

講 座

Polygon 1.5 ユーザーマニュアル（モダンアナログ法を用いて過去の気候を定量的に復元するために開発されたユーザーフレンドリーなソフトウェア）

中 川 賀*



本稿では、Windows用ソフトウェア Polygon 1.5 の使用方法について解説する。Polygon 1.5 は、花粉や珪藻などの微化石データに対してモダンアナログ法を適用し、過去の気候を定量的に復元するために開発された専用のツールである。類似のソフトは他にも存在しているが、Polygon 1.5 はきわめてユーザーフレンドリーなインターフェースを採用しており、使用法の習得が容易である点に大きな特徴がある。古気候の推定値は、全分類群のパーセンテージあるいは選ばれた主成分軸の得点を用いて計算される。その他の特徴的な機能として、(1) 2または3次元の主成分空間中に現世データの散らばりを表示できる、(2) 同じ空間中に、化石データの変遷を軌跡として表示できる、(3) 気候復元に適さない化石データを自動的に検出する、(4) 気候復元の誤差モデルを生成し、復元結果の較正(キャリブレーション)を行う、などがあげられる。Polygon 1.5 は専用のウェブサイト (<http://dendro.naruto-u.ac.jp/~nakagawa/>) から無償でダウンロードすることができる。

キーワード：Polygon, 定量的気候復元, モダンアナログ法, 花粉分析, 硅藻分析

I. はじめに

古生態学的な多変量データ（花粉や珪藻のデータが典型的にこれに当たる）を用いた定量的な気候復元の手法は、第四紀学の分野において、1990 年代前半ごろから急速にその重要性を増してきている (Guiot, 1990; Nakagawa *et al.*, 2003 など)。これまでに提案されている手法の総数は膨大なものになるが、モダンアナログ法 (Modern Analogue Techniques : MAT) はそうした中にあって、用いられる頻度が高い手法の一つである。これは MAT の論理的な構造が比較的シンプルであること、また分類群の出現率と気候との間にモデル化された関係性をいっさい想定しないこと、などの利点が受け入れられた結果であると推察される (e.g., Nakagawa *et al.*, 2006; Tarasov *et al.*, 2007)。だが、専門的なトレーニングを受けたことのない研究者がその手法を導入しようとして

も、簡単には実現しない場合が多かった。それには、以下にあげるようないくつかの理由があったように思う。

(1) これまで配布してきたソフトウェアがユーザーフレンドリーでなく、その開発者本人と同僚、共同研究者以外が使用方法を独学で理解することは現実的にきわめて困難であった（例外も存在する。たとえば Juggins が開発・配布している C2 (<http://www.campus.ncl.ac.uk/staff/Stephen.Juggins/software.htm>) は有償であるにもかかわらず、操作が容易であるため、世界中でユーザーを獲得している）。

(2) 定量的な気候復元には現世のデータセット（たとえば花粉であれば、表層花粉データセット）が不可欠であるが、そのようなデータセットはごく一部のコミュニティによって独占的に所有されており、外部からのアクセスが容易でなかった（これは厳密には事実と言えない面もあるが、多くの初学者がそのような印象を持ち、壁

2008年1月18日受付、2008年5月24日受理。

* Department of Geography, University of Newcastle. Newcastle upon Tyne, NE1 7RU, England (UK). E-mail : takeshi.nakagawa@newcastle.ac.uk

を感じざるを得なかったことは事実である)。

(3) 仮に、現世データセットが手に入り、ソフトの使い方まで理解したとしても、多くのソフトにおいて計算過程(場合によっては計算結果も)は図として出力されず、ソフトが本当のところ何をしているのか、直感的に理解することは困難であった。

Polygon 1.5 は、これらの問題点を一気に解決することを目的に開発された Windows ソフトウェアである。開発に際しては、グラフィカルユーザーインターフェース(GUI)の部分に最大の努力を傾注した。また Polygon 1.5 のインストーラ・パッケージには、Gotanda *et al.* (2002) によって整備された日本の表層花粉データセット、および Nakagawa *et al.* (2002) によって整備された表層花粉採取地点の気候データベースが付録として添付されている。計算のアルゴリズムは、本稿の中でとくに断らないかぎり Nakagawa *et al.* (2002) で提案されたものと同一である。このソフトウェアに著作権は設定されておらず、ダウンロードにも配布にも一切の制限を設けていない。最新版のインストーラ・パッケージは、<http://dendro.naruto-u.ac.jp/~nakagawa/> からダウンロードすることができる。2008年5月24日¹⁾の段階で、このサイト以外に筆者が責任をもってアップデートしているダウンロード・サイトは存在しない。また同ソフトのマッキントッシュ版、Linux 版は存在しておらず、将来においてもこれらを開発する予定はない。

Nakagawa *et al.* (2002) が提案した手法の中で、とくにオリジナルな貢献として重要性が高かったのは、復元値の誤差を確率密度関数として生成するアルゴリズムとソフトウェアであった。当時配布したソフトウェア(PolCalib 2.0 および PolHist 2.0) はその後アップデートしたもの、依然として Polygon 1.5 と同じサイトからダウンロードすることができる。だが、今回提案する Polygon 1.5 はこれらの旧ソフトをほぼシームレスに内包しており、ユーザーは旧ソフトを別個に立ち上げることなく、多くの場合その存在すら意識することなく、気候復元から復元結果の較正までを一連の動作として実行できる。Polygon 1.5 に搭載された旧ソフトと単体の旧ソフトの間には、数学的アルゴリズムの違いはいっさい存在しない。

Polygon 1.5 はすでに世界の 10 カ国以上の研究者によって用いられているが、ユーザーマニュアルに日本語版が存在しなかったため、発祥の地である日本国内における使用はむしろ限定的であった。本稿はこの問題を解消し、日本におけるモダンアナログ法普及の助けとなる

ことを目的として執筆された、日本語による初の公式使用説明書である。なお本稿では、説明の便宜のため、ユーザーは日本国内の花粉データを用いて、陸上の気候を復元する目的で Polygon 1.5 を使用しているものと仮定した。当然であるが、これは花粉以外のデータを用いて、気候以外のパラメータを復元するために Polygon 1.5 を使用することを何ら妨げるものではない。

II. 作業全体の流れ

図 1 は、Polygon 1.5 が実行する作業の単純化されたフローチャートであり、気候復元と復元結果の較正(キャリブレーション)に関する部分のみを図示している。ここに登場する作業のほとんどは、完全に自動化されているか、あるいはボタンのクリックひとつで実行される。ここで示した流れに従って作業するかぎり、次に行うべき操作は、ほとんどの場合において、ハイライトで指示されたボタンをクリックすることのみである。

III. インストール

インストーラ・パッケージは zip 形式で配布されているため、ダウンロード後はまずこれを解凍する必要がある。解凍が完了したら、Setup.exe をダブルクリックし、あとは通常のインストール手順に従う。インストールが完了すると、スタートメニューの中に Polygon 1.5 のショートカットが生成されているはずである。ソフトを起動するには、このショートカットを選択するだけで良く、とくにコンピュータを再起動する必要はない。

IV. ファイルの書式

Polygon 1.5 を用いて気候復元を行うには、最低でも以下の 3 つのファイルが必要である。

- (1) 表層(=現世)花粉データセット,
- (2) 化石データセット,
- (3) 表層花粉採取地点に対して推定された現世気候データセット.

また復元結果の較正を行う場合には、これに加えて

- (4) 表層花粉採取地点に対する気候推定の誤差モデルが存在することが望ましい。(4) は気候パラメータひとつにつきひとつのファイルが必要であるため、実際のファイル数は 4 よりも多くなる場合が多いだろう。これらのファイルが科学的にどういう意味のものであるかについては、復元手法そのものについて解説した論文(Nakagawa *et al.*, 2002) を参照されたい。なお、Polygon 1.5 と Gotanda *et al.* (2002) の花粉データセットを用い

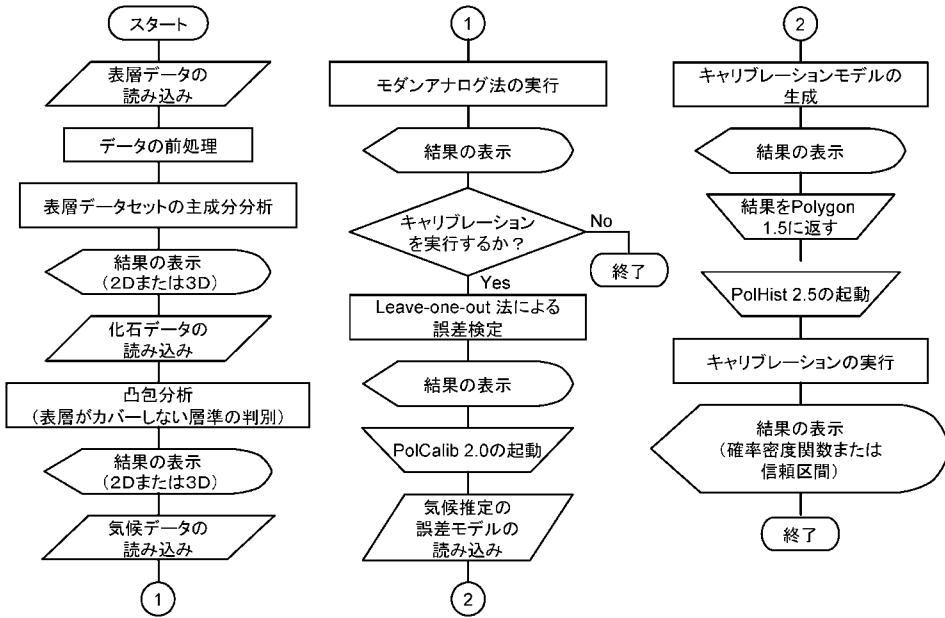


図 1 Polygon 1.5 を用いた気候復元と較正のフローチャート

て日本の気候の復元を行うのであれば、上記のうち(1), (3), (4)についてはインストーラ・パッケージに付録として添付されている。(2)はユーザー自身のデータであるので、Polygon 1.5 の書式に合わせてフォーマットを整える必要がある。本章では Polygon 1.5 が読むことのできる書式について詳述する。

