

## 解説

## 3D造形物を利用した学習教材の開発と活用：放散虫骨格の拡大模型作製を例に

小林由枝\*・栗原敏之\*\*・岸本直子\*\*\*・松岡 篤\*\*\*\*

\*新潟市西区五十嵐2の町8050・\*\*新潟大学大学院自然科学研究科・\*\*\*摂南大学理工学部機械工学科・\*\*\*\*新潟大学理学部地質科学科

## Development and application of 3D-printed enlarged models for understanding the skeletal structure of radiolarians

Yoshie Kobayashi\*, Toshiyuki Kurihara\*\*, Naoko Kishimoto\*\*\* and Atsushi Matsuoka\*\*\*\*

\*8050 Nino-cho, Ikarashi, Nishiku, Niigata 950-2102, Japan (yoshiek@dc5.so-net.ne.jp); \*\*Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050 Nino-cho, Ikarashi, Nishiku, Niigata 950-2181, Japan; \*\*\*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Setsunan University, Ikedanakamachi 17-8, Neyagawa, Osaka 572-8508, Japan; \*\*\*\*Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, 8050 Nino-cho, Ikarashi, Nishiku, Niigata 950-2181, Japan

## はじめに

放散虫は、珪質殻の化石によって顕生累代を通して進化石を追跡できる生物であり、現在でも海洋生態系の低次栄養段階を占めるプランクトンとして、極域から赤道域まで海洋の様々な領域・深度に適応して生きている（例えば、De Wever *et al.*, 2001; 鈴木ほか, 2012）。これまで世界各地の陸域と海洋底の堆積物において化石帯が設定され、現在もその高精度化に向けた努力が続けられている。このような放散虫化石の生層序学的な有用性については、高等学校の地学の教科書でも示準化石の例として取り上げられており、学習教材としての重要性も認識されつつある（例えば、島崎・木村ほか, 2003; 内海ほか, 2003; 松田・山崎ほか, 2006; 磯崎・江里口ほか, 2011; 西村ほか, 2012）。

放散虫が示準化石として用いられるのは、殻の形態的な多様性が高いだけでなく、殻形態が地質時代を通した時間軸上で変化に富むからである。したがって、その重要性を教育の現場で伝えるには、放散虫の殻形態を正しく捉え、比較検討させることが必要である。ところが、放散虫の殻のサイズは通常100～300 μmであるため、手に取れる大型化石のような直感的観察が難しい。

一般に、放散虫などの微化石は、光学顕微鏡による透過像や走査型電子顕微鏡（SEM）による表面構造の観察を行い、種を同定する。大学の専門学科では、これらの手法を実習に組み入れることが可能である。しかし、1日のみの普及活動や大人数を対象とする一般向けの実習では、時間と設備面の制約から同様の手法を実施することは難しい。筆者らも、大人数向けに光学顕微鏡や実体顕微鏡を使った放散虫観察の実習を行ってきたが、透過像からの三次元形態の把握は経験を要するものであり、

普及型の実体顕微鏡で細部を観察することは困難である。放散虫の殻は、日常では目にすることのない自然の造形の緻密さに驚き、その観察を通して学術的な知識を得ることができる好例である。事実、その微細な構造に興味を抱く人は決して少なくなかった。しかし、現状の教育手法では、そういった観察者の知的欲求に十分に答えられているとは言い難い。

このような状況において、筆者らは、最近急速に普及が進んだCT（Computed Tomography）スキャンによる形状測定と3D造形技術を用いて「放散虫殻の拡大模型」を新たな学習教材として開発・活用する取り組みを進めてきた。以下では、拡大模型の有効性と開発の背景を述べ、放散虫化石の形状データ取得から複製作業へと至る一連の工程について解説する。さらに、実習の実践およびアンケート結果から見た今後の課題について述べる。なお、本論で扱う放散虫の形質用語は、鈴木ほか（2012）の邦訳を参考にした。

## 拡大模型の有効性と学習教材開発の背景

近年、大型化石の3Dデータの利用や計測が容易になり、研究と教育への活用が進んでいる（椎野ほか, 2010; 芝原, 2014）。さらに最近では、微化石の3D形状データの取得にも高分解能のマイクロフォーカスX線CTスキャナが用いられるようになり、非破壊で詳細な形状測定や内部構造観察が可能になった（例えば、Görög *et al.*, 2012; Matsuoka *et al.*, 2012; Ishida *et al.*, 2015）。また、3Dプリンタを使えば、得られる形状データから樹脂や石膏の造形物を作製できるため、放散虫等の微化石でも手に取れる大きさに拡大できるようになった。微化石の拡大模型作製や展示については、辻（2012）、横山（2012）、木

