

ハノイの地形と水文環境 —3次元都市モデルの構築—

米澤 剛[†] 柴山 守^{††}

ベトナムの首都であるハノイは、東南アジアの中でも古い歴史を持つ都市の一つである。ハノイの都市形成には、自然環境が大きくかかわっている。本研究で作成した DEM からハノイの地形の微細な起伏を知ることができ、さらに地形分析を進めて旧河道や埋め立てられた池や沼の痕跡を探ることである。本研究では、これまで歴史的視点を中心に考えられてきたハノイの都市形成・発展論を自然科学的手法や結果を考慮しながら明らかにする。

Topography and Hydrological Environment of Hanoi -Construction of 3-D Urban Modeling-

Go Yonezawa[†] and Mamoru Shibayama^{††}

Analyzing the relief of terrain and micro-topography of Hanoi can play an important role in explaining its urban transformation. To analyze topographical changes, it is necessary to use elevation data to generate a digital elevation model (DEM), a digital representation of ground surface and the most important element of topographical analysis for urban transformation, providing evidence for the existence of features such as old rivers, lakes, fills and land subsidence.

1. はじめに

ベトナムの首都ハノイは、急速な都市化が進む東南アジアでも成長著しい都市の一つであり、同時に約 2,000 ヶ所の史跡や歴史的建造物を残す歴史都市でもある。そのハノイの都市形成を考える上で、重要となる点が 2 つある。1 つは 19 世紀後半、ハノイはフランス政府の統治（植民地）下にあったことである。フランス政府とベトナム人の相互の関係や特徴といった歴史的背景を踏まえてハノイの都市変容を捉える必要がある。もう 1 つは、ハノイの地形と水文環境である。ハノイは都市の東を流れる紅河の氾濫原に位置し、平均標高は 10 メートル以下である。そのため歴史資料によると、古くから度重なる洪水に直面していた。19 世紀後半にフランスが作成した地図では、すでに紅河の西岸に沿って大規模な堤防が標され、自然災害への対策が講じられていたことが伺える。また、19 世紀後半から 20 世紀初頭に至る都市化の中で、多数の湖や池が地図上から消滅する。これらはハノイの都市変容にどのように影響し、その結果いかなる都市発展を遂げているかを考える必要がある。

本研究は、これまで歴史的視点を中心に考えられてきたハノイの都市形成・発展論を自然科学的手法や結果も考慮しながら明らかにすることを目的としている。具体的には、ハノイという都市地域を「地下」・「地表」・「地上」の情報で構成する 3 次元空間として捉え、それぞれが相互に作用するような基盤データの構築を目指す。

2. ハノイの歴史と自然環境

ハノイは東南アジアの中でも古い歴史を持つ都市の一つであるが、他の都市とは少し違った形成過程が特徴的である。桜井（1989a）によると、7 世紀初頭、中国の唐朝が現在のハノイの地に安南都護府を置き、中国の南方支配の拠点としていた。1010 年、ベトナムの李朝（1009～1225 年）がこの地を都として「タンロン（昇竜）」と呼んだことから首都ハノイの歴史ははじまる。その後、ハノイは 19 世紀末から 80 年ほどフランス統治下に置かれ、1976 年の南北統一の後、ベトナム社会主義共和国の首都として現在に至っている。このようにハノイの都市形成には、ベトナムの文化だけでなく中国、さらにはフランスの文化が大きく影響している。ハノイに数多く残されているフランス建築物もその影響である。

自然環境もまたハノイの都市形成に多大な影響を及ぼしている（桜井，1989b）。「ハノイ」という語は、「河内」という漢字に由来する。ハノイの北側と東側には巨大な紅河が流れ、西側と南側にはトーリック川とニューエ川という紅河の支流が流れている。

[†] 京大大学生存基盤科学研究ユニット
Institute of Sustainability Science, Kyoto University
^{††} 京都大学東南アジア研究所
Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University

