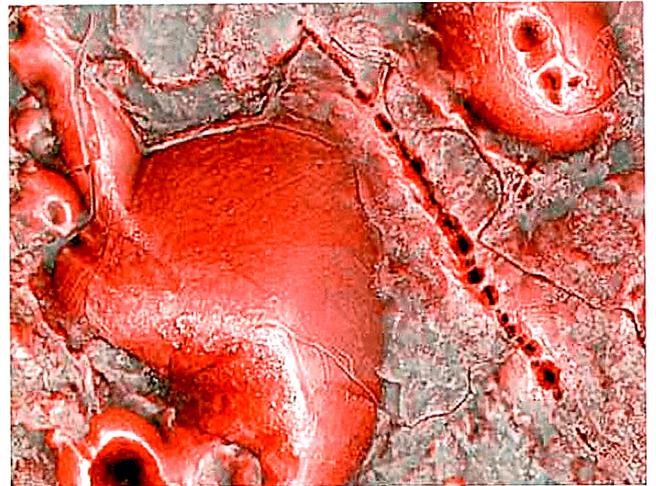


図11 富士山青木が原水穴火口列赤色立体地図
Fig. 11 RRIM of crater row in Aoki-ga-hara, Mt.Fuji

4.2 等高線表示の問題点

従来の航空測量による地形図作成では、図化機で実態視しながら等高線を描くのであり、一般的には等高線間の高度は測定しない。等高線間の任意の1点の高度は、両側の等高線から内挿補間によって読み取る。ところが、LiDARなどの測定データから計算で等高線を作成する場合、緩斜面では等高線高度と一致しないために隙間を生じることがある。地形表現として等高線を用いる場合、この隙間部分の任意の1点の高度を知るには、実測値が存在するにもかかわらず、等高線から内挿補間で求めることになる。これでは取得されたデータの精度がいかされていらないことになる。

このような問題は、等高線の性質によって生じる。斜面傾斜と図面上での等高線間の隙間に着目して整理したダイヤグラムを図12に示す。斜面が急になるにつれ、等高線間の距離は狭くなる。傾斜70度になると、等高線の間隔が広がり、傾斜3度では間隔が1 cmに達する。傾斜0度では $\tan \theta$ は無限大となる。平野の地形を等高線で表現することは困難であり、等高線から平野の微

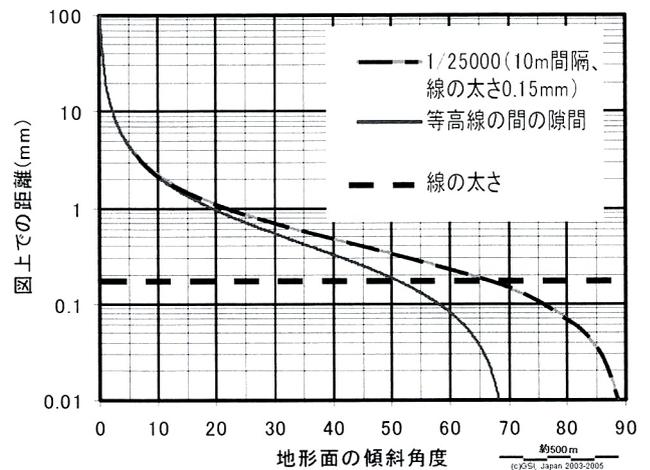


図12 斜面傾斜と図面上での等高線間隔距離の関係（1/25,000地形図の主曲線の場合、線幅0.15mm）（千葉・鈴木（2004）を一部改変）。

Fig. 12 Relation between slope inclination and contour interval on the drawing with a line width of 0.15mm in a scale of 1/25,000 topographic map (Chiba and Suzuki: 2004)

地形を読み取るのが難しいことは、よく経験することである。

この図から、等高線による緩傾斜部の地形表現力を向上させるためには、等高線間隔をできるだけ狭くすればよいことがわかる。一方で、急傾斜の等高線どうしの接合を避けるためには、線を細くするか図面縮尺を大きくすることになる。LiDARによって取得された1 mメッシュの地形データを測定精度を生かして表現するには、1/500程度の大縮尺とせざるをえない。範囲が広ければ図面数も膨大となり、現地調査には使いにくい。したがって、LiDARによる高精度の地形データの利活用のため

には、等高線以外の地形表現が必要となる。

4.3 地形可視化フィルタ

DEM データをもとに、地形を可視化する手法には、陰影図、斜度方位区分図、高度段彩図、ラブラシアン図、地上開度図、地下開度図などの各種フィルタ画像がある。これらの画像には、それぞれ一長一短があり、1枚ですべての地形特性を表現することは難しい。いくつかの画像を見比べあるいは合成し、総合的に理解することが必要である。

一般に地形面は、ひと組の (x, y) 値についてひとつの z 値しかもたない。これは写真等のデジタル画像と共通の2.5次元データ構造である。したがって、高度を輝度に変換すれば、地形を画像として取り扱うことも可能で、Photoshopなどの画像処理ソフトウェアによる高度な画像処理も可能となる。以下、代表的な画像処理フィルタについて解説する。

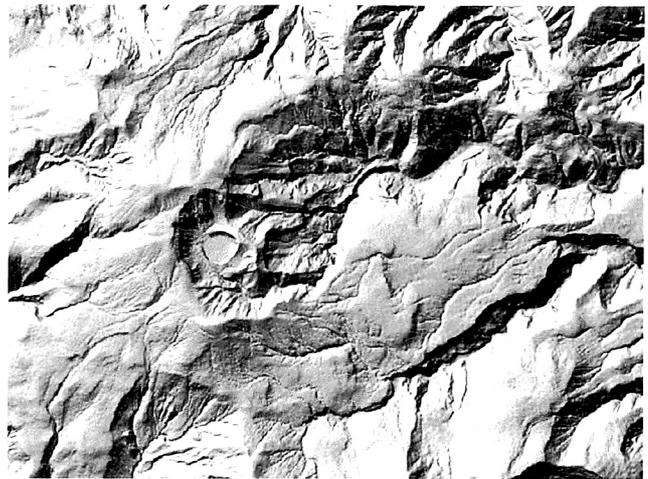
(1) 陰影図

直射日光に照らしだされたような画像であり、一般的に大地形はわかりにくい表現である。地形面の法線ベクトルと太陽光のベクトルの余弦から、反射率を求め陰影図とする。太陽光に地形面が正対しているほど明るく表現される。太陽高度を低くするとコントラストが大きくなり、微地形をより強調することができる(図13(a))。

