

精密地形模型の縮尺の違いによる地物認識性に関する検討 ～航空レーザ測量による高細密地形データ（八王子城跡）を用いた精密地形模型の試作～

尾身 洋・木之下 章・村上 尚平（東京カートグラフィック株式会社）

瀬戸島 政博（公益社団法人日本測量協会）

秋山 幸秀（朝日航洋株式会社）

本田 謙一（国際航業株式会社）

1. はじめに

近年、高精細な数値標高データの充実がめざましい。これは航空レーザ測量や解析処理技術の普及発展、パソコンの処理能力の向上によるところが大きく、今後、UAVの活用によって今まで以上に高精細化、スピード化が図られて行くことが期待される。

一方で、地形模型の製作については、最近では比較的安価な3Dプリンタが登場し、国土地理院でも、地形模型用のデータ提供サービスを開始するなど、地形模型の普及への取り組みが活発化している。

本検討では、現状の3Dプリンタでどこまでリアルな地形、地物の模型化ができるかを確認するために、高精細な数値標高データを用いて大縮尺の精密地形模型を試作し、縮尺の違いによる地物認識性について検討することとした。今回試作に使用した高精細な数値標高データと試作した精密地形模型の例を図1に示す。

2. 3Dプリンタについて

最近になって3Dプリンタという名称が用いられるようになってきているが、その技術は1980年代から研究され、発展して来た。3Dプリンタが流行り出したのは、装置の進化よりも近年の3Dプリンタの低価格化に加え、3Dデータが充実し手に入りやすくなったことや3D-CADの発達によるところが大きい。

3Dプリンタには幾つかの造形方式があるが、基本的な考え方としてはいわゆる「積層式」という言葉で表すことができる。積層式とは高さ方向に何層も材料を薄く重ねて積層する方式で、インクジェット式、粉末式、熱溶解式、紙式などがある。代表的な造形方式であるインクジェット式と粉末式の特徴を表1に示す。

3. 高精細数値標高データ

本検討で使用する高精細数値標高データは、航空レーザ測量により作成された八王子城跡の

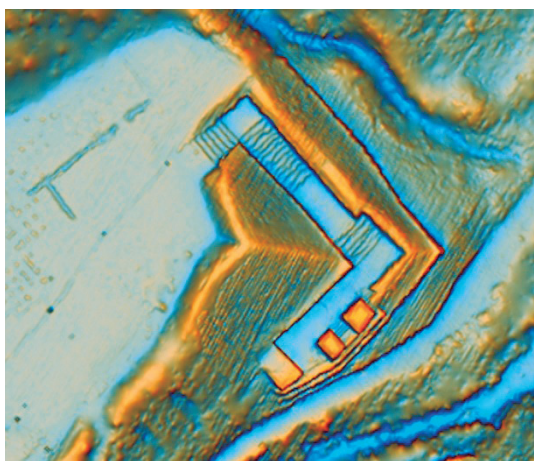


図1 高精細な数値標高データ（陰陽図表現）及び精密地形模型の例（左図は陰陽図による立体表現（瀬戸島・秋山・本田による））

表 1 インクジェット式と粉末式の特徴

	インクジェット式	粉末式
特 徴	インクジェット式は光造形方式の一種で、液体状のUV硬化性樹脂を薄く噴射しては紫外線で固め、その上にまた噴射を繰り返す。この方式は16 μ mの積層ピッチでの造形が可能で非常に精密な造形が可能な反面、耐久性・耐熱性が低い。ほとんどの機種が単色のみ。	粉末式は、パウダー状の粉を敷きその上に接着剤を塗布して固め、またその上に粉を敷きということを繰り返す。この方式は100 μ mの積層ピッチでやや粗いが、接着剤への着色によって多彩な色付けが可能である。
機 種 例	 Stratasys 社製 OBJET350 CONNEX1 ※資料提供：アルテック株式会社	 3DSYSTEMS 社製 Projet4500 ※写真提供：3D Systems 社

