

地図情報の新たな整備・更新技術の開発 ー5mメッシュDEMから地図情報レベル25000の 等高線を作成する手法の検討（第1年次）ー

実施期間

令和4年度～令和6年度

基本図情報部地図情報技術開発室

高田 悠太郎 稲澤 保行

新藤 昭彦 岸本 紀子

1. はじめに

国土地理院では、様々な数値標高モデル（以下「DEM」という。）の整備・公開を行っており、その中でも航空レーザ測量による基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュ（標高）（以下「DEM5A」という。）は、全国整備に向け、未整備地域の航空レーザ測量の実進を進めている。DEM5Aは、地形解析や水文分析などに活用されており、傾斜量図や陰影図などの様々な地形解析図を生成する手法が開発されてきた。その地形解析図の一つとして、等高線図がある。

国土地理院では、等高線の取得に写真測量による手法を用いている。木々に覆われた箇所の地表面は、作業者の知識や技量に拠り、等高線の精度にばらつきが生じやすい。一方で、航空レーザ測量データを基に作成されたDEMを用いる手法は、植生被覆により実際の地盤高との誤差が生じる可能性があるものの、誤差は相対的に小さく、高精度な等高線の自動的な作成に有効と考えられる。

そこで、現在の地図情報レベル25000の等高線（以下「地理院等高線」という。）を、航空レーザ測量由来のDEM5Aから発生させた等高線に入れ替えることを目的として、DEM5Aから新しい地理院等高線を作成する手法について検討した。ここでは、①滑らかな等高線を作成するためのDEM5Aのフィルタリング手法の評価、②凹地・補助曲線作成処理手法について報告する。

2. 等高線平滑化手法の検討

2.1 空間フィルタリングの概要

DEM5Aから作成した等高線は、微地形が詳細に表現され、地理院等高線のように滑らかではない。これを解決するため、まずDEM5Aに対し、標高を濃淡画像の画素値ととらえ、画像処理技術の一つである空間フィルタリングを実施し、あらかじめ平滑化したDEM（以下「平滑化DEM」という。）から等高線を作成した。そして、適切なフィルタを判断するために、各種フィルタ処理の評価を実施した。なお、平滑化手法の検討においては、DEM5Aの持つ高さ精度を不必要に落とすことなく、地理院等高線の形状に近づけることを目標とした。

本稿ではフィルタによる等高線の出力結果の違いを確かめるため、フィルタの種類・サイズ、標準偏差の組み合わせによる15パターン（表-1）について評価した。

- ① 平均化フィルタ (AF) …注目画素を対象領域の画素値の平均値に置き換える処理方法.
- ② メディアンフィルタ (MF) …注目画素を対象領域の画素値の中央値に置き換える処理方法.
- ③ ガウシアンフィルタ (GF) …ガウス分布に従い, 注目画素に近いほど大きな重み, 遠いほど小さな重み付けをしたフィルタのこと. 処理前の画像を $f(i, j)$, 処理後の画像を $g(i, j)$ とすると, 式 (1) で表される.

$$g(i, j) = \frac{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w f(i+m, j+n) \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_1^2}\right)}{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_1^2}\right)} \dots (1)$$

w はフィルタサイズを規定し, $(2w+1)(2w+1)$ のフィルタサイズになる. σ_1 の標準偏差は距離を考慮したガウス分布を制御しており, 本稿では $\sigma_1 = 1.3$ とする.

- ④ バイラテラルフィルタ (BF) …GFに加え, 注目画素と周辺画素の輝度差 (本稿では標高差) が小さいほど大きな重み, 大きいほど小さな重み付けをしたフィルタのこと. $f(i, j)$ を処理前, $g(i, j)$ を処理後とすると, 式 (2) で表される.

$$g(i, j) = \frac{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w f(i+m, j+n) \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left(-\frac{(f(i, j) - f(i+m, j+n))^2}{2\sigma_2^2}\right)}{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left(-\frac{(f(i, j) - f(i+m, j+n))^2}{2\sigma_2^2}\right)} \dots (2)$$

σ_2 の標準偏差は輝度差を考慮したガウス分布を制御しており, 本稿では σ_2 を 1.0, 5.0, 10.0, 20.0 と変えて検証を行った.

