

3次元技術等によるデジタル技術の導入

金田明大（奈良文化財研究所）

Application of 3D Documentations for Archaeological Survey
KANEDA Akihiro (Nara National Research Institute for Cultural Properties)

・3次元計測／3D Documentation・レーザースキャナー計測／Laser Scanner
・Structure from Motion・遺跡探査／Archaeological Prospection

1. 遺跡情報を残す

(1) 遺跡情報の特性

遺跡と言っても、その範囲は極めて広い。その構成を遺構と遺物に分けて考えると、遺構は古墳や社寺、城郭など現状においても地表観察可能なものも存在するが、多くの遺跡は地中に埋没している。同種の遺跡であっても遺存状況は多種多様であり、自然的、人為的な営為により、現存しないものも多い。

遺物についても、同様の過程を経て、現在に多様な状況で残されている。

ここでは、これら遺跡に残存する資料から得られる情報を遺跡情報と呼ぶこととしたい。

人間の眼は可視光しかとらえられないため、地中の内部を見るには土を物理的に除去する発掘か、可視光以外の物性にに基づく探査による他はない。

発掘は、直接的に地中の状況を明らかにすることが可能であり、詳細な情報が取得できる反面、対象自体の現状を大きく改変し、また情報の逸失も多い。ある程度の保存性がある遺物に比べて、発掘された遺構については、長年の取り組みがあるものの、我が国においてはその状況を維持することが極めて困難である。このため、発掘調査時点での可能な限りの情報取得が必要となる。

遺物については、適切な管理により、情報の再取得が可能である。しかし、劣化は着実に進行していくこと、事故や災害による逸失の危険性を考えれば、これも情報化をはかる必要がある。

ば、これも情報化をはかる必要がある。

探査は非破壊的手段であり、対象の状態を変化させることなく情報取得が可能な反面、得られる情報は現状では極めて限定されたものであり、時期や性格といった考古学において重要な情報を直接的に取得することは困難である。

遺跡情報の取得方法には共にこのような限界があり、相補的に利用することが望ましいが、これらを扱う上で鍵となるのは空間情報であると考ええる。遺跡情報から得られる時間や分類、性格といった他の情報は、研究者、調査担当者の解釈に大きく依存する面があり、差が大きい。加えて、これらを固定することによる研究の硬直化の危険性もある。その点、空間情報については標準的な扱いがしやすい。

本講義では、主にこれらの点について紹介する。

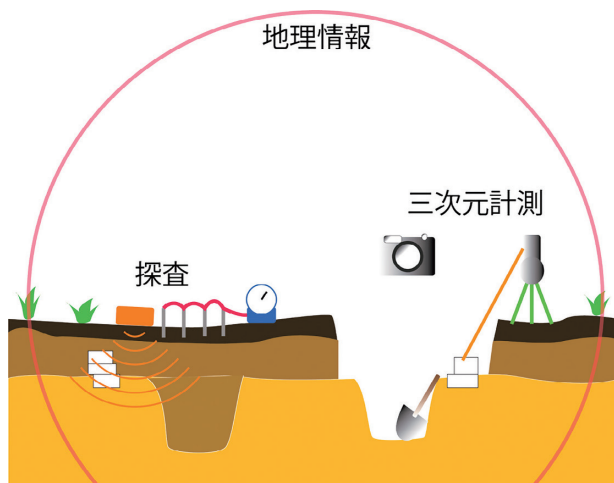


図1 本講義で扱う範囲

表1 代表的な記録方法と記録可能な情報（金田2014より）

	形状	大きさ	色	質感	観察の反映	記録の密度
図面	○	○	×	△	○	×
写真	×	×	○	○	×	○
記述	×	△	△	×	○	×
三次元データ	○	○	△	○	×	○

（2）記録の担い手は？

発掘調査においては、調査を実際におこなっている者が得られる情報を最も良く記録できるだろう。

近年では要求の多様化、人員や予算などの資源の問題から、記録を補助者や外注に委ねることも少なくない。しかし、その記録について適切な監理をおこなう主体は、やはり調査担当者が専門的な視点よりおこなうことが必要である。

また、環境や状況において、これらの記録が既存の手法では十分に達成できない状況も起こり得る。予想できない緊急性を有する発見などについては、記録を残すこと自体が極めて困難な状態にあることもある。