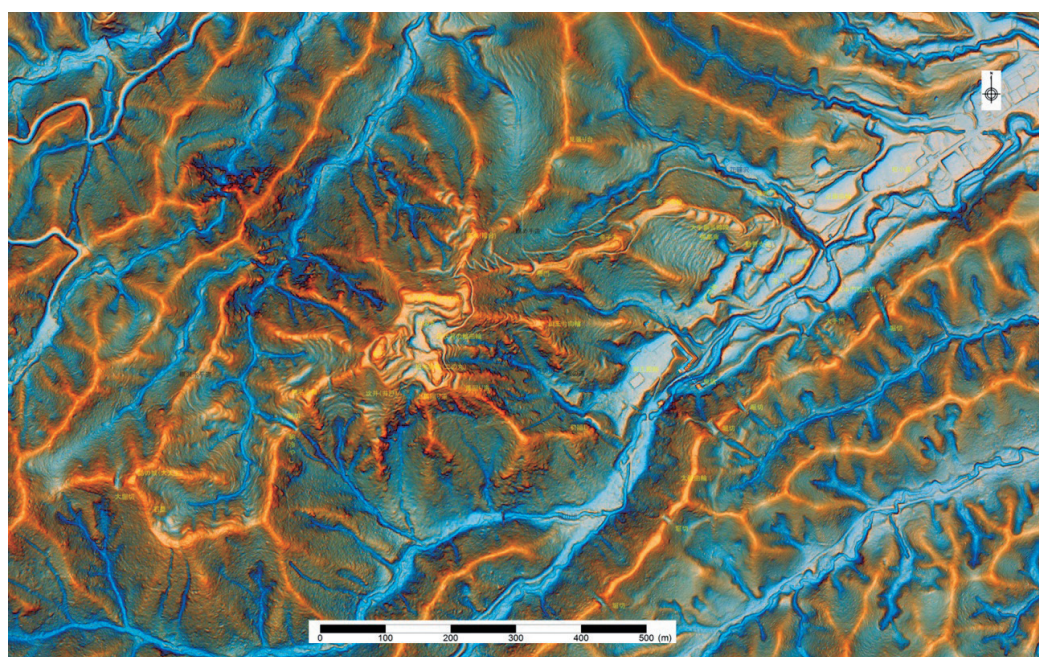


図 2 八王子城跡の高精細数値標高データ（陰陽図による立体表現（瀬戸島・秋山・本田による））

地上解像度 0.25m のデータを使用する。このデータは瀬戸島・秋山・本田により、月刊「地理」60-1 にて発表された「高精細な航空レーザ画像から戦国の山城空間を見る～戦国の終わりを告げた八王子城～」における研究成果であり、微細な地形・地物が良く表現されているため、3Dプリンタでの地物認識性の検討に有効なデータである。八王子城跡の高精細数値標高デー

タを図2に示す。

航空レーザ測量の概要及び今回使用した高精細航空レーザ測量データの諸元、八王子城跡の概要は以下のとおりである。

(1) 航空レーザ測量（月刊「地理」60-1 より引用²⁾）

航空レーザ測量は、地上での測量を必要とせず、固定翼の航空機や回転翼のヘリコプタに

搭載したレーザ測距儀を用いて、迅速かつ均一の精度で広範囲な地域の三次元地表データを取得できる。

上空での機体の位置やセンサの傾きはGPS（Global Positioning System：全地球測位システム）やIMU（Inertial Measurement Unit：慣性計測装置）で記録され、対象地域の三次元地表データはレーザ測距儀で計測される。

取得する点群データの密度や対象地域の地形条件、計測面積等を考慮した飛行計画に基づき、機上から地表面にレーザ波を1秒間に最大40万回連続に照射し、反射波の往復観測から得られる地表までの距離、照射角度、機上の位置情報を用いて地表の標高や形状を精密に計測する。

（2）今回使用した数値標高データ

今回使用した高精細な数値標高データは、ヘリコプタ搭載による高精細な航空レーザ測量であり、その計測諸元を表2に示す。

なお、今回使用した数値標高データは、高精細航空レーザ測量データからさまざまなノイズを除去し、2種類の密度の異なる点群からT

INを生成した後に0.25mにグリッド化したデータである。従って地上解像度0.25mが均一な精度を持っている訳ではない。

今回の検討は、この数値標高データをどれだけ精密にモデル化できるかを検討することを目的とし、現地をどれだけ精密にモデル化できるかは検討の対象とはしない。

（3）八王子城跡

八王子城跡は、日本100名城にも選ばれ、北条氏照によって築城された中世最後の山城と言われる城である。1570年代から築城が開始されたと言われ、完成を見ることなく天正18年（1590年）、豊臣秀吉の小田原攻めに際して、前田利家、上杉景勝の3万の軍勢に攻められ、凄惨な合戦の末に落城した悲劇の城である。

