

古代ギリシャ都市アテネのアゴラにおける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評価

(B. C. 300 , B. C. 150 , A. D. 100の3年代における復元的考察)

○松枝 朝*1 木村 敏浩*2
 黒岩 孝*3 大内 宏友*4

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¹⁾。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多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、アゴラを構成する個々の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」²⁾が有効であると考えられる。高精度な画像相関³⁾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⁴⁾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⁵⁾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^{4,6)}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

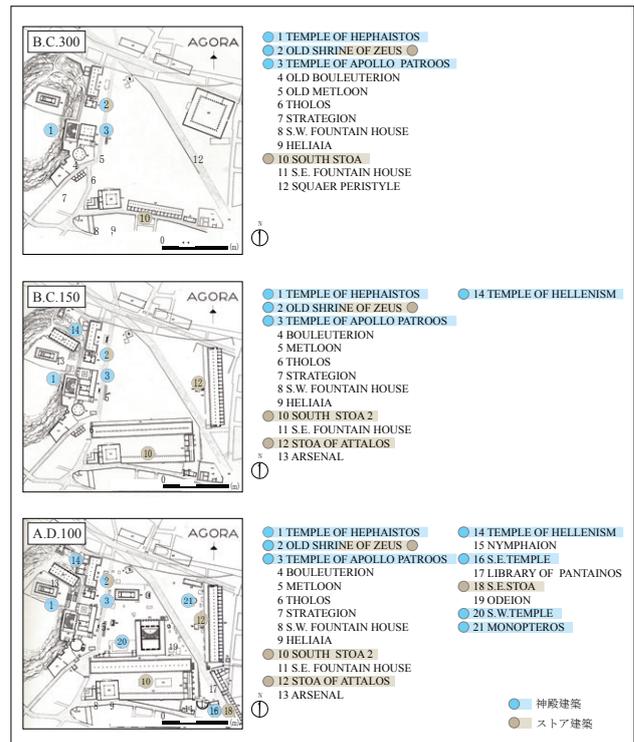


図1 アゴラ配置図

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⁷⁾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。また、既往研究⁸⁾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、続く既往研究⁹⁾にて、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を分析し、画像相関との関連性を考察した。

本稿では、既往研究で3Dモデルを作成した3つの年代のアゴラに建つ神殿建築、ストアに着目し、それぞれのファサードを抜き取り、フラクタル次元分析及び画像相関を行うことでその類似性を定量的に評価する。さらに、2つの分析結果の関連性について考察する。

3. 画像相関分析

3-1. 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⁸⁾に基づき、ここで言う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。具体的に以下の計算により相関値を算出した。画像がNピクセル×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3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。

3-2. 神殿建築の画像相関を用いた分析

画像相関を用い、図4に示す神殿建築の類似性について検討した。

2値化画像及び相関値の最大値を示す(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について以下のことが考察できる。

- ①TEMPLE OF HEPHAISTOSは MONOPTEROSとSTOA OF ZEUSを除いた神殿建築と相関値がやや高い。
- ②STOA OF ZEUSはどの神殿建築とも相関値が低い。
- ③TEMPLE OF APOLLOはMONOPTEROSと STOA OF ZEUSとだけ相関値が非常に低い。
- ④TEMPLE OF HELLENISMはSTOA OF ZEUSとだけ相関値が非常に低い。
- ⑤MONOPTEROSはTEMPLE OF HELLENISMとだけ相関値が高く、その他の神殿建築とは相関値がほとんどない。
- ⑥S. E. TEMPLEはS. W. TEMPLEとTEMPLE OF APOLLOとの相関値が非常に高く、MONOPTEROSとの相関値が非常に低い。
- ⑦S. W. TEMPLEはS. E. TEMPLEとTEMPLE OF APOLLOとの相関値が非常に高く、MONOPTEROS、STOA OF ZEUSとの相関値が非常に低い。

