

| | |
|------------------|---|
| Title | 自然科学における3次元プリンターの活用事例 |
| Sub Title | Various examples of 3D printer usage in natural sciences |
| Author | 河野, 礼子(Kono, Reiko) |
| Publisher | 慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会 |
| Publication year | 2018 |
| Jtitle | 慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.64 (2018. 9) ,p.31- 45 |
| JaLC DOI | |
| Abstract | |
| Notes | 研究ノート |
| Genre | Departmental Bulletin Paper |
| URL | https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20180930-0031 |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

自然科学における 3 次元プリンターの活用事例

河野礼子*

Various Examples of 3D Printer Usage in Natural Sciences

Reiko T. KONO

1. はじめに

2005 年の最初の導入以来、10 年以上にわたって 3 次元プリンターを研究上活用してきた。その過程で自身の研究の方向性も 3 次元プリンターに引っ張られるように変わってきたように思う。また自身だけではなく周辺の研究者からのバラエティに富んだ要望に応えると同時に、当時勤務先であった博物館での展示や教育普及の用途にもさまざまに協力してきた。その過程で明らかになってきたことは、思い切って言うてしまうならば、3 次元プリンターは自然科学の研究上非常に有用である、ということである。3 次元プリントの技術的解説は既存の文献を参照いただくとして（新野，2010；京極，2014），これまで 13 年におよぶ私と 3 次元プリンターとの付き合いの経緯を紹介することで、その有用性を伝えたい、というのが本稿の狙いである。

本稿ではまず、3 次元プリンターを利用するようになったいきさつや 3 次元プリントの一般的な原理を簡単に紹介する。その後、私自身の研究活動においてどのように 3 次元プリンターを活用してきたか、そしてさらに他の研究に協力したさまざまな事例を紹介し、3 次元プリント技術が自然科学分野でどのような意味を持つのか、どんな風に活用可能であるのかを分析する。最後に今後の方向性を考察する。

* 慶應義塾大学人類学研究室（〒 223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1）: Laboratory of Anthropology, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8521, Japan. Email: rtkono@flet.keio.ac.jp



図1. 筆者が使用してきた3次元プリンター。左：EDEN 260，右：Connex 350。

2. 経緯

3次元プリンターを2005年に導入できたことは私の研究人生においてもひとつの画期的な展開であったことは間違いない。当時勤務していた国立科学博物館（科博）人類研究部・人類第二研究室長であった溝口優司氏が代表の科学研究費補助金・基盤研究（S）「更新世から縄文・弥生期にかけての日本人の変遷に関する総合的研究」（課題番号17107006）に私も連携研究者として参加しており、この科研費で3次元造形装置を購入することとなった。科研費の申請段階で3次元造形技術について情報収集し、当時入手可能な装置のうちでいずれがよさそうか吟味した。

ちょうど当時は3次元造形技術がより身近で手ごろな存在になってきた時期であったと思われる（今村，2004；丸谷，2004；中川・丸谷，1996）。元祖3次元造形技術ともいえる光造形技術は、光硬化樹脂を満たした槽の中に高さ方向の移動可能なステージを設置し、このステージ上面を液面より一層の厚さ分下げておいて、ステージ上の樹脂溶液層に光を当てて造形すべき形状に樹脂を硬化させる。次にもう一層分ステージを下げて同様に次の層の形状を硬化させる。これを繰り返していくことによって、次第に高さ方向が形作られていくのである（中川・丸谷，1996）。

こうした元祖とも言うべき光造形技術に加えて、2005年当時は、さまざまな方式の3次元造形機が出現していた。たとえば光硬化樹脂液のかわりに粉末状の材料を使用し、レーザーを照射して焼結させる粉末焼結法や、粉末状の材料をバインダーという固着剤で固めていく粉末結合法の装置などが入手可能であった（丸谷，2004）。こうした中で我々は、2003年ごろに発売されたばかりであった、イスラエルのObjet社によるEDEN 260を導入することにした（図1）（Objet社は2012年に米国のStratasys社と合併した）。

EDEN 260 の造形方式はインクジェット、Polyjet、あるいは Material Jetting などと呼ばれるものであり、ごく簡単には、「上下可動ステージ付きのインクジェットプリンター」と表すことができよう。すなわち、光硬化樹脂をインクがわりに印刷し、同時に光を照射して硬化させる。一層印刷が終わるとステージを一層分下げ、また次の層を印刷し硬化させる。この行程を必要な高さになるまで繰り返すのである。このとき、下に土台がなければインクは載せられないので、オーバーハングする箇所や空洞部では性質の異なる樹脂で下の空間を埋めておく。サポート剤と呼ばれるこの樹脂は硬化後もゼリーのようにやわらかいので、造形完了後にこのサポート剤部分を取り去ることによって、希望通りの形状を得ることが可能である。

Polyjet 方式は液体樹脂を利用するために粉末をバインダーで固着させる方式よりは積層厚さが薄く、完成品の表面を細かく滑らかに作ることが可能である。一方、従来の光造形法で必要であった「支持構造体」のかわりにサポート剤で全周を覆うため、この支持構造体を取り除く際に「バリ」が生じたり削り過ぎたりする心配もない。さらに、材料をインクがわりにセットして印刷するだけという扱いやすさも特徴と言えよう。また、必要かどうかはさておき、二つのリングがつながった構造や、かみ合った状態の歯車などを、一括して造形することも可能である。