表-1 フィルタ処理方法

フィルタの種類	フィルタサイズ	σ_2
平均化フィルタ (AF)	3×3	-
	5×5	
	7×7	
メディアンフィルタ (MF)	3×3	-
	5×5	
	7×7	
ガウシアンフィルタ (GF)	3×3	-
	5×5	
	7×7	
バイラテラルフィルタ (BF)	3×3	1
	5×5	1
	7×7	1
		5
		10
	20	

2.2 空間フィルタリングの検証と評価

DEM5Aに対して表-1に記載した15パターン of フィルタ処理を実施し, それぞれの平滑化DEMから等高線を作成した (等高線の出力はQGISのGDALライブラリを使用). その際, 15パターン of 等高線に対して, 平滑量と高さの精度について以下の検証を実施した.

2.2.1 平滑量の検証

表-2のとおり, 「地形起伏指数 (TRI)」 (Riley et al., 1999) が異なる3地区を選定し, フィルタ処理の違いによる等高線の平滑量を検証した. “徳宿”, “鎌倉”, “辰野” 3地区それぞれについて, 15種類の等高線に対して, ①等高線 (標高値10m間隔) の形状を変えずに約5m間隔で補間点を発生させ, ②等高線の始点, 5m補間点, 10m補間点で構成する三角形の重心と5m補間点の較差を計測した. この一連の処理を, 始点の位置を10m補間点の位置に変えながら, 検証地区全体の等高線に対して再帰的に実行し, 較差を集計した. 較差の平均値 (平滑量) が大きいほど等高線形状が粗く, 小さいほど滑らかであるといえる.

表-2 検証対象地域

2次メッシュ番号		544024(徳宿)	523974(鎌倉)	533870(辰野)
TRI	平均	1.19	5.31	8.17
	SD	1.64	4.57	3.23
	最大値	17.37	42.83	65.53
標高(m)	最大値	50	206	1632
	最小値	0	0	703
起伏		小	←—————→	大

フィルタごとの平滑量を図-1に示す。フィルタ処理によって等高線は滑らかになり、地理院等高線の平滑量に近づくことがわかる。地理院等高線の平滑量に比較的近い0.3以下となるフィルタは、AF5×5、AF7×7、GF7×7、BF7×7 ($\sigma_2 = 20$) である。

BF ($\sigma_2 = 1$) は、“徳宿”を除き、フィルタサイズを変更してもフィルタ処理無しのDEM5Aと平滑量に大きな変化は見られなかった。また、BF7×7 ($\sigma_2 = 20$) はどの地域もほぼGF7×7と同様の平滑量になった。よって、BF7×7 ($\sigma_2 = 5$ 及び $\sigma_2 = 10$) が、 σ_2 のパラメータとして適切であるといえる。

2.2.2 高さ精度の検証・評価

平滑化DEMから作成した標高値5m間隔の等高線上に10m間隔で発生させた補間点について、同位置のDEM5Aの標高値との標高差を集計した結果を表-3に示す。検証地域は表-2の“鎌倉”とした。なお、較差は2つの標高値の差分の絶対値を、標高差は平滑化DEMの標高値からDEM5Aの標高値を引いた値を指す。基本測量に適用する「基本図測量作業規程」では、1/25,000地形図の等高線の標高精度はRMSEが5m以内と規定されている。今回の検証では、どのフィルタを用いた等高線もこの精度を満たしている。AFとMFは、特にフィルタサイズが7×7になると、DEM5Aより-5m以下の標高になる割合が高くなり、標高が低くなる傾向がある。そのため、高さ精度を重視するのであれば、AF7×7やMF7×7より、GF7×7またはBF7×7が適しているといえる。

