

# DSM による地方都市の 3 次元的時空間分析

## －戦後の伊勢市主要部の事例－

桐 村 喬

〈要旨〉 本稿では、地方都市である三重県伊勢市の主要部を対象として、空中写真から生成した DSM を用いて、3 次元的な視点からの都市空間の長期的変化の分析を行った。まず、1960 年代以降の複数年次の空中写真をもとに、SfM ソフトウェアを用いて DSM を生成した。DSM の分析からは、中心市街地から徐々に郊外に市街地が広がり、山地が切り開かれたり、低地部の農地が宅地化されたりするなど、都市化が進展する様子が確認された。また、伊勢市駅南側に高層の商業施設が建設され、その後、郊外にも商業施設が増えて、商業機能の郊外化が進むとともに、駅前の高層の商業施設が取り壊され、再開発されるという状況も明らかになった。一方で、街区別の分析からは、都市化や郊外化の過程だけでなく、中心市街地でも若干の高層化がみられたことが確認された。3 次元的な景観を可視化した結果からも、同様の傾向が明らかになった。今後、DSM の研究利用を拡大させるためには、DSM の誤差を減らし、精度を改善するか、あるいは、相対的な高度差を利用するなどの対応策の検討が必要である。また、精度の低さのために、本稿では利用しなかったものの、米軍撮影の空中写真を利用することができれば、戦災復興から高度成長期までの過程も分析できる。また、戦前の空中写真が残存している可能性もあり、これも利用できるのであれば、1930 年代の街並みも再現できるだろう。このように、一定の課題があるものの、時系列的に DSM を整備して都市空間におけ

る 3 次元的な時空間分析を行うことで、これまで国勢調査などの人口統計が中心であった 20 世紀以降の都市の長期的な変化に関する研究に、高さという別の次元を加えることができる。また、DSM 生成の副産物ともいえる 3 次元モデルを用いることで、直接、景観の変化を確認でき、これまでは写真などの固定された視角からしか把握できなかった街並みを、自由な視点から観察することができる。

〈キーワード〉 DSM（数値表層モデル）、SfM、3 次元モデル、都市化、郊外化、地方都市

## I はじめに

高度成長期以降、諸機能の集中にともない、大都市では急速に高層建築物が増加してきた。このような“都市空間の立体化”（戸所，1994）は、高度成長期以後の都心部の空洞化と、バブル経済崩壊以降の都心部での諸機能の回帰を経ても継続しており、近年は、首都圏を中心にタワーマンションも大きく増加してきている。このような都市空間の立体化の実態は、従来、綿密なフィールドワークによる研究者独自の調査結果や、消防署などによる高層建築物の調査結果、住宅地図などを利用して分析されてきた。

一方、2021 年 3 月に国土交通省が公開した「PLATEAU」<sup>1)</sup>からは、3 次元都市モデルのベクターデータがダウンロードできるようになっている。このような都市の 3 次元的な特性に関するデータの整備と公開は、立体化してきた現代の都市を 3 次元的かつ定量的に分析することを可能にし、都市地理学研究に新たな方向性をもたらしうると考えられる。建物の建築年などの情報を合わせれば、時系列的な分析もある程度可能になる。しかし、立体化が顕著な都市ほど建築物の建て替えが進んでおり、過去の状況を遡って把握することは難しく、都市の高さ方向での 3 次元的な変容過程を適切に捉えることは難しい。

広域の 3 次元モデルデータは、一般的に、LiDAR スキャナで直接計測するか、衛星画像や空中写真から写真測量を行うことによって作成される。高精度な機器やソフトウェア、高解像度の衛星画像を利用するには、莫大な費用が必

要であり、広域的に解析することは現実的ではない。しかし、近年では、ドローンで撮影した写真データから 3 次元の点群データを生成し、3 次元モデルを作成する Structure from Motion (SfM) と呼ばれるソフトウェアも安価に利用できるようになってきた。SfM はこれまで、どちらかといえばミクロな視点からの分析に用いられてきており、地理情報関連では、主に地形解析や森林環境の解析に用いられてきた（早川・小口, 2016; 小林, 2020 など）。一方で、都市全体のようなマクロな視点からも利用でき、空中写真や衛星画像を用いた分析が試みられている（Lastilla et al., 2021）。日本の場合、国土地理院が公開している空中写真データを利用すれば、SfM ソフトウェアによって DSM（数値表層モデル）を生成し、3 次元モデルデータを作成できる（桐村, 2021）。また、国土地理院は、戦後の全国の空中写真や終戦直後の米軍撮影の空中写真を 400dpi の高解像度で公開しており、主に第 2 次大戦以降の長期間にわたる DSM データを広域的に構築することもできる。さらに、DSM データをもとにして、3 次元都市モデルデータを生成することもでき、矢野ほか（2007）による「バーチャル京都」のような時間軸を加えた“4 次元”的な景観の可視化も可能である。「バーチャル京都」は、祇園祭の山鉾巡行をウェブ上でバーチャルに再現した「祇園祭デジタル・ミュージアム 2021」<sup>2)</sup> の基盤データの一つにもなっており、時系列的に広域の 3 次元モデルデータを構築することで、地域のバーチャルミュージアムの基盤的なデータとしても活用できると考えられる。

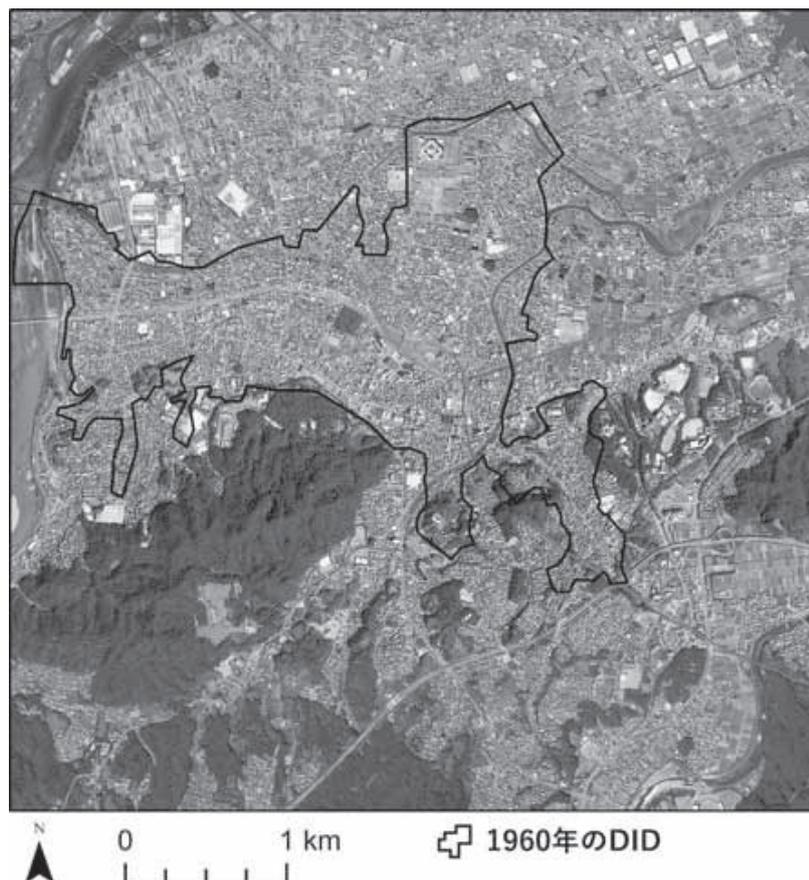
そこで、本稿では、地方都市である三重県伊勢市の中心市街地と郊外を含む主要部を対象として、空中写真から生成した DSM を用いて、高さという視点からの都市空間の長期的変化の分析を行ったうえで、DSM を活用した都市の 3 次元的時空間分析の展開可能性について整理する。都市をマクロな視点で捉え、分析するための新たなデータとして DSM を活用できるものと考えられ、本稿は、地形や森林の解析に主に用いられてきた SfM を、時系列的な視点からの都市空間の分析に適用するものである。また、小地域統計などを活用した長期的な変化の分析がすでに行われてきた東京（梶田, 2019; 桐村, 2011a）、京都（桐村, 2011b）のような大都市と比べて、伊勢市のような地方都市では

