

國學院大學學術情報リポジトリ

三次元技術を考古資料の記録に用いることの意義

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: Japanese 出版者: 国史学会 公開日: 2024-05-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 横山, 真, Yokoyama, Shin メールアドレス: 所属: |
| URL | https://doi.org/10.57529/0002000450 |

三次元技術を考古資料の記録に用いることの意義

横山真

I はじめに

さまざまな産業で三次元技術が活かされるようになって久しいが、日本考古学において三次元技術への関心は、必ずしも高いと言えるものではなかった。ところがここ数年の間に、そうした状況は変化しつつあることを実感している。これまで高価だった三次元計測システムが、比較的安価で入手できるようになってきたことが、その主な要因であろう。

学会学会では、考古学における三次元技術の可能性をテーマとしたシンポジウムや専門誌の特集号などが、頻繁に企画されるようになっていく（城倉他二〇一六、中園二〇一七、渡邊他二〇一七、日本情報考古学会二〇一七）。こうした学会の動きに連動し、各地では有志の考古学専門家による三次元計測方法のワークショップ、ハンズオンセミナーなども盛んに行われるようになり、考古学者から考古学者へと三次元計測のノウハウの伝達が始まっている。このような昨今の動向から、今後三次元データは、考古学における記録方法の有力な選択肢として、急速に普及が進むことが予測される。

ところで、筆者がはじめて考古資料の三次元計測をおこなったのは、今から一七年前の二〇〇一年のことであった。筆者は当時、主に石器製作にもなう残滓の分析を研究のテーマとしていた。ところがこうした資料は、既存の報告書の様式では、そもそも記録の対象として抽出されないことが多いため、研究の基礎データの収集に苦慮していた。

ちょうどその頃、筆者は地形学における情報処理の考え方を知った。地形情報処理は、地形の三次元データに画像処理を適用し、主題図として視覚化する技術である。画像処理演算によって得られるさまざまな主題図は、自然地理学の基礎情報としてだけでなく、その頃から既に農業、防災、土木、都市計画など、人々の暮らしに直結する有益な情報として幅広く活かされていた。こうした情報活用の仕組みをロールモデルとすれば、考古学の情報も、それぞれ異なる目的をもった研究者、さらには考古学の枠を超えた、多様な利用者のニーズに応えるための仕組みができるのではないかと考えたのである。

このような動機で、二〇〇一年に石器の三次元計測実験を開始した。石器表面の凹凸を地形に見立て、地形と同様の画像処理を試みるためである。この実験により、地形の演算方法をそのまま遺物に適用するだけでは十分な結果が得られないことが分かったが、その後約二年間かけて、当初の問題をクリアすることができた。そして二〇〇三年に、この技術をもとにした株式会社ラングを起業した。ラングは創業から一五年間で、十数万点にのぼる考古資料の三次元データや記録図の提供をおこなってきたが、それと同時に、考古学の記録における諸問題を解決するためのラボとして、独自の研究をおこなってきた。

筆者は、二〇一八年二月に國學院大学において開催された、国史学会のミニシンポジウム「計測技術の進展と考古学」において、ラングの活動における基本的な問題設定と、その解決のための技術開発について話す機会をいただいた。本稿はその発表の内容をまとめたものである。

Ⅱ とりまく環境の変化

まず、本論の前提として、日本の考古学をとりまく社会背景を確認しておきたい。

図1の破線グラフは、発掘調査費用の推移を示したグラフである（文化庁二〇一七）。統計が開始された高度成長期終末の一九七三年当時、五〇億円にも満たなかった発掘調査費用は、その後右肩上がりに増加を続け、一九九七年には過去最大の約一三二一億円となる。ところがその翌年から一転して急激な減少に転じ、二〇一一年にはピーク時の半分以下の約五二四億円にまで減少する。

不動産バブルが崩壊したのは一九九二年前後と言われているが、発掘調査費用はその後も変わらずに上昇を続けている。転機となった一九九七年は、第二次橋本内閣が緊縮財政に舵を切ったことにより、国内の景気減速が顕著になった年である。その後二〇一二年以降では、急激な減少傾向が一旦落ち着きをみせるが、その主な要因は、アベノミクスによる金融緩和政策による効果であると推定される。このように考古学の経済的背景は、その時代の国の財政・金融政策に大きく左右されてきたことがわかる。

次に、情報技術的な背景を確認する。図1の実線グラフは、日本のインターネット利用率の推移である（総務省二〇一八）。統計が開始された一九九七年当時、一〇パーセントにも満たなかったインターネット利用率は、その後右肩上がりに増加を続け、二〇一三年には八〇パーセントを超える。

この統計が開始されるおよそ一年前の一九九五年十一月には、マイクロソフト社から windows 95 日本語版が発売され、それまで一握りの技術者のものであったパーソナルコンピュータは、一般家庭や個人へと広く普及していくことになる。この頃のインターネット接続サービスは、通信速度や通信料において、未だ実用的とは言い難い

