

化石人類の脳：ネアンデルタール人と早期現代型新人の頭蓋エンドキャスト復元

近藤 修* 福本 敬* 藤森 智行** 菱田 寛之** 鈴木 宏正** 赤澤 威***

*東京大学大学院理学系研究科

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

**東京大学先端科学技術研究センター

〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1

***高知工科大学総合研究所

〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口185

E-mail: ***akazawa.takeru@kochi-tech.ac.jp

要約：化石人類の脳研究はエンドキャスト（脳の鋳型）の復元から始まる。したがって化石人類の脳を十分に把握するには、1：正確なエンドキャストの復元、と2：現生人類の脳機能地図情報を化石人類へ外挿する方法が必要となる。我々はアムッド1号ネアンデルタール人とカフゼー9号早期現代型新人の頭蓋CTデータより、3次元エンドキャストモデルを作成した。この2個体のレバント地方化石人骨の頭蓋内腔形態を数量化する手始めとして、前頭葉の非対称性、とくにブローカ領域の非対称性を評価した。これまでのアムッド1号エンドキャストによる観察・記載とは観点が異なるが、計測結果として右側のブローカ領域のほうが左側のブローカ領域よりも正中矢状面より離れていた。この左右差は正中矢状面の設定による誤差を勘案した上で評価された。化石頭蓋エンドキャストにおける正中矢状面は正中部の解剖学的特徴点を通るものとして定義されるが、2個体の現代人MRIデータより得た脳構造に基づく正中矢状面と頭蓋骨構造に基づくそれとの差は比較的大きく、左右差を評価するに当たって無視できない。

Abstract : The research for fossil hominid brains starts from the reconstructed endocasts. Thus reasonable understanding of fossil hominid brains needs; 1: correct endocast reconstruction, and 2: the way to extrapolate information of living human brain maps to the fossils. We made 3D endocast models of Amud 1 Neanderthal and Qafzeh 9 early modern *Homo sapiens* using image analysis techniques on CT data of the fossil cranium. As a first step to quantify the endocranial shapes of these two Levantine fossils, we assessed the asymmetry of the frontal lobes, especially in the Broca's cap region. Contrary to the previous observation for the Amud 1 endocast, the right Broca's cap portion was more distant from the midplane than that in the left.

The degree of difference should be assessed after quantification of the errors due to the mid-plane positions. Based on two modern human MRI data, we detected a moderate deviation between the mid-sagittal planes, one defined in the brain structure and the other in the landmarks on the cranial bones, thus, indicating that the mid-plane deriving errors should not be negligible in assessment of the asymmetry of fossil endocasts.

1 はじめに

人類進化研究のなかで脳の進化の持つ意味は大きい。それはヒトが進化とともに獲得した文化・行動・コミュニケーションなどが脳の高次機能と密接に関連しており、これらの獲得には何らかの脳の解剖学的構造の改変がかかわっているだろうと予想されるからである。したがって、ヒトの進化に伴う脳構造の変化に興味を持たれるが、神経連絡などの組織学的ミクロレベルの構造変化は化石記録では追跡できない。よりマクロな解剖学的構造を化石頭蓋の脳鋳型(エンドキャスト)より類推することになる。個体発生のレベルでは脳の形と頭蓋の形は密接に結びついている(1,2)ので、これを種間関係あるいは系統間のグループに拡張することはある程度可能であろう。

化石脳の研究は頭蓋やエンドキャストを用いた脳容量の推定が中心課題であったが、一方で、動静脈の走行パターン(3)や左右の非対称性(4)、特定の溝や回転の記載(3)もおこなわれてきた。現代脳科学における脳機能マッピングの情報を化石人類に応用するには、脳の大きさや全体の形だけではなく、前頭葉・側頭葉の位置やより細かい溝や回転の同定が必要であるが、一般にエンドキャストから溝や回転を知ることは困難である。現状では、エンドキャストの3次元形状の分析(5)や大脳と小脳のプロポーシヨンの分析(6)が見られるのみである。

定量的・定性的アプローチの如何にかかわらず、研究対象は化石頭蓋、あるいは作成されたエンドキャストである。したがって正確なエンドキャストの作成・復元が重要であり、本来力点を置くべき点であるが、これまではあまり注

目されてこなかった。それは実物の化石資料にたいしマニュアルで進められる復元作業が繰り返しの利かないものであり、正確なエンドキャストの作成には作業の熟練が唯一の方法であったという事情がある。

