

# 古代ギリシャ都市アテネのアゴラにおける画像処理手法を用いた復元的考察 (画像相関及びフラクタル次元解析を用いた建築様式の定量的な評価手法について)

○松枝 朝\*<sup>1</sup> 木村 敏浩\*<sup>2</sup>  
黒岩 孝\*<sup>3</sup> 大内 宏友\*<sup>4</sup>

キーワード：アゴラ アテネ 画像相関 フラクタル次元解析 ファサード 建築様式

## 1. はじめに

2500年に及び続く西洋の建築、都市史上の原点とする見方がある古代ギリシャ都市アテネは、建築、都市を記述する用語の多くがその時代に起源をもつことはよく知られている。R. E. ウィッチャーリーは「アゴラとは他のどんな都市の公共の広場でも、さまざまな活動がこれほど頻繁に、不断に集中して行われた場所はない。その機能は、公共的広場というよりはむしろ都市の中核地域、その心臓なのである」と表現している<sup>1)</sup>。都市の諸機能の拡大や、細分化にもかかわらず、アゴラは昔からの雑な機能を実質的に受け継ぎ、その成長は建物の数と質に、その過程を見ることが出来る。そして建物は時代を経るにつれて様式の変容を伴い、ファサードや空間の用途にそれらは現れている。

一方、建物のファサードの類似性を検討する手法として、「画像照合」を目的とした「画像相関技術」<sup>2)</sup>が有効であると考えられる。高精度な画像相関<sup>3)</sup>は、画像センシング、映像信号処理、コンピュータビジョンなどの様々な分野で重要になる基本処理である。

また、個と総体との関係性や物理的収縮を持たないパターンの特徴を扱う科学として、フラクタル理論<sup>3)</sup>は様々な分野に応用されている。自然界は樹木から銀河系に至るまでフラクタル性を持つ形態のカスケード(多層構造)とし、それらの時間的変動もフラクタルとして捉えられる。フラクタル次元を用いた分析手法は、一見不規則な事象や形状の複雑さを定量的に示すことが可能であることから、建築・都市・地域計画分野の研究にも応用されつつある。

これらの画像処理手法を用いることにより、アゴラにおける各神殿、ストアの様式の定量的な評価手法について、考察を行う。

## 2. 既往研究のレビューと本研究の目的

我々の既往研究<sup>4-6)</sup>では、文献から得られた情報(図1)と現地調査データをもとに、3Dモデルを3つの年代ごとに作成した(図2)。さらに、人の視点場の極座標を光に置き換え、この光の減衰を用い3D陰影画像を作成し、アゴラにおける建築の配

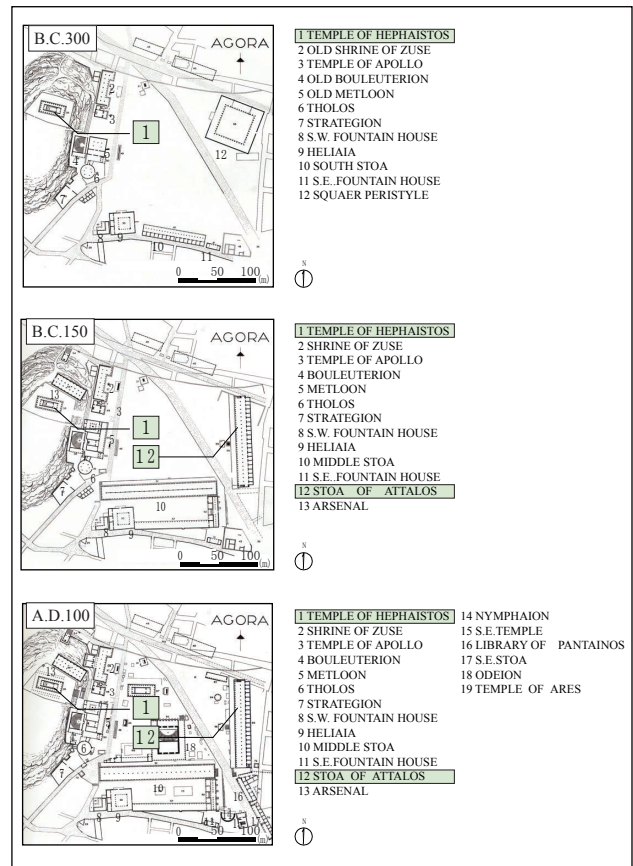


図1 アゴラ配置図

置構成を分析し、アゴラの空間的「秩序」の考察を行った。続く既往研究<sup>7)</sup>では、アテネのアゴラの北西部に位置するテイセイオン神殿に光を照射し、アゴラとの関係性を考察した(図3)。また、既往研究<sup>8)</sup>では、各年代のストアと神殿について画像相関を用いて分析した。しかし、これらの神殿・ストア建築のファサードのフラクタル次元については明らかになっておらず、考察の余地があると考えられる。

