

数値地形モデル (DTM) の道路設計への適用 Application of Digital Terrain Model to Road Design

○新井伸博¹ 雑賀康治¹ 岡林隆敏²
Nobuhiro Arai Kouji Saika Takatoshi Okabayashi

【抄録】土木事業の計画から事業化に至る過程の中で、地形情報を電子化し関係者間で共有することは重要である。本研究では、道路設計の予備設計段階から一貫して使用できる地形情報を構築するために、精度的には詳細設計時に縦横断地形の取得が可能な高精度な3次元数値地形データの作成方法を示した。さらに、等高線による地形の扱いから、数値地形モデルによるデータ表現を用いて、実測により補足したデータとの一元化を図り道路設計へ適用する手法を提案する。

【Abstract】 In the process of planning to the execution of a certain construction work, digitalization of topographic information and sharing it among engineers is very significant. Here, in this paper, in order to construct topographical information to be used in the basic and detailed road design, an effective way of achieving cross-sectional and vertical topography with high-level 3-dimensional numerical topographic data is indicated. Furthermore, aside from dealing topography by contour lines, numerical topographic data are supplemented to the actual field surveying data, forming a digital terrain model to be applied to road design.

【キーワード】CAD, DTM, 情報の共有化

【Keywords】CAD, DTM, Sharing of Information

1. はじめに

道路設計は、一般に概略設計、予備設計、詳細設計に分けられ構造が詰められていく。概略設計や予備設計では複数の計画路線に対して縦断・横断地形を平面図から読みとりながら検討するという形で行っており、本命案に到達するまでの作業に3次元CADを用いることは有効である。3次元CADを利用して道路設計を行うには、その基本となる地形が従来の紙ではなく、電子化されたデジタル形式の地形、すなわち、3次元数値地形データを基に行われなくてはならない。CADで利用する際の数値地形データのデータ形式や作成方法、測量から設計へのデータの受け渡し方法などの標準化については、建設CALIS/ECを踏まえた取り組みを建設省や土木学会等が始めている^{1)~3)}。しかし、測量分野以外では3次元数値地形データの利活用や発展性などに関する研究は少なく^{4)~6)}、土木分野ではGIS (Geographical Information System)を含め2

次元データとしての利用が主流である。

建設省公共測量作業規程^{7)~9)} (以下作業規程)で規定される数値地形データの表現には、等高線法と数値地形モデル法(以下DTM法, Digital Terrain Model)の2種類がある。著者らは、これまで計画の初期段階において路線評価を支援する手段として3次元CADとコンピュータグラフィックスを利用した研究を行ってきた^{10), 11)}。その際には、地表面の標高や地物等を視覚的に判断できる地形図としての情報が必要とされるため、数値地形データの表現には等高線法のみが利用されてきた。3次元CADの利用を前提とすれば、基本となる数値地形データはデジタルデータとしてのデータ精度や編集、汎用性に優れるDTM法の利用が望ましく、明確な活用手法が確立されていないことから様々な取り組みが必要である。

本研究では、線形を確定する予備設計段階で地図情報レベル250 (相当縮尺1/250)の精度を有する高精度

な3次元地形データを作成し、予備設計から詳細設計に至るまで一貫して使用する数値地形データの構築方法と地形データを利用する際の問題点や課題を整理し今後の方向性を示した。さらに、3次元CADを用いる際に、等高線のみによる紙地図的な数値地形データの取り扱いから、本来の等高線法とDTM法によるデータ表現を併用することで実測により補足したデータとの一元化を図り道路設計へ適用する手法を提案する。

2. 数値地形データを活用するため課題

2.1 道路事業の高度化への対応

図-1は、数値地形データを利用してルート承認から工事発注に至る道路事業の高度化に対応した流れである。高度化に対応するためには、事業プロセスに応じて利用者・住民等が参加しやすい協議や評価方法の導入が望まれる。提案した手法は、計画当初より高精度な3次元数値地形データを取得し一貫して使用することで、3次元CADの活用による設計業務の大幅な省力化と計画見直し等のフィードバックに対応するものである。従来手法では、広範囲な地形情報から路線測量を行って計画を絞り込む方式のため、様々な地形データや使用CADが混在し事業化後に変更が生じた場合の計画変更が困難である。