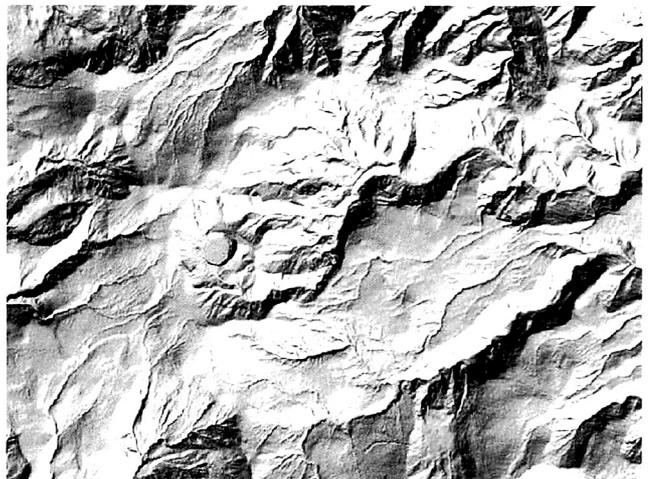
強い方向依存性があり特定方向の地形を選択的に強調するため、すべての微地形を把握するために光源の方向などを様々に変化させて比較することがよく行われる。影を計算するとさらに立体感が強まるが、影が投影された部分の地形が判読しにくくなる。光源が下辺方向から当たった場合には地形が反転して見えることもある(図13(b))。机上に地図をおいて周りを取り囲んで議論するような場合、陰影の方向と見る方向が理想的な側の人と、理想的でない側の人との間で、凹凸の判断が反転し、議論に混乱が生じる可能性がある。

(2) 斜度図

斜度図は、微分画像とも呼ばれることがある。地形面の法線ベクトルの垂直成分から傾斜を求め、明度と反比例させて表現する。傾斜と等高線密度との関係に類似し、直観的に理解しやすい。カラーテーブルに対応つけるこ



(a) 北西太陽高度 45 度



(b) 北東太陽高度 45 度

図13 国土地理院10mメッシュ数値標高モデル「蔵王」から作成した陰影図：(a)北西太陽高度45度、(b)北東太陽高度45度。

Fig.13 Shaded relief map around Mt.Zao created by using 10m-grid DEM of Mt.Zao provided by Geospatial Information Authority of Japan:

(a) illuminated from northwest in solar altitude of 45°,
(b) illuminated from northeast in solar altitude of 45°

ともある(図14)。

斜度図には、陰影図のような方向依存性がなく、あらゆる方向の地形の特徴をよく表現できる。微地形を強調するが、大地形は明瞭ではない。しかし、斜度図だけでは周囲と比較して高いのか低いのか、尾根なのか谷なのか区別がつかないという問題がある。たとえば、円形の丘なのか窪地なのかを斜度図のみから判定することはできない。

(3) 高度段彩図

古くから地図帳などの小縮尺地形図に使用されてきた手法である。高度と色相を対応させたカラーパレットを

用いる。一般的に大地形分布を表現するには適した方法であるが、微地形は表現できない。また、色数を増やしても識別に限界があるためにグラデーション的表現を用いる場合と、色数を限定して等高線を遠方から認識しやすくする場合がある。表現したい地形特性に合わせて、カラーパレットと高度の対応関係を微調整すると、非常にわかりやすい画像が作成できる。小縮尺の地形図や平野部、海底地形図など、相対的に高度変化の少ない地形に適している。

4.4 赤色立体地図の作成

(1) 地上開度と地下開度 (横山・白沢・菊池：1999)

地上開度と地下開度のフィルタは、大地形を表現するフィルタであり、任意の地点から空の広がり表現しようとしたフィルタである。地上開度は、着目点を中心とする考慮距離までの地表面について、着目点における天頂から地平線までの角度を8方向測定し平均したものである。一方地下開度は、着目点における鉛直下法にある天底と地表面との角度の最低のものを8方向測定し、平均したものである。いかえれば、地下開度は、あらかじめ地形反転させて計算した地形開度とも言う。地上開度を明度と比例させて作成した地上開度画像は、尾根筋が白く強調されるが谷筋はぼやけた表現となる(図15)。全体に方向依存性のないレリーフのような立体感がある。

一方、地下開度を明度と比例させて作成した地下開度画像は、谷筋の部分が白く強調され、尾根筋ぼやけた表現となる(図16)。これらの画像は、着目点の近傍で最大角度や最小角度をとる場合には微地形が表現され、遠方で最大角度や最小角度をとる場合には、結果的に大地形に微地形を同時に表現することができる。地上開度画像は、天空光(環境光)に照らし出された白色完全不透明の地形表面に類似し、尾根を明るく表現する。地下開度画像は、同様の環境光下の半透明で内部散乱可能な地形表面の明るさに類似し、谷を明るく表現する。

(2) 尾根谷度

地上開度図と地下開度図は、大地形と微地形を同時に表現するこれまでにない画像であるが、地形を把握するために2枚の画像を1枚に統合することで、両方のフィ



図14 斜度図
Fig. 14 Slope map



図15 地上開度図(開度考慮距離1000m)
Fig. 15 Ground openness map with a radial limit of 1,000m

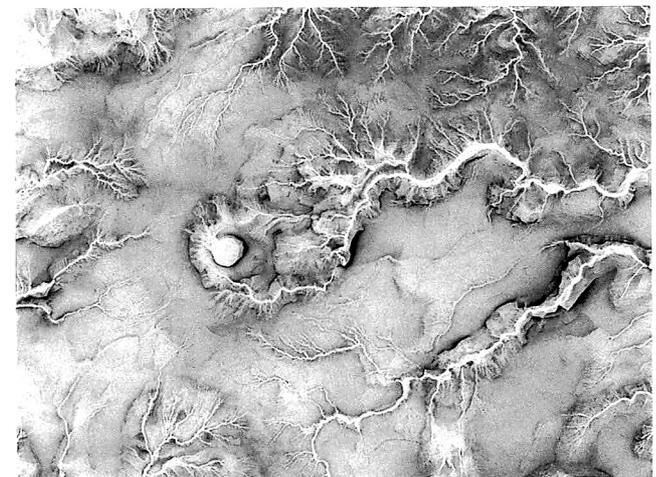


図16 地下開度図(開度考慮距離1000m)
Fig. 16 Underground openness map with a radial limit of 1,000m