本稿では、アゴラの構成要素として最も重点を置かれてきた、神殿建築とストア(柱廊型建築)に着目し、立面図における画像相関とフラクタル次元解析を行うことによって、その類似性を定量的に評価し、それぞれの年代ごとに分類が可能であることを示す。

### 3. 神殿建築・ストアの概要について

資料<sup>9)10)</sup>を元とした、今研究の対象とする神殿とストアの概要を以下に示す。

#### 3-1. 神殿建築

i) テルモン (B.C. 630 頃)

B.C. 630 頃に建てられたこの神殿は、アルカイック期の代表的なもので、遺跡として現存する最古の神殿である。

ii) テイセイオン (B.C. 450 頃)

ヘファイストス神殿と呼ばれ、コロノス・アゴライオスの丘の上であり、アゴラを見渡すことのできる神殿である。南北 13.708m 東西 31.776m (または 38.24m) の大きさで、短辺は 6 本の、長辺は 13 本 (総数 34 本) の円柱で屋根を支えるドリス様式の建築物である。

iii) ディディマ (B.C. 300 頃)

ディディマのアポロン神殿は神殿としては稀に見る巨大な建造物であり、ローマ期の形態の先駆けである。

#### 3-2. ストア

i) バシレイオス (B.C. 600 頃)

アルカイック期の代表的な形式をしており、ペンテリック大理石の壁、テラコッタタイルの屋根が象徴的であった。

ii) アスクレピエイオン (B.C. 340 頃)

アスクレピエイオンは紀元前 4 世紀にテレマコスが建てた木造のストアであり、それが建て替えられ石造りになったストアである。アクロポリスの南面の神域に建てられ、クラシック期の代表的形式をしている。最古の 2 階建てストアとして有名である。

iii) アッタロス (B.C. 150 頃)

アッタロスのストアは 1861 年にアゴラの東側に確認されたストアである。形態は外側に 45 本のドリス様式、内側に 22 本のイニア様式の列柱が並ぶ 2 階建てであり、長手方向に 111.96m、短手方向に 19.52m で、高さが 11.42m あった。上層階とテラスの両方は、大規模な人数を収容することができ、アゴラ広場で祝われたコンテストやフェスティバルを見る為の優れた見所を提供した。

### 4. 画像相関分析

#### 4-1. 画像相関の方法

復元した 3D 画像を画像相関に用いる画像にするため、グレースケール画像から 2 値化処理することによって濃度が 0 または 1 の 2 値化画像を作成する。既往研究<sup>9)</sup>に基づき、ここで行う 2 値化照度の 15% レベルである値をしきい値として行った。具体的に