2.2 道路設計における問題点

道路設計の表現法は、内容別に平面設計、縦断設計、横断設計の3つに大きく分けられる。それぞれに共通していることは、設計全般に地形が関係していることである。概略設計では、空中写真測量により作成した図面縮尺1/2500から1/5000の平面地形図を基に、コントロールポイントとなる地物などを回避しながら複数の路線に対して平面線形の計画を行い、並行して、縦断・横断地形を平面地形図から読みとりながら切り盛り土量を計算し本命案を選定している。

一方、予備設計からは新たに空中写真測量により作成する図面縮尺1/1000の地形図を基に実施しているが、詳細設計においては実測による縦横断図を用いて幅杭設計や擁壁・法面等の計画を行い平面図に展開・図示している。このため、詳細設計の段階で実測の結果を平面地形図の等高線に反映する場合は、縮尺(地形データの精度)の違いから設計者がアナログ的に等高線修正を行っている。

このように、道路設計では基になる地形は固有であり互いに関連しているにもかかわらず、平面設計においては空中写真測量、縦断設計では縦断測量、横断設計では横断測量と、それぞれ異なる方法により地形データが取得されており、地形図をデジタルデータにする際のデータ精度や表現方法に整合性が取れないことになる。

2.3 3次元CADを利用する際の問題点

道路設計に3次元CADを利用することは、事業の高度化への対応や設計の省力化などの面で有効である。従来は、作図ツールとして2次元CADが普及してきたこともあり、平面線形と縦断線形を区分した2次元線形としての設計手法が定着している。このため、3次元CADを利用し生成された路線の設計データは、平面・縦断・横断図などの2次元の設計図面で表現されることから、3次元CADの有効性は認識されながらあまり利用されてこなかった要因である。

また、道路設計で扱う地形のデジタルデータは、測量成果を紙図面として作成し利用しているのが一般的であり、3次元CADを利用する際には紙図面から新たに3次元の地形デジタルデータを作成する手間を必要としている。今後、3次元CADを活用する上では、地形データを3次元デジタルデータとして流通させることが最優先の課題である。

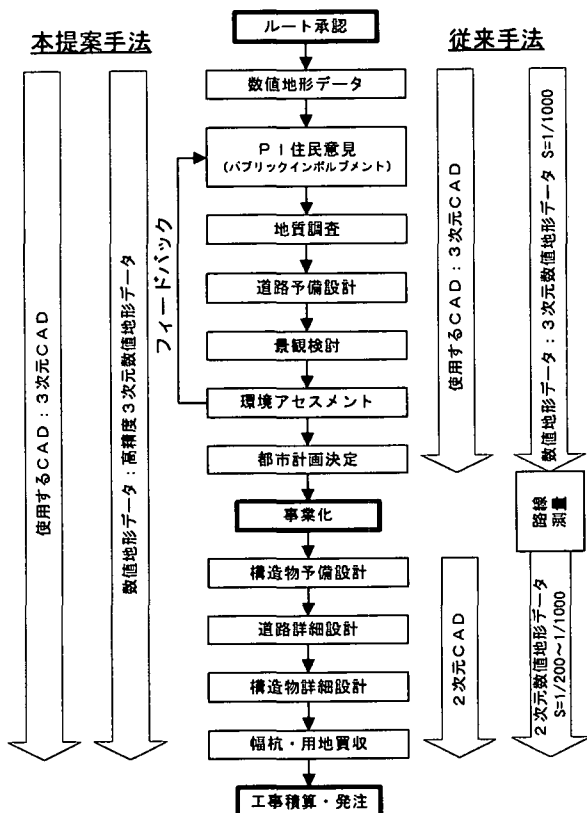


図-1 数値地形データを利用した道路事業の流れ

2. 4 道路設計で利用する数値地形データ

数値地形データの作成は作業規程等を基に行われ、地形・地物等に関する地図情報を一定の精度を保持した位置、形状を表す座標データおよびその内容を表す属性データ（レイヤまたはコード）として計算機処理可能な形態で表現したDMデータファイルの形式で規定される。数値地形データをCADへ受け渡す場合はDMデータファイルによるのが最善であるが、測量成果を基に作成された数値地形データは地形原図（紙図面）として提供されていたことから、DMデータファイルをCADデータに変換するソフトが一般に公開されておらず、作業規程にも未規定である。このため、著者らは、数値編集の段階で数値地形データをDXF（Drawing Interchange File）フォーマット等に変換し利用している。