表-3 平滑化DEMから作成した等高線とDEM5Aメッシュ標高の較差と標高差

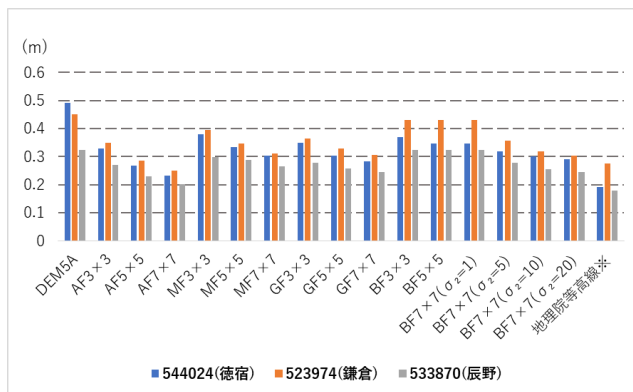


図-1 平滑量の比較

等高線の種類	DEM5Aとの較差(m)			標高差分布(%)※		
	平均	最大較差	RMSE	<-5m	-5 ~ 5m	5m<
フィルタ無し (DEM5A)	0.93	11.03	1.26	0.11%	99.79%	0.10%
AF_3×3	1.09	19.40	1.44	0.19%	99.65%	0.16%
AF_5×5	1.51	14.85	1.96	0.85%	98.50%	0.65%
AF_7×7	2.05	19.40	2.64	3.45%	93.83%	2.77%
MF_3×3	1.10	19.40	1.50	0.49%	99.43%	0.08%
MF_5×5	1.43	19.40	1.90	1.28%	98.35%	0.37%
MF_7×7	1.89	19.40	2.52	4.02%	94.05%	1.93%
GF_3×3	1.04	14.40	1.38	0.15%	99.71%	0.14%
GF_5×5	1.18	19.40	1.55	0.25%	99.54%	0.21%
GF_7×7	1.33	12.90	1.72	0.43%	99.24%	0.33%
BF_3×3($\sigma_2 = 1$)	0.95	19.40	1.27	0.12%	99.77%	0.11%
BF_5×5($\sigma_2 = 1$)	0.95	14.40	1.28	0.12%	99.77%	0.11%
BF_7×7($\sigma_2 = 1$)	0.96	19.40	1.28	0.12%	99.78%	0.10%
BF_7×7($\sigma_2 = 5$)	1.14	19.40	1.50	0.21%	99.62%	0.17%
BF_7×7($\sigma_2 = 10$)	1.28	19.40	1.67	0.27%	99.48%	0.25%
BF_7×7($\sigma_2 = 20$)	1.32	19.40	1.71	0.40%	99.30%	0.30%

※標高差は「等高線の標高値-DEM5A標高値」を示す。

2.2.3 土地起伏条件に応じた等高線表現の比較

<山地部の評価>

表-2 “鎌倉” の山地部における、DEM5A、AF7×7及びMF7×7から作成した等高線と標高差分布を図-2に示す。また、図-2中の断面線による地形断面図を図-3に示す。AF7×7及びMF7×7の等高線は、DEM5Aの等高線に比べ、断面A-A'のような地形において、谷の標高を高くし、断面B-B'のような地形において、尾根と山頂部の標高を低くする傾向がある。また、断面C-C'において特に顕著であるが、AF7×7は、MF7×7に比べ、傾斜の変化部分を比較的なだらかにしてしまう傾向がある。

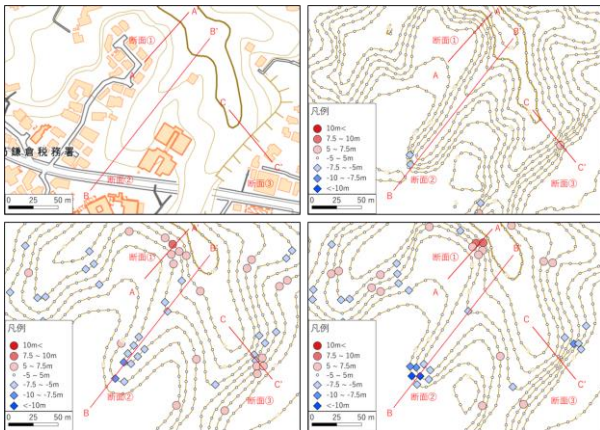


図-2 DEM5A・AF・MFによる等高線と精度分布
 (左上：地理院地図(等高線は10m間隔)
 右上：DEM5A 左下：AF7x7 右下：MF7x7)

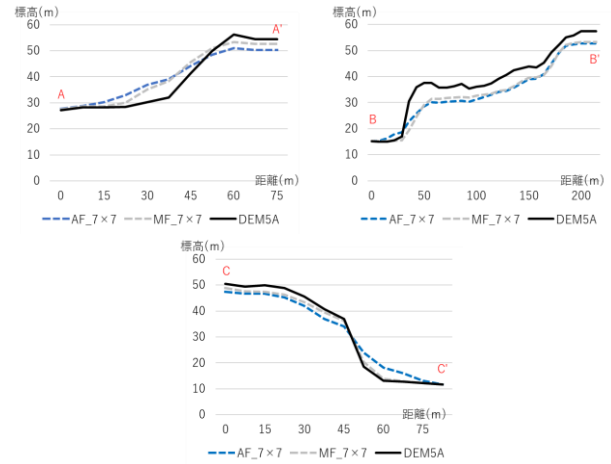


図-3 地形断面図
 (左上：断面① 右上：断面② 下：断面③)

