

精密立体地質模型と各種メディアとの連動による 地形・地質情報の可視化と情報発信

芝原 暁彦・今尾 恵介・大道寺 覚・柚口 三奈子・
酒井 克・小林 弘幸

精密立体地質模型と各種メディアとの連動による 地形・地質情報の可視化と情報発信

芝原 暁彦¹⁾・今尾 恵介²⁾・大道寺 覚³⁾・
柚口 三奈子⁴⁾・酒井 克⁴⁾・小林 弘幸⁵⁾

キーワード：三次元造型，プロジェクションマッピング，科学番組，教材

1. はじめに

地形図や地質図を判読する際、等高線から立体的な地形を正確にイメージしたり、さらには地層の積み重なりと地形との関わりとを把握したりすることは、初心者には困難を伴う行為である。しかし3Dプリンタをはじめとする三次元造型機によって作り出した立体模型を用いることで、これらの作業を効果的に支援することができる。例えば伊藤ほか(2013)では、三次元造型によって作り出した雌型をもとに量産した石膏製の地形模型を含む工作キット一式を、大学の屋外実習において受講者一人一人に配付し、地図の判読方法の学習や地形イメージの把握を支援した事例について述べられている。

これに加えて、立体物に映像を投影するプロジェクションマッピング技術と、三次元造型物とを組み合わせることで、より学習効果の高い模型を作り出すことが可能である。例えば芝原(2013)及び芝原ほか(2014)においては、プロジェクションマッピングに適した精密模型の造型手法と映像投影時の位置合わせ向上技術(特開 2014-032304)の組み合わせによって開発した「精密立体地質模型」の概要と、これを用いた地質情報の可視化例について述べた。

またこうした模型は博物館などで展示するだけでなく、ユーザーが模型に触れながら観察する(触察する)ことで地層や断層の広がりや把握することが可能であり、視覚障害を持つユーザーに対しても効果が見られたことは本号掲載の芝原ほか(2015)にて述べた。

本論では模型を用いた学習支援をより発展させる目的で、以下に示す2つの応用事例を紹介しつつその意義を検証する。

事例1：テレビ番組において、複数のユーザーが一つの精密立体地質模型を触察しながら科学情報の理解を深めたケース。

事例2：博物館でのイベントにおいて、複数のユー

ザーそれぞれに組立て式の地形模型を供給して工作を行ってもらい、完成した模型に各々のユーザーがプロジェクションマッピングを行うことで地形や地質の理解を促進したケース。

2. 事例1：テレビ科学番組における精密立体地質模型の運用

1) 番組で使用する模型の開発

2015年の元旦にNHK BSプレミアムで放送された科学番組「凸凹探検で謎解き！裸にしたいTOKYO」において、東京都内の地形を再現した3m四方の精密立体地質模型の展示が行われ、これを出演者らが触察することで地形と地質を理解する様子が放送された(図1)。番組名の「裸にしたいTOKYO」は、東京に林立する多数の建造物を除去し、その下に隠れている多様な地形や地質を調査するという趣旨を含む表現である。本章ではまず、番組内での使用目的に合わせた精密立体地質模型の開発経緯について述べる。

テレビ番組で地形模型による情報発信の様子を取り上げた例は過去にも見られる。例えば東日本大震災によって破壊された石巻市沿岸部の町並みが三次元造型技術によって詳細に復元され、復興のシンボルとなった様子がテレビ番組にて放送されている(益満・高橋, 2013)。

また三次元造型技術の普及に伴い、今後はユーザーが三次元造型された模型を触察しながら地図や地形の情報を把握したり、その場所の地質学的な履歴を理解したりするなど、模型の観察そのものに焦点を当てた番組の需要が高まると考えられる。そこで筆者らは今回の番組を先行例とすべく、上記の科学番組で使用するための精密立体地質模型の開発手法や、テレビ放映に適したプロジェクションマッピングの手法について検討した。

1) (独) 産業技術総合研究所 地質標本館 2) 地図研究家, 著述業
3) (株) ニシムラ精密地形模型 4) (株) ドキュメンタリージャパン
5) (公財) つくば科学万博記念財団

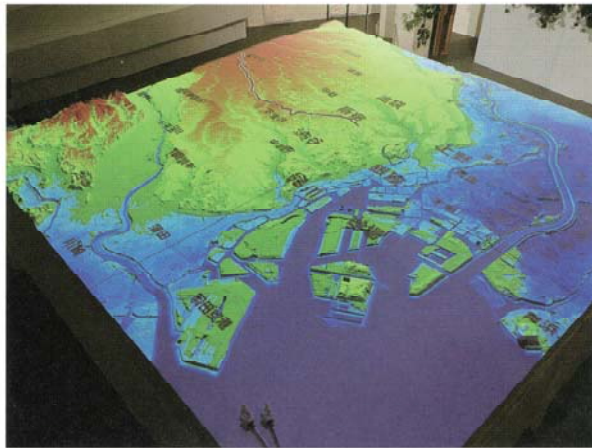


図1 東京周辺の3.0 m × 3.0 m 地形模型（縮尺1/10000）に、主要な地名と、微地形を示す標高段彩図を投影した様子（南東から北西への俯瞰）。写真上(西端)から伸びる赤いラインは玉川上水を示す。

