フラクタル幾何学に基づく積層アーチの風荷重に対する力学的性質 に関する研究

A STUDY ON STATIC CHARACTERISTICS OF A LAYERED ARCH WITH FRACTAL GEOMETRIC FORM AGAINST WIND LOADING

前 稔文*, 朝山秀一**, 河井宏允***

Toshifumi MAE, Shuichi ASAYAMA and Hiromasa KAWAI

This paper describes the static characteristics of a layered arch with fractal geometric form against wind loading. Wind tunnel test is conducted to acquire the wind force coefficient. It can be thought separated flow is found near the top of the structure through the distribution obtained experimentally as a whole. Subsequently analytical results show the stress distribution is similar to other arches that have a same rise angle and a different iterated times. Intensity of the stress becomes large with increase of the rise angle and iterated time. It means the arch with small rise angle have a rationality more than other one with larger rise angle. The above results show the layered arch structure has possibility enough although it has complex configuration affected by wind.

Keywords: *Fractal, Arch structure, Wind tunnel test, Wind force coefficient, Frame analysis*

フラクタル, アーチ構造, 風洞実験, 風力係数, 骨組解析

1. 序

これまでの建築物は、基本的にユークリッド幾何学図形の組合せによるものが殆どである。それに対して、自然界に存在する形にしばしば見られるフラクタル幾何学的形状を建築に取り込めば、自己相似性や非整数次元などの幾何学的な意味で、自然界に存在するものに近い形の特徴を持つ新しい建築構造的形状が得られると考えられる。

既に、フラクタルは建築分野においても応用され始めているが¹⁾ 2) 3) 4) 5) 6) 7)、反復関数システムの利用などの本格的な研究事例は少ない。こうした状況の中、筆者らの一人は、完全自己相似集合を構成するフラクタル幾何学的形状をしたトラスに関する研究を発表し^{8) 9) 10) 11)}、そのトラスを用いた屋根を実際に設計した¹²⁾。さらに、筆者らは本論文で扱う完全内部自己相似集合を構成するフラクタル幾何学的形状をしたアーチ構造に関する研究を発表した¹³⁾。それは、樹木などの生成過程と同じ形のシステムを用いた構造体で、基本となるアーチの上に縮小写像により生成される小アーチを積み上げたアーチ（以下、積層アーチと呼ぶ）である。既に発表した論文¹³⁾では、積層アーチの厳密な形状を誘導した上で、フラクタル次元と形状パラメータとの関係を明らかにし、骨組解析用データの自動生成システムについて述べた。また、それを用いて積層

アーチに鉛直荷重が作用した場合、ローラー支持部の変位を抑制するタイビームのような役割を果たす部材が存在するなど、鉛直荷重に対する積層アーチの力学特性を明らかにし、パラメータ毎による通常のアーチ構造（以下、単層アーチと呼ぶ）と比較したが、風荷重に対する性質は言及しなかった。しかしながら、複雑な形状をした積層アーチを実際に設計するためには、その構造体に作用する風圧分布を把握することが必要である。

そこで、本研究では、積層アーチの形状パラメータを変化させ、縮小写像の繰返し回数がそれぞれ違う9つの試験体を作成し、風洞実験によりそれぞれの風力係数を求めた。また、それに基づき風荷重を定め、骨組解析を行ない、その力学的性質を明らかにした。

2. 風洞実験の目的及び方法

積層アーチは、フラクタル幾何学に基づく屋根架構で複雑な形状をしており、いかなる風圧力が作用するかを予想することは困難なため、骨組に作用する基本的な風荷重を把握するための風洞実験を行った。実験は、文献14で分類されている「剛な小規模構造物の骨組用風荷重」を対象として「屋根ばりの風荷重」を参照しながら、測定対象、実験方法を計画した。

実験の対象となる積層アーチの形状は、形状パラメータの組合せ

* 東京電機大学大学院博士課程建築学専攻 工修
** 東京電機大学工学部建築学科 教授・工博
*** 京都大学防災研究所 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Tokyo Denki University, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Tokyo Denki University, Dr. Eng.
Prof., Kyoto University, Dr. Eng.

