

# 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\*

山原一輝\*\*、今野晃市\*\*\*、千葉史\*\*\*\*、佐藤真麻\*\*\*\*\*

石器の接合資料は、旧石器時代と縄文時代の人々の生活を調査するための重要な資料である。石器は、石核と呼ばれる原石から剥片と呼ばれるパーツを剥離させ、その後道具として使用するために、剥片を整形したツールである。石器を作成する過程で排出される剥片を接合し、石器の加工工程を再現することで、石器製作者の製作意図や行動、技術力、生活範囲などさまざまな情報を得ることができる。石器の加工工程を再現するためには、同一の石核から製作された石器同士を接合し、隣接する石器の位置や姿勢を復元する必要がある。しかし、石器の接合資料の作成は手作業で行われているため、作業には多くの時間と労力がかかる。また、作業には石器が破損するリスクを伴うため、作業者の負担も大きい。そこで本論文では、計測点群から生成したポリゴンモデルを利用して、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について提案する。本手法は、剥離面は滑らかな形状であり、剥離面同士の境界は、稜線を構成していることに着目して、曲率に基づいて稜線を抽出する。次に、抽出された稜線で閉領域を構成し、剥離面を抽出する。最後に、同一の母岩に属している各石器の剥離面同士でペアを作成し、ペアに含まれるポリゴンが幾何学的に一致するかどうかを評価する。その結果、石器間の隣接関係を検出することが可能となる。

キーワード：接合資料、領域分割、姿勢最適化、3次元計測、曲率近似

## 1) はじめに

石器の接合資料 [1] は、旧石器時代と縄文時代の人々の生活を調査するための重要な資料である。石器は、石核と呼ばれる原石から剥片と呼ばれるパーツを剥離させ、その後道具として使用するために、剥片を整形したツールである。石器を作成する過程で排出される剥片を接合し、石器の加工工程を再現することで、石器製作者の製作意図や行動、技術力、生活範囲などさまざまな情報を得ることができる。石器の加工工程を再現するためには、同一の石核から製作された石器同士を接合し、隣接する石器の位置や姿勢を復元する必要がある。一般に、復元された資料は石器の接合資料と呼ばれる。接合資料を作成するためには、まず出土した石器に関して、石器の材質や模様などに基づき母岩分類を行う。次に、同一の母岩に属する石器同士が接合可能かどうか調査する必要がある。なぜなら、出土した多くの石器に対して接合情報を探索することによって、遺物解析のための情報量を大幅に増加させることが可能となるからである。しかし、石器の接合資料の作成は、いまだに手作業で行われている。手作業での接合資料の作成には、石器が破損す

るリスクを伴う。また、作業には多くの時間と労力がかかるため、作業者の負担も大きい。

石器計測により得られた3次元データに基づいて、接合資料作成を計算機で支援できれば、石器破損のリスクと作業者の負担軽減が期待できる。石器を3次元計測機器で計測し、得られた計測点群からソリッドモデルを生成する手法が提案されている [2]。文献 [2] の手法は、表裏2方向から石器を計測したポリゴンモデルに対して自動位置合わせを行い、位置合わせされたポリゴンモデルを近似接合することで、データの欠落の補間や重なり目の除去により、ソリッドモデルを生成する手法である。文献 [2] の手法により得られたポリゴンモデルを利用することによって、計測によるデータの欠落を補間した完全なモデルで、石器の隣接関係を探索することが可能である。

遺物の一種である土器片を対象として、隣接関係を探索する手法もいくつか提案されている。文献 [3, 4] は、土器を復元するために、土器片の輪郭データを階層化した表現を提案して、接合部分を検出する手法を示している。また、文献 [5, 6] は、皿や蓋などの平面的な形状を持つ土器破片を対象とし輪郭形状の階層表現に基づいた土器復元手法を提案している。文献 [5, 6] の手法では、接合箇所候補を段階的に抽出し、その箇所分割した輪郭線から階層構造を構築することで接合の精度を高めるものである。以上のように、文献 [3, 4, 5, 6] で提案されている土器片を対象とした隣接関係探索は、輪郭線のマッチングによる2次元的な処理となる。石器の接合は剥離された面同士の一致を調べる必要があるため、2次元の輪郭線情報だけでは不十分である。

本論文では、計測点群から生成したポリゴンモデルを

\* A Method of Detecting Adjacent Flakes in Stone Tool Restoration by Extracting Peeling Surfaces

\*\* Kazuki YAMAHARA 岩手大学大学院工学研究科

\*\*\* Kouichi KONNO 岩手大学大学院工学研究科

\*\*\*\* Fumito CHIBA (株)ラング

\*\*\*\*\* Maasa SATOH 岩手大学大学院工学研究科

利用して、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について提案する。本手法は、剥離面は滑らかな形状であり、剥離面同士の境界は、稜線を構成していることに着目して、曲率に基づいて稜線を抽出する。次に、抽出された稜線で閉領域を構成し、剥離面を抽出する。最後に、同一の母岩に属している各石器の剥離面同士でペアを作成し、ペアに含まれるポリゴンが幾何学的に一致するかどうかを評価する。その結果、石器間の隣接関係を検出することが可能となる。

## 2) 関連研究

### 2.1 接合資料の作成過程

石器は、旧石器時代と縄文時代の遺物の一種である。石器は、石核と呼ばれる石器の材料に打撃を加え剥離させた剥片を作成し、剥片の形状を調整することで完成する。剥離された石器の面が剥離面である。寿命が来た石器や、石核から剥片を剥離したり調整する過程で廃棄される破片が、遺物として出土する。出土した石器は、以下の工程を経て処理される。