Fig. 1 The bird's eye view of 3D projection mapping of topographical map (elevation tints) produced by GIS around Tokyo City (from the southeast to the northwest). The size of the model is 3.0 m x 3.0 m, and the scale is 1:10000. The red line shows Tamagawa waterway.

番組制作は(株)ドキュメンタリージャパンが担当し、本論著者である同社の柚口・酒井の企画により、模型表面に海進海退による地形発達を経緯や人類史、そして土地利用の変遷などを可視化する構成となった。また模型の造型は(株)ニシムラ精密地形模型が担当し、同社が行う製造工程の一部に、上記特許を実施許諾契約として技術移転する形で作業が進められた。

今回の番組では、模型を撮影した映像を高解像度の地上デジタルテレビで放送し、なおかつ模型の近接撮影（最短約10 cm）なども行う関係上、これらの運用に耐える精度が求められた。そのため下記のような条件を満たす仕様が必要と考えられた。

- A) 東京都内の微地形を再現するため、3 m 四方の寸法内に約1/10000相当の縮尺で地形模型を造型する。
- B) 大型模型に投影し、その様子を高解像度の地上デジタルテレビで放映する関係上、視聴に耐えうるだけの解像度を持つ画像（4K～2K相当）をプロジェクションマッピングする。
- C) 撮影用スタジオ内で使用する関係上、撮影用ライトの光を受けてもプロジェクションマッピングが視認できる光量を持つプロジェクターを確保する。

D) 3 m 四方の画像投影が可能な投射距離（約3.5 m以上）を確保する。

A) の要求仕様を満たすため、地形データは国土地理院発行の基盤地図情報数値標高モデル5 mメッシュ（標高）を使用し、東京駅を中心とした水平方向30 km × 30 km、高低差：-8.655 mから86.726 mの範囲を縮尺1/10000にて造型した。また、点群データの間引き処理は行わず、座標点数31 644 667点、三角網ポリゴンメッシュのライン数94 885 981、メッシュ数24 915 080面の高密度データを作成した。さらに低地部分の地形を強調するため、東京高潮対策推進連盟が発行する東京都東部低地帯立体地形図（東京高潮対策推進連盟、2013）を参考に、荒川・隅田川・江戸川沿いの沖積層を含む標高5 m未満の地域を鉛直方向30倍に、標高5 m以上の地域を鉛直方向10倍にそれぞれ強調した。また標高5 m未満の地形が5 m以上の地形を逆転することを防ぐため、標高5 m以上の地形データは全て標高値を10倍したうえで、100 mかさ上げした（例：標高4.9 mを147 m、5.0 mを150 mとする）。これらのデータを切削式三次元造型機的一种である3Dプロッタに入力し、地形模型を造型した。なお具体的な製造工程は図2にフローチャート形式で示す。

またB)及びC)の要求仕様に対応するため、投影用のプロジェクターとしてWUXGA（1920 × 1200ピクセル、アスペクト比16:10）を光量4000ルーメンで投影可能なキヤノン株式会社製短焦点プロジェクターWUX400STを採用した。さらに要求仕様D)を満たすため、鉛直方向に4 mの投射距離が確保可能な撮影用スタジオに模型を設置した。またスタジオの可動式吊り天井にプロジェクターを接続し、投射距離の調整を可能とした（表1）。

模型表面へのプロジェクションマッピングを行う前段階として、位置合わせのために図3Aに示した正方形の赤色パターン画像を約2 mの高さから水平床面上に投影し、画像の縦横比及び中心点を計測しながらプロジェクターの水準及び光軸の調整を行った。その後、中心点の座標を基準としながら模型の設置を行い、図3Bに示した白黒の格子状パターンを投影してプロジェクターと模型との間のねじれを補正した。さらに仕上げとして図4に示した標高段彩図を模型にプロジェクションマッピングし、模型上の微地形と対比しつつ、投射距離の微調整や、プロジェクターのレンズシフト機能などを用いた水平方向の微調整を行い、