により変化する。既に発表した論文¹³⁾で鉛直荷重に対するその力学特性を把握した際には、形状パラメータの一つである円弧の中心角を6で除した各角度 θ ($20^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$, Fig.1) に対して、形が最も複雑なものという意味でフラクタル次元が最高値となる組合せのものを対象モデルとして骨組解析を行った。本論文では、その時に触れていない風荷重に対する積層アーチの性状を明らかにすることを試みた。実験には、屋根となる円弧の中心角度が 120° 、 150° 、 180° ($\theta=20^\circ$ 、 25° 、 30°) で、2層から4層の屋根を持つ9体の模型を用いた (Fig.2)。最下層アーチまでの高さはフルスケールで7.5m、建物の幅は桁方向に30m、梁方向は30mである。Table 1に屋根の頂部高さを示した。なお、Fig.2中の模型記号のFAはFractal Archの略記で、前側の数字は円弧の中心角を6で除した角度 θ 、後の数字は縮小画像の繰返し回数を示している。

実験には、京都大学防災研究所の境界層風洞(測定部長21m、測定部断面2m×2.5m)を使用した。Table 2に風洞の仕様を示した。模型の幾何学的縮尺率は、風洞の大きさや対象となるモデルの複雑さによる模型作成の難易度などを考慮して、1/150とした。積層アーチの計画地域は都市内とし、風洞では荷重指針の地表面粗度IVの気流を模擬した。気流の模擬のため、風洞の測定部風上端に高さ40cmの鋸型バリアーを設置し、その風下から模型の周りを含めて風洞内に6cm×6cm×6cmの立方体のブロックを24cm間隔で千鳥状に敷きつめた(Fig.3)。模型はバリアーから16.5m位置のターンテーブルに設置した。模型位置における平均風速の鉛直分布をFig.4に、目標

Fig. 1 A fractal branch showing center of layered arch ($n=3$).

Fig. 2 Scale of specimen.

Table 1 Heights of a layered arch (unit: m).

iterated times	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$
1	18.48	22.40	27.35
2	19.36	23.75	29.35
3	19.70	24.28	30.18

Table 2 Characteristics of window.

model	Eiffel type wind tunnel
length of wind tunnel	51m
length of test section	21m
size of test section	height:2m, width:2.5m
turn table	diameter:1.8m
maximum wind speed	25m/s

Fig. 3 Experimental arrangement.

Table 3 Specification of wind tunnel.

similarity condition	natural wind	mesurement result of air-flow
average wind speed	$V_z = V_{z1}(z/z_1)^{0.27}$	$V_z = V_{z1}(z/z_1)^{0.29}$
turbulence intensity	$I_u = 0.25 (z=30.18m)$	$I_u = 0.25 (z=0.201m)$
turbulence scale	$L_H = 100m (H=30.18m)$	$L_H = 0.67m (H=0.201m)$

Fig. 4 Profiles of mean wind speed and turbulence intensity.

とした地表面粗度IVの気流特性と作成した風洞気流の特性との比較をTable 3に示す。

測定対象模型は、実寸で1.5m (模型寸法で1mm)の凹凸まで再現

Fig. 5 Definition of wind direction.

Table 4 Sampling condition.

sampling duration	15sec. (real time: 10min.)
sampling interval	1/400sec. (real time: 1/10sec.)
sample number	6000
run number	5

(a) FA-25-1

(b) FA-25-2

(c) FA-25-3

Fig. 6 Distribution of wind pressure coefficient.

した。風圧は、梁間方向に風上端（F列：端から模型寸法で0.5cm）と中央（C列）の2カ所で桁方向に測定した。風圧測定点、アーチの繰返し回数が1のものは各列19点、2及び3のものは各列55点で、測定点数はそれぞれ38点および110点である。なお、風圧測定点の番号はアーチ屋根の左端（風上端）から時計回りに設定している。

風圧係数は、(1)式によって算定した。

$$C_{pj} = \frac{P_j - P_s}{q_H} \quad \dots(1)$$

ここで、 P_j は測定点j点での外圧の時間平均値、 P_s は風洞内静圧、 q_H は基準高さ（屋根最頂部）における速度圧である。各測定点の外圧は、模型表面に内径1mmφの真鍮パイプを埋め込み、内径1.4mmφのビニールチューブで真鍮パイプと圧力センサーを気密に接続し測定した。この場合のビニールチューブの長さは1mとした。実験は、ピトー管位置での風速を10m/sに設定し、-90°から10°ごとに90°まで計19風向について実施した(Fig.5)。時間の縮尺率 T_m/T_f は、設計風速 V_f を40m/sとした場合、凡そ1/40である。データのサンプリング諸元をTable4に示した。

3. 風洞実験による測定結果

Fig.6は円弧の中心角度150°（ $\theta=25^\circ$ ）の模型における中央断

Fig. 7 Distribution of wind pressure coefficient (wind direction=0°).