ルタ画像の長所を取り入れた画像が導入された。これが尾根谷度図である。

地上開土と地下開土の間には明瞭な反比例関係がある(図17)。この関係は、考慮距離が短くなるほど強くなる。尾根部では地上開度が大きく、谷部では地上開度が小さく地下開度が大きい。また、地上開度と地下開度の合計値と傾斜の間に、弱い比例関係があり、傾斜が緩い場合には地上開度も地下開度ともに90度に近づく傾向がある。地上開度は天頂と地形断面の上側接線の角度、地下開度は、天底と地形断面との下側接線の角度である。したがって、地下開度と地上開度の差は、尾根なのか谷なのかの尺度となる。そこで、尾根谷度を

$$\text{尾根谷度} = (\text{地上開度} - \text{地下開度}) / 2$$

と定義する(千葉・鈴木:2004)。この計算により尾根谷度図が作成できる。

(3) 赤色立体地図

尾根谷度は、広い平面上地形では、水平面も斜面も0という値をとり、傾斜を表現することができない。尾根谷度というパラメータは、図18では、右下45度方向に向かう軸に投影した値とみなすことができる。これに対し、傾斜は軸に対し垂直方向に変化するので、傾斜と尾根谷度を独立して識別できるカラー合成を行い図化すれば、大地形も微地形も表現できる画像が作成できる。

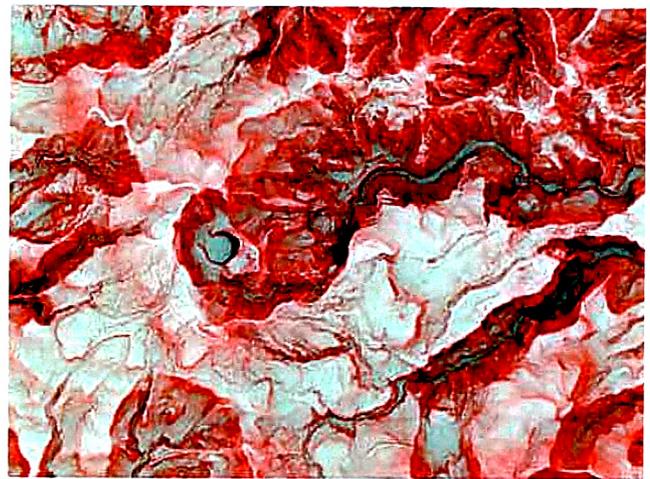


図18 赤色立体地図
Fig. 18 Red Relief Image Map(RRIM)



図19 有珠山2000年噴火西山西麓火口群
Fig. 19 Craters on the west foot of Nishiyama, Mt. Usu

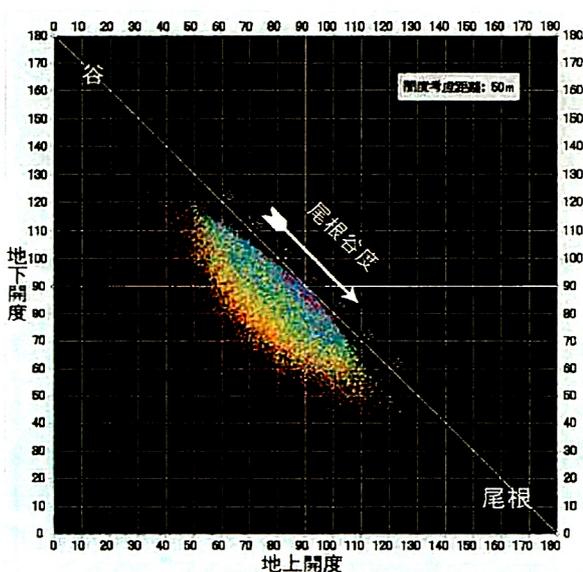


図17 地上開度と地下開度の関係
Fig. 17 Relation between ground openness and underground openness



図20 新潟県長岡市(旧山古志村)虫亀付近の棚田地形
Fig. 20 Rice terraces at Yamakoshi-Mushikame, Nagaoka, Niigata Pref.

尾根谷度を明度に、傾斜は赤の彩度に比例させた画像を乗算合成した時に、最も地形特性をわかりやすく表現することができる（千葉・鈴木：2004）。この画像には、安定した立体感もあり、しかも微地形も大地形も認識できる画像で、これが「赤色立体地図」である（図18）。全ての色相について同様な画像を作成することが可能であるが、最も立体感が強く感じられる色は赤である。

図19, 20に、有珠山西山西麓火口群と新潟県長岡市（旧山古志村）虫亀地区の棚田地形の赤色立体図を示す。
 (4) 3Dビューワ

赤色立体地図は2次元の画像でありながら、3次的に視覚に訴えかける画像となる。さらに、赤色立体画像をDEM（数値標高モデル）に貼り付け、3Dビューワによる表示も可能となる。この表示は大変リアルであり、空からの地形データと画像を組み合わせたモデル中に降り立ち地上真横から対象物を見ることなども可能であり、臨場感あふれた画像を作成できる（図29）。航空レーザ計測+赤色立体地図+3Dビューワという最新技術のコラボレーションで実現された。

5. 古墳の航空レーザ計測

大型古墳の測量図の大部分は戦前に作成されているが、測量図から得られる地形情報は、考古学の観点からみて極めて重要である。しかしながら、大型古墳の詳細な測量は容易ではない。地上測量による場合、現地への立ち入り許可などの制約があるだけでなく、樹木など障害物により作業に困難を伴う場合がある。そこで、精密な地形情報を得るため、航空レーザ計測の適用が検討された。過去に大型古墳を対象とした航空レーザ計測は行われておらず、榎原考古学研究所とアジア航測の共同研究により、初めてヘリコプター搭載型航空レーザ計測が実施された。その結果、非常に貴重な大型古墳である御廟山古墳・コナベ古墳、箸墓古墳、西殿塚古墳、また新沢千塚古墳群の詳細な地形情報が取得された（西藤・藤井：2010）（藤井ら：2011）（佐田ら：2012）（Fujii *et al.*: 2012）。以下その成果のいくつかを紹介する。