#### 1. 注記

遺跡を2次元のグリッドに区切りXY座標を決定する。遺物を掘り出した方向をZ方向として、遺物が出土した位置を $(x, y, z)$ 座標で表現する。注記とは、出土した石器に固有の識別番号を付加し、石器ごとの出土した位置を $(x, y, z)$ 座標で記録する工程である。注記は出土した全ての石器に対して行われる。

#### 2. 母岩分類

注記が終了した石器に対して、母岩分類を行う。母岩分類とは、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工程である。図1は、母岩分類された石器の例である。同一模様の石器がグループ化されていることがわかる。

#### 3. 接合作業

接合作業は、母岩分類により同一のグループに属する



図1 母岩分類された石器例

石器に対して、接合可能かどうかを検査する作業である。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を探索し、空間姿勢を決定していくことで、石器の元になった原石を復元する作業である。一般に接合作業は、手作業で行われているため、多くの時間が必要であり、効率よく行うためには、経験と専門知識が必要不可欠である。

図2、図3は、接合資料の例である。図2は、剥片の調整時に剥離してできた破片を、元の剥片と接合した例である。剥離してできた破片と元の剥片は、面で接触する。図3は、内部に空洞を形成しながら接合している接合資料を示している。

内部に空洞ができる接合資料は、内部の空洞部分の石器がツールとしてどこかで使用されたため、接合された石器が出土した遺跡からは、その石器が出土しないことを示している。内部に空洞を形成する場合は、石器同士の接合面が狭くなる。一方図2の例では、元になる石器表面を打ち欠きながら形状を調整した破片を接合したもので、接合面は広い。本研究では、剥離面全体で接合する図2のような石器を対象とする。

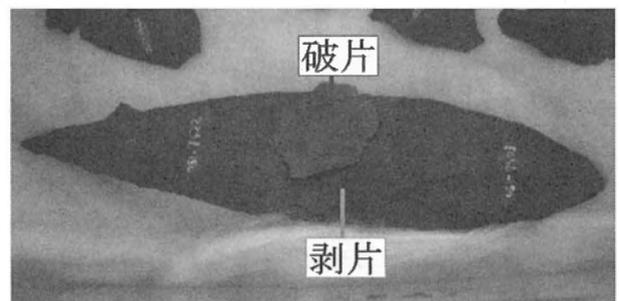


図2 接合資料例 (面で接触する場合)



図3 接合資料例 (中央が空洞の場合)

### 2.2 破片からのモデル復元手法

文献〔7〕は、破壊された石像の破片を3次元計測装置により計測して、破片を表すポリゴン頂点の曲率に基づいて破片断裂面と石像表面を分類し、破片断裂面のマ

マッチングにより石像を復元する手法を提案している。また、文献 [8] は、破片からフレスコ壁を復元する手法について提案している。文献 [7] と同様に破片断裂面を検出してマッチングする手法である。どちらの手法も、破片断裂面間のマッチングについては、曲率分布が一致する別の断面を検出することで実現する。しかし、石器の剥離面は滑らかな面で剥離するため、文献 [7, 8] の手法では剥離面を破片断裂面として検出することが困難である。

### 2.3 石器の領域分割手法

領域分割は、石器のポリゴンモデルについて剥離面を検出するために必要な操作である。石器モデルを領域分割するためには、領域の境界となる稜線を抽出する必要がある。文献 [9] は、実測図作成のために石器の特徴線を追跡する手法を提案している。文献 [9] では、石器表面を表すポリゴンモデルから最大2面角を用いて稜線を検出し、検出された稜線を連結して石器の実測図に近いワイヤーフレームモデルを得る手法について述べている。しかし、文献 [9] の手法で抽出したワイヤーフレームモデルでは、稜線列によって閉領域を構成する保証がないため、石器のマッチングに必要な領域に分割できるとは限らない。

文献 [10] は、ポリゴンモデルの各頂点における曲率を近似し、近似曲率と2つの面が成す角度を用いて稜線を抽出することで、ポリゴンモデルを断面ごとに領域分割する手法を述べている。近似曲率を用いた領域分割と2つの面が成す角度を用いた領域分割を組み合わせ、機械部品などの、近似曲率が一定の値に集中するような形状に対する領域分割を実現している。

石器の場合、稜線の両側の面における曲率値が大きく変化するので、文献 [10] の手法を適用可能である。よって本研究では、文献 [10] の手法に基づいて、剥離面検出を行う。

### 3) 提案手法

本研究では、文献 [2] で述べられた手法で生成されたポリゴンモデルを利用して、石器間の隣接関係を検出する。具体的には、3角形メッシュで構成されたポリゴンモデルの各頂点における近似曲率を求め、頂点の近似曲率を基に稜線を抽出する。抽出した稜線をたどり、閉領域を構成することによって、石器を領域分割する。2つの石器から、ひとつずつの領域を取り出し、それらの領域が幾何学的に一致するかどうかを2乗距離に基づいて評価する。距離がしきい値以下の場合には、それらの領域は一致するとみなす。すなわち2つの石器間が隣接するとみなす。以下に本手法の詳細を説明する。

### 3.1 近似曲率の算出

母岩に打撃を加えて、剥がされた石器の面が剥離面である。石器の剥離面は稜線で囲まれる滑らかな面となる。よって、剥離面をポリゴンで近似したときには、凹凸が少ない形状で表される。一方、剥離面と剥離面の境界を表す稜線は、尖った形状として表現される。このような形状特徴に着目して、曲率を用いて稜線と剥離面を検出する。

最初に石器ポリゴンモデルの各頂点における近似曲率を算出する。本手法では、式 (1) に示すような、ガウス曲率近似式を用いる。

$$K = \frac{3(2\pi - \sum_{j=1}^n (\alpha_j))}{\sum_{j=1}^n (A_j)} \quad (1)$$

ただし、 $\alpha_j$  は、対象の頂点  $V$  につながる稜線間の内角を表している。また、 $A_j$  は、頂点  $V$  を共有する各ポリゴンの面積である。図4は、各頂点における近似曲率を濃淡分布で表示した図である。図4で薄い色は曲率が高く、濃い色は曲率が低い頂点である。曲率が高い頂点を連結して、閉領域を構成することによって、領域を分割する。領域分割の詳細は、3.2節で説明する。