このような状況において、近年、発掘遺構の記録手法として、伝統的な手法に加え、3次元計測手法が実用化され、普及してきている。これらの手法は形状に関する詳細で高密度の情報を迅速かつ低コストに取得できる。

ただ、いかなる場合においても、専門的な知識に基づいた観察が遺構・遺物の評価には必須であり、これは手法により変わるものではない。

（3）3次元か2次元か

「所詮三「ダイメンション」を有する品物は、矢張り三「ダイメンション」のものを以ってしなければ、其の眞の性質を傳へることは困難である」（濱田耕作1930『考古学関係資料模型目録』）

日本考古学の草分けである浜田耕作（青陵）が述べているように、考古資料は立体物であり、その形状はユークリッドの3次元空間上に存在している。このため、形状情報は3次元で情報化することが情報の損失が少ない。

しかし、高密度の3次元の情報を（表示としては疑似的ではあるが）利用できるようになったのは近年のことである。

このため、従来においては、情報を線画や写真など2次元に縮約し、また表現することで扱ってきた。これらは次元の減少に基づく情報の損失をできる限り補う形で洗練化され続けている。

表1では現在の主な遺跡情報の取得手法を示す。現状においてはいずれの手法もその情報保存の可否があり、記録手法を過不足なく取得するため、いずれも必要と考える。

近年、3次元計測手法の技術の進展と普及には目覚ましいものがあるが、現状においては、それのみにて既存の手法に変わるものは少ない。また、蓄積型の学問として過去の情報が重要となる当該分野の研究においては、既存の2次元による情報との互換性を担保した形での利用が現状では必要と考える。しかし、3次元情報から情報を縮約した形での実測図や、拓本に代わる表現をおこなうことは可能であり、今後、煩雑な伝統的手法に代わるものとなろう。

2. 3次元計測手法とその利用

(1) 様々な手法

立体である対象物を記録する方法については、現在、多様な方法が存在する（表2）。

従来からおこなわれてきた伝統的な手法であっても、例えば遺構の平面図に特徴点の標高を加えることで、三次元の情報を記録したものは、三次元計測といえるだろう（図2）。

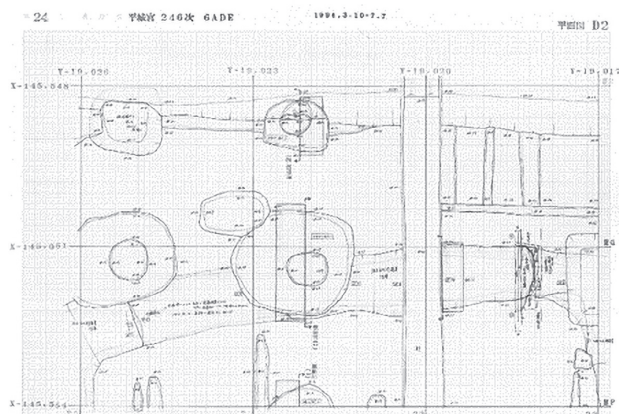


図2 簡易オフセット計測による平面図

計測用のカメラと解析図化機を用いた写真測量は、主に空中写真測量として広範囲の大規模な遺跡調査の記録に利用されてきた。

また、計測点の迅速な計測と、作図の効率を目的とした電子平板などが試みられており、一部で定着しつつある。

近年、これらの方法に加えて、より高密度の形状情報を取得し、記録する手法として、レーザースキャナーによる計測や、コンピュータビジョンを利用した画像による計測などの手法が進展をみせ、急速に普及しつつある。ここでは、これらの動向について紹介をおこないたい。

(2) レーザースキャナーによる計測

レーザー光を発信し、対象物の表面での反射を記録することで形状を計測しようとする手法である。多く用いられているのは、レーザー光の発信から反射した光線の受信までの時間を計測する手法であり、発信の角度と時間に基づく ToF (Time of flight) 法や位相差法、三角測量の原理を加えた三角法が存

