

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

芝原暁彦¹⁾

1. はじめに

博物館展示や学会などにおける地学情報の一般普及や教育において、地質図の判読は非常に重要な要素である。しかしながら、専門教育や一定期間のトレーニングを受けた経験がなければ、地質の積み重なりと、それがもたらす地形の特徴を図面から読み取ることは容易ではない。一般的に、地質図や地形図をわかりやすく展示するためには三次元CGによる立体表示を行うが、パソコンや携帯端末などの平面的な画面情報だけでは立体情報の把握が難しく、より立体を三次元的に知覚するためには何らかの手段が必要となる（吉森ほか、1999）。

この問題を解決するため、地形と地質の分布を直感的に視認できる精密な立体地質模型を開発した。この模型は地質標本館における特別展示や各地のジオパーク、学会でのプレゼンテーション等で普及を進めている（伊藤ほか、2010；渡辺・芝原、2012；及川ほか、2013）。

なお本技術は現在特許出願中であるため技術的内容を記載することができない（特願2012-172692、情報処理装置、情報処理方法及びプログラム）。よってこの技術を用いた地質情報の可視化方法と、アウトリーチでの活用に観点を絞って報告する。

2. 立体模型の開発

今回開発した立体地質模型は、三次元造型機によって造型した立体地形模型の表面に、地形図や地質図などの画像情報をプロジェクターで光学投影したものである（第1図）。このように、立体物の表面に画像や映像を投影する手法は「プロジェクションマッピング」という名称で知られており、すでに各地の科学館やエンタテインメント施設で広く活用されている（北田ほか、2012）。しかし今回開発した立体地質模型は、あらかじめ投影時の位置合わせを意識した三次元造型およびデータ処理と、三次元CADを用いた投影シミュレーション



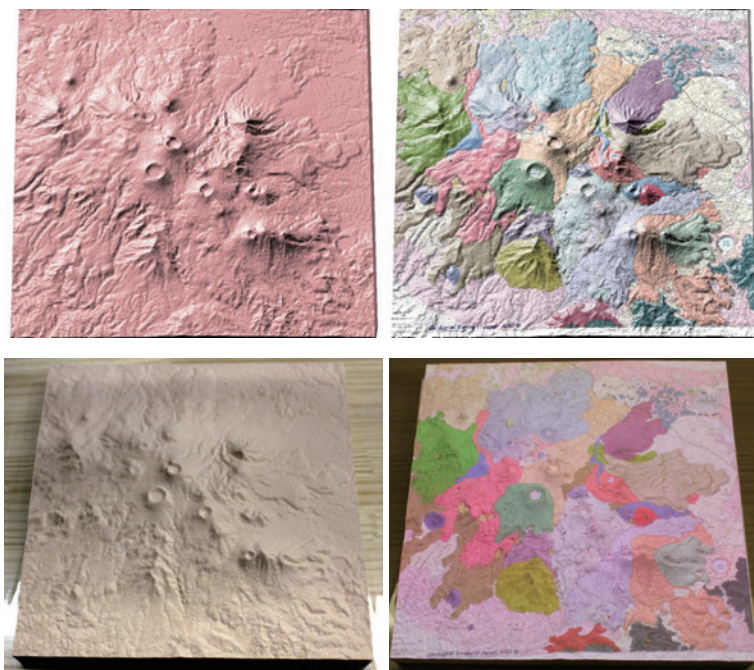
第1図 プロジェクションマッピングを行った霧島火山の立体地質模型（左：投影前、右：投影後）。模型サイズ 290.50 mm × 290.50 mm。なお、投影画像は室内灯が点灯した状態でも視認可能であるが、右側の写真では写真撮影の都合上、室内灯を消灯している。