5.1 ヘリコプター搭載型航空レーザ計測

ヘリコプターの場合、固定翼より低対地高度で飛行し、



ヘリコプター底部にレーザ計測システムを搭載。

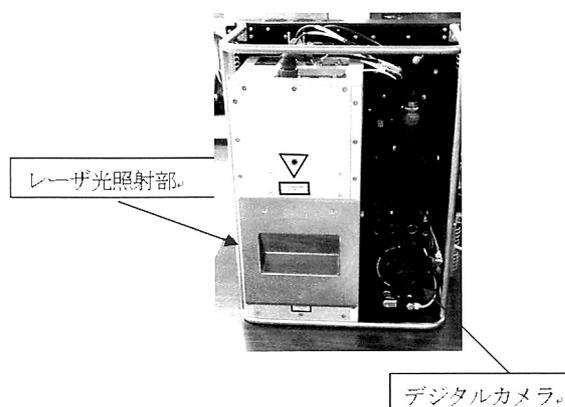


図21 使用されたヘリコプターと航空レーザ計測機器
 Fig. 21 Helicopter and Airborne LiDAR system

多数のレーザ光を照射するため、高密度の計測を行うことができる。高密度で計測できることにより、樹木内の地盤面に多くのレーザ光が届き、より詳細な地形形状を捉える。使用されたヘリコプター（ロビンソン社製 R44）とレーザ計測機器（TopoSys 社製 Harrier56）を図21に示す。

5.2 御廟山古墳とコナベ古墳

御廟山古墳の航空レーザ計測は、2010年2月21日に、コナベ古墳は2009年12月7日に、表3の計測諸元にて実施された。両古墳とも樹木が鬱蒼としており、濠の外側から一部墳丘内の裾の地表面を確認できる程度だった（図22）。そこで、古墳を「井」字状に4測線からレーザ計測を行う手法が採られた。同一地点に対して4方向からレーザ光が照射されることで、地盤へのレーザ光の進入角度が変わり、樹木の陰になり計測できない箇所も、均一な地盤データが取得できる。また、樹木の表層、中間層のデータも取得でき、墳丘上に植生する樹木の繁茂

表3 御廟山古墳とコナベ古墳の航空機レーザー計測諸元
Table 3 Specifications of airborne LiDAR survey at Gobyoyama and Konabe mounded tombs

	御廟山古墳	コナベ古墳
計測年月日	2010年2月21日	2009年12月7日
コース数	4コース	4コース
計測高度(m)	対地500m	対地650m
パルス発射数	180kHz	120kHz
スキャン角	±30度	±30度
飛行速度	70km/h	70km/h
レーザー計測点密度	30点/m ²	10点/m ²



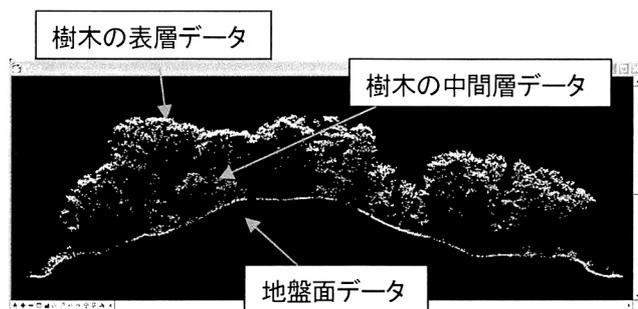
図22 御廟山古墳
Fig. 22 Gobyoyama mounded tomb

状況も断面図ほかにより把握することができる。(図23, 図24)

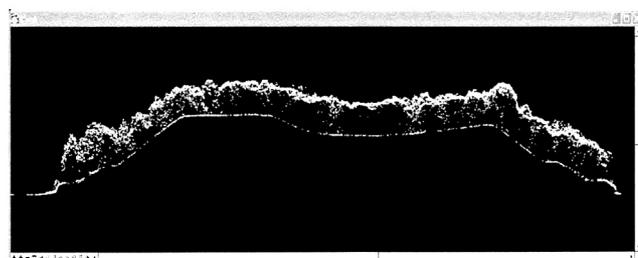
(1) 御廟山古墳

御廟山古墳は、大阪府堺市北区百舌鳥本町に所在し、墳丘部は百舌鳥陵墓参考地として宮内庁に管理されている。この古墳は、前方部を西に向けた前方後円墳であり、百舌鳥古墳群の一部を構成し、その規模は本古墳群内で4番目に相当する。2008年には宮内庁と堺市により墳丘と濠の一部の調査が実施された。この調査により御廟山古墳が5世紀中ごろに築造され、墳丘の規模が全長約200mであることが判明した。またこの古墳は3段築成であり、南側くびれ部には造り出しがあり、墳丘各段の斜面には葺石が、平坦部には埴輪が巡らされ、墳丘の周囲には濠が2重に設けられている。

航空機レーザー計測でえられた地盤面データの赤色立体地図を図25に示す。2008年に、宮内庁が墳丘を、堺市が濠から外側の測量を実施し、測量図を作成しており、このデータを使用して、レーザーデータの精度検証を行っ



(a) 墳丘主軸直交方向断面



(b) 墳丘主軸方向断面

図23 コナベ古墳のレーザー反射点データ

Fig. 23 Laser reflection points of Konabe mounded tomb: (a) across the principal axis, (b) along the principal axis.

