GMMworkshop01 scripts/ja  
※23April2020 Just translated by DeepL, not improved yet

※24April2020 Improved by AN

ワークショップ 考古学と幾何学的形態学

概要

この2つのワークショップは、日本の考古学者、研究者、愛好家を対象に、幾何学的形態学（GMM）の応用とその可能性について、理論と実践の両方の要素を考慮しながら紹介することを目的としています。

第1回目は、統計的形状と形態の基本的な数学的裏付けをわかりやすく紹介し、その後、GMMの基礎を詳細に説明し、従来の形態測定法と比較したときの統計学的な効果と網羅性を強調します。

第２回目には、考古学資料のかたちを分析する一般的な手法の一つである、Momocs（Rのパッケージ）を用いたアウトライン分析を紹介します。このワークショップでは、公開されているデータセットを用いて、輪郭抽出、照合、変換から、解析ワークフロー（データの可視化や高度なテクニックを含む）に至るまでのGMMの手順を紹介します。

プレゼンテーション、データ、コードを含むすべてのリソースは、GitHubリポジトリ（www.github.com/CSHoggard/-workshopjapan2020）で公開されます。

講師 Dr. Christian Steven Hoggard（サザンプトン大学、イギリス）

クリスチャンは、サザンプトン大学の客員研究員です。サザンプトン大学でネアンデルタール人の技術的多様性に関する論文で博士号を取得した後、デンマークのオーフス大学で2年間の博士研究員を務めました。専門は計量考古学、特に二次元幾何学的形態測定法、考古学への系統学的アプローチ、文化進化。そのほか、青銅器時代の金属細工、中世のブローチなど、石器以外の考古学資料の研究も行なっており、最新の共同研究プロジェクトでは、膝蓋骨（膝頭）の3次元形態学による生物学的性別の違いを調査しています。

セッション１：基礎と研究史（45～60分

// : スライドブレーク

はじめに：このセッションと質疑応答の構成について

スライド 1.

皆さん、おはようございます。私はクリスチャン・スティーブン・ホガード博士です。

考古学研究に「かたち」（形状）ベースのアプローチを導入する、このワークショップへようこそ。

これから1時間あまり、「かたち」の分析の発展について紹介します。それは私たち考古学者が、

どのように考古学資料のバリエーションを分類記載するのか

どのようにバリエーションを可視化するのか

そして人類の過去のさまざまな側面を理解するために、幾何学的形態測定学をどのように利用できるのか

に変革をもたらすものです。

幾何学的な基礎、幾何学的形態測定の方法論の長所と短所、さまざまな疑問、

どのように幾何学的形態測学を定を「行うか」について詳細に説明します。

実践は、第2回ワークショップで実際のソフトウェアを用い、ハンズオンとして実施します。

この講義の内容（英語・日本語）は、私のGitHubリポジトリ（www.github.com/CSHoggard/-workshopjapan2020）で公開しています。