在する。前者は外部光線などにも強く、広範囲の計測が可能であるが、精度が低い傾向にある。後者は高い精度での計測が可能であるが、外部環境に弱く、基本的には室内の計測に主に用いられる。このため、遺構には前者、遺物には後者を用いることが多い。ただ、これらはレーザー光を用いるため、反射が著しく強いものや、ガラスなど多重反射をおこす対象については計測が困難であったり、成果が良好でない場合がある。

また、近年、航空機や UAV などにレーザー機器を搭載し、地形を計測する空中 LiDAR 技術が注目されている。この技術では、森林などにおいておきるレーザー光の多重反射を解析し、最終反射を地表面とすることで、従来の写真計測などでは困難であった森林内の地表の情報を明瞭にできる。このため、踏査が困難な場所における人為的な地形の改変痕跡、古墳や山岳寺院、山城などの実態を明らかにすることが可能である。

加えて、手持ち型の LiDAR の利用を現在進めている。これは、森林内などにおいて広範囲に簡便に地形計測を可能とし、樹木の除去などをコンピューター上でおこなうことが可能である。空中 LiDAR より高密度な地表情報の取得が可能であり、共に活用することで、今まで困難であった広域の遺跡の把握と、現況調査を可能とする。

(3) レーザースキャナー計測利用の実例

ここでは、いくつかの利用例についてふれる。

まず、遺構の計測として、福島県桜田IV遺跡の例をあげる（図3）

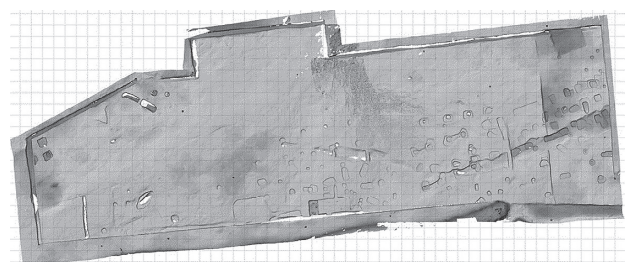


図3 桜田IV遺跡レーザースキャナー計測成果

ここでは、震災復興調査として、古代の規則的に配置された掘立柱建物を確認した。記録の迅速化の

ため、位相差法レーザースキャナーによる計測をおこない、800 m強の遺構について、半日で計測を終了することができた。

また、奈良県本願寺裏山遺跡では、中世の武士団の墓地について ToF 法レーザースキャナー計測をおこない、竹の成長や土砂の流出により日々変化が進行している危険性が指摘されている箇所において、計測時点での詳細な記録を残し、今後の保存についての基礎情報を得ることができた（図4）。

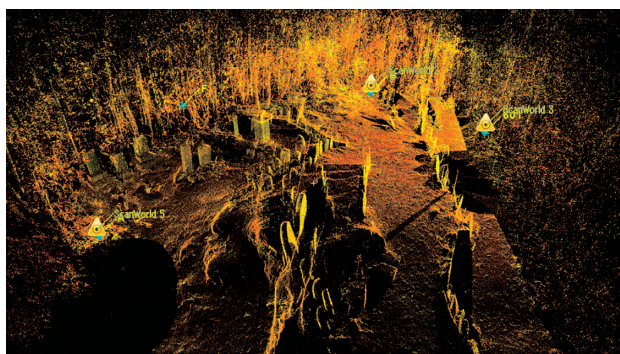


図4 本願寺裏山遺跡のレーザースキャナー計測

遺物についても、廉価型の三角法レーザースキャナー計測によって、土師器甕（鍋）を計測し、既存の観察では明瞭でなかった内面の無紋当て具や円形の刺突の存在が明らかになるなど、成果をあげている（図5）。

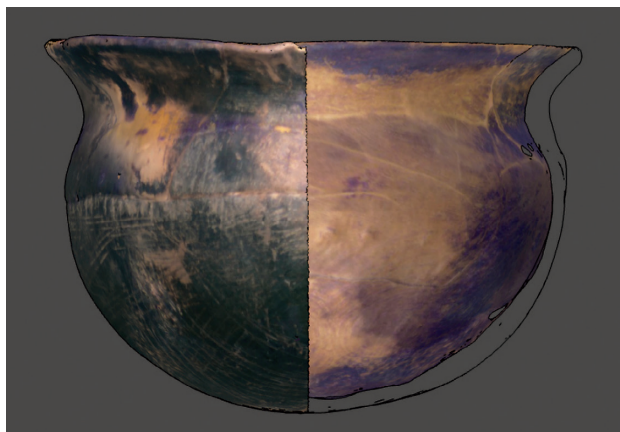


図5 土師器甕の計測成果と実測図に準じた表示

手持ち LiDAR による計測としては、奈良県新沢千塚古墳群での試験的な計測をあげる。古墳群内は森林内に存在しており、従来の空中写真計測による方法では計測が困難であった。橿原考古学研究所による空中 LiDAR 計測の結果、古墳群の詳細や未発

