

【研究成果報告時/研究成果の概要】様式-2-ウ

古地図を用いた氾濫計算手法の基礎的検討と
我が国の治水政策の評価

中央大学研究開発機構 助教 小山直紀

本研究では、過去から現在における治水政策を時系列的に評価することを目標に、1880年代に作成された迅速測図及び1970年代の空中写真から数値標高モデル(DEM)の作成方法を検討した。迅速測図は、マップデジタル手法により等高線、基準点を用いてDEMを作成し、1970年代の空中写真は、Sfm-MVSによりDSMを作成した。さらに、そのデータを用いた氾濫計算を実施することで当時の洪水現象を再現するとともに、現況のDEMを用いた計算結果と比較し、氾濫計算への適用可能性および過去の地形データの使用用途について考察した。

Key Words :古地図, 数値標高モデル, マップデジタル, Sfm-MVS, 氾濫計算, 治水政策

1. はじめに

近年降雨の激甚化で水災害が多発しているが、1940年から1960年では1000人規模の死者数が度々発生していたのに対し、ここ20年では多くて100人単位であり、死者数は大きく減少している¹⁾。この背景には、これまでの治水政策の発展が大きく寄与した結果だと推測できる。一方、歴史的な政策に関して、時系列的に歴史的な政策を評価した研究は少ない。そこで、本研究では、①明治期(1880年代)、②戦後(1970年代)、③現代の3時期において数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)を年代別に作成する。古地図を用いた部分的な氾濫計算を行った例^{例え(ば)2)}はあるものの広域での地形モデルは未整備であり、古地図から標高や河道網を抽出して数値モデルを整備することは容易ではないことが想像できる。そこで、過去の2時代のデータベースを作成し、その自動化に向けた基礎的検討を実施する。そして、作成したDEMで関東広域での氾濫計算により、我が国の治水政策の評価をすることが目的である。

2. 過去の時代の数値標高モデルの作成について

一般に数値標高モデルを作成する方法は、マップデジタル、ステレオマッチング、航空レーザ計測の3種類ある。マップデジタルは、地形図データから等高線及び標高値を作成する手法であり、ステレオマッチングは、2枚以上の空中写真に同一の対象地域が写る、いわゆるオーバーラップした空中写真を使用し、対応する像を画像の濃度分布などの情報を指標に高さを取得する方法である。航空レーザ計測は、航空機から地上に向けてレーザ光を照射し、反射して戻ってくる時間差で地物の高さを取得す

る方法であり、2000年ごろから現在にかけて、最も主流の作成手法である。本研究では、対象範囲を関東平野としており(図-1参照)、この理由として、国内で初めて近代的な測量技術である平板測量を駆使して作成された「迅速測図」は、関東平野でのみ作成されていること、利根川の右岸側であり、カスリーン台風による被害などこれまでに多くの治水の歴史があるためである。なお、図-1は、国土地理院が提供する基盤地図情報の数値標高モデルの5mDEM(以下、現況のDEM)を背景にしている。

対象範囲において、地形図や空中写真による地図の整備状況を年表にしたものが表-1である。この表より、対象範囲を網羅する地形図は、明治時代の1880年代が最初であり、その後、1920年代以降からは約10年毎に作成されていることがわかる。一方、空中写真は、1970年代から1990年代までに約10年毎に作成されている。

本研究では、数値標高モデルの対象として、迅速測図と1974~1975年の空中写真において、マップデジタル及びステレオマッチング手法をそれぞれ用いて数値標高モデルを作成した。

2-1 迅速測図から数値標高モデル作成

表-1 対象範囲を網羅する地図の整備状況
(緑部分は本研究で数値地形モデルを作成したもの)