まさに、ハノイは川に囲まれた、「河の内」にある都市なのである。このため、ハノイは度重なる洪水被害に古くから苦しめられてきた。図1は1926年のハノイ大洪水の航空写真である[a]。堤防の決壊により、被害は拡大した。

図2にハノイの1873年の古地図と2005年の人工衛星画像（IKONOS）を示す。約130年前のハノイの中心部は湖や池沼が極めて多い土地であったことがわかる。この理由として春山（2004）は、堤防建設をあげている。紅河の旧蛇行流路部が、堤防建設で切断されて本流が直線的河道となると、氾濫原には旧河道が三日月湖として残される。ハノイ市街北部のホータイ湖や中心部に位置するホアンキエム湖などはこうしてできた湖であり、その他にも旧河道が数多くの沼沢地として残存していた。このような点から、ハノイでは早い時期から堤防などの治水構造物の整備に着手していたことが伺える。現在、堤防は「ハノイ大堤防」と呼ばれ、洪水被害から首都圏を守っている。2005年の人工衛星画像では紅河の西岸に沿って一本の長い道路が確認できる。これがハノイ大堤防であり、ハノイの市街地を囲むように建設されている。近年、堤防決壊による洪水被害こそ少ないが、大雨による都市の冠水や内水氾濫が頻発している。

ハノイの都市化の中で多数の湖や池沼はどのように消滅し、ハノイ大堤防の建設はどのような過程で行われ、また、頻発する都市問題にどう対処していくのか。この問題は2次元空間を対象とした分析だけでは難しい。これらを解決する鍵となるのが3次元都市モデルであると考えられる。