見の古墳の存在が明らかになり、技術の有効性に注目が集まった（西藤ほか2009）。

空中 LiDAR は、計測点の密度が低いため、より高密度の観察をおこなうために手持ち LiDAR の計測を試行した。

この結果、樹木の状況を含めて、高密度の遺跡の形状情報を取得することができた。現地での計測時間は8分であり、従来よりはるかに迅速に計測が可能となっている。

また、点群処理ソフトウェアを用いて、樹木や構築物をフィルタリング処理して除去し、地表情報のみを表示することで、より詳細な観察をおこなうことが可能となった。密度が高いため、低灌木などは完全には除去できていないが、これらも手動での除去が可能である。（図6・7）

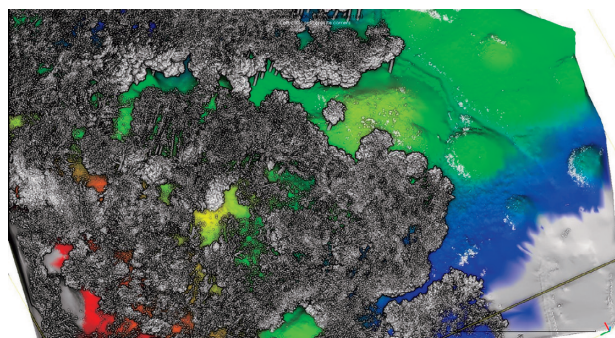


図6 新沢千塚古墳群LiDAR計測（計測時）

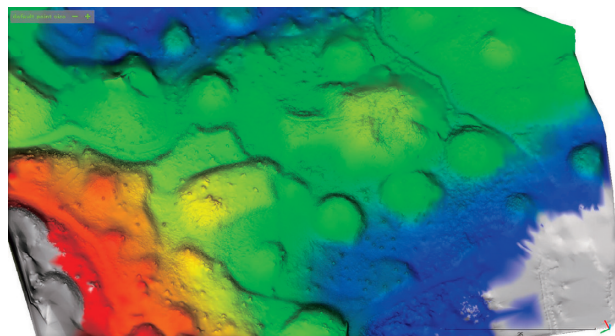


図7 新沢千塚古墳群LiDAR計測（樹木除去後）

(4) Structure from Motion・Multiview Stereo による計測

Structure from Motion (SfM) は、複数の画像を解析することで画像の取得位置を復元し、また形状を復元する技術である。成果に基づいてより高密度な計測点の集合である点群を計算する Multiview Stereo (MVS) と合わせて、画像より詳細な対象物

の形状情報を取得することが可能である。

これらは、外部の情報を高速に処理し、自らの位置や周辺環境を判断することを目的としたコンピュータビジョン (CV) 技術として開発が急速に進行しており、自動車の自動運転といった技術と結びついているものである。

平板など伝統的な手法を含めて、他の手法の多くが専用機器を必要とするが、本手法の文化財記録におけるひとつの利点として、市販のコンピュータとカメラにソフトウェアを加えることで3次元計測が可能となることがあげられる。このことから、多様な立場や環境で文化財の保護や研究に従事している者が技術を利用できると考えられる。

(5) SfM・MVS利用の実例

SfM・MVSは、カメラの選択により多様な対象の計測が可能になることが特徴である。

奈良県瀬田遺跡では、発掘調査の休み時間にメモ代わりに撮影した遺構写真より3次元計測をおこなうことができた。(図8)



図8 SfM・MVSの計測成果

成果は3次元情報を有しているので、任意の高さ間隔による等高線図(図9)や標高別の段彩図(図10)を簡単に製作することが可能である。

また、写真撮影によって迅速に計測が可能であることから、発掘の進行状況に合わせて計測をおこない、各段階での遺構の状況や、発掘調査の記録をおこなうことも可能である。(図11)