元号	西暦	マップデジタル		ステレオマッチング
		関東平野迅速測図	地形図 (2.5万分の1)	地形図 (5万分の1)
明治13	1880	1880~1886		
大正14	1925		1927~1930	1928~1929
昭和25	1950		1952~1959	1952~1954
昭和40	1965		1965~1968	
昭和45	1970		1970~1973	1974~1975
昭和50	1975		1979~1982	
昭和55	1980		1984~1987	1984~1986
昭和60	1985			1989~1990
平成2	1990		1993~1995	

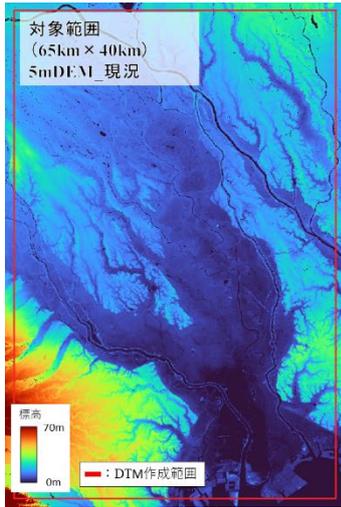


図-1 対象範囲(関東平野)
(背景には現況の5mを使用)



図-2 迅速図の1部分



図-3 マップデジタイズによる等高線
及び基準点のデジタル化

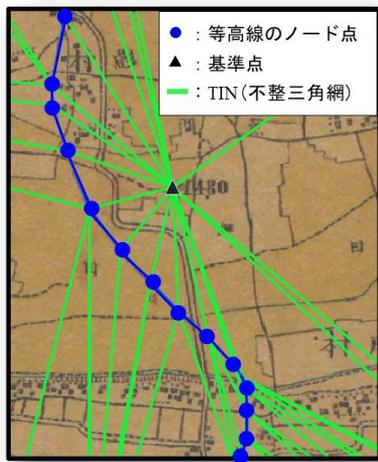


図-4 TINの作成

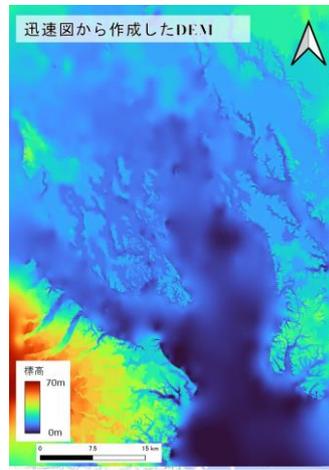


図-5 迅速図から作成したDEM

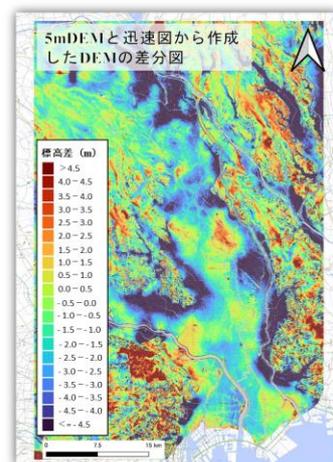


図-6 現況5mDEMと
迅速図から作成したDEMとの差分図

図-2は、迅速測図の一部を載せており、地図情報レベルは、20,000分の1であり、等高線は、5m間隔に表記されている。地図上には、基準点が小数第2位まで、等高線については整数値が記載されている。ここから、迅速測図からDEMを作成する方法について説明する。まず、迅速測図はアナログデータであるため、地図上に記載されている等高線及び基準点から標高値を抽出し、デジタルデータにする。これはマップデジタイズと呼ばれる方法である。この方法によって、等高線や基準点を可視化したものが図-3であり、等高線の総延長は6,500km、基準点の総数は273地点である。都心に近いほど標高差は5m以内に収まるため、等高線が描かれていない。次にこれらのデータから、TIN(Triangular Irregular Network)と呼ばれる不整三角網を作成する(図-4参照)。等高線を作成する際に設定するノード点と、基準点を三角形で結び、それぞれの三角形の中で、距離に応じて標高値を内挿補完で求めている。そして、不整三角網データから作成したいサイズのグリッドに標高データを反映させることで、汎用計算等に用いるこ

