

事例研究にもとづく建築と自然の収斂進化

Convergent Evolution of Building Structures and Morphology in Nature Based on a Case Study

住居学科 石川 孝重

Dept. of Housing and Architecture Takashige Ishikawa

抄 録 本論文では、既存建築の事例、自然界の形態の分析により、建築と自然の関係について、収斂進化という説明を与え、それに基づき、自然界の形態から建築の構造体を取り入れる過程を「操作」という説明で一般化した。この「操作」による形態創生手法を、自然界の形態から、合理的な建築の構造体を得るための手法として提示した。「操作」の具体内容を既存建築の事例から分析した。分析結果から、「操作」対象となる構造体の構成要素を明確にし、「操作」によって得られる構造形態のパターン化を行った。また、既存建築の事例をこの手法に当てはめ、検証を行い、対象とした事例全てをパターン化することができ、これをもって「操作」による形態創生手法の整合性の実証とした。

キーワード：建築構造、構造システム、形成要素、収斂進化、操作

Abstract This paper analyzes existing architectural structures and morphology in the natural world and describes the relationship of structures and nature from the point of view of convergent evolution. The morphological engineering method is explained in this paper: it is a process to create and determine structure-forming elements from morphology in nature. This morphological method in engineering is a rational way to determine adequate structural form. The concrete patterns of engineering in morphology creation are analyzed by studying existing buildings. Structural components as objects of engineering are then clarified, and classified according to the pattern of structural forms divided by manipulation types. Due to verification applying to existing buildings, all patterns are classified in a consistent manner.

Keywords : building structure, structural system, forming element, convergent evolution, morphology engineering

1. はじめに

本研究では、自然界の形態からヒントを得て、建築の合理的な構造体を創生することを目的とする。

自然界では厳しい生存競争に生き残るため、各生物がそれぞれの環境に適した進化を遂げ、エネルギーの効率化が図られている。例えば、植物の形ひとつ取っても、茎の丸い断面は全ての方向に一様な曲げ剛性をもつため、どの方向の風荷重に対しても有効であるし、さらに竹のような中空断面ならば、同じ分量の材でも中実断面に比べ曲げ、捩じれに対して強度が増すため、より細く高く効率的に陽の光に近づくことが可能になる。

また、昨今、深刻な環境問題が世界的に取り沙汰されている。建築においても、限られたエネルギーをいかに効率良く使っていくかが、今後ますます重要な課題になってくると考えられる。

このエネルギーの効率化を考えていく上で、自然界の形態を観察することが建築構造の創生のヒントになると考え、本研究を行う。また、合理性だけでなく、デザインの美しさの観点からも有効な方法になることを期待している。

2. 事例研究

2.1 既存建築の事例

文献とホームページの調査（引用文献は表1に

表記)より、設計者自身が意図的にモチーフとして自然界の形態を取り入れたと記述があるもの、もしくは、意図せずに結果的に自然界の形態と似た構造をもつ事例を取り上げ紹介する。各事例を読み解いていく上で、構造形態を形成する主要素として「建築デザインのための構造計画」¹⁾を参考に、「形」「質(材)」「量(大きさ)」に注目し、「量」についてはさらに、「材の量」と「全体の量」の2つに区分している。建築としての「形」「質」「量」、モチーフの自然界の形態としての「形」「質」「量」を項目に設定し、その他に「事例建築の基本情報」、「自然界の形態の形成プロセス」、建築と自然界の形態それぞれについて「特徴」の項目を加え、どのような特徴の自然界の形態が、建築においてどう活かされているか等の比較や考察を行いやすいよう、表1に既存建築の事例一覧としてまとめた。

まず、本論で扱う「自然」の範囲を明らかにする。本論では、表1の事例1から事例12に示す、自然界の中で人工的な力、操作を加えることなく形成される構造形態についてのみを対象とする。よって事例15 RIBBONSや事例20 カテドラル聖マリア大聖堂は有機的な形態に見えるが、構造体のモチーフに自然界の形態があるわけではなく、人工的に創生された構造形態のため、本論で扱う「自然」の対象としない。ただし、事例13 Living Treeのように、位相最適化という人工的な形態創生でありながら、結果得られた形態が樹木という自然界の形態と似ている事例は、似ている自然界の形態をモチーフと見なして対象とした。また、事例4 ハイムブルグのプールや事例5 マンハイムのマルチホールのように懸垂模型がモチーフの場合も、模型は人工のものであるが、構造形態決定プロセスが重力という自然界の力に委ねられているものとして対象とした。

また、事例17の sumika パビリオンで取り込まれている120°の幾何学や自然界の中から抽出したアルゴリズムによって形成される形態については、広い意味で自然といえるかもしれないが、本論では、自然界のルールにより得られる「合理的な構造体」を追求するため、具体的な形態をもたないルールとしての自然は対象としない。ただし、ハチの巣に見られる六角形や、巻貝のスパイラルなど、自然界の中で形成され、その合理性が形態をもって証明されている構造形態については対象とする。