同地域におけるGF7x7及びBF7x7から作成した等高線と標高差分布を図-4に示す。GFはいわゆる加重平均処理なので、同じフィルタサイズのAFより平滑化は弱い。また、BF7x7 ($\sigma_2 = 1$) の等高線は、DEM5Aの等高線と形状の変化がほぼ見られないものの、BF7x7 ($\sigma_2 = 5$) の等高線では、なだらかな傾斜がある範囲で平滑量の違いが見られ、AF7x7やMF7x7ほどでは無いものの山頂部の標高を低くする傾向が見られた。

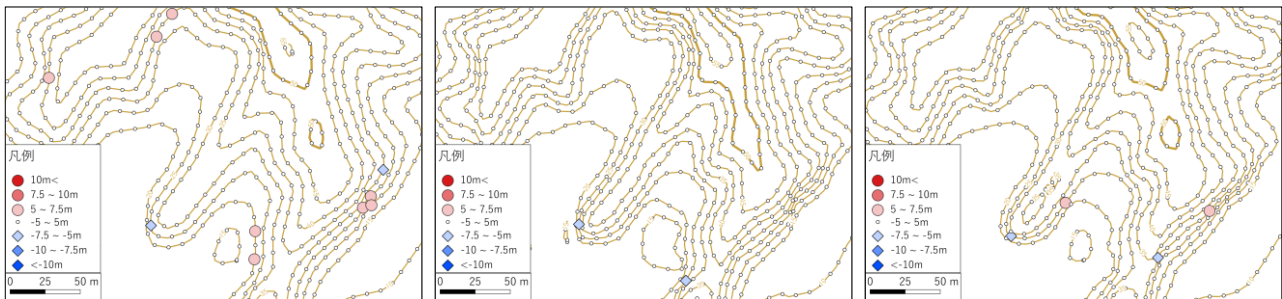


図-4 GF・BFによる等高線と精度分布
 (左：GF7x7 中央：BF7x7 ($\sigma_2 = 1$) 右：BF7x7 ($\sigma_2 = 5$))

<平地部の評価>

鎌倉の平地部における平滑化DEMから作成した等高線を図-5に示す。AF7x7やMF7x7の特に標高10mの等高線は、フィルタ処理無しのDEM5A等高線と比較して微細な凹凸が無くなり、すっきりとした表示になる。BF7x7 ($\sigma_2 = 1$ 及び $\sigma_2 = 5$) の標高10mの等高線は、GF7x7の等高線とほぼ同様の形状になっているが、10m以外の等高線は、GF7x7の等高線と比較して平滑量が小さくなっている。