3. 数値地形データの作成

道路設計の流れの中で一貫して3次元CADを利活用するために、数値地形データの作成方法とその表現方法について示す。

3. 1 数値地形データの作成方法

図-2は作業規程で記載されている数値地形データの取得から数値編集までの流れを示す。数値地形デー

タ（地図情報レベル250）を取得する方法は、作業規程において次の3種類に分類され、目的や必要とする精度に応じて使い分けられている。

①TS地形測量

TS（トータルステーション）またはGPS（Global Positioning System）測量機を用いて現地観測により測量を行い、デジタル平板システム等にデータを取り込み数値地形データを作成する。

②デジタルマッピング

空中写真を用い、図化段階から数値データを取得し、数値編集を行って数値地形データを作成する。

③既成図数値化

既に作成されている地形図をスキャナー等で数値化し、数値地形データを作成する。

単に高精度な数値地形データを取得するという目的であればTS地形測量で行うのが一般的な手法である。しかし、通常の道路設計で用いられるような広範囲をすべてこの方法で行うことは作成する費用や期間を考慮すると現実的ではない。著者らは、この問題を解決するため以下の3点について研究し数値地形データを作成した。

まず1点目として、高精度な数値地形データの取得をデジタルマッピングとTS地形測量を併用し行っ

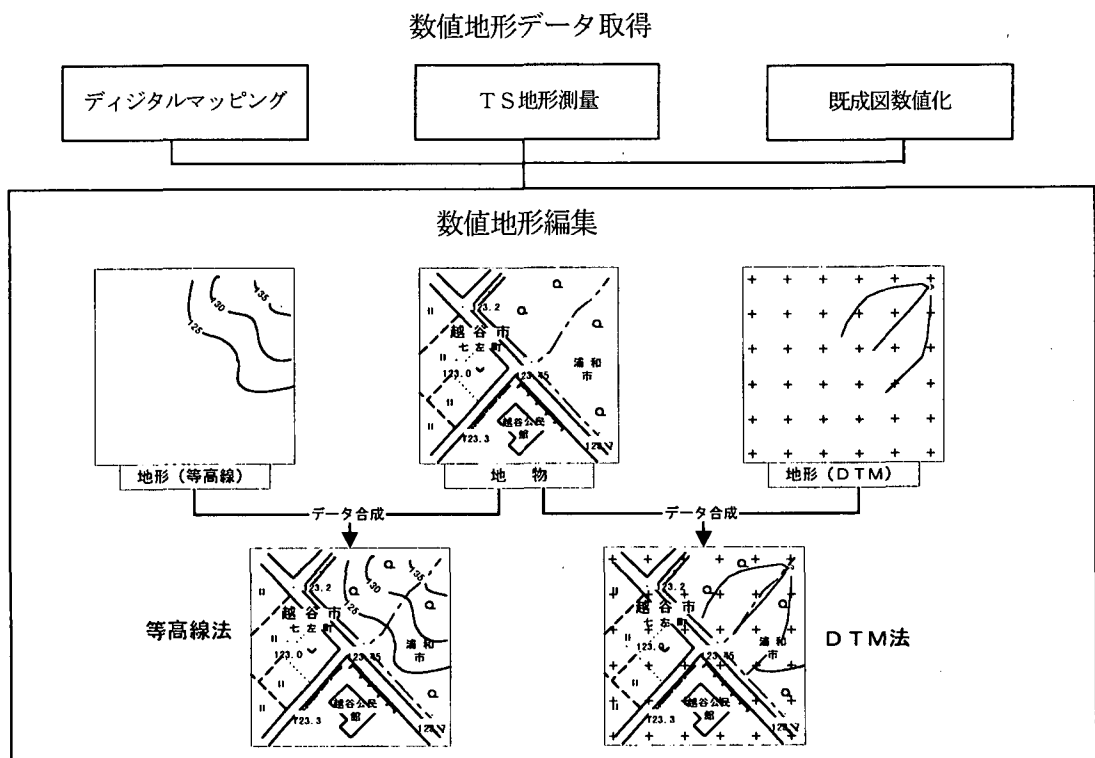


図-2 数値地形データの作成方法

たことである。具体的には対象範囲全体の数値地形データの取得はデジタルマッピングで行い、樹木等で地表面が写真に写らない箇所、道路等公共施設、及び計画上主要なコントロールポイントとなるような箇所については、TS地形測量により補足測量を行う。取得したデータは、デジタルマッピングから得られたデータのうち補足測量を行った範囲のデータを消去し、その部分のデータとして置き換えた。ここでの課題は、データの一元化を行うため、双方から得られるデータの精度を統一することである。表-3は地図情報レベルの総合精度について作業規程に記載されている規定値である。この表によると地図情報レベル250より高精度なものについては規定されておらず、本研究では地図情報レベル250の精度確保を目標としてデータを取得した。これにより全体的な精度の整合性を図り、デジタルデータとして一元化した。

