

## 接合資料作成のための計測点群による高速な隣接剥離面探索手法

千田 あゆみ<sup>1)</sup>(非会員) 松山 克胤<sup>1)</sup>(正会員) 千葉 史<sup>2)</sup>(非会員) 今野 晃市<sup>1)</sup>(正会員)

1) 岩手大学大学院工学研究科 2) 株式会社ラング

### A Rapid Searching Method of Adjacent Flake Surfaces in Stone Implements by Using Sets of Measured Points for Generating a Joining Material

Ayumi Chida<sup>1)</sup> Katsutsugu Matsuyama<sup>1)</sup> Fumito Chiba<sup>2)</sup> Kouichi Konno<sup>1)</sup>

1) Graduate School of Engineering, Iwate Univ. 2) LANG CO.,LTD.

chida @ lk.cis.iwate-u.ac.jp

#### 概要

石器の接合資料とは、同一の石核から製作された石器同士が接合され、隣接する石器間の位置や姿勢を復元した資料のことである。接合資料の作成は、通常1つの遺跡から出土した資料群を母集団として行われるが、その中に母岩を復元するために必要な全ての石器が含まれるとは限らない。しかしながら復元のために、出土したすべての石器を対象として組み立てを試行することは難しい。そのため、組み立てをいつ終了するか、すなわち、組み立てにおける終了条件の決定が非常に困難である。また、一般に接合資料作成は試行錯誤を伴う手作業で行われるため、作業者の負担が大きい。従来、計算機を用いて石器の剥離面を抽出し、剥離面同士のマッチングを行うことによって接合資料を作成する手法が提案されている。しかし、従来手法は、複数の石器剥離面が合併し、ひとつの剥離面を構成するような複雑な剥離面に対して探索が困難である。また、探索対象となる全ての石器剥離面に総当たりでマッチングを行わなければならないため、探索に非常に時間がかかり、大量の石器に適用することが困難である。そこで、本研究では複数の石器剥離面で構成される複雑な剥離面に対して、隣接する石器を探索できる高速な剥離面探索手法を提案する。本手法では、石器を計測した計測点群から自動的に剥離面上の点群を抽出し、特徴量を計算する。次に、計算した特徴量を用いて、接合する石器の剥離面同士をマッチングして、隣接する剥離面候補を高速に探索する。その後、候補となる剥離面から適切な石器を選出し、姿勢最適化手法を用いて接合する。最後に、接合した2つの石器剥離面と隣接する剥離面を解析して、複数剥離面をひとつの剥離面に併合することで、複雑な剥離面に対しても石器接合資料作成を自動化できることを検証する。

#### Abstract

Stone flakes are assembled on the same stone core and the position and posture of the adjacent flake surfaces are restored to form a joining material of a stone tool. The operation to assemble stone tool flakes is usually carried out for a population group of materials excavated from a single archaeological ruin, but the group does not always contain all of necessary stone flakes to restore the original stone tool. It is difficult to try assembly for all the excavated stone flakes for the restoration. Due to this, it is hard to determine when to terminate the assembly of stone flakes, or the conditions to terminate the assembly. In addition, the assembly is generally performed manually through a trial-and-error process, which becomes a heavy burden of workers. A method has been proposed for extracting flake surfaces of stone tools and detecting the matching ones to be adjacent by using a computer. With the conventional method, however, it is difficult to detect adjacent flakes for complex flake surfaces, such as a surface for which multiple flakes are merged. Moreover, matching calculation must be implemented for all the target flake surfaces. This operation is very time consuming to search and apply them to a large number of stone tools. In this study, therefore, we propose a faster search method of matching surfaces for complex flake surfaces. In this method, stone tools are measured automatically to extract point clouds on flake surfaces and the feature quantity is calculated. Next, the feature quantity is used to match the flake surfaces and candidates for adjacent surfaces are detected at high speed. Then, appropriate flakes are selected from the candidates and the orientation optimization method is applied to join the flakes. Finally, the flake surfaces are analyzed and two flake surfaces are merged, and we verify that it is possible to automate stone tool material creation from complex flake surfaces.

**キーワード** 石器, 接合資料, 3次元計測, ヒストグラム, 類似形状検索

**Keywords** Stone tools, Joining flakes, Three-dimensional measurement, Histogram, Similar shape search

## 1 はじめに

石器の接合資料 [1] とは、同一の石核から製作された石器同士が接合され、隣接する石器間の位置や姿勢を復元した資料のことである。例えば、石器をジグソーパズルのピースと見立てたときに、ジグソーパズルを組み立てた結果が接合資料に相当する。接合資料からは、石器製作者の製作意図や技術力、行動や生活範囲など様々な情報を得ることができる。接合資料の作成は、通常 1 つの遺跡から出土した石器群を母集団として行われるが、その中に母岩を復元するために必要な、全ての石器が含まれるとは限らない。しかしながら復元のために、出土したすべての石器を対象として復元を試行することは、時間的な制約があるため難しい。そのため、組み立てをいつ終了するか、すなわち、組み立てにおける終了条件の決定が非常に困難である。また、一般に接合資料作成は、出土した石器の色や模様、形を手がかりに試行錯誤を伴う手作業で行われるため、作業者の負担が大きい。そのため、作業者の負担を減らし、効率的な接合資料の作成を行うために、計算機を用いて試行錯誤を大幅に削減する技術が必要とされる。