ンおよびマーカーを使用した画像投影法を併用することで従来よりも精度の高いプロジェクションマッピングを行うことが可能となっている（第2図）。

投影の基礎となる地形模型の製作には三次元造型機を使用した。三次元造型機は加工方法によって大きく2種類に分かれ、薄膜層を順次積層することで三次元形状を形成する積層造型方式のものを三次元プリンタ、エンドミル等の工具によって金属や樹脂などを削り取っていく切削造型方式のものを三次元プロッタと呼称する。積層造型、切削造型とも、造型精度や価格面での長所短所がある。例えば積層造型は削りかすなどの廃棄物が少なく、また複雑かつ有機的な形状も造型できる。一方切削造型は積層造型に比べて選択できる材料の幅が広く、また精度や解像度は若干積層型に勝る（小林、2011）。しかし近年、両タイプともに性能向上や低価格化なども進んでいることから、機能面や価格面での単純比較は難しい。

今回の造型では、材料の自由度やランニングコスト、工作精度などを考慮し、切削造型方式である三次元プロッタ

1) 産総研 地質標本館



第2図 霧島火山地質図の投影。

上段:三次元 CAD を用いた霧島火山地質図の投影シミュレーション(左:投影前,右:投影後)。下段:実物の模型に対する投影結果(左:投影前,右:投影後)。模型サイズは 290.50 mm × 290.50 mm。なお,立体地質図の作成に当たっては,国土地理院長の承認を得て,同院発行の数値地図 50000(地図画像)及び基盤地図情報を使用した(承認番号平 24 情使,第 914 号)。

を選択した。また切削材料としては三洋化成工業株式会社製のサンモジュール SS と呼ばれる合成木材を使用した。

模型を造型するための地形データとしては,数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)を利用した。具体的には国土地理院発行の基盤地図情報 10 m メッシュ標高データ^{*1}や,スペースシャトルのレーダーによって得られた立体地形データ(Farr *et al.*, 2007),また海底地形データとして地質調査所の 250 m グリッド地形データ(岸本, 2000)や NOAA National Geophysical Data Center (NGDC) 発行の ETOPO5 等の全球地形データを使用している。

いずれの数値標高モデルも地理情報システム(米国 Esri 社製 ArcGIS 等)に読み込んだうえで逆距離荷重法による補間を行い,等高線の形状情報を付加したうえで三次元 CAD 形式のソリッドモデルデータに加工し,3D プロットによる出力を行った。完成した地形模型の表面に精緻なプロジェクションマッピングを行うことで,三次元的に図面を解読することが可能となる。

屋外でのプロジェクションマッピングにはバッテリー等の電源確保が必要となる。しかしプロジェクターによる投影の代わりとして,伸縮自在な印刷用フィルムに図面を印刷し,これを筆者が造型した石膏製の地形模型に被覆

することでプロジェクションマッピングとほぼ同様の効果を得ており,電源の確保が困難な野外巡検などにおいて利用されている(伊藤ほか, 2013)。

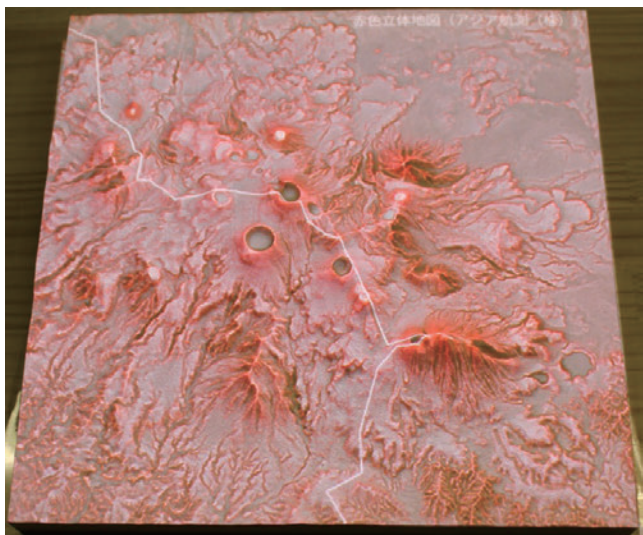
3. 地質標本館特別展での活用

博物館展示の一例として,2013年4月16日から5月末日まで開催された地質標本館春の特別展「ボラ(軽石)が降ってきた!霧島火山新燃岳の噴火とその恵み」における立体地質模型の展示について紹介する。過去の標本館特別展における立体模型の展示例としては,2007年開催の夏の特別展「三宅島火山—その魅力と噴火の教訓—」に石膏製の三宅島火山模型を提供したほか(目代ほか, 2007),2010年に開催された秋の特別展「イーハトーブの石たち—宮沢賢治の地的世界—」でも同様の石膏製岩手山模型にプロジェクションマッピングを行ったものが展示されている(澤田ほか, 2010)。しかし本技術によるプロジェクションマッピングを利用