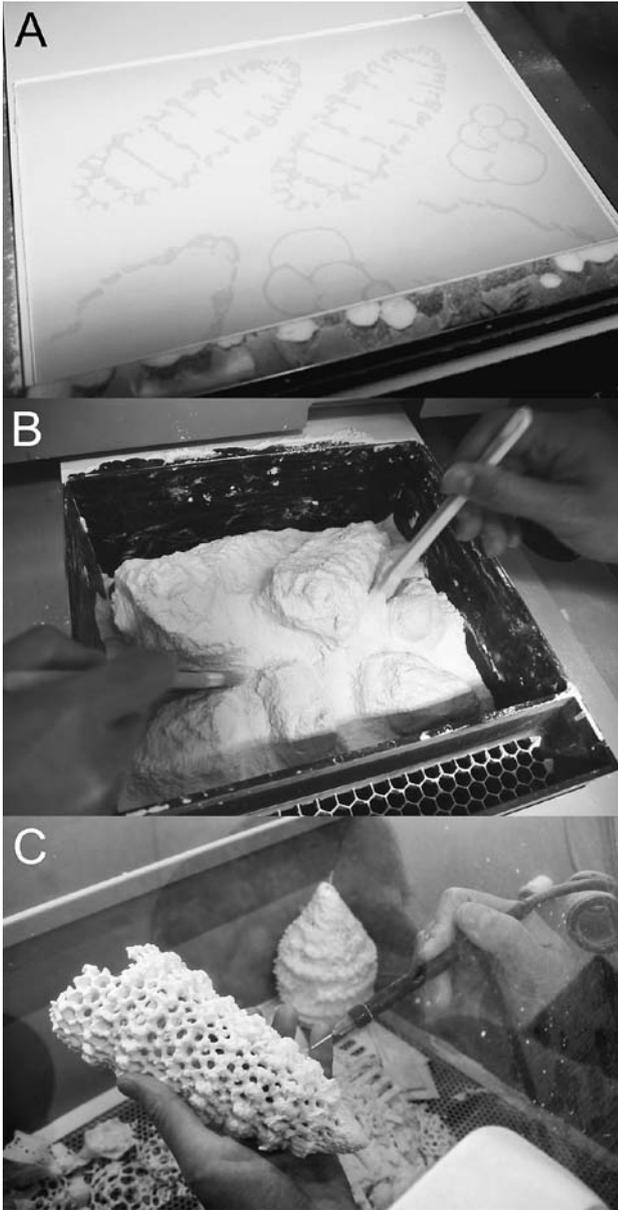


図1. 3Dプリンタによる造形とクリーニング作業。A. 石膏粉末を用いた積層造形。B. 石膏粉末からの掘り出し。C. エア噴射での粉末除去。

元(2012)でも紹介されているので、併せて参照されたい。

3Dプリンタを用いた造形による放散虫の拡大模型は、光学顕微鏡・SEM観察では分かりにくい殻の立体的な構造や内部骨格を確認しやすい。そのため、展示や研究用だけでなく、気軽に触れる学習教材への応用も期待できる。しかし、現時点では、保存状態の良い微化石の3Dデジタルデータが不足していることや、生産コストと材質の強度不足等の課題があり、学習教材として普及するには至っていない。

石膏を用いる粉末積層式の3Dプリンタは、石膏層毎に接着剤を噴射し、固着させて造形する(図1A)。この工

程の最終段階では、充填された石膏粉末中から造形物を掘り出し(図1B)、筆やエア噴射で付着している粉末を丁寧に除去してゆく(図1C)。これは硬化した部分を殻の輪郭・細部のガイドラインとして認識しつつ、自らの手で殻の形態を具現化していく作業といえる。筆者らも、この作業を実際行ってみて初めて気づく形状の特徴があった(例えば、殻孔の位置や開口方向など)。すなわち、拡大模型の完成品を見るだけよりも、体験的な作業を組み合わせることによって格段に骨格構造の認識が進むということである。

こうした経験を基に、筆者らは放散虫の骨格構造を理解する実習として、クリーニング作業を含む拡大模型製作を着想した。しかし、実習の作業物として石膏粉末で充填された3Dプリンタの造形物を使用するのは、設備とコスト面において現実的ではない。そのため、その代替として、レジンキャスト(樹脂 casting)と呼ばれる樹脂製の組み立て式模型の成型手法を採用し、安価で丈夫なウレタン樹脂での複製と整形作業に改変した。複製1個あたりの原価は300円ほどであり、普及活動にも利用が可能である。

### 3D形状データの取得と複製方法

#### 複製した化石と殻形態の特徴

今回、複製に使用したのは、アラビア半島東部に露出するオマーンオフィオライトの噴出溶岩層上に分布する後期白亜紀のミクライトから得られた放散虫化石である。この堆積物はスヘイラ層と命名されており(Fleet and Robertson, 1980)、珪質岩とミクライトから保存の良い放散虫化石が報告されている(Tippit *et al.*, 1981)。模型を作製する種の選定では、保存状態が良好で型取りしやすい形状であること、さらに年代決定に用いられるなどの学術的意義があることも考慮した。検討した試料には同心円状で球状の骨格を持つSpumellaria目と塔状で節のある骨格を持つNassellaria目が多量に含まれていたが、前者は多数の殻孔がある多重の球状殻を持ち、型取りが難しいため、今回は後者から*Pseudotheocampe urna*(Foreman)および*Rhopalosyringium scissum*O'Doghertyの2種を選んだ。試料は、実体顕微鏡で保存状態良好と判断した個体を選んでCT撮像に供した。これらの種について拡大模型の作製を行った結果、表面装飾の立体的な形状や頭部殻節の内部骨針・管状開口といった系統分類で重視される殻形態の特徴を、間近に手にとって様々な方向から観察することができた(図3, 7)。特に、骨針と殻節の接続部や管状開口部から殻内部へかけての三次元的な形状は光学顕微鏡やSEMでは認識しにくいものであるため、拡大模型はそれらの観察に極めて有効である。

*Pseudotheocampe urna*は、Foreman(1971)によって提唱された種で、円錐形の頭部・胸部殻節および終端部

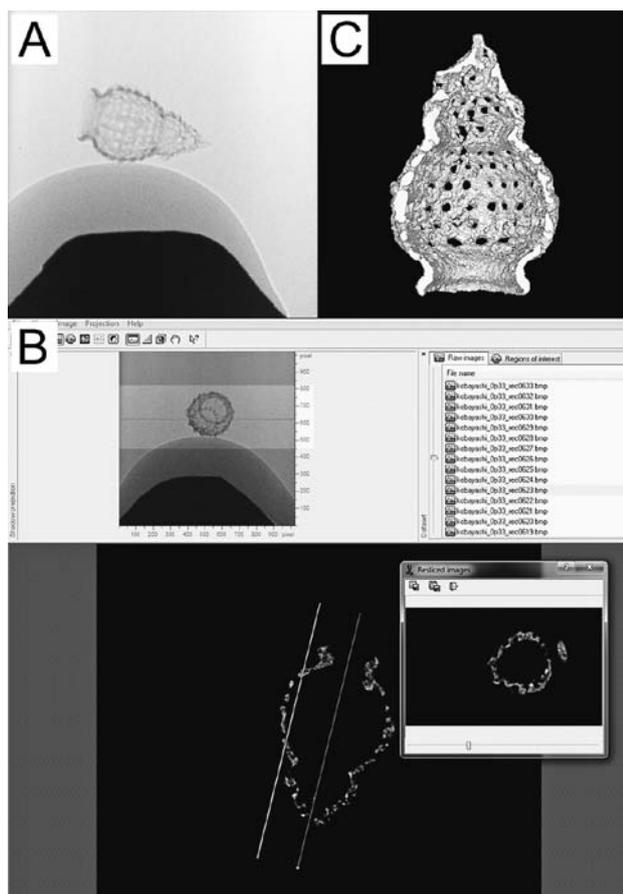


図2. *Pseudotheocampe urna*のCT撮像。A. 透視画像。黒く見えるのが真鍮製のホルダで、ホルダと試料が直接触れないように木工用ボンドを載せた上に液状糊で試料を接着している。B. 再構成データの加工作業。C. 最大断面積付近で二分割した3D形状データ。