もっとも重要なことは、(1)花粉分類群の名前、(2)表層花粉採取地点の名前、および(3)両者の入力されている順番を、複数のファイルにまたがって統一することである(図 2)。また典型的な書式ミスとしては、0 の代わりに空白が入力されている場合、またデータ領域之外のどこかに不要な空白が入力されている場合などがある。不要な空白セルを避けるもっとも単純な方法は、データ領域を新しいワークシートにコピーして保存しなおすことである。保存の際の書式は csv (コンマ区切りテキスト) である必要がある。インストーラ・パッケージには化石のサンプルデータも添付されているので、書式の見本として活用していただきたい。復元にどの分類群を用いるか、またそれらの分類群をどの順番で入力するかは、表層と化石のファイルの間で矛盾を生じていないかぎり、Polygon 1.5 にとって本質的な問題ではない。また、花粉分類群名、表層花粉採取地点名、化石層準ラベル(名前でも深度でも可)、気候パラメータ名のいずれに

ついても、文字数の制限は存在しない。サンプルデータのラベルの文字数は 8 文字以下に統一されているが、これは PPPbase (<http://www.imep-cnrs.com/pages/3pbase.htm>) など既存のソフトとの互換性を維持するための措置にすぎず、Polygon 1.5 にとって本質的に必要なことではない。重要なことはファイル間の統一のみである。なお、保存の書式が csv であることから、コンマの使用は場合によって誤動作を引き起こす可能性が否定しきれない(開発に使用したコンピュータ上では、そのような誤動作は確認されなかった)。

表層花粉の値については、Polygon 1.5 はパーセンテージを自動的に計算する機能を持っている。だが、化石花粉のデータシートには、全分類群の合計を基数(100%)としたパーセンテージがあらかじめ入力されている必要がある。言い換えると、化石データのパーセンテージは自動的に再計算されない。これは、Polygon 1.5 を花粉以外の多変量データに応用する場合を想定した処置である。

化石データの縦軸としてサンプル名ではなく深度(あるいは年代)を用いる場合、最初の 1 行および最後の 1 行のラベルに適当な値を入力し、パーセンテージを全分類群について 0 としておくと、これらの行の深度はグラフの縦軸の最小値および最大値として用いられる。同様

分類群の名前と順番は、表層花粉データセットと化石花粉データセットで同一でなくてはならない。

サイトの名前と順番は、表層花粉データセットと気候データセットで同一でなくてはならない。

表の上下にゼロ値のみの行を挿入して深度を与え
ておくと、その深度がグラフの上限と下限になる。

1 Reference data						
	A	B	C	D	E	AH
1	Site name	ABIES	ACER	ULMUS ZELVIBURNUM		
2	Jss-001	6.52	0	0	0	
3	Jss-002	0	0	0	3.47	
4	Jss-003	2.05	0	0	1.23	
5	Jss-004	0	0	0		
6	Jss-005	2.04	0	2.04		
285	Jss-282	18.46	0.92	6.15		
284	Jss-283	39.77	0	0		
285	Jss-284	32.98	0	2.13		
286	Jss-285	5.1	0	1.02		
287						
288						

2 Fossil data						
	A	B	C	D	E	AH
1	Age	ABIES	ACER	ULMUS ZELVIBURNUM		
2		0	0	0	0	
3		9395349	1.19	0	1.59	0
4		1644186	3	0	4	0
5		2348837	1.97	0.39	2.36	0
6		2701163	1.13	0.38	1.88	0
88		43076.92	1.05	1.57	6.28	0
89		44961.54	0.45	0.45	2.03	0
90		46846.15	0.27	0.27	4.55	0
91		50000	0	0	0	0

3 Climate data						
	A	B	C	G	H	I
1	Site name	TANN	PANN	PWIN	PSUM	
2	Jss-001	9.7684	3939.53	1553.221	2422.288	
3	Jss-002	17.4434	2236.75	615.313	1621.437	
4	Jss-003	17.3234	2236.75	615.313		
5	Jss-004	15.8174	2236.75	615.313		
6	Jss-005	15.8234	2236.75	615.313		
283	Jss-282	4.8216	815.34	348.701		
284	Jss-283	5.6468	1123.74	601.77		
285	Jss-284	6.4268	1123.74	601.77		
286	Jss-285	6.4268	1123.74	601.77		
287						
288						

4 Tann-EstObs						
	A	B	C	D	E	F
1	Tann-Est	Tann-Obs				
2		5.5634	6.41			
3		5.3626	5.54			
4		7.4242	7.17			
5		5.932	5.32			
6		7.0758	7.33			
145		21.728	22.42			
146		22.552	21.86			
147		21.737	22.3			
148		22.3678	22.87			
149						
150						

図 2 Polygon 1.5 のためのデータフォーマット

に、全分類群のパーセンテージが0であるような行がファイルの途中に挿入されている場合、Polygon 1.5はこれをデータの不連続点として解釈し、グラフはその行の上下に分割して表示される。これは堆積物に不整合がある場合などを想定して設けられた機能である。

V. 操作法の実際

1. 凸包分析

(1) 凸包分析の概要

凸包分析とはPolygon 1.5が新たに提案する分析手法であり、ある地点の化石データを解釈するにあたり、参照する表層データセットが適切に選択されているかどうか、また、十分に多様なデータを含んでいるかどうかをチェックするのに用いることができる。たとえば、日本の化石データとアフリカの表層データを強引に組み合わせようとしたような場合、原理的には凸包分析によって、その選択が妥当でないことが示されるはずである。表層データが日本といつても単一の県からしか得られて

おらず、カバーする範囲が狭すぎるような場合も同様である。

凸包分析の第一歩は、表層花粉データセットの主成分分析(Principal Component Analysis : PCA, あるいはEmpirical Orthogonal Function : EOF分析)である。これにより表層花粉データセットは、その多様性をもっとも良く説明すると思われる座標軸で定義される空間中に散らばる点の集合として表現される。次に、同じ空間中に化石花粉データセットを投影する。ここでは化石データの主成分分析を実行しているのではなく、あくまで表層データの主成分軸を保持したまま、その軸上における得点を計算している点に注意する必要がある。もし化石データが、表層データによって雲のようにカバーされる空間内に留まっているのであれば、そのような化石データに対して気候復元を実施することには比較的大きな蓋然性がある。反対に、その雲からはみ出している化石データがあった場合、Polygon 1.5はそのような時代の気候復元を実行するには表層データセットが不備であ

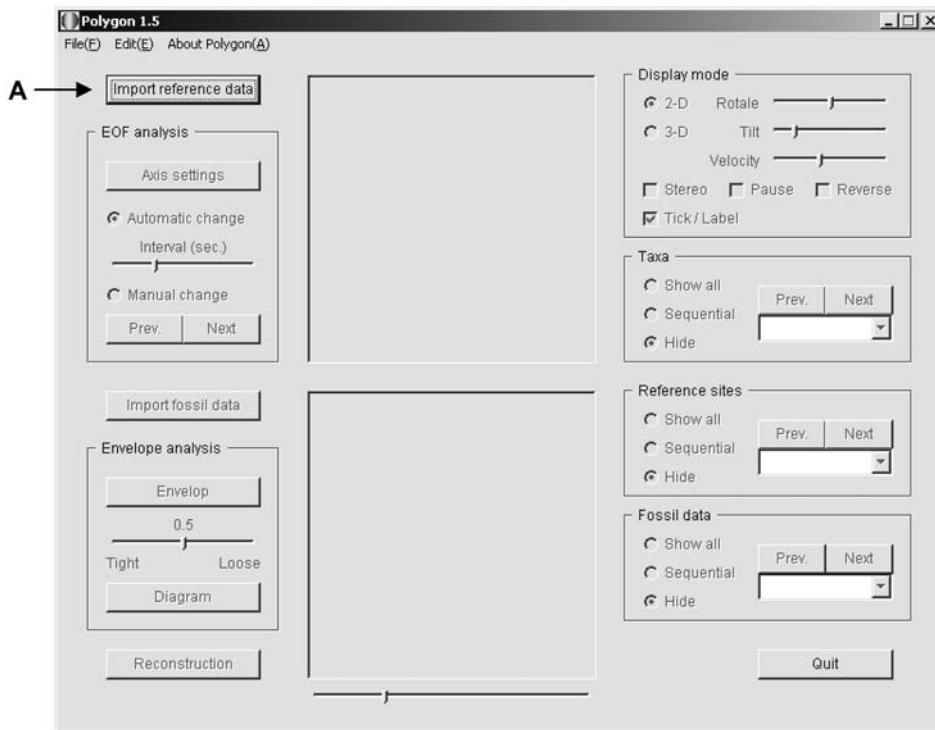


図3 Polygon 1.5 の起動時の状態

ると判断し、ユーザーに警告を与える。データセットの不備は、分類群の出現率と気候との間にいっさい簡略化されたモデルを想定しない（したがって外挿が原理的に不可能である）モダンアナログ法の場合、とくに深刻である。このような場合にあり得る唯一の解決方法は、より多くの気候条件を含む広い地域から表層花粉データを収集し、表層花粉データセットがカバーする範囲を拡大することである。

(2) データの前処理

図3は、Polygon 1.5 を起動した直後の状態を示している。ここでフォーム左上の“Import reference data”ボタン（図3のA）をクリックすると、ファイル選択ウィンドウが開くので、サンプルデータを格納したフォルダの中から“1_Reference_data.csv”というファイルを選び、「開く」を選択する。すると、図4のような新しいフォームが開く。このフォーム上で、データの前処理方法の指定、および主成分分析の詳細設定を行うことができる。表層データがすでにパーセンテージで保存されている場合、あるいは花粉以外の多変量データを読み込もうとしていて、変数によって単位系が異なるような場

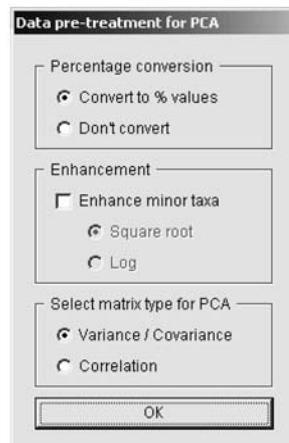


図4 データ前処理用プロンプト

合には、あらためてパーセンテージに変換することは必ずしも要求されないが、前者の場合には、入力されているすべての分類群の合計が100になっているかどうかを確実にチェックする必要がある。全体の部分和（たとえ