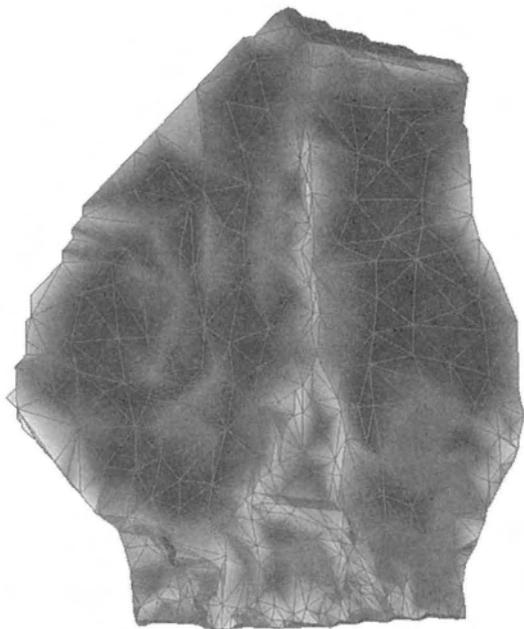
### 3.2 領域分割

3.1節で算出した曲率に基づいて、大きい曲率を持つ頂点を追跡することで、尾根を形成する石器の稜線を抽出する。石器の稜線は、剥離面の境界となるので、抽出した稜線を繋いで、複数の稜線で囲まれた閉領域を構成する。構成された閉領域を単位として、剥離された石器の剥離面を検出する。以下では、領域分割のアルゴリズムについて説明する。ここで、しきい値以上の曲率を持つ頂点を「特徴頂点」とする。

#### 1. 特徴頂点を検出する。

特徴頂点かどうかを判定するためのしきい値は、石器ごとに異なる。しきい値は、石器の実測図に記載されている稜線上の頂点が、全て特徴頂点として検出できる値を試行錯誤しながら設定する。例えば、図5において、黒丸で表した頂点  $V_1$  から  $V_{10}$  が特徴頂点である。 $V_1$  から  $V_{10}$  の頂点以外の頂点は、近似曲率がしきい値以下の頂点である。

2. 特徴頂点  $V_i$  と隣接する特徴頂点の中で、最も近似曲率が大きく、かつ頂点間の形状が尾根形状である頂点  $V_j$  を検出する。例えば図5では、頂点  $V_1$  に隣接する頂点  $V_2$  と  $V_3$  が、隣接する特徴頂点である。もし、頂点  $V_2$  の方が頂点  $V_3$  より大きい曲率を持ち、かつ頂点間が尾根形状の場合、頂点  $V_2$  が選択される。図5において、太い線が探索した頂点間を繋いだ稜線で



曲率:低

曲率:高

図4 石器ポリゴンモデルの頂点における近似曲率表示

ある。特徴頂点  $V_i$  に隣接する選択候補となる特徴頂点がない場合は、これ以上探索することが困難であるため、稜線列を廃棄し、新たな特徴頂点に対して稜線追跡を行う。

3. これまでに得られた稜線列に、手順2で得られた頂点  $V_i$  と  $V_j$  間の稜線  $E_i$  を追加する。ここで、稜線  $E_i$  の頂点  $V_j$  が、稜線列の最初の稜線の開始点と一致する場合は、閉じた稜線列を構成するので、手順4にすすむ。一致しない場合は、頂点  $V_j$  を  $V_i$  に置き換えて手順2に戻る。

4. 作成した閉領域を用いて、領域分割を行う。以降、閉領域の境界を構成する稜線を特徴稜線とする。

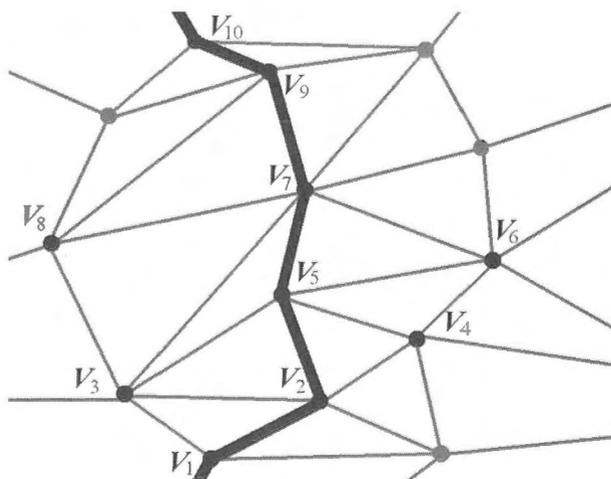


図5 頂点の追跡

作成した閉領域の面積が小さい場合は、誤マッチングの原因となるので、本手法では、ある一定以下の面積の閉領域は、利用しない。また、三角形ポリゴンの頂点の曲率が3点とも高い場合、すなわち凹凸が激しいポリゴンは、剥離面とはみなせないで、マッチング処理対象からはずす。

### 3.3 初期位置合わせ

次に、分割された領域を用いて、領域間の位置合わせを行う。位置合わせは、初期位置合わせと姿勢最適化の2つの工程に分かれる。初期位置合わせでは、ニュートン法による姿勢最適化の工程で、局所解に陥らないようにするために、領域Aの特徴稜線に接するポリゴンが、領域Bにできるだけのような位置を決定し、2つの領域の位置をある程度合わせる。