とができるDEMが作成可能となる。本研究では、国土地理院が提供する5mDEMとの比較を実施するため、迅速測図から5mグリッドでDEMを作成した。図-6は、現況のDEMと迅速図から作成したDEMの差分図である。この図の青色の寒色系は、明治期と比較し、現在のDEMが低くなっていることを示しており、暖色系は現況のDEMが高いことを示している。1880年代と比較して、広い範囲で4m以上もの地盤沈下が見られ、特に利根川沿いや江戸川沿いにその傾向が高いことが分かる。この要因としては、地下水くみ上げ等によって地盤が低下したことが考えられる。一方、一部地域では地盤が高くなる傾向が見られ、人口改変地形による可能性が推測される。しかし、先述のとおり都市に近づくほど、標高差が小さくなるため等高線の記載が無く、さらに基準点の密度が粗いため、作成したDEMの信頼性が十分ではないことが考えられる。今後、現況のDEMとの差が大きい地域は詳細な分析が必要である。

次に図-7は、迅速図における基準点(図-7の水色点)とその地点における現況のDEMを比較したも

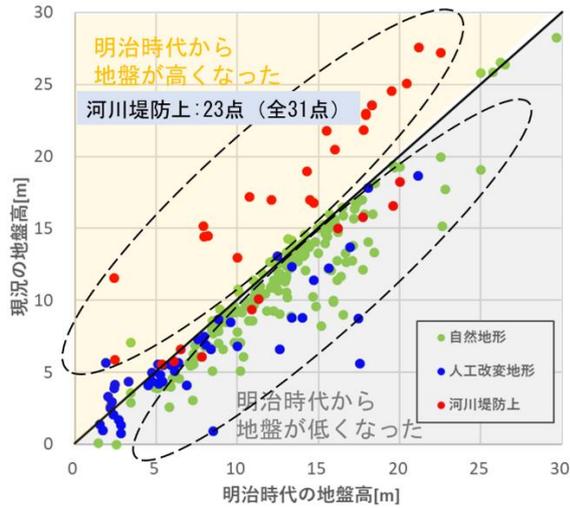


図-7 明治時代と現況の地盤高の変化量

のである。この図より、迅速測図で河川堤防上に存在していた点の多くは、平均して約3m地盤高が高くなっていることが分かる。この結果は、これまでの洪水対策における度重なる堤防の嵩上げによる影響だと推測する。また、国土地理院が提供する地形分類において、人工改変地形とされている箇所における基準点は平均1.2m低く、それ以外（ここでは自然地形に分類）に位置する基準点の高さも平均1.3m低くなることを示し、対象範囲の多くの地点で、地盤沈下したことが分かった。

2-2 航空写真から数値標高モデル作成

本研究では、対象範囲全域において空中写真が撮影されている1974~1975年を対象にした。このデータから数値標高データを作成する方法について述べていく。空中写真から数値標高モデルを作成する手法は、ステレオ図化機を用いる方法と SfM-MVS(Structure-from-Motion Multi-View-Stereo)による自動標高値抽出の手法³⁾がある。本研究では、SfM-MVSによる標高値の作成を実施した。SfM-MVSは、空中写真を主に2つの工程(SfM処理及びMVS処理)に分けて、標高値を算出する。SfM処理は、空中写真からタイポイントと呼ばれる特徴点を抽出し、各写真の位置や角度を推定する。さらにMVS処理に使用する内部標定と外部標定の設定を行う。MVS処理は、内部標定と外部標定から画像間マッチングの計算をし、視差の計算および最適化を行う。そして、これらのデータから高密度点群を作成することにより、数値表層モデル(DSM)を作成する。本手法に用いた空中写真は、国土地理院の地図・空中写真閲覧サービス⁴⁾よりダウンロードし、入手した。図-8に、集めた空中写真を載せており、全3,538枚の写真である。各写真は、1枚1枚は、上下左右方向にオーバーラップした写真であるため、撮影カ所の重なりを考慮した上で並べる必要がある。そのため、先ほど説明した、SfM処理によって空中写真による対象領域を網羅した事前データを作成した。また、図の写真群からわかるように、エリアによって、春夏