1970年代以前の詳細な小地域統計が作成されていないことが多く、データが整備されていたとしても、平成の大合併などのために、郊外を含めたひとまとまりの都市全体を分析できる状況にはないことが多い。空中写真から生成できる DSM は、そのようなデータの少ない地方都市における新たなデータとして利用価値が高いものと考えられる。

## II 分析方法と使用するデータ

国土地理院が提供する地理院地図<sup>3)</sup>では、オルソ幾何補正された最新や過去の空中写真を閲覧することができる。オルソ幾何補正とは、真上から見た空中写真になるように補正する処理のことである。航空機などからの空中写真の撮影においては、カメラの真下以外の被写体は、斜め方向から撮影されることになる。高層になるほど傾いて撮影され、それが平面の空中写真として記録されるため、オルソ幾何補正が必要になる。オルソ幾何補正の際には、1枚の空中写真だけでなく、連続して撮影された複数枚の空中写真が必要であり、それぞれの被写体の対応関係を解析したうえで、オルソ幾何補正が行われる。このとき、2つの空中写真の視差から高さ情報も同時に取得でき、DSM を生成することができる。SfM ソフトウェアは、このような写真の対応関係の判定から被写体に関する3次元的な座標を取得する処理を、自動的あるいは対話的に行うことができるアプリケーションであり、DSM やオルソ幾何補正された空中写真データを生成することができる。

そこで、本稿では、代表的な SfM ソフトウェアである Agisoft 社の Metashape Professional を用い、国土地理院の地図・空中写真閲覧サービス<sup>4)</sup>からダウンロードできる、400dpi の高解像度<sup>5)</sup>の空中写真データを利用して、DSM を生成する。空中写真データのダウンロードから DSM の生成までの手順については、桐村（2021）と同様である。対象地域は、一定の土地利用変化と高さ方向の変化が生じてきたと考えられる伊勢市の中心市街地と郊外を含む主要部であり（第1図）、1960年の国勢調査結果による DID（人口集中地区）を包含した5km 四方の範囲である。なお、以降では、1960年の DID の地域を中心市街地と呼ぶ。空中写真の選定にあたっては、可能な限り同一年次で、



第 1 図 分析対象地域

1960 年の DID については国土数値情報より作成。  
背景の空中写真は国土地理院撮影の空中写真高解像度データ（2020 年）より作成。

難しい場合は 2 年程度の幅を上限として、一連の空中写真を使って対象地域全体の DSM が生成できることを条件とした。選定した空中写真および撮影年次は第 1 表のとおりである。撮影縮尺についてはおおむね 1 万分の 1 程度である空中写真を選定したが、2000 年代については空中写真が少ないため、やむを得ず 2002 年については 3 万分の 1、2008 年については 2 万分の 1 の空中写真を用いている。

分析の手順としては、まず、対象地域における DSM を生成し、それぞれの年次について示したうえで、高さ方向の変化から把握できる都市化や郊外化の過程を検討する。そのうえで、2017 年度の三重県共有デジタル地図データに基づく街区<sup>6)</sup>の単位で、街区内の DSM のラスターデータのセルのうち、高さの値の上位 2.5%、下位 2.5%を除いた残る 95%での高さの最大値と最小値の差（以下では、この値を 95%高度差と呼ぶ）を求めて、変化の詳細な地域的

第 1 表 使用する空中写真

年次	撮影日	撮影縮尺	写真の枚数	写真の色
1961/63年	1961年8月21日			
	1963年5月7日	1万分の1	48	モノクロ
	1963年6月1日			
1975年	1975年9月26日			
	1975年11月10日	8千分の1	66	カラー
	1975年11月20日			
1983年	1983年10月30日			
	1983年11月1日	1万分の1	56	カラー
	1983年11月15日			
	1983年11月21日			
2002年	2002年4月22日	3万分の1	13	モノクロ
2008年	2008年9月12日	2万分の1	15	カラー
	2008年9月24日			
2020年	2020年9月21日	1万分の1	61	カラー
	2020年9月28日			

国土地理院「地図・空中写真閲覧サービス」より作成。

傾向を定量的に分析する。さらに、DSM から生成した 3 次元モデルを用いて、それまでの分析から得られた結果をもとに、3 次元的な景観の変化の分析を行い、視覚的に 3 次元的な分析を試みる。

### Ⅲ DSM からみた都市化と郊外化の状況

Metashape Professional 上で空中写真を読み込み、写真のアラインメントを行ったうえで、GCP（地上基準点）を設定して、写真の位置などを調整した結果の誤差は第 2 表のとおりである。各年次の GCP（地上基準点）の誤差（RMSE）は非常に小さいが、GCP は地上に設定しており、建物や樹木の高さの誤差は、必ずしもこの誤差には含まれていないことに注意する必要がある。また、生成された DSM の 1 セルあたりの解像度は 1.17m ～ 2.02m であり、撮影縮尺が最も小縮尺である 2002 年についてはやや解像度が粗くなっている。

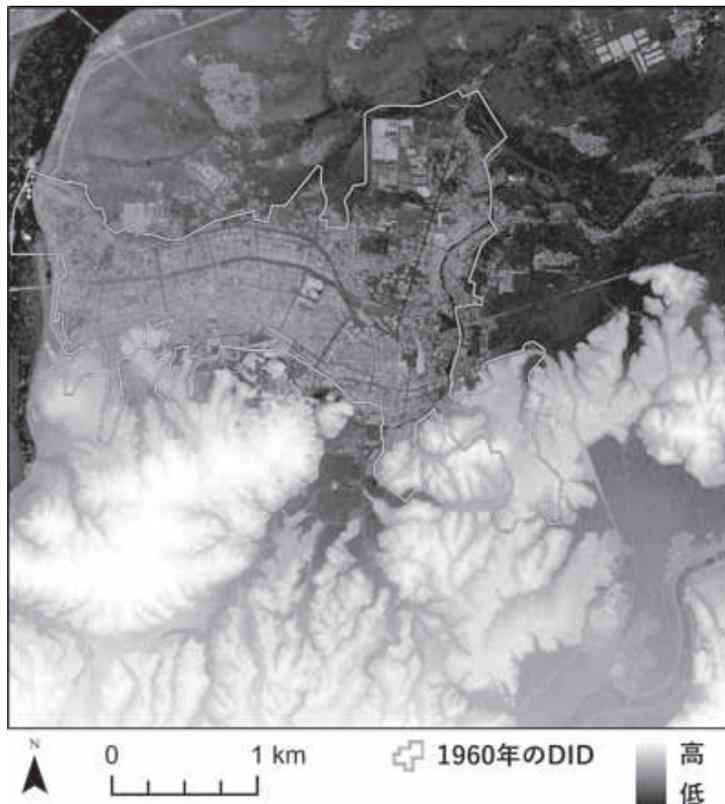
1961/63 年の DSM をみると、値の高さから中心市街地内に建物が密集している様子がうかがえる（第 2 図）。中心市街地の北にはいくつかの集落が確認