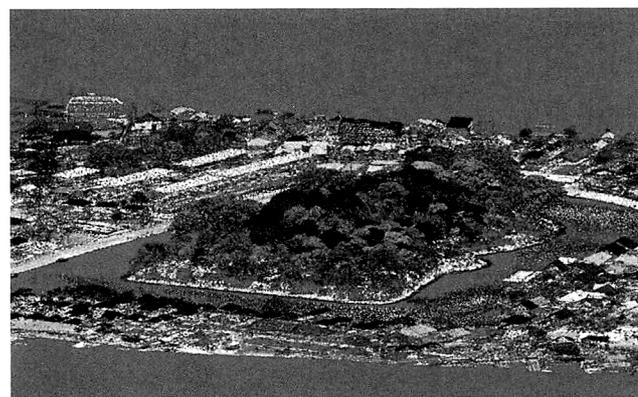


図24 コナベ古墳のレーザー強度データ(鳥瞰図)

Fig. 24 Laser intensity data of Konabe mounded tomb (bird's-eye view)

た。図26に、地上測量の等高線とレーザーデータの等高線を重ねた図を示す。後円部および前方部の最高標高点の高さを比較した結果、誤差が数cmであったが、平面の形状でもほとんど差異がないため、レーザーデータは現地測量と遜色ない精度を確保していると考えられる。ただし、墳丘内の樹木を伐採した際に、処理木が集積された場所があり、等高線に違いが生じている(図26(b))。

(2) コナベ古墳

コナベ古墳は、奈良県奈良市法華寺町に所在し、小那辺陵墓参考地として宮内庁に管理されている。この古墳

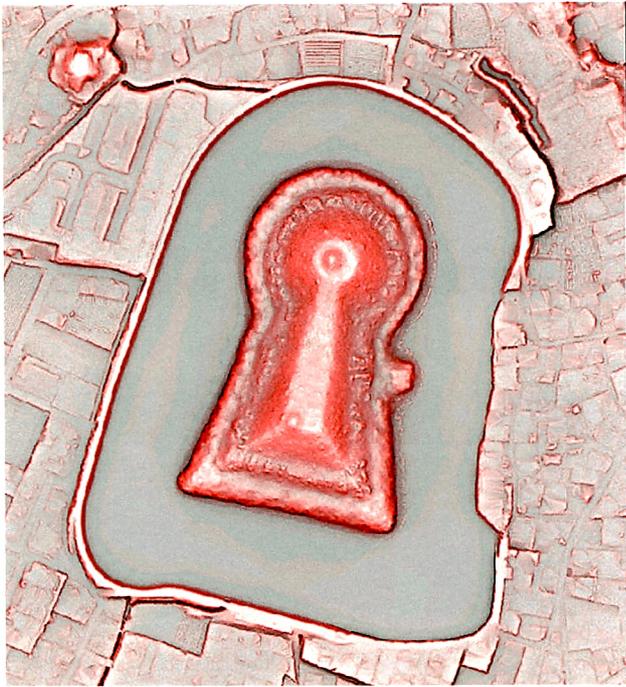


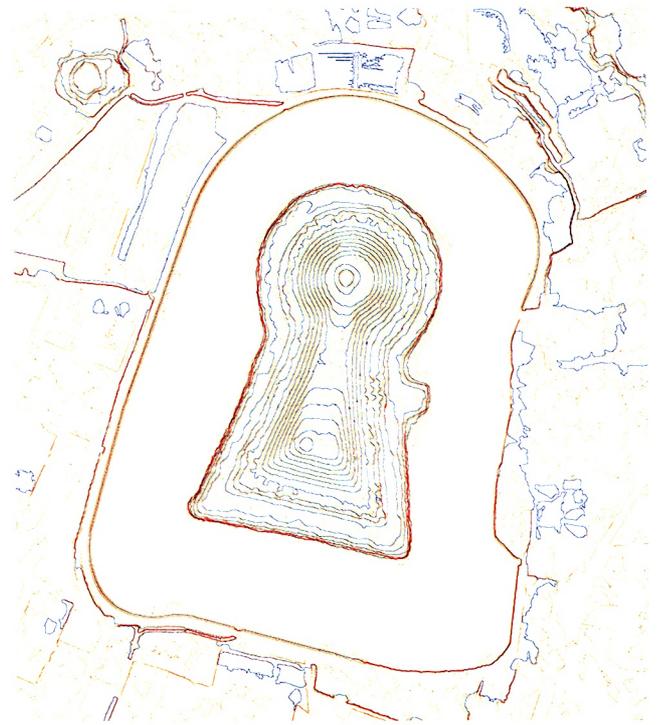
図 25 御廟山古墳赤色立体地図
Fig. 25 RRIM of Gobyoyama mounded tomb

は前方部を南に向けた前方後円墳であり、佐紀盾列古墳群の一部を構成している。この古墳には濠が巡り、その外側には堤に沿って陪塚が築造されている（図 27）。5 世紀前半の築造とされ、墳丘は 3 段に築成され、東西のくびれ部には造り出しが設けられている。現在公表されている墳丘の規模は、全長約 204 m、後円部径約 125 m、高さ約 20 m、前方部幅約 129 m、高さ約 17.5 m であり、近年の調査では堤や陪塚が奈良時代の庭園として利用されていることが判明している。2009 年秋の西造り出し部の調査では円筒埴輪のほか、柵形埴輪、蓋形埴輪、家形埴輪等の形象埴輪が検出された。

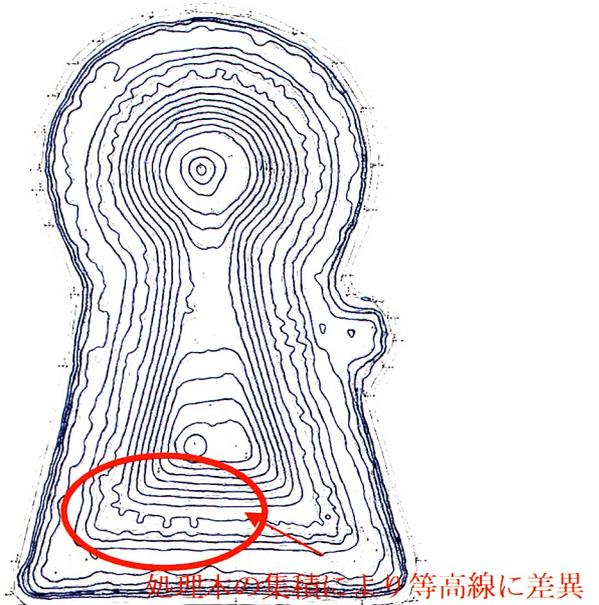
航空レーザ計測の赤色立体地図を図 28 に、その 3D 表示を図 29 に示す。後円部墳丘の小さな高まり、後円部墳頂へ至る道や西造り出しの方形の高まりが確認できる。また、古墳周辺部では古墳を取り囲むように段丘上に立地する陪塚等が明瞭に表示され、新たなコナベ古墳像を見ることができる。（藤井・吉永：2010）