従来、計算機を用いて石器の剥離面 [2] を抽出し、剥離面同士のマッチングにより隣接する石器剥離面を検出する手法 [3] が提案されている。初めに、対象となる剥離面の幾何形状がどの程度一致するかを、2 つの面間の距離に基づいた評価式により算出する。その後、評価値が最小かつ閾値以下となる剥離面間のペアを選出して、接合する。しかし、文献 [3] の手法は、単純なマッチングは可能であるが、複数の石器剥離面が合併し、ひとつの剥離面を構成するような複雑な剥離面に対して探索が困難である。また、探索対象となる全ての石器剥離面に総当たりでマッチングを行わなければならないため、マッチングには非常に時間がかかり、大量の石器に適用することが困難である。

そこで、本論文では複数の石器剥離面で構成される複雑な剥離面に対して、隣接する石器を探索できる高速な剥離面探索手法を提案する。本手法では、形状の類似度によりマッチング候補を絞り込むことによって、マッチングの高速化を実現する。また、複数の剥離面から構成される複雑な剥離面に対しては、ひとつの剥離面に併合することで課題の解決を行う。実験では、複雑な剥離面に対しても石器接合資料作成を自動化できることを検証する。

## 2 関連研究

### 2.1 石器接合資料作成

石器は、黒曜石などの石を加工して製作した道具の一種である。主に、旧石器時代、縄文時代、弥生時代の人々が使用していた。石器作成の手順を図 1 に示す。初めに、母岩と呼ばれる石器の基となる石に打撃を与えて剥片を作成する。次に、剥片に打撃を加え形状を細かく調整することで、道具として使用できる形に成形して完成する。剥片と母岩のように、本来接合されていた石同士が剥がれたときにできる面を剥離面と呼ぶ [2]。

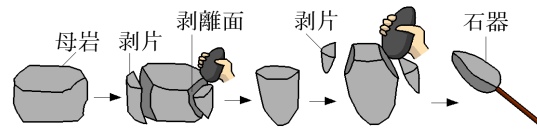


図 1: 石器作成手順

接合資料の作成は、石器の色や材質、模様を基に同一の母岩から製作されたと推定される石器を、同一のグループに分類する。この作業を母岩分類 [3] と呼ぶ。その後、分類したグループごとに石器の接合を行う。具体的には、3 次元ジグソーパズルのように、各石器に対して隣接する石器の剥離面を探索し、剥離面を一致させることで、石器の元になった母岩を復元する作業である。接合した石器や剥片が出土した場所と接合順から、製作時期、製作された場所、製作者の行動などが解析できる [2]。

### 2.2 石像とフレスコ壁の復元

文献 [4] では、破壊された石像の破片から隣接する破片を探索する手法が提案されている。全ての破片データに対して曲率分布を求めることで、破片を構成する部位が石像表面か、または石像内部の破片断裂面であるかを分類する。分類された面の曲率分布に基づいて、破片が隣接する面を特定することができることから、マッチングを効率化することが可能となる。文献 [4] の手法では、曲率分布が一定の範囲内に収まる場合は石像表面を示す。一方、曲率分布が一定の範囲内に収まらない場合は、破片断裂面であると判断する。曲率分布が一番近い破片断裂面を次々と探索し、徐々に大きな破片の集合を作成していくことで、最終的に石像を復元することが可能である。しかし、石器剥離面は滑らかな面でのみ構成されているため、すべての面で曲率分布が一定の範囲内に収まる。ゆえに、文献 [4] の手法を適用することは困難である。

また、文献 [5] では破壊されたフレスコ壁の破片をマッチングする手法について述べられている。この手法では、各頂点の曲率分布を求め、破片断面の稜線を抽出する。その後、輪郭線上の稜線を取り出した結果を用いて、破片のマッチングを行う。石器はフレスコ壁とは異なり、表面と裏面に模様が無く滑らかな形状である。そのため、石器は表面と裏面の判定が困難である。さらに、空間姿勢から探索するため文献 [5] の手法は適用できない。

### 2.3 石器接合処理

文献 [3] では、ポリゴンで表された石器剥離面間のマッチング手法が提案されている。初めに、対象となる剥離面の幾何形状がどの程度一致するかを、2 つの面間の距離に基づいた評価式により算出する。その後、評価値が最小かつ閾値以下となる剥離面間のペアを選出して、接合する。文献 [3] の手法では、通常の石器接合で表れる、複数の石器剥離面が組み合わされて、ひとつの大きな剥離面を構成するような場合について

述べられていない。また、マッチングを総当たりで行うため、石器数が多くなると接合資料作成に時間がかかることが問題点として挙げられる。

## 3 提案手法

### 3.1 概要

石器接合箇所の探索は、打撃により母岩から分離した面同士が形状が一致するかどうかで調べることができる。打撃により分離した面は剥離面と呼ばれている。剥離面の境界は、稜線（尾根線）で構成される。稜線で囲まれた領域がひとつの剥離面を表し、剥離面の内側は滑らかで曲率が小さい形状となる。そこで、本手法では、計測点群を剥離面ごとに分割し、探索対象となる剥離面と形状が一致する別の石器の剥離面を探索する。その後、形状が一致した2つの剥離面を接合してひとつにまとめ、接合した剥離面に隣接する剥離面を再構築する。再構築された剥離面は、新たな探索対象となる。以上のような手法により、石器を接合した接合資料を自動生成することができるようになる。以下に本手法の具体的な手順を示す。図2は処理の流れである。