DSM による地方都市の 3 次元的時空間分析（桐村）

第 2 表 GCP の数と誤差および生成された DSM の解像度

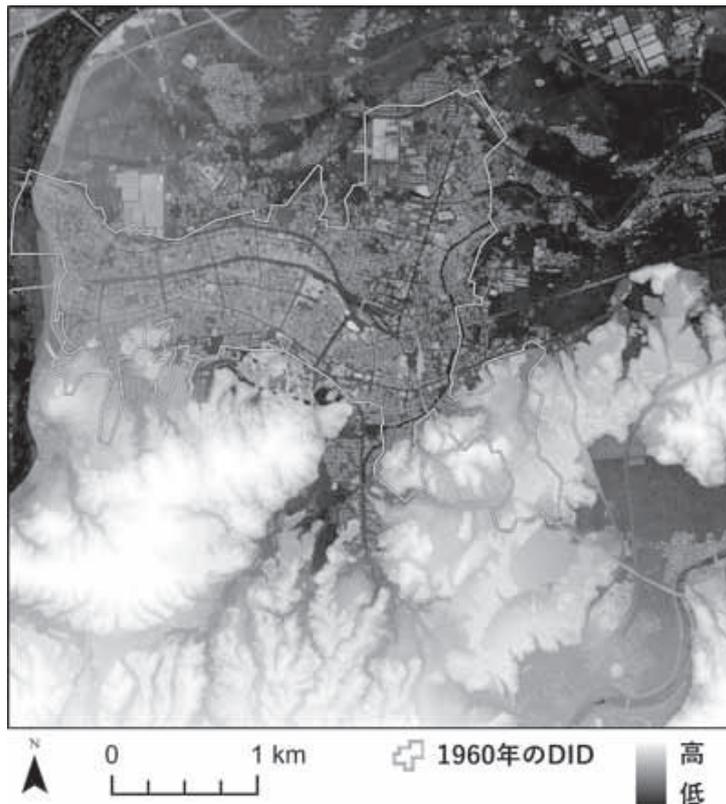
年次	GCPの数	GCPの誤差 (m)	生成された DSMの 解像度 (m/セル)
1961/63年	63	0.001156	1.69
1975年	58	0.002420	1.22
1983年	57	0.002679	1.39
2002年	63	0.000364	2.02
2008年	91	0.000572	1.25
2020年	63	0.004154	1.17

国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。



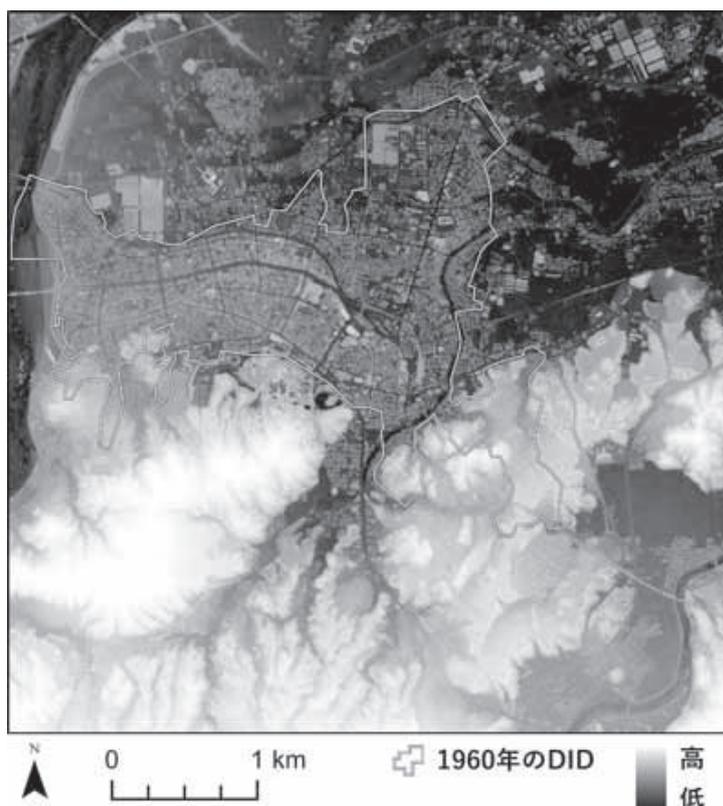
第 2 図 1961/63 年の DSM  
国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。

できるが、特に大きいものは高向地区であり、この時点では御園村の大字であった。北東部には神鋼電機（現シンフォニアテクノロジー）の工場も確認できるが、中心市街地の北の低地のほとんどで開発は進んでおらず、旧河道も低い値として明確に読み取れる状態である。中心市街地の南や南東には山地が広が



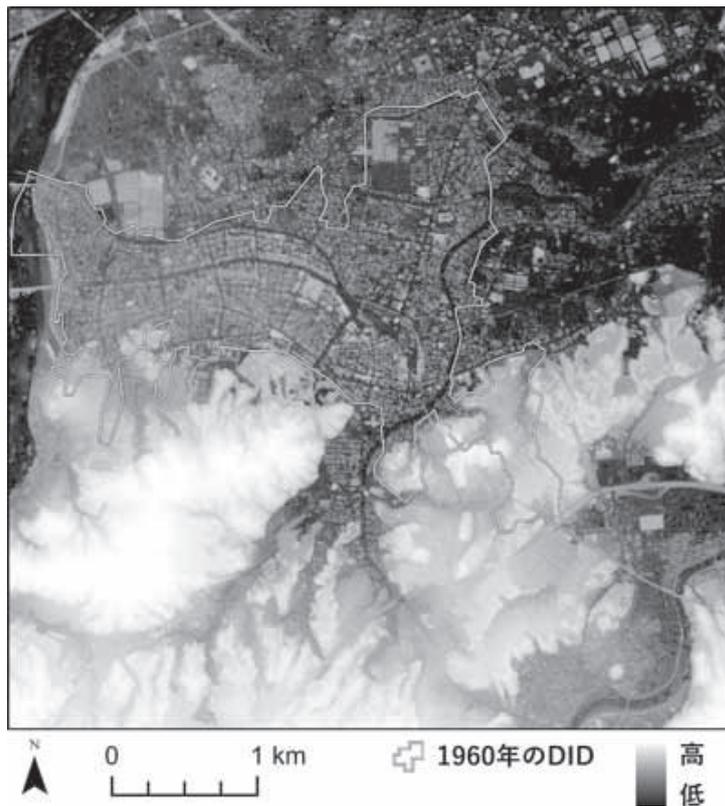
第 3 図 1975 年の DSM  
国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。

り、倉田山のように切り開かれて平坦になっている場所もあり、山地の合間にある低地では、既存の集落を除けば、あまりまだ開発が進んでいない状況が分かる。1975 年の DSM をみれば、中心市街地の外縁部から外側にかけて、市街地が若干拡大し、周辺地域の都市化が進む傾向を読み取ることができる（第 3 図）。北部では、旧河道やその周辺の低地が都市化され、国道 23 号の南勢バイパスも開通しており、盛り土として周辺よりもやや高いために、DSM 上にもはっきりと表れている。中心市街地の東の低地でも都市化が進み、山地が広がる南側でも一部が切り開かれつつ、都市化が進んでいる様子が見て取れる。また、中心市街地から南東方向には、近鉄鳥羽線が開業しており、1961/63 年と比べると、五十鈴川駅が南東部の山地・山林を切り開いて建設されていることがわかる。中心市街地の内側でも、伊勢市駅（対象地域の中央付近）の南側に高層の建築物が建てられていることが読み取れる。これは当時のジャスコ B 館であり（市川，2019）、伊勢市駅の南側では建築物の若干の高層化が確認できる。伊勢市駅南側での高層化は 1983 年までの間も続いている（第 4 図）。