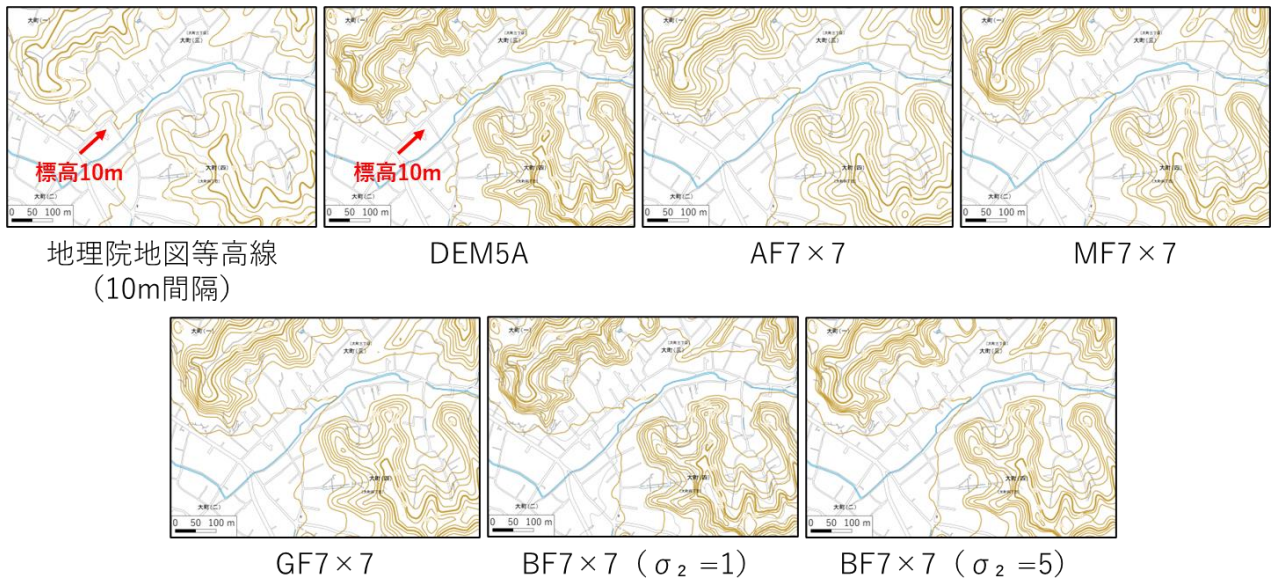


図-5 平地部における等高線

2.3 評価結果を踏まえた手法の提案

2.3.1 提案手法

平滑量の検証から、地理院等高線の平滑量に近づけるためには、AF5×5、AF7×7、GF7×7、BF7×7 ($\sigma_2 = 20$) のフィルタ処理がおおむね適していると判断できるが、AF、MFは強い平滑化ができるものの、高さ精度が低くなり、特に山間部における地形起伏の特徴を大きく損ねる可能性がある。GFも比較的程度は小さいが、同様の特徴を持っている。一方、BFは他のフィルタと比較して全体的な平滑量は小さいが、パラメータの調整によって地形変化に応じた平滑化が可能である。しかし、BF7×7は $\sigma_2 = 20$ の場合GF7×7と変わらない平滑化になるため、BFを適用する場合は、 $\sigma_2 = 5$ や $\sigma_2 = 10$ が適しているといえる。

また、ほとんどのフィルタ処理により尾根や山頂付近の標高が過小評価されてしまう。この問題を防ぐためには、尾根・山頂部に対してはフィルタ処理をしないようにする必要がある。

そこで提案手法として、あらかじめDEM5Aデータを尾根・山頂部とそれ以外の平地・傾斜部に2分し、尾根・山頂部に対してはフィルタ処理を実施せず、それ以外の部分は注目点からの標高差に応じて平滑量が変化するBF7×7 ($\sigma_2 = 5$) を採用し、作成した等高線を検証することにした。なお、尾根・山頂部の抽出については、自動処理で行った。

2.3.2 評価と考察

前項で提案した手法により作成した等高線を図-6に示す。尾根・山頂部の等高線はフィルタ処理を実施していないため、DEM5A本来の高さ精度を有しており、そのほかの範囲では、BF7×7 ($\sigma_2 = 5$) に応じた一定の平滑化処理がされている。提案手法によって、単一のフィルタでは処理できなかった課題を解決することが可能になった。尾根・山頂部はおおよそその範囲を抽出することができたが、場合によっては谷部も抽出されているため、改良の余地があると考えている。BF7×7 ($\sigma_2 = 5$) のフィルタが適切であるかどうかは今後議論していく必要があるが、 σ_2 の値を変更することで起伏の差による等高線の平滑量を微調整することができるため、ほかのフィルタよりも汎用性が高いと考えている。

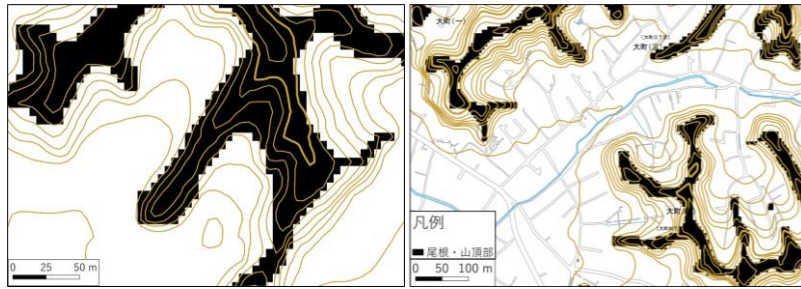


図-6 提案手法による等高線

3. 凹地と補助曲線の自動抽出

3.1 提案手法

等高線による地形判読においては、緩傾斜地や複雑な地形における凹地及び補助曲線の表現を必要とする場面が少なくないが、DEM5Aから単に等高線を生成しただけではこれらは表現されない。