1. 石器を計測し、点群を取得する [6].
2. 剥離面ごとに点群を分割する。
3. 剥離面を表す点群に D2[7] を適用し、得られた特徴量をデータベースに登録する。
4. 探索対象（剥離面）とマッチする剥離面候補をデータベースから選出する。
5. 姿勢最適化 [3] を行い、正規化距離を計算する。
6. 正規化距離が閾値以下かつ最小の剥離面と接合する。ここで、正規化距離が閾値より大きい場合は手順4に戻る。
7. 剥離面を再構築する。

3～7の処理を繰り返すことで、接合資料の作成を自動化する。以降では、手順3～7について、詳細な手法を説明する。

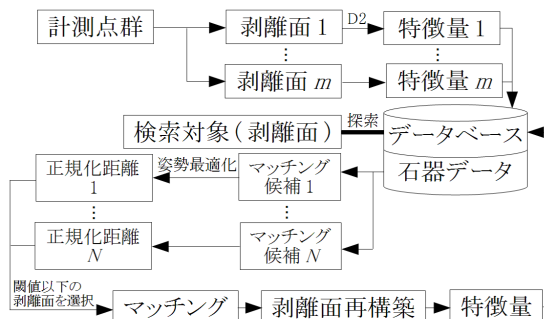


図 2: 処理の流れ

### 3.2 計測点群を用いた剥離面抽出

#### 3.2.1 剥離面抽出手法

点群を剥離面ごとに分割するために、剥離面の境界となる稜線を抽出した後、稜線で囲まれる閉領域に属する点群を抽出し、同一の色属性を付加する。ただし、剥離面の面積が小さい領域は、誤マッチングの原因となるため、剥離面として抽出を行わない [3].

処理の流れを以下で説明する。3.1節で述べたように、剥離面の境界となる稜線近傍は曲率が大きく、剥離面の内側は曲率が小さい。ゆえに、計測点群に軽量化処理を適用すると、稜線近傍では点密度が高く、剥離面の内側付近では点密度が低くなる。そこで、本手法では、各点とその点のK近傍点との距離を計算し、最も近い点との距離が閾値以下の場合稜線上の点と判断し、閾値以上の場合、剥離面の内側の点と判断する。閾値は実験により0.005とした。実験結果の一部を表1に示す。稜線上の点と判断した頂点を大きな点、剥離面上の点と判断した頂点を小さな点で示す。抽出した点群を目視で判断し、稜線上の点が抽出され、剥離面上の点が抽出されない距離を閾値として設定した。また、図3は、軽量化された点群から剥離面の稜線上の点群を抽出した結果である。

表 1: 点群抽出結果

| 石器<br>距離 | 02 | 10 |
|----------|----|----|
| 0.050    |    |    |
| 0.010    |    |    |
| 0.005    |    |    |
| 0.001    |    |    |

次に、稜線上の点群から作成したイラスト図に対して、閉領域ごとに異なる色を付加し、計測点群をイラスト図へ正射影することでイラスト図に描かれている色属性を各点に転写する。図4は、イラスト図の閉領域で表される剥離面の1つに赤色を付加したイラスト図である。また、図5は、イラスト図から計測点群に赤色の色属性情報を転写した結果である。転写の具体的な手順を以下に示す。色属性の転写は面積が大きいものから行うため、境界線上の点は大きい剥離面に属する点群から色付けされる。

1. 閉領域ごとに色を付加したイラスト図に、イラスト図と同じ姿勢の計測点群を重ね合わせ、各点をイラスト図に正射影することで、点とイラスト図の閉領域を対応付ける。
2. 点ごとにイラスト図上からRGB情報を取得し、色属性情報を点に付加する。

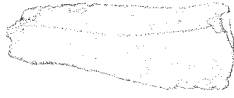


図 3: 稜線上の点群



図 4: イラスト図

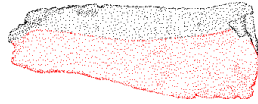


図 5: 属性転写後

### 3.2.2 マッチング高速化手法

先行研究では、計測点群を剥離面単位で分割した後、総当りでマッチングを行うため、石器数が多くなると接合資料作成に時間がかかることが問題であった。そこで、本研究では、類似する剥離面の探索を行い、マッチング時間の高速化を実現する。

3次元モデルの類似検索手法として様々な手法が提案されている。例として、頂点情報のみを用いる D2[7]や、D2 に面の向き情報を追加した AAD[8]、頂点を持つ位置ベクトルと法線ベクトルを用いる SPRH[9]などが挙げられる。AAD や SPRH は、頂点における面法線ベクトルを計算する必要があるため、特徴を抽出するときの計算量が増加する。それに対して、D2 は特徴量の計算に頂点情報のみを用いるため、計算量が少なく、高速に特徴を抽出することができる。そこで、分割された点群ごとに形状特徴を算出する D2 関数 [7] を用いて特徴量を算出し、特徴量に基づきマッチング候補を絞り込むことで高速化を実現する。