スライド2/3

疑問点がある場合、ワークショップの途中、および最後に質疑応答の機会を多数設けています。

はじめに強調しておきますが、「間違った質問」というものは存在しません。

私たちは知的好奇心が旺盛で、一方ですべてを知っているわけではありません。

なんでも聞いてください。私自身が、またほかのメンバーが、質問に答え、理解を助けます。

スライド4

では、始めましょう。

「かたち」は、私たちの日常生活のすべての基盤です。

それは、私たちが運転する車、ショップで購入するキッチン用品、座っているソファー、寝るためのベッドに至るまで、

「かたち」私たちの物質的な生活の中心にあります。

「かたち」は、道具がどのように機能するか、どのように受けとめられ、考えられるかについて意味を持ちます。

さらには、そのアイテムの出自や製造者を知るヒントを与えてくれることもあります。

「かたち」は、考古学者が、人類の最も古い祖先から歴史時代、現代社会に至るまで、

過去の社会を把握し、理解するために重要であることは当然です。

そして、どのような研究においても、さまざまな形状を定量化して記述し、

収集したデータを通して、「かたち」の変化傾向を可視化し、探索し、分析する必要がある―

適切な仮説やモデルを検証するために。

ここ20年の間に、幾何学的形態測定学（GMM）という学問分野に基づいた技術を利用し、

考古学者は、さまざまな考古学資料の「かたち」を記録し、理解する方法を変革させてきました。

スライド5/6

GMMを議論する前に、私たちは「かたち」とは何であるのかを知る必要があります。

実際には、それを定義するのは難しいかもしれません。

私たちはいつも「かたち」について話しています。

正方形、丸い、くねくねしている、とがっているなど、普遍的な語彙でその構成要素を説明します。

しかし、私たちが、それぞれのオブジェクトをそれぞれの「かたち」であると言う時、

「かたち」とは何であるのかを定義することは難しいのです。

おそらく、形状の最も優れた定義、または最も簡潔で共有されている定義は、

統計学者のクリストファー・スモール教授による以下のものです：

「かたち」とは、「変換、回転、等方的な拡大縮小によっても不変なすべての情報の合計」と定義しています(Small, 1996: 6)。

※等方的な拡大縮小=isotropic scaling：オブジェクトについて、大きさの要素だけをリニアに変化させること

もう少し噛み砕いてみましょう。

スモールが言っていることは、「かたち」は、ページやスクリーンのどこにあっても変化しない情報だということです。

回転させても、サイズを変更しても変化しないということです。

6つの正三角形は、6つの円、球体や立方体と、同じ「かたち」を持つことになります。

完璧なシナリオでは、それらはどのように変換しても同じ「かたち」になります。

しかし、Small (1996)も指摘しているとおり、2つのオブジェクトが（測定誤差の範囲内で）同一の情報をもっていることは稀です。

考古学的な記録は、その好例でしょう。

スライド7/8。

スモールの定義を用いる上で重要なことは、二つのオブジェクトは同じ「かたち」でも大きさが異なる場合があるということです。

これは考古学者の関心事でしょう。

大きさは（「かたち」とは）別に、定量化され認識されます。

例えば、蛇、カバ、キリン、どれが大きいかという古典的な質問があります。

大きさは様々に測ることができます。

1) 長さなどの直線的な測定

2) 計算された質量、体積、重量

3) セントロイドの大きさ（後ほど簡単に説明します）

つまり、わたしたちは「かたち」について話をしているときには「かたち」の話をしていますが、大きさを含めた時にはオブジェクトの「形態」について話をしているのです。

スライド9.

3 つの変数（形態、かたち、大きさ）は、形態測定学により、定量化し、分析し、理解することができます。

1957年に動物学のロバート・ブラキス教授（ユニバーシティ・カレッジ・ダブリン）によって最初に用いられた形態測定学とは、大きさ、「かたち」、およびそれらの分散（または共分散）の定量的な研究です。

形態測定学の研究者にとって、2つの異なる研究分野があります。

1）伝統的な形態測定学と、2）幾何形態測定学です。

伝統的な形態測定学は、直線的（リニア）な測定値（長さ、幅、角度、比率、指数）の研究に焦点を当てます―

散布図の分析や、ユークリッド距離行列分析（EDMA）のようなより複雑な分析を通じて、単独で、あるいは組み合わせて。

これらの方法は考古学史に深く根ざしており、半世紀以上にわたって（類型論と共に）遺物の分類の基礎を提供してきました。

旧石器時代については、フランシス・ボルドの研究や、デレク・ローによるハンドアックスの技術に関する研究を例に挙げることができます。

スライド10.

しかし、伝統的な形態学的アプローチには多くの問題があります。

従来の方法論はしばしば主観的であり、その精度には少なからぬ誤差を含みます。

測定誤差は、器具、観察者、（測定の）向きや角度、疲労度合いなど、さまざまな要素に起因します。

GMMでは、参照点をデジタル化し、（必要に応じて）自動化することができ、誤差の範囲を減らすことができます。

GMMの最大の利点は、直線的な測定値と比べて、はるかにカバーする範囲が広く高レベルの「かたち」情報を抽出できることです：

参照点、外形、表面を検討することは、限られた方向からの計測値よりも、より立体的な（とポグラフィックな）情報を提供します。

もちろん、直線的な計測がダメというわけではありません;