最近になってCTスキャンデータより3次元データを作成し、それを用いた仮想復元の手法が古人類学にも応用されるようになってきた(7,8)。これにより実物の化石標本を傷めることなく試行実験が可能となり、頭蓋内に取り残されたマトリックスの除去(9)、化石頭蓋の歪み補正(10,11)に加え、CTデータを用いたエンドキャスト作成(12)も試みられている。

今回我々は、西アジアレバント地方の化石人類より、アムッド1号とカフゼー9号の頭蓋CT断層撮影データを入手し、これよりエンドキャストの作成をおこなった。さらには前頭葉、ブローカ領域の左右非対称性を探る目的の端緒として、正中矢状断面の設定による誤差の検討をおこなった。

2 資料と方法

2-1 アムッド1号とカフゼー9号

対象とする化石頭蓋は西アジア、イスラエルの中期旧石器洞窟遺跡より発掘されたアムッド1号とカフゼー9号である。アムッド1号は1961年に東京大学西アジア調査団が発掘した成人男性骨格であり、典型的(ヨーロッパの)ネアンデルタールによく似る一方、現代人につながる新しい形態特徴をもつ“進歩型ネアンデルタール”とされている(13)。カフゼー9号は1969年にフランス調査隊が発掘した成人女性(性別については反論もある)骨格であり、早期現代型

新人 (early modern *Homo sapiens*) とされている (14)。このレバント地域には中期旧石器を伴うおよそ 10 万年から 5 万年前にかけて、これら 2 つのタイプの人類が同時に、あるいは前後して棲んでいたようである。これ以降、ホモサピエンスはユーラシア大陸に拡散していき、一方のネアンデルタールはおそらく絶滅したというシナリオが描かれている。

アムッド 1 号頭蓋からは既にエンドキャストが作成されており、小川らによって記載され、脳容量が 1750cc と推定されている (15)。カフゼー 9 号頭蓋ではエンドキャストは作られていない。

2-2 CT 断層撮影データによる頭蓋とエンドキャスト 3 次元モデルの作成

化石人骨の頭蓋 CT 断層撮影データは別の研究プロジェクトにおいて過去に医療用の CT 装置により撮られたものであり、DICOM 形式でデータが保存されている。

アムッド 1 号頭蓋の CT データは 1 断面画像が 512x512 ピクセル、192mmFOV、1 mm スライス厚であり、平面解像度は 0.375mm/ピクセルとなる。

オリジナルのアムッド 1 号頭蓋はその欠損部分が石膏あるいは漆喰によって補填されており、3 次元モデル作成にあたり骨と補充剤の部分を区別する必要があった。しかしながら、補充剤の CT 値と骨部の CT 値には重なりがあり単一の閾値ではうまく分離できない。CT 値分布の観察の結果、多くの骨部では CT 値が高く (800 以上) 補充部では CT 値が低い (700 以下) もの、補充部の中に局所的に CT 値の高い部分が散在していることがわかった。おそらく漆喰などが十分に攪拌されないためにダマが生じ、高密度になったと思われる。以下、補充部に残るダマの除去と閾値以下となる骨部 (海綿質) の復元を計算機上でおこなうためのプログラムを作成した (Appendix を参照)。

カフゼー 9 号頭蓋の CT データは 1 断面画像が

512x512 ピクセル、208mmFOV、0.5mm スライス厚であり、平面解像度は 0.40625mm/ピクセルとなる。

双方の化石頭蓋の CT データを MacOS X 用の医療画像ソフト OsiriX に読み込んだ後、3D サーフェスレンダリング機能と STL 形式でのメッシュデータ保存機能を用いて、頭蓋 3 次元モデルを作成した (図 1)。

エンドキャスト 3 次元モデルは上記 STL 形式の頭蓋モデルを 3 次元形状処理ソフト RapidForm に読み込んでおこなった。頭蓋モデルのポリゴン数が 200 万を超えるため、データを左右に分割し、作業を行いやすくした。エンドキャストモデルでは頭蓋の内面のみのデータが必要である。頭蓋の内面と破断面との境界、動静脈の圧痕との区別はコンピュータには難しく、結局、ソフト上の塗りつぶし選択機能を用いて手作業ですべての面を選択した。その後、すべてのポリゴンの法線を反転させることにより、表裏を逆転させ、エンドキャストモデルとした (図 2)。

2-3 ブローカ領域における左右アシンメトリーの評価

脳の左右非対称性 (アシンメトリー) は、解剖構造的な面からも、機能・行動学的面からも明らかになってきており、両者の結びつきが強く示唆されている (16)。したがって、化石人類のエンドキャストの左右非対称性を計測することによって、脳のアシンメトリー、ひいてはその機能・行動における左右差についても何らかの手がかりが得られるかもしれない。