D2 の計算手順を図 6 に示す。特徴量は、全ての頂点ペア間の距離に基づいて算出されており、ヒストグラムで表される。データベースに格納した特徴量と検索対象の剥離面上の点群から計算した特徴量を、マンハッタン距離 [7] により比較することで、マッチング候補となる剥離面を探索し、距離の短い上位  $N$  個の剥離面をマッチング候補として選出する。

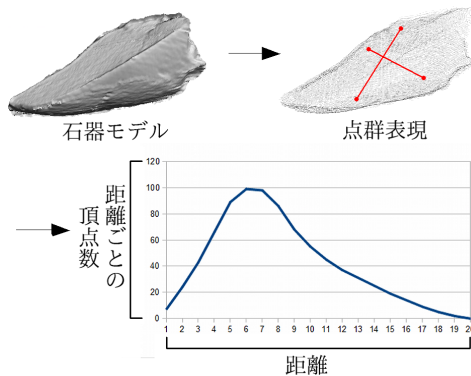


図 6: D2 の計算手順

マッチング候補から、最も適切な隣接剥離面を選出するときは、 $N$  個のマッチング候補となる剥離面に対して姿勢最適化手法 [3] を適用し、正規化距離を算出する。そして、正規化距離が最小かつ閾値以下の剥離面を最適な隣接剥離面として選出する。正規化距離の算出は、計算コストが高いため、文献 [7] の手法で計算対象を絞り込むことによって、大幅に高速化することが可能となる。

本手法では、 $N$  個の隣接剥離面を選出する。ここで、もし条件に合致するマッチング候補が存在しない場合は、次に類似度の高い剥離面を  $N$  個取り出し、閾値を上げて候補を探索する。本手法では、文献 [3] に従って正規化距離の閾値を 0.1 とした。また、閾値を上げる場合は経験的に 0.15 とした。

### 3.2.3 計算時間の評価

文献 [3] の手法の流れを図 7 に、提案手法の流れを図 8 に示す。データベースには  $m$  個の剥離面が格納されていると仮定する。文献 [3] の手法では総当りでマッチングを行うため、全ての剥離面の正規化距離を計算する必要がある。そのため、 $m$  回正規化距離を計算しなければならない。一方、提案手法はあらかじめ特徴量を計算し、類似度が高い上位  $N$  個の剥離面に対してのみ正規化距離を計算する。

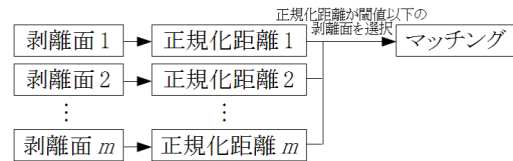


図 7: 従来手法の流れ

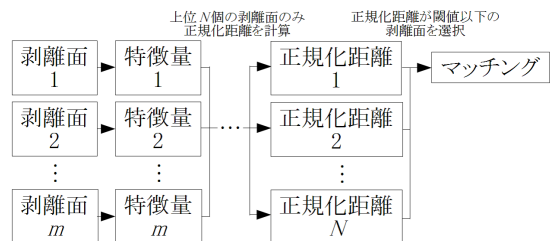


図 8: 提案手法の流れ

1 回の正規化距離の計算時間を  $t_1$ 、特徴量の計算時間を  $t_2$ 、マッチング候補探索時間を  $t_3$  とする。文献 [3] の手法の計算時間は式 (1)、提案手法の計算時間は式 (2) で示される。

$$mt_1 \quad (1)$$

$$m(t_2 + t_3) + Nt_1 \quad (2)$$

ここで、 $m \gg N$  と仮定して従来手法と実行時間を比較する。



$$\begin{aligned} & mt_1 - \{m(t_2 + t_3) + Nt_1\} \\ & = (m - N)t_1 - m(t_2 + t_3) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $(m - N) \approx m$  とすると、式 (3) は式 (4) で近似できる。

$$\begin{aligned} & mt_1 - m(t_2 + t_3) \\ & = m \{t_1 - (t_2 + t_3)\} \end{aligned} \quad (4)$$

$t_1 - (t_2 + t_3)$  は、ひとつの剥離面に対する実行時間の差分である。よって、 $t_1 - (t_2 + t_3)$  が正になれば、従来手法と比較して提案手法は高速であると言える。

次に、 $N$  の値 (マッチング候補の数) によってどの程度高速化できるかを考える。従来手法と比較して提案手法が  $k$  倍高速であると仮定すると、式 (5) が導出される。

$$t_1 = k(t_2 + t_3) \quad (5)$$

これを式 (3) に代入すると、式 (6) が導出される。

$$\begin{aligned} & mt_1 - \left(\frac{m}{k}t_1 + Nt_1\right) \\ & = t_1 \left\{ \frac{m(k-1)}{k} - N \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$k > 1$  であれば、式 (7) が導出される。

$$N < \frac{m(k-1)}{k} \quad (7)$$

従って、 $N$  を  $\frac{m(k-1)}{k}$  より小さい数に設定すれば、提案手法の方が高速であると予測できる。ここで、 $m$  を固定し、マッチング候補数  $N$  と  $k$  の関係を考える。図 9 には、 $N$  と  $k$  の関係を表すグラフを示す。 $N$  の値は小さければ小さいほど高速化の効果が得られるが、正解となる剥離面が探索できない可能性がある。本手法では、マッチング候補数に正解が含まれるかどうかと、探索速度のバランスを考慮して、 $N$  をグラフの曲率が一番大きい  $N = 5$  に設定する。