八王子城落城を契機に、その数日後に小田原城もついに開城することになり、まさに戦国の終わりを告げた城と言われる所以である。

その後、合戦の犠牲者の怨霊を恐れたのか、徳川幕府により立ち入りが制限され、結果的にその当時の遺構がそのままの形で残ることになった。

表2 今回使用した高精細航空レーザ測量データの諸元（国際航業株式会社による計測データ）

大 別	回転翼（ヘリコプタ）搭載レーザ	固定翼（セスナ）搭載レーザ
撮影年月日	2014年3月7日	2012年1月29日
撮影地区	八王子城跡の大部分を網羅	詰の城以西のみを使用
飛行高度	670m	2440m
飛行速度	92km/h	185km/h
パルス発射速度	36万回/秒	6.2万回/秒
スキャン角度	60°	25°
照射密度	50点/㎡	20点/㎡

表3 OBJET350の性能と試作での使用条件

	項 目	内 容
性能	造型方式 積層ピッチ 造形解像度 造形サイズ	ボリジェット方式（UV硬化アクリル系樹脂） Z軸 16μm（HQモード）/ 30μm（HSモード/DMモード） (X) 600dpi (42μm) x (Y) 600dpi (42μm) x (Z) 1600dpi (16μm) (X) 340mm x (Y) 340mm x (Z) 200mm
使用条件	積層ピッチ モデル材料 造形サイズ	30μm（HSモード/DMモード） Vero（アクリル系硬質樹脂：白） (X) 200mm x (Y) 200mm x (Z) 200mm

4. 精密地形模型の試作

4.1 使用する3Dプリンタ

今回使用する3Dプリンタは、高精細な地形模型を作成する目的から、光造型方式の3Dプリンタ (Stratasys 社 製 OBJET350 CONNEX1) を使用することとした。

OBJET350 の性能と、今回の試作における使用条件を表3に示す。

4.2 模型縮尺の決定

まずは、表3の使用条件にある造型解像度と積層ピッチ及び造型サイズから導き出される、各縮尺における地上分解能と作成可能範囲を表4に示す。

高精細数値標高データの地上解像度は0.25m、高さ方向は0.1m単位であるため、模型縮尺 1/3,000 であっても理論上はデータを再現可能である。

ただし定性的な尺度である地物認識性については、縮尺が小さくなれば例え模型に再現さ

れていたとしても、地物認識性は悪くなる。逆に縮尺が大きくなれば、地物認識性は良くなるが、模型化できる範囲が狭くなる。

縮尺を大きくすればするほど地物認識性は良くなるのが明らかであることから、見栄えのする大縮尺の模型はあえて切り捨てて、1/500、1/1,000、1/2,000 の3つの縮尺で試作を行うこととした。今回の検討ではこれら3つの縮尺の違いによる地物認識性を検討することとした。

4.3 試作地区の選定

精密地形模型を試作する地区は、御主殿付近及び本丸付近それぞれについて、城跡の特徴的な人工的地物が含まれる250m四方のエリアを選定した。選定の結果を図3に示す。

4.4 試作する模型の成型範囲及び成型イメージ

縮尺の違いによる地物認識性の検討がしやすいように、3つの縮尺とも同一地点が含まれ、かつ地区ごとに3つの縮尺を一体で成型するようにした。2つの地区の縮尺ごとの成型範囲及

表 4 各縮尺における地上分解能と作成可能範囲

模型縮尺	地上分解能		作成可能範囲
	(X,Y) 600dpi (42 μ m)	(Z) 762dpi (30 μ m)	
1/250	0.0105m	0.007m	(X) 50m x (Y) 50m x (Z) 50m
1/500	0.021m	0.015m	(X) 100m x (Y) 100m x (Z) 100m
1/1,000	0.042m	0.03m	(X) 200m x (Y) 200m x (Z) 200m
1/2,000	0.084m	0.06m	(X) 400m x (Y) 400m x (Z) 400m
1/3,000	0.126m	0.09m	(X) 600m x (Y) 600m x (Z) 600m