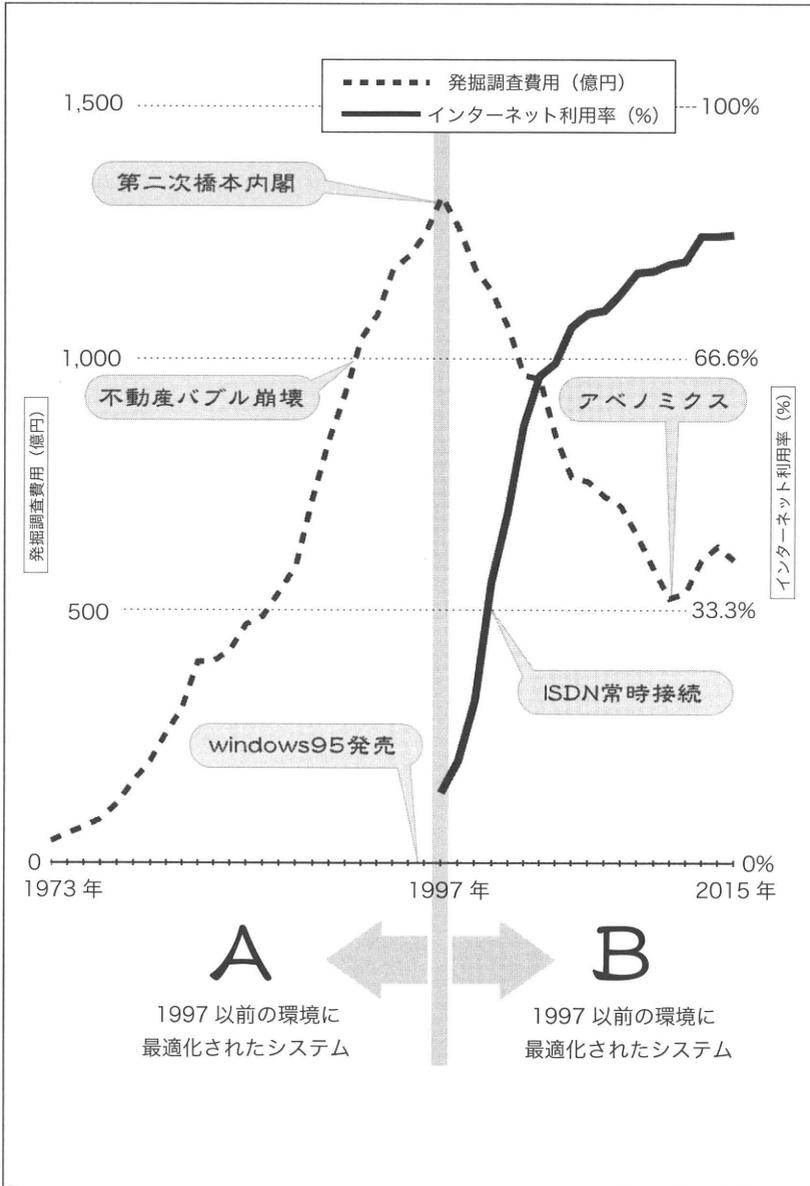


図1 異なる二つの環境

ものであった。しかし二〇〇〇年に、定額制ISDN常時接続サービスが開始され、二〇〇三年頃にはADSLを中心としたブロードバンドサービス、そして光通信というように、立て続けに高速な通信技術が一般向けに提供されると、インターネットは瞬く間にそのユーザーを拡大していくことになる。

Ⅲ 異なる二つの環境

このように、日本考古学の背景となる経済的、情報技術的な二つの指標の推移を重ねてみると、両者とも一九九七年前後に大きな転換が起こっていたことがわかる。つまり一九九七年以前の環境、一九九七以降の環境という、対的な時代背景から成る二つの環境が存在し、日本考古学はその中を歩んできたといえるのではないだろうか。

ここで、一九九七以前の環境において問題なく機能していたシステムを仮に「A」とする(図1)。「A」とは、私たちが慣れ親しんできた方法、すなわち実測図を描き、それを紙に印刷して情報提供するシステムである。この「A」は、形をほとんど変えることなく、一九九七以降に成立した別の環境に入ってくる。すると間もなく様々な問題が表出し始めることになる。

調査予算の減少による人的負担の増加は、どの調査機関にも共通した慢性的課題となるが、それにとどまらず、例えば、遺物保管費用の問題、蔵書保管費用の問題、未刊行報告書の問題、発掘調査に携わる財団法人の廃止問題、さらには民間調査会社による低価格競争の激化に便乗した官製談合事件など、発掘調査費用の急減に起因する、ありとあらゆる問題が、マスメディアを通して明るみに出てくるのである。ここで着目すべき点は、これらの問題のほとんどが、一九九七年以降の新しい環境に入ってから間もなく、堰を切ったように噴出してきたという事実である。

したがって、「A」というシステムは、あくまで一九九七年以前の環境において機能するように設計されたシステムであり、時代背景が一変した一九九七以降には、その環境で問題なく機能するシステム「B」が新たに必要とされているのではないだろうか。本稿では、この「B」が存在するならば、それは如何なるシステムなのかについて論じてみたい。

Ⅳ アーカイブズという概念

筆者は、「B」について考えるとき、アーカイブズの内容が参考になると考えている。アーカイブズ学は、記録する資料を選択し、記録のユーザーがそれを理解する手助けをおこなう高度な専門職を「アーキビスト」と定義し、このアーキビストの目的や役割を明確化することで、現代的な記録を構築しようとする学問である。アーカイブズは、二〇世紀前半に欧米で提唱され、社会の急速な情報化とともに、その重要度を増してきた概念である。日本では、二〇〇四年になって、これをテーマにした日本で初めての学会「日本アーカイブズ学会」が設立され、先行する海外研究の翻訳や、個別分野の問題に対処するための研究が行われるようになっていく。