した展示は,地質標本館では初となる。

霧島火山周辺地域の模型は,新燃岳を中心とした 21.50 km 四方の地域を 74,000 分の 1 スケールで造型した(第 2 図)。使用した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 10 m メッシュ JPGIS (GML) 形式である。造型した霧島火山周辺の立体模型表面に,井村・小林(2001)による霧島火山地質図の投影を行った。

また新たな試みとして,アジア航測株式会社が作成した赤色立体地図データのプロジェクションマッピングを行った(第 3 図)。赤色立体地図とは従来の地形図よりも明瞭に地形の凹凸を把握できる表現方法を用いた平面図であり,急傾斜ほど赤く,尾根ほど明るく,谷ほど暗くなるような色調補正を施されている。この手法により,特殊な器具や訓練を必要とせず自然な立体感を得ることが可能で,レーザー測量等で得られた高解像度地形データの表現に適している(アジア航測株式会社, 2009)。この地図は微地形の把握にも適していることから,同じく高解像度地形データによって作られた立体模型に投影することで相乗効果を得やすい。これは赤色立体地図が,陰影図のような光源方向による方向依存性を持たないため,真上から光を投影するプロジェクションマッピングとの親和性が高いことに起因すると考えられる。



第3図 霧島火山立体地質模型に対する赤色立体地図の投影。
模型サイズは 290.50 mm × 290.50 mm.

これらの成果物を駆使して、霧島火山の特徴である複合的な火山地形（火口湖，溶岩流，火砕丘，岩屑なだれ等）を効果的に把握できる展示を行った（及川ほか，2013；模型の諸元については芝原，2013，p. 39参照）。

4. 恐竜渓谷ふくい勝山ジオパーク（福井県勝山市）における活用

ジオパークにおける活用例として、恐竜渓谷ふくい勝山ジオパークにおける模型展示について紹介する。これは同市のジオパーク推進協議会の発案によるもので、同市ジオパークにおける地形や地質をはじめとした自然科学情報の可視化検討作業，および地学教育や防災教育での活用が主な目的となる。模型はかつやま恐竜の森のロビーや市役所にて使用予定であるほか，学校や博物館等の教育機関においての使用も想定している。これらの目的から，下記のような仕様が必要と考えた。

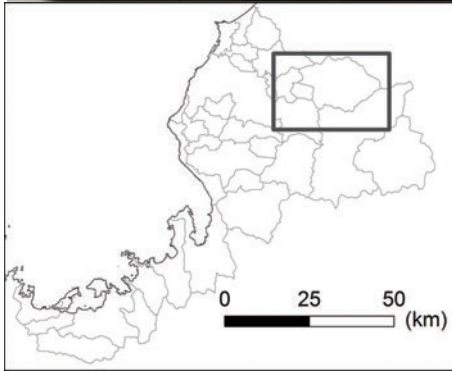
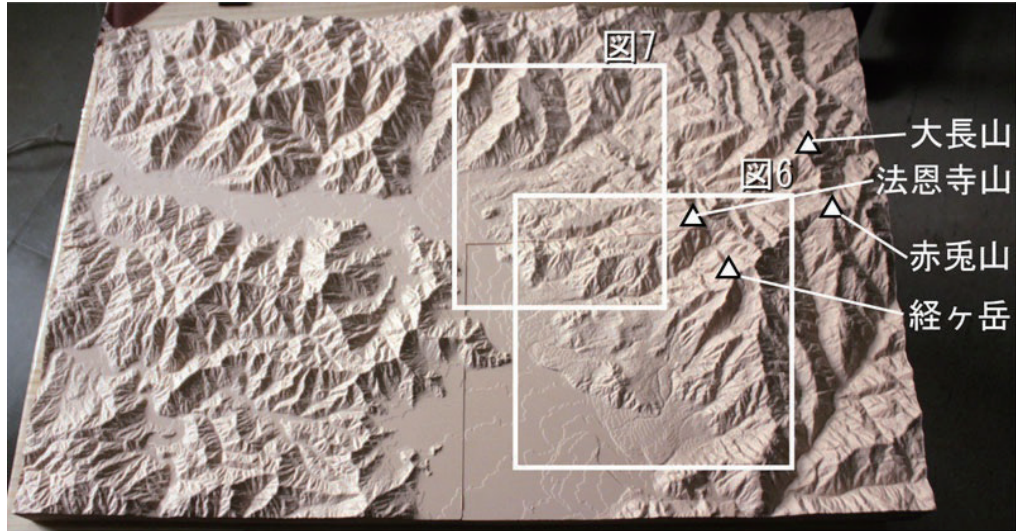
- 1) 同ジオパーク内に分布する大長山（1,671 m）^{おおちょうさん}，赤兎山（1,628 m）^{あかうさぎやま}，経ヶ岳（1,625 m）^{きょうがたけ}，法恩寺山（1,356 m）^{ほうおんじさん} などから構成される火山性山地が把握できること。また経ヶ岳山頂にて発生した岩屑なだれによって形成された，勝山市南東部の六呂師高原^{ろくろし}や塚野原台地の斜面が把握できること。
- 2) 勝山ジオパークの地質を特徴づける飛騨変成岩類や恐竜化石を産する手取層群^{おもだに}，面谷流紋岩類や中新世前期の古期安山岩類，そして勝山市周辺地域に最も広く分布する，4.63 Ma から 0.88 Ma までの年代値