装置を導入した直接の経緯は上述の通りであるが、そもそもそれ以前から、3次元デジタル形状データを実体として作り出すツールの必要性を強く感じていた。もともと私は、ヒトや類人猿の歯（とくに大白歯）の表面を覆う「エナメル質」という組織が、種によってどれくらい厚いか薄いかを定量的に分析する、というプロジェクトから研究をスタートした。この際に先行研究のようにエナメル質の厚さを2次元の断面上で評価するのではなく、歯冠（歯の口の中に出ている部分）全体のエナメル質の3次元形状をデジタルデータ化してから厚さや体積などを数値化する方法を確立した (Kono et al., 2002; Kono, 2004)。デジタルデータ化には最初レーザー計測を利用したが、ほどなく工業用 CT 装置により連続断面撮影をする方法を導入し、以降現在に至るまで、基本的にデータ化の過程はこの方法によっている。

大白歯の形状をデジタルデータ化するとはつまり、大白歯歯冠表面を覆うエナメル質を、内側の象牙質と分けるということである。これにより、通常は歯の内側に隠れている象牙質の表面の形がデータとして可視化される。このエナメル質と象牙質の境界面の形状は、発生学的にも進化的にも重要であるが、可視化したとは言ってもあくまでコンピューターの画面で見えるわけで、直接観察するのとは大違いである。このエナメル象牙境界面の形を直接観察し、象牙質の先端のとがり具合を触って確かめることができたなら、という希望がそこで生じたのは自然な流れであろう。そうした素地があったところに、上記の科研費の計画が持ち上がり、日本の化石人骨の分析などに3次元分析技術を応用するとのことで、3次元プリンターの購入へと至ったわけである。

3. 大白歯から頭骨デジタル復元へ——自然人類学における活用事例

3次元プリンター導入後は、希望通り、それまでにデータを蓄積してきた大白歯のエナメル象牙境界面の形状を次々と印刷して実体化した。やはりディスプレイで見ると実際に触って見るのとは大違いである。とくに3次元プリントの際には出力する大きさも自由に変えられることから、もともと1cm足らずの大きさのヒトの歯などは、3倍から4倍程度に拡大して印刷することにより、非常に観察しやすいものとなる。このように、自由に拡大縮小できるという点は、やってみて初めてわかる3次元プリントの良さのひとつである。

一方、科研費の計画にそって日本の更新世化石人骨を代表する港川人の1号頭骨や下顎骨の分析研究を共同で進めるなかでも (Kaifu et al., 2011; Kubo et al., 2011), さまざまに3次元プリントが力を発揮した。とくに下顎骨の分析では、右側の第2大白歯までが残存する標本 (下顎骨B) と、左側の第3大白歯だけが残存する標本 (下顎骨D) があり、これらが同一個体のものである可能性を検証するというこで、下顎骨Dを鏡像反転して下顎骨Bの後ろに配置してみることにした (Kaifu et al., 2011)。この際に、ディスプレイで見ただけでなく、3次元プリントして骨の表面形状のつながり具合を実際に触って確かめたこで、同一個体のものであっても矛盾しないと判断することができた。

また、港川人骨の中でもっとも保存がよく、顔面部の残存している港川1号男性の下顎骨については、切歯部の破断箇所の接合状態をデジタルデータを利用して再検討した (Kaifu et al., 2011)。実物の骨資料で接合部をはずして貼りなおそうとすると骨をさらに破壊しかねないために、CT撮影したデータをもとに、仮想的に修正したのである。その結果、顎関節における下顎骨と頭骨のフィットもよくなり、上下の歯のかみ合わせも改善された。しかし修正された下顎骨はデータとしてしか存在しないため、修正結果を実際に確認・観察するにはやはり3次元プリントする必要があった。

港川1号の下顎骨のように、デジタルデータをもちいて接合・復元する手法はいろいろな意味で有用であり、化石資料の研究においてしばしばデジタル復元手法が利用されている (Zollikofer et al., 1998)。私自身、エチオピアのミドルアワッシュ地域から産出する人類化石資料の研究グループに大白歯形状の分析をするべく参画していたために、同グループが約440万年前の人類化石、アルディピテクス・ラミダスの全身骨格の研究を進める際には、歯の研究に加えて、頭骨のデジタル復元プロジェクトにも参加することができた。通称アルディと呼ばれるこの全身骨格個体の頭骨は、地層に埋まっている間に土圧などによってかなり平坦につぶれていた。これをCT撮影し、デジタルデータ上で数十の破片に切り分けて、復元したのだ (Suwa et al., 2009)。この標本は、アルディピテクス・ラミダスという人類進化研究上非常に重要な意味を持つ種の、顔面部を含めて復元可能な唯一の頭骨資料であるが、その復元結果はこれまたデジタルデータとしてしか存在しないのである。もとのCTデータから頭骨の破片を切り分ける、すなわちセグメンテーションの作業には私も加わった。セグメンテーションされ