アシンメトリーを計量的に評価する方法の 1 つとして正中矢状断面を基準面として左右の非対称性を測るということが考えられる。脳、あるいはエンドキャストのように左右構造間で明確な相同点が定義されにくい場合に有効である。しかしこの場合、正中面の設定基準によって生じる誤差を見積もる必要がある。化石頭蓋はおよそ大なり小なり変形して歪んでいることが多

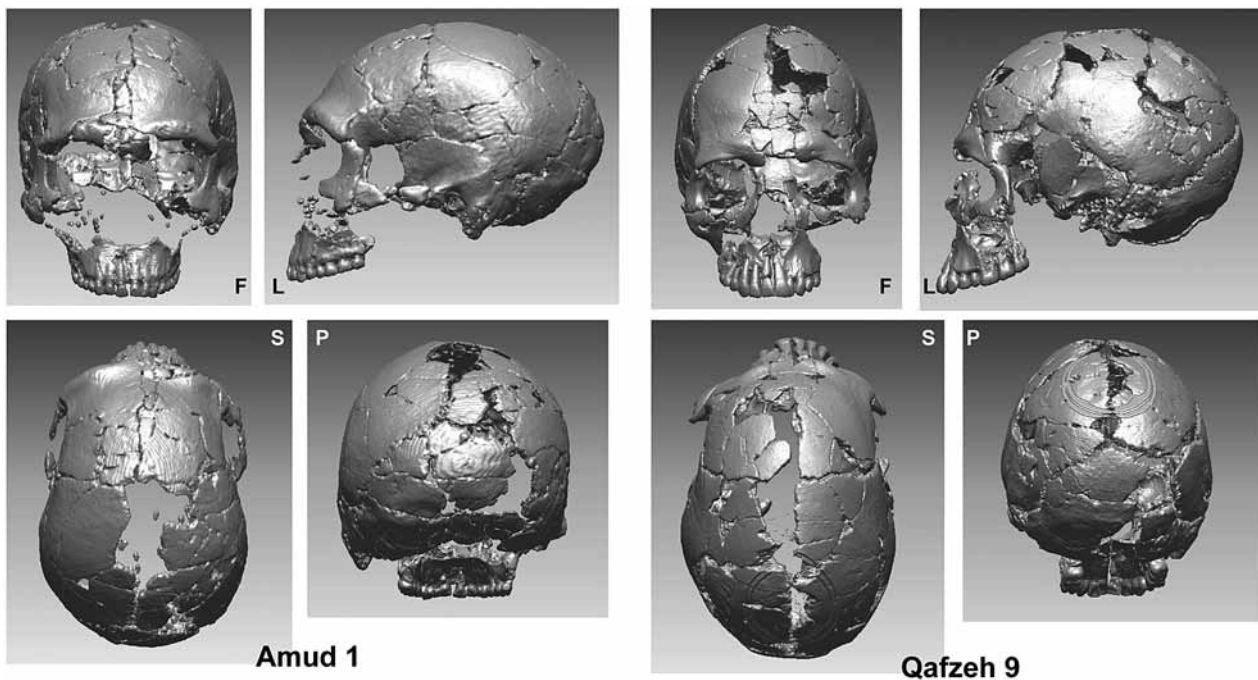


図1. アムッド1号(左)とカフゼー9号(右)の頭蓋モデル。それぞれ左上から時計回りに、前面観(F)、左側面観(L)、後面観(P)、上面観(S)