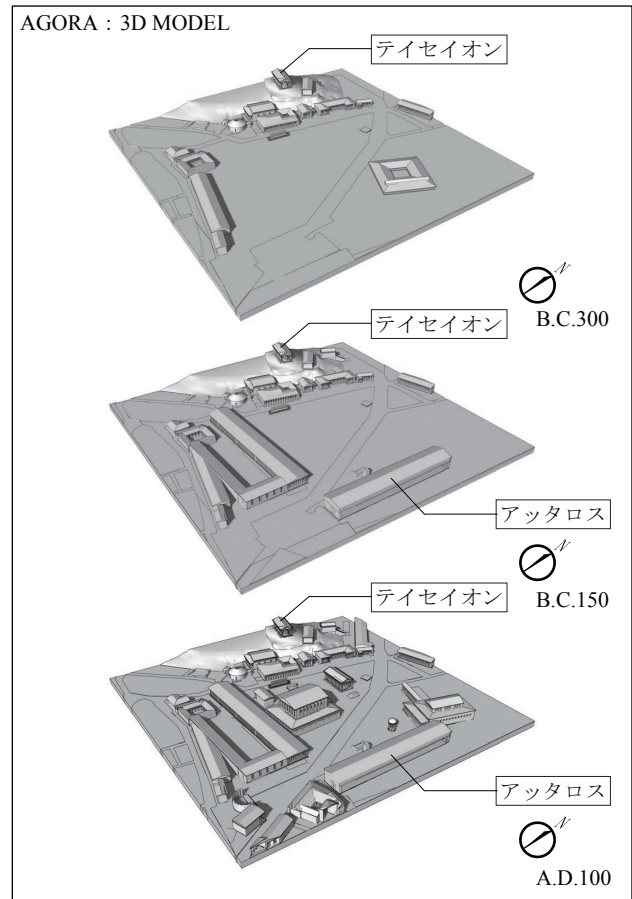


図2 3D広場モデル

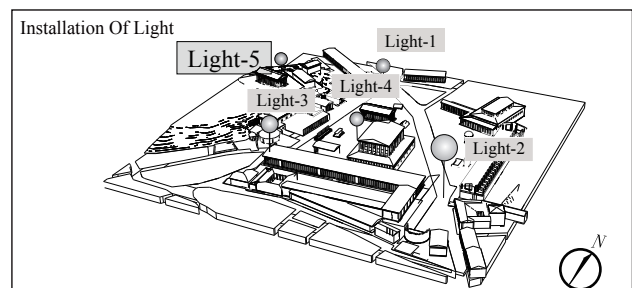


図3 光源の設置

以下の計算により相関値を算出した。画像が  $N$  ピクセル  $\times$   $N$  ピクセルの画像データ  $f(i, j)$ ,  $g(i, -j)$   $\{i, j=1, 2, 3, \dots, N\}$  が与えられたときそのフーリエ変換を  $F(p, q)$ ,  $G(p, q)$  とする (1) (2) 式。また  $F(p, q)$  の複素共役をここでは  $F(p, q)$  と表す。相関の式に (3) 式を用い、(4) 式によってフーリエ逆変換を行う。

$$F(p, q) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(i, j) W^{(ip+jq)} \quad \dots \dots (1)$$

$$G(p, q) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g(i, j) W^{(ip+jq)} \quad \dots \dots (2)$$

$$H(p, q) = F(p, q) \times G(p, q) \quad \dots \dots (3)$$

$$h(i, j) = \frac{1}{N \times N} \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N H(p, q) W^{-(ip+jq)} \quad \dots \dots (4)$$

ただし  $\{p, q=1, 2, 3 \dots N\}$  とする

図4は3D画像相関値を示す。①は画像Kaと画像Kaの相関値(これを自己相関関数 $\Phi_{KaKa}(x,y)$ という)を示し、一方、同図②は画像Kaと画像Kdの相関値(これを相互相関関数 $\Phi_{KaKd}(x,y)$ という)を示す。

①②より $\Phi_{KaKa}(x,y)$ の方が $\Phi_{KaKd}(x,y)$ よりも相関値が高くなっていることがわかる。各画像の相関値を分析する際は、変化したときの相関値の最大値を用いた。

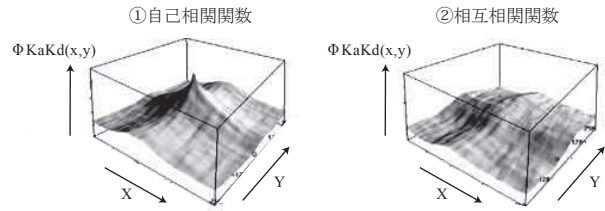


図4 3D相関値画像

#### 4-2. 神殿建築の画像相関を用いた分析

画像相関を用い、各年代の神殿の類似性について検討した。具体的には、アルカイック期<sup>\*2</sup>のアポロン神殿(テルモン: B.C. 630頃)、クラシック期<sup>\*3</sup>のテイセイオン神殿(アテネ: B.C. 450頃)、ヘレニズム期<sup>\*4</sup>のアポロン神殿(ディディマ: B.C. 300頃)についての画像相関を行った。

2値化画像及び相関値の最大値を示す(図5、表1)。画像相関による最大相関値より、対象とした神殿建築は相互に相関関係はほとんどないことがわかった。



図5 神殿のファサード

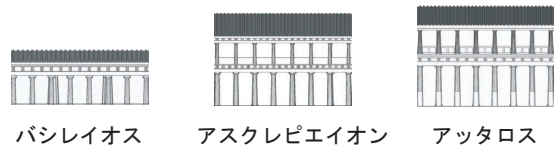


図6 ストアのファサード

表1 神殿の相関値

	テルモン	テイセイオン	ディディマ
テルモン	1.0000		
テイセイオン	0.1546	1.0000	
ディディマ	0.1712	0.1235	1.0000

表2 ストアの相関値

	バシレイオス	アスクレピエイオン	アッタロス
バシレイオス	1.0000		
アスクレピエイオン	0.2266	1.0000	
アッタロス	0.2487	0.4179	1.0000