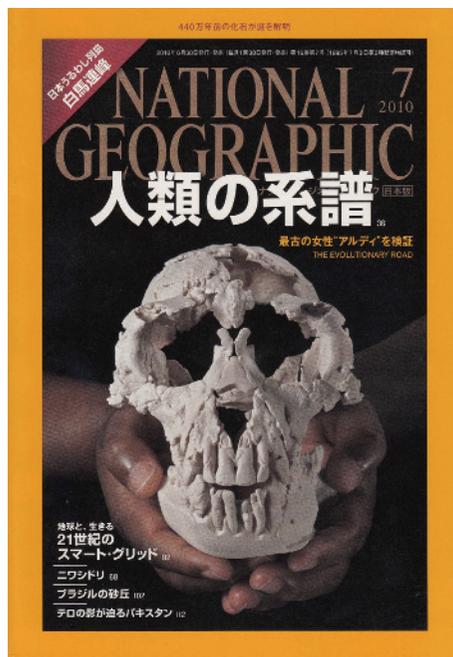


図2. ナショナル・ジオグラフィック誌、2010年7月号の表紙。3次元プリントした復元頭骨は表面を塗装してある。

た破片データをもとに頭骨全体を復元する作業は、共同研究者でありアルディピテクスの第一号化石の発見者でもある東京大学総合研究博物館の諏訪元教授が長い時間をかけて進めた。復元作業の途中段階では、データを受け取って3次元プリンターで出力し、それをもとに復元状況をチェックしてまた修正する、ということを10回以上繰り返したので、結果的にかなりの時間をこのデジタル復元のために費やしたことになる。最終版の復元データについては、国際研究グループの共同研究者らとも共有するべく、いくつだったか思い出せないくらい多数プリントアウトした。そのうちのひとつが、若干の表面塗装を施された上で、ナショナル・ジオグラフィック誌の表紙を飾ったことは、3次元プリンターとの長い付き合いの中でも最大のハイライトであったと言えよう(図2)。

アルディピテクスの研究をさらに発展させるために、諏訪教授が代表者となって応募した新たな大型科研費(特別推進研究(課題番号24000015)「ラミダス化石等人類進化研究を中心としたマクロ形態研究の推進と基盤充実」)が採択された。最初のEDEN 260導入から7年経過した2012年に、この科研費によって、より大きなサイズの造形が可能なConnex 350を後継機として導入することができた(図1右)。EDEN 260ではおよそ20cm四方が最大造形サイズであったが、Connex 350は34cm×34cm×20cmの造形エリアがあるため、細長い骨の実物大のプリントなども可能である。さらにConnex 350は材料樹脂のカセットを一度に2個装填することができるため、色や物性の異なる二つの素材を混ぜて造形することが可能とな



図3. 石垣島・白保遺跡出土人骨の頭骨デジタル復元作業の過程で作成した半分サイズの頭骨の山。「死屍累々」という感じ。

り、さらに応用範囲が広がった。材料としては硬質プラスチックからゴム様素材まで、物性もさまざまなものが利用可能であり、硬質プラスチックでも透明、白色、灰色、青色、黒色などが発売されていた。しかし選択肢はたくさんあっても、そもそも造形の目的が骨や歯などのデジタルデータの実体化であるので、それほど色や素材にこだわる必要がないため、実際にはもっぱら白色と黒色のプラスチック材料を利用してきた。これによって、白と黒、そして両者を適当な混合比率で混ぜることで何段階かの灰色に色分けして印刷することが可能である。

その後、石垣島の新空港建設に伴い発見された白保竿根田原洞穴遺跡から出土した人骨資料の研究を牽引してこられた土肥直美博士が、頭骨資料をデジタル復元してはどうかと思い立ち、私に声をかけてくださった。白保遺跡からは、更新世までさかのぼる人骨が多数出土している(沖縄県立埋蔵文化財センター, 2013, 2017 a, b)。人類学者なら誰でも、更新世の人骨の研究ができる機会があれば喜んで参加するであろう。もちろん私も二つ返事で引き受け、現在に至っている。現地発掘調査にも加わり、また発掘報告書の執筆にも参加するなど、すっかり深入りしているのが現状であるが、もともとの目的であったデジタル復元作業も着々と進めている。そして言うまでもなくここでも3次元プリンターが大活躍している。ヒトの頭骨を実物大で3次元プリントすると、印刷時間が30～40時間、また材料費がおよそ10万円程度と、時間も費用もかかるため、復元途中の確認のためにはもっぱら、1/2サイズにプリントアウトしている。これまでのところ、全体的に残存していて復元が可能な4個体分の頭骨のうち、3個体分については、ほぼ復元が完了しているが、この過程で確認のために印刷した半分サイズの頭骨は軽く20点を超えているであろう(図3)。

白保遺跡の資料のように、頭骨の破片がそれなりに残存しているものの、実物の骨を接合して頭骨を組み立てるのには欠損部も多くまた接合面も小さくてなかなか貼り合わせられない状