また、自然界の形態からのヒントの得方として、

本論では合理的かつ意匠的に美しい構造体を得ることを目的とするため、表1で取り上げた事例のうち、意匠的な摸倣のみの事例は、本論で扱う既存建築の事例として対象にしない。よって、事例14のキノコ状の形をもつナミックステクノコア、事例16のリアス式海岸状の大船渡市民文化会館リアスホール、事例18の構造ユニットの配置により森のような空間を表現したY150 はじまりの森、事例19の水泡を模した外壁の北京国家水泳センターは対象としない。

以上から、本論では表1で取り上げた事例のうち、事例1から事例13までの13の事例を対象とする。

既存建築の事例において、建築の構造体と自然界の形態とを比較すると、「形」「質」「量」がそのまま同じであることはまずない。まず、「全体の量」が異なり、建築化するにあたり、巨大化することがほとんどである。さらに、巨大化した構造を支えるため、「質」が強固なもの、また「質の量」が大きく強固なものになるなどの違いが見られる。そしてこれら変化した「質」「量」とバランスを取りあわせて、「形」が変わることも多い。

表1の中から事例6 ジョンソン・ワックス社の柱を例として挙げる。モチーフであるハシラサボテンの骨格は維管束(質)が束になり形成される、メッシュ状の中空円管(形)で、成長すると直径は約20~60cm、高さは約12~15m(全体の量)になる。またメッシュは規則性のあるものであるが、枝分かれ等による応力分布の不均一に応じて補強がなされ、外見からは規則性が判別できない(形)。これをモチーフとした柱では、直径約23cm、高さ約3~15m(全体の量)とほぼ同じくらいだが、建築物を支える柱であるため、大きな荷重がかかる。この荷重を支えるため、メッシュには金属(質)が用いられ、コンクリート(質)で包まれている。また、メッシュも規則性のみを抽出(形)し、均一な強度の柱が形成されている。「質」「形」の変化である。

ここで重要なことは、既存建築の事例は自然界の形態の見かけをそのまま用いているわけではないということである。建築と自然界の形態の間には、全体の量の違いを初め、一致しない条件・目的が存在する。ジョンソン・ワックス社の柱の事例では、「支える荷重が大きくなること」「枝分かれ等のための不均一な強度補強は必要でなくなること」がこの条

件・目的として挙げられる。

既存建築の事例では、この条件・目的の不一致をうまく解消し、自然界の形態を建築の構造体として取りこんでいるといえる。その結果、合理的な建築の構造体が実現していると考えられる。

反対に、条件・目的の不一致の解消法に無理がある場合について、文献⁴⁴⁾をもとに例を挙げる。北京オリンピックのスタジアムの場合、構造システムとして鳥の巣がモチーフになっている訳ではないが、「形」だけを模することにより、条件・目的の不一致の解消の際に大量の鋼材が必要になったことから、合理的とはいえない事例になる。

2.2 自然界の形態の事例

既存建築の事例研究では、付随して、モチーフである自然界の形態の事例についても、その特徴などを表1の中で示した。各事例を知るにつれ、本論のテーマである自然界の形態から建築のヒントを得るためには、既に建築と結び付きのある自然界の構造体以外でも、自然界の形態そのものに目を向けて理解を深めていく必要があると考えた。そこで、文献^{19, 20, 40, 42)}とホームページ^{4, 41)}の調査により自然界の形態の事例研究を行い、その結果を紹介する。

既存建築の事例と同じく、形態を形成する主要要素として「形」「質」「量」に注目し、「形成プロセス」「特徴」の他、「形態決定の条件・目的」の項目を加え、表形式にまとめた。「形態決定の条件・目的」の項目を加え、結果として構成された形態とその要因とを結び付けることで、形態のもつ意味を理解するという狙いがある。表2に自然界の形態の事例一覧を示す。

本論では、「自然界の形態は合理的な構造システムをもつはずである」という前提を元に「その構造システムが建築にも有効なのではないか」と考え、研究を進めている。厳しい自然界の中で生き残っていくには、エネルギー消費をできるだけ効率良くする必要があり、その条件下で形成される形態は合理的な構造システムをもつはずだからである。前項の中で、既存建築の事例は自然界の構造体の見かけの「形」を模している訳ではないことを述べたが、ここではさらに、この自然界の形態の構造システムについて、その形態決定要因に注目して考察する。