コンパクトデジタルカメラなどの簡便な記録機器

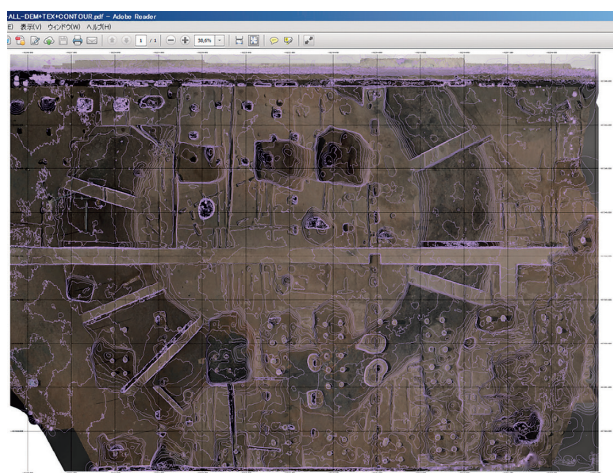


図9 等高線の表示

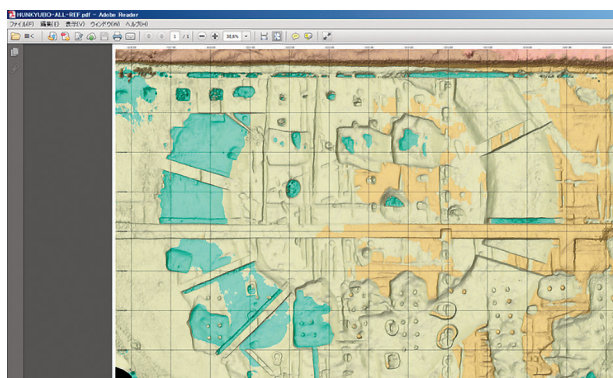


図10 段彩図の表示



図11 調査段階毎の詳細な記録

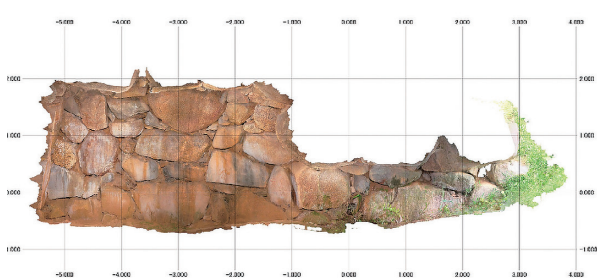


図12 横穴式石室の計測

により、ある程度の記録が可能となることから、記録が未だ十分におこなわれていない遺構や石造物などの記録にも活用が可能である。奈良県弁天塚古墳の横穴式石室の計測では、現地での全作業を1時間程度で終わらせることができた。(図12)

遺物についても、大小にかかわらず、目的に応じた機材の選択により、3次元情報の取得が可能である。備前焼大甕の計測では、従来であれば形状の計測すら煩雑であった大型資料の計測をおこない、起伏だけの表示とすることで器表にみられる製作痕跡を観察することが可能である。(図13)

これらの成果を基に、更に製作や使用に関する痕跡を詳細に観察することが可能となる。人間の視覚は色彩やその変化に強く反応し、現物でも微細な器表面の痕跡に気付かないことも多い。起伏のみの表示をおこない、また表示を変えることを通じて、観察を深めることが可能である。(図14・15)

土師器の底部の計測成果では、写真や実物の観察では把握が困難な工人の手の痕跡をはじめ、多様な情報を得ることができた。(図16)