ば、高木花粉総数 : AP など)を用いてパーセンテージを定義することは、標準的なモダンアナログ法では想定していない。したがって、たとえばハンノキ属など特定の分類群を除外して計算を実施したい場合には、これらの分類群を数表から削除し、新たに csv ファイルを作成しなおす必要がある。

マイナー分類群の強調は、平方根あるいは対数によって行うことができる。これらはフォーム上のチェックボックスとラジオボタンで容易に設定できる。主成分分析(PCA)を、分散共分散行列で行うか、相関係数行列を用いて実施するかの設定も、このフォーム上で行う。前者は各変数の値の絶対値を考慮するため、すべてのパラメータで単位系が揃っているデータセットに適する(花粉データのパラメータは、通常すべて分類群の%であるため、典型的にこれに該当する)。後者は変数の値の変動幅が標準化されるため、変数の単位系が異なるために値を同一の基準で評価できないようなデータセットに適する。デフォルトは、Polygon 1.5 は微化石データの解釈に使用する場合が多いであろうことを想定して、分散共分散行列に指定されている。

(3) 主成分分析

前節に述べた設定を完了したのち、OK ボタンをクリックすると、表層データセットの主成分分析が自動的に実施される。結果を表示している状態が図 5 である。上の図は各分類群の主成分負荷量を示し、下の図は各サンプルの主成分得点である。デフォルトの状態では、主成分軸(EOF) 1 と 2 を用いた 2 次元空間中に表示されるが、右上のラジオボタンで 3-D を選択すると、主成分軸 1 から 3 までを用いた 3 次元アニメーション表示に切り替わる(図 5)。

(4) 結果の保存

主成分分析に限らず、Polygon 1.5 が output するすべての結果は、図あるいは数表として、二通りの方法で保存することができる。もっとも簡単な方法は、結果を出力している図の上にポインタを置き、マウスの右ボタンをクリックすることである。この操作により、“Copy”および“Save matrix”という項目を含むメニューが開くはずである(図 6)。ここで Copy を選択すれば、ビットマップの図がクリップボードにコピーされ、任意のソフトに貼り込むことが可能になる。Save matrix を選択す

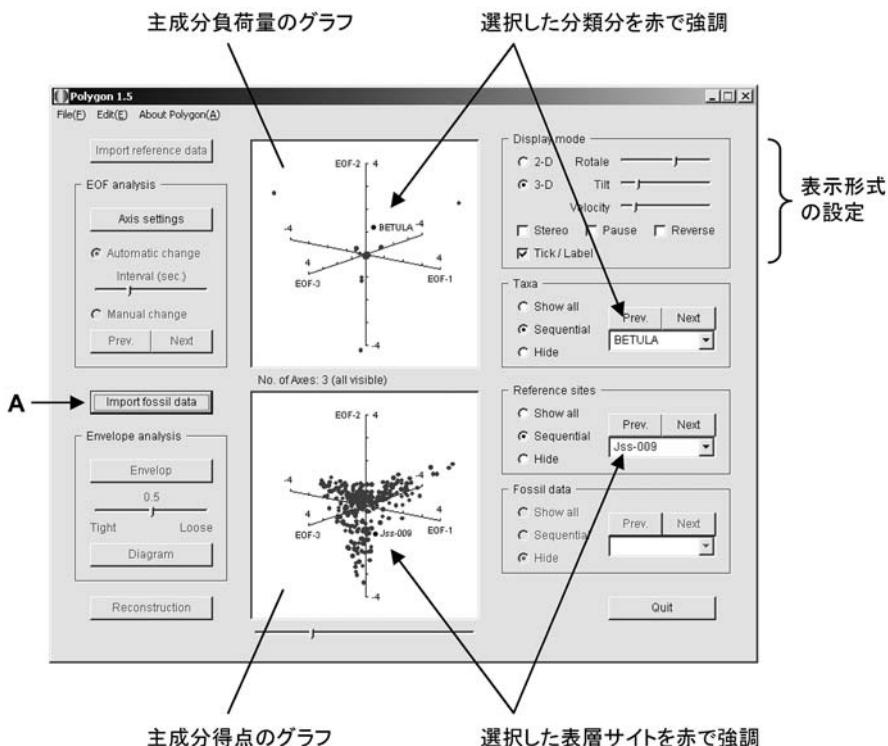


図 5 表層データセットの主成分分析結果

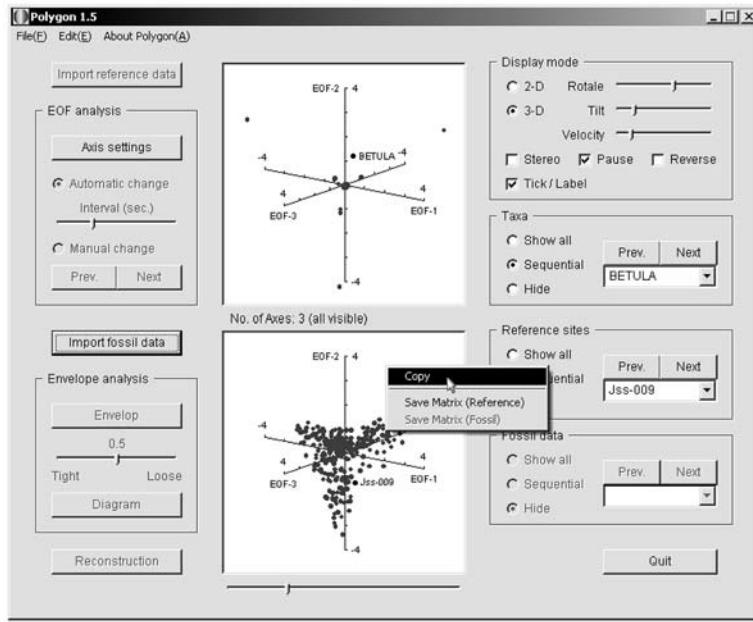


図 6 結果の保存方法

画像を右クリックしてポップアップメニューを呼び出し，“Copy”を選択するとビットマップの図がクリップボードにコピーされる。“Save matrix”を選ぶと、結果がcsv フォーマットの数表として保存される。この数表は Excel で直接読み込むことができる。

ると、結果が csv 形式のファイルとして数表で出力される。この数表は Excel などの表計算ソフトで直接開くことができる。

(5) 化石データの投影

次に、表層データセットと同じ主成分空間内に化石データを投影し、変化の様子を軌跡として表示する。それには化石データセットを読み込む必要があるが、そのために用いるボタンは、図 5 の中に A で示した “Import fossil data” ボタンである。これをクリックし、ファイル選択ウィンドウの中から化石データを格納したファイルを開く（サンプルファイルを用いるのであれば、“2_fossil_data.csv” がこれに当たる）。すると表層データに対して行ったのと完全に同一の前処理が、化石データに対しても施された上、化石花粉群集の深度に沿った変遷が、表層花粉群集と同じ主成分 (EOF) 空間に黄色の軌跡として投影される（図 7）。

ここで、Polygon 1.5 は化石花粉データセットに対して、新たに主成分分析を行っているのではないことに注意する必要がある。投影する軸は、あくまで表層花粉データセットに対して求められた主成分軸であり、Polygon 1.5 は化石データをその既存の軸に対して正

射影し、軸上の値を読んでいるにすぎない。すなわち、パーセンテージ空間内に表層と化石のデータセットをプロットした場合と比較して、両者の相対的な位置関係は本質的には変化せず、あくまで座標軸のみが回転・伸縮している。数学の言葉で言い換えると、表層花粉データセットを行列 S 、主成分分析の結果を行列 P とした場合、

$$P = AS \quad (1)$$

となるような行列 A が存在する。化石花粉の投影結果 Q は、化石花粉データセットを行列 F とした場合、単純に

$$Q = AF \quad (2)$$

として求められる。行列 A が両方の式で共有されている点が重要である。このため Polygon 1.5 では、化石花粉データセットの主成分得点 (EOF score) は、かならずしも平均値 0、標準偏差 1 とはならない。

(6) 凸包分析

凸包とは、数学的には厳密な定義を持つ言葉であるが、直感的には「点の集合を包み込むようなゴム膜」と

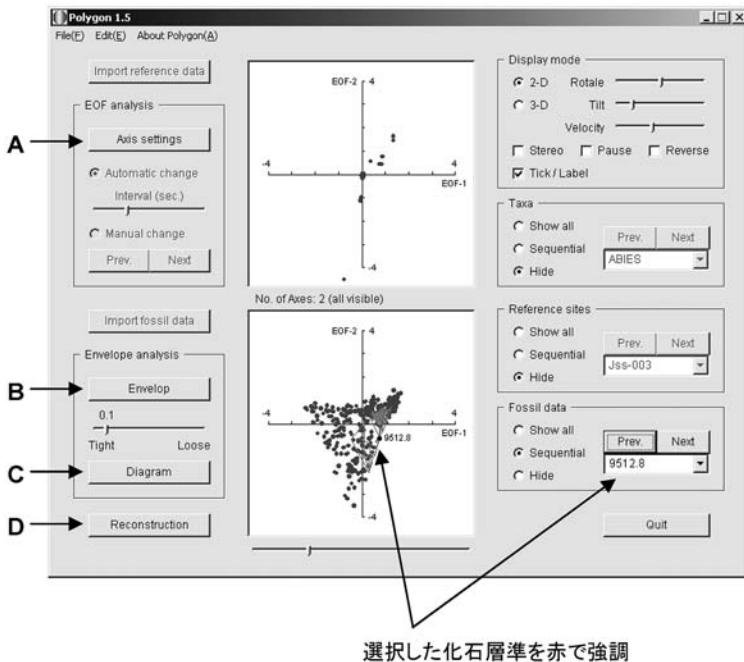


図 7 化石データセットを、表層データセットの主成分軸によって定義される空間に投影した状態

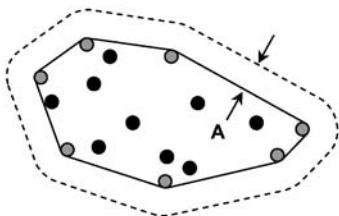


図 8 2次元空間中における、きつい凸包(実線)とゆるい凸包(点線)の例

凸包の「きつさ」は、もっともきつい凸包からの距離(A)によって定義される。ここで、距離の単位は主成分得点であり、1は標準偏差を意味する。グレーで示したのは凸包の頂点を構成する点であり、Polygon 1.5 のカラー モードでは、このような点は青で表示される。