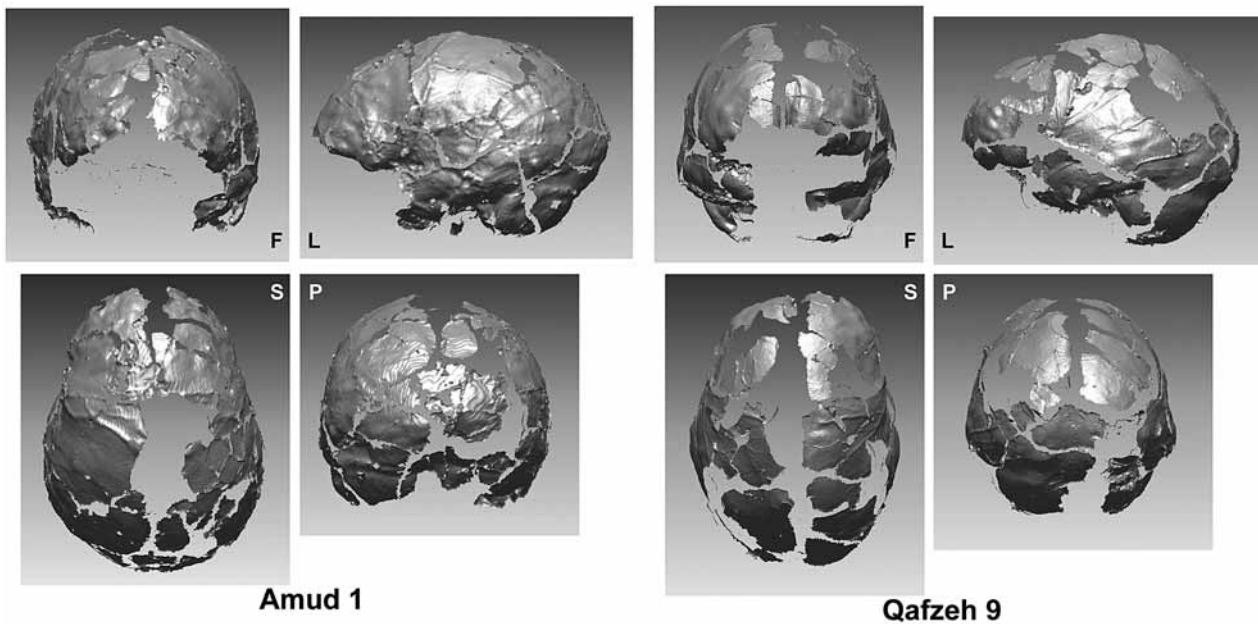


図2. アムッド1号(左)とカフゼー9号(右)のエンドキャスト(脳鑄型)モデル。それぞれ左上から時計回りに、前面観(F)、左側面観(L)、後面観(P)、上面観(S)

いし、正中面を設定する情報は頭蓋の解剖学的特徴点に頼らざるを得ない。したがって必然的に誤差は増大する傾向にある。

今回、我々は、アムッド1号とカフゼー9号の頭蓋CTデータよりとくに前頭葉のブローカ領域相当部位における左右差の評価を試み、同時に正中面設定における誤差を検討した。より具体的には、両化石頭蓋の残存する解剖学的特徴点より正中矢状面を設定し、左右のブローカ領域へのキョリを計測した。ここから得られた左右差と、正中矢状断面の設定基準による誤差を比較した。

化石頭蓋での正中矢状面の設定は、アムッド1号に対してはナジオン、プロスチオン（切歯孔）、ラムダの3点を、カフゼー9号に対してはプロスチオン、前頭稜（盲孔）、ブレグマ、ラムダの4点を参考に設定した（図3）。プロスチオンと切歯孔、前頭稜と盲孔はそれぞれ位置が近いので1つのセットとして考えた。上記解剖学的特徴点の中では前頭稜、盲孔、ナジオン、プロスチオン、切歯孔はかなり正中断面の基準としてふさわしいが、頭蓋縫合上の2点（ブレグ

マ、ラムダ）は正中断面からのズレが比較的大きいと予想される。

上記位置に正中矢状面を設定し、全CTデータを再配置したのち、この正中面より前頭葉ブローカ領域に相当する部位までのキョリを左右それぞれ複数箇所計測し、さらに左右差を求めた。距離の計測点は正中矢状面に対する法線上のCT値数列より、頭蓋内面に当たる箇所を half-maximum height 法により決定した（図4）。

一方、正中矢状断面の設定誤差は現代人MRIデータより算出した。2個体の現代人頭部MRIデータに対し、脳の内部構造をもとにそれぞれ正中矢状面を設定し、データを再配置した後、頭蓋上の特徴点としてナジオン、ブレグマ、ラムダを同定し、正中面からのキョリを計測した。MRIデータでは骨部は黒く抜けてしまうが、周囲の骨膜、脳硬膜や繊維性結合組織などの軟部組織により縫合の位置はある程度同定可能である。それぞれの個体につき3点を2回ずつ計測することとしたが、第1個体ではブレグマの同定時に候補となる2箇所を計測し合計3回、第2個体ではラムダの位置が撮影範囲から外れて