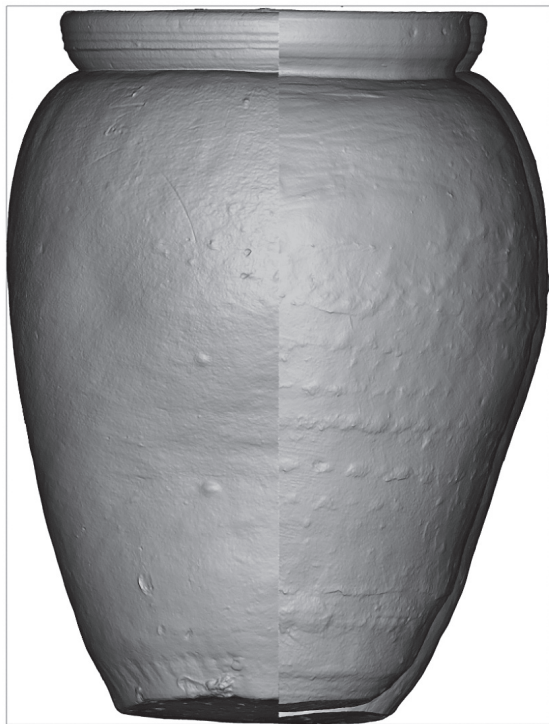


図13 備前焼大甕の計測成果

より詳細な検討も顕微鏡写真やマクロ撮影により形状の計測が可能である。ここでは、土師器内面の暗文の描きだし部分の3次元計測を示す。工具の形状や施文時の動きによる粘土の移動などが観察でき



図14 須恵器長頸壺の計測成果

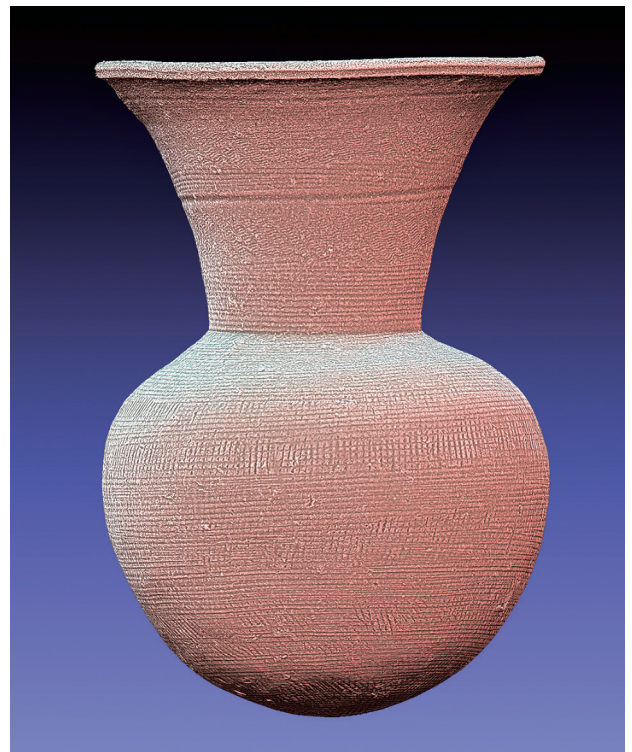


図15 須恵器長頸壺の器表面の観察

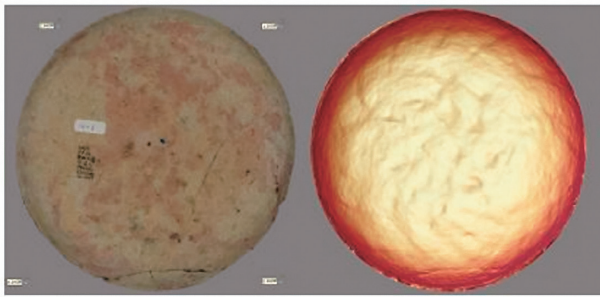


図 16 土師器坏底部の製作痕跡の抽出

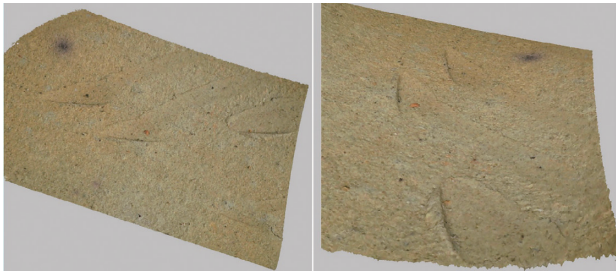


図 17 土師器坏内面の暗文の計測
る。(図 17)

計測された情報は、資料間の比較検討などに用いることが可能である。同范の瓦の比較では、范傷の進行について、詳細な検討が可能である（中村 2017）。6276Aa と 6276Ab の同范瓦の検討では、明瞭に内区の范傷の進行を示すことができた。(図 18)