して理解される(図8)。凸包分析はある化石花粉群集が、表層花粉データセットを作る凸包の外部に存在しているか、あるいは内部に含まれているか判別することを指し、Polygon 1.5が独自に提案する分析手法である。原則としては、凸包に含まれない化石データに対して、モダンアナログ法を適用するのは好ましいことではない。逆に、凸包内部に含まれる点に対しては、復元値が一定の蓋然性を持つとする仮説をこの段階で棄却すること

とはできない。

Polygon 1.5は、凸包分析に際して凸包のまわりに若干のマージン(ゆとり)を持たせることもできる(図8のA)。これにより、確かに凸包をはみ出しているが、實際にはごく近傍に表層サンプルを伴っているような化石サンプルを、凸包外として棄却してしまうリスクを軽減することができる。凸包のきつさ(tightness)は、メイン・フォーム上のスライダーを動かすことで設定できる。マージンの幅の単位は、各EOF軸上の目盛りの単位(=標準偏差)と同一である。

凸包分析に際しPolygon 1.5は、表示モードが2-Dであれば、表示に用いる2本の主成分軸によって定義される平面内で計算を実行する。表示モードが3-Dであった場合、同様に3本(あるいはそれ以上:後述)の主成分軸によって定義される空間中で計算を実行する。軸は必ずしも寄与率の高いものから順番に選ぶ必要はなく、コントロールパネル(図9)を用いて任意に選択することができる。コントロールパネルは、図7の中に“A”で示した“Axis setting”ボタンをクリックすることによって表示される。

ちなみに、表層花粉データセットの主成分軸は、原理的には現世植生(および花粉の堆積過程)の多様性を説

明するのに適した軸であるはずである。その中から人による搅乱を反映した軸を認定し、これを除外して分析を行うことによって、分析結果に対する人間活動の影響

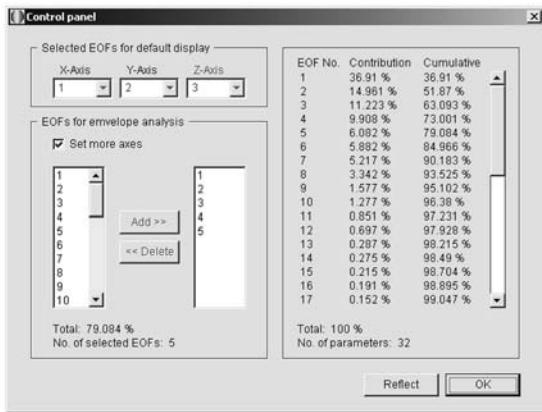


図 9 凸包分析と表示に用いる主成分軸を、任意に選択するためのコントロールパネル

ここでは例として、主成分軸 1 から 5 までが選択されている。合計 5 軸の積算寄与率は 79.1% である。

を排除できる可能性がある。

凸包分析を実行するには、図 7 の中に B で示したボタンをクリックする。凸包の内部に含まれないような化石データが存在する場合、その層準は黄色の軌跡の上に赤い円として表示される。また表層データセットのうち、凸包の頂点を構成する点は塗りつぶしの色が緑から青に変化する。凸包分析は、考慮する軸の本数を増やせば増やすほど判定は厳しくなる(図 10)。仮に、すべての軸を分析に用いた場合、ごく平均的な組成を示す化石花粉群集中に、たった一個体の希少分類群が存在するだけでも、そのサンプルは凸包からはみ出してしまうことになるが、そのような議論は科学的には無意味である。現実的には、主成分寄与率の大きい方から順番に EOF 軸を採用していくとして、積算寄与率が 70% ないし 80% を超えるほど多くの軸を採用することに大きな意味はないものと思われる(経験に基づいた感想であり、数学的に検証したわけではない)。なお、各 EOF 軸の寄与率、および選択された EOF 軸の積算寄与率は、いずれもコントロールパネル(図 9)に数値で表示される。

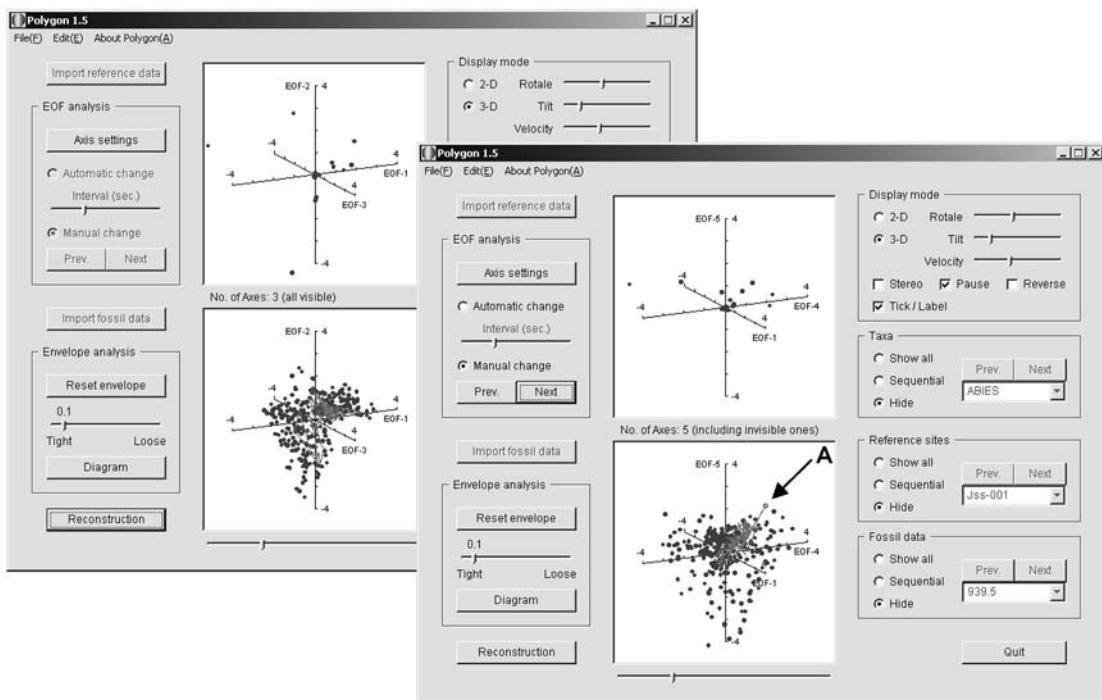
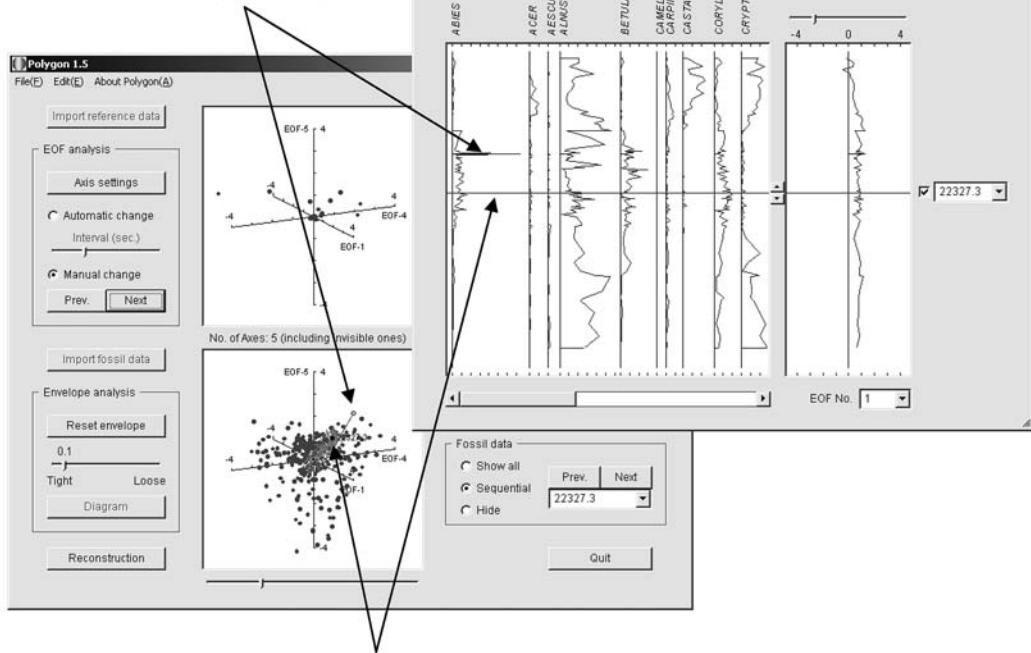


図 10 凸包分析を、主成分軸 1–3 のみで行った場合(左)と 1–5 で行った場合(右)

後者の表示には、暫定的に主成分軸 1, 4, 5 が用いられている。3 軸の場合、すべての化石層準は凸包の中に存在しているが、5 軸でははみ出す層準(A)がひとつ発生する(凸包の「きつさ」はともに 0.1 に設定)。

A: 凸包分析の結果、表層花粉データセットが作る凸包をはみ出すと判定された層準（メイン画面では赤い円、ダイヤグラム中では赤い線として表示）。



B: 手動で選択した層準（メイン画面では赤く塗りつぶした円、ダイヤグラム中では青い線として表示）。

図 11 花粉ダイヤグラム（右）と主成分軸空間中の軌跡（左）

両者は、本質的にはまったく同一である物を異なった表現方法で示しているにすぎない。Polygon 1.5 の図は基本的にすべてシンクロされており、ここに示した 2 枚も例外ではない。すなわち、一方で選択する層準を変更すれば、他方の表示も自動的に追随するし、凸包分析の設定を変更すれば、結果は両方の図に即座に反映される。