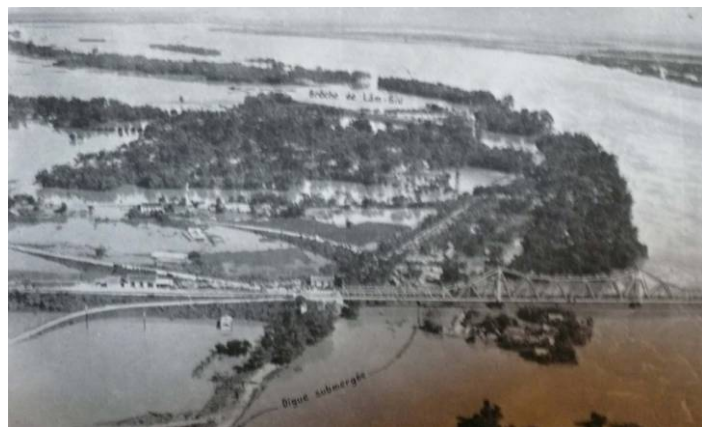


図1 1926年におこったハノイ大洪水の航空写真

a) 東京大学生産技術研究所大田省一氏提供（フランス国立図書館所蔵）。

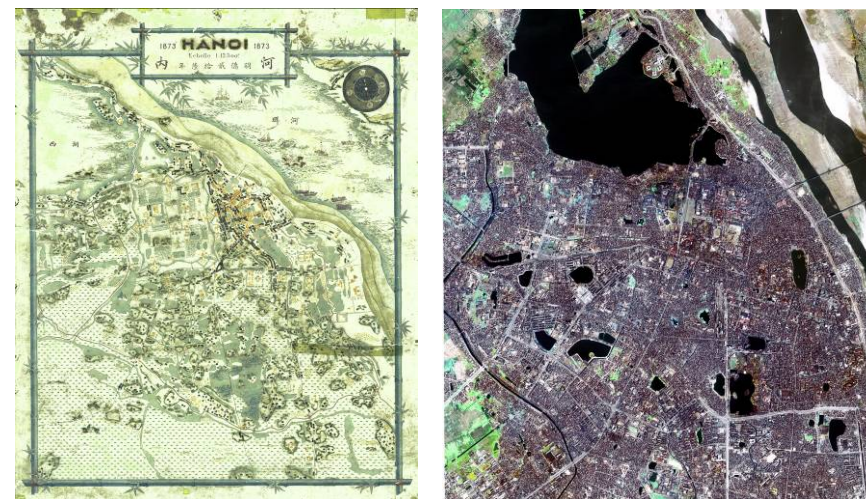


図2 1873年のハノイの古地図と2005年の衛星画像（IKONOS）

3. 3次元都市モデル

3次元都市モデルは都市空間を構成する要素として、「地上」「地表」「地下」の3つから構成される。本研究では、「地上」の情報は建物データ、「地表」の情報は地形データ、「地下」の情報は地質データと定義した。具体的には、「地上」の情報である建物データは、ハノイの都市計画図から作成した3次元のベクトルデータである。都市計画図から建物情報だけを抽出し、2次元ベクトルデータ（約22,000ポリゴン）を作成した。この2次元データをGISソフトウェア、ここではGRASS GIS[b]とQuantum GIS[c]を用いて建物の3次元データに変換した。ハノイの中心部に位置するホアンキエム湖周辺（フォーコー地区）の建物の3次元表示例を図3に示す。この3次元データを用いて、19世紀後半におこなわれたフランスによる都市計画（多数の池や湖の埋め立て）を明らかにすることができる。 「地表」の情報としては、「地上」の情報と同様、ハノイの都市計画図に記載されている中心部（8×6キロメートル）の約17,000点の標高測量値より解像度2メートルのDEM（数値標高モデル: Digital Elevation

b) GRASS GISはFOSS（フリーオープンソースソフトウェア）である。
<http://wgrass.media.osaka-cu.ac.jp/grass/index.php> から入手可能である。