態では、デジタル復元は非常に有力な手法である。デジタルデータであれば、接合面が小さくても位置関係さえ確立されれば、人工的に作成した直方体などで接合部分を補強するなどしてその位置関係を保持することができる。また欠損等により骨同士が離れているケースも、棒のような構造を作成して間をつなぐことが可能である。3次元プリンターで造形する際には、人工的に付加した棒や補強構造については骨の部分とは異なる色で印刷してやれば、どこが骨でどこが付け加えた構造なのかが見分けられる。さらにデジタル復元の最大の強みは、左右どちらかが欠損している場合に、残存している側を鏡像反転をすることで欠損部を補えることであろう。この場合にも、反転して補った部分は色を変えて出力することで、オリジナルの骨と補った部分とを混同せずに済む。

4. 地衣類から恐竜まで——各種プロジェクトの強力なる助っ人として

ここまで紹介してきたように、自分自身が直接関わった研究プロジェクトにおいても3次元プリント技術をさまざまに活用してきたが、同僚や同業者などの依頼に応じて造形してみたものはさらに多岐にわたる。2005年の最初の導入以来、科博の研究部の集まりなどで3次元プリンターの宣伝を2度ほどしたが、最初のうちはあまり反応がなかった。さまざまな生物の分類などに関わっている研究者が在籍していることから、生物の形をなんらか分析する過程でそうした造形技術が活用できる可能性を感じる研究者はもちろんたくさんいて、時おり相談に乗ることはあったけれども、結局のところまずはターゲットとなる形状をデジタルデータ化せねばならず、そのすべが無いために造形まではなかなかたどり着かない、という感じであった。X線CTは基本的に、X線を吸収する物体であればうまく画像として得られるが、骨や歯などの硬組織を持たず水分含量の多い軟体動物だとか、薄いシート様の構造が多い植物などは、なかなかCT画像上で分解することが難しいのである。

そうした中で、思いがけずデータ化がまずまずうまくいったのは地衣類であった。科博植物研究部の大村嘉人研究主幹に協力して、地衣類を数標本、CTで撮影し、そのデータから形状を抽出することができた。このデータをもとに約4倍にも拡大した3次元モデルを作成したのである。出来上がったモデルはさらに実物そっくりに彩色されて、展示などに活用されている(図4)。地衣類にはさまざまな形状があるのであるが、うまく造形することができた樹枝状地衣類のイオウゴケは拡大するとまるでエノキタケのように見える形状をしていた。出来上りのサポート剤の除去の過程で“エノキタケ”がぼきぼきと折れてしまい、もっと大きく拡大して作り直したことが思い出される。

植物関係では、同じく科博植物研究部の堤千絵研究主幹の仕事は印象深い。彼女は植物の花の形を拡大して見せられるような模型を作りたい、との目的設定のもと、形状のデジタルデータ化に自身で取り組みさまざまに工夫をした。花卉や雄しべ雌しべなど、薄かったり細かったりするパーツが組み合わさっている花の構造は、CT撮影してもなかなか形状を抽出しにくい。CT画像上でなかなか「見えない」のである。これを克服するために堤研究主幹は、X線を吸



図4. 樹枝状地衣類，イオウゴケの拡大モデル。上：白い樹脂で造型したモデル。左下はイオウゴケの実物。下：木下美香氏により着色されたモデル（写真提供：大村嘉人氏）。



図5. ギーマの花の拡大モデル。CT スキャンにより形状データを抽出し，半割りにして透明樹脂で造形した。

取するように花を染色し，さらにしなびてしまわないように凍結乾燥してから，非常に小さな対象物を撮影可能な CT 撮影システムを利用して画像を得た。ここからさらに手間のかかるデ

デジタル画像上でのセグメンテーション作業を経て、一部はなめらかな表面構造まで完全に再現するには至らなかったものの、ツツジ科のギーマヤ、キク科のヤナギニガナ、イワタバコ科のエスキナンツスの花の構造をなんとかデータ化することに成功したのである。ひとたびデータ化ができれば、それを真ん中でバツサリ半分に割る、といったことはデジタルデータの操作で簡単にできるので、花のデータを半分割りにして、倍率もさまざまに造形してみたところ、20倍程度に拡大することでようやく花の模型を作ることに成功した。この時は内部構造を透かしてみたいとの希望であったので、透明樹脂を使って造形した(図5)。

データ化できるかどうかが鍵となるという意味では、私が人類学の研究で対象としている骨や歯、そしてそれらの化石は、X線をよく吸収する物質でできており、あとから振り返って考えてみれば、たまたま最初からCT撮影でデータ化するのに非常に都合がよいものを相手にしていた、ということであった。同じようにヒトに限らず化石資料を扱う古生物学の分野でも、CT撮影によるデータ化ということが頻繁に行われており、いくつか3次元プリントを提供したこともある。たとえば恐竜の歯のデータをもとに拡大模型を作成したり、発掘調査で出土した動物骨標本の複製を作ったり、そういったことにはしばしば対応した。