で狭窄する膨らんだ腹部殻節を持ち、全体として高台のある壺のような形で特徴づけられる。頭部殻節には細い内部骨針があり、そのうちの1本は頂棘に繋がる。頂棘のある側（背側）とは反対側に、腹側管状開口がある（図3下段）。*Rhopalosyringium scissum*は、O'Dogherty (1994)により記載され、10～12本の縦の肋が発達するくさみ形の殻を持つ。*Pseudotheocampe urna*に比べ、殻が厚い。また、頭部殻節にはしっかりとした内部骨針が認められる（図3上段）。*Rhopalosyringium scissum*は年代決定にも重要な種で、セノマニアン階最上部に初産出が認められている（Musavu-Moussavou *et al.*, 2007）。なお、スヘイラ層のミクライトに含まれる*R. scissum*には、頭部殻節に長い頂棘を持つ個体と持たない個体があるが、今回は頂棘を持たない個体を用いた。

### 形状データ取得・造形

CT撮像には、SEM [JSM-6510 (JEOL)] に装着したSkyScan Micro-CT In SEM (Bruker) を用いた（摂南大学理工学部機械工学科岸本直子研究室所有）。放散虫試料

は、真鍮製のホルダに木工用ボンドを少量塗布し乾燥させた上に、ポリビニルアルコール性の液状糊で接着した。液状糊が乾燥し試料が固定された後、ホルダをSEM内に設置されている回転台に装着した。試料の大きさ（140–189  $\mu\text{m}$ ）によってCCDカメラの分解能を調整し（309–421 nm/pixel）、加速電圧30 KeV、ビーム電流81–85 nAの条件下で、180°回転させながら撮像した（図2A）。得られた画像はソフトウェアNRecon (Bruker) でCT画像に再構成し、試料の歪みや亀裂、ゴミ等が少ない個体のデータを選抜した。それらについて、数値解析ソフトウェアCTAn (Bruker) で水平状態の化石の積層データを作成し（図2B）、必要に応じて補正した後、最大断面積付近で二分割した3D形状データを得た（図2C）。なお、*R. scissum*の頭部殻節の骨針については、棘が太いため、ほぼ完全な形状データを取ることができた。これに対し、*P. urna*の骨針は繊細で、今回の3D造形法で十分に表現される形状データを得ることはできなかった。

このような工程を経て得られたデータについて、Zprinter450 (Zコーポレーション) を用いて石膏模型を作製した。石膏模型の大きさは片手に収まる程度の大きさ（縦約9 cm）とし、型取り用と整形見本用に2組を造形した（図3）。作製された大きさでの模型の拡大率は、*P. urna*が約640倍、*R. scissum*が約870倍である。次に、模型に付着している石膏粉末を除去しワックス液に浸した後、60°Cの恒温器内で余分なワックスを溶かし落とした。なお、型取り用の模型は、余分なワックスを除いた後にラッカープレーで着色しておく、型取りに用いるシリコンゴムと識別しやすく、補強の効果もある。

### 型取り

型取りは、二分割して3D造形した2種の拡大模型を各々原型として、シリコンゴムにて二面型取りを行った。*Rhopalosyringium scissum*の頭部殻節の骨針は、半裁された石膏模型から該当する部分をニッパーで切り出し、合わせて1つのパーツにした。*Pseudotheocampe urna*の骨針は石膏模型で完全に3D造形できなかったため、型取りは行っていない。最終的に、*R. scissum*は合計3パーツ（図4A）、*P. urna*は2パーツから成るように原型を修正した。型取りの手法は、ウレタン樹脂（レジン）により複製する方法を用いた（レジンキャスト：模型の王国, 2009）。これは、一般的な化石の型取りとおおよその手順は同じである（高橋, 2000）。以下に型取りの手順を示す。

(1) 原型の殻孔や殻口等の空隙を油粘土で塞ぐ（図4B）。これを平らに伸ばした粘土上に内側を下にして置く。また、その隙間も粘土で埋める。この際、原型は雌型の枠に対して斜めに配置すると、複製時に気泡が抜けやすくなる。特に、殻の内側に節がある場合は気泡が溜まりやすいため、注意が必要である。