c) Quantum GISはFOSS（フリーオープンソースソフトウェア）である。
<http://www.qgis.org/> から入手可能である。

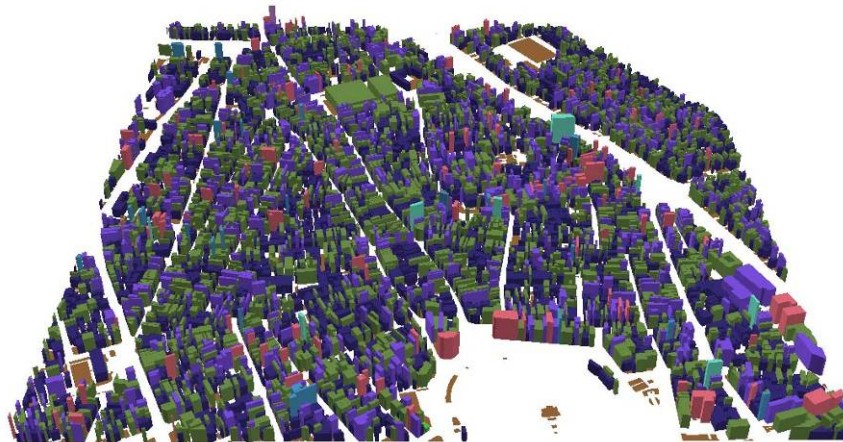


図 3 フォークー地区における建物の 3 次元分布図

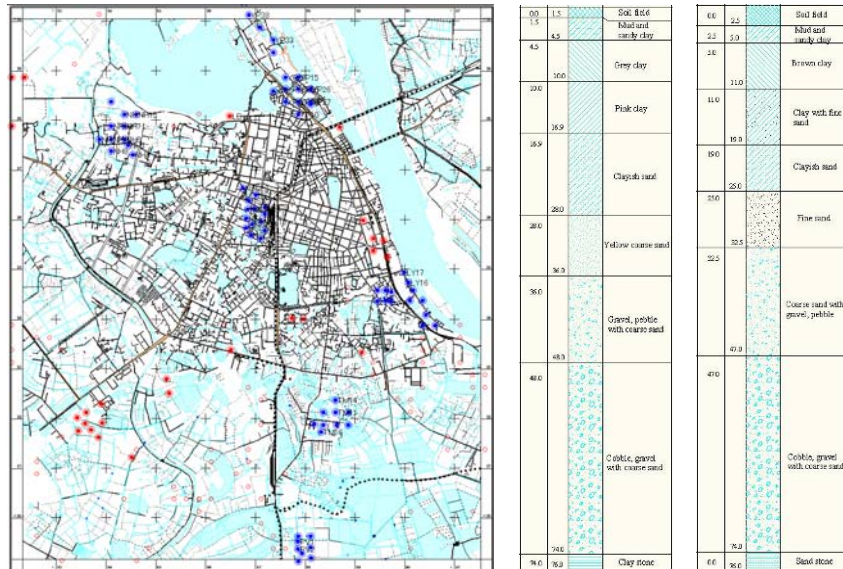


図 4 ハノイにおけるボーリングの分布図 (左) とデータの表示例 (右)

Model) を作成し、現在のハノイの微細な地形起伏を表現した。この DEM の作成方法に関しては、4 で述べる。作成された DEM は現在のハノイの地形を知るだけでなく、これまでの都市変容や今後の都市形成を考える上で最も重要なデータとなる (桜井ほか, 2007)。「地下」の情報としては、ハノイ鉱山地質大学と共同で収集したハノイ全域の地質ボーリングデータを用いて、地質構造の推定をおこなっている。これまでに収集したデータは約 120 本であり、図 4 にボーリングデータの分布図とオリジナルデータの表示例を示す。地質構造のモデリングは、ハノイにおける深刻な都市問題の一つである地盤沈下と地下水利用の因果関係を特定できる可能性がある (Tran et al., 2007)。地下水の分布を知るには地質構造の把握が不可欠である。

この 3 次元都市モデルを基盤とし、これまでの地域研究にはない時空間分析を用いてハノイの都市変容を明らかにする。ここでは、とくに地形データを用いてハノイの都市変容を考察する。

4. 地形データの作成

4.1 SRTM データの利用

日本で一般的に利用されている DEM のうち解像度が高最も高いものは、国土院発行の『数値地図 5m メッシュ (標高)』である。これは一つの領域を地表 5 メートル間隔 (解像度は 5 メートル) で区切った方眼 (メッシュ) の中心点の標高を一定の形式で並べたものである。しかしながら、対象地域は日本の一部の主要都市のみとなっている。全国的に整備されている DEM は、同じく国土院から発行されている『数値地図 50m メッシュ (標高)』 (解像度は 50 メートル) が有名であり、これは地形解析や各種目的の GIS データとして幅広く利用されている。一方、ベトナムにはこのような正式な DEM が存在せず、存在しても解像度が低く不明瞭なものが多い。また、無償で利用できる地球規模の DEM としては、NASA が提供しているスペースシャトル地形データ (SRTM : Shuttle Radar Topography Mission) [d] や米国地質調査所が提供している GTOPO30[e] などがある。SRTM データには 2 種類あり、解像度は約 30 メートル (SRTM-1) と約 90 メートル (SRTM-3) である。GTOPO30 の解像度は約 1 キロメートルである。図 5 に SRTM-3 を利用して作成したハノイ周辺の DEM の可視化例を示す。図 5 から分かるように、これらの DEM では、微細な凹凸の地形変化を見るには解像度が低い。そのため独自に高精度の DEM を作成する必要がある。