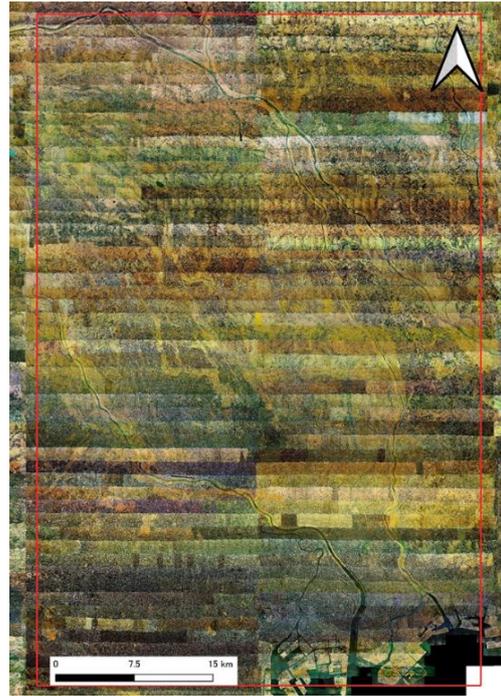


図-8 対象領域における空中写真(全3,538枚)

に撮られた空中写真(緑色が濃いもの)や秋冬に撮られた空中写真(黄色や茶色が濃い)があることがわかる。このことより、空中写真は、対象領域においては、全て同一時期に撮られていないことがわかる。また、詳細は紙面の都合上詳細については書くことができないが、エリアによって、撮影高度や用いられたカメラが異なっている。そのため、SfM処理をした場合に、画像間のマッチング精度が下がり、DSMを作成することができない、そのため、撮影された諸条件が同一のエリアで解析した後、各エリアの結果を接合するため再度解析を実行している。また、これらの写真は、垂直直下方向でのみ写真が撮られており、ディッキングやドーミングと呼ばれる問題⁵⁾が発生する。これは、SfM-MVSによりDSMを作成した際に、作成したエリア内において、実際の地形面と比較し、エリア中心からおおよそ同心円状に標高が低くなるもしくは高くなる現象が発生するものであり、地形が低くなる現象をディッキングと呼び、高くなる現象をドーミングと呼ぶ。本解析を実施した際にも、ディッキング現象が生じており、一般的には、この対策には、斜め写真の追加もしくは、GCP(Ground Control Point)を追加し補正する必要がある。GCPとは、標高の判明している地点のことであり、日本でいえば基準点がこれにあたる。斜め写真については、ダウンロードサイトでは入手できず、また、撮られているかも不明である。そこで、本研究では、GCPを追加することによって、ディッキング現象の緩和をすることとした。対象領域全体にGCPを設定し、解析を行っていくが、現在の基準点については、国土地理院の基準点成果サービス等閲覧サービス⁶⁾から全国で入手が可能である。しかし、本研究で使用している空中写真は、1975年ごろ

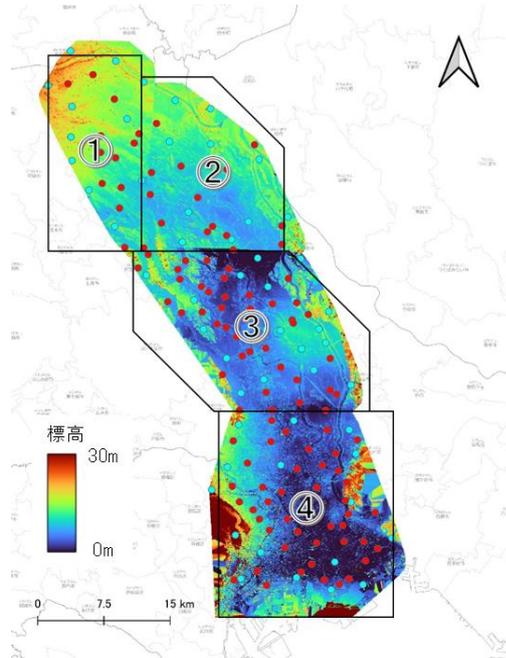


図-9 SfM-MVSによるDEM
(GCPの設定あり、氾濫計算に使用する領域にのみ、SfM-MVSによる処理をした。)