5.3 新沢千塚古墳群

新沢千塚古墳群は、奈良盆地の南部、橿原市川西町、鳥屋町、北越智町に位置する小丘陵に密集するように築造されている（図 30）。この古墳群は、4 世紀後半から



(a) 等高線図



(b) 墳丘拡大図

図 26 御廟山古墳における地上測量と航空機レーザ測量の比較
(青色：レーザ計測等高線)

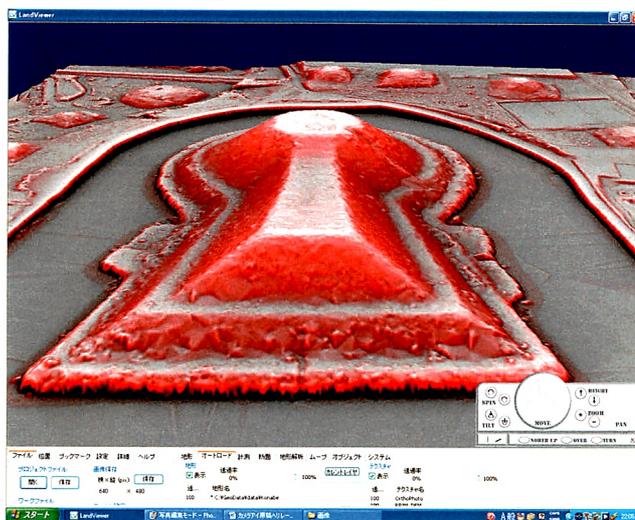
Fig. 26 Comparison between ground survey and airborne LiDAR survey at Gobyoyama mounded tomb (blue line: LiDAR data): (a) Contour map, (b) Close-up map of the mound.

6 世紀中頃に築造され、直径 10 m から 15 m の円墳を中心に、前方後円墳や方墳を含む約 600 基あまりから構成される。

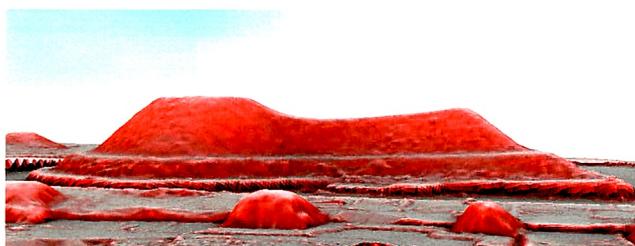
1960 年代初めの日本政府の農業生産拡大政策の中、



図 27 コナベ古墳のデジタル航空写真
Fig. 27 Digital aerial photograph of Konabe mounded tomb



(a) 鳥瞰図



(b) 側面図

図 29 コナベ古墳赤色立体地図の3Dビューワによる表示
Fig. 29 Display of RRIM of Konabe mounded tomb by 3D viewer: (a) Bird's-eye view, (b) Side view.



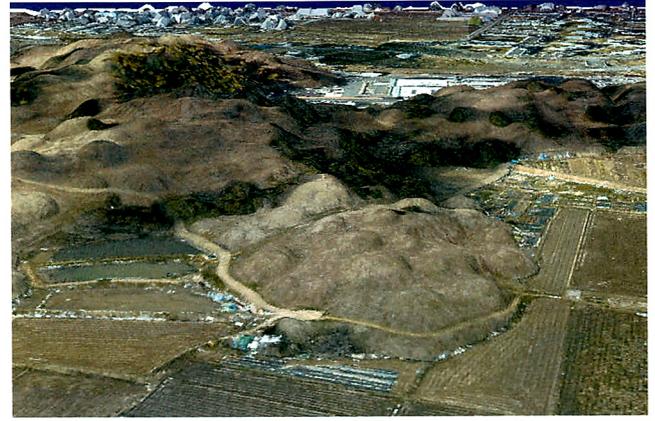
図 28 コナベ古墳の赤色立体地図
Fig. 28 RRIM of Konabe mounded tomb

古墳を守るべく約 130 基の古墳が発掘された。この発掘調査をとおして小規模古墳の群構造や築造過程，さらに大陸からもたらされた副葬品の存在が明らかになった。その結果，1976 年には，ほとんど古墳群全体にあたる 124,427 m² が国史跡に指定された。

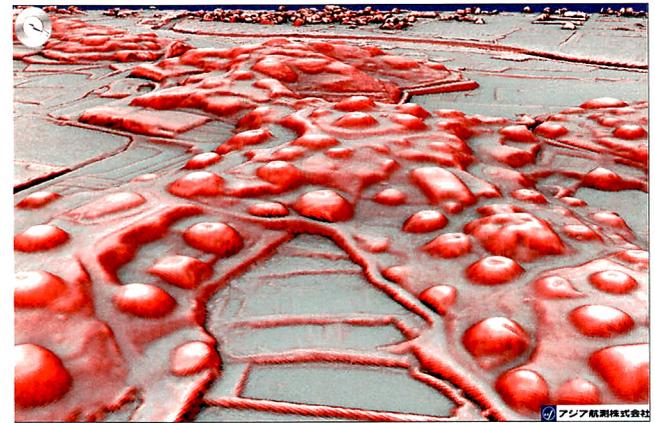
ヘリコプター搭載レーザ地形計測は，2011 年 3 月 10 日に実施された。飛行高度 500 m，飛行速度 70 km/h，古墳群上空を北西－南東方向に，7 コースで計測された。レーザは，1 秒間に 18 万回発射される。良質なデータを取得するため，同一地点に 3 方向からレーザを照射するようコースの重複率をあげてレーザ光の地盤への到達率を高め，1 m² あたり 30 点以上のデータを取得し，詳細な地形データを取得した。得られたデータは，既存の地上測量との比較では，高さで数 cm 以内の差であった。結果の赤色立体地図を図 31 に示す。また，3D ビューアシシステム「LandViewer」（アジア航測）を用いて，3D 表示した結果を図 32 に示す。



図 30 新沢千塚古墳のデジタルカメラオルソ画像
Fig. 30 Digital ortho photograph of Niizawa-senzuka



(a) オルソ写真



(b) 赤色立体地図

図 32 新沢千塚古墳群の 3D ビューワによる表示
Fig. 32 3D view of Niizawa-senzuka: (a) Ortho photo, (b) RRIM.