多くの場合、仮説やモデルは、リニアな形態測定学によって検討することができます。

しかしカバーする範囲と情報の解像度の点では、GMMの方が有利です。

GMMの他の利点としては、形状を簡単に抽出できることが挙げられます：

私たちは考古学資料の「かたち」を検討するだけなので、縮尺（そして向き）を揃えた画像や写真は必要ありません。

（ただし理想的ではありませんが）

しかし、GMMでは、特別なソフトウェアパッケージと専門用語の知識、スキルが求められます。

願わくば、このワークショップ（あるいは第2回のワークショップ）が終わる頃には、問題なくなっていることを願っています。

スライド11

直線的な計測と同様に、GMMを使用して多くの事例を検討できます。

たとえば：

* アセンブレージのレベルで、「かたち」の平均と中央値、分散の分布を明らかにする  
  （考古学資料の「かたち」の変化は漸移的か急激か）
* 2 つ以上の考古学資料またはアセンブレージが「かたち」の上で異なっているかどうかを調べる
* アセンブレージが形態（=かたち×大きさ）に違いがあるかどうかを調べる
* 考古学資料の「かたち」が大きさや成長・発達度合い（アロメトリー）、その他の要因と関連するかどうか検討する  
  （例：原材料、人類種、時代区分、等）
* 考古学資料の「かたち」の変異が特定のモデルや仮説と対応するか調べる  
  （例：「かたち」の様々な要因による経時的な変化）
* 考古資料の生成・形成過程のネットワークベース・モデルの作成  
  （「かたち」のクラスター分析や系統分析）

スライド 12/13/14/15/16

GMMの基礎（ランドマーク幾何学など）に入る前に、歴史的な展望を考えることは重要です。

それは、今日の議論に至るまでの600年の道のりです。

おそらくGMMの基礎は、画家、版画家、理論家のアルブレヒト・デューラー（1471-1528）に遡ることができます。

初めて西洋にサイの絵をもたらしたことでも知られるデューラーは、記述的幾何学でも著名です。

デューラーは、コンコイド（平面曲線の一種：蝸牛曲線を含む）、エピサイクロイド（定円に外接して回転する円が描く軌跡）を含む、複雑な三次元形状の複雑さを詳細に説明しました。

彼はまた、「デリアン問題」または「[立方体倍積問題](<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%8B%E6%96%B9%E4%BD%93%E5%80%8D%E7%A9%8D%E5%95%8F%E9%A1%8C>)」と呼ばれる、一辺の長さがs、体積V=S^3の立方体に対し、体積2倍(S=2V)の立方体を決定する問題の研究でも知られています。

GMMに関連して、デューラーは、直交座標系のグリッドにより解剖学的特徴の変化を表現し、「かたち」の変換、認識を示した点で、重要です。

これは、今日ではランドマーク変換の主要な分類記述子として使用されているものであり「かたち」の変化を記述する強力な手段となっています。

次に300年早送りすると、GMMの大きな飛躍は、スコットランドの生物学者、数学者、古典学者であるサー・ダーシー・ウェントワース・トムソン（1860-1948）の仕事に認められます。

トムソンの著作「On Growth and Form（生物のかたち）」は、生物学的な形態が物理的・数学的な原理を反映していることを証明した名著です。

『生物のかたち』の中で最も有名な挿図は、デューラーと同様に、生物種の間の形態の多様性を「かたち」の返還で示したものです。

トムソンは、この「かたち」の変化が、一貫した変形によってモデル化できることを明らかにしました。

「一貫性」として、重要なことであるが、ダーシーは、いくつかの種がある特定のパターンにもとづき変形（引き伸ばし）されているしていることを示しました。

ランドマークがこれらのを種に適用され、「かたち」を分類記載するための図像的な基礎が提供されたことに注目しましょう。

トムソンはダーウィニズムに批判的でしたが、彼の示唆に富む言葉は、ハクスレー、チューリング、エピジェネティクス研究者のコンラッド・ワディントン、コルビュジエ、その他の偉人にもインスピレーションを与えました。

また最終章でダーシーがデザインした数学的なダイアグラム、これらを知るために、この本を買うことを強くお勧めします。

さらに50～60年を早送りすると、GMMが「かたち」の変化を記載分類する統計的手段を発展させてきたことがわかります。

今日のGMMの創始者フレッド・ブックステイン、故デニス・スライス、ミリアム・ツェルディッチ、ジェームス・ロールフの研究が含まれます。

彼らの仕事の多くは、現在まで続くものです。

この時点で誰か質問はありますか？

ついてきていますか?