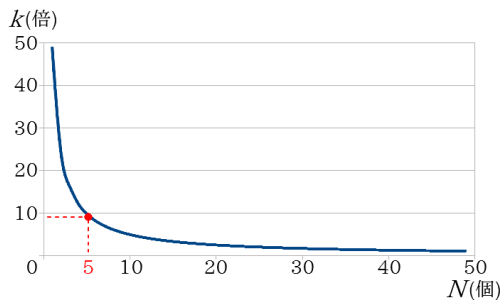


図 9: マッチング候補数と高速化の関係

### 3.3 剥離面再構築

文献 [10] の手法を利用してマッチングを行うと、マッチング前は分断されていて検出することができなかった、複数の石器剥離面で構成される大きな剥離面が復元される。ゆえに、接合した剥離面に隣接する、各石器の剥離面同士をひとつにマージすることで、新たな剥離面を検出できるようになる。そこで、接合後

に本来 1 つの剥離面であったかを判定し、剥離面を併合して再構築を行う。

図 10 に剥離面再構築の様子を示す。図 10 は剥離面 A と剥離面 B が隣接関係にある石器モデルである。モデル 1 とモデル 2 において、接合される剥離面を接合面と呼び、青い斜線で示す。また、ピンクの点は剥離面の境界稜線の角となる点を示す。さらに、接合面に隣接するモデル 1 の剥離面を剥離面 A, C で示す。同様に、モデル 2 では、剥離面 B, D とする。ここでは、同色の剥離面 A と B が、本来ひとつの剥離面が分断されたと仮定し、本手法の手順を説明する。初めに、分断された剥離面の境界線において、接合面を含む 3 つ以上の剥離面が共有する頂点 (図 10 のピンクの点) の探索を行う。次に、同一剥離面候補の評価を行う。剥離面 A と剥離面 B が 1 つの剥離面を構成する場合、剥離面 A, B が接合される境界線は、マッチングした時点で一致する。また、剥離面 A, B は本来 1 つの剥離面であったものが分断された形状であるため、剥離面 A と B は滑らかな形状となるはずである。そこで、本手法では初めに剥離面 A の境界上の頂点と、剥離面 B の境界上の頂点との距離が閾値以下となる頂点ペアを求める。距離の閾値は、実験の結果 4mm に設定した。次に、各頂点を共有するポリゴンの法線ベクトルの平均を求め、各頂点における平均法線ベクトルの角度が閾値以内で一致している場合は、剥離面 A と B は同一剥離面とみなすこととする。角度の閾値は、実験の結果 30 度とした。図 11 は剥離面再構築の結果を示している。頂点  $V_1$  と頂点  $V_2$ 、頂点  $V_3$  と頂点  $V_4$  を端点とする共有境界稜線の両側の剥離面をひとつの剥離面となるようにデータを統合することで、剥離面の再構築を行う。

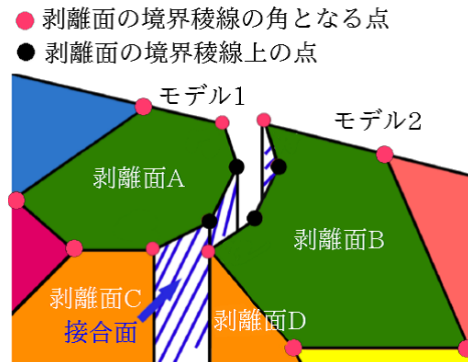


図 10: 再構築される剥離面検出

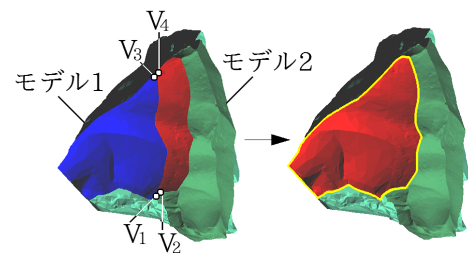


図 11: 複数剥離面の統合

剥離面再構築された2つのモデルは、1つのモデルに統合され、再構築された剥離面については、特徴量を算出し直す。そのため、新たに検出した剥離面から再び剥離面上の点群を抽出し、特徴量の計算を行う。また、マッチングにより接合された石器同士には、細かい隙間が存在する。原因として、石器製作過程で砕けたり、経年劣化、計測誤差、マッチング誤差などが挙げられるが、マッチング処理は十分な面積の剥離面があれば実行可能であるため、細かい隙間は無視しても実行には問題ない。

## 4 実験結果

3章で述べた手法について、接合可能な模造石器を計測して得られた計測点群を用いて検証を行う。使用したPCの環境は、Intel Core i7 2700k CPU 3.80GHz, 16GB RAM である。実験には同一の材質と分類された4種類の石器グループを用いる。

### 4.1 剥離面抽出

初めに、3.2節で述べた、剥離面の自動抽出手法の有効性について検証する。グループ1からグループ4の石器から抽出した剥離面数を表2から表5に示す。また、石器モデルから作成したイラスト図の一部を図12に示す。