なかでも特に、コリストデラという淡水性の絶滅爬虫類を研究対象とする神奈川県立生命の星・地球博物館の松本涼子博士からは、石川県から出土した白亜紀の小型両生類の頭骨化石を研究するのにあたり、非常に小さなこの資料を大きく出力して頭骨を復元したいとの相談を受けた。CT撮影とそのデータから頭蓋を構成する個々の骨を切り出すセグメンテーションの作業はすでに終わっているとのことであったので早速対応したのであるが、なんとともとの化石は1.5 cm × 2 cm × 0.5 cmの母岩に入っており、大きなパーツでも4 mmしかないということであった。その小さな母岩の中から43点の骨のパーツを切り出したというのである。もとが1 cm程度の範囲に収まっていたものなので、すべて20倍に拡大して出力することにした。私が手伝ったのはその部分だけであるが、この標本は非常に重要なものであったとのことで、松本博士はその後この拡大模型をもとに頭骨を復元し、新属新種として論文発表した(Matsumoto and Evans, 2018)(図6)。

最近ではデータ化の過程を工夫する研究者も現れた。科博地学研究部の木村由莉研究員は、写真から3次元モデルを作成する機能を活用して、ナウマンゾウの大きな化石頭骨を3次元データ化した。もとが大きい物体なので、このデータを縮小プリントアウトして、ミニチュアの象の頭骨化石モデルを作ることができた。データ化の方法はCT撮影だけではない、という好例と言えよう。同様に、科博動物研究部の哺乳動物グループでは、はく製資料の保存の試みの一つとして表面形状スキャナーによるデータ化に取り組んでおり、そのデータをプリントアウトしたこともある。

さらに、そもそも肉眼レベルでは全く見ることのできない微小サイズの対象については、原子模型のように、最初からモデルとしてデータを作成する、という可能性もある。科博地学研究部の門馬綱一研究主幹に依頼された鉱物の結晶構造モデルがその好例であろう。この際に、元素の違いを見やすくするために色を変えて出力してみると、大変効果的であった(図7)。

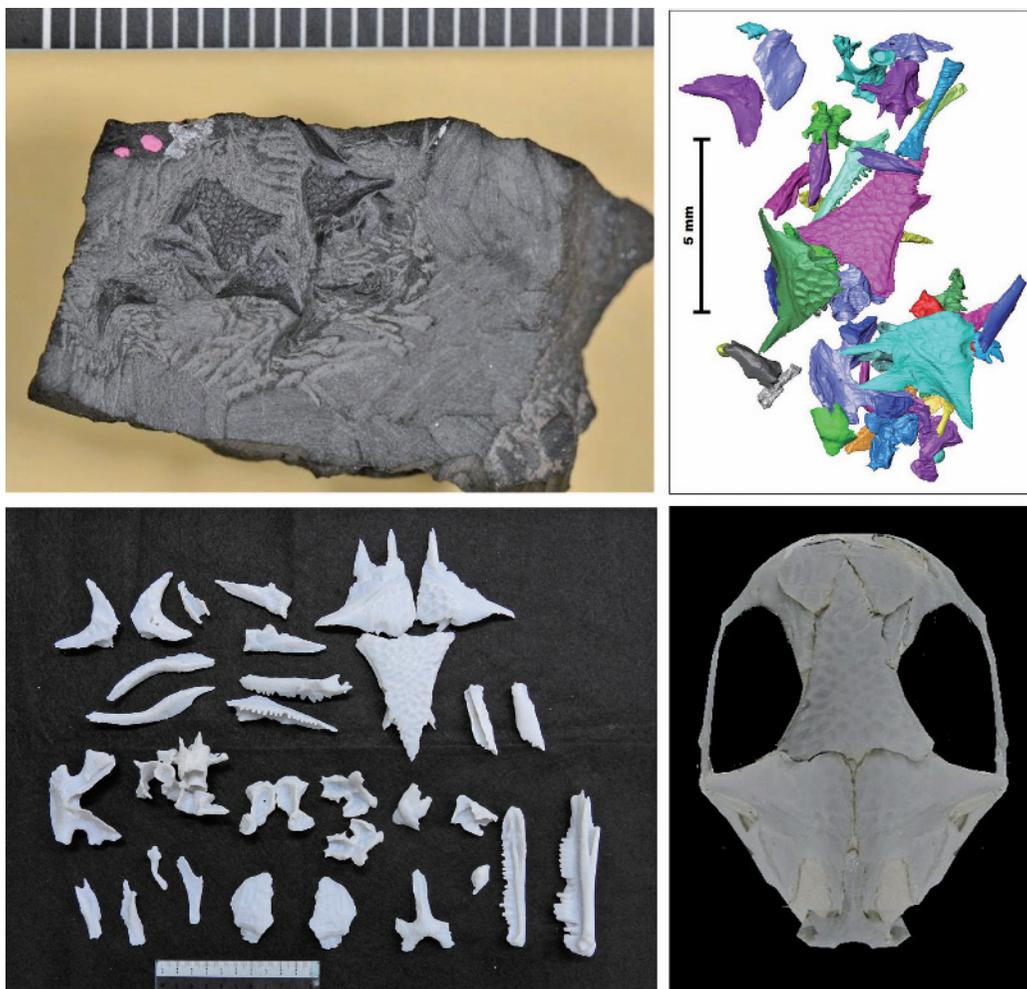


図6. 白亜紀の小型両生類、シラペトン・イサジイの化石（左上）とCTデータから切り出された43のパーツ（右上）、その20倍プリントアウト（左下）と、組み立てられた頭骨（右下）。（写真・図版提供：松本涼子氏）