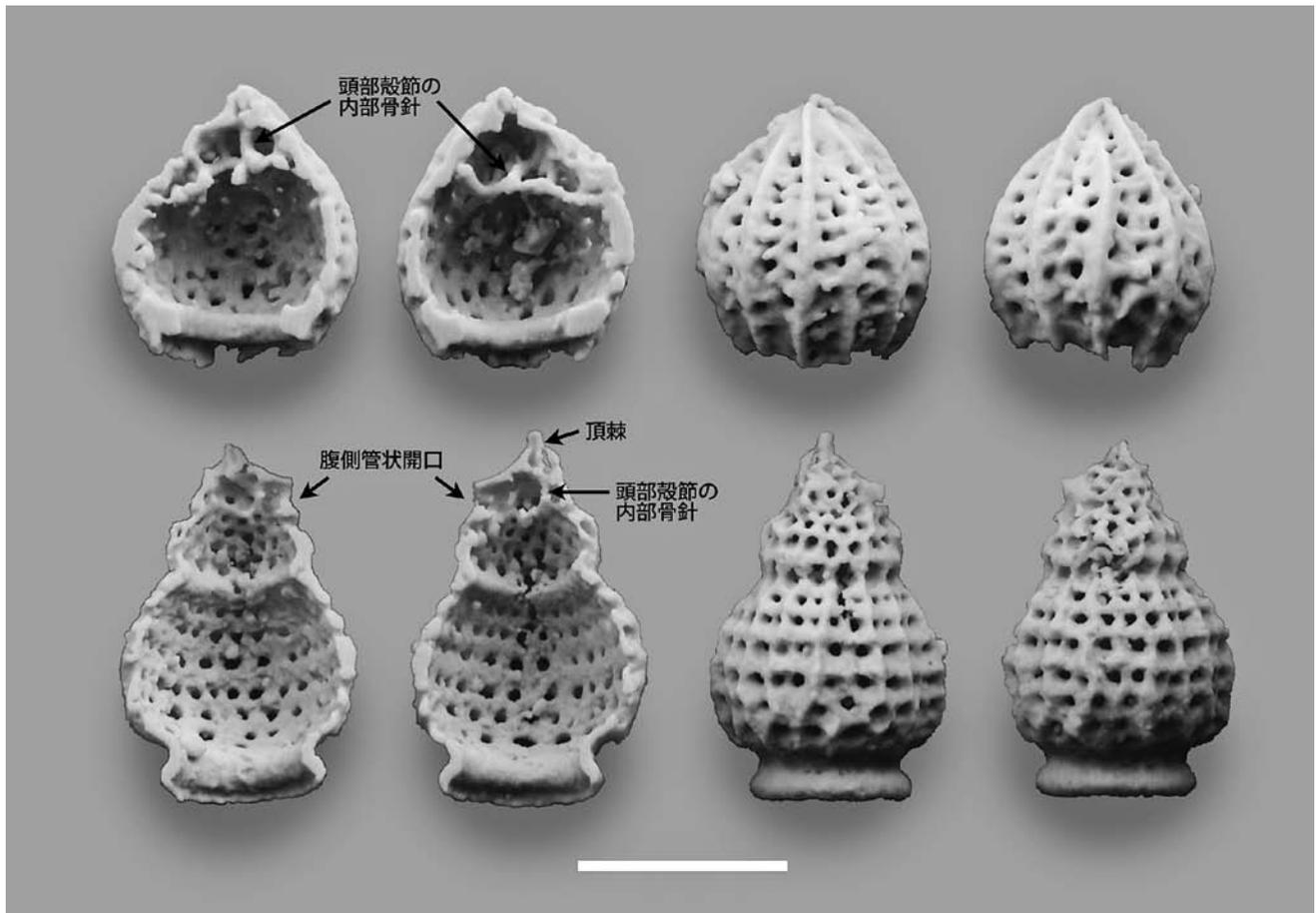


図3. 拡大模型. 上段が *Rhopalosyringium scissum*, 下段が *Pseudotheocampe urna*. スケールバーは5cm.

(2) 原型を置いた粘土に、湯口、湯道、空気穴およびダボ穴を作る (図4C). また、粘土に張り付き防止の石鹼水を筆で塗っておく (図4D). その後、原型の周囲をブロック (ジーエスアイクレオス Mr. 型取りブロックを使用) で枠組みする (図4E).

(3) シリコンゴムに硬化剤を混ぜ、原型が隠れるまでは気泡が入らないようにシリコンゴムを細く垂らしていき (図4F), 原型が隠れてからは約1 cmの厚みができるまで流し込む (図4G). その後、完全に硬化するまで半日放置する.

(4) シリコンゴムが硬化したら、ひっくり返して底と原型に詰めていた粘土を取り除く (図4H). その後、余分なシリコンゴムを除去し (図5A), シリコンゴム同士の接着を防ぐ層となる油性ワックス (リンレイ 床用油性ワックスブルーを使用) を筆で厚めに塗布する (図5B). 続いてブロックで枠を組み、再度硬化剤を混ぜたシリコンゴムを流し入れ、半日放置する.

(5) シリコンゴムの硬化後、ブロックを外して (図5C), 彫刻刀等で型の外周のバリと角を落とす (図5D). 型を開き (図5E), 湯口、湯道および空気穴を整える (図5F). この際、型に水を注ぎ、湯道や空気穴の状態を確

認する. また、複製に用いるレジンの分量も、型に注いだ水を定量することでおおよその必要量を調べることができる (図5G).

(6) 後述の複製工程の通りにレジンを流し込み、成型状態の確認を行う. 必要に応じて湯道等の修正を行い、型を完成させる (図5H).

今回は、化石1個の型取りに1.1~1.6kgのシリコンゴムを要した. 模型は大きい方が複製作業を簡単に行えるが、型のシリコンゴム量が増えるので注意が必要である. なお、原型は殻孔が多く複雑な形状をしているので、型取りには引裂強度の高いシリコンゴム (ウェーブ SG-020) を使用した. 一般的な硬さのシリコンゴム (例えば、ウェーブ・シリコンゴム) でも型取りを試みたが、数回の複製で負荷のかかる部分が損傷した.

型取り後に石膏製の原型を取り出す際には、破損する場合もある. 今回は、*P. urna*の原型が破損した. したがって、繊細な骨格を型取りする時は、樹脂製の方が扱いやすいと思われる. ただし、石膏製の原型の保存を考えなければ、一度の型取りに耐えるだけの強度があればよく、1回目の複製を原型として、実習で使うのに支障のない精度での型取りが可能である.