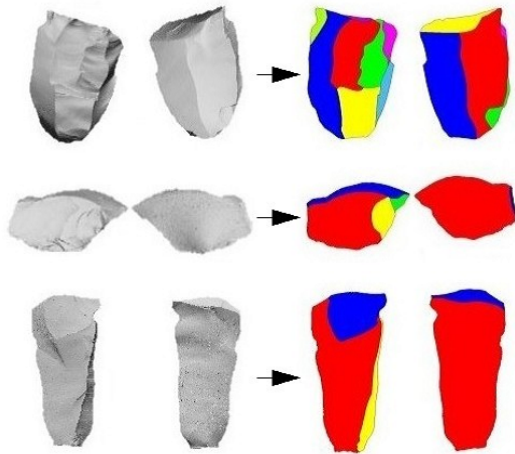


図 12: 作成したイラスト図の一部

石器番号はグループ1に01~19, グループ2に21~36, グループ3に39~46, グループ4に50~60までの識別番号を設定し、剥離面番号は石器の識別番号ごとに、アルファベット順の英字を設定した。検出結果と実物を目視により比較し、意図通りに剥離面を抽出できていることを確認した。また、目視により閉領域の表面積がマッチングに不十分と判断した場合は抽出を行わない。

表 2: グループ1の剥離面数

| 石器番号 | 01 | 02 | 03 | ... | 17 | 18 | 19 | 合計 |
|------|----|----|----|-----|----|----|----|----|
| 剥離面数 | 13 | 3  | 4  | ... | 9  | 4  | 7  | 97 |

表 3: グループ2の剥離面数

| 石器番号 | 21 | 22 | 23 | ... | 34 | 35 | 36 | 合計 |
|------|----|----|----|-----|----|----|----|----|
| 剥離面数 | 8  | 3  | 2  | ... | 3  | 3  | 3  | 52 |

表 4: グループ3の剥離面数

| 石器番号 | 39 | 40 | 41 | ... | 44 | 45 | 46 | 合計 |
|------|----|----|----|-----|----|----|----|----|
| 剥離面数 | 7  | 6  | 8  | ... | 6  | 7  | 5  | 48 |

表 5: グループ4の剥離面数

| 石器番号 | 50 | 51 | 52 | ... | 58 | 59 | 60 | 合計 |
|------|----|----|----|-----|----|----|----|----|
| 剥離面数 | 13 | 5  | 6  | ... | 4  | 4  | 6  | 54 |

### 4.2 マッチング候補検索

グループ1から、図13に示す赤色で転写した部分(剥離面01M)を検索対象の剥離面として、石器番号01以外の石器から抽出した84個の剥離面から計算した特徴量をマンハッタン距離を用いて比較する。本手法では、最初を選択する剥離面は、面積が最大の剥離面とする。マッチング候補の検索結果を表6に示す。たとえば表6の01M-12Cは、剥離面01Mと剥離面12Cをマッチング評価したことを示している。剥離面01Mに接合する剥離面12Cの順位は1位であり、検索に要した時間は265ミリ秒であった。剥離面01Mと剥離面12Cは、本来接合される箇所であり、計算結果は正しいことがわかる。また、剥離面01Mと剥離面12Cから作成したヒストグラムを図14に示す。ヒストグラム同士のマンハッタン距離が最も近いことから、2つの剥離面の形状が類似していると判断できる。その他の剥離面に対しても、接合される剥離面の検索が成功したことを確認した。本実験では、 $N=5$ としたとき、全てのグループで剥離面候補に、正解となる剥離面が必ず含まれていることを確認した。ゆえに、 $N=5$ は、妥当な数であるといえる。

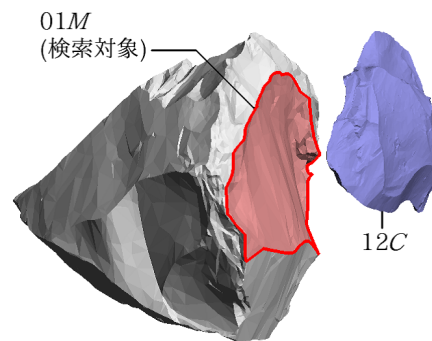


図 13: 検索対象

表 6: マッチング候補の検索結果

| 順位  | 検索剥離面   | マンハッタン距離 |
|-----|---------|----------|
| 1   | 01M-12C | 570      |
| 2   | 01M-12E | 718      |
| 3   | 01M-14A | 1057     |
| ... | ...     | ...      |
| 84  | 01M-17I | 4634     |

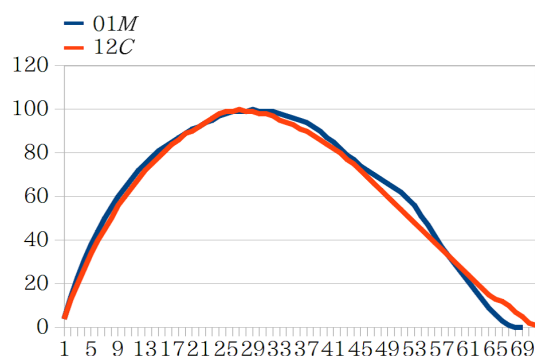


図 14: 01M と 12C のヒストグラム

### 4.3 剥離面再構築とマッチング時間

従来手法と提案手法のマッチング時間を比較し、どの程度高速化できたか検証する。マッチング時間の比較には、分断されていた剥離面を再構築して新たに復元した剥離面を用いる。再構築した剥離面を図 15 に示す。接合した石器ごとに色分けを行っており、白い丸が接合した剥離面の境界線上の頂点、黄色の線が再構築した剥離面の境界線を示している。図 15 の石器間にまたがる剥離面の再構築に要した時間は 5.1 秒であった。