面 (C 列) の風圧係数を、 -90° から 90° までの 7 風向について示したものである。正圧が最大となるのは、FA25-1 では測定点 3、FA25-2 及び FA25-3 では測定点 7 (図中▼印) であった。また、負圧は中央より若干風上側 (図中△印) で最大となる。風向が 0° 、すなわち梁に対して平行 (桁に対して直角) に風が当たる場合に正圧が最も大きい。一方、負圧が最も大きい風向は 30° であった。また、最大負圧は、アーチの繰返し回数が増える程減少する。また、Fig.7 に示した風向角度 0° におけるアーチの形状に対する風圧係数分布から分かるように、縮小写像の繰返し回数が 1 のものを除けば、風上側の隣り合う 3 層目サブアーチ間の凹部付近で正圧が最大となった。負圧に関しては、アーチの凸部で値が大きくなり、凹部では両隣のアーチ凸部に設けられた測定点より風圧は小さくなる傾向が見られた。このような傾向は、風向 90° を含むどの風向においても観測された。Fig.8 は、同モデルの風向角度 0° における風荷重の水平方向成分の和 (抗力) と鉛直方向成分の和 (揚力) の繰返し回数の増加による推移を示したものである。抗力は繰返し回数と共に単調に増加するのに対し、逆に揚力は減少する傾向にあり、その回数が 2 から 3 に増加する時に緩やかに減少し、繰返し回数が 1 の場合においては揚力が抗力を上回っている。

4. 風荷重に対する骨組解析

ここでは、風荷重が作用した場合の積層アーチの骨組解析を行なうため、前章で得られた各測定点に作用する外圧係数を用いて、風荷重を求めた。風荷重は、国土交通省告示第 1454 号に準拠して以下のように算出した。

$$f = q \cdot C_f \cdot A \quad \cdots(2)$$

ここで、 f は風荷重 (N)、 q は速度圧 (N/m^2)、 C_f は風力係数、 A は各荷重作用点の支配面積 (m^2) である。まず、(2) 式における風力係数 C_f は本風洞実験によって得られた外圧係数として扱い、各荷重の作用点における屋根の支配面積は、別途算出した。速度圧 q に関しては、同告示同号における

$$q = 0.6 \cdot E \cdot V_0^2 \quad \cdots(3)$$

Fig.8 Relationship between drag force and lift force ($\theta=25^{\circ}$).

Table 5. Parameters of cross-section (fractal arch)

Iterated times	H (mm)	B (mm)	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)
0	1,000	600	25	45
1	400	200	8	13
2	150	75	5	7
3	100	50	5	7

より求めた。この(3)式における V_0 は国土交通大臣が定める基準風速で、本積層アーチは東京都 23 区に建設するものと想定したため $V_0=34\text{m/s}$ となり、 E は同告示に従い算出する数値で次式により求めた。

$$E = 0.6 E_r^2 G_f \quad \cdots(4)$$

また、 E_r は、平均風速の高さ方向の分布を表す係数であり、

$$E_r = 1.7 \left(\frac{H}{Z_0} \right)^{\alpha} \quad \cdots(5)$$

より得られる Z_0 及び α は地表面粗度区分に応じて得られる数値であり、それぞれ 550m、0.27 である。 $H(\text{m})$ は建物の基準高さであり、ガスト影響係数 G_f も、同告示の地表面粗度区分と建物基準高さ H から、それぞれのモデルに対して補間により求めた (Table 1 参照)。

骨組解析を行なう架構の部材断面の寸法については、基本となるアーチ (1000x600x25x45) の梁せいに対して、縮小写像となるアーチの梁せいが縮小率 λ (いずれの場合も $\lambda \approx 0.4$) をほぼ満たすように、JIS 規格の H 型鋼より選択した (Table 5)。また、アーチの支持条件は、左端をピン、右端をローラーに定め、アーチのスパンを 30m、各節点は剛接合とした。また、ヤング率は $205.8\text{kN}/\text{mm}^2$ 、せん断弾性係数は $77.2\text{kN}/\text{mm}^2$ とし、各モデルの解析結果を比較することで、風荷重が作用した場合の積層アーチの基本的性質を検討した。

5. 風荷重に対する解析結果および考察

本章では、前章で算出した風荷重を用いて、積層アーチの骨組解析

Fig.9 Comparison of displacement (unit: cm, $\theta=25^{\circ}$).