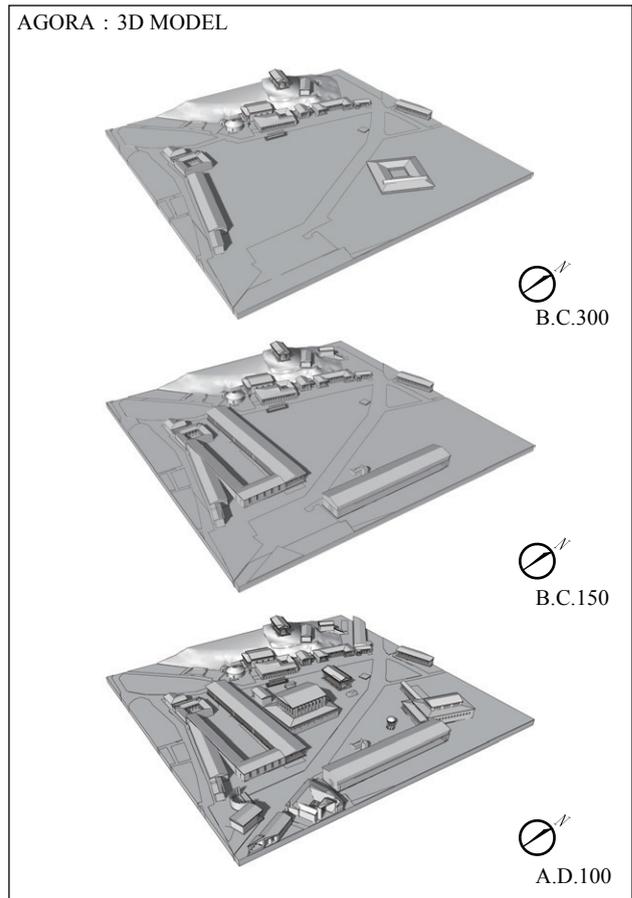


図2 3D広場モデル

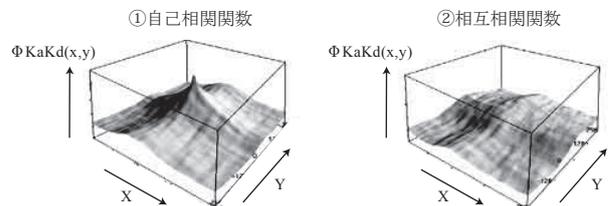


図3 3D相関値画像

3-3. ストアの画像相関を用いた分析

画像相関を用い、図5に示すストアの類似性について検討した。

2値化画像及び相関値の最大値を示す(表1)。画像相関による最大相関値より、対象としたストアについて以下のことが考察できる。

- ①ROYAL STOA、STOA POIKILEはSTOA OF ZEUS以外のストアとの相関値が非常に高い。
- ②STOA OF ZEUSは対象とした他のストアと比べ、どのストアとも相関値が低い。
- ③SOUTH STOA、SOUTH STOA2、STOA OF ATTALOSはSTOA OF ZEUS以外との相関値が非常に高い。
- ④S. E. STOAはSTOA OF ZEUS程ではないが、他のストアと比べ低い値をとっている。
- ⑤ストアの相関値は神殿と比べ、どれも比較的高い値をとっている。

表1 神殿建築・ストアの画像相関分析

神殿	名称	TEMPLE OF HAPHAISTOS	STOA OF ZEUS	TEMPLE OF APOLLO	TEMPLE OF HELLENISM	MONOPTEROS	S.E.TEMPLE	S.W.TEMPLE
B.C.300	TEMPLE OF HAPHAISTOS	1						
B.C.300	STOA OF ZEUS	0.1353	1					
B.C.300	TEMPLE OF APOLLO	0.6579	0.2430	1				
B.C.150	TEMPLE OF HELLENISM	0.5106	0.0574	0.4018	1			
A.D.100	MONOPTEROS	0.1243	0.0828	0.1251	0.4128	1		
A.D.100	S.E.TEMPLE	0.5294	0.2778	0.7565	0.2779	0.0552	1	
A.D.100	S.W.TEMPLE	0.5816	0.2098	0.8248	0.3972	0.1261	0.7383	1
ストア	名称	TEMPLE OF HAPHAISTOS	STOA OF ZEUS	TEMPLE OF APOLLO	TEMPLE OF HELLENISM	MONOPTEROS	S.E.TEMPLE	S.W.TEMPLE
B.C.300	ROYAL STOA	1						
B.C.300	STOA POIKILE	0.7604	1					
B.C.300	STOA OF ZEUS	0.4564	0.4480	1				
B.C.300	SOUTH STOA	0.7473	0.7403	0.4499	1			
B.C.150	SOUTH STOA 2	0.8276	0.8025	0.4886	0.7851	1		
B.C.150	STOA OF ATTALOS	0.7478	0.7295	0.4601	0.7416	0.7737	1	
A.D.100	S.E.STOA	0.7020	0.6644	0.5356	0.6739	0.7364	0.6669	1