大濱徹也はアーカイブズを次のように説明している。「日本のアーカイブズ運動は歴史研究者の史料保存運動として展開したがために、すでに述べたように「史料」に呪縛され、アーカイブズを歴史研究の場とみなす思いに強く規定されてきました。そのため文書館なる場は歴史好きの集う場と見なされているのが現状です。しかしアーカイブズは公文書館にせよ文書館にせよ、当該社会の営みを記録した資料を組織的・体系的に残すことをおし、社会の構成員、共同体をになう一人ひとりに己の目で社会の営み、協同体のあり方を検証するなかに、己の場を確かめるこ

とを可能とする器なのです」(大濱二〇〇七)。

前半で述べられている現状は、確かに日本考古学の現状と共通している。しかし、本来のアーカイブズの目的は「社会の構成員、共同体をになう一人ひとり」が能動的に記録にアクセスし、それぞれの問いを、自ら検証できる状態をつくることだと理解することができる。

V 記録のユーザーとは

では、日本考古学において「社会の構成員、共同体をになう人」とは誰のことを指しているのだろうか。

現在、日本にはおよそ六〇〇〇人の考古学専門家がいるとされる。記録者は、遺構や遺物の情報を実測図として発信するが、周知のとおり実測図は「描ける人しか読めない」「読める人しか描けない」媒体であり、しかも国内の研究者に向けられた、いわばローカル言語である。したがって、現状の情報の共有は、この六〇〇〇人の閉じた世界で完結するものになっている。大濱氏の言う「社会の構成員、共同体をになう人」が、この六〇〇〇人のことを指しているならば、これで何ら問題はない。

ところが、一九五〇年に施行された文化財保護法の総則第一条には、「この法律は、文化財を保存し、且つ、活用を図り、もつて国民の文化的向上に資すると共に、世界文化の進歩に貢献することを目的とする。」とある。事業全体の根本的な理念を表したこの最も重要な一文には、日本国民、あるいは世界文化の進歩を担うあらゆる人が、保存された記録の利用者となり得ることが記されている。さらに文化財の記録には、耐用年数という考え方を適用できないことも重要な点である。実資料が消失してしまうことを前提とした記録保存であるため、記録された時点から、それが

どれだけの期間、問題なく利用できれば十分である、という想定は、そもそも本来の趣旨にそぐわない。すなわち保存された記録は、未来永劫にその利用者の要求を満たし続けることが求められているのである。このように考えると、考古学のアーカイブズにおいて「社会の構成員、共同体をなう人」とは、この先の時間・空間上に無限に分布することになる。記録者の責務は想像以上に重いことにあらためて気づかされる。

VI「B」に求められる要件

さて、これらの前提を踏まえると、「B」に求められる要件が明確になる。

記録の利用者が、この先の時・空間上のどこにでも存在し得るということは、記録として残す情報が、現代人の感覚で読みとり得た事象では不十分であることを意味する。無数の観点、あるいは時代を追って次々に変化する観点から、多角的な検証を可能にするために、記録は定量的なデータであることが第一要件となる。そして、この記録が共有の「器」の中にあり、利用者がいつでも「己の場を確かめる」ためにこれを見に来ることを前提とした仕組みの構築が第二の要件となる。さらに、発掘調査費が不足している近年の状況は、記録一点当たりの製作コストをできる限り削減することが求められており、これが第三の要件となるだろう。

筆者は、こうした要件を満たすためには、考古資料の記録を三次元データとすることが重要だと考えている。現在ラングでは、年間五千点から一万点の考古資料の記録を作成しているが、たとえ受託した業務が、実測図を最終成果品とする仕様であっても、取り扱うすべての資料に対して三次元データを取得する取り組みを継続してきた。ところが初期の頃は、実測図を作成する以上にコストを費やすケースが頻発し、且つ計測したデータも、考古学の専門家が

求める品質に達していると言えるものではなかった。そこでラングでは、考古資料の三次元データ化に的を絞ったシステムの開発を独自におこなってきた。この開発は大きく二つに分けられる。ひとつは三次元計測機の開発であり、もうひとつは三次元データの視覚表現の開発である。以下にそれぞれについて説明する。

Ⅶ 三次元計測機の開発

三次元計測における第一の課題は、その作業の効率化であった。九〇年代から主に工業分野で実用化されてきた三次元計測システムは、そのほとんどがひとつの対象を多方向から計測し、得られたデータをソフトウェア上でマッチングさせるものであった。この方式は、資料一点あたりの計測に多くの時間を要し、且つその作業には終始人が専従する必要がある。そのため、記録保存の現場にこれをそのまま導入しても、大きな効果は生まないと考えた。なぜなら、通常の遺跡調査の場合、ひとつの選ばれた資料を記録するというケースは希で、実際には遺跡から出土する大きさ数cm程度の石片、土器片を大量に記録するケースが圧倒的に多いからである。そこで筆者らは、このような記録保存調査の実情に即した三次元計測機が必要であると考え、考古学のための三次元計測機の開発に取り組んできた。

まず、必要とする条件を次のように設定した。第一に、計測にかかるコストを抑えるため、複数資料を一括して自動計測できること、第二に、データの精細さを確保するため、計測点群密度は〇・一ミリメートルピッチ以下とすること。第三に、対象資料を痛めないために、非接触の計測方式であること、となる。これらを踏まえて、最初に導入した計測機は、ローランドディージー社のPIX-4という三次元スキャナであった。それを実測図作成の委託業務のなかで実践的に運用することにより、その計測機の問題点を洗い出し、次の試作機を設計・製作するという手順を