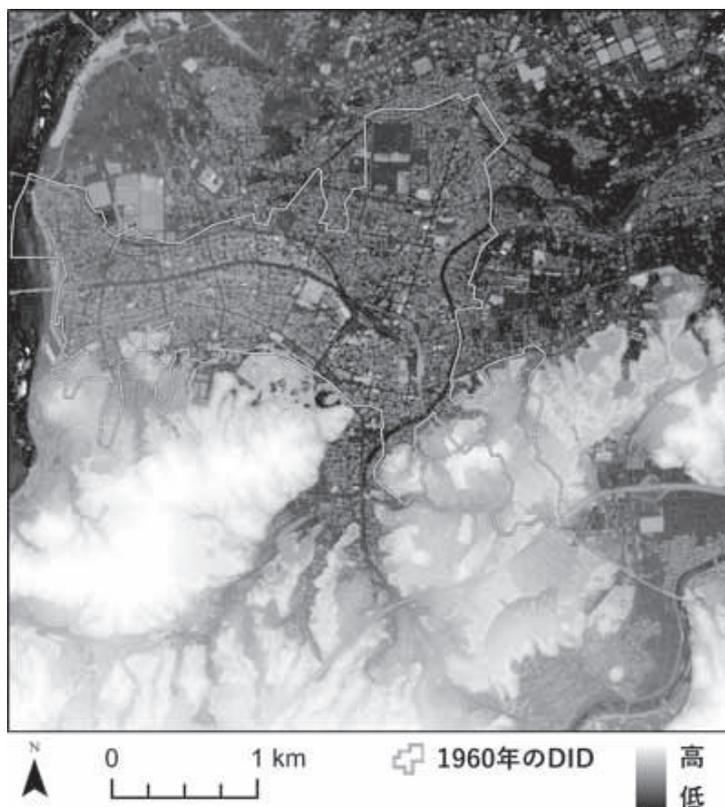


第 4 図 1983 年の DSM  
国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。

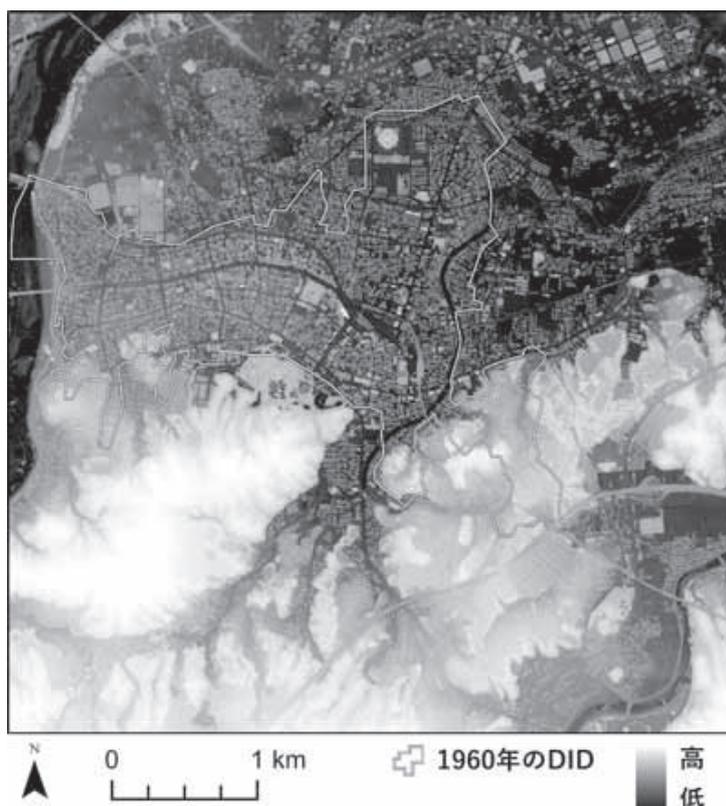
一方で、北東部の国道 23 号南勢バイパス沿いにはショッピングセンターのララパークが開業していることがわかるが、バイパスの沿道にはまだあまり建物がない。この 8 年間も引き続き、対象地域内の都市化が徐々に進む傾向が確認でき、南部の山地も少しずつ開発されていることがわかる。約 20 年後の 2002 年の状況を観察すると、南勢バイパス沿いで開発が進んだことが読み取れる(第 5 図)。市街地の拡大は主に低地部で進んでおり、山地の開発による都市化は局所的であるが、南部から南東部にかけて、伊勢自動車道が開通して山地が切り開かれ、伊勢インターチェンジ (IC) の周辺には当時のジャスコ新伊勢店 (現イオン伊勢店) が開業している。2002 年から 2008 年の間の大きな変化は、中心市街地北端 (対象地域の中央北部) に立地していた東洋紡績の工場の跡地における、ショッピングセンターのミタス伊勢の開業である (第 6 図)。また、南勢バイパス沿いのララパークは建て替えられ、より大きな建物になっていることがわかる。一方で、伊勢市駅南側にあったジャスコの建物がなくなっていることが DSM から読み取れ、駅前の商業集積が衰退し、商業機能の郊外化が



第 5 図 2002 年の DSM  
国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。



第 6 図 2008 年の DSM  
国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。



第 7 図 2020 年の DSM  
国土地理院撮影の空中写真高解像度データより作成。

進んできたことが推測される。2020 年になると、ミタス伊勢の北側に伊勢赤十字病院が開業しており、一方で、対象地域の北西部にあり、中心市街地の北にあった移転前の山田赤十字病院の建物が DSM 上から無くなっている（第 7 図）。また、伊勢 IC の北西側にある市立伊勢総合病院も隣接する北側の敷地に移転していることがわかる。中心市街地のうち、伊勢市駅前に注目すれば、ジャスコの跡地に高層建築物が確認でき、近隣にも高層建築物が新たに建設されている。ただし、ジャスコ跡地の高層建築物の用途は小売店ではなくホテルで、近隣のものも多くはホテルかマンションであり、商業集積としての駅前の機能は失われている。この間の都市化は北部の低地や南部の山地で徐々に進んでいるが、大規模な開発は少ない。