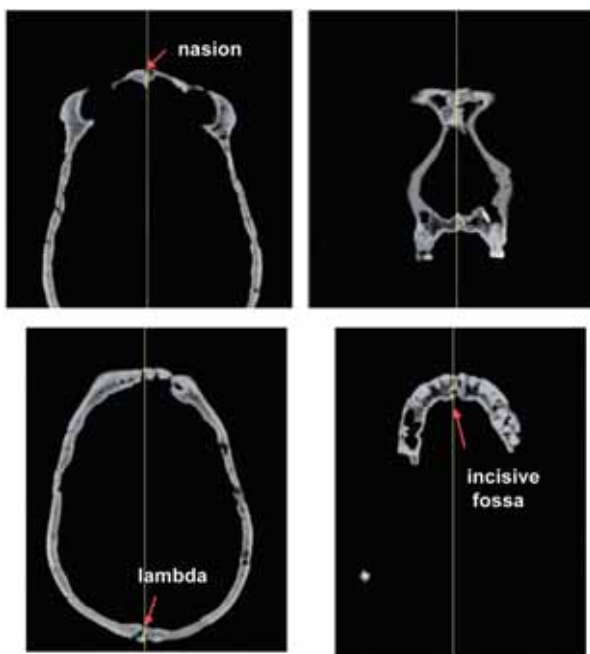


図3. アムッド1号頭蓋に対する正中矢状面の設定。

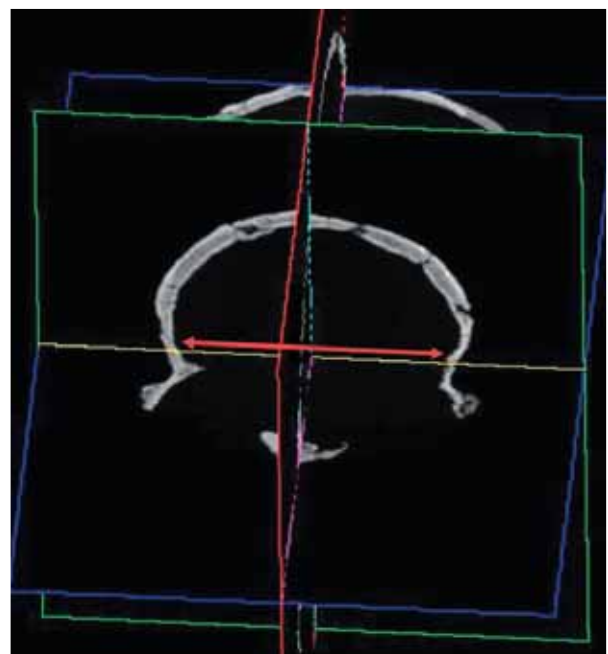


図4. 正中矢状断面から左右の頭蓋内壁までの距離計測。CT画像は直行する3平面(赤：矢状面、緑：前頭面、青：水平面)に投影される。

いたためここでの計測はできなかった。

以上の化石頭蓋 CT、現代人 MRI データ分析は医療画像分析ソフト Analyze を用いた。

3 結果

アムッド1号とカフゼー9号の頭蓋エンドキャストの3次元データは図2に示したとおりである。頭蓋の内面が保存されている部分のみが表示されている。アムッド1号は左半が、カフゼー9号は右半がより保存されているのがわかる。

全体の形は頭蓋の形をよく反映している。すなわち、アムッド1号のエンドキャストは前後に長く上下に低い。比べてカフゼー9号では上下に高い。アムッド1号では側面観で後頭極あたりの強い屈曲が観察される。これはネアンデルタールで広く見られる occipital bunning (後頭髻) と関係するが、アムッド1号はネアンデルタールの中ではこの occipital bunning の発達は弱いとされている。カフゼー9号の頭蓋表面形態観察では occipital bunning は見られないが、復元されたエンドキャストでは後頭極における屈曲が比較的強く見られる。これは横洞溝(transverse sinus) による圧痕が影響していると思われる。前頭部の立ち上がりはカフゼー9号のほうが強く膨隆するように見えるが、アムッド1号は前頭極の部分が欠けているので注意を要する。上面観ではアムッド1号は前頭部が前に狭く、側頭、頭頂部が丸く大きく膨らんでいる。カフゼー9号では前頭部はより丸く大きいものの、頭頂・側頭部の全体的ふくらみはアムッド1号より弱く、側頭部の一部が外側に膨らむ。左側のふくらみは復元の誤差や変形等の影響が考えられるが、右側もおおよそ同様のふくらみが見られるので、この個体の特徴かもしれない。

頭蓋 CT データによるブローカ領域相当部位の左右差は表1に結果を示した。全体で11回の計測結果である。左右差(diff)の値は左から右を引いているので正値が左側大、負値が右側大を示す。アムッド1号ではすべての計測で diff が負