図 12 気候復元のためのフォーム

(7) 結果の立体視

三次元(3-D)アニメーションは点の空間的なばらつきを理解するには非常に適した表示方法であるが、動画は紙に印刷して出版物に使用することができない。この問題を解決するために、Polygon 1.5には主成分分析の結果をステレオグラムで出力する機能が搭載されている。メインフォーム右上の“Stereo”チェックボックスを選択すると、表示モードが3-Dである場合には、ほとんど同じグラフが左右に並んで表示されるようになる。実際には、左右のグラフは微妙に異なる角度から描かれており、表示されたとおりの位置関係で印刷すれば、そのまま立体視を行うことができる。

(8) 花粉ダイヤグラム

凸包分析で内部に含まれないと判定された化石層準は、EOF空間中の分布図で表示するのみではなく、その層準を花粉ダイヤグラム上に表示することもできる。メインフォームの“Diagram”ボタン(図7のC)をクリックすると、化石花粉データが花粉ダイヤグラムとして表示される。この中で、とくに赤い横線によって表示されている層準が、マージンを考慮しても凸包の内部に含まれない(したがって気候復元の信頼度が低い)層準である(図11のA)。言い換えると、EOF空間中の赤い円と、ダイヤグラム中の赤い横棒とは1対1対応をしている。なおダイヤグラム中の青い横線は、マウスで自在に上下させることができる。このときEOF空間中の軌跡の上を、赤く塗りつぶされた円が移動する。この機能を用いることで、任意の化石層準について、その化石花粉群集の近傍にじゅうぶんな数の表層サンプルが存在するかどうかを視覚的にチェックすることができる。

ダイヤグラムは、フォームのサイズに応じてサイズが変わるものになっている。またダイヤグラムの右隣には主成分得点(化石花粉データセットの主成分得点ではなく、表層の主成分軸に対して化石データを正射影した値)も表示される。この曲線は、主成分軸がどのような植生(あるいは花粉堆積過程)に対応しているかを考察する上で役に立つ可能性がある。ただし、この得点をそのまま気候プロキシーとして用いることについては、筆者はこれに必ずしも賛成しない。主成分軸は、あくまで複数の要因が組み合わさった結果としての、現象の多様性を描写するのに適した軸であるにすぎない。気候など背景要因の復元に使うのであれば、少なくとも主成分得点ではなく主因子得点の方が適しているであろう。なお、ダイヤグラム、主成分得点とともに、図を右クリックすることによって出力の結果を保存することができる。

2. モダンアナログ法による気候復元

(1) デフォルト設定を用いた簡便な復元

気候復元を実行するには、まずメインフォームの左下にある“Reconstruction”ボタン(図7のD)をクリックし、新しいフォームを開く必要がある。さらに、新しいフォームの左上の“Import climate data”ボタン(図12のA)をクリックすることで、表層花粉採取地点に対して推定された現世気候のファイル(サンプルデータでは“3_climate_data.csv”がこれに当たる)を読み込む。このファイルの科学的な意味については、Nakagawa *et al.* (2002)が詳述している。なお、表層花粉採取地点における現世気候ファイルが手に入らない場合には、気象台の緯度経度標高と観測データ、および表層花粉採取地点の緯度経度標高データさえあれば、筆者によって開発されたPolation 1.0ソフトウェアによって容易に計算を実行し、書式の整ったデータファイルを生成することができる。Polation 1.0は、Polygon 1.5と同じダウンロードサイトで無償配布されている(Polygonの次のバージョン(2.0)では、Polation 1.0を機能の一部として統合する予定である)。現世気候ファイルの読み込みに成功すると、Polygon 1.5はデフォルト設定に基づいて自動的に気候復元の計算を実行し、結果を折れ線グラフとして表示する(図13)。復元する気候パラメータは、グラフの下のコンボボックスから選択できる。

デフォルト設定を使用した場合、気候のグラフは青と赤の折れ線を含むはずである。ここで、青は生の復元結果を示し、赤は移動平均によってスムージングをかけたグラフである。移動平均は横軸と縦軸両方の値について計算されているため、サンプリング間隔が一定でなかったとしても、赤の折れ線が数学的あるいは層序学的な意味を即座に失うことはない。移動平均を算出する際の層準数は、グラフの上にあるスライダーを動かすことで変更可能である。赤の折れ線が必要ない場合には、スライダーの値を1にすればよい。またグラフの幅は、下にあるテキストボックスに数値を入力することで自在に設定できる。

計算の設定あるいはデータによって、グラフ中に細くて赤い水平線が表示される場合がある(図13のA)。これは凸包分析で認定された、表層データセットが占める空間内にない(すなわち復元の信頼度が低い)化石層準である。ここでの赤の水平線は、主成分得点の散布図中における赤い円(図11のA)に正確に対応する。

青の水平線(図13のB)は、ユーザーが自在に移動できる層準選択線である。ここで選ばれた層準は、主成分

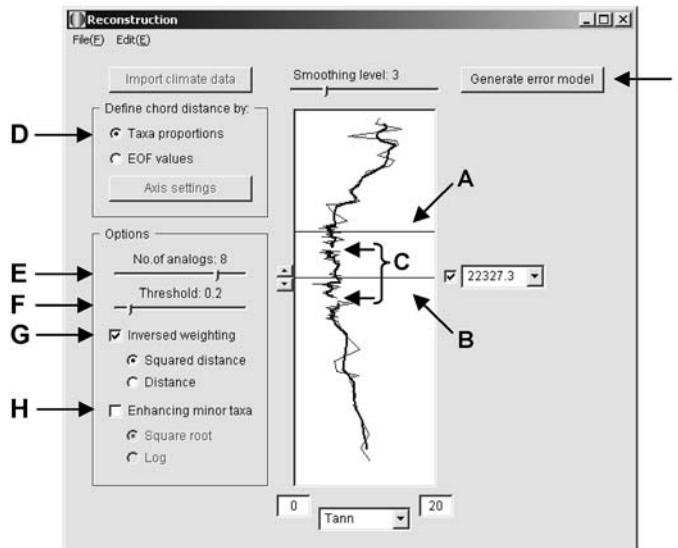


図 13 デフォルト設定で気候復元を実行した状態

得点の散布図中では赤く塗りつぶした円(図 11 の B)に対応している。青の線が必要ない場合(グラフを図としてコピーする時など)には、層準ラベルの横のチェックボックスを解除すれば消すことができる。このとき、他のフォーム上でこれに対応している表示もすべて、連動して自動的に消去される(この設計思想は Polygon 1.5 全体を通じて一貫しており、複数の図が異なるセッティングによって描画されることは基本的にあり得ない)。同様に赤の線も、メインフォームの“Reset envelope”をクリックすることで消去可能である。これを消去しても、以降の計算結果に影響はない(ささいに発生しない)。

(2) しきい値

例に示した気候復元結果のグラフには、2カ所の不連続点がある(図 13 の C)。これは、この層準の化石データの近傍に、参照できる表層花粉データが一つも存在しなかったことを示している(しばしば non-analogue situation と表現される。凸包の内部であっても、表層の地点密度が低ければ、このようなことは起こり得る)。このような場合、Polygon 1.5 は気候復元を拒否し、空白を出力するようになっている。

ここで問題になるのは、「近傍」とは何かという点である。「近傍」を定義するためには、必然的に「距離」を定義する必要があるが、定量復元の慣例では、距離は Squared chord distance(定着した訳語は存在しないようだが、本稿では便宜的に「平方弦長」を用いる)と呼ばれる値で

もって表現される。また近傍を認定するしきい値としては、0.1ないし0.2程度の値が用いられる場合が多い。しきい値は、図 13 の F に示すスライダーを動かすことで任意に設定することができます。マイナーフレーナーの強調を行っていない場合、平方弦長とは、 ΔP_i を分類群 i のパーセンテージの差、 n を分類群の総数、 C_p^2 を平方弦長とした場合に、次のような式で与えられる量である。

$$C_p^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta P_i}{100} \right)^2 \quad (3)$$

全体和を 100 とするパーセンテージデータの場合、平方弦長の論理的な最小値は 0、最大値は 2 である。平方弦長の平方根(=単なる弦長)に 100 を乗じれば、その値はパーセンテージで定義される空間中のユークリッドの距離に正確に対応する。

(3) 最大アナログ数

化石花粉データの近傍に充分な数の表層花粉データが存在した場合、平方弦長の近いものから順に良いアナログとして採用していくことになる。このとき、アナログを最大でいくつまで採用するかを、図 13 中に “E” で示したスライダーを用いて設定することができる。Polygon 1.5 におけるデフォルトの値は、この分野の慣例を尊重して 8 に設定してあるが、これはコンピュータの性能が低かった時代の歴史的遺産を踏襲している(変数の数は 2 のべき乗である方が扱いやすかった)だけのこと

で、数学的に特に意味のある値ではない。ただし、8を使用してこれまで多くの優れた結果が得られてきたことは事実であり、筆者自身も含め、多くの研究者はこの点について問題視する必要性をあまり感じていない。

なお、既存のソフト (PPPbase など) の中には、設定によって最低でも 1 個 (あるいは数個) のアナログを、平方弦長がしきい値を超えたとしても強引に見つけてきてアナログとして採用し、気候復元を実行するものがある。現バージョン (1.5) の Polygon では、このような機能は搭載されていない (2008 年 5 月 24 日¹⁾ 現在)。Polygon 1.5 で最大アナログ数を 8 とした場合、それは「平方弦長がしきい値を超えない範囲だけを検索して、最少なら 0、最大でも 8」の意味である。

(4) 主成分得点を用いたモダンアナログ法

通常のモダンアナログ法において、モダンアナログの認定は、分類群の出現比率によって定義される多次元空間中のユークリッド距離あるいは平方弦長を用いて行われる。これに対して Polygon 1.5 は、選ばれた主成分軸で定義される多次元空間中の距離を用いて、アナログを認定する機能を搭載している。この切り替えは、図 13 に “D” で示したラジオボタンによって行われる。主成分得点は平均値と標準偏差 (主成分寄与率に相当) を用いて標準化されているため、アナログ判定に用いる平方弦長の定義には若干の修正 (主成分寄与率による重みづけ) が必要になる。すなわち、 C_e^2 を平方弦長、 k を分析に用いる主成分軸の数、 w_i を主成分軸 i の寄与率 (%)、 ΔS_i を主成分軸 i 上の得点の差とした場合、平方弦長を定義する式は次のようになる。

$$C_e^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{w_i \Delta S_i}{100} \right)^2 \quad (4)$$