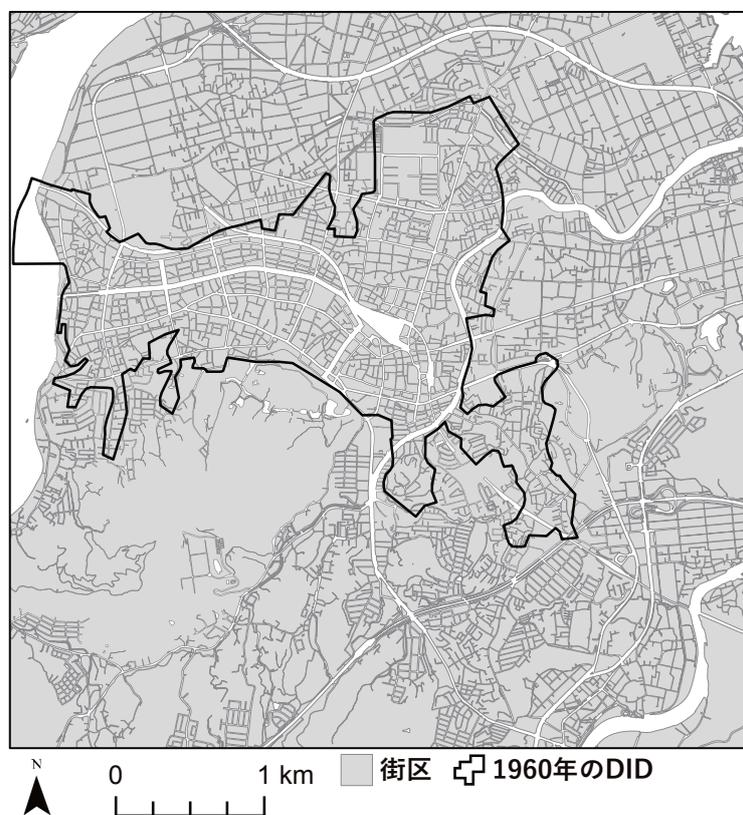
#### IV 街区別にみた 95%高度差の変化の特徴

街区別の 95%高度差を求めることで、DSM の生成時における誤差の影響をある程度排除することができる。95%高度差は、街区内の外れ値を除いた相対

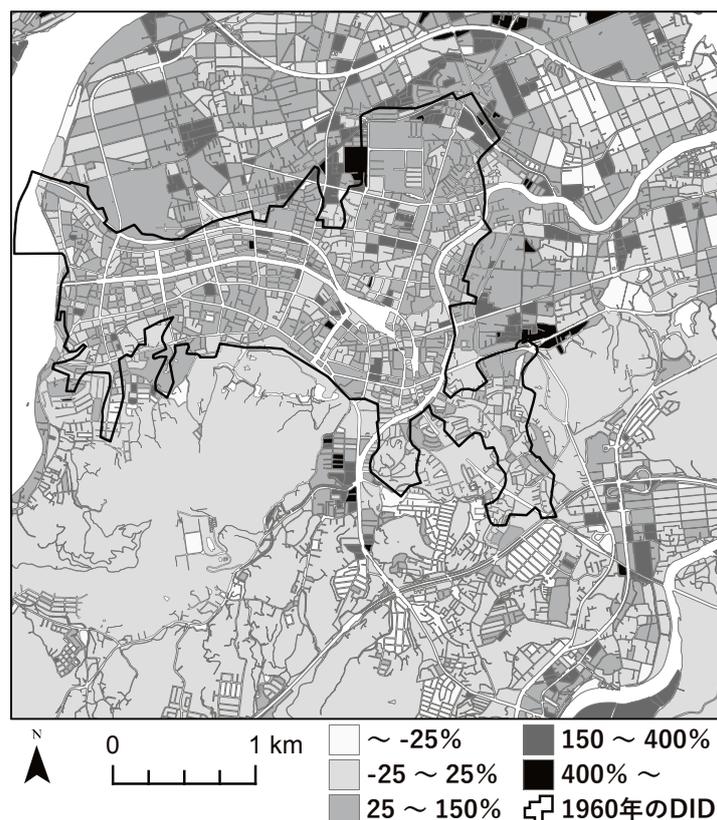
## DSM による地方都市の3次元の時空間分析（桐村）

的な高度差であり、系統的な誤差がある場合でも、街区内で誤差の程度が一定であれば、95%高度差にはあまり影響がないと考えられる。ただし、95%高度差の値は、DSMと同様に建物以外の高度差も含み、樹木以外に地形による高度差も含まれる。したがって、ある程度平坦な街区以外では、95%高度差の値をそのまま用いて分析することは難しいため、2時点間の変化率を求めることで、高層建築物の建設による立体化や、山地や森林の開発の地域的状况を明らかにする。

ここでの分析対象とする街区は、河川敷や鉄道敷地などを除いて作成した街区のデータのうち、100平方メートル以上の面積をもつものであり、第8図のようになっている。なお、山地と道路で区切られていない住宅地は山地の街区に含まれていることがある。まず、1961/63年から1975年の間では、各年次のDSMからの分析で示されたように中心市街地の北側で一定の上昇傾向がみられる（第9図）。また、南東部を中心に、95%高度差が街区の一定のまとまりごとに低下していることが確認でき、山地が切り開かれたことがわかる。一



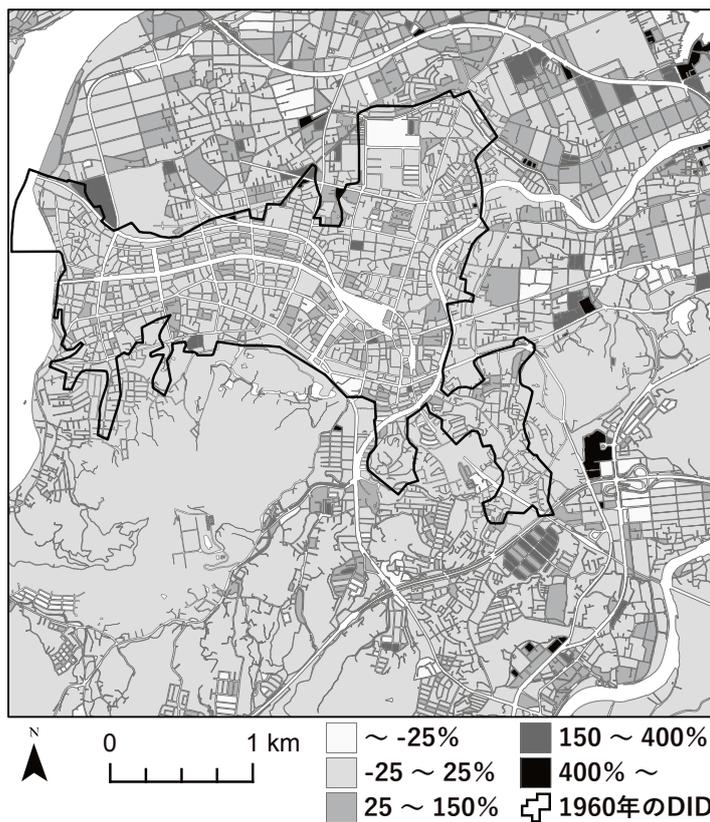
第8図 分析対象とする街区  
三重県共有デジタル地図（2017年度）より作成。



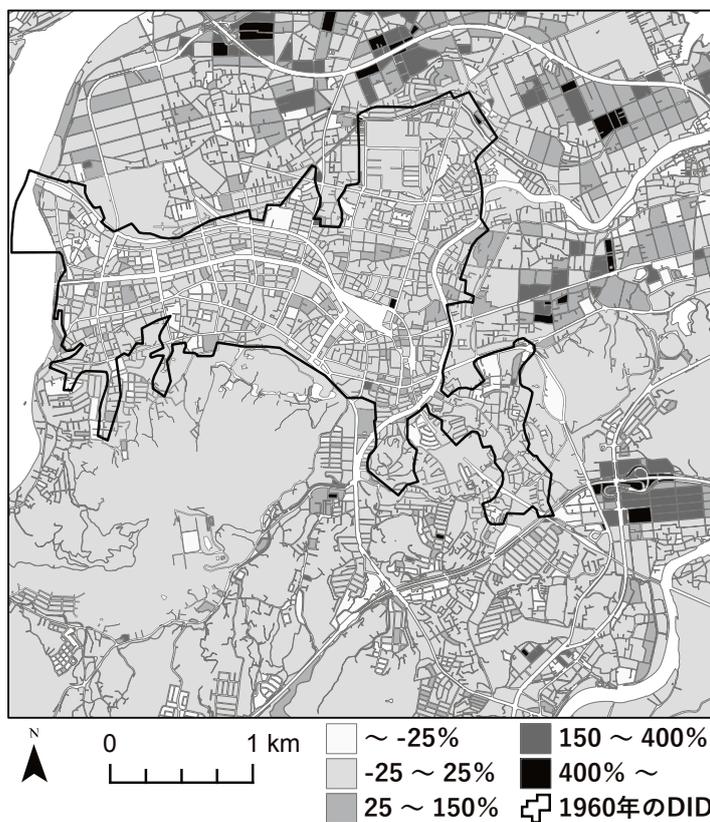
第 9 図 街区別の 95%高度差の変化率 (1961/63 年~ 1975 年)  
DSM より作成。

方で、中心市街地の内側の街区の多くでも、一定の値の上昇が確認でき、伊勢市駅南側でも大きく上昇している。このような変化は、この間の中心市街地で若干の立体化が進んだことを示唆している。1975 年から 1983 年の間をみると、1975 年までと比べれば全体的に 95%高度差の値の変化幅は小さい (第 10 図)。ただし、南東部でみられた 1961/63 年と 1975 年の間に 95%高度差が低下した街区のうちのいくつかでは、値の上昇が確認でき、この間に住宅が建設されたものと考えられる。1983 年と 2002 年の間では、中心市街地や南部では大きな値の変化は確認できない (第 11 図)。しかし、北部の南勢バイパス沿いでは、95%高度差が大幅に上昇している街区が確認でき、南東部の伊勢 IC 周辺でも大きく上昇していることがわかる。2002 年と 2008 年の間では、それほど顕著には 95%高度差は上昇していないが (第 12 図)、中心市街地の内部などで、マンション建設などによって局所的に大幅に上昇している街区もみられる。2008 年と 2020 年の間も同様の傾向であり (第 13 図)、伊勢市駅南側の街区や伊勢赤十字病院のある街区など、特定の街区で局所的に 95%高度差が上