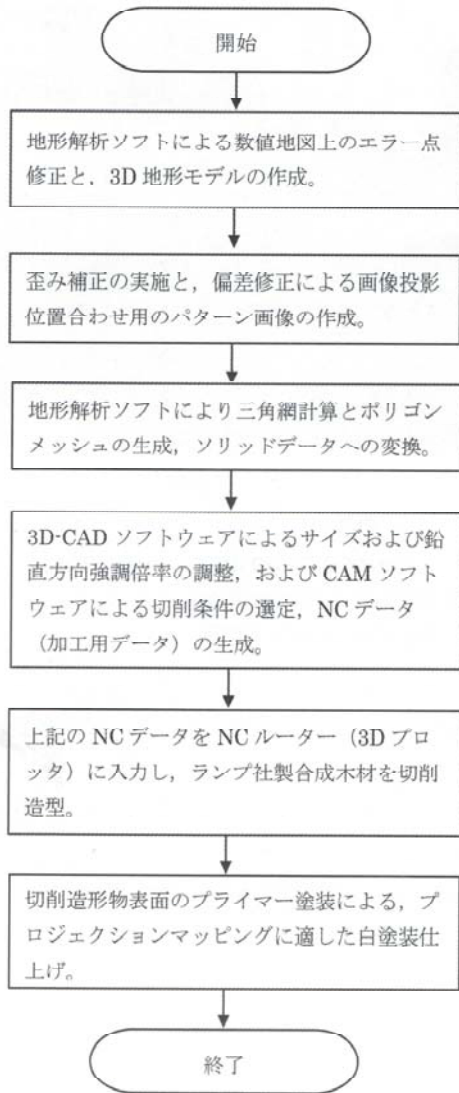


図2 模型造型のフローチャート
Fig.2 Flow chart of rapid prototyping.

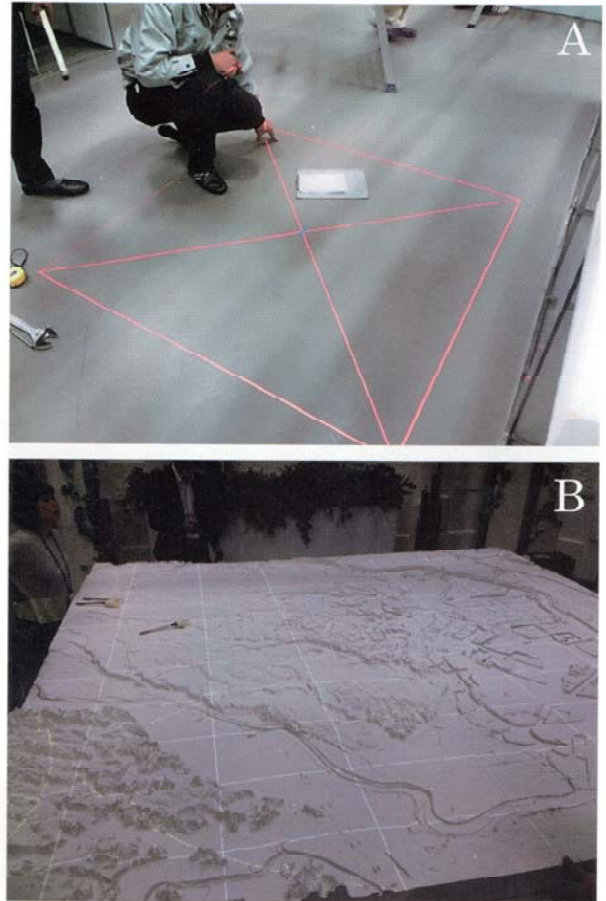


図3 プロジェクション位置合わせの様子(その1)。
A: 水平床面へのパターン画像の投影。B: 模型への格子状パターンの投影。

Fig. 3 The calibration of projection mapping around Tokyo City (part 1). A: The projection of calibration pattern on the horizontal floor. B: The projection of latticed pattern on the miniature.

表1 事例1及び2のプロジェクションマッピングに使用した機材の一覧

Table. 1 List of equipment used for projection mapping in case1 and 2.

プロジェクター機種名	事例1 キヤノン株式会社製 WUX400ST	事例2 デル株式会社製 M115HD
プロジェクター解像度	1920 × 1200 ピクセル	1280 × 800 ピクセル
プロジェクター光量	4000 ルーメン	450 ルーメン
設置用機材	特注加工品	サンワサプライ株式会社製 CR-LAST3
投射距離	約 3.5 m	約 0.6 m