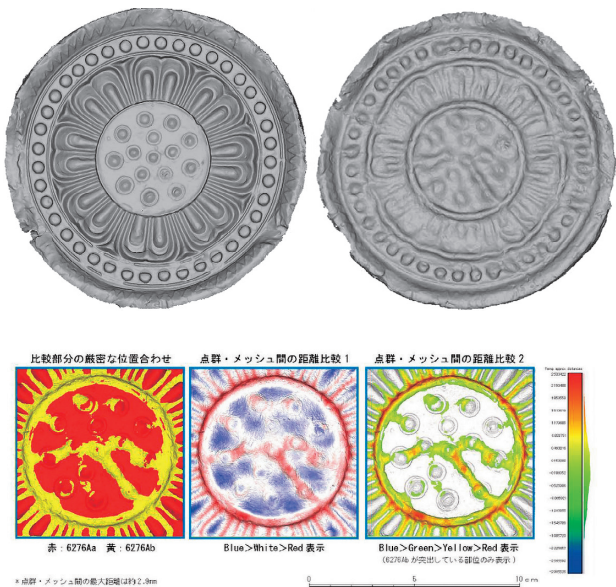


図 18 同范瓦の范傷の進行の検討

3. 探査情報の活用

(1) 多彩な探査技術

非破壊的手段により遺跡の情報を取得する技術の総称を探査と呼称する。大きく、地表の状況を検討する判読と、地下に埋蔵されている対象に対して、その物性の特徴を活かして能動的あるいは受動的に計測をおこなう物理探査にわけられる。

中でも、地中レーダー探査や電気探査は、地中の疑似的な立体構造を可視化することが可能な技術であり、技術の進展や解析手法の発展により、地中に埋蔵された遺跡の情報を限定的であるが取得することが可能となりつつある。

(2) 地中レーダー探査利用の実例

遺跡の物理探査は、その対象に合わせて必要となる取得情報を選択する必要がある。このため、遺跡により有効な手法が異なるが、日本の遺跡に対しては地中レーダー（GPR）探査が多くの場合有効であることが明らかとなってきた。

地中レーダー探査は電磁波をアンテナから発信して地中からの反射の強弱を反射時間に応じて取得することで疑似的な地中の断面を計測することが可能である。解像力と迅速な計測が可能である利点があり、今後も主流となる手法であろう。

位置情報を付加した計測成果を集積することを通

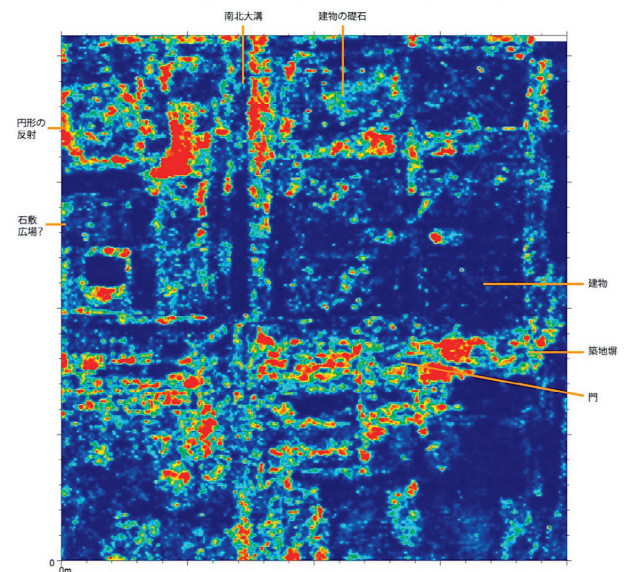


図 19 地中レーダー探査成果（平城宮）

じて、平面の異常部の状況を深さ毎に示すことが可能である。

奈良県平城宮東方官衙では、深さ毎に遺構の状況を把握することが可能であり、礎石建物、掘立柱建物、方形の石敷、築地塀、門、水路、宮内道路といった遺構と推定できる反射が確認され、続けて実施した部分的な発掘調査でその実態を把握することができた。(図19)

茨城県神野向遺跡では、常陸国鹿島郡正倉の建物が把握され、建物の地業や、下層の掘立柱建物の存在を明らかにすることができた。(図20)