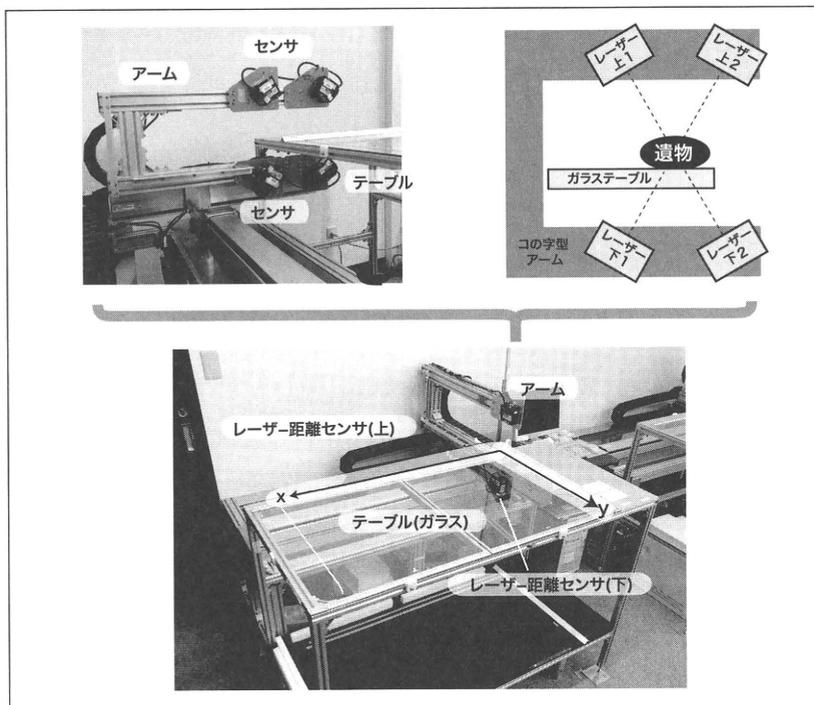


図2 SOMA の構造

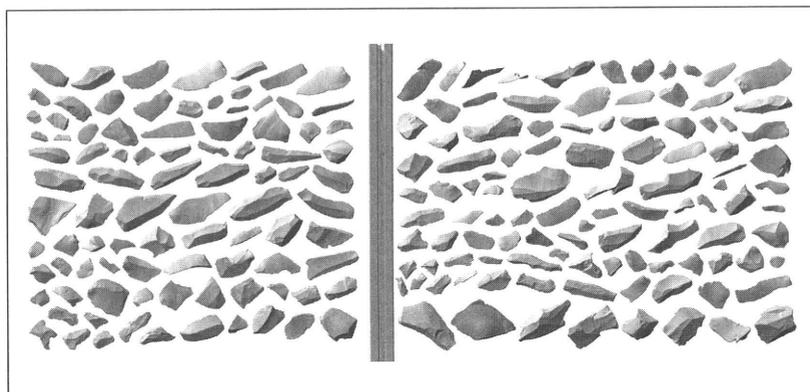


図3 計測結果

繰り返し、現在までに合計4機の三次元計測機を製作してきた。そして二〇〇八年に製作したのが、現行の4号機SOMAである(村木他二〇一四、横山他二〇一七a)。

SOMAの構造を図2に示す。中心に資料台となるガラステーブルがあり、そのガラステーブルを挟むように、コの字型のアームを設けている。アームの基部はXYロボットに取り付け、その先端部にはレーザ距離センサを上下それぞれ二台ずつ、ガラステーブルに対して傾けて取り付けている。対象資料を斜めから計測することで、レーザの死角を最小限に抑える構造となっている。

動作は、センサがXY方向を移動し、四つのセンサがガラステーブルの上に並べた遺物を測定する。X方向のプロファイルを計ると、アームが任意のピッチでY方向へ移動し、次のX方向のプロファイル計測へと移行する。この動作を繰り返すことで、テーブル全体の三次元データを取得する。テーブル寸法は一〇五〇×五五〇ミリメートルとしたが、これは一回の計測が約八時間で完了するように計算して求めた大きさである。朝に開始した計測が夕方に完了し、同日夕方開始した計測が、翌朝には完了しているというように、一日二四時間で、昼夜2サイクルの運用を想定した設計となっている。

図3は、同等の機種で約二〇〇点の石器を一度に計測した結果である。このように大量の遺物の三次元データを自分で取得することにより、遺物一点あたりの計測コストを大幅に抑えることが可能になった。

Ⅲ PEAKITの開発

さて、三次元計測機で取得したデータは、そのままでは単に三次元座標を保持した点の集まりである。この点群を

視覚的に表現することによりはじめて意味のある情報となる。三次元データの視覚表現は、現状では物体の陰影付け、すなわちシェーディングによって得られる「レリーフ」とするのが一般的である。レリーフは、光線ベクトルと物体表面の法線ベクトルとのなす角 θ の余弦を画像化したものである(図4)。一般にレリーフ表現が広く採用されている理由は、物体の形状を直感的に視覚化することができるからである。しかし筆者は、考古資料に限った場合、この表現が最適な方法であるとは考えていない。その理由は、考古学者が対象を観察し、製作、使用、風化などの痕跡を判読する場面では、レリーフ画像から認識される凹凸よりも、さらに細かい局所的な起伏情報を手掛かりとすることが多いからである。