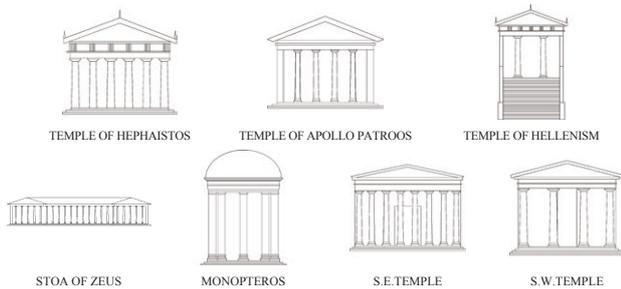


図4 神殿のファサード

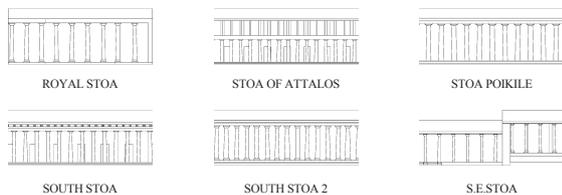


図5 ストアのファサード

4. フラクタル次元分析

4-1. 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logrとlogN(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^n 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。

4-2. フラクタル次元分析結果

- i) 1024pixelにおいて、神殿建築のフラクタル次元は1.2199-1.4503であるのに対して、ストアは1.3788-1.4842の値をとっており、比較するとストアの方が神殿建築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る(表2)。
- ii) 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6、7)。

5. 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、それぞれの時代変遷における個々の建物の様式を分析することができた。以下に本研究から得た知見を整理し、2つの側面からの分析結果により考察できる。

- I. 既往研究にて考察したように、ストアの相関値は神殿建築と比べ、どれも比較的高い値をとっており、同様にフラクタル次元も比較的高い値をとっている。
- II. MONOPTEROSとTEMPLE OF HELLENISMは1024pixelのフラクタル次元において、対象の神殿建築の中で最大と最小を示しているが、お互いの相関値は0.418と高い数値を示している。MONOPTEROSにおいては、他の神殿建築と比較してもこの値が一番高いものとなっている。
- III. TEMPLE OF HEPHAISTOSはどの神殿建築とも平均的な相関値をとっており、フラクタル次元に

表2 神殿建築・ストアのフラクタル次元解析

神殿	名称	1024pixel	512pixel	256pixel	128pixel	64pixel	32pixel	16pixel
B.C.300	TEMPLE OF HEPHAISTOS	1.3491	1.2706	1.1191	0.7913	0.6148	0.2721	0.3685
B.C.300	STOA OF ZEUS	1.4367	1.3876	1.2857	1.1495	0.7996	0.4326	
B.C.300	TEMPLE OF APOLLO	1.3062	1.2330	1.1117	0.7383	0.4091	0.3995	
B.C.150	TEMPLE OF HELLENISM	1.4503	1.3860	1.2825	1.1861	1.1260	0.9323	0.6315
A.D.100	MONOPTEROS	1.2199	1.2769	1.2142	1.0143	0.9488	0.9676	0.7297
A.D.100	SOUTH EAST TEMPLE (S.E.TEMPLE)	1.3718	1.3106	1.1253	0.9506	0.9037	0.3588	0.2925
A.D.100	SOUTH WEST TEMPLE (S.W.TEMPLE)	1.3447	1.2674	1.1968	1.0569	0.9669	0.3668	
ストア								
B.C.300	ROYAL STOA	1.3788	1.3118	1.2829	1.1942	1.0585	1.0589	0.7075
B.C.300	STOA POIKILE	1.3979	1.3377	1.2407	0.8774	0.6591	0.6778	0.3685
B.C.300	STOA OF ZEUS	1.4367	1.3876	1.2857	1.1495	0.7996	0.4326	
B.C.300	SOUTH STOA	1.4734	1.4081	1.2511	1.1611	0.9716	0.6043	0.2925
B.C.150	SOUTH STOA 2	1.4681	1.4238	1.2975	1.2592	1.0617	0.4381	
B.C.150	STOA OF ATTALOS	1.4842	1.4354	1.3717	1.2599	1.1439	0.6401	
A.D.100	SOUTH EAST STOA (S.E.STOA)	1.3942	1.3182	1.2369	0.9760	0.9262	0.2827	