本手法は、領域Aに含まれる全ての頂点が、領域B上に乗るような空間姿勢を算出する。そのため、領域Aの面積は、領域Bより、面積が小さいと仮定する。そこで、領域を構成する特徴稜線に接するポリゴンがのる平面が一致する条件により、初期位置を決定する。具体的には、領域を構成する稜線がのる平面同士が一致するように、特徴稜線と特徴稜線を辺とするポリゴンの法線ベクトルから直交座標軸を作成し、座標軸同士を合わせる。その後、領域同士の一致評価を行い、評価値が最も良い姿勢を初期位置とする。

図6に初期位置合わせのアルゴリズムを示す。ここでは、図6(a)に示すポリゴンモデルM1とM2の領域A、Bを計算の対象とする。なお本論文では、特徴稜線を含むポリゴンがのる平面を、接触平面と呼ぶ。また、本手法は領域Aに含まれる全ての頂点が、領域B上に乗るような空間姿勢を算出するアルゴリズムである。そのため、図6(b)に示すように計算対象となる二つの領域において、面積が小さい方の領域を領域Aとし、他方を領域Bと仮定する。

図6(c)に示すように最初に、2つの対象物M1、M2においてマッチングに使用する領域A、Bを取り出し、領域に含まれる特徴稜線  $E_i^A$  ( $1 \leq i \leq m$ )、 $E_j^B$  ( $1 \leq j \leq n$ ) と、接触平面  $F_i^A$ 、 $F_j^B$  を取り出す。ただし、領域Aの特徴稜線数を  $m$ 、領域Bの特徴稜線数を  $n$  とする。

次に、 $E_i^A$ 、 $E_j^B$  のペアを総当りで作成し、各特徴稜線方向ベクトルとポリゴンがのる平面の法線ベクトルを基に局所座標系を作成し、ペアとなる稜線  $E_i^A$ 、 $E_j^B$  から作成された局所座標系が一致するようにM1を移動する。図6(d)は、局所座標系を一致させる様子を示している。

次に、領域Aに含まれる接触平面が領域B上に乗るかどうか評価する。具体的には、領域Aに含まれる全ての接触平面  $F_i^A$  に対し、領域Bに含まれる全ての面における重心と、 $F_i^A$  の重心との距離が最小となる面とで、面ペアを作成し、全ての面ペアの距離誤差の総和を算出する。距離誤差の総和の算出を全ての  $E_i^A$ 、 $E_j^B$  のペアに

対して繰り返し行い、距離の総和が最小となる特徴稜線のペアを選ぶ。選んだ特徴稜線ペアの局所座標軸が一致する位置を初期位置とする。

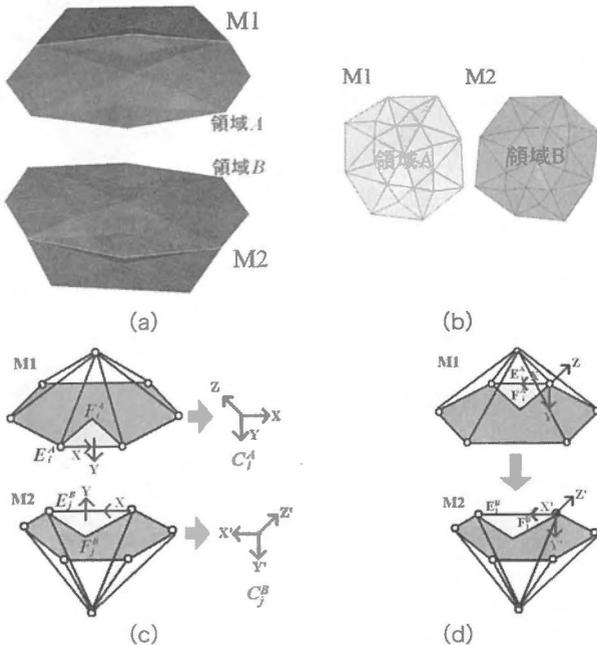


図6 分割された領域の境界稜線における局所座標軸の設定

### 3.4 姿勢最適化

2つの領域が一致しているかどうかを定量的に判断するために、初期位置が決定された対象領域の空間姿勢を最適化する。具体的には、領域Aに含まれる全ての頂点が、領域B上にあるような、空間姿勢を算出する。姿勢を最適化するために、領域Aの頂点と領域Bとの距離の二乗和が最小となる姿勢を最適解とする。3.3節で述べた手順と同様に、領域の面積が小さい領域を領域A、他方を領域Bとする。姿勢最適化は、以下の手順で行う。

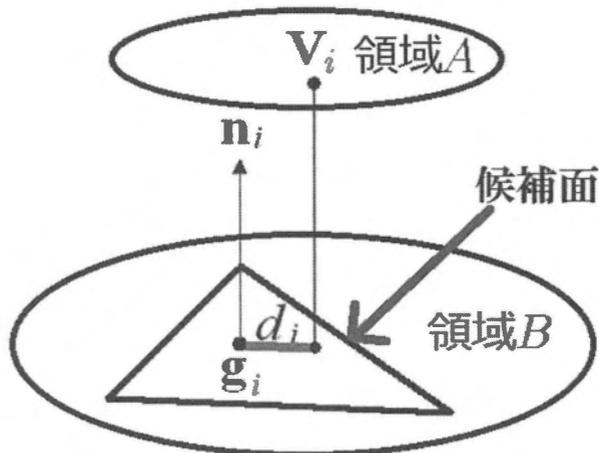


図7 頂点と面の距離の算出方法

1. 図7に示すように、領域A上の頂点 $V_i$ を領域B上の各面に射影し、射影した頂点が、その面の内側に存在する場合、その面をペア候補とする。全ての候補に対して、領域A上の頂点と、候補面の重心 $g_i$ の距離 $d_i$ が最小となる面をペアとする。