DSMによる地方都市の3次元的時空間分析（桐村）

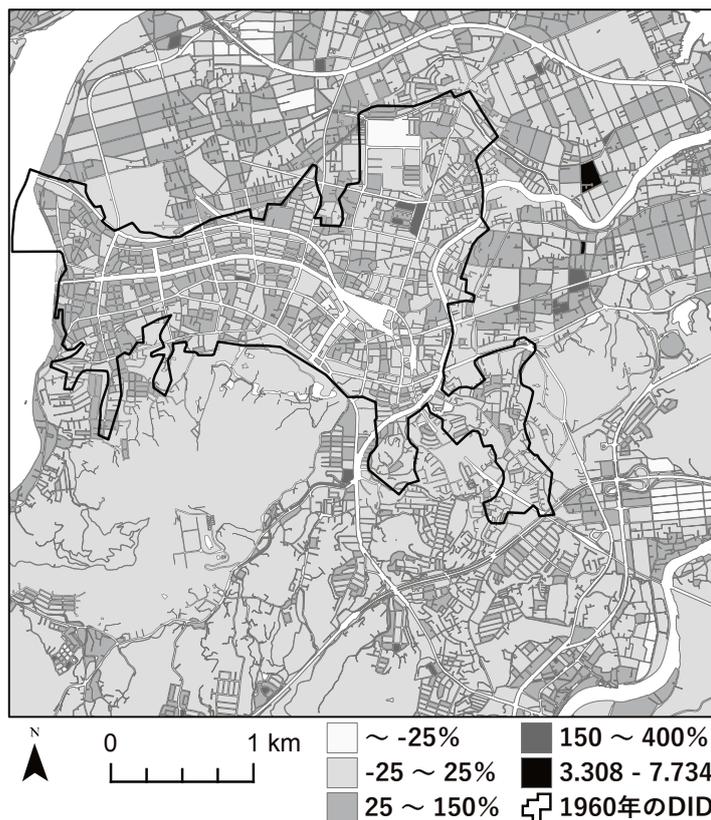


第 10 図 街区別の 95%高度差の変化率（1975 年～ 1983 年）  
DSM より作成。

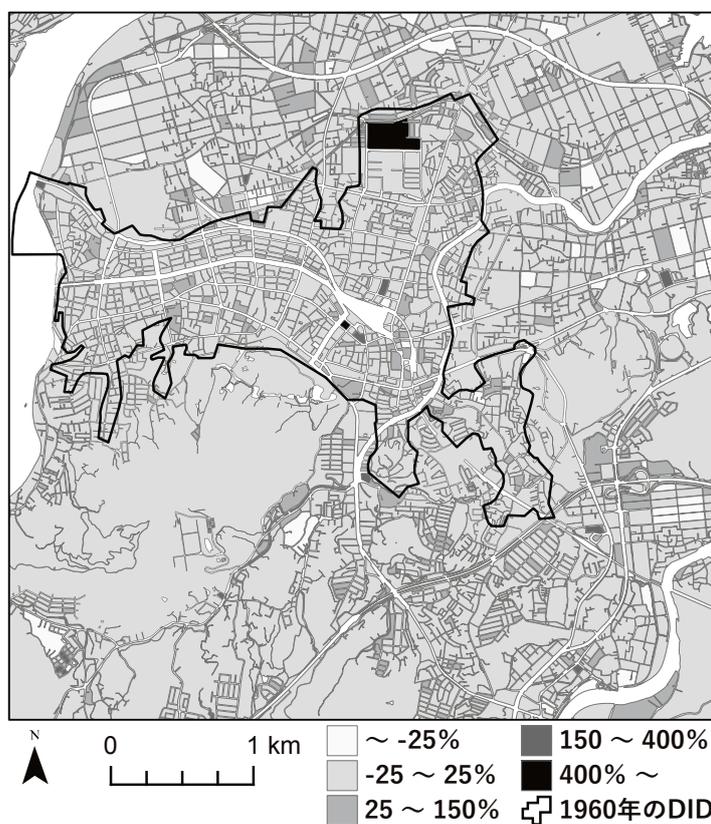


第 11 図 街区別の 95%高度差の変化率（1983 年～ 2002 年）  
DSM より作成。

DSMによる地方都市の3次元的時空間分析（桐村）



第 12 図 街区別の 95%高度差の変化率（2002 年～ 2008 年）  
DSM より作成。



第 13 図 街区別の 95%高度差の変化率（2008 年～ 2020 年）  
DSM より作成。

## DSM による地方都市の 3 次元的時空間分析（桐村）

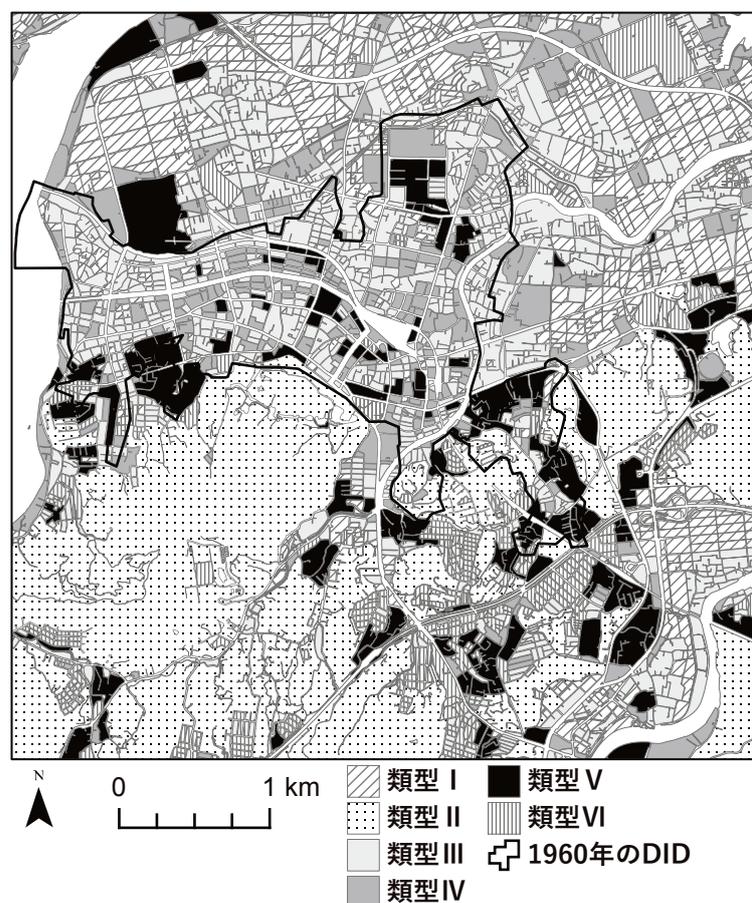
昇していることが確認できる。

次に、変化の動向をまとめるために、街区ごとの各年次の 95% 高度差の値をもとに、Ward 法のクラスター分析で街区を類型化した。クラスター数は解釈のしやすさから 6 とした。各類型の平均値は第 3 表のとおりであり、空間分布は第 14 図のようになっている。類型 I は 95% 高度差が最も小さく、かつ変化に乏しい特徴をもち、北部と南東部の低地において、主に田畑として

第 3 表 類型別の 95% 高度差の平均値の推移

類型	95% 高度差 (単位: m)					
	1961/63	1975	1983	2002	2008	2020
類型 I	2.4	3.1	3.7	4.3	5.5	5.8
類型 II	42.5	44.0	44.6	43.4	46.2	47.6
類型 III	5.0	6.3	6.5	6.0	7.4	8.0
類型 IV	5.1	7.9	9.6	9.7	11.6	12.4
類型 V	14.4	17.7	18.7	17.3	20.3	21.6
類型 VI	16.9	12.6	11.1	7.5	8.7	9.5