仮にすべての主成分軸を用いるとするならば、式 (2) の平方弦長は、式 (1) の平方弦長と等しい値になるが、主成分軸を取捨選択することで、式 (1) と式 (2) は異なった意味を持つようになる。主成分軸を用いたモダンアナログ法の研究例はまだないが、例えば人間活動の影響や、堆積過程や植生遷移といった、気候に関係ない要素の影響を排除したい場合に威力を発揮する可能性がある。ユーザーが主成分得点を用いた復元を選択した場合、Polygon 1.5 は、凸包分析に採用した軸をそのまま気候復元にも適用する。軸の選び方を変更したい場合は、メインフォームに戻って “Axis setting” ボタンをクリックし、コントロールパネルを立ち上げれば良い。

(5) 重みづけとマイナー分類群の強調

気候の復元値は、表層花粉サイトに対して推定された現世の気候の加重平均として算出される (詳細は Nakagawa *et al.* (2002) を参照のこと)。ここで、加重平均の重みづけにはいくつかの方法があり、Polygon 1.5 のユーザーも、好みに応じて方法を選択することができる。もっとも単純なのは、重みづけをしない方法である。また、Chord distance (弦長 : 平方弦長の平方根のこと) であり、より直感的な「距離」の概念に近い) の逆数を用いる方法や、弦長の二乗の逆数を用いる方法 (アナログとしての重みが、いわゆる「距離の二乗に反比例」することになる) などがよく用いられる。また弦長を算出する際に、平方根や自然対数を用いてマイナー分類群を強調することができる。以上を数学的に明確に表現すると以下のようになる。

$$CR_i = \frac{\sum_{j=1}^k \{f(C_{ij})CE_j\}}{\sum_{j=1}^k f(C_{ij})} \quad (5)$$

$$C_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left\{ \frac{g(p_i) - g(p_j)}{100} \right\}^2} \quad (6)$$

$$f(x) = x^n \quad (n=0 \text{ または } -1 \text{ または } -2) \quad (7)$$

$$g(x) = x \text{ または } \sqrt{x} \text{ または } \log x \quad (8)$$

ここで CR_i は化石層準 i に対して復元される気候、 k はその化石サンプルに対して認定された表層のアナログの数 (3 節を参照のこと)、 C_{ij} は化石層準 i と表層サンプル j の花粉群集間の弦長、 CE_j は表層サンプル j に対して推定された気候の値、 m は分類群の総数のことである。式 (7) の n の値と式 (8) の関数 g は、Polygon 1.5 のユーザーによる選択に任される (図 13 の G と H)。

[注意！]

気候復元に用いるマイナー分類群の強調は、最初に主成分分析の前処理として行うマイナー分類群の強調とはリンクしていない (I 章 2 節を参照のこと)。すなわち Polygon 1.5 では、凸包分析はマイナー分類群を強調して行うが、気候復元では強調せずに計算を実行するといった使い分けが可能である。

(6) 結果の保存

Polygon 1.5 が output する他のすべての結果と同様に、気候復元の結果もビットマップの図あるいは csv フォーマットの数表として保存することができる。前者は Windows のクリップボードを経由して、他の描画ソフトなどに自由に貼り込むことができる。後者は Excel で直接

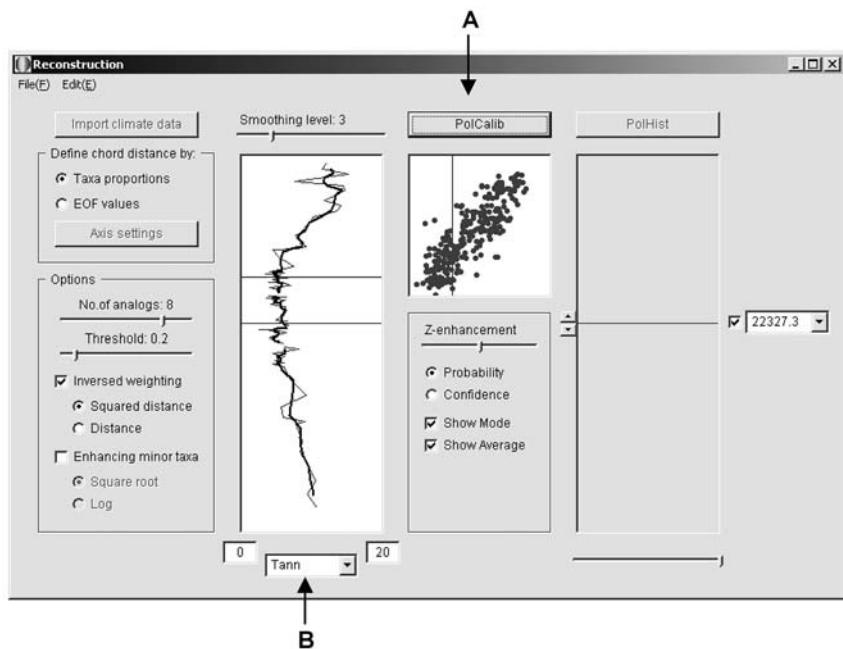


図 14 気候復元の結果と、leave-one-out 法で生成した誤差モデル

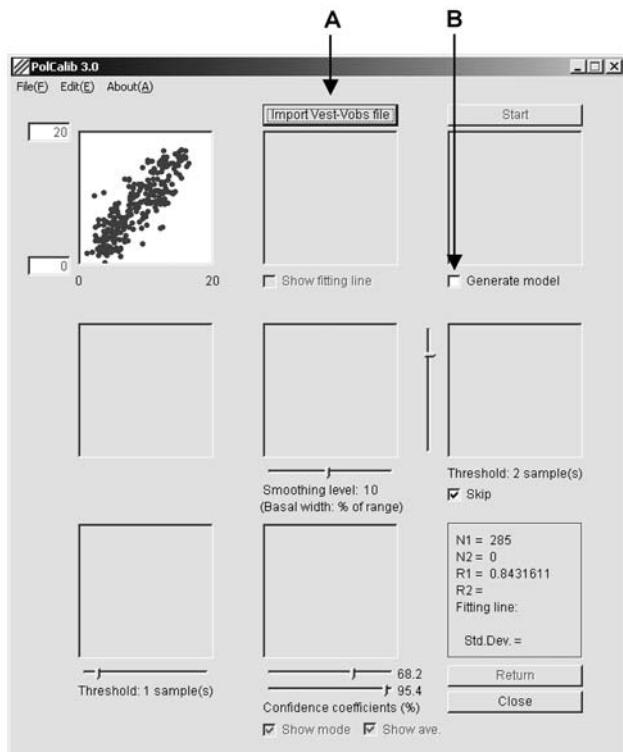


図 15 PolCalib 3.0 を起動した状態

開くことが可能である。図のクリップボードへの取り込み、あるいは数表の保存は、フォーム上端のメニューバーから行うこともできるが、より直感的には図の上にカーソルを置き、マウスの右ボタンをクリックして「.Popup menu」を呼び出すことで実行できる(図6も参照されたい)。

(7) 結果の白黒表示と色調の変更

Polygon 1.5 は基本的にはカラーでの使用を推奨しているが、予算等の理由で白黒の図が必要である場合は少なくない。カラーと白黒の切り替え、ならびに色調の変更は、メニューバーの“Edit (E)”から“Colour setting”を選択し、コントロールパネルを呼び出すことによって実行できる。

3 復元誤差の見積もりと結果のキャリブレーション

(1) Leave-one-out 法による誤差検定

Leave-one-out 法による誤差モデルの生成は、“Generate error model”ボタン(図13のI)を押すことで全自动で実行できる。この検定方法の数学的な意味については、Nakagawa *et al.* (2002)に詳しい解説があるが、直感的にはある種のモンテカルロ・シミュレーションであると理解することができる。図14中央の散布図は、復元によって得られた値(Nakagawa *et al.* (2002)の V_{rec} に相当)と表層サンプルに対して推定された値(同じく V_{est} に相当)の対応関係を示している。復元結果は、この散布図が1本の線上に集中しているほど精度(Precision)が高く、その線が原点を通る傾き45度の直線に近いほど確度(Accuracy)が高い。この散布図は、復元方法の設定および復元する気候パラメータによって、形が逐一変化する点に注意する必要がある。すなわち、復元方法が気温の復元には適しているが、降水量の復元には適さないといったことは普通に起こり得る。

モダンアナログ法の問題点として、どんなパラメータであっても(たとえば平均寿命や鉄鋼生産量など、花粉とは本質的に無関係なパラメータですら)、現世のデータセットさえ手に入れれば、化石花粉データを元に、過去についても復元結果が算出できてしまうことはしばしば指摘されてきた。しかし、そのような本質的に無意味な復元を行った場合、Leave-one-out 法によって描かれる散布図が無相関を示すことによって、無意味であると判別することができる。それほど極端な例でなくとも、気候パラメータによっては花粉で復元することが不可能あるいは困難なものもある(日本の例だと、降水量の復元は温度の復元よりも精度が低くなる傾向が見られる)。復元結果を論文などに使用する場合には、この散布図を

同時に示すか、相関係数(Nakagawa *et al.* (2002)における R^2 の値)を明記することが強く推奨される。

(2) キャリブレーションモデルの生成

Nakagawa *et al.* (2002) は前節の散布図をさらに推し進め、これにある種のスムージングを施することで、復元値のキャリブレーションモデルとして利用することを提案した。また、そのためのソフト(PolCalib 2.0)も開発し、無償で配布した。Polygon 1.5 には PolCalib のアップデート版(ver. 3.0)があらかじめ組み込まれており、別に PolCalib を立ち上げることなく、一連の作業の延長としてキャリブレーションモデルを生成することができる。

いま、誤差モデルの散布図の描画まで完了しているものとする。その場合、当初 “Generate error model” と書かれていたボタンのキャプションは、“PolCalib” に変化している(図14の A)。これをクリックすることで、組み込まれた PolCalib 3.0 を立ち上げることができる。最初のウィンドウには、すでに誤差モデルの散布図が転送されている(図15)。

キャリブレーションモデルを生成するアルゴリズムの詳細は Nakagawa *et al.* (2002) に譲り、本稿ではこれ以降の作業の流れのみ解説する。まず、PolCalib 3.0 のフォーム上にある “Import Vest-Vobs file” ボタン(図15の A)をクリックし、気候推定の誤差ファイル(日本の年平均気温であれば、サンプルファイル “4_Tann-EstObs.csv” がこれにあたる)を読み込む。これにより、Nakagawa *et al.* (2002) の用語に従うなら V_{est} と V_{obs} の関係を示す散布図が表示されるので、次に “Start” ボタン(図16の A)をクリックすれば、あとは全自动でキャリブレーションモデルが生成される。

[注意!]