退屈していないでしょうか？

スライド17/18

それでは続いて、もっとも知りたいトピック、どのようにGMMを実践するのか? に進みます。まず、データを取得する対象のカタログを作成する必要があります。

これには、CTスキャン、写真測量、いま私が熱心に取り組んでいるSfM、NextEngineのような3Dスキャナ、アーム型3Dデジタイザであるマイクロスクライブなどの3次元計測があります。

また、図面や写真など2次元のデータからも「かたち」を分析することができます。

私は最近、石器の実測図に関する誤差についての論文を提出しました。

実測の能力に関係なく、誤差はごくわずかであることを示しました。

スライド19/20/21

データセット、モデル、画像などを準備したら、次は「かたち」のデータ化です。

先に見たトムソンの研究でも示されていますが、ここでは形態学的参照点としてのランドマークが中心となります。

ランドマークとは、（対象の）構造上の相同な点を示す座標点です。

これらは直交座標（x/y または x/y/z システム）として定量化可能で、個々の点として、あるいは組み合わせてサーフェイスとして分析することができます。

Bookstein (1991)が示すように、ランドマークには 3 つの異なる種類があることが、形態学の世界では一般的に認められています。

まずはじめに、タイプ1のランドマークです。

これは、明確な生物学的構造上に定義された計測的な点である。

これらのランドマークは、特定の骨の交点や、鼻腔の後端などのような骨の特徴点など、繰り返し識別することが容易なものである。

これらは、使用できるならば「最良の」ランドマークと考えられています。

タイプ2のランドマークは、幾何学的に定義された計測的な点です。

生物学的な定義はなく、最大曲率などの点を反映しています。

一方、タイプ3のランドマークは、別の点を基準として定義された計測的な点です。

たとえば齧歯類の顎骨に、３種類のランドマークをすべてを確認できます（スライド19を参照）。

歯の中心部や図の右側の骨の構造の変化点などのタイプ1、

下顎の蝶番と頂点の曲率変化点のタイプ2、

そしてタイプ2のランドマークを結ぶ線と骨の外形が交差する点のタイプ3です。

また、アルゴリズムを用いてオブジェクトの周囲や2つの端点の間に配置されるセミランドマークもあります。

例えば、50個の等距離（等間隔）の点で、ハンドアックスの形状を記載することができます。

これらは特別なタイプ3のランドマークになります。

ここでは、アルゴリズムが外形上にセミランドマーク（白丸）を生成した例を示します（スライド20）

その定量性とカバーする範囲から、セミランドマークは、

* 考古学的に関心のある「かたち」の様相をサンプルとすべきであり、
* 可能であれば、すべての例で再現性があり、識別可能であり、
* 可能な限り多くの形状をカバーすることでき、
* 特定の領域の重み付けを増加させないよなものであるべきである。

スライド22.

ランドマークは、同じ規則でプロットされなければなりません。

そうでなければ、その後に行う変換は「かたち」の正確な反映とは考えられません。

生物考古学者にとっては、形態学的な参照点が多数あります。

たとえば頭蓋骨には明確なランドマークがあり、方向もわかっています。

三次元形状の研究は容易です。

非生物学的資料を研究している考古学者にとっては、標本の向きやランドマークを配置する際に、より大きな創造力と思考が必要とされます。

査読誌に掲載された研究は少なく、相互に比較して何が正しいのかを理解することは困難です。

どのような考古学的研究を行なうにしても、断片化（破損）の問題やサンプルサイズ（母集団を代表しているかどうか）は、研究を行う上で重要な考慮事項です。

スライド 23.

より大きな創造性が必要とされる例として、私が昨年、同僚と行なった研究を紹介します。

これはデンマーク考古学研究誌に掲載されました。

北方青銅器時代の「トゥトゥリ：tutuli」と呼ばれる、突き出た尖端をもつ小さな金属製の円形の帯金具です。

私たちは、子の資料の多様性と適切な分類に関心がありました。

特定の時代を代表する編年上の示標と考えられているタイプがあるためです。

劣化の問題を克服しなければなりませんでしたが、それ以上に興味深かったのは、この研究が斬新で、他に同様の研究が存在しないということでした。

そこで私たちは、凸部と形状変化のポイントに6つのランドマークを設定し、その間にセミランドマークを配置しました。

これにより、トゥトゥリの断面形や型式の違いを解析することができました。

スライド24

ここで、ランドマークに関する質問はありますか？

いま質問がなくても、最後に十分な議論の時間を設けますので、ご了承ください。

スライド25/26

それでは、これらのランドマークをどのようにデジタル化するかを考えてみましょう。

オープンソースのものからプロプライエタリまで、いろいろなソフトウェアがあります。

二次元の形状解析をするのにしても、三次元の形状解析をするにしても。

個人的には、2次元のランドマーク解析を行う場合はTPS Suiteを使用します。

私が最初にGMMに出会ったのがTPS Suiteだったからです。

他にも様々な優れたパッケージがあります。

「かたち」座標の作成、操作、分析を行うためのパッケージの増加、コードを（自ら）読み書きするコード・リテラシーの高まりから、Rは考古学者にとって理想的な環境となっています。