DSM より作成。



第 14 図 類型の分布  
DSM より作成。

1961/63 年から 2020 年まで利用されている街区である。類型Ⅱは 95% 高度差が最も大きく、かつ変化に乏しい特徴があり、南部を中心とする主に山地のままの街区である。類型Ⅲは類型Ⅰよりは 95% 高度差が大きいものの、変化に乏しい低層建物で占められる街区である。類型Ⅳは、中心市街地や周辺の集落に主に分布している。類型Ⅴは、1961/63 年では類型Ⅲと同程度の 95% 高度差であったが、徐々に高くなってきた街区であり、中心市街地の伊勢市駅周辺や南勢バイパス沿いなどに分布している。類型Ⅵは元々、95% 高度差が大きく、さらに値が上昇してきた街区であり、中心市街地や南部の山地に分布している。中心市街地の類型Ⅵは立体化の進展が顕著な街区と考えられるが、南部の山地では地形による高低差が元々あったことに加え、宅地開発などによって値が上昇したものと推測される。類型Ⅶはおおむね 2002 年までに 95% 高度差の低下傾向が認められる類型であり、既存建物の建て替えや山地、森林の開発による値の低下が顕著であった街区である。主に南部の山地のなかの住宅地が該当するが、工場や病院などの大規模施設の街区や、伊勢市駅南側の街区もこの類型に含まれている。

## V 3 次元的な景観の変化

SfM ソフトウェアで DSM を生成することで、3 次元モデルも生成することができる。ここでは、これまでの分析において特徴的な変化を示してきたいくつかの街区や地域に注目して、3 次元的な景観の変化を観察する。ここでは、桐村（2021）で紹介されている「ISE HISTORICAL 3D VIEW」<sup>7)</sup> の 3 次元モデル（1961/63 年、1983 年、2002 年、2020 年の 4 時点）を用いる。この 3 次元モデルは、本稿で生成した DSM に基づいて作成されたものである。なお、2002 年の 3 次元モデルは、DSM と同様に他と比べて解像度が低く、場所によっては高さもやや低くなっている。

まず、伊勢市駅南側（画像の手前）から外宮前（画像の奥）にかけての 3 次元景観を観察する（第 15 図）。1961/63 年時点（この地域ではおおむね 1963 年）では、現在の外宮参道とそれに並行した幅員の広い道路が通っているが、伊勢市駅南側の駅前には高い建物はあまりない。1983 年になると、前述のジャス

## DSM による地方都市の 3 次元的時空間分析（桐村）



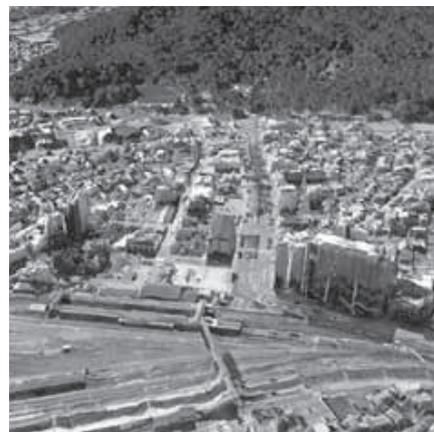
(a) 1961/63 年



(b) 1983 年



(c) 2002 年



(d) 2020 年

第 15 図 伊勢市駅南側の 3 次元景観の変遷  
ISE HISTORICAL 3D VIEW より作成。

こと、幅員の広い道路の右手に三交百貨店ができ、駅前の景観は一変する。外宮前にかけても高層建築物がみられ、一帯の高層化が進んでいる傾向が読み取れる。2002 年では、解像度が低く、やや判別しづらいが、大きな変化はない。2020 年になると、ジャスコの跡地にホテルができ、三交百貨店の跡地にはホテルと再開発ビルが建っている。一方で、駐車場も目立っており、駅に近い街区で高層化がみられる一方で、高度が下がっている街区も散見される。

次に、北部の南勢バイパス沿いの地域に注目する（第 16 図）。1961/63 年時点（この地域ではおおむね 1961 年）では、ほとんどが農地である。1983 年になると、すでに南勢バイパスが開通しており、住宅が増えるなど、都市化も進んでいる。画像の左手前ではショッピングセンターのララパークが開業しているものの、バイパス沿いにはまだあまり建物が立地していない。2002 年には、

## DSM による地方都市の 3 次元的時空間分析（桐村）



(a) 1961/63 年



(b) 1983 年



(c) 2002 年



(d) 2020 年

第 16 図 南勢バイパス沿いの 3 次元景観の変遷  
ISE HISTORICAL 3D VIEW より作成。

バイパスに沿って建物が建ち並び、農地が減少してきている様子が確認できる。2020 年には、さらに建物が増加している。

続いて、近鉄五十鈴川駅周辺をみると（第 17 図）、1961/63 年時点（この地域ではおおむね 1963 年）では、画像の右手前から中央を経由して奥方向に御幸道路が通り、台地上と低地部には農地が広がっている。御幸道路沿いを除けば、建物は、それほど多くはないもののおおむね台地上にある。1983 年になると、画像の左右方向に近鉄鳥羽線が開通し、中央に五十鈴川駅が開業しており、台地が切り開かれ、台地の間の谷が埋め立てられて大規模な住宅地が造成されている。低地部でも、御幸道路に近い場所を中心に宅地化が進みつつある。2002 年には、大規模な住宅地の一部をかすめるように、画像の右奥から手前方向にかけて伊勢自動車道が開通し、画像の左手前にはジャスコも開業してい

## DSM による地方都市の 3 次元的時空間分析（桐村）



(a) 1961/63 年



(b) 1983 年



(c) 2002 年



(d) 2020 年

第 17 図 近鉄五十鈴川駅周辺の 3 次元景観の変遷  
ISE HISTORICAL 3D VIEW より作成。

る。低地部の農地も減少し、駐車場の広い店舗などが立地しつつある。2020年には台地上だけでなく、低地部でも宅地化がさらに進んでいる。

最後に、皇學館大学周辺の状況についても確認する（第 18 図）。皇學館大学は 1962 年に開学（再興）されており、おおむね 1963 年の状況を示した 1961/63 年時点の状況はその直後である。すでに焼失した講堂も、画像の中央付近に確認できる。1983 年になると、現在の記念講堂や 2 号館、3 号館などが建設されており、キャンパスの南半分については 2021 年現在の状況に近づいている。周辺では学校が増え、市立伊勢総合病院もできており、宅地化が進んでいる。2002 年では、大学における変化はそれほど読み取れないが、周辺の宅地化が顕著に進んでいることがわかる。2020 年には、キャンパスの北半分が大きく変わり、7 号館などの真新しい建物が確認できる。

## DSM による地方都市の 3 次元の時空間分析（桐村）



(a) 1961/63 年



(b) 1983 年



(c) 2002 年



(d) 2020 年

第 18 図 皇學館大学周辺の 3 次元景観の変遷  
ISE HISTORICAL 3D VIEW より作成。

## VI おわりに

本稿では、地方都市である三重県伊勢市の主要部を対象として、空中写真から生成した DSM を用いて、3 次元的な視点からの都市空間の長期的変化の分析を行った。まず、1960 年代以降の複数年次の空中写真をもとに、SfM ソフトウェアを用いて DSM を生成した。DSM の分析からは、中心市街地から徐々に郊外に市街地が拡大し、山地が切り開かれたり、低地部の農地が宅地化されたりするなど、都市化が進展する様子が確認された。また、伊勢市駅南側に高層の商業施設が建設され、その後、郊外にも商業施設が増えて、商業機能の郊外化が進むとともに、駅前の高層の商業施設が取り壊され、再開発されるという状況も明らかになった。一方で、街区別の分析からは、都市化や郊外化の過程だけでなく、中心市街地でも若干の高層化がみられたことが確認された。3

次元的な景観を可視化した結果からも、同様の傾向が明らかになった。このような中心市街地での変化は、都市空間の立体化（戸所，1994）に該当する事例と考えられるが、DSM の分析においては若干の誤差も含みうることから、さらなる精査が必要と考えられる。