を示す新期安山岩類など，多様な地質分布が一目で把握できること。

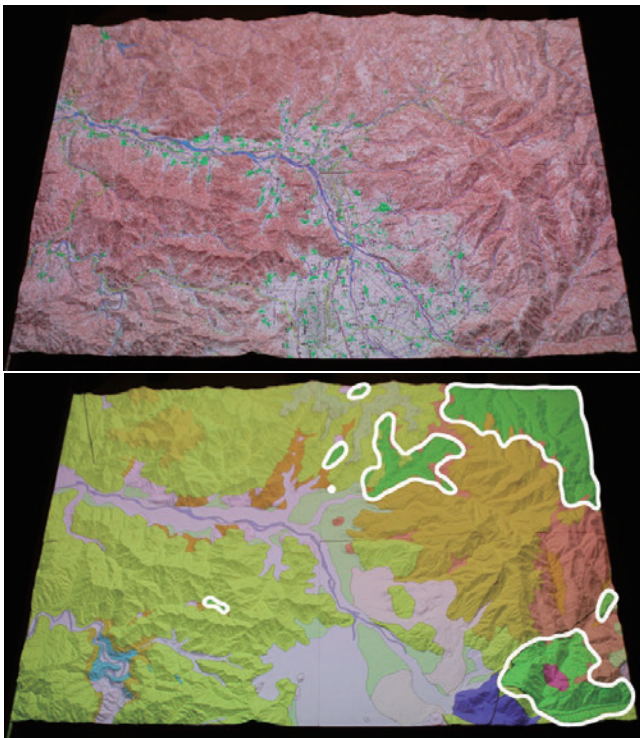
- 3) 勝山ジオパークにおいて特徴的である河岸段丘面での市街地形成および土地利用を可視化するため，勝山市街地の大部分が含まれる河岸段丘低位面（福井県，1996，1998）が確認できる解像度での造型を行い，また市街地分布状況や等高線を把握するために国土地理院の5万分の1地形図および福井県（1996，1998）による地形分類図や，経ヶ岳火山の岩屑なだれシミュレーション等の明瞭なプロジェクションマッピングが行えること。
- 4) 学校の教室などにも容易に持ち込めるよう，運搬しやすい形状と大きさであること。