同じ地学研究部の谷健一郎研究員からは、海底調査のための深海用全方位カメラを新規開発するにあたって、その部品を印刷したい、という要望もあった。これはつまり、もともと実在しないものを、コンピューター内でデザインしプリントアウトして実体化する、ということである。3次元造形技術はそもそも、製品開発に際して、デザインの確認といった行程を迅速化・簡略化するために開発されてきたことを考えれば、これはむしろ本来の使い方であるとも言えよう。私自身も実は、CT撮影時に標本をステージ上に固定するための治具などをプリントしたりすることもある。谷研究員のカメラは、3次元プリンターで印刷した構造体に民生品のカメラ・制御基板・電池などを組み付けることで、耐圧水深・映像解像度的に世界トップレベ

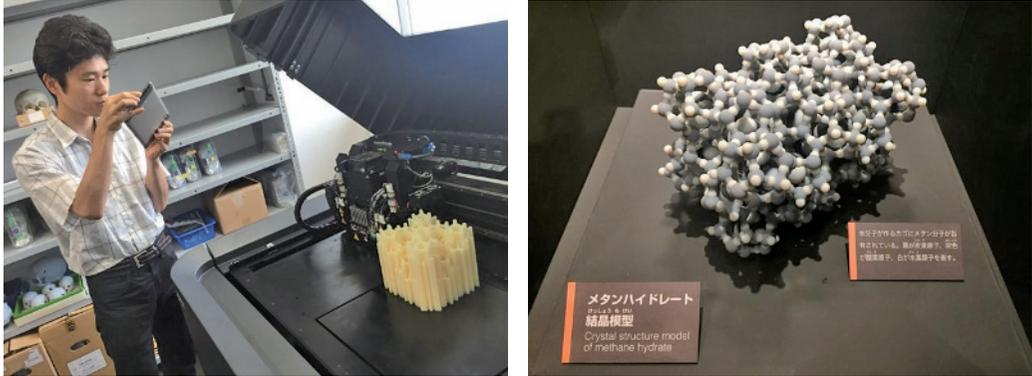


図7. 結晶構造モデル。左：刷り上がったモデルと門馬研究主幹，右：科博の2017年の特別展『深海展2』用に印刷したメタンハイドレートの結晶構造モデル。

ルの性能を安価に実現することができたとのことである（図8）。

自然科学の研究からは少し離れるかもしれないが、3次元プリントは博物館などでの展示や教育普及活動においても大変有用である。とくに、経費はかかるが何度でもやり直すことができるので、博物館の来館者に標本を見せたり触らせたりするなど消耗しやすい用途にもちいる場合にも、3次元プリントモデルであれば破損などの心配をそれほどせずに済む。もちろん、本物を見せてもらう方が来館者にとってはよほどうれしいことであろうが、モデルでも見せてもらえないよりはずっとましであるし、特に触ってよいというのは来館者にとっても直接体感するよい機会であろう。さらに拡大縮小によって大きさを変えたり、データを切断して中身が見えるようにしたりと、実物ではできない造型ならではのメリットもある。

実際、科博の教育普及活動にもさまざまに協力した。たとえば、人類学関係でも、縄文時代人の頭骨の本物は一般の方が直接手に取る機会はなかなかないので、等倍の3次元プリントを触って確かめる体験プログラムを開発し、そのための頭骨のプリントアウトを作成した。初代のモデルがかなり壊れかかってきたとのことで、2代目の印刷を最近頼まれたところである。また、人類学以外でも、カニのツメの構造を見せるためにCT撮影して等倍模型と拡大模型を印刷した例や、珪藻の形を見て触って確かめてもらうための拡大模型を印刷した例などがある。

また、展示資料を3次元プリントした例もたくさんある。たとえば2015年に開催された特別展「生命大躍進」では、人類化石資料を4点、3次元プリントしたものを展示した（国立科学博物館ほか、2015）。中国で発見された5500万年前の化石霊長類、アーケブス・アキレス（Ni et al., 2013）については、発見者である中国科学院の倪喜軍博士よりCTデータを提供してもらい、これをもとに3次元プリントしたものを本物に似せて着色し展示した。昨年開催された特別展「深海2017」においては、門馬研究主幹・谷研究員に協力し、メタンハイドレートの結晶構造モデルをプリントして展示した（図8）。常設展示でも3次元プリントは活用されている。たとえば科博・地球館1階の地球史ナビゲーターでは、人類の進化とともに脳の容