*Geomorph*と*Momocs*パッケージ、*shape*のさまざまな特徴は、おそらく最も広く使われているパッケージです。

しかし、どのような分析を行いたいかによって選択肢は異なります。

Geomorphは三次元の生物学的解析に向いているのに対し，Momocsは二次元の解析に焦点を当てています。

第2回のワークショップでは，２次元のアウトライン解析を行うために設計されたMomocsパッケージに焦点を当てます。

Rのリテラシーを持っている人にとっては，Tidyverse（データ操作，変換，モデリング，可視化のためのパッケージ群であり，一般的に使われている）との互換性があるので，私はMomocsをおすすめします。

重要なのは、いくつかの手法を合わせることも可能だということです。

TPS Suiteでデータを生成し、そのデータをRにインポートして分析することもできます。

私は定期的に行っています。

スライド27.

ランドマークをデジタル化したら、データをチェックする必要があります。

メモ帳などを使用するか、Rで。

以下の4つの点を自問してください。

　1) すべての対象に正しい数のランドマークがあるか?

　2) ランドマークの順番は正しいか?

　3) IDラベルは正しいか?（これらは後から修正する）

　4) 縮尺は合っているか? （サイズも含めた分析を行っている場合）

スライド28

この時点で、ランドマークデータを収集することができました。

適切な場所にランドマークを配置したり、オブジェクトの周りにセミランドマークを配置して形状を把握しました。

ここで、どのような分析を行うかを決める必要があります。

ここでは、ランドマーク分析の方法を3つの異なる方法にまとめてみました。

最初の2つは古典的なGMM（狭義）に基づいたものですが、3つ目はそうではありません。

* ランドマーク分析：ポイントが個別的で、固有のランドマークの場合
* アウトライン分析：セミランドマークを使用している場合で、それらが全体的な「かたち」と考えられる場合
* その他：多項式曲線フィッティングなどの代替法を含む、今日は取り上げません

スライド29/30/31。

ランドマーク分析を行なうのであれば、まずデータから実際の「かたち」を抽出しなければなりません。

写真やモデルは異なる形態空間（モルフォスペース）にあります。

回転が間違っていたり、サイズが異なっていたりします。

ここでは、一般化プロクルステス分析（プロクルステス・スーパーインポーズ：重ね合わせ、または一般化最小二乗法とも）として知られている、「かたち」を分離するための手順を実行します。

これは、生の座標（ランドマーク）が共通の重心（セントロイド）に変換され（スライド30：a→b）、同じセントロイドサイズ（距離の二乗）になるようにスケーリングされ（b→c）、ランドマーク間の距離が最小になるように回転される（c→d）ことを意味します。

変換後の新たなランドマークは、しばしばプロクルステス座標と呼ばれ、「かたち」を記述し、そして多変量解析で使用するものです。

これを使って、必要に応じてこの後のすべての分析を行うことができます。

いまや私たちは対象の「かたち」を把握しました。

少し歴史的背景を説明すると、ギリシャ神話では、プロクルステスはポセイドンの息子でありアテナイとエレウシスの間の神聖な道に住んでいました。

彼は、夜を過ごすためにすべての通行人を招待するためのベッドを有していた。

通行人がベッドのサイズにあわないと、彼は鍛冶屋のハンマーで叩いて伸ばしたり、はみ出た部分を切り落とした。

最終的に、プロクルステスはアテナイの英雄テセウスに捕らえられ、自らのベッドに「はめ込まれた」のだった。

スライド32.