表-3 地図情報レベルの総合精度

地図情報レベル	精度 (地上座標, 標準偏差)	
	平面位置	標高点の標高
250	0.125m以内	0.25m以内
500	0.25m 以内	0.25m以内
1000	0.70m 以内	0.33m以内
2500	1.75m 以内	0.66m以内
5000	3.50m 以内	1.66m以内
10000	7.00m 以内	3.33m以内

2点目として、デジタルマッピングによる精度を地図情報レベル250とするために必要な大縮尺空中写真を撮影する手段として低空・低速で撮影することができるヘリコプターを適用したことである。一般に撮影は固定翼、及びヘリコプターのいずれかで行われ、取得する地図情報レベルに応じて撮影手段を選定する。コスト的には固定翼が優れているが、飛行高度の制限(対地高度300m以上厳守)があるため、低空で撮影を行う場合はヘリコプターが適用される。

最後の3点目として、道路設計の流れの中で3次元CADを一貫して使用するために、数値地形データをCADデータ形式(DXF)に変換し作成したことである。

3.2 数値地形データの表現方法

図-2に示すように、データ表現には等高線と地物データを合成する等高線法と、数値地形モデルと地物データを合成するDTM法の2種類がある。現状では

等高線法が一般的である。

従来の道路設計では、地表面の標高や地物等を視覚的に判断できる地形図としての情報が必要とされるため、路線測量を併用する設計手法が普及し等高線法が利用されてきた。一方、DTM法は精度が確保でき、またデータ編集や汎用性に優れ、数値地形データを一元化し3次元CADを活用する設計では重要なデータ形式である。しかし、数値地形データを利用する際に3次元的な高さの精度を考慮した設計手法が確立されていないことや、DTM法では地形図としての情報を視覚的に判断することができないこと等から、道路設計にはほとんど利用されていない。

本研究では、道路設計の流れの中で一貫して3次元CADを利活用するために等高線法、DTM法のそれぞれ優れる点を考慮し、次の5つの条件を満足する数値地形データの表現方法を提案する。

- ① 数値地形データが一元化されること。
- ② 作業規程の精度が確保できること。
- ③ データ編集や汎用性に優れること。
- ④ 地表面の標高や地物等を視覚的に判断できる地形図としての情報が表現されていること。
- ⑤ DTMの高さ情報と等高線の高さ情報とで整合がとれていること。

図-4は、上述の条件を満足する数値地形データ表現方法の流れである。まず、数値編集より得られた地物データから道路、水路等の高さを有したデータを抽出し、グリッドデータ、ブレイクライン、ランダムポイントで形成される地形(DTM)と合成し3次元の地表面データを作成する。次に、市販ソフトを使用して地表面データよりTINデータを生成することで、3次元CADで利用できる3次元数値地形データを作成する。設計に使用する縦横断地形等、正確な地形の高さ情報はこのTINデータから取得する。平面計画を行う場合は、標高や地物等の情報が視覚的に判断できる地形図としての情報が必要となるため、TINデータより等高線を生成し家屋、塀、記号、注記、行政界等の情報を含めた地物データと合成して地形図を表現する。

これまででは、図-2で示す等高線法により数値地形データを表現している。最終的なデータ表現方法は本提案手法と同様であるが、DTM法に比べデータ精度やGISへのデータ活用など汎用性に劣る。また、一

度作成された数値地形データに標高データを追加する等の修正が生じた場合、等高線法では大幅な手直しや追加したポイントでの標高データが正確に反映されない結果となる。提案した手法によれば、DTMの高さ情報と整合がとれた等高線が作成されることから、データの一元化を図ることができる。ただし、DTMから等高線を発生させる手法は、現在作業規程では認められておらず、今後の動向を注視していくことになる。