1) および2) の要求仕様を満たすため，国土地理院発行の基盤地図情報 数値標高モデル10 mメッシュ JPGIS (GML) の地形データをもとに，総ポリゴン数1,175,988 の高密度なソリッドモデルデータを作成し，3Dプロッタでの出力を行った（第4図）。また造型用の材料に関しても再検討を行い，これまで使用していたサンモジュールSSに代わって，サンモジュールMHを採用した。サンモジュールMHの密度は気温25℃の条件下で0.35g/cm³と，サンモジュールSSよりも約1.3倍高密度である（三洋化成工業株式会社，2012）。そのため素材のきめが細かいことから，高密度データの造型に適していると判断した。また画像投影用のプロジェクターとしてBenQ株式会社製モバイルプロジェクター GP10を採用した。本機は1,280 × 800ピクセル表示に対応していることから比較的高解像度の画像を投影することが可能で，またモバイルプロジェクターながら550ルーメンの輝度を持ち，コントラスト比が10,000:1であるため，プロジェクションマッピング時に高輝度かつ高解像度な画像を投影することができる。サンモジュールMHで造型したきめの細かい模型に，高解像度かつ明瞭な画像データを投影することで，最終的な視認性が大きく向上した。以上の要素により，火山性山地や地質分布を可視化した（第5，6図）。

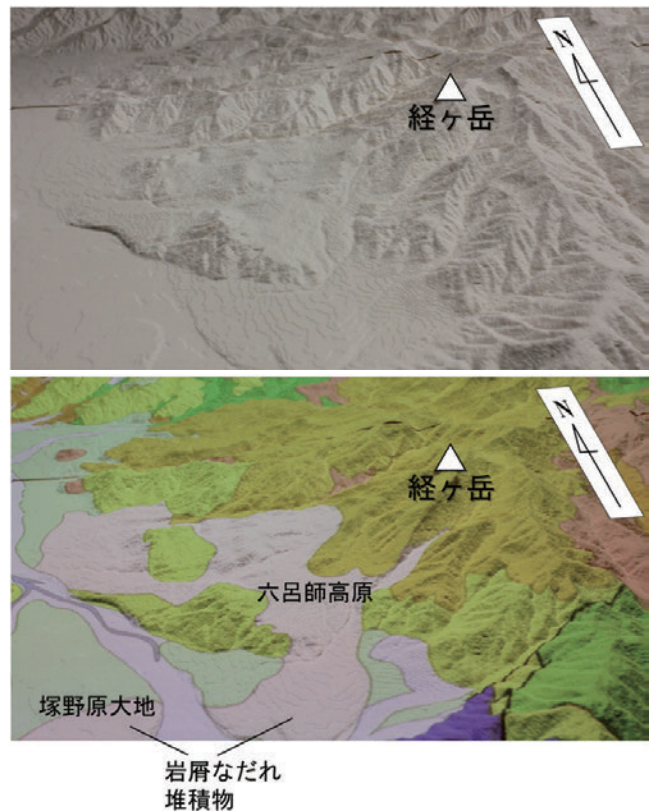
3) に関しては，約1/56,000のモデル縮尺ながら，等高線を10 m間隔で精密造型することで，標高300 ~ 500 mに分布する河岸段丘高位面と，標高140 ~ 147 mの河岸段丘低位面Ⅰ，およびその下位に接する河岸段丘低位面Ⅱ（福井県，1996）の各段丘の分布を概ね可視化した（第7図）。また前述のとおり高解像度のプロジェクターを採用したことで，5万分の1地形図，20万分の1地質



第4図 恐竜渓谷ふくい勝山ジオパーク周辺の地形模型。
上：勝山市周辺の立体地質模型（白枠は第6、7
図の位置を示す）。下：造型位置（灰色枠内）。模
型サイズは599.92x396.58（mm）。なお立体地質
模型の作成に当たっては、国土地理院長の承認を
得て、同院発行の数値地図50000（地図画像）及
び基盤地図情報を使用した（承認番号平24情使
第699号）。



第5図 勝山市周辺の地形・地質図の投影。
上：国土地理院数値地図50000（地図画像）の投影結果。
下：20万分の1数値地質図幅の投影結果。白枠は手取層群
の主な分布域を示す。