自然界の構造体は、その形成プロセスに着目する

と、生き残るために様々な条件・目的に対してエネルギーを効率的に消費し、それぞれにとっての合理的な構造システムを形成していることがわかる。しかし、この様々な条件・目的の中には形を維持するためだけでなく、「移動をする」「捕食する」「水中で生活する」等の建築では必要としない条件・目的も含む。自然界の構造体の事例から2つ例を挙げ比較をする。一つは放散虫の骨格、もう一つは雪の結晶である。

放散虫の骨格は、石鹸膜の張り方に酷似した形状をもつ、海中の微生物である。石鹸膜はその形態決定にはエネルギー最小原理が働くため、得られる面は極小曲面となり、膜の引張力はあらゆる方向で等しくなる。石鹸膜のこの性質を利用し、極小曲面を得て形態決定された建築は既に存在し、モントリオール万国博覧会ドイツ館がその例として挙げられる。放散虫も骨格ができあがる過程で、表面張力が働いたのではないかと考えられており、「全体の量」や強度を高めるために「質」「質の量」を変化させ、建築に取り込むことができる可能性が大いにある。

一方、雪の結晶はその形成プロセスを辿ると、結晶の構成原理はエネルギー最小原理ではなく、水分子の性質と湿度の状態が形態決定の条件であることが分かる。さらに、結晶自体が微小で重力影響もほとんど受けていないことから、建築に取り込むことによる構造システム上の利点はないと考えられる。ここから考えられることは、建築の合理的な構造システムを得るには、少なくとも自然界の形態の形成プロセスにエネルギー最小原理が働いている必要がある、自然界の構造体といえども、条件・目的によっては建築の構造体のヒントにはならない場合もあり得るということである。

3. 建築と自然の収斂進化

3.1 収斂進化と建築への適応

国語辞典によると「収斂進化(しゅうれんしんか)とは、魚類のサメと哺乳類のイルカのように全く系統の違う動物が、似たような体形を持つようになること。」と記されている。

新水俣門の事例をもとに、設計者の渡辺誠氏の言葉⁴⁵⁾より引用する。『『新水俣門』の全体のカタチは木に似ている、と思うかもしれない。しかし、これは樹木の外形を模倣したものではもちろんないことに注意してほしい。・・・木の枝と骨、というよ

表2 自然界の形態の事例

自然界の構造体	画像	形	質(材)	量(大きさ)	形態プロセス	特徴	形態決定の条件・目的
1 植物の茎(41)		円管	維管束: セルロース繊維により硬化された細胞壁			全ての方向に一種な曲り剛性がある	あらゆる方向から吹く風に対して素直に曲がって倒れるため
2 ゴムの木(19)		円筒形の中空断面 樹皮に巻き寄り合った木の幹	維管束: セルロース繊維により硬化された細胞壁	直径数十cm、高さ数十m程度	木や幹(皮)が傷みやすい断面が空になり、結合部で肥大化 ※気根…地上に露出した根の一種	中空断面より曲がり、折れに強さがよい。中空の円管にその繊維束が配置されている茎は、6本の維管束を木にまとめた時の強度の少なくとも25倍はある	最小限の量用材料で、最大の空間を占めるため
3 したれ柳(19)		水分の多い材料組織 細く柔軟な枝はさらさらになった葉方向の繊維を柔らかくする外で芯の断面	維管束: セルロース繊維により硬化された細胞壁	直径数mm~数cm		柔軟で柔軟性に富む柔構造 エネルギー吸収に優れる	風の力を受け流し、力学的な負担を少なくするため
4 ガジュマル(19)		垂れた枝の質量が完全体に占める割合が多い	維管束: セルロース繊維により硬化された細胞壁			長雨期の構造物 モーメントを枝の付け根に伝達せず、引張力のみ伝達	地震エネルギー等を吸収するため
5 ハチの巣(20)		六角形 枝を支える支柱	維管束: セルロース繊維により硬化された細胞壁	直径数十cm、高さ数十m程度	傾いた木の枝幹の柱から気根が生え、地面に到達すると太く太くなり、支柱となる	自己増殖機能	傾いた樹幹や、伸びた枝を支えるため
6 シュロ(41)		2面の繊維の束が互いに重なり合っている	維管束: セルロース繊維により硬化された細胞壁	厚さ約0.1mm、長さ約10~15mm	4片持ち束の応力伝達 片持ち束の応力線に沿ったような働きをする	木が倒れる時、互いに強さを支えるように働く	傾いた樹幹や、伸びた枝を支えるため
7 鳥の翼の骨(41)		非常に薄い完全な円管	骨: コラーゲン繊維(赤色の線目)リン酸カルシウム(灰色の線目)をセメントのようにまとったもの。強く、弾力性も少しある	直径数十cm、高さ数十m程度		応力分布に合わせた応力伝達経路の分布	傾いた樹幹や、伸びた枝を支えるため
8 ハワタカの手(骨)(41)		円管構造に加え、1本の支柱(骨: コラーゲン繊維(赤色の線目)リン酸カルシウム(灰色の線目)をセメントのようにまとったもの。強く、弾力性も少しある)がされている	骨: コラーゲン繊維(赤色の線目)リン酸カルシウム(灰色の線目)をセメントのようにまとったもの。強く、弾力性も少しある	直径数十cm、高さ数十m程度		円管構造が大きい曲げモーメントに耐える	傾いた樹幹や、伸びた枝を支えるため
9 ヒトの土留骨(4)(M1)		中央が太く、両側に向かって徐々に細くなっていく	骨: コラーゲン繊維(赤色の線目)リン酸カルシウム(灰色の線目)をセメントのようにまとったもの。強く、弾力性も少しある	平均的な長さ43.2cm	応力分布に合わせて材料が振り分けられている	中央が太く、両側に向かって徐々に細くなるように振る	傾いた樹幹や、伸びた枝を支えるため