頂点 $V_i$ と候補面の距離 $d_i$ は、式(2)で算出する。ただし、 $n_i$ は、候補面の単位法線ベクトルである。式(3)は、領域A上の全ての頂点と面ペアに対して算出した距離の合計値 $D$ を示した式である。本手法では、 $D$ が最小となる条件の下で最適な姿勢を決定する。

$$d_i = (V_i - g_i)n_i \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=1}^n (d_i)^2 \quad (3)$$

2.  $D$ が最小となるように、領域Aの頂点を座標変換する変換行列を求める。座標変換後の頂点は、 $V'_i = MV_i$ のように表される。 $V'_i$ は、領域Aの移動後の頂点座標であり、 $V_i$ は、現在の領域A上の頂点座標である。 $M$ は、 $4 \times 4$ の変換行列である。行列 $M$ の要素は、XYZ各軸の回転角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ と、平行移動量 $T_x, T_y, T_z$ から成る多項式である。これらの値を未知数として、最小二乗法を用いて、式(3)を解くことで、誤差が最小となる変換行列を得ることができる。

### 3.5 石器間のマッチングペアの決定

接合資料を作成するためには、母岩分類によって同一の母岩に属していると推定された石器の中から、接合する2つの石器の最適な位置を導出する必要がある。最適な位置は、2つの石器の最適な領域ペアを抽出することと等しい。最適な領域ペアを評価する場合、式(3)によって導出した評価値 $D$ は、面積が大きい領域ほど大きな値となり、値の大小によって最適な領域を評価することが困難である。そこで、評価式を面積に依存しない指標にするため、式(3)の $D$ を領域Aの面積で割った「正規化距離」を用いて領域ペアの評価を行う。2つの石器間のすべての領域ペアにおいて、正規化距離がしきい値以下であり、最小のものを最適な領域ペアとして選択する。

以下領域ペアの抽出手順を示す。ここで、石器M1が持つ領域を $A_i$  ( $1 \leq i \leq s$ )、石器M2が持つ領域を $B_j$  ( $1 \leq j \leq t$ )とする。

1. 石器M1のひとつの領域 $A_i$ と、石器M2の全ての領域 $B_j$ のペアに対して、姿勢最適化を適用して、正規化距離が最小となる領域ペアを求める。
2. 正規化距離がしきい値以上のとき、2つの石器は隣接関係がないと判断して、石器M1の次の領域 $A_{i+1}$ を設定して手順1に戻る。本研究では、経験的にしきい値を0.1に設定した。
3. 正規化距離がしきい値以下のとき、2つの石器は

隣接関係がある可能性があると判断して、領域ペアを候補として保存する。そして、石器 MI の次の領域  $A_{i+1}$  を設定して手順 1 に戻る。

手順 1 から 3 を全ての領域  $A$  に対して行い、領域ペア候補を取り出す。その後、2つの石器間の正規化距離が最小となる領域ペアを隣接関係があると判断する。

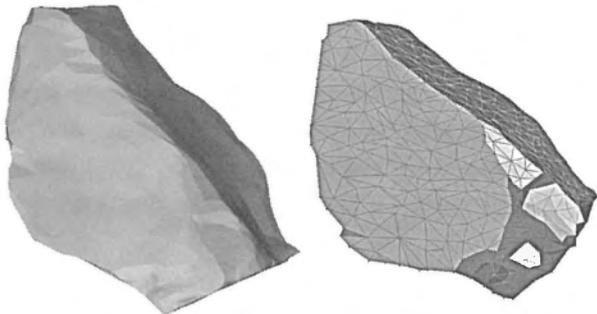
#### 4) 実験結果

3章で述べた手法を、接合資料を計測した石器を用いて検証する。石器 A から D は、実際に出土した石器であり、接合箇所が判明しているものである。また、石器 E から H は、専門家が当時の石器を再現するために作成した石器模造品である。本研究では、この2種類の石器を用いて提案手法の検証を行った。使用したPCの環境は、Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 2.66Ghz、2GB RAM である。

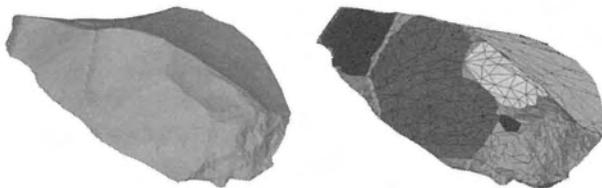
表 1 石器 A から D の領域分割結果

	A	B	C	D
頂点数	1779	1883	1430	4044
特徴頂点のしきい値	0.24	0.36	0.20	0.40
全領域数	12	7	12	19
マッチング領域数	4	6	5	10

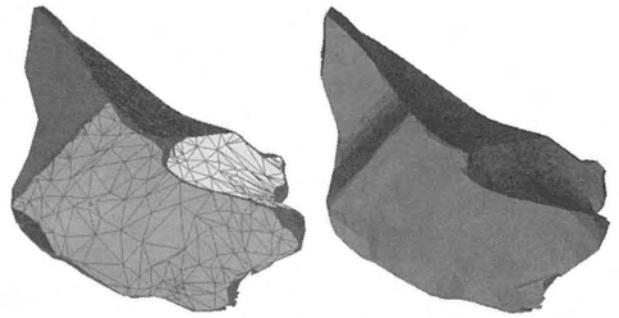
まず、3.2節で述べた領域分割手法について検証する。表 1 は、石器 A から D までの石器を領域分割した結果を示している。意図する剥離面が抽出できているかどうかを目視により判断し、試行錯誤を行いながら、特徴頂



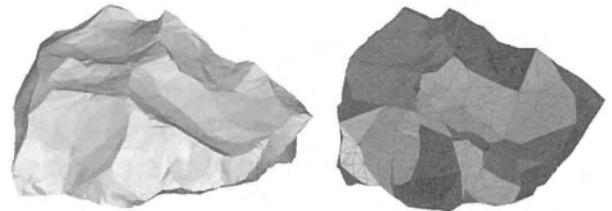
(a) 計測したデータ (b) 領域分割したデータ  
図 8 石器 A の計測データと領域分割の結果