第6図 経ヶ岳およびその岩屑なだれによって形成された六呂師高
原、塚野原台地の分布（上：投影前，下：20万分の1数値
地質図幅の投影結果）。

図, 5万分の1地形分類図等の投影に対応した。

4) に関しては, 液晶モニタースタンドとして市販されているサンワサプライ製CR-LAST7を利用することで対応した。このスタンドは容易に分解と持ち運びが可能であるため, これを改造してモバイルプロジェクターおよび立体模型の設置機構と, 投影距離および角度の微調整機構を追加し, 可搬性の高い投影システムを開発した(第8図)。なお, 模型の主な諸元は以下のとおりである。

- ・ 造型範囲：勝山市を中心とした東西34.12 km, 南北22.50 kmの範囲
- ・ 模型サイズ：599.92×396.58 (mm)
- ・ 縮尺：1/56,879
- ・ 高さ方向強調倍率：1.04
- ・ 等高線間隔：10 m
- ・ 総ポリゴン数：1,175,988

5. 今後の展開

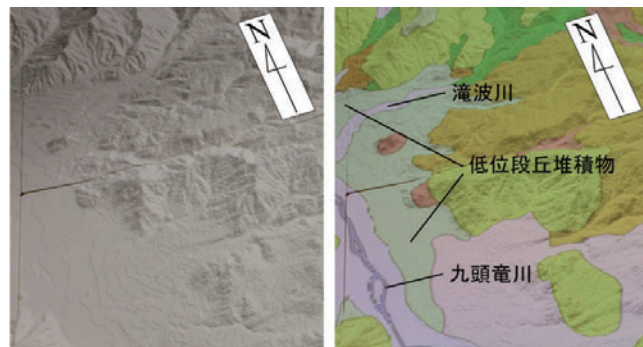
本立体模型はまだ開発段階であるため, 従来の平面図や立体模型に対する優位性を定量的に評価できていない。そのため今後は画像解析による模型の等高線抽出を行うなどの手法を用いて従来法との精度比較を行うほか, 視覚, 触覚による官能試験を用いた評価も行う予定である。

さらに現在, 地質標本館内にて視覚障害を持つ見学者の方々にも地形の凹凸を把握して頂くため, 日本列島の地形と日本周辺の海底地形とをシームレスに造型した立体模型の運用なども行っている。また技術面での展望として, プロジェクションマッピングを行った立体模型に動的な情報をさらに追加するため, 「拡張現実^{*2}」と呼ばれる技術との組み合わせも試験的にやっている。

ジオパークでの応用に関しては, 恐竜渓谷ふくい勝山ジオパークの例のように, 各地域でアピールポイントとなる地形および地質学的な特徴がそれぞれ異なるため, それを可視化するための技術を地域ごとにカスタマイズ, もしくは新規開発するケースが多い。これらの技術的内容については別途報告する。

6. 謝辞

産業技術総合研究所名誉リサーチャーの加藤碩一氏には, ジオパークや各学会にて本精密地質模型を活用する貴重な機会とご意見を頂いた。また同研究所 地質標本館の



第7図 勝山市街地の大部分が含まれる低位段丘堆積物の分布とその地形。左：投影前, 右：20万分の1数値地質図幅の投影結果。



第8図 立体地質模型の投影システム。
左：投影システム全体（大きさはプロジェクター部分も含め高さ約1.5 m, 幅約60 cm）。右：カメラ用スライダを流用したプロジェクターの上下方向への微調整機構。

利光誠一, 渡辺真人, 及川輝樹, 住田達哉の各氏, 地質分野研究企画室長の伊藤順一氏, 関東産学官連携推進室長の橋本亮一氏, 産学官連携推進部プロジェクト支援室の松浦晃久氏, 地質情報研究部門の三田直樹氏には, 模型の造型と活用にあたって数多くのご助言とご支援を頂いた。

恐竜渓谷ふくい勝山ジオパークにおける模型展示に際しては, 福井県勝山市の山岸正裕市長, 勝山市役所未来創造課の水上実喜夫課長, 恐竜渓谷ふくい勝山ジオパーク推進協議会の松村誠一会長, 勝山市未来創造課ジオパーク推進室の畑中健徳室長に模型造型に関わる機会を頂戴した。以上の方々に深謝申し上げる。

*1 国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービス (<http://fgd.gsi.go.jp/download/> 2013/04/18 確認)。