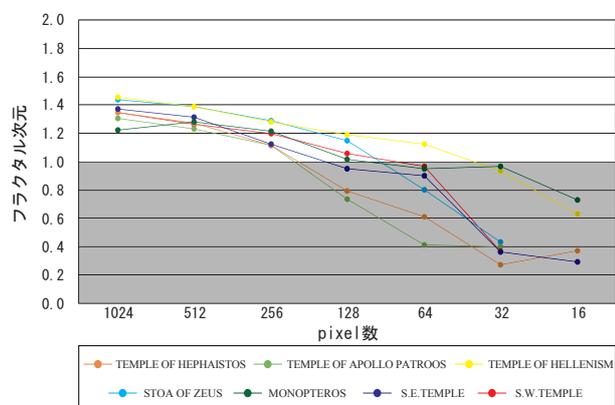


図6 神殿建築のフラクタル次元

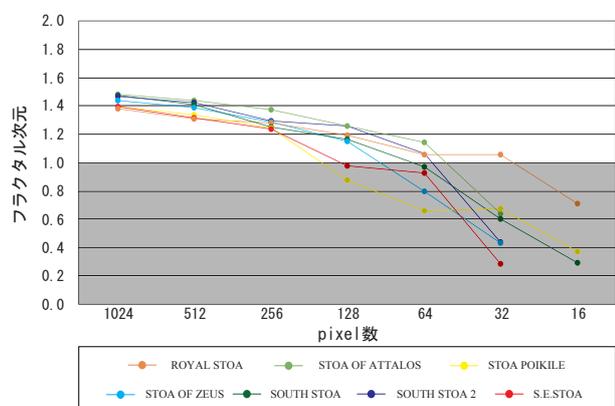


図7 ストアのフラクタル次元

おいては、対象の神殿建築の中で中央に位置している。

以上、画像解析による2つの分析手法総合的な関連性について考察を行った。以後、神殿建築・ストアの更なる分析を重ね、相関値とフラクタル次元の関係性についての知見を広げ、広場（アゴラ）の空間の秩序化について考察を進めていく予定である。

[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) Hiroto 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: 古代ギリシャ都市アテネのアゴ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-画像関連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) 松枝 朝・木村 敏浩・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処理手法を用いた復元的考察-画像関連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-, 日本建築学会梗概集, 2018
- 10) JOHN TRAVLOS, PICTORIAL DICTIONARY OF ANCIENT ATHENS, Thames & Hudson Ltd; y First printing edition, 1971, 6
- 11) JOHN TRAVLOS, BILDLEXIKON ZUR TOPOGRAPHIE DES ANTIKEN ATTIKA, Ernst Wasmuth Verlag, 1998. 11
- 12) 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
- 13) 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
- 14) D. S. Robertson, Greek and Roman Architecture Cambridge, 1943.
- 15) W. B. Dinsmoor, The Architecture of Ancient Greece London 1975
- 16) 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

[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よう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) フラクタル次元: 自己相関性を定量化した数値であり、相関性をもとにした測度で、異相次元と異なり、非整数値を取ることが特徴である。

- *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 青山製図専門学校 教員
- *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