## 複製と整形

複製には、二液混合型のウレタン樹脂レジンキャスト Ex ノンキシレングレイ（ウェーブ）を用いた。今回の実習時には、化石の凹凸が視認しやすい灰色のレジンを用

いた。

複製の手順は、まず、前述の方法で作製したシリコンゴム型の内側に離型剤KF-412SP（信越シリコン）を軽く噴霧する（図6A）。続いて化石部分に成形時の気泡

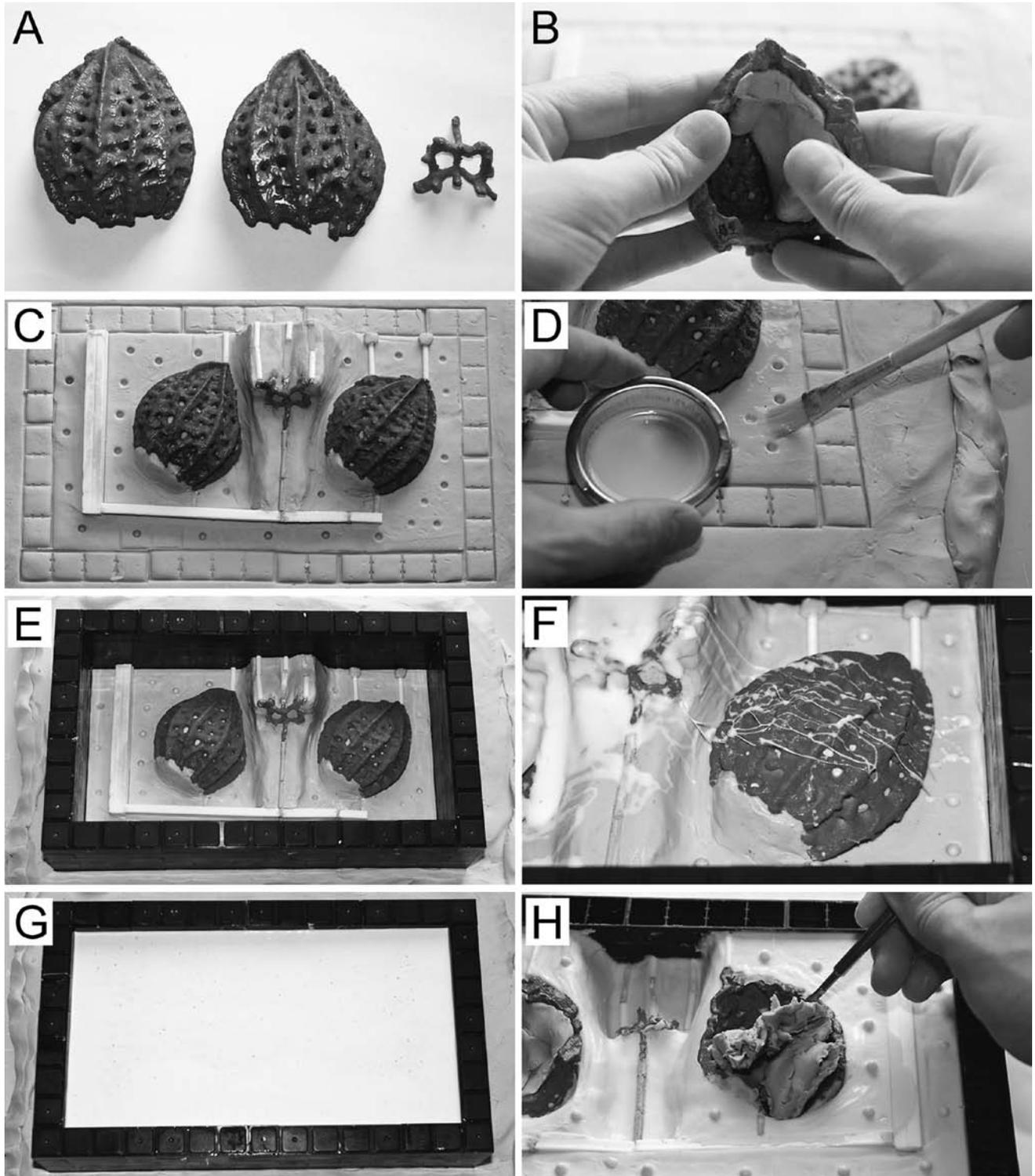


図4. 拡大模型の型取り作業。A. 3パーツから成る *Rhopalosyringium scissum* の原型。B. 殻の内部から殻孔や殻口に粘土を詰め、空隙を塞ぐ。C. 原型、湯道等を粘土上に配置し、ダボ穴を開ける。D. 粘土に張り付き防止の石鹼水を塗布する。E. 枠を組んだ状態。F. 原型に接する部分はシリコンゴムを丁寧に流し込む。G. 半日放置し、シリコンゴムを硬化させる。H. 型を返し、粘土を除く。

を防ぐためのベビーパウダーを筆で薄くまぶし (図6B), 型を閉じる. 次に型を輪ゴムで固定し, 布団ばさみで中央部分を押しさえる. この際, シリコンゴムが柔らかく, 二面の厚みも異なる型なので, 底部に変形による隙間が

生じないように注意する.

このような下処理を施した後, 型に二液を混合させたレジンが必要量注ぎ (図6C), 硬化させる. 硬化時間は約15分である. 硬化後, 型を開きレジンパーツを取り出

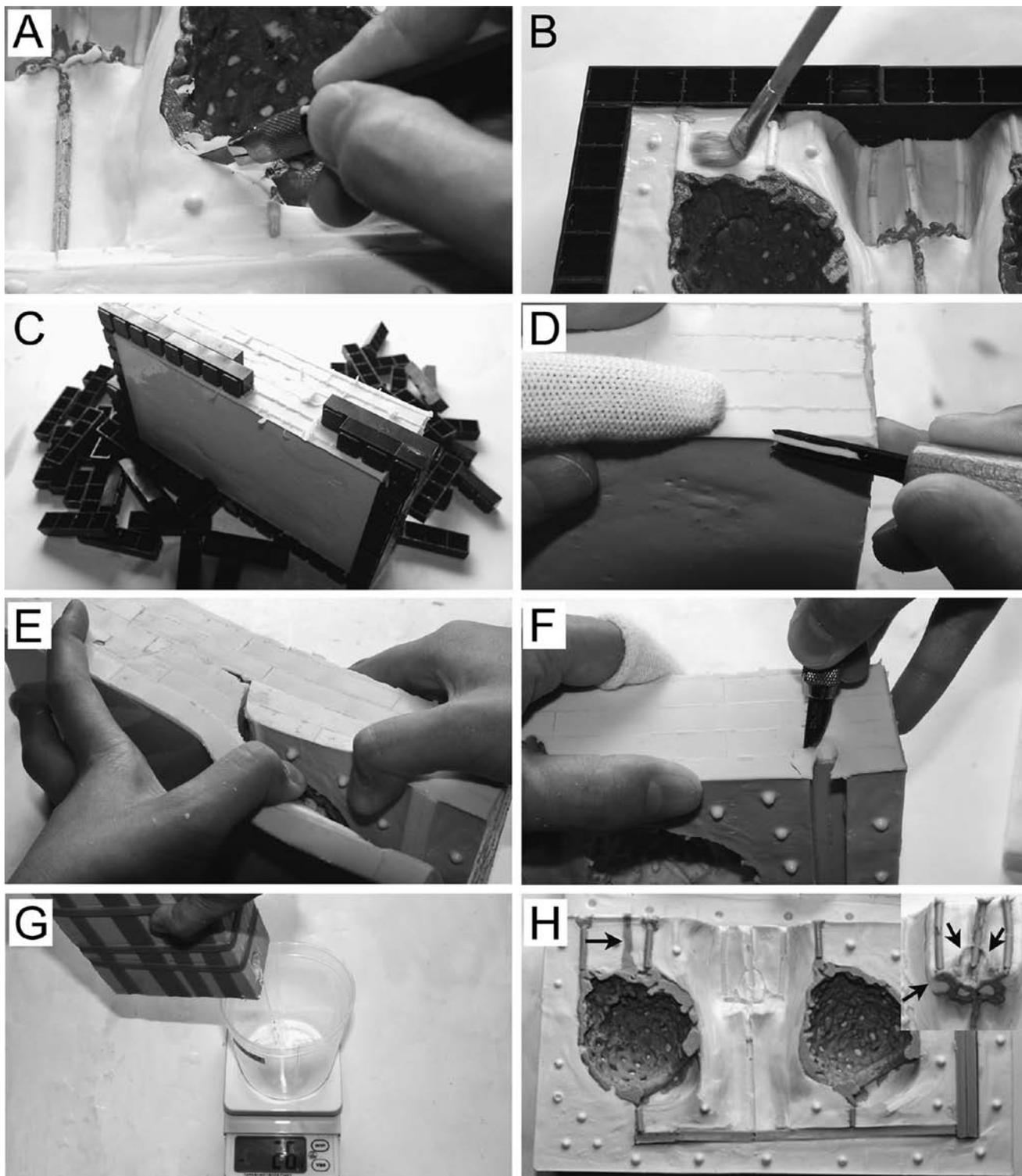


図5. 拡大模型の型取り作業 (続き). A. 余分なシリコンゴムを除去する. B. シリコンゴム同士の張り付きを防ぐため, ワックスを塗布する. C. 硬化後, 枠を外す. D. 表面のバリや角を落とす. E. 型を開く. F. 湯道等を整える. G. 型に水を注ぎ, 湯道の具合やレジンの必要量の目安を調べる. H. 必要に応じて型を調整する. 今回は気泡溜まりができた部分に空気抜け (矢印) を追加した.