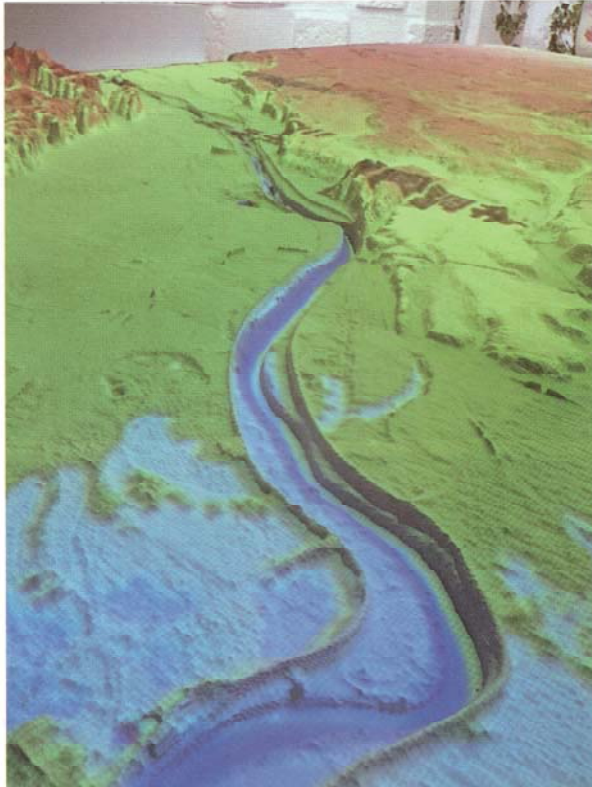


図4 プロジェクション位置合わせの様子(その2)。位置合わせ用の地形段彩図の投影。写真は多摩川下流部分を拡大したもの。地図上の微地形と模型上の微細な凹凸が合致している。

Fig. 4 The calibration of projection mapping around Tokyo City (part 2). The projection of elevation tints on the miniature. This close-up photo shows the topography around lower Tama River. The microtopography of 2D map are fitted precisely to the surface shape of the miniature.

最終的な精度を向上させた。またプロジェクションマッピングの位置調整後は、ユーザー(出演者)らが模型を観察・触察する際に、指示棒や小型カメラが模型に届かないなどの支障がないかどうかをテストし、またカメラ撮影に適した色温度となるよう、投影用画像を調整した(図5)。

2) 番組中における精密立体地質模型の運用

番組中においてはまず投影前の模型を出演者が観察し、次に主要な地名や道路網、衛星画像(表2-A, B)をプロジェクションマッピングして現在の地形の把握を行った。次に12万年前の下末吉海進、最終氷期最寒冷期における海退、縄文海進のアニメーション(表2-C, D, E)をプロジェクションマッピングし、地形形成の様子を表現した。その後は1603年以降の徳川



図5 著者の一人、酒井による模型の運用テスト。南から北への俯瞰。

Fig. 5 The operation test of the miniature by Yoshimi Sakai (Co-author). The bird's eye view from the south to the north.

表2 事例1のプロジェクションマッピング用に作成した画像一覧。

Table. 2 List of pictures used for projection mapping in case 1.

A. 現在の都内の微地形を示す段彩図(図1)
B. 主な地名(銀座、新宿、池袋等)・鉄道網・道路網・衛星画像(図6)
C. 約12万年前の海進期における古東京湾の形成(東京全域が海面下にある状態)
D. 約2万年前の最終氷期最寒冷期における海退と地形形成のアニメーション(海水準低下による東京湾の陸化と、その際の河川侵食で形成された開析谷、木村ほか(2012)をもとに作成した現在の沖積層基底標高)
E. 約6000年前における縄文海進と低地の形成、武蔵野台地における赤羽～上野の海食崖の形成(図7)
F. 徳川入府時(1590年)の海及び河川の分布(日比谷入江の位置)、1660年における神田川の流路変更の様子
G. 五街道(東海道・日光街道・奥州街道・中山道・甲州街道)の道筋
H. 江戸時代の水運網、玉川上水のライン配水図・神田上水配水図

幕府における治水の様子、人為的な地形開発の経緯などを表示し(表2-F, G, H)、東京が地形の凹凸を生かして発達した都市であることを表現した。

模型の撮影には通常のカメラやクレーンカメラなどに加え、ウェアラブルカメラの一種である米

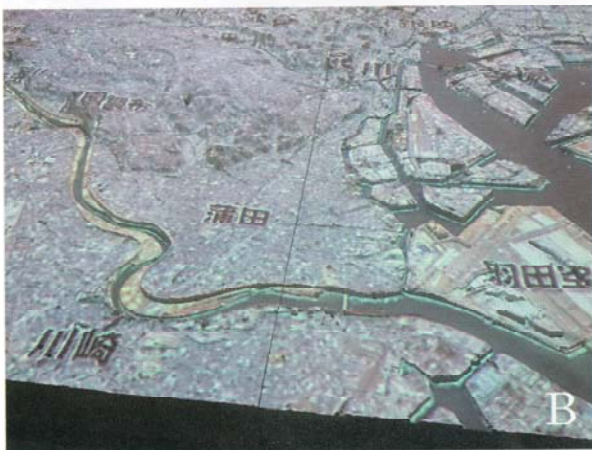
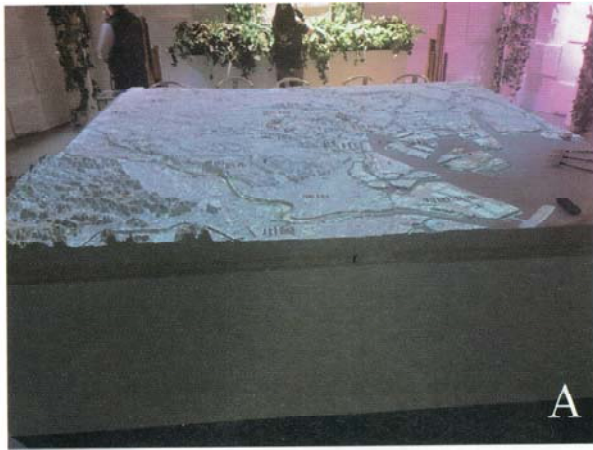