そこで筆者らは、PEAKITという考古資料に特化した三次元データの表現方法を考案した(Chiba, F. 他二〇〇九、横山他二〇一七b)。PEAKITとは「開度」という演算処理によって得られた画像を基本とし、それにレリーフや距離段彩など、他の演算によって求められる複数の画像を選択的に重ね表示する技術である(図5)。開度は、着目地点から周辺地形の見晴らし度合いを数値化したものである(Yokoyama, R. 二〇〇二他)。図6に開度計算(探索距離し)の概念を示す。開度には「空中」の見晴らし度合いを数値化した地上開度と、「地中」の見晴らし度合いを数値化した地下開度がある(図6)。地上開度では、数値の高い部分が尾根地形を表し、地下開度では、数値の高い部分が谷地形を表す。

図7aは、石器にレリーフ処理を適用した画像である。器体全体の大局的な形情報を、直感的に表現できる点がレリーフ処理の特長である。しかし、光源の位置によって得られる結果が大きく変化するため、局所的な起伏を網羅的に抽出する目的に適した方法ではない。図7bは、同じデータに対して、地上開度処理を適用した画像である。切り立った尾根となる稜線、なだらかな尾根となるリング、発泡状の自然面の凹凸の様子など、局所的な起伏を抽出でき

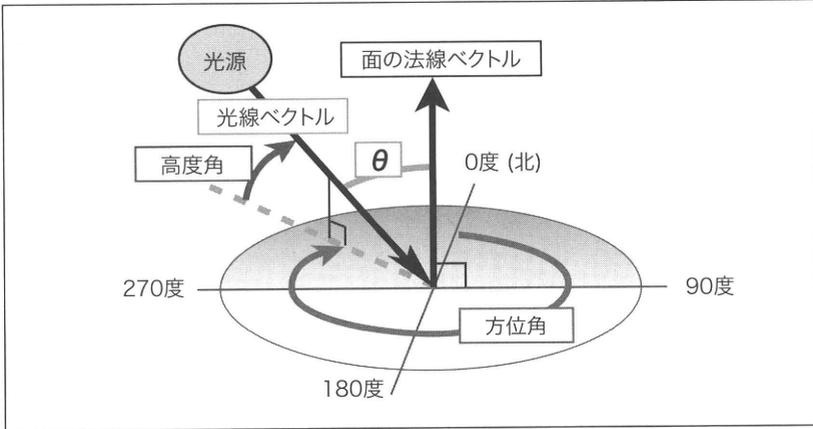


図4 レリーフの概念

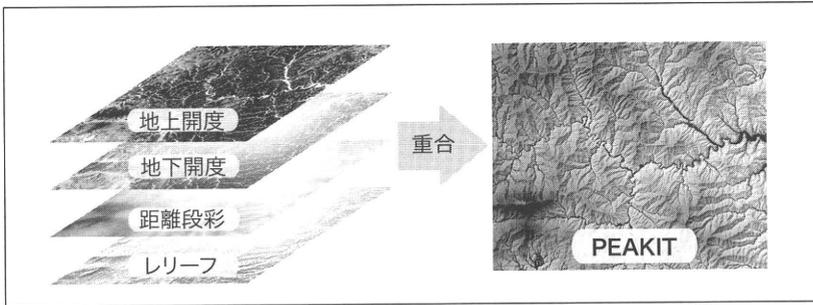


図5 PEAKITの概念

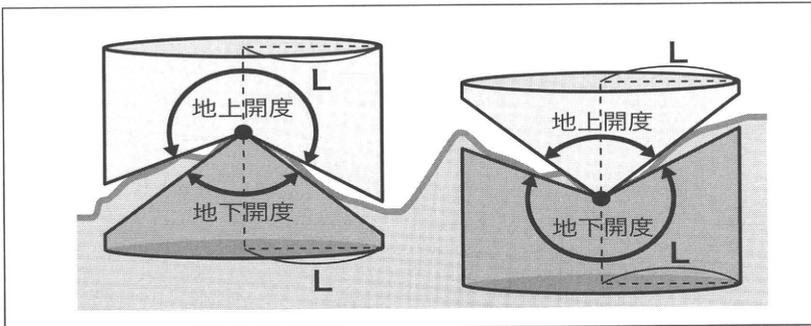


図6 開度の概念

る点が開度処理の特長であり、これがレリーフ処理の欠点を補う情報となる。図7cは、レリーフと地上開度を重合表示したPEAKIT画像である。この二種類の画像を重合することによって、それらが特長を相互に補完し、大局的な情報から局所的な情報までを、ひとつの画像として表現することができる。

また図8aは、縄文土器にレリーフ処理を適用した画像である。器面の湾曲や、輪積に由来する緩やかなアンジュレーションなど、大局的な形情報が陰影によって表現されている。図8bは、同じデータに対して、地上開度処理を適用した画像である。地上開度は面の傾きの変換点において高い値をとるため、縄文の節や条を縁取りしたような画像となる。このように、局所的な起伏を抽出できる点が開度処理の特長であり、これがレリーフ処理の欠点を補う情報となる。図8cは、レリーフと地上開度を重合表示したPEAKIT画像である。この二種類の画像が、特長を相互に補完し合うことで、大局的な情報から局所的な情報までを、ひとつの画像で表現することができる。これにより縄文原体の種類、施文の単位や順序などの情報の読み取りが可能になる。

Ⅹ ワークフローの再構築

以上のように、大量の考古資料を一括で計測するための三次元計測機の開発、および三次元データから考古学的判読を可能にする画像処理方法の開発によって、データ作成の効率を大幅に向上させることができた。この二つの技術はそれぞれ特許の認可をうけ、日々大量のデータ作成の中で活かされている。

さて次に、これらの開発によって獲得した新しいワークフローについて検討する。図9は、石器の実測図作成において、新旧二つのワークフローを比較した図である。左側が従来の作図で、右側が三次元による新しい作図のワーク