(a) 計測したデータ (b) 領域分割したデータ  
図 9 石器 B の計測データと領域分割の結果



(a) 計測したデータ (b) 領域分割したデータ  
図 10 石器 C の計測データと領域分割の結果



(a) 計測したデータ (b) 領域分割したデータ  
図 11 石器 D の計測データと領域分割の結果

点のしきい値を調整した。調整したしきい値を用いた領域分割で得られた領域数を全領域数に示している。全領域数のうちで、マッチングに利用できる領域を、3.2節で述べた手法により抽出し、その数をマッチング領域数に示した。また実行結果を、図 8、図 9、図 10、図 11 に示す。これらの図では、(a) は、計測した石器のポリゴンモデルを、(b) は、本手法により領域分割した結果を示す。同色の領域が、剥離面を表している。図 12 は、図 8 (b) の左下部分を拡大した図である。3つのポリゴン頂点において大きい曲率となるポリゴンが同色で示されており、そのようなポリゴンで構成される領域は、剥離面でない領域として示してある。以上の結果から、剥離面を表す領域を抽出することができていることが分かる。

次に、3.4節で述べた姿勢最適化手法の有効性を検証する。隣接関係の分かっている石器ペアを用意し、一方の石器のひとつの剥離面に対して、他方の石器のすべて

#### 剥離面領域 1

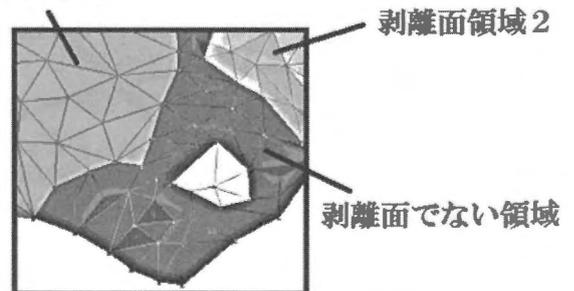


図 12 剥離面とそうでない領域

表2 石器AからDの姿勢最適化結果

	石器 A-B	石器 B-D	石器 C-D
初期位置誤差	2.2618	7.3890	13.8852
1位の正規化距離	0.0040	0.0099	0.0742
2位の正規化距離	0.0950	0.0950	0.3650
実行時間	37 [秒]	91 [秒]	119 [秒]

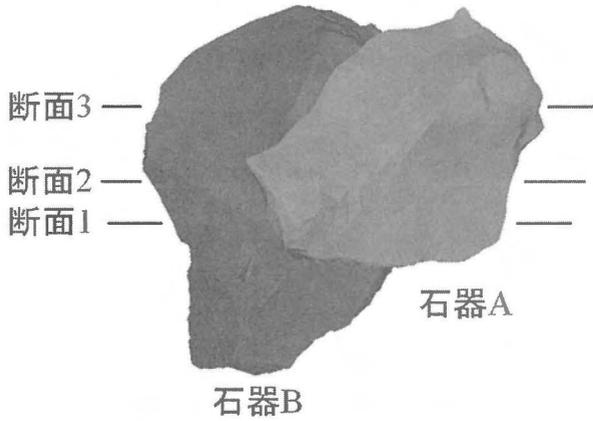


図13 石器A、石器Bの姿勢最適化結果

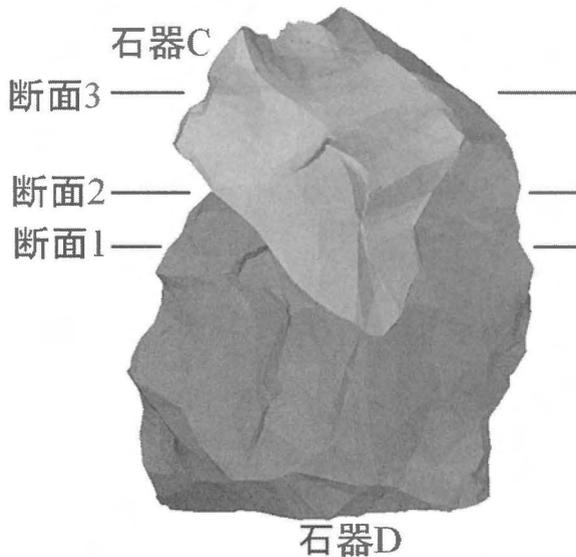


図14 石器C、石器Dの姿勢最適化結果

の剥離面のマッチングを行う。表2は、最適化された姿勢となった剥離面間の正規化距離を示す。初期位置誤差は、初期位置における剥離面領域間の誤差を表す。1位の正規化距離は、姿勢が最適であると判断された剥離面領域の正規化距離を表す。2位の正規化距離は、次点となった領域の正規化距離を表す。また、実行時間は最適な姿勢を決定するための総時間を表す。1位の正規化距離となった面ペアが、意図した剥離面のペアとなることが確認できた。実行時間についても妥当である。表2に述べた、石器A-B、石器C-Dについて、姿勢最適化を適用した結果を図13と図14に示す。また、図15(a)、(b)は、図13、図14に示す「断面」の位置で、石器を切

断したときの断面形状を示す。断面形状を見ると、精度良く空間姿勢が得られていることがわかる。図16、図17は、石器EからHに対して、姿勢最適化を適用した例である。図18(a)、(b)は、図16、図17に示す「断面」の位置で、石器を切断したときの断面形状を示す。これらの図からも、隣接石器間の空間姿勢が正しく得られていることがわかる。よって、提案する姿勢最適化手法が有効であることが分かった。