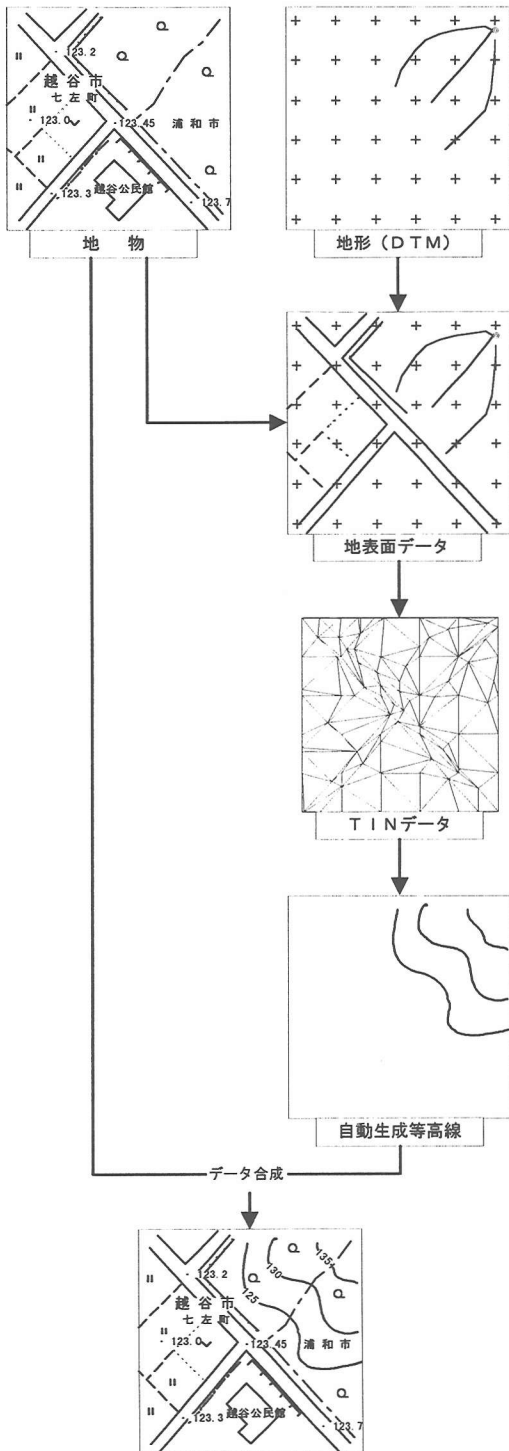


図-4 数値地形データの表現方法

4. 道路設計への適用

提案した手法による数値地形データを道路設計へ適用するために、以下の取り組みと検証を行った。

- ① 本提案手法を基に撮影高度やDTMデータを取得するメッシュ間隔、現地補測測量の程度等の作成条件により、得られる精度にどのような影響が生じるか検証を行った。
- ② 作成された数値地形データは、道路詳細設計に精度面で適用できるか検証を行った。
- ③ 道路設計に本提案手法を適用した場合の効果について整理した。

4.1 作成条件による精度の違い

(1) 作成ケース

作成条件により得られる精度にどのような影響が生じるか検証するために、以下に示す条件により数値地形データを18ケース作成した。

- ① 対地高度300m(写真縮尺1/2000)と400m(写真縮尺1/2660)で作成した場合。
- ② DTMメッシュ間隔5mの場合と20mの場合。
- ③ 現地補足測量の対象箇所として、現地補足測量を実施しない場合、道路等公共施設のみ実施する場合、道路等公共施設と樹木等で地表面が写真に写らない箇所を実施する場合。
- ④ 今回提案したDTM法で作成した場合と現状一般的な等高線法で作成した場合。

(2) 対象地域

撮影を行った対象地域は、図-5のような平地10%、丘陵地90%で構成される比較的平坦な箇所である。そのうち樹木部は25%であった。



図-5 撮影地域全体図

(2) 検証方法

路線測量成果から得られる実測の地形情報を真の値とし、高さ位置に関する精度の検証を行った。地形表面全体の精度を把握するため、比較する地形情報は横断地形(60断面)に着目し、実測との差を表す指標は平均誤差とした。平均誤差は図-6に示したように、実測との差により生じる面積を合計し横断幅で除した値である。