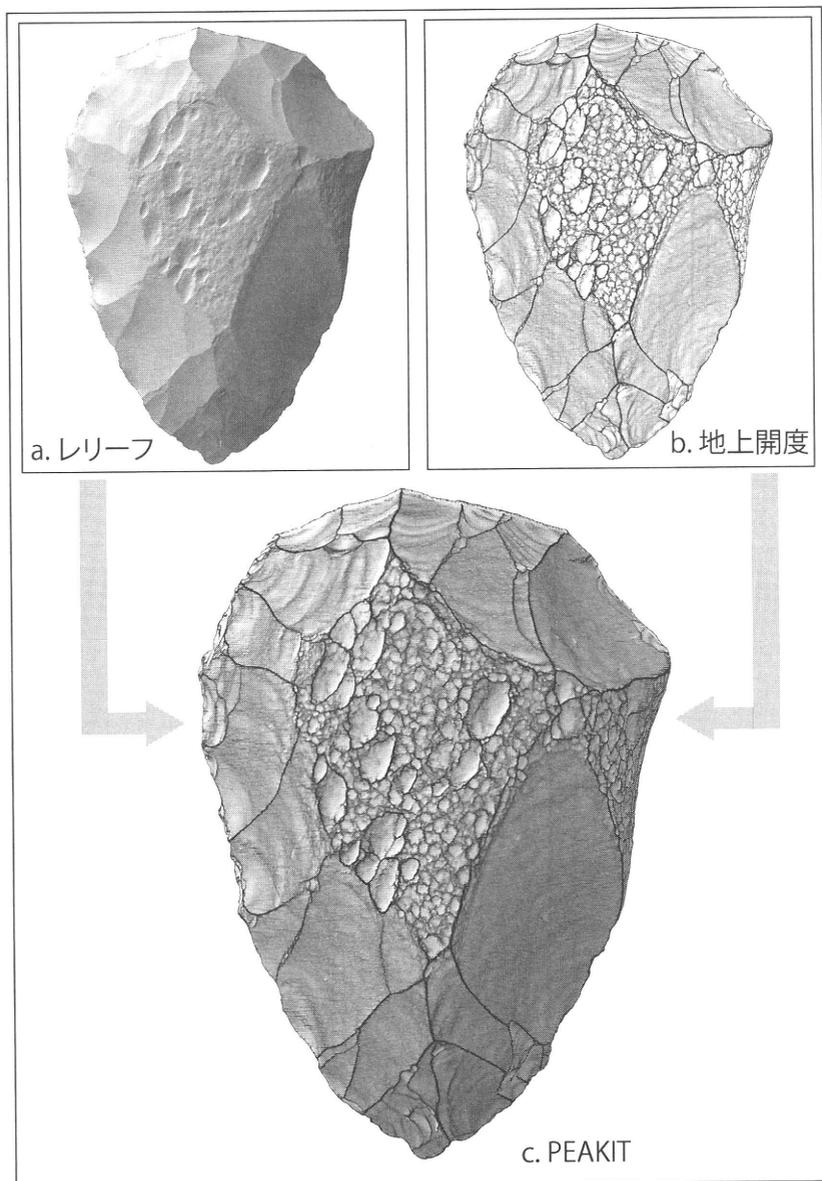


図7 石器の画像処理

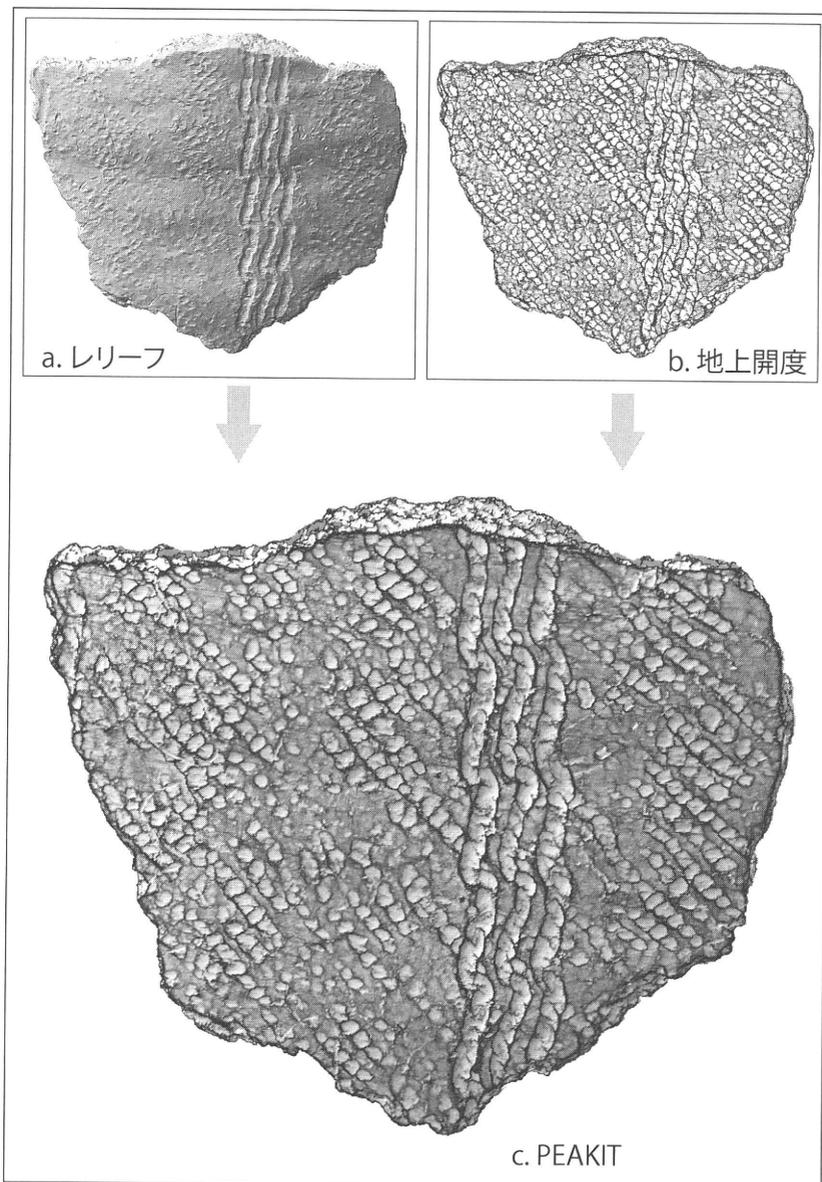


図8 縄文土器片の画像処理

フローである。従来のワークフローでは、記録者はまず、石器表面に着目点を定め、その点の座標をデイスターや定規で計測し、紙面上に投影して測点をおとす。次に石器を観察しながらその測点を線でつなぎ、鉛筆図を作成する。そして鉛筆図をペンでトレースし、実測図を完成させる。一方、三次元のワークフローは、まず複数の石器をガラステーブルに並べ、一度に計測する。計測したデータから個々のデータを切り出し、画像処理をかけてPEAKITを作成する。そしてその画像を背景に、石器を観察しながら線を描いて実測図を完成させる。

この両者の決定的な違いは「観察」の位置の違いにある。従来のワークフローでは、一度にまとめて多くの測点を落としてしまうと、線描段階で、それぞれの測点が何を意味する目印であるのかが分からなくなってしまう。そのため、測点は数点ずつ落とし、直ぐに石器を観察しながら線を描く動作を繰り返す。すなわち「計測」と「観察」「線描」は、「石器」直下の同一ループの中に共存させることになる。一方、三次元のワークフローでは、「観察」は「石器」から離れた下位のループに配置することができる。この「観察」の位置の違いは、システム全体の効率化において極めて重要な点である。なぜなら、前半は定量的な工程、後半は定性的な工程というように、一連の工程を、性質の異なる二つの動作に分割することが可能になるからである。

前半工程は、誰が何回やつても同じ結果、唯一の結果を求めるプロセスであるから、ここは徹底的な機械化、自動化によって限りなく効率を高めることができる。それに対して後半工程は、それぞれの主観、百人いれば百様の経験にもとづいて、結論を分岐分散させる定性的なプロセスである。このプロセスは機械によって自動化することはできないが、本来この過程こそが、大濱氏の言う「社会の構成員」「共同体をなう一人ひとり」が担うべきプロセスなのではないだろうか。