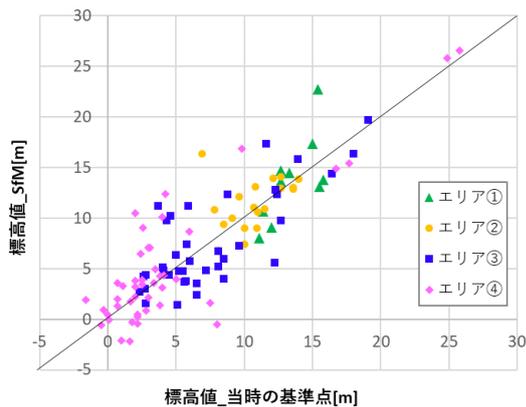


図-10 SfM-MVSで作成したDEMと検証用の
基準点との比較

の基準点であるため、現在と地盤沈下や土地開発等によって標高に違いが生まれている可能性がある。そのため、過去の地図情報データから、基準点入手する必要がある。そこで、過去の地図データをweb上で閲覧可能な今昔マップ⁷⁾より対象領域における基準点をすべて見つけ出し(全191点)、その中から59点をGCPとして使用した。

図-9は、1970年代の空中写真からSfM-MVSから作成したDEMである。また、①～④までの黒枠で囲まれた部分が、空中写真の諸元が異なるものであり、それぞれのエリアにおいてDEMを作成している。図-5の迅速図から作成したDEMと異なり、領域が狭くなっているが、これは、対象領域全体をSfM-MVS処理するために数週間という時間を要したため、次章の氾濫計算に関わる部分のみに対して処理をしたためである。図-10はSfM-MVSによって作成した

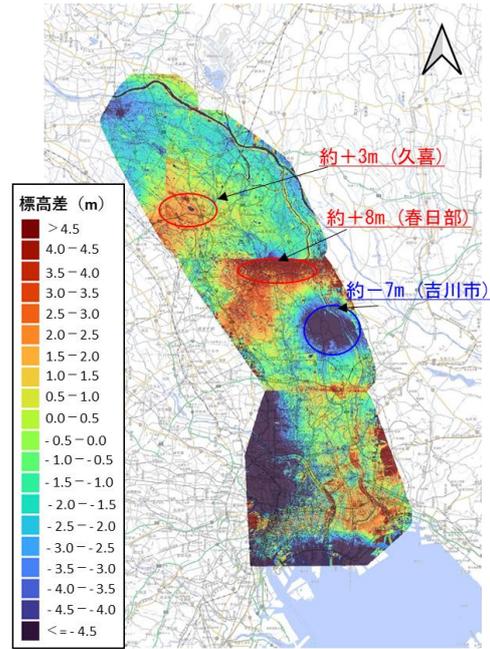


図-11 現況5mDEMと
1970年代の空中写真から作成したDEMとの差分図

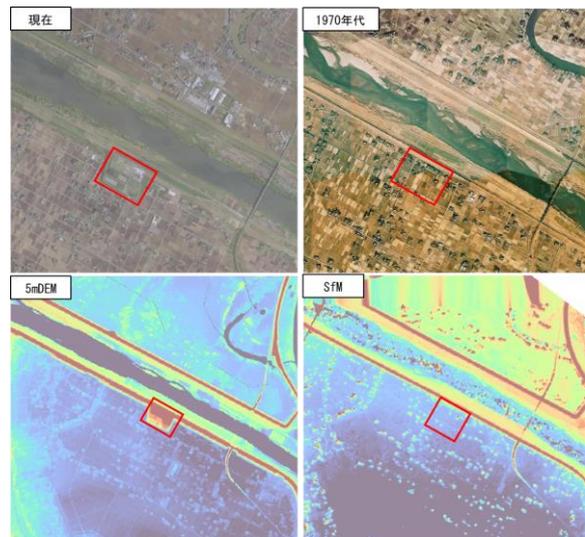


図-12 SfM-MVSによる構造物の抽出
(防災ステーションの有無)