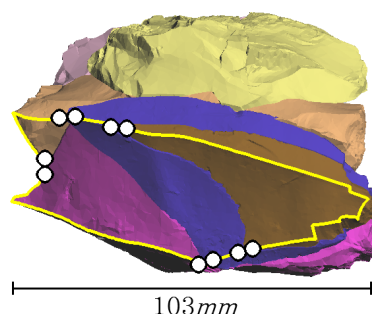


図 15: 対象剥離面

表 7 に、従来手法と提案手法でマッチングを行った場合のマッチング候補数とマッチング時間計測結果を示す。従来手法では、総当たりでマッチングを行うため、マッチング候補数は 49 個で、マッチング時間は

2562.3 秒と、非常に時間がかかっている。本手法では、初めに検索対象である剥離面に対応する剥離面候補検索を行う。その結果、マッチングに要した時間は 304.4 秒であり、従来手法と比較すると約 8.8 倍の高速化を実現した。提案手法を用いたマッチング時間の内訳を図 16 に示す。図 16 より、正規化距離計算時間は 260 秒、特徴量の計算時間は 44.1 秒、マッチング候補の計算時間は 0.3 秒であった。全体の計算時間に対する正規化距離の割合は、約 85 %であり、この部分が高速化に大きく寄与することがわかる。

表 7: マッチング時間

|      | マッチング候補数 | マッチング時間  |
|------|----------|----------|
| 従来手法 | 49 個     | 2562.3 秒 |
| 提案手法 | 5 個      | 304.4 秒  |

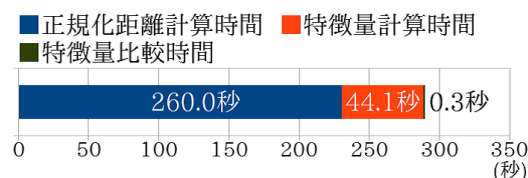


図 16: マッチング時間の内訳 (提案手法)

また、提案手法でグループごとの石器を全て接合した結果を以下に示す。グループ 1 からグループ 4 の石器を全て接合した場合、特徴量同士の類似度を基にした順位、検索対象に接合する石器剥離面を探してマッチしたものを統合するまでの時間、2つの剥離面間の正規化距離を表 8 から表 11 に示す。これらの表では、石器を接合して、剥離面再構築を行った後は、剥離面は、01M, 21D, 41G, 52A に、それぞれ統合されている。全てのグループで、本来接合される剥離面がマッチング候補数内に含まれ、候補となった剥離面のうち正規化距離が最小かつ閾値以下の面となったことから、本手法の有効性を示すことができた。また、本手法は母岩分類 [3] 後の石器群に適用可能であることが示された。提案手法で 4 種類の石器を接合した結果を図 17 から図 20 に示す。また、図 21 から図 24 に実際に接合した石器の写真を示す。図 24 は、3D プリンタで作成したレプリカである。実物の接合同様の結果が得られたことから、本手法の有効性が示された。

さらに、グループ 1 とグループ 2 の石器が混在している状態で、グループ 1 の石器を全て接合する。01M から探索を行いグループ 1 の接合石器が完成できるかどうか検証する。その結果、正解の剥離面が 5 位以内に含まれるものは 83 %, 上位 10 位以内に含まれるものが 94 %であった。この結果から、母岩分類された石器グループごとの探索では問題ないが、母岩分類を行わない大規模な石器群からの探索の場合については、隣接剥離面の認識率を向上させる必要がある。



表 8: 接合石器作成時間 (グループ 1)

| 石器      | 順位       | 正規化距離    | 時間    |
|---------|----------|----------|-------|
| 01M-12C | 1/84     | 0.093339 | 444.6 |
| └ 06B   | 2/79     | 0.048363 | 543.5 |
| └ 10E   | 4/75     | 0.076167 | 345.8 |
| └ 07C   | 1/69     | 0.073788 | 462.2 |
| └ 05A   | 1/64     | 0.089561 | 501.8 |
| ...     | ...      | ...      | ...   |
| └ 09C   | 1/3      | 0.054424 | 252.4 |
| 合計      | 8171.9 秒 |          |       |

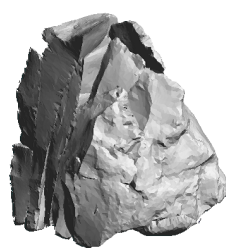


図 17: マッチング結果 (グループ 1)



図 18: マッチング結果 (グループ 2)

表 9: 接合石器作成時間 (グループ 2)

| 石器      | 順位       | 正規化距離    | 時間    |
|---------|----------|----------|-------|
| 21D-25C | 3/44     | 0.094361 | 496.0 |
| └ 22C   | 4/41     | 0.084532 | 357.5 |
| └ 23B   | 4/38     | 0.071664 | 445.3 |
| └ 24B   | 1/36     | 0.084148 | 478.4 |
| └ 34C   | 3/33     | 0.096574 | 257.5 |
| ...     | ...      | ...      | ...   |
| └ 35B   | 1/3      | 0.086409 | 237.4 |
| 合計      | 6656.9 秒 |          |       |