図 31 新沢千塚古墳群の赤色立体地図
Fig. 31 RRIM of Niizawa-senzuka

地形データの詳細な観察の結果、新たな墳丘やこれまで知られていなかった墳形の古墳が発見された。

(1) 新発見の前方後円墳

新沢千塚古墳群の南東に位置する竹林内でこれまで確認できなかった前方後円墳が発見された。墳高が 3 m 程度と低いためこれまで古墳として認識されていなかった。墳丘の赤色立体地図を図 33 に、墳丘の大きさを表 4 に示す。竹林ではレーザー光の地盤到達率が低く、地形の判

読が困難であることが多い中、ヘリコプターレーザー計測による高密度の測量が古墳の発見につながった。

(2) 新たな墳形の確認

新沢千塚古墳群 17 号墳は、これまで発見例のなかった、長方形の方墳の上に円墳が片側に偏って乗った墳形（変形上円下方墳）であることが確認された。墳丘の赤色立体地図を図 34 に、墳丘の大きさを表 5 に示す。

小規模な古墳が密集する新沢千塚古墳群において、大規模古墳同様に墳丘情報を詳細に取得し、各古墳の立地を明確に視覚化できた。(佐田・吉永：2012)

6. モービルマッピングシステム (MMS: Mobile Mapping System)

車両などの地上移動体に位置姿勢計測装置 (GNSS/IMU)、レーザスキャナ、カメラなどのセンサを搭載し、

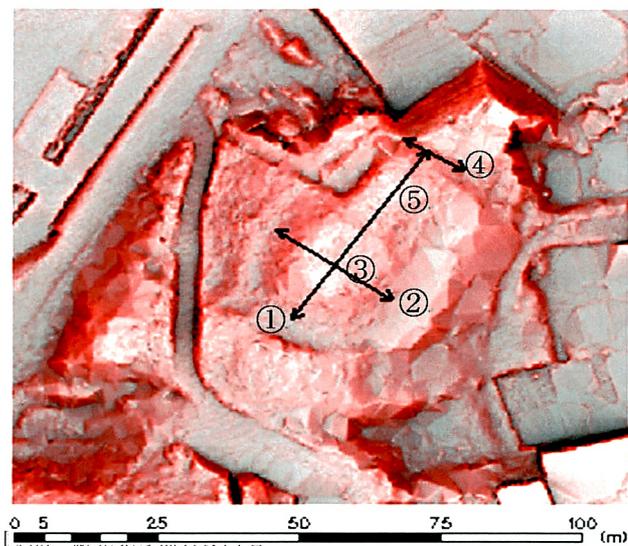


Fig. 33 Newly-discovered keyhole-shaped mound.

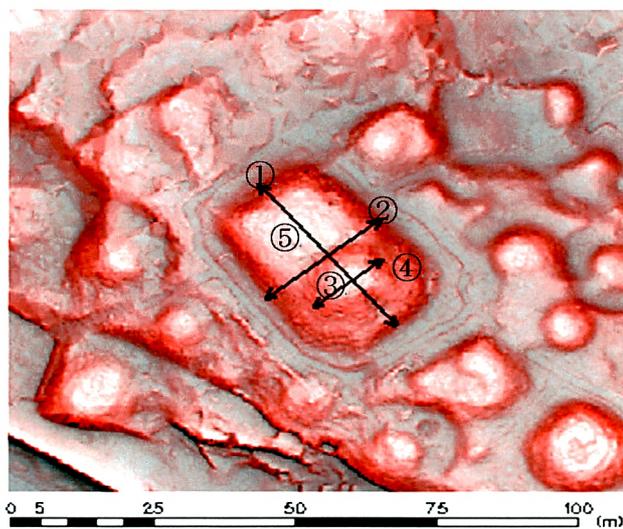


図 34 新たに確認された墳形

Fig. 34 Newly-discovered form of tomb

表 4 新発見の前方後円墳の大きさ

Table 4 Dimensional data of newly-discovered keyhole-shaped mound

①全長	41.72 m
②後円部径	24.83 m
③後円部高	2.11 m (標高 89.75 m)
④前方部幅	12.29 m
⑤前方部高	2.74 m (標高 88.57 m)

表 5 新たに確認された墳形の大きさ

Table 5 Dimensional data of the newly-discovered form of tomb

①長辺長	38.25 m
②短辺長	25.72 m
③方墳高	2.46 m (標高 91.35 m)
④円墳径	15.62 m
⑤円墳高	2.24 m (標高 93.59 m)

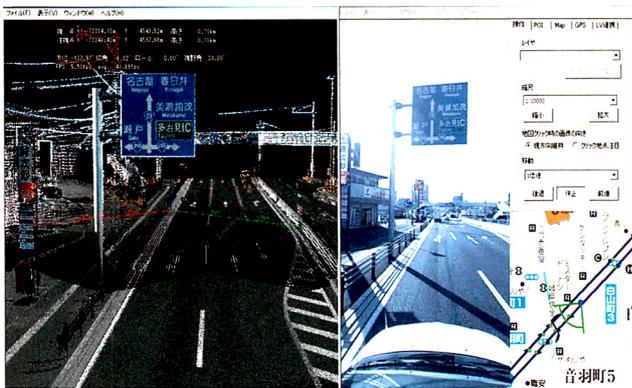
移動しながら周辺地物・地形の三次元情報を取得する装置をモバイルマッピングシステム (MMS) といい、計測装置の構成や計測原理は、航空レーザ計測装置とほぼ同様である (図 35)。航空レーザ計測装置が上空から下方向のみを計測しているのに対し、モバイルマッピングシステムは地上の車から周囲を計測し、道路面以外に建物壁面やオーバーハングの構造物、トンネル内の計測も可能としている。また、地上では、GNSS 信号が受信できない環境が多く存在するため、オドメータ (距離計) を搭載して位置精度を確保する方法も採用している。

取得したレーザデータや画像データを使用して地物や地形を三次元図化することが可能であり、建造物の CSD モデル化、航空レーザの補完、点群そのものを利用した計測など幅広く活用できる (図 36)。空から観測できない文化財、例えば、建造物群や町並みなどの計測に応用することができる。