標高と基準点(図-9 赤及び水色の丸点)の比較である。全体的な傾向として、現況と作成したDEMの差異は概ね2m以内である箇所が多いが、場所によっては、5m以上もの差が発生しているところがある。特に、エリア③でのばらつきが大きいことがわかる。

また、図-11は現況のDEMと空中写真から作成したDEMの差分図である。この図より、エリア①およびエリア②に関しては、概ねDEMが作成できていることがわかる。一方エリア③に関しては、境界部においては、ドーミング現象が発生し、中心部においてはディッシング現象が起きており、現況のDEMと大きな乖離が起きていることがわかる。また、エリア④に関しても同様のことが言える。これは使用した空中写真データが様々な時期で撮られており、輝度が大きく異なることなどの原因が考えられ、今後

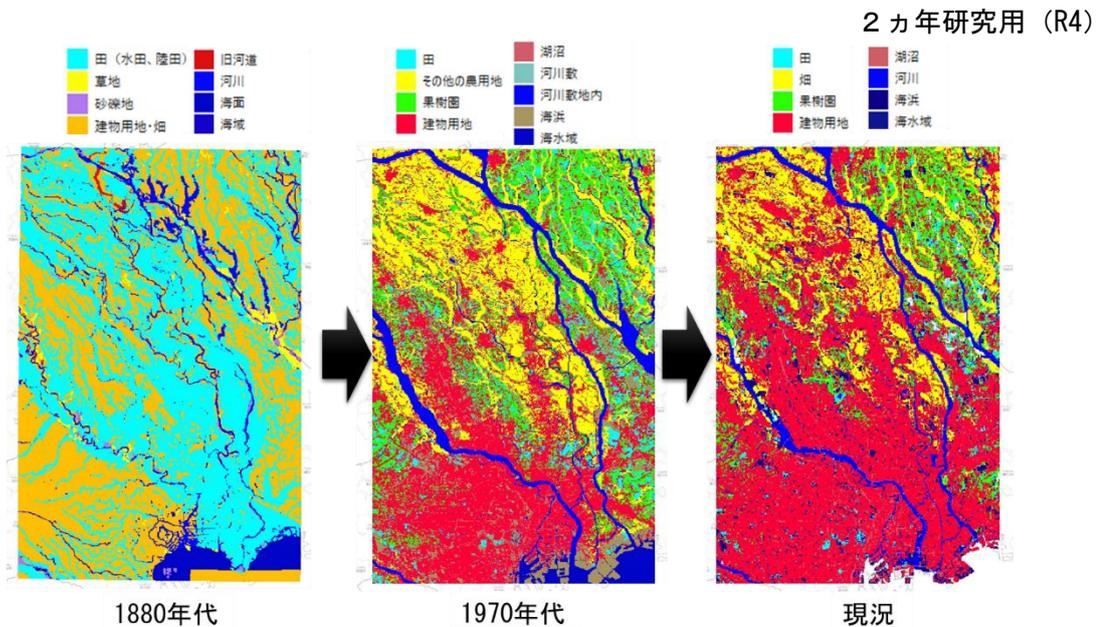


図-13 土地利用の変遷(左から、1880年代、1970年代、現況)

研究していく必要がある。また、図-12は、1970年代と現況において、DEMの変化が起きた部分を抽出しており、構造物等により、DEMが変化した場合に抽出できることを示している。