の結果について考察を行なった。その際、円弧の中心角度が 150° ($\theta=25^\circ$) のモデルで風向 0° の場合のものを例として、積層アーチの変形、軸および曲げ応力について検討した。また、各積層アーチを比較する際には、紙面の都合上、試験体中央の C 列についてのみを対象とした。

積層アーチに風荷重が作用した場合における変位量を 300 倍に拡大したものを Fig.9 に示す。なお、図中の中央および右下にある数値は、積層アーチの最下層であるメインアーチの中央部およびローラー支持部における水平変位量と鉛直変位量を示したものである。積層アーチのローラー支持部における水平変位量は、縮小写像の繰返し回数が 1, 2, 3 と増加するのに対し、0.03, 0.27, 0.36 となっており、その回数と共に大きくなる傾向が見られた。

Fig.10 および 11 に、風荷重に対する積層アーチの軸力図、モー

メント図を示す。いずれの応力図においても、最下層のメインアーチが主として駆体を支えていることが分かる。

軸力分布を比較した場合、縮小写像の繰返し回数と共に軸力が大きくなる傾向が見られ、メインアーチにおける軸力の最大値は 6.84, 8.40, 9.50kN となった (Fig.10)。しかしながら、繰返し回数が 2 および 3 のものと、風下側において圧縮力が生じているのに対し、縮小写像の繰返し回数が 1 の積層アーチでは、揚力が抗力よりも大きいためメインアーチの部材には全て引張力が生じている。

曲げモーメントの場合も、繰返し回数と共にメインアーチにおける最大値は、16.28, 44.99, 59.24kN $\cdot$ m と大きくなる傾向が見られた。いずれの場合においても、モーメントの生じ方は概ね類似しており、アーチの内側が伸びるような曲げモーメントがメインアーチに生じ、風下側よりも風上側で大きく生じている。しかし、繰返

Fig.10 Comparison of axial force diagram (unit: kN, $\theta=25^\circ$).

Fig. 11 Comparison of moment diagram (unit: kN $\cdot$ m, $\theta=25^\circ$).

Fig.12 Comparison of lateral displacement at a roller supporting point.

Fig.13 Comparison of bending stress.

し回数が1の場合に関しては、中央と風下側の両サブアーチ間の凹部で外側に伸びるような曲げモーメントが生じており、この部材においては繰返し回数が2および3のものと曲げモーメントの生じ方が異なっており、そのことは軸力の場合と同様に揚力が抗力よりも大きかったためと考えられる。

以上のように、縮小写像の繰返し回数による比較した場合、その回数と共に変位および軸力・モーメントは大きくなる傾向が見られ、その回数によって積層アーチの形状が複雑になっても、軸力分布やモーメントの生じ方にはそれほど著しい差は見られなかった。また、同部材位置における力の向きの違いは、繰返し回数によって、積層アーチの形状や風圧分布が変化するために生じたと思われる。

次に、全モデルのローラー支持部における変位量を表したものをFig.12に示す。図中の縦軸は変位量、横軸が風向角度で、繰返し回数 n による違いを検討した。変位量は全体的に、アーチのスパン方向に風荷重が作用する風向角度が 0° の場合に最大で、アーチの中心角度および縮小写像の繰返し回数の増大と共に大きくなる傾向が見られた。なお、円弧の中心角度が 120° ($\theta=20^\circ$)のものは、縮小写像の繰返し回数や風向に関係なく、アーチの内側に変位する傾向が見られた。その理由としては、角度が小さいためにアーチのライズが低くなり、負圧が大きく作用してアーチ全体が上方に引き上げられたためと考えられる。また、その変位量は他のモデルと比べて小さいが、大スパン構造の設計では応力度よりも変形量が重要となるので着目すべき結果である。

以上の結果は、角度 θ と繰返し回数の組合せによってアーチの形

状や高さが異なり、その結果、風荷重の作用が異なったためと考えられる。しかしながら、各アーチの変位量を比較した場合、値の正負の違いはあるが、アーチスパン長さからみれば、40m/sの風速に対して、スパンの1/2000以下の値となっている。

応力度に関しては、本積層アーチは単純支持であるため、曲げが主体となることが予想されるため、各モデルの曲げ応力度について考察した(Fig.13)。なお、各図中における値は、基のメインアーチと繰返し生成された縮小写像であるサブアーチの応力度であり、それらの各層の中で最大となる値を風向ごとに抽出したものである。各図とも積層アーチの上層部ほど応力度は増す傾向がある。また、縮小写像の繰返し数が2回および3回であるサブアーチ（3、4層目の小アーチ）では、風向が $\pm 40^\circ$ や 50° 付近で応力度は大きくなっているが、応力度は全て 15.0N/mm^2 以下である。また、縮小写像の繰返し数が3のものは3層目と4層目の応力度にあまり差が見られないことから、積層アーチの屋根の層数が、これ以上増えた場合でも風荷重による影響に大きな変化は見られないと考えられる。