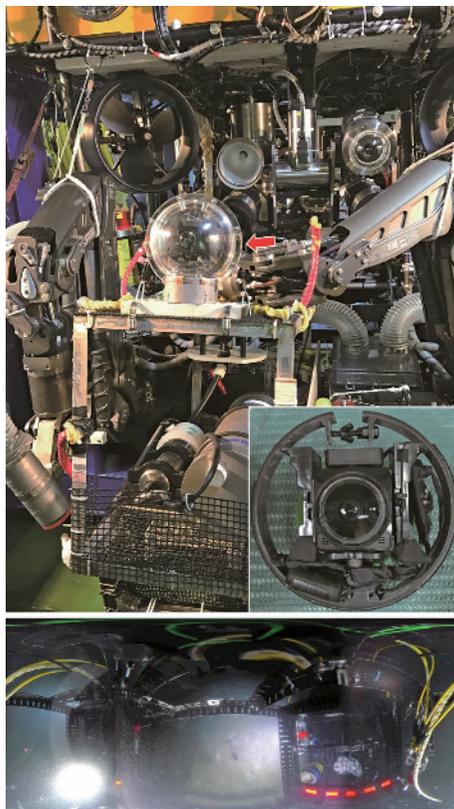


図8. 無人探査機に取り付けた深海用全方位カメラ（赤矢印）。右下挿画は3次元プリンターで製作したパーツにカメラ・制御基板・電池などを取り付けたところ。下は実際に撮影された画像の一例。駿河湾の水深約300m地点で撮影された。（写真提供：谷健一郎氏）

量が大きくなってきたことを示す展示として、3次元プリントしたエンドキャストを5点、展示している。

5. まとめと展望

3次元プリンターは、2013年に当時のバラク・オバマ米大統領が一般教書演説で触れたことに象徴されるように、最近数年のうちに急速に身近なテクノロジーとなってきた（中野，2014）。一般家庭でも購入可能な価格帯の装置も発売され、またWEBからデータをアップロードして3次元プリンターでプリントするサービスなども展開されている。装置自体の価格にはかなりの幅があり、目的によっては手ごろな価格帯の装置でも十分に事足りる場合もある。しかし自然科学の領域で印刷すべき対象の場合、なかでも特に生物の形状においては、自然な曲面が滑らかに再現されることが非常に重要となるため、ある程度高価なハイスペックの装置を利用することが望ましい。装置の扱いやすさなども加味すると、現状でも、Stratasys社の

Connex シリーズなど Polyjet 方式の3次元プリンターは最も目的にかなうシステムの一つであると考えられる。

これらの装置の問題点があるとすれば、装置自体の価格もさることながら、材料費も高額であるに加えて、さらに維持・運営の費用がかさむことであろう。したがってせっかく導入がかなった場合には、それなりの頻度で使用しないと持っているだけで経費がかかるわけであるが、かといって使うにも先立つもの(=材料費)が必要となる。企業の製品開発などの営利目的での使用ではなく、研究目的であるので、材料、すなわち樹脂の代金について「アカデミック・プライス」の導入などをメーカーに提案してはいるが、現在までのところそうした動きは見られない。

自然科学の研究における3次元プリンターの登場頻度は、それぞれ企業の製品開発などとはおそらく比べものにならない低さであろう。頻度は低くとも必要な場面での必要性や有効性は非常に高いのであるが、限られた研究費から材料費を出すということでもあるので、研究うまく運用するためには、大学や研究所などが装置を導入して維持管理をし、複数の研究者が材料費の応分負担することで使用できるような環境がもっとも望ましい、というのが私のたどりついた結論である(さらに理想を言うならオペレータを雇用できればなおよい)。実際に、前職で装置を運用していた際には、たくさん造形を希望する研究者には材料を購入してもらうなど、それに近い形で運用していた。きっちりと金額計算をしていたわけではなく、あくまでも「どんぶり勘定」ではあったが、ともかくおおよその使用量に応じて負担してもらうことで、どうにか回っていた、ということである。

装置がなければ外注で造型してもらう方式もあるが、その場合は材料費実費に加えて作業時間分の料金を請求されるなど、当たり前だが自前で造型するよりはだいぶ費用も高額になる。少しだけやってみたい場合はそれでもよいかもしれないが、そもそも最初に「ちょっとやってみよう」というときに簡単に試すことができるかどうか、というのが3次元プリンターを使う上での最初のハードルだと思うので、そこで外注というのでは却ってハードルをあげる結果となる。一方、試してみたところ非常に有効であることがわかり、もっとたくさん使いたいとなった場合には、外注の割高な経費が問題になってくる。当然のことながら外注ではなく自前で装置を運用している方がさまざまな融通が利くのである。

本稿では3次元プリンターが夢のように役に立つ装置のように紹介してきたが、当然夢のようでない部分もある。一つには3次元プリントで何かを造形するのは、さまざまな研究活動において、あくまでも「途中」のステップである場合がほとんどである、とのことであろう。これは私自身だけの問題かもしれないが、かなりの時間を3次元プリンターの運営に投じてきたけれども、何かを造形すればそれで論文が出来上がるわけではないのだ。結局、その先が重要なのである。また、どんなに精度よく造形ができると言っても、やはり本物には及ばないことも指摘しておく必要があるだろう。当たり前の話ではあるが、所詮は研究作業をしやすくしてくれる補助なのである。さらに、これは技術的な問題であるが、造型物は今のところ、永遠に不変不朽、というわけではないことも付け加えておく。形状によっては時間が経過するとゆが

みや変色が生じるケースもあるし、強度が足りないこともある。もともとこうした技術が開発されてきた経緯を考えればある意味当然のことであろう。しかしそうした夢のようでない部分があっても、やはり目的によってはこれがないとどうにもならない、という場面があるのだから、3次元プリンターはやめられない。