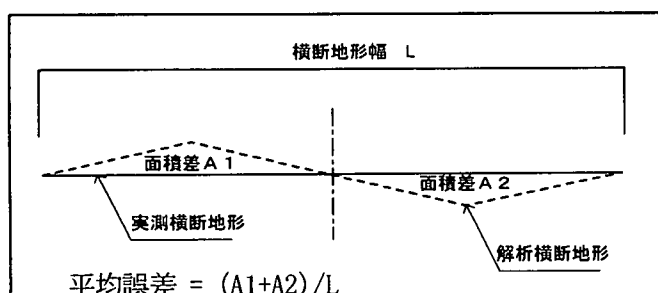


図-6 平均誤差

一般に、横断地形の精度確認は作業規程の点検測量によって行われるが、その際の許容範囲は誤差の平均値ではなく最大値を適用している。今回は、全体的な精度を検証することが先決であると判断し平均値を適用した。また、平面位置の精度検証は行わなかったが、横断地形の精度が確保できれば理論的に問題はない(2)、(3)。

(3) 結果と考察

まず、全体的な精度に着目して、数値地形データの各作成ケースに対する総合平均誤差を表-7に示した。

表-7 各手法の平均誤差

数値地形データ作成ケース	総合平均誤差(m)	評価
等高線法-対地高度300m	0.068	5(136%)
等高線法-対地高度400m	0.075	6(150%)
DTM-対地高度300m-5mメッシュ	0.050	1(100%)
DTM-対地高度300m-20mメッシュ	0.059	3(118%)
DTM-対地高度400m-5mメッシュ	0.057	2(114%)
DTM-対地高度400m-20mメッシュ	0.066	4(132%)

表における評価欄は、総合平均誤差の小さい順位であり、さらに1位を100%とした場合の誤差比率を併記した。表中の総合平均誤差の値は、各横断から算出した平均誤差の合計を横断面数で除したものである。ただし、現地補足測量は道路等公共施設と樹木等で地表面が写真に写らない箇所を行った場合のものである。この結果では、表-3の地図情報レベル250精度を満足している。各ケースでの精度は、等高線法とDTM法ではDTM法、対地高度300mと400mでは300mの方が優れる。また、DTM法の精度は、メ

ッシュ間隔5mと20mでは5mの方が優れ、精度は対地高度よりもメッシュ間隔による影響が大きい。このため、最も高精度なデータを得られる手法は対地高度300mの写真縮尺で5mメッシュのデータを取得するDTM法である。

次に、各横断の精度に着目して、各横断の平均誤差と累計分布頻度を図-8に示した。図-8は、対地高度300mの等高線法(図中の破線)と写真縮尺で5mメッシュのDTM法(図中の実線)を対比したものである。DTMの場合、平均誤差10cm以内(0.1m)のデータが全体の85%程度を占め、平均誤差20cm以内(0.2m)では全体の95%、平均誤差30cm以内(0.3m)にすべてのデータが含まれていることを示している。

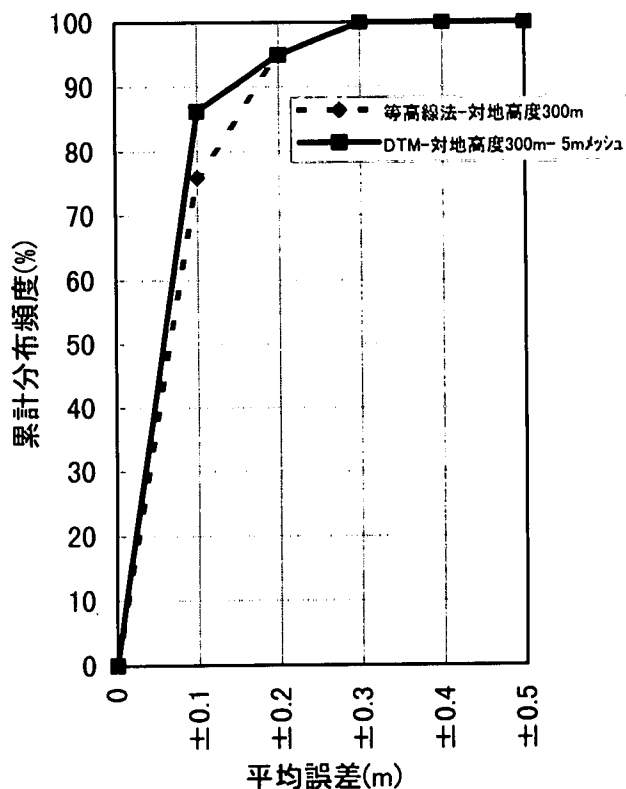


図-8 平均誤差と累計分布頻度

最後に、現地補足測量に着目して、現地補足測量の程度と平均誤差の関係を表-9に示した。この結果では、現地補足測量を実施しない場合でも地図情報レベル250精度(0.250m以内)を確保でき、さらに、樹木等で地表面が写真に写らない箇所を現地補足測量することで十分な精度向上が期待できる。