値、すなわち右側が大きく、平均値で2.5mmの差を示した。一方、カフゼー9号では負値が4、正値が7、平均値で約1mm左側が大きいことを示している。

この結果はさまざまな誤差要因を勘案してはじめてある程度の意味をなすといえる。そのうち、今回は基準となる正中矢状断面の設定誤差を考えた。化石人類の左右差の計測では頭蓋上の解剖学的特徴点を用いて正中矢状面を設定しているので、この特徴点が本来の(正中)位置からずれている場合に誤差は拡大する。ここでは現代人頭部 MRI データにおいて脳内部構造より決定した正中矢状面に対し頭蓋上の特徴点がどれほど偏倚しているかを計測した。表2に現代人頭部 MRI データによる計測結果を示す。

現代人1では誤差が1.5mmから3mm、現代人2では0mmから2mm生じている。すべての試行を平均すると誤差は1.86mmとなった。2個体のみのものであるので個体差がどの程度あるのかは今後の資料数増加を待たねばならないが、ナジオン、ブレグマ、ラムダなどの頭蓋上の特徴点を用いた場合、1~2mm程度の誤差は生じることが予想される。

この結果から、今回試みた化石頭蓋のエンドキャスト前頭部の左右差を見てみよう。アムッド1号では2.5mmほど右が大きくカフゼー9号では1mmほど左が大きいという結果は、おおよそ1~2mm程度の誤差に比べ大きな差がこの2個体の化石人骨の左右差のパターンとして存在することを予想させる。今後さらに、正中矢状面の設定方法を工夫し、その誤差についてデータを充実させていく必要があるだろう。さらには、他の誤差要因、とくに化石頭蓋の歪みや復元のズレについて、具体的な検証をあわせて行う必要がある。

4 考察

アムッド1号にはすでに作成されたエンドキャストがあり、小川ら(15)とHollowayら(17)に

表1. アムッド1号とカフゼー9号の前頭部ブローカ領域相当部位の左右差（正中矢状面からの距離）。（diff = left - right, 単位 mm）

Amud 1			Qafzeh 9		
left	right	diff	left	right	diff
47.5	50	-2.5	51	48.5	2.5
51	52.5	-1.5	53	50	3
51.5	54.5	-3	53.5	50	3.5
51.5	55	-3.5	53.5	50	3.5
48	50.5	-2.5	51	47.5	3.5
49.5	51	-1.5	50	48.5	1.5
50	52.5	-2.5	49.5	47.5	2
50	53	-3	47	49.5	-2.5
45.5	48.5	-3	48	50.5	-2.5
47	50	-3	48.5	50	-1.5
48	49	-1	48	49.5	-1.5
mean		-2.454545	mean		1.045455

表2. 現代人2個体における正中矢状断面設定の誤差。正中矢状断面と頭蓋表面の特徴点（n:ナジオン、b:プレグマ、l:ラムダ）との距離。

	計測ポイント	誤差(mm)
現代人1	n1	1.5
	n2	2
	b1	3
	b2	3
	b3	2.5
	l1	2
	l2	3
	現代人2	n1
n2		0.5
b1		1
b2		2
mean		1.863636

よって記載されている。全体形状に関しては今回の観察結果とおおよそ一致を見るが、左右差として Holloway らは“明瞭な幅と長さの左後頭 petalia と幅の右前頭 petalia”が存在すること、さらに“左ブローカ領域 (Broca’s cap region) は大きく外側に突出する”と述べ、右利きの可能性と現代人と同等の認知能力を持っていた可能性がある」と推測している (17)。

脳やエンドキャストの左右 petalia を評価するには正中矢状断面の設定が必要である。今回2個体の現代人で観察した脳構造における正中矢状面と頭蓋形態特徴から求める正中矢状面に生じた誤差はここでも考慮すべきであろう。すでに現代人的な petalia のパターンを示すと考えられているアムッド1号エンドキャストの左右アシンメトリーもこの点から再評価の対象となる。

今回の結果で注目すべき点は、前頭部ブローカ領域相当部位における左右アシンメトリーの評価である。この領域が言語の獲得、特に発話機能と関連があるとされているからである。通常右利き手の人は脳の言語野は左にあるといわれ、聴覚言語野であるウェルニッケ野、運動言

語野とされるブローカ野ともその占める脳の部位が右側より左側のほうが広く大きいという(16)。したがってこれらの領域の定量化がエンドキャスト上で可能となれば、人類進化における言語機能の獲得に具体的なデータを与えることができる。

既存の化石人類エンドキャスト研究においても、この部位(前後に浅い溝により丘状のふくらみを持つため Broca's cap と呼ばれる)は注目されてきたが、客観的な定量化はいまだ行われていない。記載・観察データによると現代人的な左優位パターンはすでにインドネシアの *Homo erectus* である Sambungmacan 3 にみられ(18)、おそらく180万年前のアフリカの *Homo habilis* (KNM-ER 1470) にまでさかのぼれるという(17)。