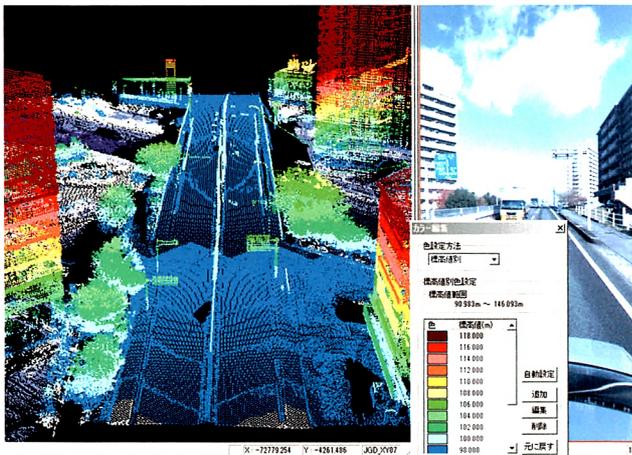


図 35 モバイルマッピングシステム (MMS)

Fig. 35 Mobile Mapping System



(a) LiDAR 点群 (左) と 360 度パノラマ画像 (右)



(b) 高さ色分け表示 (左) と 360 度パノラマ画像 (右)

図 36 MMS 計測データのビュー表示

Fig. 36 Display of MMS measurement data : (a) LiDAR point clouds (left) and 360° panoramic picture (right); (b) Altitude tints display of LiDAR point cloud (left) and 360° panoramic picture (right).

7. おわりに

測量機器による広域の 3 次元計測技術は、航空写真から始まり、GNSS/IMU 技術とレーザ計測技術の融合により、航空レーザ計測へと発展し、空中と地上の両方から計測する手段を得た。文化財分野への利活用場面では、地上の立ち入り困難、かつ植生が存在する場所では、ヘリコプターレーザ計測により高密度な微地形データを取得することが有効である。大型古墳を例にあげれば、墳丘および周辺の精緻な地形情報の取得は、学術的にも社会教育的にも大きな意味があるといえる。また、前方後円墳の「赤色立体地図」表示は、その「造形美」を際立たせ、古墳築造の意味や目的に、立体的な造形への意識が、強く関わっていることを印象付けさせる最適な表現法であるといえる。

航空機レーザによる計測手法は、広範囲での微細地形や遺構の検討のみならず、人が立ち入ることが困難な森林地帯（熱帯雨林等）や、危険地域（地雷原・自然災害地区）における遺跡の立地や分布調査に威力を発揮することができる。そして付随して得られる情報から、繁茂する植生の研究にも役立つと考えられる。地上からを含めたレーザ測量技術は、ピラミッドや城郭などの大型建造物の測量や、集落や町並み全体の記録・保存など、文化財関連での有効活用が大いに期待される技術である。

引用文献

- 石井武政・柳沢幸夫・山口昇一・寒川旭・松野久也 1982 『松島地域の地質』 地域地質研究報告：5 万分の一地質図幅／地質調査所（編）秋田(6)第 89 号 121p
- 西藤清秀・藤井紀綱 2010 「新時代を迎えた大古墳測量」 日本文化財科学会第 27 回大会研究発表要旨集 pp.40-41
- 佐田一徹・吉永剛・藤井紀綱・西藤清秀 2012 「ヘリコプター搭載航空レーザ測量による古墳調査」 日本写真測量学会平成 24 年度秋季学術講演会予稿集 pp.23-24
- 末永雅雄 1961 『日本の古墳』 朝日新聞社 169p
- 千葉達朗 2006 『活火山 活断層 赤色立体地図でみる日本の凹凸』 技術評論社 136p
- 千葉達朗・小山真人 2002 「青木が原樹海の地形が見えた」 国土交通省富士砂防事務所広報誌「ふじあざみ」38 pp.1-2
- 千葉達朗・鈴木雄介 2004 「赤色立体地図-新しい地形表現手法」 応用測量論文集 15 pp.81-89
- 千葉達朗・鈴木雄介・平松孝晋 2007 「地形表現が生み出す地図の可能性」『地形表現手法の諸問題と赤色立体地図』 日本国際地図学会 pp.27-36

- 奈良県立橿原考古学研究所附属博物館 1998 『オオヤマトの古墳と王権』 奈良県立橿原考古学研究所附属博物館第 50 冊特別図録 72p
- 長谷川昌弘・川端良和（編著）2010 『基礎測量学』 電気書院 pp.114-125
- 藤井紀綱・西藤清秀, 千葉達朗 2012 “The new visualization method of the three dimensional data to heritage sites by LiDAR Data” 第 3 回日韓レーザーシンポジウム要旨集 pp.205-219
- 藤井紀綱・吉永剛・佐田一徹・西藤清秀 2011 「ヘリ搭載航空レーザー計測データによる大型古墳の微地形表現」写真測量とリモートセンシング 50(1) pp.2-3
- 横山隆三・白沢道生・菊池祐 1999 「開度による地形特徴の表示」写真測量とリモートセンシング 4 pp.26-34
- Fujii, N., Saito, K., Chiba, T., Sata, I., Yoshinaga, T. and Tasaki, K. 2012 “The new three-dimensional visualization method of heritage sites by LIDAR data” The XXIIInd Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Melbourne pp.87-92

(2013 年 12 月 27 日受付, 2015 年 3 月 15 日受理)

High-Resolution Aerial Survey: Evolution of Measurement and Display Techniques, from LiDAR to Red Relief Image Map

Noritsuna FUJII¹⁾, Kiyohide SAITO²⁾ and Tatsuro CHIBA³⁾

¹⁾ Asia Air Survey Co., Ltd. 1-2-2 Manpukuji, Asao-ku, Kawasaki, Kanagawa 215-0004, Japan

²⁾ Archaeological Institute of Kashihara, Nara Prefecture, 1 Unebi-cho, Kashihara, Nara 634-0065, Japan

Many historical and archaeological monuments, including ancient tombs, are found widely throughout in Japan, and can be suitably detected and visualized by aerial surveying. The conventional method of aerial survey is mainly based in aerial photogrammetry. Presently, laser scanning techniques have enabled us to acquire topographical data with higher resolution. A new aerial survey system, airborne light detecting and ranging (LiDAR), can collect bare ground-surface data even in locations with tree and bush coverage. Red Relief Image Map (RRIM) is a new method of visualizing topographic information that can visualize both concave and convex regions of topographic slopes. Combining airborne LiDAR with RRIM can serve as a powerful tool to find and monitor archaeological monuments scattered across wide areas.