さらに、風向 0° の場合における、各積層アーチのローラー支持部の水平変位量と、メインアーチにおける各応力度の縮小写像の繰返し回数に対する推移をFig.14~17に示す。各角度における繰返し回数の増加に伴う軸応力度およびせん断応力度の推移(Fig.15および16)の傾向は、ほぼ類似している。いずれの角度も、繰返し回数が1から2においては単調に増加しているが、2から3においては、円弧の中心角度が 120° ($\theta=20^\circ$)のものはあまり変化はなく、円弧の中心角度が 180° ($\theta=30^\circ$)のものは急に増加している。これ

Fig. 14 Relationship between displacement and iterated times.

Fig. 15 Relationship between axial stress and iterated times.

らは、Fig.18 に示すように、各積層アーチに作用する抗力と同じ傾向を示し、水平方向成分による影響が強く見られる。一方、水平変位量 (Fig.14) と曲げ応力度 (Fig.17) の推移では、円弧の中心角度が 120° ($\theta=20^\circ$) で繰返し回数が2のモデルで下に凸となっている。Fig.19 は揚力を示したもので、縮小写像の繰返し回数と共に積層アーチを上方に引き上げる力が減少することが分かる。特に、円弧の中心角度が 120° ($\theta=20^\circ$) で繰返し回数が1のモデルでは、ローラー支持部は円弧の内側に変形しているので、繰返し回数の増加と共に上方に引き上げる力が減少すれば、変形は0に近づくことが分かる。以上から風荷重の抗力と揚力のバランスが、積層アーチのローラー支持部における水平変位量に影響を与えていることが分かった。

6. 結論

本研究の結論として、以下のことが言える。

- 1) 今回の風洞実験により、複雑な形状を持つ積層アーチの風向角度に対する風圧力分布の変化を確認することが出来た。いずれの風向においても、縮小写像の繰返し回数が1のものを除けば、風上側の隣り合う3層目サブアーチ間の凹部付近で正圧が最大となり、負圧に関しては、アーチの凸部で値が大きくなり、凹部では両隣のアーチ凸部に設けられた測定点より風圧は小さくなる傾向が見られた。風向角度 0° における風力係数の値は、国土交通省告示第1454号で示されている円弧屋根の場合において最大-0.8となるのに対し、縮小写像の繰返し回数が1回のは-0.84と若干高くなったが、それが2および3のものは-0.49程度であった。また、風上側における正圧の最大値は、縮小写像の繰返し回数が1のものは0.61で、2および3のものは、それぞれ0.74および

Fig. 16 Relationship between shear stress and iterated times.

Fig. 17 Relationship between bending stress and iterated times.

Fig. 18 Relationship between drag force and iterated times.

Fig. 19 Relationship between lift force and iterated times.

0.79となり、繰返し回数と共に値も大きくなるが、その増加量は次第に少なくなる傾向が見られた。

- 2) 今回の解析で、積層アーチに風荷重が作用した場合の力学特性を把握できた。いずれのアーチもメインアーチが主として駆体を支えており、縮小写像の繰返し回数による積層アーチの形状の変化

によって力の伝達機構も異なり、部材によっては応力の生じ方に違いが見られたが、積層アーチの各応力の生じ方は繰返し回数による差はほとんど無く、概ね類似している。また、応力そのものは繰返し回数の増加と共に各応力の値も大きくなる傾向が見られ、繰返し回数が1, 2, 3と増加するのに対し、軸力の最大値は6.84、8.40、9.50kNとなり、モーメントの最大値は16.28、44.99、59.24kN・mとなった。