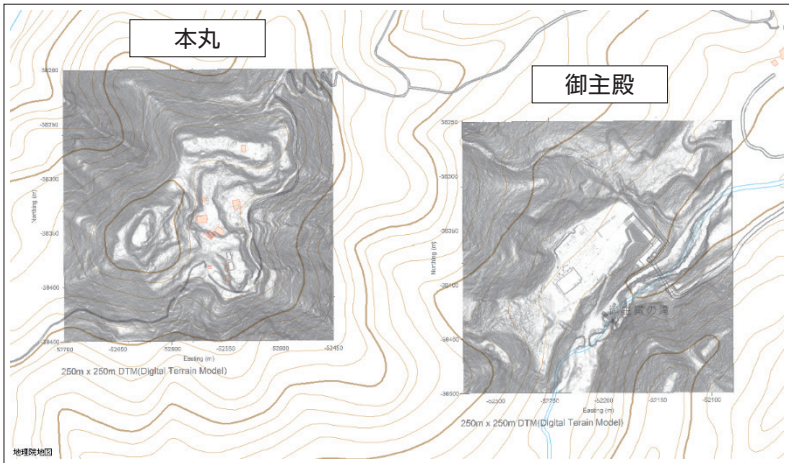


図 3 地区選定結果

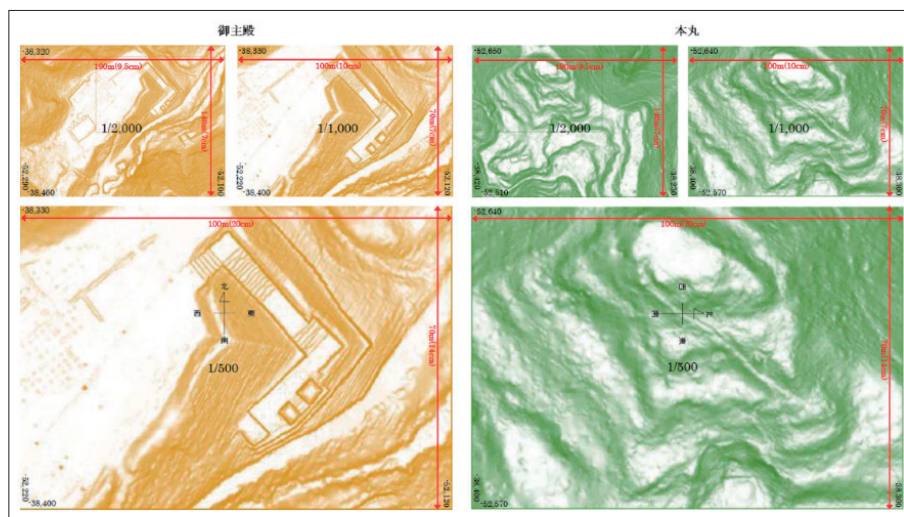


図4 成型範囲及び成型イメージ

び成型イメージを図4に示す。

4.5 成型までの処理の流れ

成型までの処理の流れを図5に示す。

4.6 試作した模型

完成した2地区の試作模型の外観を図6に示す。

5. 試作した模型から読み取れること

完成した模型は、1/500 縮尺においては、高細密数値標高データで表現されている微細な地形・地物まで、地物認識性が十分に保たれている。1/1,000、1/2,000 については、地物は再現されているものの、縮尺が小さくなればなるほど再現性が低下しており、地物認識性に難がある。

デジタル顕微鏡で撮影した特徴点における、縮尺ごとの地物の再現状況を図7に示す。

6. 考察

今回の検討を通じて、地上解像度 0.25m の高精細数値標高データを用いて、精密地形模型を製作する場合の、縮尺の違いによる地物認識性に関して確認できたことを以下に列記する。

- ① 30 μ m 以下の積層ピッチで造型可能性能のインクジェット式3Dプリンタを用いて、

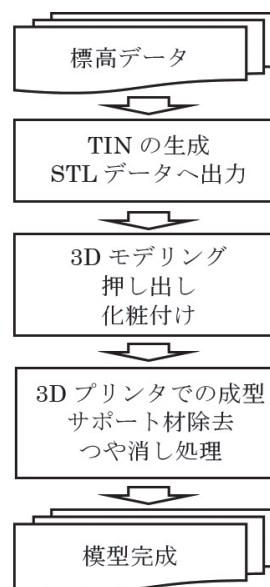


図5 成型までの処理の流れ

微細な地形・地物を再現した精密な地形模型の製作が可能である。

- ② 地物認識性を意識して模型を作成する際の模型縮尺に関して、地上解像度 0.25m の数値標高データを用いる場合には、1/500 が妥当な縮尺である。また、地物認識性をある程度確保した状態で広範囲に作成したい場合には、1/1,000、1/2,000 で作成しても良い。
- ③ 1/2,000 より小縮尺の場合には、0.25m 解像度ではデータが細かすぎて地物の再現ができない。また、認識性も低下するため



図 6 完成した試作模型の外観

適切な縮尺と言ひ難い。もし 1/2,000 より小縮尺で模型を製作する場合には地上解像度を間引くことで、データ処理や 3D プリンタの成型時間の短縮が期待できる。

これらの結果から、地上解像度と模型縮尺の関係を表 5 に整理した。

7. まとめと今後の課題

航空レーザ測量による高精細数値標高データを用いた大縮尺の精密地形模型は、従来の中縮尺の標高データを用いた地形模型と比較して、地物認識性やリアルな地形再現性においてインパクトがあることが、今回の試作を通じて