10	骨の繊維組織 41)		ヒトの大腸骨の縦断面図に見られる繊維組織は、骨の重量を担っている。それを構成する繊維は互いにほとんど直交している。	骨の繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	ウシ、全長およそ1.5m、高さおよそ1.5m	運動の仕方や姿勢の取り方が違えば応力分布に応じて、骨の繊維組織は異なった分布を示す。  (右)と大腸骨の応力分布(左) 41)	体の向きが異なる方向に走るため、繊維の配列に異なるように配列している。肩胛骨の向きが異なる方向に走るため、繊維の配列に異なるように配列している。	繊維の向きが異なる方向に走るため、繊維の配列に異なるように配列している。
11	四足動物の骨格 41)		背骨に変形が見られる。	骨、コラーゲン繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	ウシ、全長およそ1.5m、高さおよそ1.5m	繊維組織が骨の中で応力分布に応じた配列をしているように、骨格全体も応力分布に応じた配列をしている。	繊維組織が骨の中で応力分布に応じた配列をしているように、骨格全体も応力分布に応じた配列をしている。	繊維組織が骨の中で応力分布に応じた配列をしているように、骨格全体も応力分布に応じた配列をしている。
12	ウシ、ウマ、カンガルー 41)		前足の骨種のどけの突起が大きい。	骨、コラーゲン繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	ウシ、全長およそ1.5m、高さおよそ1.5m	ウシ、ウマ、カンガルーの骨格は、前足の骨種のどけの突起が大きい。	ウシ、ウマ、カンガルーの骨格は、前足の骨種のどけの突起が大きい。	ウシ、ウマ、カンガルーの骨格は、前足の骨種のどけの突起が大きい。
13	ゾウ、ラクダ 41)		突起の大きい突起はウシなどと大差はないが、後方に大きく突起している。	骨、コラーゲン繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	ゾウ、全長およそ6m、高さおよそ3m	突起の大きい突起はウシなどと大差はないが、後方に大きく突起している。	突起の大きい突起はウシなどと大差はないが、後方に大きく突起している。	突起の大きい突起はウシなどと大差はないが、後方に大きく突起している。
14	キリン 41)		前足側の骨種の突起が非常に高く、体の後ろが低い。骨格は真上に持ち上げた位置にある。	骨、コラーゲン繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	高さおよそ5m	前足側の骨種の突起が非常に高く、体の後ろが低い。骨格は真上に持ち上げた位置にある。	前足側の骨種の突起が非常に高く、体の後ろが低い。骨格は真上に持ち上げた位置にある。	前足側の骨種の突起が非常に高く、体の後ろが低い。骨格は真上に持ち上げた位置にある。
15	カンガルー 41)		背中に突起はない。	骨、コラーゲン繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	全長およそ1.5m、高さおよそ1.5m	背中に突起はない。	背中に突起はない。	背中に突起はない。
16	ナマケモノ 41) 42)		脊椎骨が真横にたぐささん。リ、すべて同じような形と大きさで配置されている。	骨、コラーゲン繊維組織 (布状)の縦目(リン酸カルシウム(骨状)をセメントのように繋ぎつたもの。強く、弾力性も少しある)	全長約40~70cm	脊椎骨が真横にたぐささん。リ、すべて同じような形と大きさで配置されている。	脊椎骨が真横にたぐささん。リ、すべて同じような形と大きさで配置されている。	脊椎骨が真横にたぐささん。リ、すべて同じような形と大きさで配置されている。
17	放射虫 41)		石綿質(微小曲面)に類似した形状の骨格。	ケイ酸からなる硬い骨格	骨格が出来上がる過程で表面張力が働いて考えられている。	石綿質(微小曲面)に類似した形状の骨格。	石綿質(微小曲面)に類似した形状の骨格。	石綿質(微小曲面)に類似した形状の骨格。
18	雪の結晶 43)		六角対称形	水分子	材料そのものが持つ性質に任せて自然に形成される。	六角対称形	六角対称形	六角対称形