3. 作成した地形データを基にした氾濫計算

本論文で作成したDEMは、1880年代に作成された迅速測図からマップデジタル手法で作成したものを、1970年代の空中写真からステレオマッチング手法のSfM-MVSによって作成したものを、さらに、現代の国土地理院が提供するDEMを含めて3種類ある。これらのDEMを用いて、氾濫計算を実施することにより、各年代のDEMの違いが氾濫に及ぼす影響について分析を実施した。

対象とした洪水は、1947年にカスリーン台風で決壊した利根川右岸(埼玉県加須市)である。解析の諸元として、計算格子サイズは25mとし、土地利用については、迅速測図から土地利用を判別した。また、1970年代および現代については、国土地理院が提供する国土数値情報⁸⁾から各年代における土地利用情報が提供されているものを用いた。図-13は、各年代における土地利用を示したものである。この図より、1880年代は、現況で建物用地になっている場所のほとんどは、水田もしくは畑であったことがわかる。その約100年後である1970年代は、水田はほとんどなくなり、建物用地か農用地となっていることがわかる。現在では、都心を中心に建物用地が増え、農用地が減少していることがわかる。

氾濫計算に使用した方程式は、浸水想定区域図に用いられている浅水流方程式を使用した。また、土地利用に合わせてmanningの粗度係数を決めている。境界条件の氾濫流量は、内閣府のカスリーン台風の報告書⁹⁾より、ピーク流量が5000m³/sと推定されていたため、この値がピーク流量となるように設定し、

約40時間高水位が継続すると仮定し、正規分布の形としている。また、氾濫発生地点については、カスリーン台風と同様の場所を設定した。また、氾濫解析結果については、図-10のエリア③において、現況との大きな乖離が発生しているため、エリア①、②の部分のみに着目し解析を実施した。

図-14は、各時代において氾濫計算を実施し、最大浸水深の結果である。まず迅速図であるが、等高線及び基準点から作成されているため、DEMの解像度が低く、最大浸水深の明瞭さはなくなっていることがわかる。しかし、現況の計算結果と比較をしても、最大浸水深が大きい地域に関しては、概ね同様の結果が得られていることがわかる。また、空中写真から作成したDEMに関しては、計算結果より、現況に近い明瞭さが得られていることがわかる。また、現況と比較をすると、概ねの浸水域に関しては表現できているものの、完全には一致しないことがわかる。このことから、空中写真から作成したDEMは、ある程度の再現性はあるものの、細かな地形の表現が難しいことがわかった。

4. まとめ

本研究では、過去から現在における治水政策を時系列的に評価することを目標に、1880年代に作成された迅速測図及び1970年代の空中写真から数値標高モデル(DEM)の作成方法を検討した。迅速測図は、マップデジタル手法により等高線、基準点を用いてDEMを作成し、1970年代の空中写真は、SfM-MVSによりDSMを作成した。さらに、そのデータを用いた氾濫計算を実施することで当時の洪水現象を再現するとともに、現況のDEMを用いた計算結果と比較し、氾濫計算への適用可能性および過去の地形データの使用用途について考察した。以下にそのまとめを示す。