す（図6D）。取り出し後はシリコンゴム型のちぎれやすい殻孔部分について破損を調べ、必要に応じ補修する。

型から取り出したレジンパーツには、不要な部分が付いているので、整形を行う。まず、ニッパーで切り出し

た各パーツを中性洗剤で洗い、付着した離型剤を除去する（図6E）。その後、原型を参考にしながら、ヤスリやナイフ、ドリル刃を装着したピンバイス等の道具を用いて、バリ取りと殻孔の整形を行う（図6F）。また、気泡

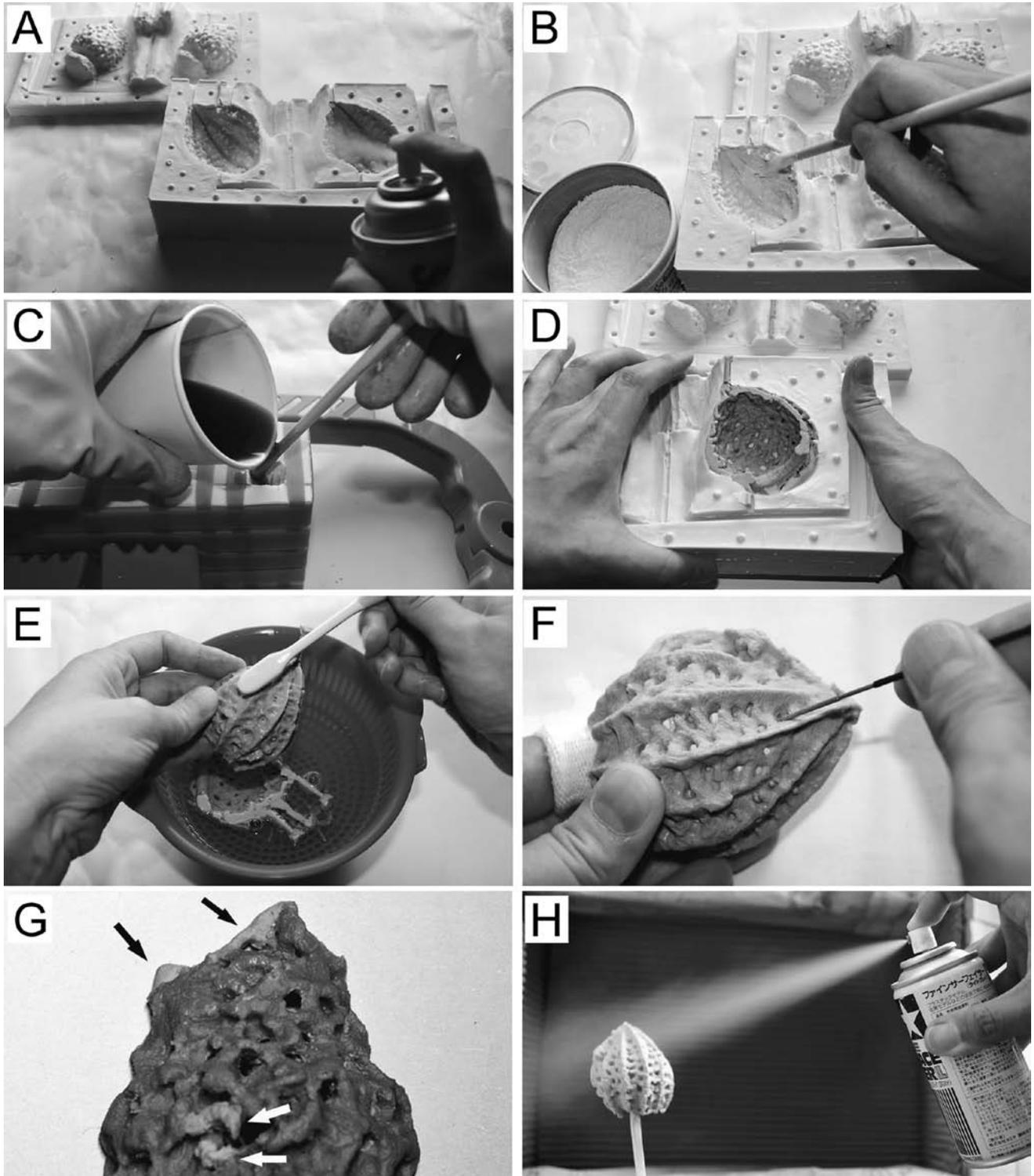


図6. 複製作業の手順. A. 離型剤の噴霧. B. 気泡を防ぐためベビーパウダーを型に塗布する. C. レジンを型に注ぐ. D. 硬化したレジンパーツの取り出し. E. 洗浄. F. 棒ヤスリ等で整形する. G. 気泡で欠けてしまった部分は、パテを盛って補修する（矢印）. H. 塗装して完成.

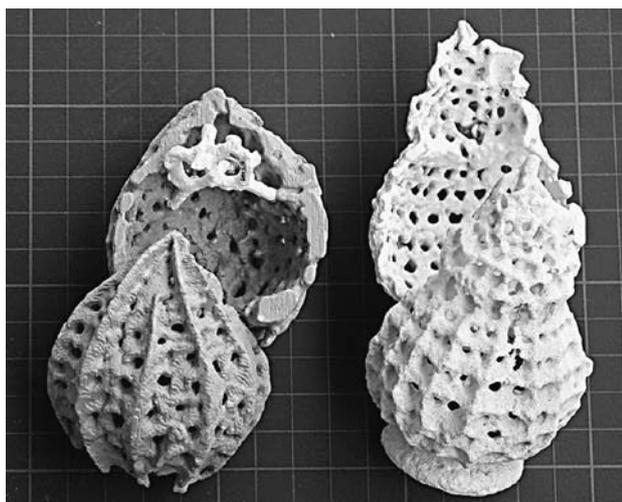


図7. 完成した *Rhopalosyringium scissum* (左) と *Pseudotheocampe urna* (右) の複製。 *Rhopalosyringium scissum* の骨針は、殻の片側に細い針金を使って軸打ちし、接着固定してある。

による欠損部分（球状の穴になる）が目立つ場合は、パテを盛って穴を埋める作業を行う（図6G）。最後にサーフェーサーと呼ばれるプラモデル用の下地塗装を吹きつけて（図6H）、複製の完成となる（図7）。なお、図7で示した *R. scissum* の頭部室の骨針は、殻の片側に細い針金を使って軸打ちしてから接着固定してある。