次に、3.5節で述べた石器間のマッチングペアの決定手法を検証する。具体的には、ある石器の剥離面を基準に、それにマッチする別の石器の剥離面を複数の石器の中から決定できるかどうかを検証する。表3は、対象の石器AからDに対して、石器間のマッチングにより隣接関係を抽出した結果である。各石器の対象領域に対する、ペア候補領域と正規化距離を示している。例えば、石器Aの領域1と正規化距離が最小となる領域は、石器Bの領域4であり、このときの正規化距離は0.3541である。本手法では、3.5節で述べたように、正規化距離がしきい値以下で、最小のものを候補領域ペアとして選択する。その結果を、表3の候補領域ペア欄に示す。×で表されたペアは、正規化距離がしきい値より大きいので候補ではない。また、○で表された場合は、正規化距離がしきい値以下であるので、候補領域ペアである。ここで、石器Aに対しては、2つの候補領域ペアが得られたので、これらのうちで最小の正規化距離となるA-3とB-1が、石器Aの領域4に隣接する石器Bの領域1ということになる。同様にB-4とD-2、C-3とD-1が候補領域ペアとなる。この結果は、表2に示す結果と同様のペアが得られたことを示しており、意図する隣接関係が得られたことになる。図19は、表3の結果を

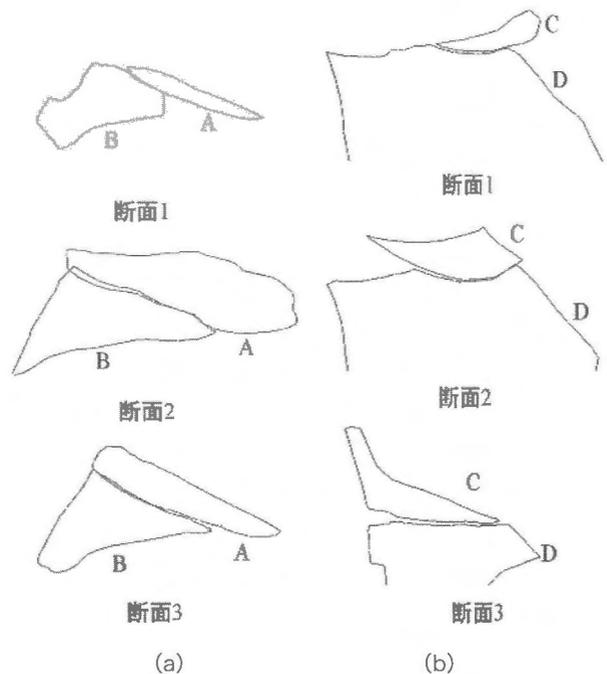


図15 A-B、C-Dの断面

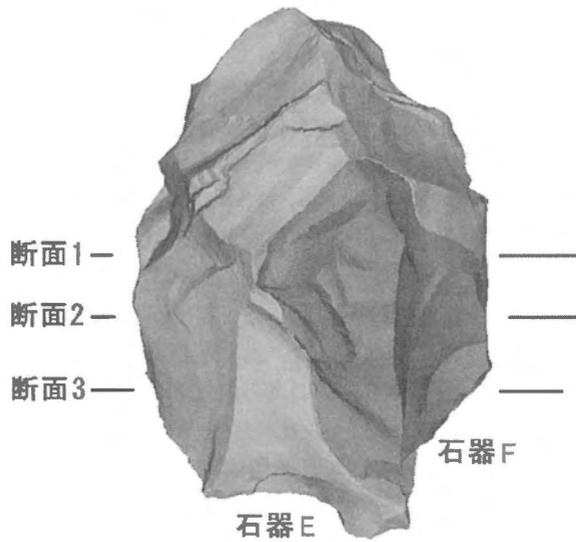


図16 石器E、石器Fの姿勢最適化結果

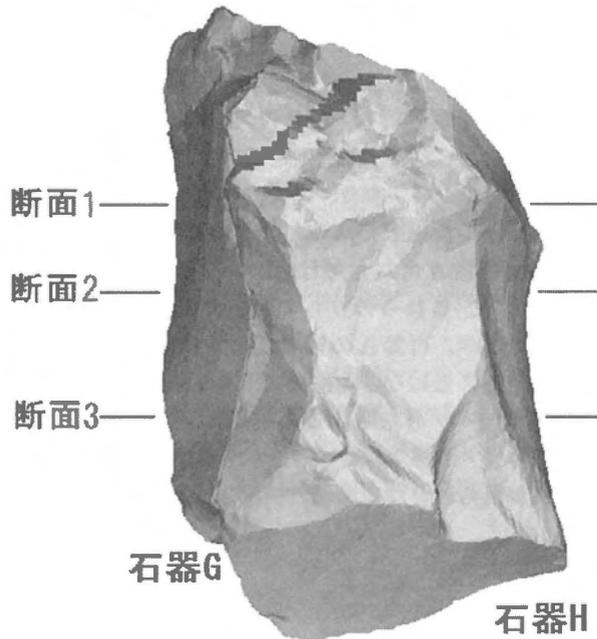


図17 石器G、石器Hの姿勢最適化結果

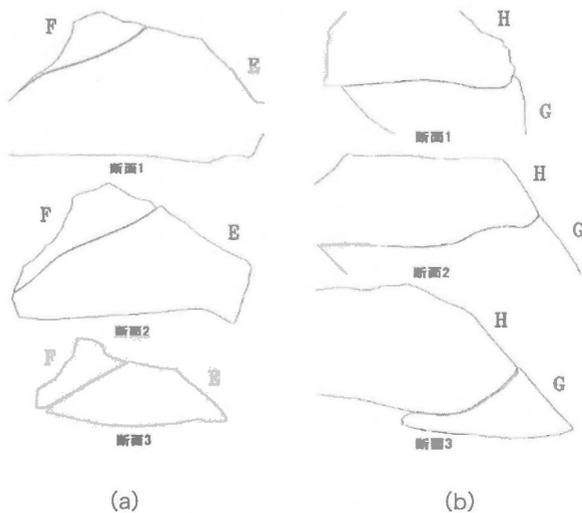


図18 E-F、G-Hの断面

利用して石器の姿勢を決定した結果である。この図から分かるように、4つの石器の配置が適切に決定されている。

以上のように、本手法では、石器の剥離面がもう一方の石器の剥離面に完全に乗るような接合に対して有効である。しかし、現状の手法は複数の石器によって剥離面を形成する場合や、石器の内部が欠けていて、空洞を形成するような接合に対しては、正しい接合関係を得ることが困難である。今後の拡張が必要である。