今回の化石頭蓋における評価は正中からの距離を計測しておりブローカ野の面積を測っているわけではないので、厳密な意味で上記 Holloway が述べているこの領域のアシンメトリーとは異なっている。今回の計測はどちらかというところ正中面からの幅に関する petalia のパターンを示しているのかも知れない。化石頭蓋や、そのエンドキャストでは脳の組織学的な情報は復元不能であるので、厳密に領野を定義することはできない。しかしながらブローカ野に関してはその占める面積が左有意であると同時に特にブロードマン 45、47 野の Broca's cap は外側下方への突出が強くなっていることが特徴である。今後、この領域特異的な突出程度を数量化することを考えるべきであろう。もしそれが正中矢状面の定義を必要としないものであればさらに望ましい。

現生種の脳、とくにヒトの脳については、組織構造、MRI をもちいた 3 次元解剖構造、fMRI、PET を用いた 3 次元機能画像、脳機能障害患者の臨床データなどが、一定の基準テンプレートの下に集積され、3 次元的な確率マップが提示されている(19)。そこでは、解剖学構造を含めさまざまな観点でのアシンメトリーについても

3 次元マップが可能である(16)。今後、これらの情報を化石人類の脳エンドキャストへ外挿する方法を確立することが重要であろう。そのためには、現代人の脳構造と頭蓋エンドキャスト、あるいは頭蓋表面形態との関係、変異を調査していく必要がある。

謝辞

アムッド 1 号、カフゼー 9 号の頭蓋 CT データはイスラエル、テルアビブ大学の Yoel Rak 博士とスイス、チューリッヒ大学の Zollikofer 博士、Ponce de Leon 博士らに共同所有権があるものを新たに研究上の使用契約を交わした上で使用させていただいた。現代人 2 名の MRI データは自然科学研究機構生理学研究所の定藤規弘博士よりいただいた。ここに感謝申し上げます。

本稿は学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(S))「西アジア死海地溝帯におけるネアンデルタールと現生人類交替劇の総合的解明」(課題番号:17102002 研究代表者・赤澤威)“および私立大学学術研究高度化推進事業・学術フロンティア推進事業「博物資源工学に基づく脳と知の共進化に関する実証的研究(研究代表者・赤澤威)”による成果の一部である。

引用文献

- (1) Moss, M.L. and Young, R.W., “A functional approach to craniology,” *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 18, pp.281-291, 1960.
- (2) Enlow, D.H., *Facial Growth*, 3rd ed., W.B. Saunders Company, Philadelphia, 2005.
- (3) Grimaud-Hervé, D., *L'évolution de l'encéphale chez Homo erectus et Homo sapiens*, CNRS Editions, Paris, 1997.
- (4) Le May, M., “Morphological cerebral asymmetries of modern man, fossil man, and nonhuman primates,” *Ann. NY Acad. Sci.*, vol. 280, pp.349-366, 1976.
- (5) Bruner, E. “Geometric morphometrics and pal-