### 実習の実施とアンケート結果

2012年11月および2013年10月に新潟大学理学部地質科学科開講「古無脊椎動物学実験」の受講者（3年次）を対象に本実習を実施した（図8）。2012年度の受講者は6名、2013年度は12名であった。これを行う前週の実験にて、複製する種を含む放散虫化石群集の実体顕微鏡観察を行った。有機溶媒と刃物を扱うための安全対策として、



図8. 実習の様子。2013年10月25日に行った新潟大学理学部地質科学科開講「古無脊椎動物学実験」にて撮影した。

実習はドラフトのある実験室で行い、マスク、手袋と白衣、指サックやテーピングを準備した。なお、ドラフトは塗料を吹きつける際に使用したが、排気できる環境であれば必須ではない。約3時間の実習を、説明と実演、作業の実施、放散虫とその形質の解説で構成し、そのうち最も時間がかかる整形作業に70分を充てた。2種の放散虫（*P. urna*と *R. scissum*）の型を受講者に選択させたところ、2012年の実習では骨針があるという理由で6名中4名が *R. scissum* を選び、2013年では先の実習で観察したからという理由で12名中8名が *P. urna* を選んだ。受講者は集中して熱心に作業を行い、拡大模型の複製を完成させていた。プラモデル製作を趣味にしている人がいるグループは全体的に作業が速かった。レジンの攪拌不足による硬化失敗が両年とも1~2件あり作業のやり直しを行ったが、それ以外に目立った失敗はなかった。実習終了後に30分程度作業を続行する者が数名出た。

実習後に、作業、学習教材としての効果、自由記述の3項目から成るアンケートを行った。両年とも作業量は、受講者全員が「適当」と回答し、作業時間と内容は各々「適当」、「簡単だった」という意見が過半数を占めた。学習教材としての効果および自由記述の回答結果は、それぞれ図9と表1に示す。受講者は、拡大模型の作製と観察を通して「構造を好きな角度から観察できる」点と「骨格を三次元的に確認できる」点を特に高く評価していた。他方、「各形質を具体的に認識できる」点の評価は両年とも低かった（図9）。これについては、今後、代表的な形質が分かりやすい化石の形状データを得るとともに、形質の説明をさらに丁寧に行う必要性を感じた。

今回の実習では、少数生産型組み立て式模型の複製手法を利用し、骨格を分割して造形したことによって、型取りしやすさだけでなく内部構造と骨針の観察を可能にした。自由記述の回答（表1）からは、受講者が「殻の全体像」から「細部」、「顕微鏡では分かりにくい内部の

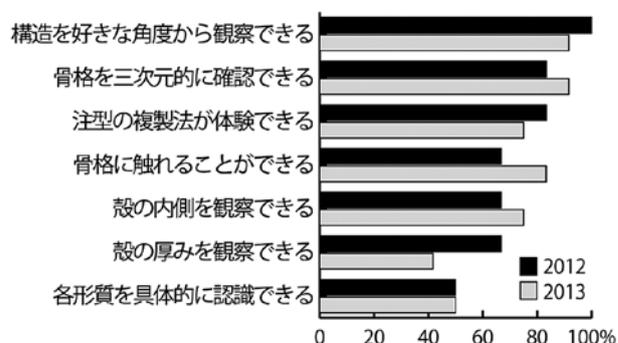


図9. アンケート結果（学習教材としての効果）の集計（複数回答形式）。

表1. アンケート結果（自由記述）.

<p><b>A. 感想・コメント</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・種毎の骨格の違い（構造や殻の厚さ）を認識できた.</li> <li>・穴が意外と多かった. 後ろの大きな穴が完全な丸でなく, 左右で少し型が違っていた.</li> <li>・内部構造や表面の凹凸の様相を観察できた.</li> <li>・殻の全体像を具体的に観察できたので, より理解が深まった.</li> <li>・顕微鏡では分かりにくい内部の構造や細かい構造が拡大模型を作製してよく分かった.</li> <li>・実際に手で触れて自由に動かせるので, 顕微鏡では観察できない部分も分かりやすかった.</li> <li>・レプリカをただ作るだけでなく, 作りながら殻のつくりを観察することが出来て良かった.</li> <li>・自分でバリ取りなどをしていくことで, 模型の隅々まで見ることができると思った.</li> <li>・ウレタン樹脂の特性を知ることができた. レプリカ作製の手順を体験できた.</li> <li>・一人一人に骨格標本ができてうれしい.</li> <li>・簡単に楽しかった.</li> <li>・準備が大変だと思うが, またやってほしい.</li> <li>・実習内容の作業中は危険物質（有機溶媒）を扱ったりしたが, 少し工夫をすればもっと小さな子供相手でもできるのではないかと思った.</li> <li>・中学生などに受けが良さそうだと思った.</li> <li>・つくりが複雑なので, もう少し時間をとったほうが良いと思う.</li> <li>・ニッパーで本体を切り離すとき, どこまでが本体なのかで少し迷った.</li> </ul>
<p><b>B. 今後作ってみたい模型</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実習で展示してあった Nassellaria.</li> <li>・巻き貝類の殻の内部.</li> <li>・異常巻きアンモナイト（ニッポニテスとか）を作ってみたい. 重心の位置を見たりしたい.</li> <li>・小型脊椎動物, 貝類（化石でなく現生でも面白そう）</li> <li>・トリゴニア, 腕足類, 三葉虫, ニッポニテス, フズリナ, 脊椎動物の骨（頭骨, 骨盤, 関節）</li> </ul>

構造」までを観察できていることが分かる。「自分でバリ取りなどをしていくことで, 模型の隅々まで見ることが出来る」に筆者らの狙い通りの効果が得られたことを感じた。「一人一人に骨格標本ができてうれしい」という感想からは作製物に対する満足感が窺えた. 実習後に完成物を持ち帰って鑑賞することで, 放散虫に対する興味の持続が期待できる. また, 本実習は扱う化石種によって普及活動にも展開可能であると考えているが, 受講者からも「少し工夫をすれば, もっと小さな子供相手でもできるのではないかと思った.」というコメントが得られた.

今回作製した拡大模型には半裁の状態で型取りしやすい形状の種を選んだが, 参考に展示した多節塔状の Nassellaria を作製したいという声が寄せられた (表1). 大学のカリキュラム内での実習時間を考慮すると, 整形の手間が少ない型を使うことが望ましいと考えていたが, 専門学科の3年次では高い完成度を望む傾向があり, 複雑な構造の模型も提供できるように改良していく必要性

を感じた. 今後作ってみたい模型として挙げられていた意見のなかには, 「内部」という言葉や「重心の位置を見たい」という理由が添えられているものがあり, 本実習によって3D形状計測とその造形物を用いた対象物の観察と検証という新たな研究視点の獲得が示されていた.