図6 ASTER衛星画像の投影例。A: 南から北への俯瞰。B: 多摩川下流～羽田空港付近の拡大画像。

Fig. 6 The projection mapping of ASTER satellite image. A: The bird's eye view of the miniature (from south to north). The close-up photo around lower Tama River and Haneda Airport.

Woodman Labs 社製カメラが使用された（図8）。このカメラを用いた微地形のクローズアップ撮影により、本来の地形と、人為的な開発によって形成された地形との違いについても観察が可能となった。また著者の一人である今尾により、最終氷期最寒冷期には最大で100 mを越える海水準低下があり、その際に形成された古東京谷が地下に隠れていること、武蔵野台地の下町との境界は枝葉のような複雑な形状をなしていること、縄文海進による低地（図7）が形成され、さらに海食によって日暮里崖線が形成されたなど、地形発達の様子が解説された。また同時にこれらの地形を生かし、江戸時代には日比谷入江の埋め立て、駿河台の形成、五街道の工事、神田川の流路変更や土手の建設による洪水対策、神田上水・玉川上水による飲料水の確保等によって現在の東京の原型となる地形が作られたことや、明治時代以降の鉄道路線工事に伴って



図7 海進・海退画像の投影例（白色部分が陸地、濃紺色部分が海）。写真は縄文海進時における海食崖形成の様子。

Fig. 7 The projection mapping of transgression and regression on the miniature. White color shows land and navy-blue color shows sea. This photo shows the location of sea cliff and the Jomon transgression.

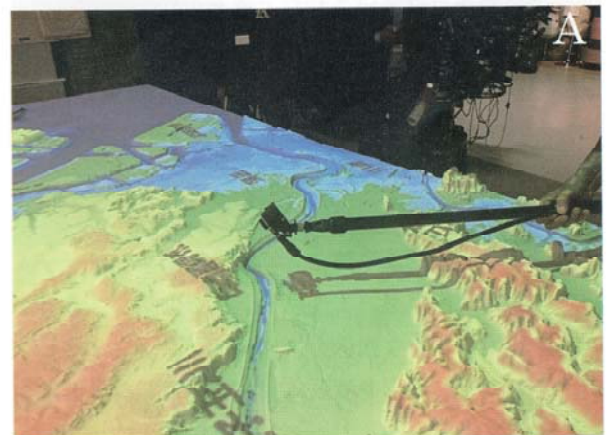


図8 A: GoProによる拡大画像撮影。B: 東京駅周辺を拡大撮影した様子。

Fig. 8 A: The magnified photographing by GoPro Camera. B: The close-up pictures around Tokyo Station taken by GoPro Camera.

形成された大地の切り通しや築堤が、現在も台地上の「引っかけ傷」や低地の「細長い盛り上がり」状の地形として残されていること、そして戦後の高速道路工事に伴って河川の埋築が行われたことなど、人為的な地形の改変についても解説が加えられた。

このように模型を通した体験とプロジェクションマッピングによる連続的な情報の表示により、東京が持つ多種多様な地形とその発達史、及びそれらを駆使した都市の発展史についての情報を出演者に対して多面的に提供することができた。

なお以前より、精密なプロジェクションマッピングを行う場合、カメラで撮影した精密立体地質模型の映像をモニターに映した際に、映像の視聴者が模型をCGによる描画と混同するという問題がたびたび発生していた。しかし今回の番組では出演者が模型に直接触れ、またウェアラブルカメラを使用した観察を行うなどユーザーと模型間とのインターフェースが数多く取り上げられたため、模型のアナログ的な側面が強調され上記問題点は解決されたと考えられる。

3. 事例2：工作キットと精密立体地質模型との連動による教育活動

前章では、一つの大型模型を複数のユーザーが触察し、地形や地質を理解した事例について述べた。本章ではこれと対照的な事例として、複数のユーザー一人一人に簡易型の模型（工作キット）を供給し、各自が自作の模型に様々な画像をプロジェクションマッピングすることで、地形や地質に関して学習した事例について報告する。