#### 4-3. ストアの画像相関を用いた分析

画像相関を用い、各年代のストアの類似性について検討した。具体的には、アルカイック期のストア・バシレイオス(アテナ: 前6世紀頃)、クラシック期のアスクレピエイオンのストア(アテナ: B.C. 340頃)、ヘレニズム期のアッタロスII世のストア(アテナ: B.C. 150頃)について画像相関を行った。

2値化画像及び相関値の最大値を示す(図6、表2)。画像相関による最大相関値より以下のことが考察できる。

①アスクレピエイオンとアッタロスは、やや高い相関値を示した(表2)。

③バシレイオスは、アスクレピエイオン、アッタロスともに低い相関値を示した(表2)。

以上のことから、対象としたストアについては、アスクレピエイオンとアッタロスがやや高い相関関係にあることがわかった。

### 5. フラクタル次元分析

#### 5-1. 分析手法

フラクタル次元解析として、ボックスカウンティング法を用いる。ボックスカウンティング法は、陰影画像を適切な閾値で2値化処理する必要がある。ここでは、既往研究のデータに基づき、閾値を2.3% (256×0.023≒6階調以上を白とする)とし、一辺1024pixelの白黒2値の画像を作成した。

このように作成した2値化画像を一辺r画素の正

方形で被覆するとき、対象とする画素値を含む正方形の個数を画素間隔rごとに $N(r)$ とすると、次の式が成り立つ。

$$N(r) \cdot r^D = C \dots \dots \dots (1)$$

ここで、Cは定数であり、このときのDがフラクタル次元となる。また、式(1)を変形すると、

$$\log N(r) = \log C - D \log Nr \dots \dots \dots (2)$$

となる。フラクタル次元Dは $\log r$ と $\log N(r)$ の直線の傾きであり、最小二乗法により算定することができる。

本稿では、一辺が2<sup>n</sup>pixelとなるように、画像の解像度を変化させ、1024、512、256、128、64、32、16pixelとし、同様にフラクタル次元解析を行った。

#### 5-2. フラクタル次元分析結果

- i) 神殿はストアと比べて、フラクタル次元が低いことがわかる(表3)。
- ii) 1024pixelにおいて、神殿・ストア共に年代が進むにつれフラクタル次元が増加している

表3 神殿建築・ストアのフラクタル次元解析

	年代	名称	1024pixel	512pixel	256pixel	128pixel	64pixel	32pixel	16pixel
神殿	A	B.C.630頃	テルモン	1.4130	1.3211	1.1569	0.9302	0.7008	0.5688
	B	B.C.450頃	テイセイオン	1.4515	1.3870	1.2378	1.1567	0.9233	0.5316
	C	B.C.300頃	ディディマ	1.5048	1.4117	1.2948	1.1270	0.9606	0.8405
ストア	D	B.C.600頃	バシレイオス	1.5450	1.4930	1.3506	1.2748	1.1821	1.1279
	E	B.C.340頃	アスクレピエイオン	1.5752	1.5327	1.4352	1.3023	1.0973	0.8157
	F	B.C.150頃	アッタロス	1.5885	1.5327	1.4206	1.2638	1.0338	0.7409

ことがわかる(表3)。

iii) 神殿・ストア共に pixel 数が減少するにつれて、フラクタル次元が減少していることがわかる(図7)。

6. まとめ

以上、神殿建築とストアに着目し、画像相関及びフラクタル次元解析を行うことで、それぞれの変遷を分析することができた。画像相関による分析では、神殿の相関値はストアの相関値に比べて比較的低いことがわかった。

また、フラクタル次元分析では、ストアは神殿よりも比較的高いフラクタル次元を有していることがわかり、神殿・ストア共に年代が進むにつれフラクタル次元が増加していることがわかった。

神殿に比べ、ストアの相関値が比較的高いことや、アスクレピエイオンとアッタロスの相関関係、フラクタル次元の値や pixel 数の減少に伴う変動が似ていることから、相関値とフラクタル次元の値は一定の関係性を有すると推測できる。