*2 拡張現実 (Augmented reality :AR) と呼ばれる技術で, 現実環境

と仮想環境を融合する複合現実感 (Mixed Reality : MR) と呼ばれる技術の一分野に含まれる。ユーザーが見た現実の風景にコンピュータグラフィックスによって描かれた三次元オブジェクトをオーバーレイ表示する技術であり、これを実施するための手段としてシースルー型のディスプレイを使用する光学的シースルー方式や、カメラによって撮影された映像上に仮想環境を描画するビデオシースルー方式などが存在する (神原, 2010)。

文 献

- アジア航測株式会社 (2009) 赤色立体地図による高精度微地形判読. 砂防技術総覧, JSECE Publication, no. 56, 1-2-3.
- Farr, T. G., Rosen P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Ko-brick, S. H. M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D. (2007) The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- 福井県 (1996) 5万分の1土地分類基本調査「越前勝山・白山」. 福井県, 43p., 付図4葉.
- 福井県 (1998) 5万分の1土地分類基本調査「永平寺」. 福井県, 42p., 付図4葉.
- 井村隆介・小林哲夫 (2001) 霧島火山地質図. 1:50,000 火山地質図 11, 1sheet, 地質調査所.
- 伊藤順一・西来邦章・芝原暁彦 (2010) 地質ジオラマを用いた3D火山地質情報展示. 地質ニュース, no. 671, 34-38.
- 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.
- 神原誠之 (2010) 拡張現実感 (Augmented Reality : AR) 概論. 情報処理, 51, no. 4, 367-372.
- 岸本清行 (2000) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353, 地質調査所.
- 北田大樹・和田孝志・白井暁彦 (2012) RFID とプロジェクションマッピングを活用した科学館向けエンタテイメントVR システム. 情報処理学会エンタテイメントコンピューティング研究会2012 EC2012 要旨, <http://blog.shirai.la/wp-content/uploads/downloads/2012/11/Science-quest2012kitada.pdf> (2013/04/18 確認)
- 小林広美 (2011) よくわかる RP の活用法 (第4回) ラピッドプロトタイピング (RP) から3Dプリントへ最新のトレンドと適用分野. 素形材, 52, no. 11, 55-60.
- 目代邦康・谷田部信郎・青木正博 (2007) 地質標本館特別展「三宅島火山—その魅力と噴火の教訓」と, 特別講演会「火山噴火に備えて—2000年三宅島噴火を体験して—」. GSJ ニュースレター, no. 35, 4.
- 及川輝樹・筒井正明・田島靖久・芝原暁彦・古川竜太・斎藤元治・池辺伸一郎・佐藤 公・小林知勝・下司信夫・西来邦章・東宮昭彦・宮城磯治・中野 俊・渡辺真人 (2013) 第3回火山巡回展 霧島火山—ボラ (軽石) が降ってきた! 霧島火山新燃岳の噴火とその恵み—. 地質調査総合センター研究資料集, no. 578, 40p.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2005) 20万分の1数値地質図幅集「北陸, 中部及び近畿」. 数値地質図, G20-5, CD-ROM, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 三洋化成工業株式会社 (2012) サンモジュールシリーズ. 三洋化成工業株式会社, 東京, パンフレット No. JS20000006A, 3-4.
- 澤田結基・長森英明・青木正博・加藤碩一・伊藤順一 (2010) 秋の特別展「イーハトーブの石たち—宮沢賢治の地的世界—」. GSJ ニュースレター, no. 75, 4-5.
- 芝原暁彦 (2013) 精密立体地質模型の開発と博物館展示への応用. 地質調査総合センター研究資料集, no. 578, 38-39.
- 渡辺真人・芝原暁彦 (2012) 第5回ジオパーク国際ユネスコ会議報告. GSJ 地質ニュース, 1, no. 11, 351-352.
- 吉森勇人・松宮雅俊・竹村治雄・横矢直和 (1999) 2次元/3次元空間のシームレスな融合によるモデリング環境. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 4, 353-354.

SHIBAHARA Akihiko (2013) 3D visualization and outreach of geological information in museums and geoparks, based on finely detailed miniatures manufactured by rapid prototyping equipment.

(受付:2013年4月18日)