- eoneurology: brain shape evolution in the genus *Homo*,” *J. Hum. Evol.*, vol. 47, pp.279-303, 2004.
- (6) Weaver, A.H. “Reciprocal evolution of the cerebellum and neocortex in fossil humans,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol.102, pp.3576-3580, 2005.
- (7) Zollikofer, C.P.E., Ponce de León, M.S. and Martin, R.D., “Computer-assisted Paleoanthropology,” *Evol. Anthropol.*, vol. 6, pp.41-54, 1998.
- (8) Zollikofer, C.P.E., Ponce de León, M.S., Kondo, O., Ishida, H., Suzuki, H., Kobayashi, Y., Tsuchiya, K. and Akazawa T., “Computer-assisted reconstruction of the Dederiyeh Neanderthal infants. I : cranium and mandible,” *Recent Advances in Anthropology and Primatology, Proceedings of the 55th annual meeting of the Anthropological Society of Nippon and the 17th annual meeting of the Primate Society of Japan*. Kinsei-sha Co., Kyoto, pp.35-40, 2002.
- (9) Prossinger, H., Seidler, H., Wicke, L., Weaver, D., Recheis, W., Stringer, C. and Muller, G.B., “Electronic removal of encrustations inside the Steinheim cranium reveals paranasal sinus features and deformations, and provides a revised endocranial volume estimate,” *Anat. Rec.*, vol. 273B, pp.132-142, 2003.
- (10) Zollikofer, C.P.E., Ponce de León, M.S., Esteves, F., Tecelao Silva, F. and Pacheco Dias, R. “The computer-assisted reconstruction of the skull,” *Portrait of the Artist as a Child*, Zilhao, J. and Trinkaus, E. eds. Instituto Portugues de Arqueologia, pp. 326-341, 2002.
- (11) Ogihara, N., Nakatsukasa, M., Nakano, Y. and Ishida, H. “Computerized restoration of Non-homogeneous deformation of a fossil cranium based on bilateral symmetry,” *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 130, pp.1-9, 2006.
- (12) Schoenemann, P.T., Gee, J., Avants, B., Holloway, R.L., Monge, J. and Lewis, J. “Validation of plaster endocast morphology through 3D CT image analysis,” *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 132, pp.183-192, 2007.
- (13) Suzuki, H. and Takai, F., *The Amud Man and his Cave Site*, The Univ. Tokyo Press, Tokyo, 1970.
- (14) Vandermeersch, B., *Les Hommes Fossiles de Qafzeh (Israël)*, CNRS Editions, Paris, 1981.
- (15) Ogawa, T., Kamiya, T., Sakai, S. and Hosokawa, H., “Some observations on the endocranial cast of the Amud man,” Suzuki, H. and Takai, F. eds., *The Amud Man and his Cave Site*, The Univ. Tokyo Press, Tokyo, pp.407-420, 1970.
- (16) Toga, A.W. and Thompson, P.M., “Mapping brain asymmetry,” *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 4, pp.37-48, 2003.
- (17) Holloway, R.L., Broadfield, D.C. and Yuan, M.S., *The Human Fossil Record. vol. 3. Brain Endocasts-- The Paleoneurological Evidence*, Wiley-Liss, New Jersey, 2004.
- (18) Broadfield, D.C., Holloway, R.L., Mowbray, K., Silvers, A., Yuan, M.S. and Marquez, S. “Endocast of Sambungmacan 3 (Sm 3): a new *Homo erectus* from Indonesia,” *Anat. Rec.*, vol. 262, pp.369-379, 2001.
- (19) Mazziotta, J., Toga, A., Evans, A., Fox, P., Lancaster, J., Zilles, K., Wood, R., Paus, T., Simpson, G., Pike, B., Holmes, C., Collins, L., Thompson, P., MacDonald, D., Iacoboni, M., Schormann, T., Amunts, K., Palomero-Gallagher, N., Geyer, S., Parsons, L., Narr, K., Kabani, N., Le Goualher, G., Boomsma, D., Cannon, T., Kawashima, R. and Mazoyer, B., “A probabilistic atlas and reference system for the human brain: International Consortium for Brain Mapping (ICBM),” *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, vol.356, pp.1293-1322, 2001.

Appendix

アムッド1号頭蓋における充填部の除去と海面質部復元のためのプログラムの流れを以下に示す。位置 (i,j,k) にあるボクセルのCT値を $V(i,j,k)$ で表すことにする。

A1 閾値 θ の設定

以下の実験では $\theta = 750$ とした。このことによりCT値が θ 以下の部分のCT値を全て $-\infty$ にする。

A2 孤立群の定義 (ダマの除去)

CT値が θ 以上のボクセルからなる6連結な領域を $C(x,y,z)$ とする。 $\# C(x,y,z)$ (ただし $\#$ は集合の要素数を表す) が N_i 以下のとき、それを孤立群とし、そのボクセルの値を $-\infty$ とする。このことにより漆喰のダマになっている部分の除去を行う。以下の実験では $N_i = 15$ とした。

A3 海綿質部分の復元

CT値の大きな値に囲まれている部分は海綿質の可能性がある。CT値が $-\infty$ であるセルに関し

て3軸 (x,y,z) 方向を n_1 個分探索し、両側にCT値が $-\infty$ ではないセルが存在すれば、そこを海面質部分とみなし元データの値 $V_{original}(x,y,z)$ に置き換える。今回の実験では $n_1 = 10$ とした。続いてこの海面質が一部復元されたデータを元に再度上記と同じことを行った。今度は探索個数を n_2 とした。この n_1 と n_2 の間には $n_1 / 2 = n_2$ という関係がある。整数にならない場合は小数点以下を切り上げた。以下、この作業を繰り返し最終的に探索個数が1個分になるまで行った。

A4 表面部分の仕上げ

表面のCT値は通常の化石のCT値よりも低くなっている。そこで、CT値が $-\infty$ ではないセルに対してその x,y,z 方向6近傍に限り元のデータの値に置換することにする。このことにより多少漆喰部分が復元されてしまうが、化石の表面部分は再現される。このプロセスは3回くりかえした。6近傍探索は隣接するセルに限定しているため、完全に化石の表面をカバーするのに3次元では3回必要である。