4.2 高精度 DEM の作成

都市計画図は 2005 年に発行された地図であり、ハノイ中心部 (8×6 キロメートル)

d) The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html> から入手可能である。

e) GTOPO30

<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html> から入手可能である。

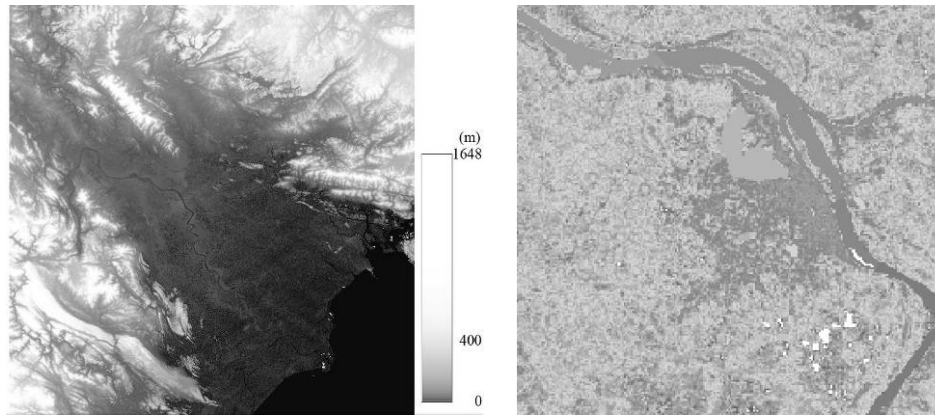


図 5 ハノイ周辺の SRTM-3 図 (左) とハノイ中心部の SRTM-3 図 (右)



図 7 ハノイの都市計画図の拡大図



図 6 ハノイの都市計画図 (左) と標高値の分布図 (右)

の約 17,000 点の標高値 (メートル単位) が記載されている。ハノイ中心部の都市計画図の表示例と標高値の分布図を図 6 に示す。黒い点が標高点である。また、図 7 に都市計画図の拡大図を示す。標高値は任意の地点で測量され、メートル単位で記載されている。ここでは、現在のハノイの微細地形を調べるために、この標高値から格子間隔が 2 メートルの高精度な解像度をもつ DEM を作成した。これは次の 4 つの作業手順から作成される。

- (1) 地図をスキャニングしてデジタル化。
- (2) 約 17,000 点のポイントデータ (x, y, z 座標値) の入力。
- (3) 地図に記載されている 4 隅の緯度・経度座標を用いて、入力したポイントデータの座標値を座標変換 (アフィン変換)。
- (4) コンピュータプログラムを用いて地形面を推定し、DEM の形式で出力。

(4) のプログラムは、3 次 B スプライン関数を用いた地形面の推定プログラムであり、地形をなめらかに推定する (野々垣ほか, 2008)。実際にこのプログラムは、地質調査から地形面や地質境界面を推定するときに用いられている。図 8 に作成した DEM を示す。作成した DEM は、格子数 6420×8050、格子間隔 2 メートル、等高線間隔 0.5 メートル、データ 1 点あたりの平均誤差は 0.024 メートルである。図 9 に都市計画図を重ね合わせて 3 次元表示した例を示す。ただし、DEM は 50 センチメートルほどの高低差も表現しているため、高さを約 30 パーセント強調して可視化している。可視化ソフトは GRASS GIS を使用した。