うに出自も材料も違うものが、同じような条件で同じような目的に向かうとき、同じような解答にたどり着くという現象は、生物学では収斂進化と呼ばれている。「新水俣門」は、一種の収斂進化の結果、植物や骨格のような形態となっているといえよう。」

上記では、生物間の収斂進化と似た現象が、建築と自然の間でも起こることがあると述べられている。ここでは紙面の都合上詳しく述べないが「建築と自然の収斂進化」は2章の事例研究で取り上げた例でも確認することができる。

3.2 「操作」による形態創生

収斂進化が人工物である建築にも起こり得ることを考えれば、次の仮説が想起される。「最適な構造形態を追求した結果、建築と自然が収斂進化を起こすのであれば、建築と自然界の構造体との間に作為的に収斂進化を起こすことにより、建築の最適な構造形態を得ることができるのではないか。」

以後、上記の仮説をもとに、自然界の構造体から建築の構造体のヒントを得る手法を追求する。ここで、収斂進化を作為的に起こすに当たって考慮すべきことが、二つある。一つは、前節の収斂進化の説明に即すと、収斂進化は建築の構造体と自然界の形態が同様の条件・目的をもった時に起こるものであるが、必ずしも条件・目的が一致しないことである。ミュンヘンオリンピックとクモの巣の例では、似通った構造形態に辿りついたそれぞれの条件・目的は、建築は構造の安定性、一方モチーフは構造の安定性の他に、罨としての機能性もある。ではなぜ収斂進化と同じ現象が起こったのかを考察すると、これらの条件・目的が求めた、高強度で軽いという「特徴」が一致し、その特徴が具体化した「形」「質」「量」に類似点が現れたと説明することができる。

このことから、建築と自然の収斂進化について、条件・目的の一致もしくは、特徴の一致も収斂進化の条件であるといえる。

もう一つは、上記の収斂進化の条件に則って、ある条件・目的もしくはある特徴が一致する建築の構造体と自然界の構造体においても、自然界から直接最適な解は得られないことである。両者の間には、互いに一致しない特徴を現す条件・目的があり、最適解を得るには、これらの不一致を解消する必要がある。

このことは、2章の既存建築の事例の考察におい

ても「建築の構造体は、自然界の形態の見かけをそのまま用いているわけではないこと」「建築の構造体と自然界の形態の間には、一致しない条件・目的が存在すること」「既存建築の事例では、条件・目的の不一致をうまく解消し、合理的な建築の構造体を実現していること」を確認しており、既存建築の事例は収斂進化の条件に則っていると説明することができる。

以上から、自然界から建築の構造体のヒントを得るために、摸すべきは自然界の形態の見かけ上の形ではなく、その構造の仕組み、つまり構造システムであることが考えられ、前述の収斂進化の条件も踏まえると、建築と自然の収斂進化を作為的に起こし、構造体の最適解を得るには、以下二つの作業を行う必要があると考える。以後この作業を「操作」と称する。

「操作1」：構造システムの抽出

自然界の形態を構成する条件・目的から、建築の構造体に適する特徴を現す条件・目的を選別し、それらの条件・目的による構造形態の在り方から、構造システムを抽出する。

「操作2」：構成要素の操作

「操作1」で得た構造システムによる構造形態に、建築の要求する条件・目的を付加し、それを満足するよう構成要素を変化させる。

自然界の形態のもつ条件・目的について、2.1で述べたように、自然界の形態は建築の構造体と一致しない条件・目的も含め、様々な条件・目的から構成されていること、また、2.2から、自然界の形態は、生き残るために様々な条件・目的に対してエネルギーを効率的に消費し、それぞれにとっての合理的な形態を形成していること、またその構造形態は建築にとって必ずしも合理的でないことを述べた。これらを踏まえた上で「操作1」を行うには、自然界の形態の条件・目的と結果としての形態との因果関係を調べ、それらを把握する必要があることが考えられる。そこで、後述の4章では、そのためのツールとして、自然界の形態の条件・目的と結果としての形態とを分類、整理した分類表を提示し「操作1」と「操作2」の具体内容を2章で取り上げた既存建築の事例について分析し、分析結果の考察から「操作1」によって得られる構造形態のパターン化を試みる。

4. 「操作」

4.1 分類表

3章で示した「操作」による形態創生を行うにあたり、自然界の形態の条件・目的と結果としての形態との因果関係を把握する必要があると考え、自然界の形態をその条件・目的により分類、整理した分類表(表3)を作成した。分類は、2章で取り上げた既存建築の事例から、モチーフの自然界の形態を9例、および自然界の形態の事例から19例全ての総計28例を対象に行った。