- 3) 積層アーチのローラー支持部における変位量は、アーチの中心角度 ($\theta=20^\circ$ 、 25° 、 30°) や縮小写像の繰返し回数に対して大きくなる傾向が見られた。中心角度が 180° ($\theta=30^\circ$) のモデルは相対的に変位が大きくなる傾向を示し、中心角度が 120° ($\theta=20^\circ$) のモデルは、建物高さやアーチのライズが他のモデルよりも低く、凹凸も比較的少ないため、ローラー支持部はアーチの内側に変位する傾向が見られた。その変位量は他のモデルと比べて小さく、大スパン構造の設計ではその適否が応力よりも変形量で決定される場合が多いことを考えれば、この結果は着目すべきことである。また、曲げ応力度もローラー支持部の変位量と同様に、縮小写像の繰返し回数と共に値は大きくなる傾向が見られるが、その回数が2および3のモデルでも、その値は 15N/mm^2 以下である。一方、中心角度が 120° ($\theta=20^\circ$) のモデルでは、 5N/mm^2 で値は $1/3$ 程度と小さく、他のモデルよりも風荷重に対して合理的な性質を持っていることが分かった。
- 4) 風洞実験で得られた風力係数から風荷重を求めた結果、その抗力および揚力とアーチの形状を決める中心角度および縮小写像の繰返し回数に対する関係が明らかになった。すなわち、その抗力は角度や繰返し回数の増加と共に大きくなり、逆に揚力は減少する傾向が見られた。さらに骨組解析により、部材応力度は抗力と同様、角度や繰返し回数の増加と共に大きくなることが明らかになった。また、中心角度が 20° のモデルの場合、それらの増減は他のモデルよりも緩やかで繰返し回数が2から3に増加する際ほとんど変化しないことが分かった。以上から、風荷重の抗力と揚力のバランスが、各積層アーチの変位および応力度に関係しており、アーチのライズが浅いモデルでは揚力によりローラー支持部はアーチの内側に変形し、縮小写像による屋根面の凹凸が大きくなるにしたがって、抗力によりローラー支持部は外側に向かって変形するので、両者のバランスが良い時に風荷重に対して有利な構造体となると考えられる。

謝辞

骨組解析に際し、快く立体解析システム<RITTAI>の使用を許容して頂いた東京電機大学名誉教授須藤福三先生に深く感謝致します。また、風洞実験を行なうに当たり、お世話になった京都大学防災研究所杉政和光技官に感謝致します。さらに実験に協力頂いた東京電機大学大学院生小林竜一君、共に作業した元卒論生小野喜子氏に感謝します。

なお、本研究は東京電機大学総合研究所研究 Q01M-05 として行なったものである。

参考文献

- 1) 山口重之, ほか: 視環境の複雑さについて—フラクタル理論による定量

化の試み, 近畿支部, No.29, pp.245-258, 1989

- 2) 奥俊信: 都市スカイラインの視覚形態的な複雑さについて, 日本建築学会計画系論文報告集第 412 号, pp.61-71, 1990.6
- 3) 佐藤祐介, 新宮清志, 杉浦巖: フラクタル次元による茶室空間の美的分析, 日本ファジイ学会・日本ファジイ学会誌 Vol.12 No.5, pp.696-701, 2000.10
- 4) 村井敬, 中谷聡: メガシティをめざして～再開発型メガシティ, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 14 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.431-434, 1991.12
- 5) ストーレイ・ホール (設計 ARM, メルボルン, 1996) の建築作品など
- 6) 笹田剛史, ほか: フラクタル理論を応用した海岸環境デザイン, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 21 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.415-419, 1998.12
- 7) 高瀬啓元: 剛体の転倒限界の複雑さについて, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 21 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.403-408, 1998.12
- 8) 朝山秀一: フラクタル幾何学的形状をしたトラス構造物の自動形状生成, 計算工学講演会論文集, 第 3 巻 2 号, pp.671-674, 1998.5
- 9) 朝山秀一: フラクタル幾何学に基づくトラスの形状生成と建築設計への応用, 日本建築学会構造系論文集第 504 号, pp.133-139, 1998.2
- 10) 朝山秀一, 岩上信夫: 反復関数システムを用いた建築骨組のイメージ生成, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 17 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.217-222, 1994.12
- 11) 朝山秀一, 岩上信夫: 2つの縮小率を持つフラクタル幾何学図形に基づくイメージ生成と空間デザイン, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 18 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.193-198, 1995.12
- 12) フラクタルトラス (設計 朝山秀一, 東京, 2001): 複雑系的アルゴリズムとフラクタルに基づく都市・建築の形状生成, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 25 回情報システム利用技術シンポジウム論文集/研究集会 2「コンピュータサイエンスが生み出す新しい建築・都市の潮流」, pp.373-374, 2002.12
- 13) 朝山秀一, 前稔文: フラクタル幾何学に基づく積層アーチの自動形状生成とその応用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 557 号, pp.181-139, 2002.2
- 14) 日本建築センター: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 1994.6

(2003年7月10日原稿受理, 2003年11月20日採用決定)