そこで、QGISのAPIとGDALライブラリを用い、図-7の手順で凹地を示す等高線を抽出した。また、図-8の手順で補助曲線（本稿では主曲線と主曲線の間に表示する標高5mごとの等高線）を抽出した。

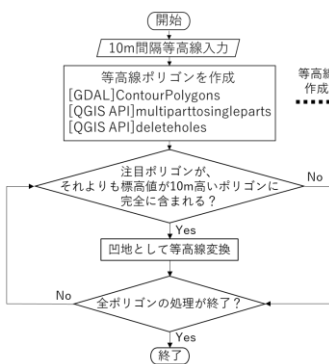


図-7 凹地抽出処理の概要

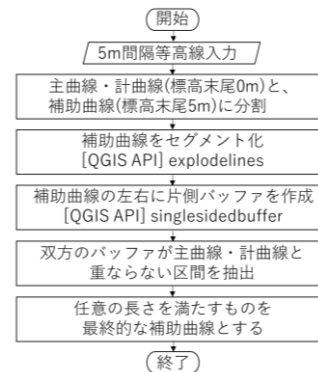
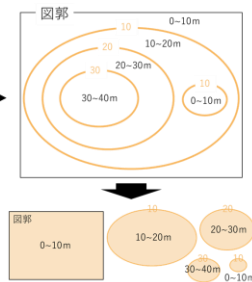


図-8 補助曲線抽出処理の概要

3.2 評価と考察

自動抽出した凹地と補助曲線を図-9、図-10に示す。凹地は地理院等高線と概ね同じ位置に抽出され、アルゴリズムに従って適切に処理ができていることが分かる。補助曲線は、郵便局や小学校周辺のなだらかな傾斜変化を表現できていることが分かる。

凹地と補助曲線の抽出については、複数の地域でさらに試行し、適切な成果が得られるか検証が必要である。特に補助曲線については、地図情報レベルに応じた抽出位置になるよう適切なバッファ幅を検討していきたい。

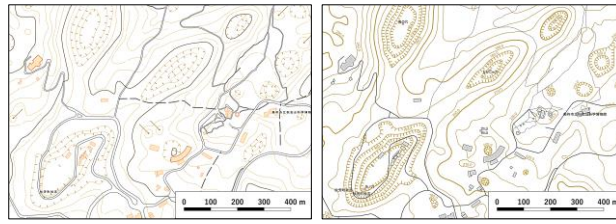


図-9 凹地抽出結果

(左：地理院地図等高線 右：DEM等高線)



図-10 補助曲線抽出結果

(左：地理院地図等高線 右：DEM等高線)

4. そのほかの課題

DEM5Aデータの水面には標高値が割り当てられていない。そのため、水面周辺で等高線の分断が生じ、正確な等高線が作成されない。水面標高を適切に内挿補間する手法の検討が今後の課題である。

作成した等高線は、表示する縮尺に応じて、補間点を間引く必要がある。その簡略化手法には、「許容誤差」と呼ばれるパラメータを任意に設定できるDouglas-Peuckerアルゴリズムがある。仮に許容誤差を1.25mとすると（地図を表示する解像度を508dpi, 1インチ=25.4mmとすると、縮尺25000分の1の時、画面1ピクセルで表現される距離は1.25mとなるため）、等高線形状をほとんど変えることなく、データの軽量化が可能になる。今後、適用可能性について詳細な検証が必要である。

参考文献

- D.Douglas・T.Peucker(1973):Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, Can.Cartogr., pp.112-122.
- 古家直行・斎藤丈寛 (2022) : 数値表層モデルを用いた資源推定において利用可能な標高モデルが及ぼす影響, 北方森林研究, 70, pp.73-76.
- 岩橋純子 (2019) : DEM (数値標高モデル) を用いた地形量・浸水量の計測, 砂防学会誌, 72 (2) , pp.43-47.
- 空中計測・マッピング部会レーザーワーキング (監修) (2013) : 航空レーザ測量による災害対策事例集, 日本測量調査技術協会, 195p
- Riley SJ, DeGloria SD, Elliot R(1999):A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. Intermountain Journal of Sciences, 5(1-4) , pp.23-27.
- 斎藤和也 (監修) (2008) : 図解 航空レーザ計測, 日本測量調査技術協会, 208p
- 高橋祥・早坂寿人・中村孝之・南秀和 (2017) : 地上画素寸法30cm級の衛星画像を用いた地図作成に関する共同研究, 国土地理院時報, 129, pp.133-146.