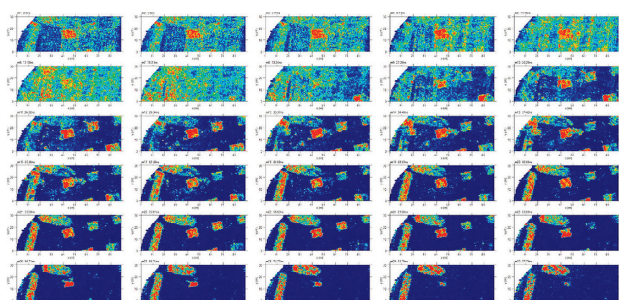


図20 地中レーダー探査結果(神野向遺跡)

地中の遺構は多様な土壌の堆積などを内包しており、物性に基づく性格の検討は困難なことが多い。このため、成果をGIS上に展開し、他の手法との比較をおこなうことによって異常部の性格を明らかにすることも必要となることがある。

茨城県瓦塚窯跡では、地中レーダー探査に加え、磁気探査、電気探査をおこない、その成果をGISでオーバレイ表示しつつ検討をおこない、地中レーダーによって示された地中の異常部の性格を局地的

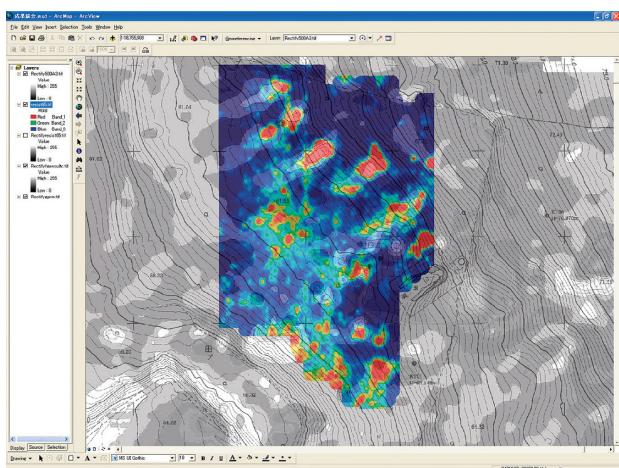


図21 地形図、磁気探査と地中レーダー探査成果

な地磁気の異常や比抵抗といった物性に基づく情報を加味することでその性格を明らかにし、瓦生産窯の地中における残存状況や灰原の広がりなどの情報を取得することができた(図21)。

地中レーダー探査は広域を迅速に探査することが可能であり、従来方法がなかったため困難であった遺跡発掘前の遺構の密度や調査区設定の基礎情報の提供といった面で有効であるとともに、史跡など発掘調査に制限のある遺跡の評価をおこなうなど、遺跡を保護しつつ研究を深化させるための基礎情報の取得の可能性を拓いている。

反面、地中の異常部の存在の指摘は可能であっても、遺跡の評価をする上で重要な年代や性格などの詳細を明らかに出来るものではないことにも注意が必要であり、発掘調査や表面採集・観察といった方法と連携していく必要がある。

【補註および参考文献】

- 1) 伊東太作 1997「遺跡を測る」飛鳥資料館図録第30冊遺跡を測る 飛鳥資料館
- 2) 金田明大・川口武彦・三井猛他 2010「文化財のための三次元計測」岩田書院
- 3) 金田明大 2014「測量機材の進化は発掘に何をもちたか」考古学研究60の論点 考古学研究会
- 4) 金田明大 2016「地下探査の最近の動向」考古学と自然科学71 日本文化財科学会
- 5) 金田明大 2017「三次元計測とRTIによる土器計測・観察の可能性と課題」文化財の壺5 文化財方法論研究会
- 6) 金田明大 2018「SLAM技術を用いた森林内遺跡の三次元計測」奈文研紀要2018
- 7) 佐藤源之 金田明大 高橋一徳「地中レーダーを応用した遺跡探査 GPRの原理と利用」東北大学出版会
- 8) 中村亜希子 2017「データベース作成に向けた瓦当の三次元計測方法とその実践」文化財の壺5 文化財方法論研究会
- 9) 文化庁文化財部記念物課 2010「発掘調査のてびき—集落遺跡発掘編—」文化庁