以上、画像処理手法により定量的な評価を行った。以後、神殿・ストアのさらなる分析を行い、相関値とフラクタル次元の関係性について考察を行う予定である。

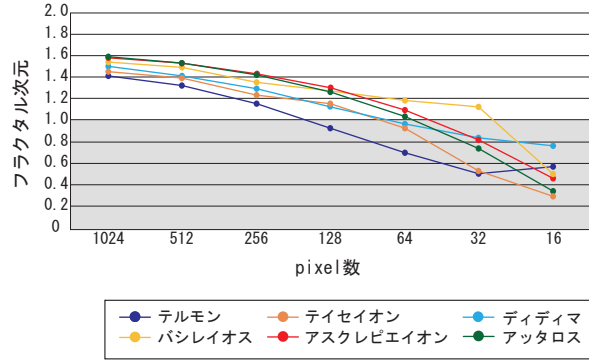


図7 神殿建築・ストアのフラクタル次元

- ラにおけるフラクタル次元解析による復元的考察—ヘファイストス神殿の可視領域の解析によるアゴラ空間の秩序化について—日本建築学会梗概集, 2017
- 8) 遠藤 庫央・大内 宏友, 古代ギリシャ都市アテネのアゴラにおける画像解析による復元的考察—画像相関技術を用いたアゴラの形成プロセスについて—, 第26回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.141-144, 2003.12
- 9) JOHN TRAVLOS, PICTORIAL DICTIONARY OF ANCIENT ATHENS, Thames & Hudson Ltd; y First printing edition, 1971.6
- 10) JOHN TRAVLOS, BILDLLEXIKON ZUR TOPOGRAPHIE DES ANTIKEN ATTIKAS, Ernst Wasmuth Verlag, 1998.11
- 11) ウィトルーウィウス(森田慶一訳), ウィトルーウィウス建築書, 東海大学出版会
- 12) ドクシアデス(長島孝一訳), 古代ギリシアのサイトプランニング, 鹿島出版会
- 13) D. S. Robertson, Greek and Roman Architecture Cambridge, 1943.
- 14) W. B. Dinsmoor, The Architecture of Ancient Greece London1975
- 15) B. ワード=パーキンズ, 古代ギリシアとローマの都市, 井上書院, 1984

参考文献

1) ウィッチャーリー(小林文次訳), 古代ギリシアの都市構成, 相模書房, pp.72~73, 1980

2) 黒岩 孝・佐藤 敬太郎・大内 宏友・松原 三人, 航空写真のフラクタル解析による市街地の形態分類及び変化領域の抽出, 環境情報科学論文集19, pp.71-76, 2005.11

3) カール・ボーヴィル著・三井直樹・三井秀樹 共訳, 建築とデザインのフラクタル幾何学, 1997

4) 金岡 正悟・遠藤 庫央・大内 宏友, 都市環境における広場形成のフラクタル性に関する研究, 第26回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.133-136, 2003.12

5) Ohuchi, H., Yamada, S., Ouchi, S., Shintani, N., Suzuki, N., and Tao, W. (2007) Study on Changes in Ancient City Agoras Using Fractal Analysis - Using Image Analysis to Describe the Formation of Agora in 300 B.C., 150 B.C., and 100 A.D., - International Symposium on Studies on Historical Heritage.

6) Hirotomo Ohuchi・Satoshi Yamada・Toshihiro Kimura・Setsuko Ohuchi・Mitsuhiro Matsubara : Study on Changes in Ancient City Agoras Using Fractal Analysis-Using Shaded Image to Describe the Formation of Agora in 300 B.C., 150 B.C., and 100 A.D.-, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 10, pp.359-366, 2011.11

7) 松枝 朝・木村 敏浩・大内 宏友 : 古代ギリシア都市アテネ のアゴ

注

\*1) 画像相関: 2つの画像の濃度分布から得られる得微量である。かつてはフィルムの様に透過性のある媒体を重ね合わせ、光学的に処理することでアナログ的に求められていたが、近年では濃度分布を画像データとして入力し、高速フーリエ変換(FFT)のアルゴリズムを用いてデジタル的に算出するのが一般的である。画像相関の値が大きくなるほど2つの画像の類似性が高く、逆に小さいほど類似性は低い。(参考文献: [1]長谷川伸:改定画像工学, コロナ社pp.155-159, 1991 [2]鳥脇純一郎:画像理解のためのデジタル画像処理I, 昭晃堂, pp.60-64, 1988 [3]末松良一, 山田宏尚:画像処理工学, コロナ社, pp.172-174, 2000)

\*2) アルカイック期: 紀元前7世紀~紀元前6世紀頃

\*3) クラシック期: 紀元前5世紀~紀元前4世紀頃

\*4) ヘレニズム期: 紀元前3世紀~紀元前1世紀頃

\*1 日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻博士前期課程  
 \*2 日本大学生産工学部建築工学科 非常勤講師  
 \*3 日本大学 生産工学部 電気電子工学科 教授・工博  
 \*4 日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻 教授・工博