これらの新たな座標により、「かたち」の変化、つまりある「かたち」から別の「かたち」へ、あるいはあるグループから別のグループの平均的な「かたち」へ、検討することができるようになりました。

「かたち」の変化を視覚化する際には、様々な図化技法を用いることができます。

トムソンが用いたようなグリッド、ロリポップチャート、ベクトル、等高線など。

スライド33/34/35/36/37。

さらに重要なのは、様々な多変量解析でデータを探索できるようになることです。

残念ながら、ここではそのすべてを詳細に説明する時間がありませんが、いくつかの重要な方法を紹介します。

おそらく、すべての考古学者が採用する最初のテクニックは、**主成分分析（PCA）**です。

PCA を通して（いくつもの異なる軸で表される）「かたち」の変化の主な原因を調べ、個々の考古学資料やグループがどのように互いに関連しているかを調べることができます。

しかし、これは分析を行う際にグループ化を考慮しないので、グループのデータを後から重ね合わせます。

年齢、場所、性別などグループ・データを明示的に調査したい場合は、**判別分析（DFA/ LDA：線形判別分析/ CVA）**を実施します。

DFAを通して、私たちは、先験的に定義されたグループが、よく分離されるかどうかを決定できます。

私たちは、パーセンテージを取得して異なる考古学資料どのようにグループに判別されるのかを識別できるかを確認したり、グループ帰属が不明な考古学資料をと比較するための教師データセットを作成することができます。

私は現在、性別がわかっている膝蓋骨のデータセットを作成して、考古学的な事例に適用するために、この手法を使用しています。

これらの手法はいずれも探索的なものであり、通常、考古学者がデータを取得した後で最初に実施するものである。

しかし、これらは特定の仮説のための統計量を提供するものではなく、「かたち」の変化を確認するための手段である。

私たちは、「かたち」を検討するための統計的枠組みづくりのために、**多変量分散分析（MANOVA、またはProcrustes ANOVA）**を利用できます。

2つのグループまたは母集団が同じであるという帰無仮説がある場合、MANOVAを使用して、特定のグループ分けまたは因子を検証できます。

サイズや対称性スコアのような定量的なデータを含む仮説に対して「かたち」を検討したい場合、さまざまな**回帰ベースの方法**を作成することができる。

これら、およびMANOVAでは、PCAから生成された主成分スコアを使用します。

私たちは、非常に**単純な階層型クラスタリング**であろうと、**最尤法**を含む計算量の多い手法であろうと、様々なクラスター・ベースの分析を通して、私たちの分類を継続的に検討したいと思うかもしれない。

最後に、**機械学習**の技術を採用して、**人工ニューラルネットワーク**や（他の以前の技術と同様に）新しい型式やクラスターを作成したいと思うかもしれません。

要するに、何を探求したいか、どのような仮説を検証したいかによるのです。

スライド38.

質問はありますか？

ここまで多くのことを理解する必要があったので、すぐに覚えていただけるとは思いません。

GMMを使って何ができるのか、その一端をご紹介します。

スライド 39

最後に、GMMにおけるアウトラインベースの手法について簡単に説明したいと思います。

これはランドマーク法と同様に一般的な手法で、対象の輪郭や特徴の周りにプロットされたセミランドマークに基づいています。

この手法は、幾何学的な意味では類似しているが、個別の相同なランドマークをピンポイントで特定することが困難な構造物、例えば石器などに有効です。

アウトライン解析手法を採用することには多くの利点があります。

特に、各考古学資料に対して同じ数のポイントを必要としないこと―

例えば、より複雑なオブジェクトの場合は、より多くのポイントが必要になります―

全く同じ位置から始める必要がないことなどが挙げられます。

私はアウトライン分析について多くの論文を公表しているので、詳細はそれらを参照してください。

従来のランドマーク法と比較した場合のアウトライン法の主な違いは、セミランドマークを一連のパラメトリック方程式に通して（フーリエ技術に基づいて）曲線にフィットさせ、

プロクラステス座標ではなく、アウトラインの曲線を生成する係数を検討するという点です。

フーリエ変換に基づく方法は、パラメトリック方程式の中で回転とサイズを説明するので、プロクルステス・スーパーインポーズを必要としません。

このことは、アウトライン解析を行うコーディングの実践で、より意味を持ちます。

アウトライン（セミランドマークの連鎖）から抽出した係数を使用して、上記のすべての統計的手法を使用することができます。

データと分析対象の変換だけです。

スライド40

以上、GMMと 考古学への適用について概観しました。

将来的には、生物考古学者以外でのGMMの応用が拡大し、モデルやランドマークの自動化、ベイズ統計や機械学習法などより強力な分析手法が採用されるでしょう。

そして私にとって最もエキサイティングなことは、オープンアクセス、コード共有による、再現性の高いGMMの進展です。

スライド41です。

ご清聴ありがとうございました。みなさまが、なにかを得ることができたなら幸いです。