表の横軸は、対象となる自然界の形態の名称と写真を挟んで、「条件・目的」と「構造体」に大別している。その中でさらに「条件・目的」の項では「重力影響」「第一目的」「状態」「構造」「地理的環境」「行動」「構造体の位置」「力学的環境」「構成原理」などの項に区分し、同じ項目の条件・目的を縦に揃えて記載することで、他の自然界の形態との比較から、各自然界の形態のもつ条件・目的を明らかにすることを狙いとしている。なお、「条件・目的」の各項目は、2章の事例研究で判明した自然界の形態の条件・目的を整理し、まとめることで項目化したものである。各項目は、形態に及ぼす影響、制約が大きと思われるものから、左より順に記載する。また、「構造体」の項は、条件・目的に結果としての形態を対応させるために設けており、「形」「質」「量」および「特徴」に区分している。

分類表の縦軸は、各自然界の形態であり、横軸の「条件・目的」により分類し、同種の条件・目的をもつものをまとめた並びになっている。なお、最も大きな区分の「生きている自然」「動物たちの建築」「生命のない自然」は「自然な構造体」⁵³⁾の目次より引用している。

以上のように、自然界の形態を互いに位置づけることにより、それぞれの条件・目的を明らかにすることを狙いとした表に、構造体の「形」「質」「量」および特徴を併せて記載し、自然界の条件・目的と形態との因果関係を把握するためのツールとして表化した。

4.2 「操作」による形態創生手法の一般化

「操作1」：構造システムの抽出

自然界の形態を構成する条件・目的から、建築の構造体に適する特徴を現す条件・目的を選別し、そ

れらの条件・目的による構造形態の在り方から、構造システムを抽出する。表4がそのフォーマットである。

①モチーフの決定

まず、自然界の形態の構成を明らかにする。「形」「質」「量」を観察し、それらが形態にどのような特徴を与えているのか、また、どのような条件・目的から、その特徴をもつ必要があるのかを明らかにする。次に、3章で述べた建築と自然の収斂進化の条件は、『条件・目的の一致もしくは、特徴の一致』であることから、条件・目的もしくは特徴に、建築の構造体に適するものがあるかを検討し、モチーフを決定する。

②モチーフを構成する条件・目的の選別

モチーフの自然界の形態を構成する条件・目的を、建築に適するか否か、またはその条件・目的が現す特徴が建築に適するか否かにより、選別を行う。なお、条件・目的は建築に適さないが、現れる特徴が建築に適する場合は、建築に適する条件・目的に選別する。

③採用と除外

手順②で選別した条件・目的のうち、建築に適する条件・目的を採用、建築に適さない条件・目的を除外する。またそれに伴って、条件・目的と対応する「形」「質」「量」の採用・除外を行う。

④構造システムの抽出

手順③で採用された「形」「量」「質」から得られる構造体の在り方を構造システムとして抽出する。

「操作2」：構成要素の操作

「操作1」で得た構造システムによる構造形態に、建築の要求する条件・目的を付加し、それを満足するように構成要素を変化させる。「操作2」の手法を具体的に示すにあたり、まず先に行った事例の分析から、構造体の構成要素「形」「質」「量」をさらに細分化し、操作対象となる要素を明確にする。分析結果から考えられる操作対象は以下の表5に示す通りであり、具体例としてジョンソン・ワックス社のモチーフのハシラサボテンの構成要素をあげる。

次に、以上8つの構成要素を操作することで、得られる構造形態をパターン化する。その際、対象となる構成要素に操作をする場合、もしくは操作をしない場合を含め、得られる可能性のある全ての構造形態をパターン化した(パターン表略)。あるひとつの自然界の形態から得られる構造形態のパターン

表4 「操作」内容分析表フォーマット

事例番号			
建築			
モチーフ			
		特徴	条件・目的
類似点	形	建築	
		モチーフ	
	質	建築	
		モチーフ	
相違点	形	建築	
		モチーフ	
	質	建築	
		モチーフ	
条件・目的	採用		
	除外		
	付加		
元となる構造形態			
構造システム			

表5 構造体の構成要素

	構造体の構成要素	例) ハシラサポテンの構成要素
形	構造体全体の形	ゼリー状の果肉が包む細長い中空円管
	構造体の構成要素の形	メッシュ状の骨格
	材の形	細長い紐管束の束
質	質	引強に強い材
	材	紐管束の束
量	構造体全体の量	高さ約120~150cm、直径約20~60cm
	構造体の構成要素の量	メッシュの大きさ
	材の量	紐管束の束の大きさ

は、各構成要素を対象とする操作と未操作の組み合わせだけで256通り、また操作内容によって得られる構造形態も変わるので、実際にはさらに多くのパターンが存在する。その中には、構造形態としては存在し得るが、実現するために材の浪費など却って不合理を生み出す構造形態パターンも存在する。本手法では、「操作1」で得られた構造システムによる形態を、「操作2」でどの構成要素を操作するかを用いて検討し、不合理な構造形態も含めたあらゆる可能性の中から、合理的な建築を目指し、一つの形態パターンを得るものとする。