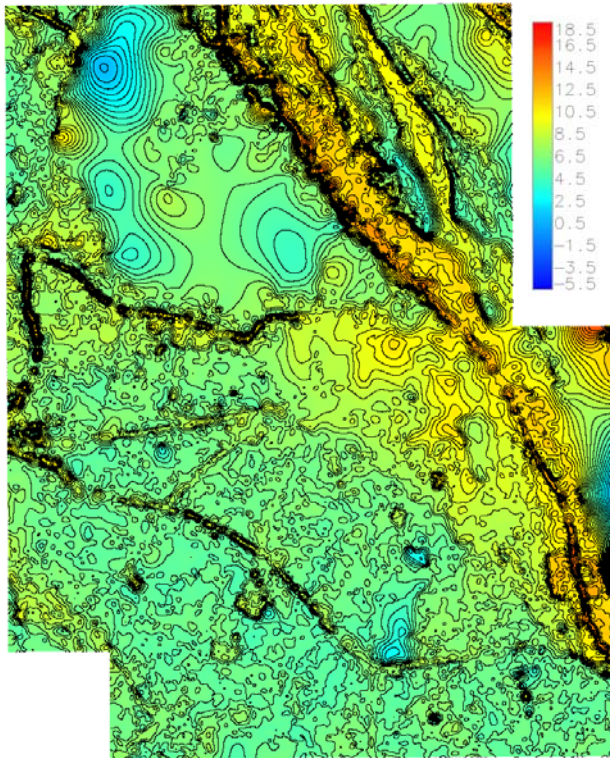


図 8 作成したハノイ中心部の DEM

4.3 地形図を用いた DEM の作成

1950 年にフランスによって作成された地形図を図 10 に示す。この地形図は現在の地形図との地形比較分析に適している。そのため、STRIPES 法を用いてこの地形図から DEM を作成した (Noumi, 2003)。その結果を図 11 に示す。2005 年の都市計画図から作成した DEM 以外、入手可能な地形図は 1950 年にフランス政府が作成した地形図のみである。現在と過去の地形変化を見るためには、現在のところ、この両者を比較することのみである。



図 9 作成した DEM に都市計画図を重ね合わせた 3 次元表示例



図 10 フランス政府作成による 1950 年の地形図

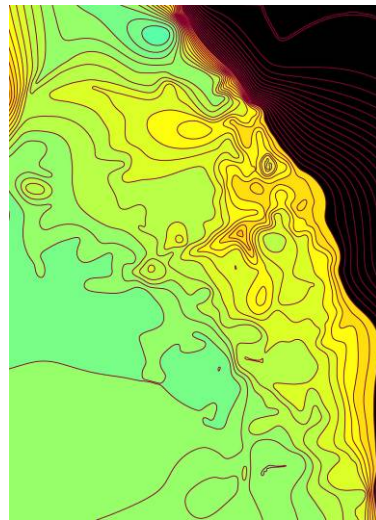


図 11 地形図から作成した DEM

5. 地形分析

このように作成した DEM から、約 130 年前に存在していた多数の湖や池沼の痕跡を探ることが可能となる。桜井ほか (2007) によると、ハノイは阮朝時代 (1802~1945 年) に湖や池沼の不断の埋め立てによって著しい都市発展を遂げ、1960 年代には現在の地形に安定した。また、米澤ほか (2007) では GIS やそれらの情報処理技術を用いて、次の 4 点を理由に桜井ほか (2007) が示したハノイの都市形成の根拠を情報学的に検証した。

- (1) 1885 年から 1898 年の間にタンロン城 (ハノイ市街地の中心に存在していた旧王城) 周辺の城壁や堀が消滅した。
- (2) 旧市街地と呼ばれるフォーコー地区 (ホアンキエム湖北側に位置する地域) では、池沼などが急速に埋め立てられ、1902 年には新たな街路が建設された。
- (3) タンロン城南側の地域での都市開発が、1890 年から 1900 年の十年間に紅河の西岸から順次、西方向に進められた。
- (4) 現在のハノイの街路は、概ね 1936 年までには完成していた。

また、図 12 に 1950 年と 2005 年の DEM を比較した結果を示す。1950 年の標高より高くなっている部分は赤色で表されている。逆に 1950 年よりも低くなっている部