この試みはつくばエキスポセンター（科学館）のワークショップイベントとして行われたものであり、「筑波山を作ってみよう！3Dプリンタによる地図・地質図の立体化」と題して開催された。

イベントではまず三次元成型機で造型した筑波山や富士山の精密立体地質模型を展示し、参加者にこれらの模型を触察してもらいながら、地形・地質の解説を行った（図9）。その後、各参加者に筑波山模型の工作キットを配布し、それぞれの参加者が筑波山の立体模型を制作した。この工作キットは厚さ3mmのスチレンボードを用い国土地理院発行の縮尺1/25000地形図「筑波」「柿岡」を基に、筑波山を50m刻みの等高線で切り離して作成した29個のパーツから構成され、参加者が手作業で積層して完成させるものである（図10、11）。なお模型は鉛直方向に約1.5倍強調

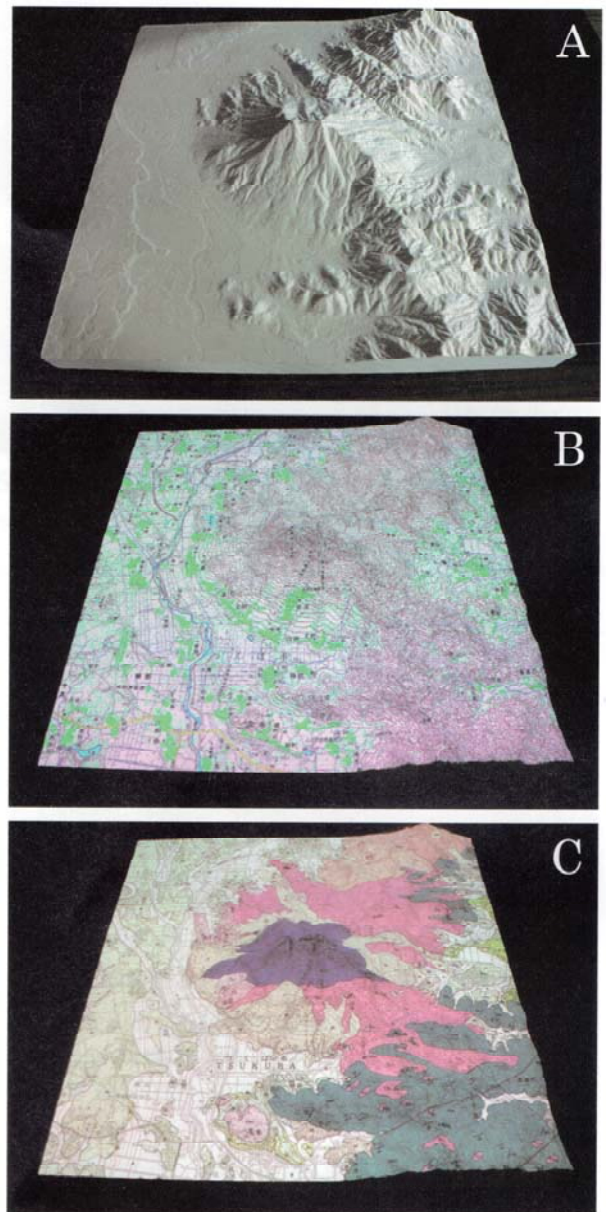


図9 筑波山の精密立体地質模型。A: 投影前, B: 5万分の1国土地理院数値地図の投影, C: 筑波山地質図の投影。

Fig. 9 The finely detailed 3D miniature around Mt. Tsukuba. A: The projection mapping of 1:50000 topographical map published by Geospatial Information Authority of Japan. B: The projection mapping of Geological map of Mt. Tsukuba published by Geological Survey of Japan.

されている（図12）。作業に要した時間は平均約1時間であった。

模型完成後は、参加者が自分の模型に筑波山周辺の地質図（宮崎ほか、1996）をプロジェクションマッピングし、筑波山を構成する岩体と地形との関連を認識



図 10 ユーザーが作る筑波山模型のパーツとなるスチレンボード

Fig. 10 Polystyrene boards for making the miniature of Mt. Tsukuba.



図 11 接着剤を用いてパーツを積層していく様子
Fig. 11 Building-up the miniature with glue.



図 12 完成した積層型の筑波山模型。寸法 30cm × 21cm, 縮尺約 1/25000, 鉛直方向の強調倍率は 1.5 倍。

Fig. 12 An accomplished miniature of Mt. Tsukuba. Size of the miniature is about 30 cm x 21 cm and the scale is 1:25000. Length, width and height are 1:1:1.5 in ratio.