なお、表の中で各構成要素は、便宜上順番に記されているが、実際の使用においては、建築上の制約の大きい構成要素から優先して操作する必要がある。また、表は一方通行のものではなく、「形」「質」「量」の関係について、「この3者は独立して決定さ

れるものではなく、互いに関連している」¹⁾ことを考慮し、一度操作が行われた対象に対しても、他の要素に変化があれば再度検討を行うなど、表の中で前後を繰り返して、建築の「形」「質」「量」を決定していくことが望ましい。

ここで、「操作2」の手法について、「操作1」の手法を示した際と同様に示す。

⑤建築の条件・目的の明確化

建築の構造体で必要となる条件・目的を明らかにする。

⑥建築の条件・目的を付加

手順④で得た元となる構造形態について、手順⑤の条件・目的に合わせて変化させる。その際、どの構成要素を操作するかパターン表に沿って検討し、あらゆる可能性の中から合理的な構造体を目指し、一つの形態パターンを得る。なお、表5の中の条件・目的には構成要素を操作することで、新たに与えられた条件・目的も加えている。また、各構成要素は本事例における優先順位を推察し、表の順序を入れ替えている。

4.3 「操作」による形態創生手法の検証

前節の「操作」による形態創生手法に当てはめ、2章で取り上げた既存建築の事例をパターン化し、本手法の整合性について検証を行う。

検証は、表1に示す既存建築の事例1から12について行う。なお、事例13 Living Treeについては、プランの提案のみの事例で材やスケールについての情報がなく、情報不足からパターン化が行えないため、対象としない。

既に表4に示した「操作」内容分析結果の中で、採用・除外・付加された条件・目的の分析、「操作1」により抽出される構造システムと、この構造システムによる「元となる構造形態」の推察を各事例について行っており、検証にはこの結果を用いる。

各事例を当てはめた検証の結果を表6に示す。さらに、判明した構成要素と操作・未操作の組み合わせにより、パターン表に示す「操作」による構造形態パターンから、各事例が当てはまる形態パターンを示すことで、その事例についての実証とする。

以上、対象とした全ての事例に対しパターン化を当てはめ、説明することが可能である。このことをもって、「操作」による形態創生手法の整合性の実証とする。

表6 「操作」の対象と内容、その条件・目的（その1）

■事例1 ミュンヘンオリンピック競技場 構造形態:パターンV									
元となる構造形態	構造体の形成要素の形	質	材の形	構造体全体の量	構造体全体の形	構造体形成要素の量	材	材の量	構造体形成要素の量
操作/未操作	ネット	しなやかで丈夫な引張材	細い						
条件・目的	エネルギー最小原理	ネット状の構造体を支える	屋根を軽くし、下部構造への負担を軽減する	人の活動の場として建築物の役割を果たす	エネルギー最小原理	屋根の役割のためケーブル間にアクリルガラスをはめ込む	全体がスケールアップ	巨大な建築物を支える	巨大な建築物を支える
操作内容	広大な範囲に屋根をかける	構造体を安全に変える		延べ床面積34,550㎡に対応する屋根のスケールに決定	美しい形を追求	全体の重量が重い	高強度の材 太い材	高強度の金属ケーブルを使用	直径を太くする。ただし、全体の量との比率はクモの巣と近い

■事例2 海の博物館 構造形態:パターンB0									
元となる構造形態	構造体全体の形	質	材の形	材	構造体形成要素の形	構造体形成要素の量	材の量	構造体形成要素の量	材の量
操作/未操作	背骨と肋骨状の骨組み	引張・圧縮に強い柔軟な材							
条件・目的	展示棟として広い空間を確保	背骨と肋骨状の骨組みにより、骨材は圧縮力・引張力を受けける	人の活動の場として建築物の役割を果たす	加工しやすさ	経済性	展示物を長く守り残すために、200m超の長径を軽減	建築物の一定地上に固定	建築物を同じ地面上に固定	建築物を支える
操作内容	柱のない展示空間		延べ床面積2,173㎡に対応するスケールを与える	鋼材を使用	木材を使用	背骨にあたる構造を立体的にスラスで組む	立体的な骨組みに結合	肋骨の先端にあたる骨材に結合	骨材にあたる柱や梁をスケールアップする。ただし、全体のスケールアップの比率程大きくする必要はない