3次元プリンターそのものの技術発展も目覚ましく、今やフルカラーに近い造型が可能な装置も登場しているようである。しかし私たちのように形を実体化することが重要な分野の研究者にとっては、色の自由度はそれほど重要ではないので、その方向へ発展して装置が高額化しても追随する必要はないと考えている。むしろその過程で材料をセットできる本数が増えるなどの使用上の便利さが増すなどで恩恵を受ける可能性もあるが、総じて高機能・高価格へと全体が流れていってしまうのはあまりありがたくないことでもある。自然科学の研究目的にとっては、それよりもむしろ、樹脂の価格低下や、成型スピードのアップなど、基本的な部分が地道に改善されるほうがありがたいので、業界に対してそうした要望をアピールしていく必要もあろう。

以上、自然科学の研究における活用事例の紹介と、今後の展望をまとめてみた。近い将来、自然科学に関わる研究者が一定数以上所属する組織では3次元プリンターを共同運用するのが当たり前の時代が到来するかもしれない。今はまだ模索の段階であるが、一足先にその面白さを知った立場から、3次元プリンターがアイデア次第でさまざまに利用可能であること、思いがけない方向へ発展する可能性もあることなどを、伝えられればと思う。

謝辞

この13年間、3次元プリンターの運用には多くの研究者を通じて複数の科学研究費研究課題より支援をいただき、また国立科学博物館のさまざまな研究費によって維持運営されてきた。ここに改めて謝意を表す。また、バラエティに富んだ愉快的プロジェクトに巻き込んで下さり、その一端を本稿で紹介することを快諾下さった研究仲間の皆さんに、心より御礼申し上げます。

引用文献

今村正人 (2004) RP の展開と最新動向, 精密工学会誌, 70 : 163-166.

Kaifu Y, Fujita M, Kono RT, Baba H (2011) Late Pleistocene modern human mandibles from the Minatogawa Fissure site, Okinawa, Japan: morphological affinities and implications for modern human dispersals in East Asia. *Anthropological Science*, 119 : 137-157.

国立科学博物館, NHK, NHK プロモーション (2015) 特別展『生命大躍進 脊椎動物のたどった道』図録, 小野雅弘編集, NHK・NHK プロモーション発行, pp. 224.

- Kono RT (2004) Molar enamel thickness and distribution patterns in extant great apes and humans: new insights based on a 3-dimensional whole crown perspective. *Anthropological Science*, **112** : 121-146.
- Kono RT, Suwa G, Tanijiri T (2002) A three-dimensional analysis of enamel distribution patterns in human permanent first molars. *Archives of Oral Biology*, **47** : 867-875.
- Kubo D, Kono RT, Suwa G (2011) A micro-CT based study of the endocranial morphology of the Minatogawa I cranium. *Anthropological Science*, **119** : 123-135.
- 京極秀樹 (2014) 積層成型技術の現状と応用展開. *スマートプロセス学会誌*, **3** : 148-151.
- 丸谷洋二 (2004) RP の原理と応用技術. *精密工学会誌*, **70** : 159-162.
- Matsumoto R, Evans SE (2018) The first record of albanerpetontid amphibians (Amphibia: Albanerpetontidae) from East Asia. *PLoS ONE*, **13** (1): e 0189767.
- 中川威雄・丸谷洋二 (1996) 積層造形システム：三次元コピー技術の新展開. *工業調査会*, pp. 250.
- 中野貴由 (2014) 付加製造技術 (3D プリンター) による金属系生体機能性材料の開発. *スマートプロセス学会誌*, **3** : 167-174.
- Ni X, Gebo DL, Dagosto M, Meng J, Tafforeau P, Flynn JJ, Beard KC (2013) The oldest known primate skeleton and early haplorhine evolution. *Nature*, **498** : 60-64.
- 新野俊樹 (2010) 積層成型技術——ラピッドプロトタイプングからラピッドマニファクチャリングへ——. *精密工学会誌*, **76** : 1340-1344.
- 沖縄県立埋蔵文化財センター (2013) 白保竿根田原洞穴遺跡——新石垣空港建設工事に伴う緊急発掘調査報告書——. 沖縄県立埋蔵文化財センター調査報告書第 65 集, 沖縄県立埋蔵文化財センター, 沖縄.
- 沖縄県立埋蔵文化財センター (2017 a) 白保竿根田原洞穴遺跡 重要遺跡範囲確認調査報告書 1——事実報告編——. 沖縄県立埋蔵文化財センター, 沖縄.
- 沖縄県立埋蔵文化財センター (2017 b) 白保竿根田原洞穴遺跡 重要遺跡範囲確認調査報告書 2——総括報告編——. 沖縄県立埋蔵文化財センター, 沖縄.
- Suwa G, Asfaw B, Kono RT, Kubo D, Lovejoy CO, White TD (2009) The *Ardipithecus ramidus* skull and its implications for hominid origins. *Science*, DOI: 10.1126/science.1175825
- Zollikofer CPE, Ponce de Leon MS, Martin RD (1998) Computer assisted paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology*, **6** : 41-54.