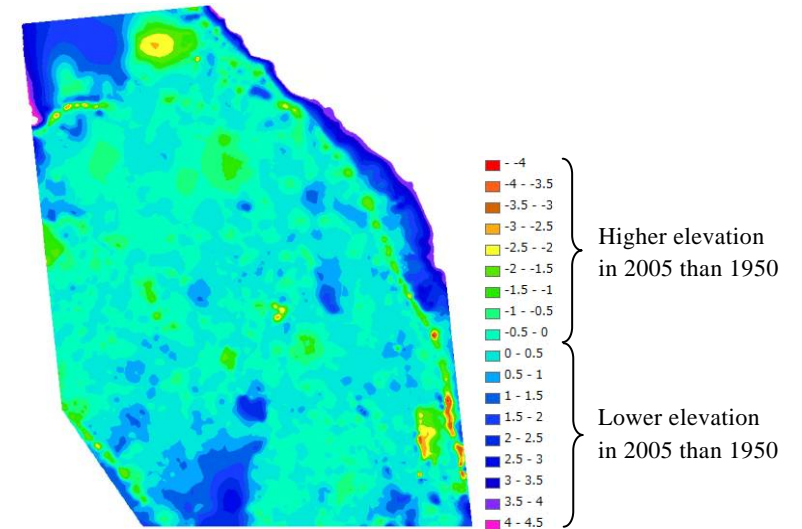


図 12 作成したハノイ中心部の DEM

分は青色で表現されている。このことより、次の 2 点の結果が得られた。

- (1) 紅河西岸の大堤防 (ハノイ大堤防) の標高は、1950 年から 2005 年にかけて平均して約 2 メートル程度高くなっている。
- (2) 2005 年におけるフォーコー地区の平均標高は約 9.5 メートルであり、これは 1950 年の平均標高より約 0.5 メートル沈下している。

Tran et al. (2007) によると、現在ハノイの人口増加にともなって地下水の利用も増加し、各地で地盤沈下を引き起こしている。このような因果関係も今後の詳細な分析で見えてくるであろう。

6. おわりに

このようにハノイを 3 次元の地域空間として捉えることで、現在のハノイをコンピュータ上に正確に再現し、地域研究の有効性を高めてきた。しかしながら、地域研究において、時間という軸を加えて 4 次元的都市変容を分析した試みはこれまでにない。3 次元都市モデルは、まさにこの 4 次元的な都市変遷の分析をおこなうためには無く

てはならない基盤であり、また、地上・地表・地下の要素で構成される3次元都市モデルに更なる歴史情報を加えていくことにより新たな知見を得る可能性は大いに広がる。ハノイには地図や地籍簿、碑文、遺跡・史跡資料など、数多くの歴史資料が残されている。時間概念を持った歴史資料を今回開発した3次元都市モデルに重ね合わせていくことで、ハノイという都市の移り変わりを時空間的に検証していくことができるのである。これは地域情報学の創出につながる一つの可能性と考えている。

謝辞 本研究は科学研究費補助金若手研究 (B)「ベトナム・ハノイの時空間的都市変容と持続的都市形成に関する研究」(21710260)と基盤研究 (S)「地域情報学の創出—東南アジア地域を中心にして—」(17101008)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 春山成子: ベトナム北部の自然と農業 - 紅河デルタの自然災害とその対策, 古今書院 (2004).
- 2) 野々垣進, 塩野清治, 升本真二: 3次 B-スプラインを用いた地層境界面の推定, 情報地質, Vol.19, No.2, pp.61-77 (2008).
- 3) Noumi, Y.: Generation of DEM Using Inter-Contour Height Information on Topographic Map, Journal of Geosciences, Osaka City University, 46, 14, 217-230 (2003) .
- 4) 桜井由躬雄: ハノイの憂鬱, めこん (1989a).
- 5) 桜井由躬雄: もっと知りたい ベトナム, 弘文堂 (1989b).
- 6) 桜井由躬雄, 柴山 守: タンロンーハノイの遺跡・碑文分布の GIS4D 分析, シンポジウム『地域研究と情報学: 新たな地平を拓く』講演論文集, pp. 37-53 (2007).
- 7) Tran, A., Masumoto, S., Raghavan, V. and Shiono, K.: Spatial Distribution of Subsidence in Hanoi Detected by JERS-1 SAR Interferometry, Geoinformatics, vol.18, no.1, pp.3-13 (2007).
- 8) 米澤 剛・柴山 守: GISを用いたベトナム・ハノイの都市形成, 日本情報処理学会「人文科学とコンピュータシンポジウム」論文集 2007, 15, pp.139-146 (2007).