## おわりに

本実習の目的である, 従来の顕微鏡観察とは異なる新しいアプローチで放散虫の骨格構造を理解させることは, 作業と完成品の観察を通して十分に達成されていた. 自作の拡大模型に対する満足度が高く, 実習後にも放散虫に対する持続的な興味が期待できる点と, CT撮像と3D造形の技術を実習者に還元できる点も, 学習教材として有効であるとの印象を受けた. 拡大模型の型を作製するまでに手間を要するが, 複製以降の作業は簡単で, 一度経験すれば実習指導が可能である. 拡大模型の複製品は安価で壊れにくく, 気軽に触れる学習教材としての活用

度は高い。今後は実習者の興味をより喚起させる模型を提供すると共に、普及活動にも展開できるよう対象年齢層の拡大をめざし、実習を改良していく予定である。

## 謝辞

新潟大学大学院自然科学研究科椎野勇太博士には、素稿を読んでいただくとともに、多くの有益なご教示を賜り、原稿が大きく改善された。本研究で複製に使用した放射虫化石の抽出には、新潟大学大学院自然科学研究科原 康祐氏の協力を得た。2012年度および2013年度新潟大学理学部地質科学科開講古無脊椎動物学実験の履修者には、実習のアンケートに協力していただいた。放射虫化石の3D形状データの取り扱いに当たり、東洋大学理工学部吉野 隆博士、独立行政法人海洋研究開発機構木元克典博士および明治大学研究知財戦略機構ガスハイドレート研究所石田直人博士にご助言を頂いた。査読者の奥村よほ子氏（佐野市葛生化石館）および板本拓也博士（産業技術総合研究所地質情報研究部門）、編集長の前田晴良博士（九州大学総合研究博物館）には有益なご助言をいただき、本稿が大きく改善された。本研究には独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金（奨励研究、課題番号24916009, 25916011, 代表者：小林由枝）を使用した。以上の方々と機関に対し、記して厚く感謝の意を表す。

## 文献

- De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J.P., Nigrini, C. and Caridroit, M., 2001. Radiolarians in the Sedimentary Record. 533p., Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- Fleet, A.J. and Robertson, A.H.F., 1980. Ocean-ridge metalliferous and pelagic sediments of the Semail Nappe, Oman. *Journal of the Geological Society*, **137**, 403–422.
- Foreman, H.P., 1971. Cretaceous Radiolaria, Leg 7, DSDP. In Winterer, E.L., Riedel, W.R., et al. eds., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **7**, 1673–1693. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Görög, Á., Szinger, B., Tóth, E. and Viszkok, J., 2012. Methodology of the micro-computer tomography on foraminifera. *Palaeontologia Electronica*, **15**(1), 3T, 1–15.
- Ishida, N., Kishimoto, N., Matsuoka, A., Kimoto, K., Kurihara, T. and Yoshino, T., 2015. Three-dimensional imaging of the Jurassic radiolarian *Protunuma? ochiensis* Matsuoka: an experimental study

- using high-resolution X-ray micro-computed tomography. *Volumina Jurassica*, **XIII**(1), 77–82.
- 磯崎行雄・江里口良治ほか10名, 2011. 地学基礎. 231p., 新興出版社啓林館, 大阪.
- 木元克典, 2012. コラム 7.5 有孔虫の3Dモデルをつくる. 谷村好洋・辻 彰洋, 微化石一顕微鏡で見るプランクトン化石の世界, 342–343. 東海大学出版会, 秦野.
- 松田時彦・山崎貞治ほか11名, 2006. 高等学校 地学I 改訂版. 263p., 新興出版社啓林館, 大阪.
- Matsuoka, A., Yoshino, T., Kishimoto, N., Ishida, N., Kurihara, T., Kimoto, K. and Matsuura, S., 2012. Exact number of pore frames and their configuration in the Mesozoic radiolarian *Pantanelium*: An application of X-ray micro-CT and layered manufacturing technology to micropaleontology. *Marine Micropaleontology*, **88–89**, 36–40.
- 模型の王国, 2009. フィギュアの達人 上級編. 100p., 壽屋, 東京.
- Musavu-Moussavou, B., Danelian, T., Baudin, F., Coccioni, R., Fröhlich, F., 2007. The Radiolarian biotic response during OAE2. A high-resolution study across the Bonarelli level at Bottaccione (Gubbio, Italy). *Revue de Micropaléontologie*, **50**, 253–287.
- 西村祐二郎ほか7名, 2012. 高等学校 地学基礎. 192p., 第一学習社, 広島.
- O'Dogherty, L., 1994. Biochronology and paleontology of Mid-Cretaceous radiolarians from Northern Apennines (Italy) and Betic Cordillera (Spain). *Mémoires de Géologie (Lausanne)*, **21**, 1–411.
- 芝原暁彦, 2014. 様々な化石の特徴, 発掘方法, 新しい調べ方がわかる 化石観察入門. 143p., 誠堂新光社, 東京.
- 椎野勇太・桑水流 理・吉川暢宏, 2010. CT画像を用いた化石の内部構造の復元: スピリファー類の腕骨形態の例. 化石, **87**, 1–2.
- 島崎邦彦・木村龍治ほか15名, 2003. 地学I 地球と宇宙. 181p., 東京書籍, 東京.
- 鈴木紀毅・大金 薫・相田吉昭, 2012. 4.1.2 放射虫. 谷村好洋・辻 彰洋, 微化石一顕微鏡で見るプランクトン化石の世界, 76–91. 東海大学出版会, 秦野.
- 高橋啓一, 2000. 複製標本の作製. 化石研究会, 化石の研究法—採集から最新の解析法まで, 21–23. 共立出版, 東京.
- Tippit, P.R., Pessagno, E.A. Jr. and Smewing, J.D., 1981. The biostratigraphy of sediments in the volcanic unit of the Semail Ophiolite. *Journal of Geophysical Research*, **86**, 2756–2762.
- 辻 彰洋, 2012. 7.1 微化石展の開催にあたって私たちは何を目的としたのか. 谷村好洋・辻 彰洋, 微化石一顕微鏡で見るプランクトン化石の世界, 323–330. 東海大学出版会, 秦野.
- 内海和彦ほか10名, 2003. 高等学校 地学I. 184p., 第一学習社, 広島.
- 横山 隼, 2012. コラム 7.4 放射虫のシルバー立体モデル製作. 谷村好洋・辻 彰洋, 微化石一顕微鏡で見るプランクトン化石の世界, 340–341. 東海大学出版会, 秦野.

(2015年1月21日受付, 2015年6月9日受理)