気候推定の誤差ファイルは、復元された気候パラメータ(図14で B として示したコンボボックスで確認することができる)に応じたものを選ぶ必要がある。たとえば、前節で例としてあげた “4_Tann-EstObs.csv” ファイルは、年平均気温(Tann)のキャリブレーションにのみ適当であって、その他のパラメータのキャリブレーションモデルを生成する目的で使用してはならない。いま復元しているのが、例えば最暖月の平均気温(MTWA)であるならば、誤差推定モデルは “4_MTWA-EstObs.csv” を使用する必要がある。Polygon 1.5 のインストーラ・パッケージには Tann と MTWA に加えて、MTCO(最寒月の平均気温)、Pann(年降水量)、Psum(4~9月の降水量)、Pwin(10~3月の降水量)、Tvar(年気温較差) :

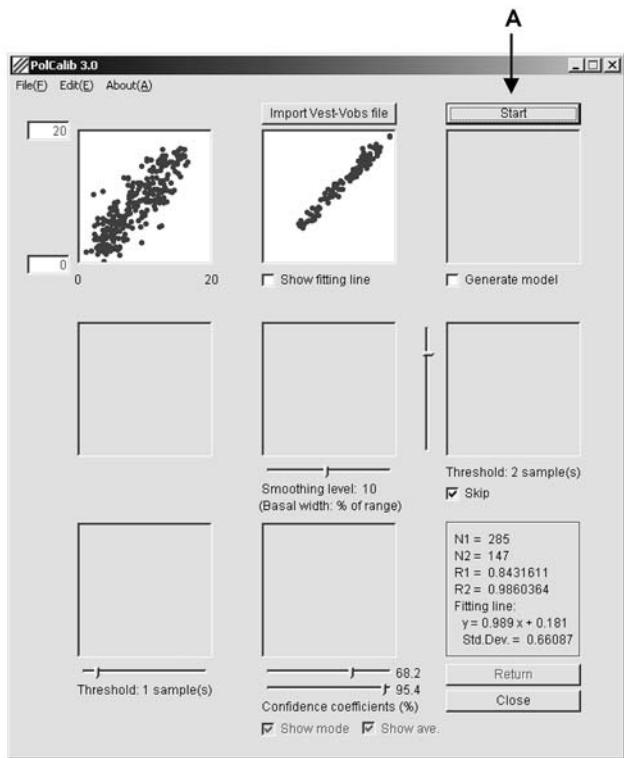


図 16 PolCalib 3.0 に気候復元誤差(左上のウィンドウ)と、表層花粉サイト(中上のウィンドウ)を読み込ませた状態

後者のファイルは、復元した気候パラメータ(図 14 の B)に応じてユーザーが選択する必要がある。

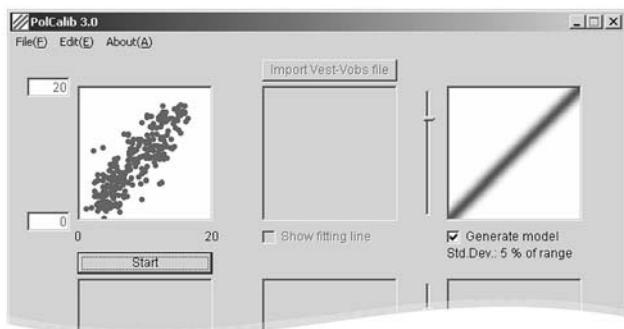


図 17 気候推定の誤差モデルに実際の値を使わず、人工的なモデルを生成した状態

MTWA—MTCO として定義), WI(暖かさの指数)の誤差推定モデルが添付されている。

[PolCalib 2.0 からの変更点]

PolCalib 3.0 には、PolCalib 2.0 にはなかった新機能がいくつか搭載されている。これらについては Nakagawa *et al.* (2002) に言及がないため、以下に解説する。

(1)もし、誤差推定モデルが入手困難であるとき(たとえば、グリッドで提供される気候データを用いて気候推定を行っており、推定誤差の評価が事実上不可能であ

るような場合がこれにあたる)、“Generate model”ボックス(図 15 の B)をチェックすることで、実際のデータに依拠しない人工的な誤差モデルを生成することができる(図 17)。この場合、モデルの傾きは常に 45 度であるが、正規分布の標準偏差はスライダーによってユーザーが設定しなくてはならない。また、インストーラ・パッケージがサポートしていない気候パラメータの復元を行う場合にも、この機能は有効である場合がある。だが、後者の場合により望ましい方法は、別に配布している

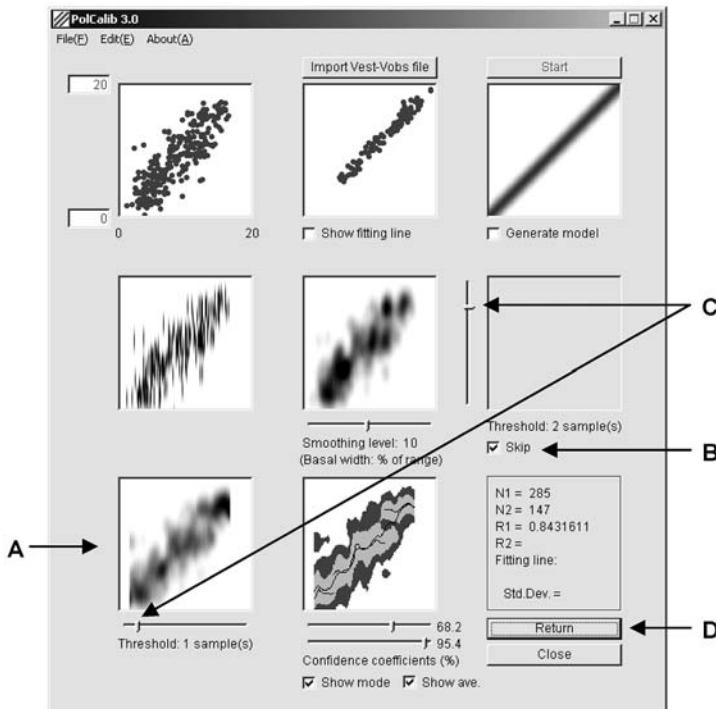


図 18 PolCalib 3.0 によってキャリブレーションモデルが生成された状態

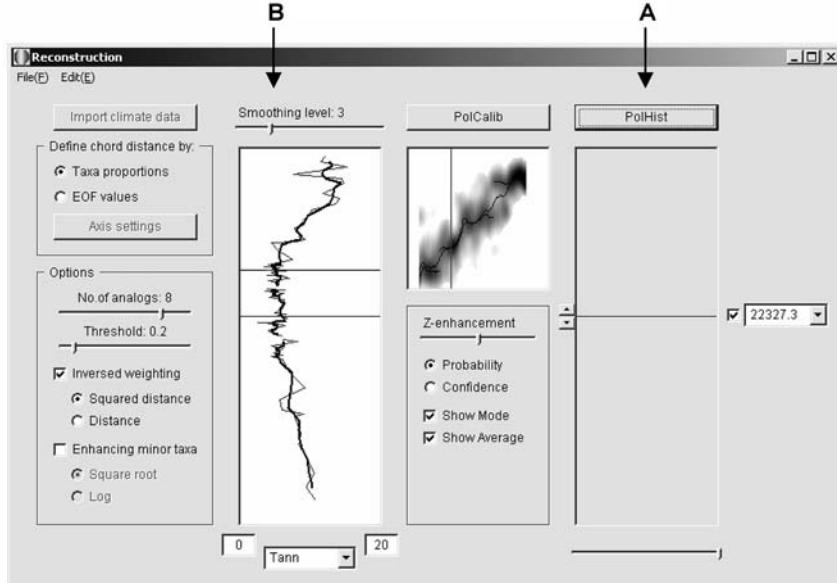


図 19 図 14における散布図が、PolCalib 3.0 の生成する誤差モデル(図 18 の A)に置き換わった状態

Polation 1.0 を用いて、表層サイトの気候推定と推定の誤差モデル生成を同時にを行うことである。Polation 1.0 には単なる気候推定のほかに、誤差検定のための Leave-one-out 法を実施する機能が備わっており、csv 形式の

出力ファイルはそのまま Polygon 1.5 で読み込むことができる。

(2) PolCalib 2.0 では、確率密度関数の標準化は縦方向に 1 回行うだけであった(図 18 の A)。PolCalib 3.0

では、この直前に水平方向の標準化を実行する選択肢が与えられている。この機能はデフォルトではオフになっているが、図18で“B”として示したチェックボックスを解除することでオンになる。数学的には、横方向の標準化を実施することで、気候帯ごとの表層サンプル密度のばらつきの効果を軽減できるはずである。ただし、キャリブレーションモデルの両端におけるゆがみは大きくなる傾向があるため、一概にどちらが良いと結論づけることはできない。使用する表層データセットが、ダイナミックレンジは大きいが分布は著しく不均一であるような場合には、横方向の標準化を行ったほうが良いだろう。反対に、ダイナミックレンジは狭いものの分布はおおむね一様であるならば、この機能の有効性よりも弊害の方が目立つ可能性が高い。いずれの場合も最善の解決

は、カバーする範囲が十分に広く、分布も一様であるような表層データセットを整備することである。

(3) キャリブレーションモデルの両端のゆがみを緩和するため、PolCalib 3.0では、キャリブレーションモデルがごく少数の点からなっているような部分については、モデル生成を不当とみなして拒否させることができる。いくつ以上の点を含めば可とするかの設定は、図18にCで示したスライダーで変更できる。