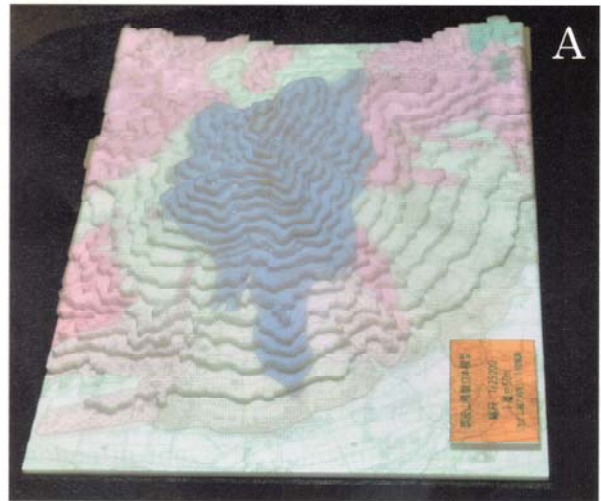


図 13 A: 完成した模型に対する地質図のプロジェクトンマッピング (西から東方向への俯瞰)。B: 自ら作った模型にプロジェクトンマッピングし、それを触察するユーザーの様子。

Fig. 13 A: The projection mapping of geological map on the miniature produced by user (bird's eye view from the west to the east). B: The palpation (touch observation) of projection mapped model by the user who built up the miniature.

した (図 13)。投影用の機材は、液晶テレビスタンドとして市販されているサンワサプライ株式会社製 CR-LAST3 を利用し、これにデル株式会社製モバイルプロジェクター M115HD と模型とを固定して、投射距離約 60 cm でのプロジェクトンマッピングを行った (表 1)。またこの際、手作り模型に最適化した画像の投影装置を設置するなど理解を助ける工夫を行った。

本イベントは、ホームページ等での告知後、一週間という比較的短期間で定員 (20 名) に達するなど、テーマに対する世間の関心の高さがうかがえたイベン

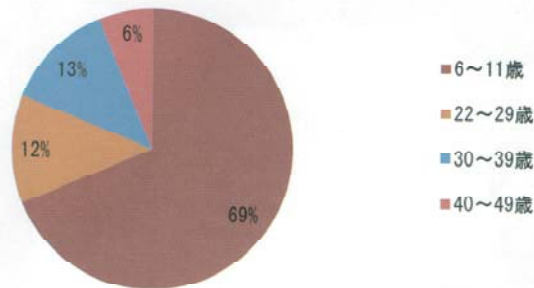


図 14 イベント参加者の年齢構成。つくばエキスポセンター (2013) より。

Fig. 14 Age distribution of event attendees (Tsukuba expo center, 2013).

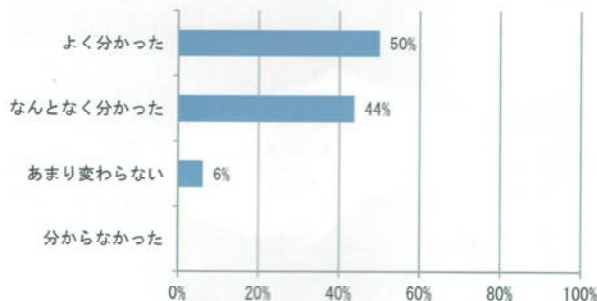


図 15 イベント終了後における、地図・地質図の理解度に関する調査結果。つくばエキスポセンター (2013) より。

Fig. 15 Results from our survey about attendees' understanding of topographical and geological maps after the event (Tsukuba Expo Center, 2013).

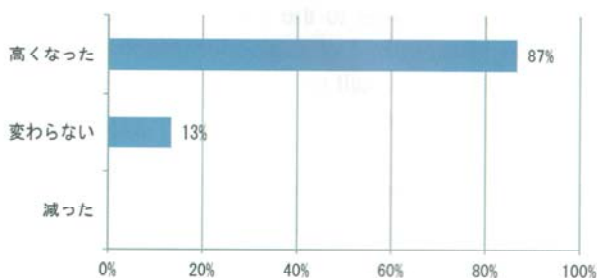


図 16 イベント終了後における、地図・地質図の立体化に対する興味や関心の変化に関する調査結果。つくばエキスポセンター (2013) より。

Fig. 16 Results from our survey about changes of attendee's interests in rapid prototyping of topographical and geological maps after the event. (Tsukuba expo center, 2013).

表 3 事例 2 のイベント参加者によるコメント。つくばエキスポセンター (2013) より。

Table. 3 Attendee's comments in case2. (Tsukuba Expo Center, 2013).