以上より考察すれば、数値地形データは、DTMと現地補足測量を併用することで高精度な3次元数値地形データを作成できることが検証された。

表-9 現地補足測量の程度と平均誤差

現地補足測量の対象箇所	平均誤差(m)	
	等高線法 -対地高度300m	DTM -対地高度300m-5mメッシュ
現地補足測量を実施しない場合	0.110	0.115
道路等公共施設のみ補足測量	0.110	0.093
道路等公共施設+樹木等で地表面が写真に写らない箇所を補足測量	0.068	0.050

4.2 データ精度の検証

提案した手法により作成した数値地形データの道路詳細設計における、適応可能な精度について検証する。精度検証の指標として作業規程の横断測量に関する点検測量の較差範囲を適用した。この関係を表-10に示した。許容較差が最大値を示しているのに対し、今回は平均誤差であるため、そのまま対比して評価することはできないが、十分詳細設計に適応可能である。

表-10 横断測量に関する点検測量の較差範囲

L	20m	30m	40m	50m
平地部許容誤差	±4.2cm	±4.7cm	±5.2cm	±5.5cm
山地部許容誤差	±11.7cm	±13.2cm	±14.5cm	±15.6cm
本提案手法	±5.0cm (DTM-対地高度300m-5mメッシュ)			

平地： $2cm+5cm(L/100)^{0.5}$

山地： $5cm+15cm(L/100)^{0.5}$

L：中心杭と末端見通杭の測定距離

今回適用した路線測量成果はL=40m

4.3 本提案手法を適用する効果

(1) 作成費用の削減

図-11は横軸に延長と縦軸に費用(図中の1升目は約1,000万円程度)の関係を示したグラフである。

グラフに示した従来法は、幅500mの地形図(空中写真測量1/1000)作成費用と幅80mの路線測量の費用で算出した費用でありデジタル化の費用は含まれていない。TS地形測量は、TSとデジタル平板を使用しすべて実測により3次元数値地形データを作成した場合の費用である。

デジタルマッピングとTS地形測量を併用する本提案手法は、従来法とくらべ多少経済的になる程度であるが、3次元デジタル化までを含めた場合には大幅な費用低減が見込まれること、高精度な3次元数値地形データを取得することで後述する効果が期待され

ることから、事業全体の効率化に大きく寄与するものと想定される。

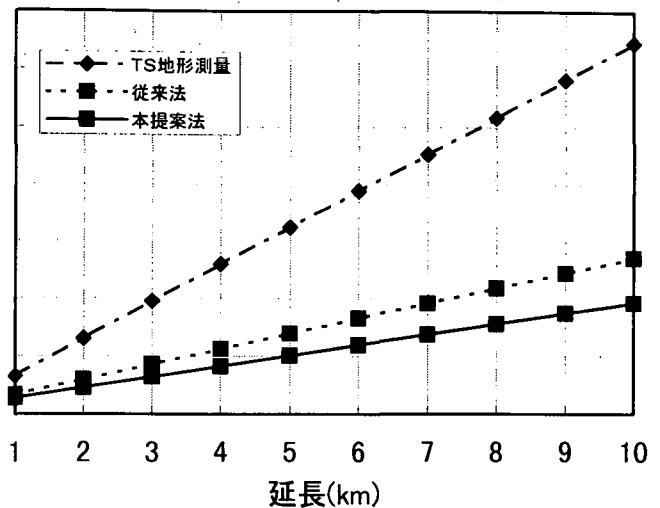


図-11 延長と費用の関係

(2) 作成期間の短縮

本提案手法は従来法と比べ、3次元CADを利用して容易に縦横断地形を取得することが可能となり調査期間は短縮される。

(3) 設計全体の精度向上

道路設計では最終成果として平面図に法面を展開し土量等の数量算出を行う。従来法では、実測による横断測量を行い横断図から法面を展開するが、横断測量の結果を補間する区間は異なった精度の地形図を基に地形を推測しながら展開する必要がある。DTM法による高精度な数値地形データは高さ情報を面として認識しているため、全体的に整合がとれた設計を行うことが可能である。