(4) PolCalib 3.0は、確率密度がある程度より小さい値をとる領域は空白で表現する。PolCalib 2.0では、この値は任意に設定することができたが、しきい値の数学的な意味は希薄であった。PolCalib 3.0では、最終的に生成されるキャリブレーションモデル(図18のA)については、しきい値を一律に適用するのではなく、ユー

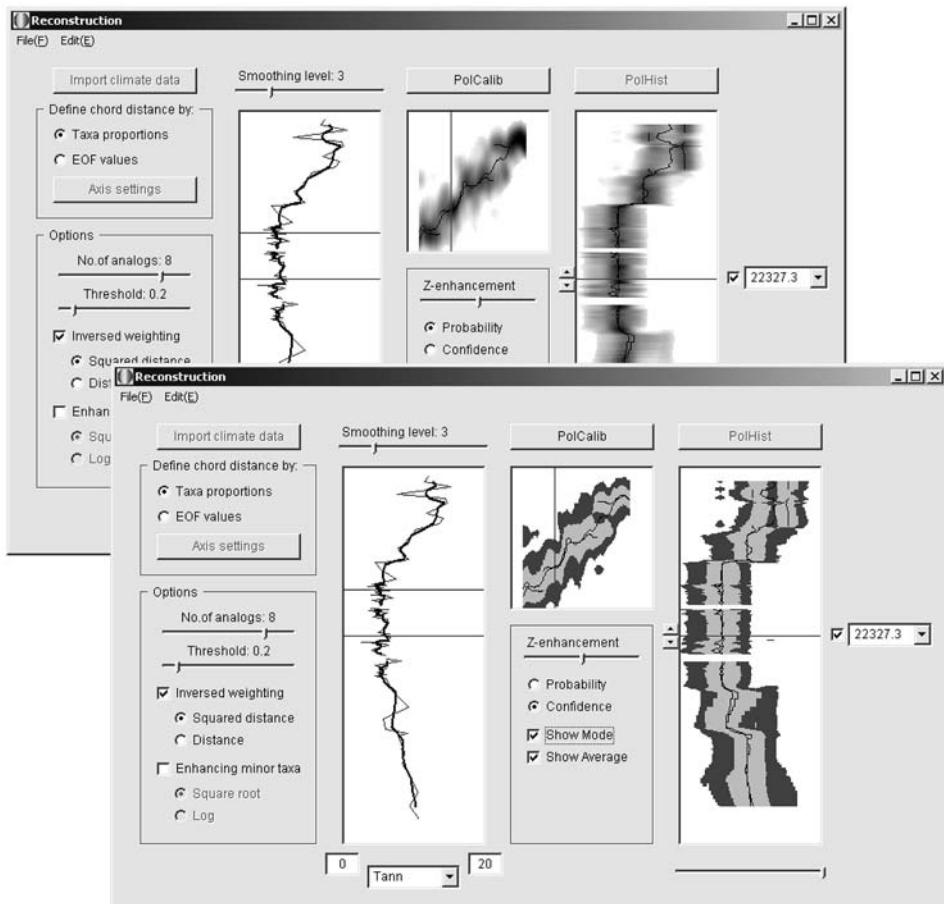


図 20 キャリブレーションが完了した状態

結果は確率密度関数(上)と信頼区間(下)のいずれかで表示させることができる。ここでは、確率密度関数のモードと平均値も実線で表示している。

ユーザーが定める信頼区間の中でのみ確率をカラーで表現し、信頼区間の外は空白のまま残すように設計されている。確率密度が小さくても、全域を塗りつぶしたい場合には、信頼区間を100%に設定すればよい。なお、ここで設定した色分けの基準は、この後のステップにもそのまま踏襲される。

4. 気候復元結果のキャリブレーション

(1) キャリブレーションの概要

PolCalib 3.0 で生成したキャリブレーションモデルは、“Return”ボタン(図18のD)を押すことでPolygon 1.5 に戻される。キャリブレーションの実行は、Nakagawa *et al.* (2002) では独立のソフト(PolHist 2.0)で行っていたが、Polygon 1.5 には PolHist のアップデート版(PolHist 2.5)が組み込まれている。ユーザーは “PolHist”ボタン(図19のA)をクリックするだけで、キャリブレーションをシームレスに実行することができる。キャリブレーションの結果は、Polygon 1.5 の他のすべての図と同様に、クリップボード上にビットマップイメージとして取り込むか、あるいは csv ファイルとして出力することで保存が可能である。図の書式は確率密度に応じたグラデーションか、信頼区間のどちらかを選

ぶ(図20)。また、確率密度関数のモードと平均値のそれぞれについて、表示・非表示をチェックボックスを用いて切り替えることができる。

(2) どの値をキャリブレートしているのか(重要)

キャリブレーションは生の復元結果(青の折れ線)ではなく、移動平均でスムージングした結果(赤の折れ線)に対して実施される。生の結果をキャリブレートするには、グラフの上のスライダー(図19のB)を用いて、移動平均を算出する層準数を1に設定すればスムージングは解除される。

(3) 出力図のサイズの変更

出力図の横幅は、フォーム下のスライダー(図21のA)で変更することができる。図の高さは、フォームのエッジ(図21のB)をドラッグし、フォームの高さ 자체を変更することで連動して伸縮する。マウスの右ボタンで図をクリップボードに取り込む場合、取り込まれる画像はその時の図のサイズを反映したものになる。

VI. ユーザーサポート

Polygon 1.5 と Polation 1.0 の使用方法、およびモダンアナログ法そのものに関する問い合わせは、筆者

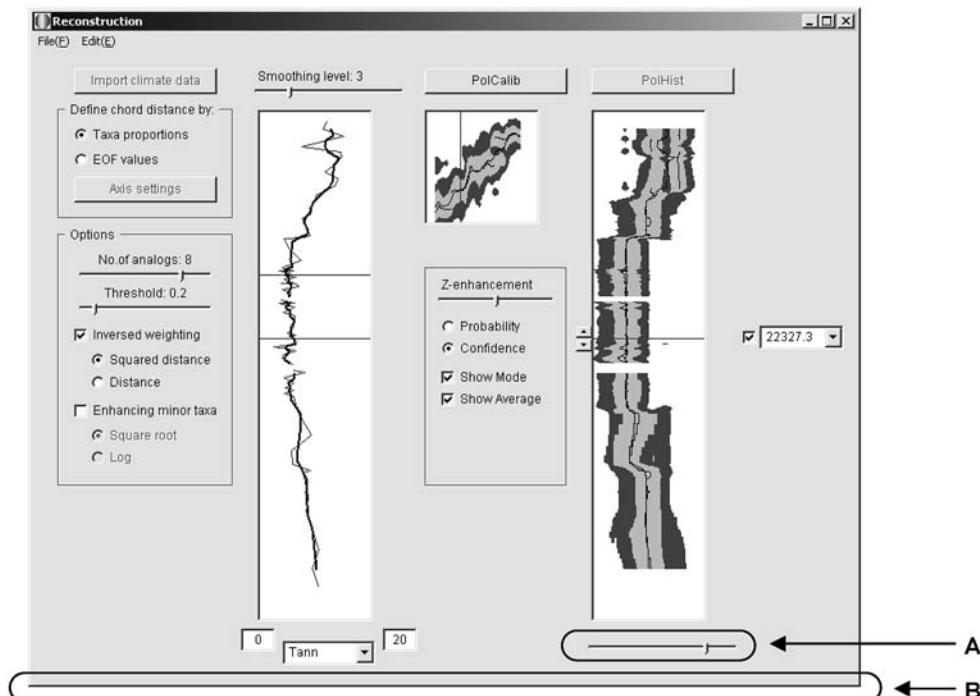


図 21 出力図のサイズ変更

(E-mail : takeshi.nakagawa@newcastle.ac.uk) が直接受け付けている。¹⁾

謝辞 当時モスクワ大学、現ベルリン自由大学の Pavel E. Tarasov 博士による、書き尽くすことのできない献身的な助けがなかったならば、筆者が定量的気候復元の手法を身につける機会は永遠に失われていたであろう。記して、心からの感謝を申し上げる。また鹿児島大学の西田 詩氏と、NTT データの赤羽善治氏の協力がなかったなら、遠い昔の数学の記憶を呼び起こすことも、プログラミングの世界に足を踏み入れることも不可能だったはずである。記して感謝を申し上げる。なおプログラミングの詳細については、Yahoo! Japan コミュニティーのメンバー諸氏にお世話になることが多かった。匿名の方々ばかりであったが、同様に記して感謝を申し上げたい。京都府立大学の高原 光教授と立正大学の米林 伸教授からは、原稿に対して非常に多くの有益な助言をいただいた。末筆であるが、記して感謝を申し上げる。

引 用 文 献

Gotanda, K., Nakagawa, T., Tarasov, P.E., Kitagawa, J., Inoue, Y. and Yasuda, Y. (2002) Biome classification from Japanese pollen data : Application to modern-day and Late Quaternary samples. *Quaternary Science Reviews*, 21, 647–657.

- Guiot, J. (1990) Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 80, 49–69.
- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K., Sawai, Y. and Yangtze River Civilization Program Members (2003) Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the Last Termination. *Science*, 299, 688–691.
- Nakagawa, T., Tarasov, P., Kitagawa, H., Yasuda, Y. and Gotanda, K. (2006) Seasonally specific responses of the East Asian monsoon to deglacial climate changes. *Geology*, 34, 521–524.
- Nakagawa, T., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002) Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan : Application to surface and Late Quaternary spectra. *Quaternary Science Reviews*, 21, 2099–2113.
- Tarasov, P., Bezrukova, E., Karabanov, E., Nakagawa, T., Wagner, M., Kulagina, N., Letunova, P., Abzaeva, A., Granoszewski, W. and Riedel, F. (2007) Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252, 440–457.

1) 本講座の受理後、2008年9月11日の時点で、記述の変更を必要とするようなソフトの仕様変更などは行われていない。
Takeshi Nakagawa : Polygon 1.5, a user-friendly computer programme for climate reconstruction using modern analogues technique.

Keywords : Polygon, quantitative climate reconstruction, modern analogues technique, pollen analysis, diatom analysis