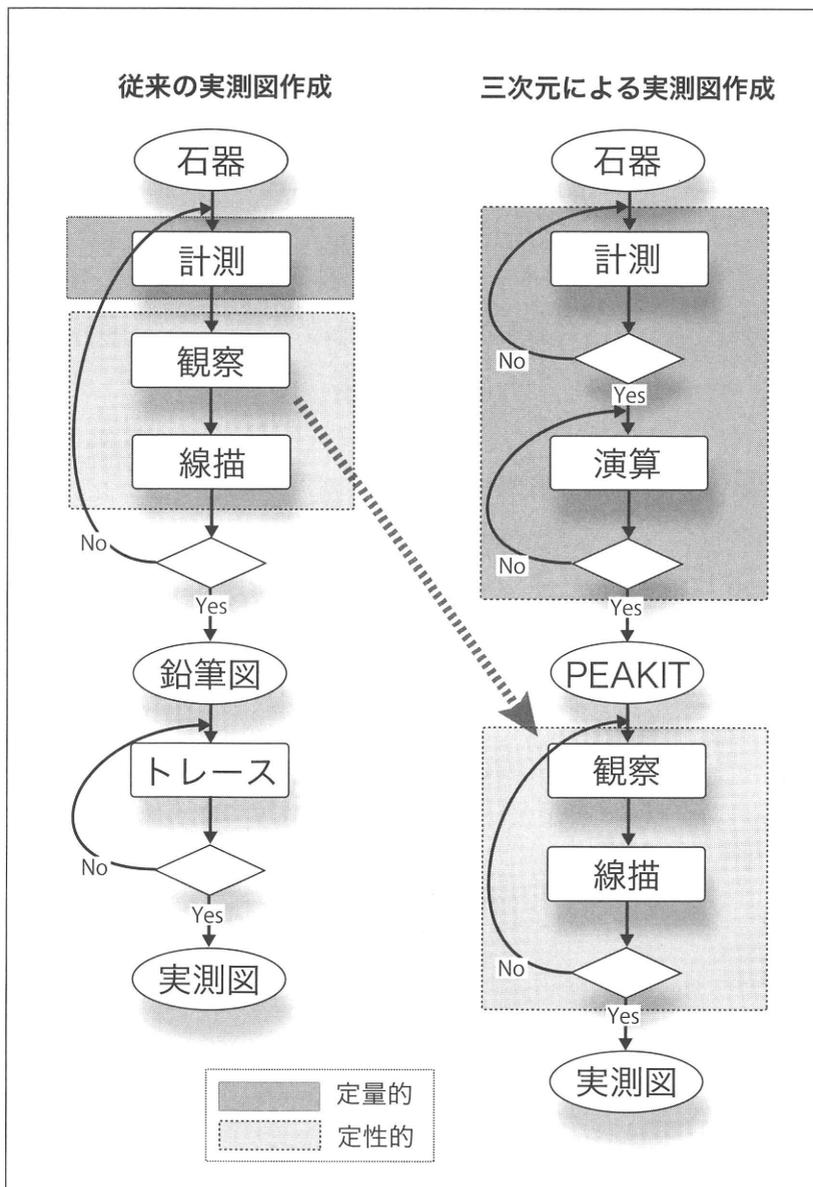


図9 ワークフロー比較

X 期待される効果

このように、ワークフローを見直すことで、解決できる課題は多い。

第一は、コスト削減の効果である。上述したとおり三次元のワークフローでは、実測図作成の一連の工程は、三次元計測や画像処理にもとづいた前半と、観察や解釈にもとづいた後半とに明確に分けられ、後半工程は記録の利用者側に委ねることが可能になる。石器一点の実測図をつくる場合、このワークフローにおける前・後半のコスト配分は、後半が前半の約三倍となることが既にわかっているため、記録作成にかかるコストは、従来約四分の一にまで抑えることができる。

第二は、記録の汎用性を高める効果である。実測図は「描ける人しか読めない」「読める人しか描けない」情報であったが、それが定量的な三次元データや直感的な視覚情報に置き換わることにより、専門性や、時間・空間上の立ち位置を超えて、誰にでもデータの二次利用ができるようになる。こうして記録の活用を促進することができる。

第三は、記録の拡張性を高める効果である。本論では、三次元データの視覚化の技術としてPEAK-ITについて紹介したが、今後さらに有効な視覚表現が考案される可能性は高い。こうしたときに、三次元データに対して常に最新の解析を適用することが可能となる。すなわち将来の利用者は、その記録が作られた時代の知識、理解の水準に左右されることなく、常にオリジナルの観点で定量的なデータを利用することが可能になる。これらによって記録そのものの陳腐化を防ぐ効果が期待できるのである。

Ⅹ おわりに

世の中の変化は、日常の暮らしのなかで常に意識されているわけではない。しかし、インターネット環境やスマートフォンを持たなかった頃の、例えば、ちょっとした外出や、友人との待ち合わせなど、特定の場面を思い返したときに、これまでの変化がいかに大きいものであったかということに改めて気づかされる。再びその時代に戻り、不自由を感じることもなく暮らすことはおそらくできないだろう。これは、社会全体で知識を蓄え、社会全体でそれを便利に利用するという「新たな秩序」が短い期間で成立し、それが既に多くの人にとって、ごく自然なものとして定着したことを意味している。それは学術情報においても例外ではなく、研究成果の共有や、相互利用を促進するオープンデータ、オープンサイエンスは、今や時代の趨勢である。

さて、日本考古学において、三次元技術への注目度が高まってきたことは、冒頭に述べたとおりである。各所での導入に向けた動きを見ていると、それは当面、実測図の下絵となる正射投影画像づくりのためのモジュールとして、既存のルーチンワークの中に組み込まれることになるだろう。しかし三次元技術は、本論で言及してきたとおり、ある製図用具の代替品ではなく、むしろ「考古学」というモジュールを、この「新たな秩序」のなかに組み込むために、欠くことのできない基盤技術なのである。立体物を研究対象とする考古学が、対象を三次元データとして自由に操作できるようになったとき、これまでにない創造的な研究方法、新しいデータの活用法を生み出す土壌ができるのではないだろうか。三次元技術を手にした考古学のこれからが楽しみである。

引用文献

- 大濱徹也 二〇〇七『アーカイブズへの眼―記録の管理と保存の哲学』刀水書房
- 城倉正祥・平原信崇・渡邊玲(編) 二〇一六『3D考古学の挑戦―考古遺物・遺構の三次元計測における研究の現状と課題』シンポジウム予稿集、早稲田大学総合人文科学研究センター
- 総務省 二〇一八「平成二十九年 通信利用動向調査」
- 中園聡編 二〇一七「特集 3D技術と考古学」『季刊考古学』第一四〇号、雄山閣
- 日本情報考古学会(編) 二〇一七『雄山閣百周年記念シンポジウム 3D技術と考古学 基調講演概要』日本情報考古学会講演論文集一九
- 文化庁文化財部記念物課 二〇一七『埋蔵文化財関係統計資料―平成二八年度―』
- 村木祐太・アルタンツェツェグエンフバイル・千葉史・松山克胤・今野晃市 二〇一四「多数の遺物を一括測定可能なレーザー型自動計測システム」『情報考古学』二〇、八一―一五頁
- 横山真・千葉史 二〇一七「PEAKITによる考古遺物の視覚表現」『季刊考古学』第一四〇号、二六―二九頁
- 横山真・千葉史・今野晃市・村木祐太 二〇一七「考古遺物のための三次元計測機開発」『季刊考古学』第一四〇号、三〇―三三頁
- 渡邊玲・山田綾乃・田畑幸嗣(編) 二〇一七『3D考古学の再挑戦―遺跡・遺構の非破壊調査研究』シンポジウム予稿集、早稲田大学総合研究機構
- Chiba, F. & Yokoyama, S. (2009). New Method to Generate Excavation Charts by Openness Operators. 22nd International Symposium CIPA 2009.
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., & Pike, R. J. (2002). Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. Photogrammetric engineering and remote sensing. 68(3), 257-265