もっと 3D プリンタの技術的な話かと思っていましたが、思いがけず地質の興味深い話が聞けて楽しかったです。(22～29 歳, 茨城県)

もっといろいろなものを作りたい!!
(6～11 歳, 茨城県)

化石なども詳しく知りたいです(6～11 歳, 茨城県)

トである。親子 (小学生とその保護者) での参加がほとんどであったが、少ないながらも 20 代、40 代個人の参加もあった。参加者の詳細な年齢構成は図 14 に示す。またイベント終了後に行ったアンケートでは、程度の差はあるものの総じて 9 割以上の参加者から地図・地質図のしくみが理解できたとの回答を得たほか (図 15)、イベントのテーマである「地図・地質図の立体化」に対する興味や関心についても 8 割以上の参加者が高くなったとの回答を得た (図 16)。またアンケートのコメント欄では表 3 に示したように、地図や地質図だけでなく、その他の分野に関する興味が高まったとの回答が得られた。

4. おわりに

低価格 3D プリンタの登場や、モバイルプロジェクターの普及によって、模型に対するプロジェクションマッピングを手軽に行うことのできる環境が整いつつある。しかしながらただ模型を作り、情報を投影するだけでは、ユーザーに驚きを与えることはできても、科学教育や防災教育での使用に耐えうるコンテンツを提供することは難しい。しかし今回、自然科学など一定のテーマに沿ったプロジェクションマッピング画像の構築と、模型の触察などを通した実感を伴う観察、及びテレビなどの放送媒体や、工作キットなど複数のメディアと連携した展開を行うことで、ユーザーの科学情報に対する興味や理解を向上させるコンテンツを構築できることが確認できた。

またその際には地形や地質情報を正確に再現した模型と、精緻なプロジェクションマッピングの存在が不可欠である。それを実現するためのソースデータの精度を維持した高精度な模型を、迅速かつ安価に製造できる特質こそが、三次元造形機が持つ大きな価値であ

ると考える。

なお、報告したプロジェクションマッピング型の精密立体地質模型はまだ運用の初期段階であり、その効果についてはアンケートを通して限定的に得られているのみで、従来の平面図や立体模型に対する優位性を定量的に評価できていない状態にある。今後はユーザーによる官能試験など、認知科学的な手法を用いて評価を進める予定である。

謝辞

NHK 番組用のプロジェクションマッピング画像を作図するに当たり、明治時代の迅速測図を独立行政法人 (以下、(独)) 農業環境技術研究所の岩崎亘典氏から、ASTER 衛星画像を (独) 産業技術総合研究所の岩田敏彰氏からご提供いただいた。また NHK 編成局の田島徹氏、株式会社 NHK エデュケーショナルの相部任宏氏には模型とプロジェクションマッピングの仕様に関して様々なご意見を頂戴した。(独) 防災科学技術研究所の木村克己氏からは沖積層基底標高に関する文献をご提供いただいた。また CG デザイナー担当のヤシマヒデキ氏には、プロジェクションマッピング用画像の作図から調整にいたるまで多大なご協力をいただいた。キヤノンマーケティングジャパン株式会社の山口智久氏及び関係各位にはプロジェクションマッピングに関する技術的なサポートを賜った。株式会社ドキュメンタリージャパンの奥村浩代表、及び同社の西口友人氏には撮影当初からご支援をいただき、また撮影現場の関係各位にはプロジェクションマッピングの調整に関する実践的なアドバイスを多数頂戴した。以上の方々に、この場をお借りして深謝申し上げる。

文献

- 伊藤 孝・岡崎智鶴子・芝原暁彦・澤村 寛・三田直樹 2013. 伸縮自在印刷用フィルムを活用した立体地形モデルの作製とその教材化の試み. 地質学雑誌 119: 39-44.
- 木村克己・花島祐樹・西山昭一・康 義英 2012. ボーリングデータベースに基づく東京低地の沖積層基底面のサーフェスマデル: 埋没地形面の特徴と地形発達史. 日本第四紀学会講演要旨集 42: 28-29.
- 芝原暁彦・西山昭一・木村克己 2015. 精密立体地質模型: 3D 造型とプロジェクションマッピングを用いた地下構造の新可視化法. 地図 53(1): 36-46.
- 芝原暁彦 2013. 三次元造型技術とプロジェクションマッピングを用いた精密立体地質模型の開発と、博物館およびジオパーク地域での活用. GSJ 地質ニュース 2: 243-248.
- 芝原暁彦・及川輝樹・石塚吉浩・中野 俊・山元孝広・高田 亮・浦井 稔 2014. 国際火山学地球内部化学協会 2013 年学術総会にて展示した富士火山地質図の精密立体模型. GSJ 地質ニュース 3: 34-36.
- つくばエキスポセンター 2013. 第 25 回ミーツ・ザ・サイエンス「筑波山を作ってみよう! 3D プリンタによる地図・地質図の立体化」開催報告. つくばエキスポセンター.
- 益満 環・高橋 智 2013. 3D プリンタ活用による石巻市沿岸部の復元立体模型の製作に関する研究. 石巻専修人学研究紀要 24: 139-143.
- 宮崎一博・笹田政克・吉岡敏和 1996. 真壁地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.