(4) 道路事業の高度化への対応

道路設計は一般に、机上でおおよその中心線を確定し、コントロール(制約)となる箇所については実測の結果を考慮しながら微調整を行い確定されるため、中心線の見直し等の手戻りが生じる。提案した手法により作成された高精度3次元数値地形データを一貫して利用することで、3次元CADを活用した設計業務の大幅な省力化と計画見直し等のフィードバックに対応可能となる。また、GISを活用して重要な施設、地質データ、遺跡、用途地域等のデータベースを数値地形データに組み込むことにより、計画の初期段階から高精度な各種情報を取得し、利用者・住民等の要望や要求条件に応える事業手法の改変や高度化への対応が可能となる。

5. まとめ

本論文で得られた知見を整理すると次のようである。

(1) 数値地形データの一元化

道路設計の流れの中で一貫して3次元CADを活用するためには数値地形データの一元化が必要である。DTM法と等高線法を併用した数値地形データの表現方法を用いることで、地形図としての情報や標高データの追加・修正等において数値地形データが一元化できることを示した。

(2) 数値地形データ作成方法

通常の道路設計で用いられる広範囲を対象とした数値地形データを効率的に作成するために、デジタルマッピングとTS地形測量を併用する高精度な数値地形データの構築方法を示した。

(3) 道路設計への適用

提案した手法により作成した数値地形データが道路詳細設計に十分適用可能な精度であることが検証された。道路設計の流れの中で、高精度な3次元数値地形データと3次元CADを組み合わせて使用することにより、道路事業の高度化への対応や設計の効率化等、様々な効果があることを示した。

今後の課題として、以下のことが考えられる。

(1) 精度の向上

道路設計に適用した事例では、局部的に最大1.0m程度の誤差を生じる箇所があった。今後は現地補足測量のデータ取得箇所やデータの構築方法等、最大誤差を少なくするためのデータ精度の検証を行う。

(2) コストの把握

他の地形形状についても実証実験を行うなど、十分なコストの検証を行う。

(3) DTMのメッシュ間隔

メッシュ間隔を細かくするほど精度が向上することが明らかになったが、その反面、コストやデータ量で不利になる。これらの関係を検証する。

(4) データ形式の標準化

3次元CADで使用するデータ形式としてDXFを適用したが、今後はGIS等の動向を注視してデータ形式の標準化を行う必要がある。その際には、精度管理、分類コード、データ形式等に関して、公共測量作業規程において細部に渡る規定化と、各種共通仕様書等の改訂が必要となる。

6. 謝辞

最後に、本研究を行うにあたり、ご協力を頂いた茨城県 県南都市建設事務所調査課の今村正美主任係長 (現竜ヶ崎土木管理課課長) をはじめ皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 土木情報システム委員会：土木CAD小委員会 研究報告書，PP98-154，1995年4月
- 2) (財)日本建設情報総合センター (JACIC)：電子データ交換ガイドブック，1998年1月
- 3) 日本道路公団：CADによる図面作成要領 (暫定案) 共通編・道路土工設計編，平成9年11月
- 4) 大石，江角，山内：GISを活用した道路設計，第51回建設省技術研究会，PP119-121，1997年11月
- 5) 佐藤彰芳，村上広史：GISの標準化に関する調査，第51回建設省技術研究会，指定課題，1997年11月
- 6) 熊谷樹一郎，大林成行，松島康人，寺山充生：衛星リモートセンシングデータの実利用を念頭に置いた地形改変による影響評価支援システムの構築，第22回土木情報システム論文集PP55-62，1997年
- 7) 建設省公共測量作業規程，(社)日本測量協会，平成8年4月
- 8) 建設省公共測量作業規程解説と運用，(社)日本測量協会，平成8年6月
- 9) 建設省公共測量作業規程記載要領，(社)日本測量協会，平成9年3月
- 10) 新井伸博，吉田茂喜，笹川滋：3次元CADによる道路設計と走行シミュレーション，第21回土木情報システム論文集，PP1-6，1996年
- 11) 新井伸博，吉田茂喜，岡林隆俊：パソコンによるCGと道路設計の視覚化への応用，第22回土木情報システム論文集，PP133-140，1997年
- 12) 建設省国土地理院：写真測量による超大縮尺図作成の可能性に関する研究作業報告書，平成元年3月
- 13) 建設省国土地理院：写真測量による超大縮尺図作成手法の標準化に関する研究作業報告書，平成2年2月