表3 マッチングペアの決定

範囲	対象領域	候補領域	正規化距離	候補領域ペア
A-BCD	A-1	B-4	0.3541	×
	A-2	B-3	0.0950	○
	A-3	B-1	0.0040	○ (最小)
	A-4	D-5	0.8120	×
B-CD	B-1	C-4	0.5090	×
	B-2	C-1	0.1942	×
	B-3	C-3	0.0999	○
	B-4	D-2	0.0099	○ (最小)
	B-5	D-5	0.9795	×
	B-6	D-3	0.8700	×
C-D	C-1	D-4	0.7614	×
	C-2	D-4	0.6432	×
	C-3	D-1	0.0742	○ (最小)
	C-4	D-2	0.3650	×
	C-5	D-5	0.9198	×

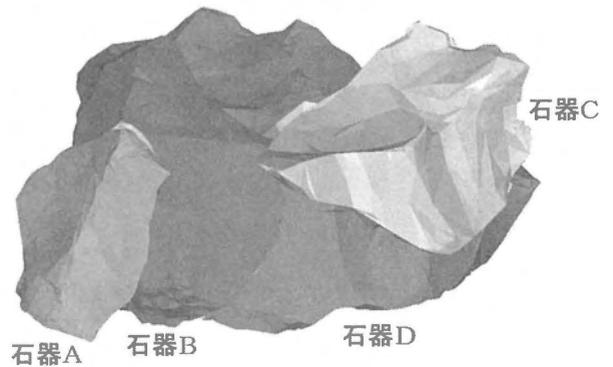


図19 石器AからDまでの接合結果

### 5) まとめと今後の課題

本論文では、計測点群から生成したポリゴンモデルを利用して、接合資料作成のための石器剥離面に基づく石器隣接面検出法について提案した。本手法をいくつかの石器に対して適用し、剥離面同士が完全に一致する場合には隣接関係が検出できた。今後の課題として、領域分割における特徴頂点の自動抽出法がある。

#### 参考文献

[1] 五十嵐彰“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] 荷田哲久、今野晃市、千葉史、徳山喜政 “石器表裏モデルからのソリッドモデル生成手法”、日本情報考古学会誌、Vol.11、No.1、pp.1-8 (2005)
- [3] 堀謙太、今井正和、小笠原司 “遺物復元を考慮した破片データの表現モデルと破片間の接合箇所検出法：日本情報考古学会誌、Vol.5、No.2、pp.1-10 (2000)
- [4] 堀謙太、今井正和、小笠原司 “土器復元における接合部位検出のための輪郭の階層型表現：電子情報通信学会論文誌、D-II、Vol.J83-D-II、Vol.5、pp.1329-1394 (2000)
- [5] 加納政芳、加藤昌平、伊藤英則 “判別の難易度に基づく類似箇所検出の高速化”、情報処理学会論文誌、第42巻、第11号、pp.2689-2698 (2001)
- [6] 坂本麻衣、安原彰吾、加納政芳、加藤昌平、伊藤英則 “輪郭形状の階層表現に基づく接合箇所検出土器復元への応用”、画像電子学会誌、第34巻、第3号、pp.228-235 (2005)
- [7] Qi-XingHuang, Simon Flory, Natasha Gelf and, Michael Hofer, Helmut Pottmann, “Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching”, ACM SIGGRAPH 2006, pp.569-578 (2006)
- [8] Benedict J. Brown, Corey Toler-Franklin, DiegoNehab, Michael Burns, David Dobkin, “A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments: Reassembling TheranWall Paintings”, ACM Transactions on Graphics (Proc.SIGGRAPH), Vol.27, No.3, pp.84:1-84:9 (2008)
- [9] 浅沼功二、千葉史、今野晃市 “石器実測図作成のための3次元特徴追跡手法”、日本情報考古学会誌、Vol.9、No.2、pp.1-10 (2003)
- [10] Razdan Amshuman, Bea MyungSoo, “A hybrid approach to feature segmentation of triangle meshes”, Computer-Aided Design, Vol.35, No.9, pp.783-789 (2003)

## A Method of Detecting Adjacent Flakes in Stone Tool Restoration by Extracting Peeling Surfaces

Kazuki YAMAHARA, Kouichi KONNO, Fumito CHIBA, Maasa SATOH

The refitted flakes of the stone tools are one of the important material in archeology to investigate the life of people of paleolithic and Jomon Period. Various information such as the stone tool producer production intention, action, technologies, and ranges of life can be obtained by connecting flakes exhausted by the process of generating the stone tool, and reproducing the generation process of the stone tool. Then, many researchers try to find the adjacent stone tool that belongs to the same core. Since restoration of refitted flakes is manual work, it is hard and time-consuming. In addition, the restoration might damage the stone tools, which places a large burden on the restoration staffs. This paper proposes the method to detect the contiguity of stone tools by using the polygons created from the measured point clouds on the faces of the stone tool flakes for the restoration of refitted flakes. In our method, finding the adjacent stone tools is based on the posture of the peeling faces. Therefore, to extract peeling faces, edges between peeling faces are detected with the curvature. Because the peeling faces are smooth shape and edges between peeling faces are sharp shape. With our method, the contiguity between stone tools can be detected.