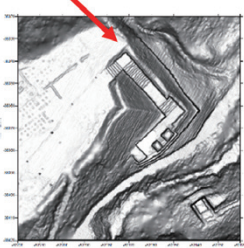
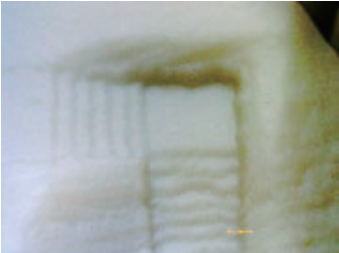
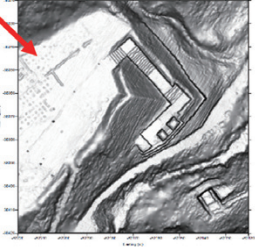
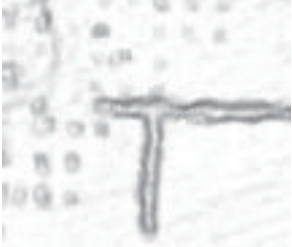
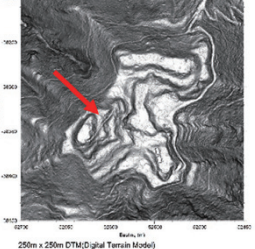
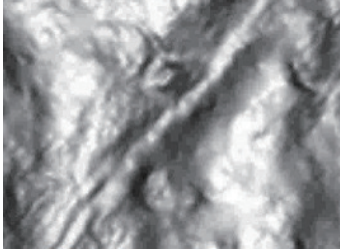
位置	標高データ	現地写真
		
1/500	1/1,000	1/2,000
		
位置	標高データ	現地写真
		
1/500	1/1,000	1/2,000
		
位置	標高データ	現地写真
		
1/500	1/1,000	1/2,000
		

図 7 縮尺ごとの地物の再現状況

表5 地上解像度と模型縮尺の関係

解像度 縮尺	0.25m	0.5m	1m	2m	4m	8m
1/250	○	△	×	×	×	×
1/500	◎	○	△	×	×	×
1/1,000	○	◎	○	△	×	×
1/2,000	△	○	◎	○	△	×
1/4,000	×	△	○	◎	○	△
1/8,000	×	×	△	○	◎	○
1/16,000	×	×	×	△	○	◎
1/32,000	×	×	×	×	△	○
1/64,000	×	×	×	×	×	△

◎：最適 ○：適切（利用によって使い分ける） △：条件次第で可 ×：不適切、意味がない、間引いて使用すべき

確認できた。

また、ディスプレイ上での3D表示に比して、地形模型が有している地形・地物の伝わりやすさ、観察性の良さ、プレゼンテーション力は、その土地の魅力や防災・減災対策などの特性をPRするのに効果的である。

精密地形模型の普及には、コストや時間、色表現など越えなければならないハードルが存在する。特に、今回試作に使用した光造型方式による模型製作では、色付けが容易でないという課題があり、プロジェクションマッピング技術を活用したCGによる動的な色表現などの可能性を検討してみたい。

これらの課題をクリアし活用場面が広がることで、精密地形模型がもつプレゼンテーション力で、地理空間情報活用による社会の利便性向上に貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 秋山幸秀：「陰陽図による地形表現」、月刊「測量」64-9、24-25項、(2014)
- 2) 瀬戸島政博・秋山幸秀・本田謙一：「高精細な航空レーザ画像から戦国の山城空間を見る～戦国の終わりを告げた八王子城～」、月刊「地理」60-1、(2015)
- 3) 前川實：「決戦！八王子城～直江兼統の見た名城の最期と北条氏照」、揺籃社、(2009)

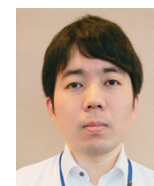
4) 日本測量協会編：「測量者のためのビジネス情報ファイル」、公益社団法人日本測量協会、(2010)

5) 原雄司：「3Dプリンタ導入&制作完全活用ガイド」、技術評論社、(2014)

執筆者

尾身 洋 (おみ ひろし)

東京カートグラフィック株式会社
空間情報部DB課
omi@tcg.co.jp



(共著者)

木之下 章 (きのした あきら)

東京カートグラフィック株式会社
取締役技術統括

村上 尚平 (むらかみ しょうへい)

東京カートグラフィック株式会社
空間情報部基本図課

瀬戸島 政博 (せとじま まさひろ)

公益社団法人日本測量協会 専務理事

秋山 幸秀 (あきやま ゆきひで)

朝日航洋株式会社
東京空情支社技術センターR・S・専任部長

本田 謙一 (ほんだ けんいち)

国際航業株式会社
東日本事業本部空間情報基盤技術部技師