図 19: マッチング結果 (グループ 3)

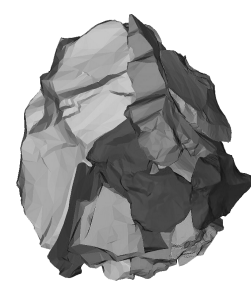


図 20: マッチング結果 (グループ 4)

表 10: 接合石器作成時間 (グループ 3)

| 石器      | 順位       | 正規化距離    | 時間    |
|---------|----------|----------|-------|
| 41G-43A | 1/40     | 0.097623 | 519.9 |
| └ 45G   | 2/35     | 0.053331 | 594.6 |
| └ 39D   | 1/28     | 0.096725 | 489.0 |
| └ 44B   | 1/21     | 0.050647 | 442.9 |
| └ 40D   | 2/15     | 0.076958 | 496.5 |
| └ 42D   | 3/9      | 0.068045 | 333.0 |
| └ 46C   | 1/5      | 0.094384 | 567.3 |
| 合計      | 3443.2 秒 |          |       |



図 21: 接合石器 (グループ 1)



図 22: 接合石器 (グループ 2)

表 11: 接合石器作成時間 (グループ 4)

| 石器      | 順位       | 正規化距離    | 時間    |
|---------|----------|----------|-------|
| 52A-56E | 1/41     | 0.044806 | 458.8 |
| └ 51B   | 1/36     | 0.029365 | 549.7 |
| └ 58B   | 3/30     | 0.065605 | 415.7 |
| └ 57A   | 2/28     | 0.083574 | 410.5 |
| └ 53B   | 1/25     | 0.088302 | 383.9 |
| ...     | ...      | ...      | ...   |
| └ 54F   | 1/6      | 0.042005 | 267.4 |
| 合計      | 5504.3 秒 |          |       |



図 23: 接合石器 (グループ 3)

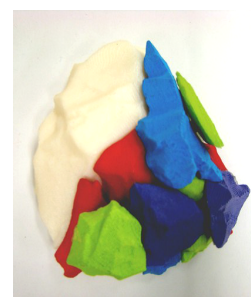


図 24: 接合石器 (グループ 4)



## 5 まとめと今後の課題

本論文では、計測点群を利用した石器剥離面の高速な隣接剥離面探索手法を提案した。本手法を用いて石器剥離面を自動的に抽出し、検索形状に類似する剥離面を高速に探索することができた。今後の課題として、実際に出土した石器を用いて実験を行うことと、隣接剥離面の認識率を向上させることが挙げられる。

## 謝辞

本研究の一部は、科研費 24501253 の助成を受けたものである。また、実験データは東京国立博物館より借用したもので、協力に感謝する。最後に、実験の一部を補助していただいた修了生の佐藤真麻氏に感謝する。なお、本論文は NICOGRAPH 2013 で発表した論文 [11] に加筆したものである。論文査読者からの有益なご指摘に深謝する。

## 参考文献

- [1] 五十嵐, “ 考古資料の接合-石器研究における母岩・固体問題- ”, 史学, Vol.67, No.3/4, pp.465-488, (2002)
- [2] 石器技術研究会, 石器づくりの実験考古学, 学生社, (2004)
- [3] 山原, 今野, 千葉, 佐藤, “ 接合資料作成のための石器剥離面に基づく隣接関係検出法 ”, 日本情報考古学会誌, Vol. 17, No.1・2, pp.23-32, (2011)
- [4] Q.Huang, S.Flory, N.Gelfand, M.Hofer, H.Pottmann, “ Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching ”, ACM TOG, Vol.25, No.3, pp. 569-578, (2006)
- [5] B.J.Brown, C.Tolerfranklin, D.Nehab, M.Burns, D.Dobkin, “ A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments:Reassembling TheranWall Paintings ”, ACM TOG, Vol.27, No.3, pp.84:1-84:9, (2008)
- [6] E. Altantsetseg, Y. Muraki, F. Chiba, and K. Konno, “ 3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine ”, The International Journal of Virtual Reality (IJVR), Vol.10, No.1, pp.37-43, (2011)
- [7] R.Osada, T.Funkhouser, B.Chazelle, D.Dobkin, “ Matching 3d models with shape distributions ”, ACM TOG, Vol.21, No.4, pp. 807-832, (2002)
- [8] R. Ohbuchi, T. Minamitani, T. Takei, Shape-Similarity Search of 3D Models by using Enhanced Shape Functions, International Journal of Computer Applications in Technology, Vol.23, No. 2/3/4, pp.70-85, (2005)
- [9] E. Wahl, U. Hillenbrand, G. Hirzinger. Surflet-Pair-Relation Histograms: A Statistical 3D-Shape Representation for Rapid Classification, Proc. of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2003), pp.474-481, (2003).
- [10] 佐藤, 松山, 千葉, 今野, “ 石器接合のための複数の隣接剥離面の併合による剥離面再構築手法 ”, NICOGRAPH 2012, CD-ROM, pp.70-73,(2012)
- [11] 千田, 松山, 千葉, 今野, “ 接合資料作成のための計測点群による高速な隣接剥離面探索手法 ”, NICOGRAPH 2013, CD-ROM, pp.53-60, (2013)