マップデジタルにより、迅速図よりDEMを作成

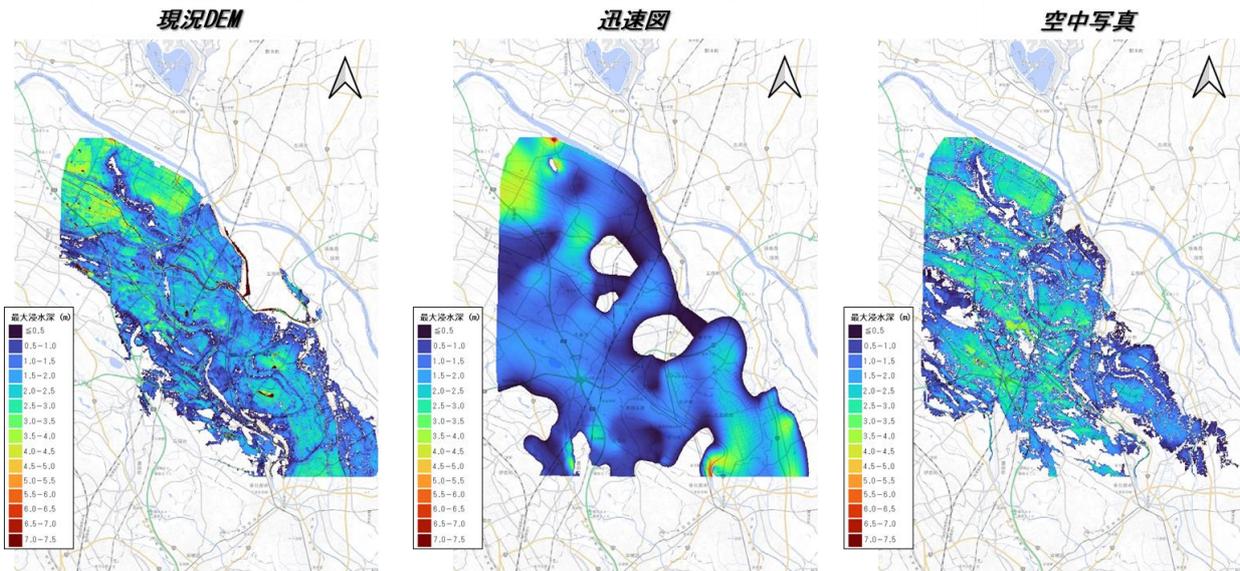


図-14 氾濫計算の結果(左から、現況、迅速図(1880年代)、空中写真(1970年代)のDEMを使用)

することを可能とした。また、1880年代と現況の標高は、平均で1.3m地盤が沈下していることが分かった。また、SfM-MVSにより、空中写真からDEMの作成を実施した。広域の標高データを使用する場合には、課題が残るものの、過去の構造物の抽出等、使用目的により作成した標高データを活用できる。さらに、作成した数値標高データを用いて、氾濫解析を実施した。迅速図から作成したDEMを用いた場合は、現況とは氾濫域が異なっているものの、概ねの氾濫域や浸水深を表現できることがわかった。また、空中写真から作成

したDEMに関しては、広域で作成するとディッシング現象やドーミング現象が生じ、一部DEMを再現できない部分が生じる。しかし、盛土や河川構造物等の過去の変遷を抽出することができる。DEMにおいても現況の5mに近い、解像度を表現できる一方で、氾濫解析結果より、現況とは完全には一致せず、細かな地形表現が再現できていないことがわかった。

以上のことより、古地図の数値地形モデルは水文学・防災工学だけでなく、農学、都市計画、環境学等、あらゆる分野で活用できる基盤情報地図として活用できる可能性がある。

謝辞：本研究は、朝日航洋株式会社による地図作成に関する情報の提供、ならびに種々の助言があり成り立つものとなった。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：水害統計調査 https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/suigaitoukei/ (2025年1月20日閲覧)。
- 2) 石川忠晴, 江戸時代の治水思想が流域治水プロジェクトの計画と実践に与えるヒントについて,

土木学会論文集D3 (土木計画学), 78 巻, 6 号, p. II 509-II 521, 2022.

- 3) Ullman S: The interpretation of structure from motion. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 203, 405-426, 1979.
- 4) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス, <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>.
- 5) Rosnell T. and Honkavaara E.: Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. Sensors, 12, 453-480, 2012.
- 6) 国土地理院：基準点成果等閲覧サービス, <https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/top.html>.
- 7) 時系列地形図閲覧サイト:今昔マップ on the web, <https://ktgis.net/kjmapw/>
- 8) 国土地理院：国土数値情報ダウンロードサイト, 土地利用細分メッシュ, <https://nftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>.
- 9) 内閣府：1947 カスリーン台風報告書, 2010.