一方、DSM の誤差や精度については、今後の利用拡大のためには解決すべき課題といえる。桐村（2021）がすでに整理しているように、国土地理院が公開している高解像度（400dpi）の空中写真でも建物が判別できる程度の DSM を生成することができ、位置精度もそれほど問題がない。ただし、年次によっては DSM の値がマイナスになってしまうなど、局所的ではなく広域的なずれが生じている箇所もみられた。このような誤差があると、DSM の差分を取ることは必ずしも適切ではないこともあり、本稿における街区別の分析のように、相対的な高度差を利用するなどの対応が必要である。また、本稿では精度の低さから用いなかったが、1940 年代および 1950 年代の状況を把握できる米軍撮影の空中写真を利用することができれば、戦災復興から高度成長期までの過程も分析できる。また、戦前の宇治山田市では、旧都市計画法の指定を受けて、1929 年に陸軍陸地測量部に依頼して、翌年に 5 千分の 1 の地形図を作成しており、その際には明野飛行学校が空中写真を撮影し、空中写真測量が行われている（宇治山田市役所，1932）。国土地理院の地図・空中写真閲覧サービスでは当該の空中写真は公開されていないものの、国土地理院や伊勢市などが現在も写真を所有している可能性はある<sup>8)</sup>。これらが利用できれば、写真の保存状況次第ではあるものの、1930 年代の街並みを再現することもできるかもしれない。

まだ一定の課題が残されているものの、時系列的に DSM を整備して都市空間における 3 次元的な時空間分析を行うことで、これまで国勢調査などの人口統計が中心であった 20 世紀以降の都市の長期的な変化に関する研究に、高さという別の次元を加えることができる。大都市圏などの単位で広域に DSM を生成し、分析することで、これまで資料上の限界から十分に明らかにできていなかった、郊外における変化なども詳細に分析できる。一方で、DSM 生成の副産物ともいえる 3 次元モデルを用いることで、直接、景観の変化を確認でき、

これまでは写真などの固定された視角からしか把握できなかった街並みを自由な視点から観察することができるようになった。加えて、3次元モデルは、地域における文化や歴史、教育などのコンテンツとしても活用できるメリットがある。400dpiの空中写真から得られる3次元モデルはバーチャル京都(矢野ほか, 2007)ほどの高精細なものではないが、それでも、伊勢市駅前の景観が時代によって大きく異なることもわかり、古い高層建築物などのランドマークとその周囲の景観の変遷なども可視化できるものと考えられる。また、時代ごとのさまざまな情報を各時代の3次元モデルと重ね合わせることで、時空間的な4次元GISの基盤データとしても活用できる。DSMの作成対象地域や時代を増やしていくことができれば、地理学に限らず、さまざまな学問分野や社会にとって有用なものになると考えられる。

## 文献

- 市川裕規 2019. 伊勢市の商業地域における地価変動と土地利用. 都市地理学, 14: 38-56.
- 宇治山田市役所 1932. 『宇治山田都市計画資料第一輯』宇治山田市役所.
- 梶田 真 2019. 関東大震災, 空襲と町丁別にみた東京中心部の社会-空間パターン変化(1920-1965). 地学雑誌, 128 (6) : 855-878.
- 桐村 喬 2011a. 日本の六大都市における小地域人口統計資料の収集とデータベース化—近現代都市の歴史GISの構築に向けて—. 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, 2011-8: 169-176.
- 桐村 喬 2011b. 京都市における社会地区分析—1911年～1965年—. 矢野桂司・中谷友樹・河角龍典・田中 覚編『京都の歴史GIS』102-126. ナカニシヤ出版.
- 桐村 喬 2021. 空中写真に基づくDSMを利用した都市空間の3次元変化の分析の試み. 地理情報システム学会講演論文集, 30, CD-ROM.
- 小林裕之 2020. 撮影高度とDTMの違いがUAV-SfMによる森林計測に及ぼす影響. 森林計画学会誌, 53 (2) : 69-79.
- 戸所 隆 1994. 『都市空間の立体化〔増補版〕』古今書院.
- 早川裕式・小口 高 2016. 地形学における地上レーザ測定の活用. 地学雑誌, 125 (3) :

299-324.

矢野桂司・中谷友樹・磯田 弦編 2007.『バーチャル京都—過去・現在・未来への旅—』  
ナカニシヤ出版.

Lastilla, L., Belloni, V., Ravanelli, R., and Crespi, M. 2021. DSMGeneration from  
Single and Cross-Sensor Multi-View Satellite Images Using the New Agisoft  
Metashape: The Case Studies of Trento and Matera (Italy) . *Remote Sens.*  
13: <https://doi.org/10.3390/rs13040593>.

## 注

- 1) <https://www.mlit.go.jp/plateau/>（最終閲覧日：2021年9月28日）。
- 2) <https://www.arc.ritsumei.ac.jp/lib/vm/gionfestivalDM/A/>（最終閲覧日：  
2021年9月28日）。
- 3) <https://maps.gsi.go.jp/>（最終閲覧日：2021年9月28日）。
- 4) <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do>（最終閲覧日：2021年9月28日）。
- 5) ダウンロードできる最も高解像度のものは400dpiであり、1270dpiのさらに高  
解像度の画像データは、日本地図センターから有償で購入することができる。
- 6) 街区のポリゴンデータは、三重県共有デジタル地図データのうちの行政区\_面  
レイヤーから、水域\_面レイヤーと道路\_面レイヤーの部分を除外して作成し  
たものをベースに、鉄道敷地や河川敷などを除外しながら作成した。便宜的に  
街区と呼称するが、道路で区切られた農地の区画などもあり、厳密には街区で  
はないものも含まれる。
- 7) <https://arcgis/f4a15>（最終閲覧日：2021年9月28日）。
- 8) 『宇治山田都市計画資料第一輯』（宇治山田市，1932）には、当時の山田駅（現  
伊勢市駅）周辺の5千分の1地形図と同じ範囲の空中写真が掲載されている。  
この写真を見る限りは、建物の輪郭が判別できるほどの縮尺で撮影されている  
ことがわかる。

A Three-Dimensional Spatiotemporal Analysis of a Regional City Using  
DSM: A Case Study of the Main Part of Ise City after World War II

Takashi KIRIMURA

Abstract

This paper analyzes the long-term changes in urban space from a three-dimensional perspective using DSM (Digital Surface Model) generated from aerial photographs of the main part of Ise City, Mie Prefecture. First, DSMs were generated using SfM software based on aerial photographs taken at multiple points in time since the 1960s, and an analysis of the DSMs showed that urbanization progressed as the city gradually expanded from the central area to the suburbs, mountains were cut through, and lowland farmland was converted into residential areas. In addition, a high-rise commercial facility was built in front of Ise City Station, followed by an increase in the number of commercial facilities in the suburbs, resulting in the suburbanization of commercial functions. Contrarily, from the analysis of each block, it was confirmed that not only the processes of urbanization and suburbanization, but also a slight increase in the number of high-rise buildings was observed in the central part of the city. The results of the visualization of the three-dimensional landscape showed a similar trend. Meanwhile, the error and accuracy of the DSM is an issue that needs to be resolved in order to expand its use in the future, and measures such as using relative altitude differences are necessary. In addition, if aerial photographs taken by the U.S. military, which were not used in this paper due to their low accuracy, can be used, the process from the reconstruction after World War II to the period of high economic growth can be analyzed. There is also a possibility that

aerial photographs from the pre-war period still exist, and if these can be used, it would be possible to recreate the cityscape of the 1930s. In this way, although certain issues remain to be addressed, the development of time-series DSM data and three-dimensional spatiotemporal analyses of urban space will add another dimension of height to research on long-term changes in cities since the twentieth century, which until now has focused on population statistics such as census data. In addition, by using a 3D model, which is a by-product of DSM generation, it is possible to directly observe changes in the landscape and cityscape from any perspective, which until now could only be grasped from a fixed perspective such as a photograph.

Keywords : digital surface model (DSM) , structure from motion (SfM) ,  
3D model, urbanization, suburbanization, regional city