■事例3 グレル公園回廊 構造形態:パターンBN									
元となる構造形態	構造体全体の形	質	材の形	材	構造体形成要素の形	構造体形成要素の量	材の量	構造体形成要素の量	材の量
操作/未操作	上部からの荷重を受けうる構造体の安定	圧縮に強い材	石を使用	柱としての役割を果たす	デザイン性	デザイン性	石を使用	石を使用	石を使用
条件・目的	任意の平面にびたりの細小曲線を得る	より強固な柱にする	増大する荷重には材の量ではなく、質で対応	増大する荷重には材の量ではなく、質で対応	構造体の安定性	構造体の安定性	材の形と構造体全体の量が一致する	材の量が構造体全体の量と一致する	材の量が構造体全体の量と一致する
操作内容	圧縮に強い材を使用	石材を使用	柱に必要なスケールを与える。高さ約300cm、直径約60cmの樹木に近いスケール	綺麗な螺旋状の捻じれ	一定の捻じれ				構造体全体の量に従う

■事例4 ハイムブルグのプール 構造形態:パターンC0									
元となる構造形態	構造体全体の形	質	材の形	材	材の量	構造体形成要素の量	構造体形成要素の量	材の量	構造体形成要素の量
操作/未操作	重力下で安定し形状	重力下で曲げ応力がかららない	人の活動の場として建築物の役割を果たす	重力下で面内方向の圧縮力のみがかかる	圧縮に強い材	構造体全体の量のスケールアップ	構造体全体の形成要素が一致する	構造体全体の形成要素が一致する	構造体全体の形成要素が一致する
条件・目的	任意の平面にびたりの細小曲線を得る	自重による負担の少ない軽い構造体	自重による負担の少ない軽い構造体	自重による負担の少ない軽い構造体	圧縮に強い材	構造体全体の量のスケールアップ	構造体全体の形成要素が一致する	構造体全体の形成要素が一致する	構造体全体の形成要素が一致する
操作内容	圧縮に強い材を使用	石材を使用	柱に必要なスケールを与える	鉄筋コンクリートを使用	鉄筋コンクリートを使用	材の量をスケールアップする	構造体全体の量に従う		

■事例5 マンハイムのマルチホール 構造形態:パターンCP									
元となる構造形態	構造体全体の形	質	材の形	材	材の量	構造体形成要素の量	構造体形成要素の量	材の量	構造体形成要素の量
操作/未操作	均等メッシュ状の格子	うすい懸垂面	細い	柔らかい	木				
条件・目的	空間を広く使用するために、柱が占める空間を少なくする	材料節約	常時かかる荷重の柱の中での分布が一樣	建物上層の荷重を支える	高強度の材を使用	鉄筋を使用	コンクリートを使用	鉄筋を使用	コンクリートを使用
操作内容	スマートなデザインの柱	圧縮材にコンクリートを加える	細く、強い柱	高強度の材を使用	圧縮材を加える	鉄筋を使用し、圧縮材にコンクリートを加える	鉄筋の形状に従う。丸く、細長い	構造体全体の量に従う	構造体全体の量に従う

■事例6 ジョンソン・ワックス社 構造形態:パターンDY									
元となる構造形態	構造体全体の形	質	材の形	材	材の量	構造体形成要素の量	構造体形成要素の量	材の量	構造体形成要素の量
操作/未操作	背骨が強く細い	中空円管	メッシュ						
条件・目的	空間を広く使用するために、柱が占める空間を少なくする	材料節約	常時かかる荷重の柱の中での分布が一樣	建物上層の荷重を支える	高強度の材を使用	鉄筋を使用	コンクリートを使用	鉄筋を使用	コンクリートを使用
操作内容	スマートなデザインの柱	圧縮材にコンクリートを加える	細く、強い柱	高強度の材を使用	圧縮材を加える	鉄筋を使用し、圧縮材にコンクリートを加える	鉄筋の形状に従う。丸く、細長い	構造体全体の量に従う	構造体全体の量に従う

表6 「操作」の対象と内容, その条件・目的 (その2)

■事例7 TOD+教参道ビル 構造形態:パターンA

元となる構造形態	構造体の形成要素の形		構造体全体の量		質		材		材の形		構造体形成要素の量		材の量	
操作/未操作	操作		操作		操作		操作		操作		操作		操作	
条件・目的	壁面として利用	デザイン性 大きな荷重を安定して支える	建てやすさ 構造計算のしやすさ	荷重の分散	人の活動の場として建築物の役割を果たす	建築物を支える。分岐の先にあるものはスラブ等の重い上階荷重	高強度な材	鉄筋コンクリート	建築物を支える。分岐の先にあるものはスラブ等の重い上階荷重	鉄筋コンクリート	鉄筋コンクリート	建築物を支える。分岐の先にあるものはスラブ等の重い上階荷重	鉄筋コンクリート	鉄筋コンクリート
操作内容	平面にする	パターン化する	分岐の先で他の柱と接続	建築物の壁面として必要なスケールを与える	高強度な材	鉄筋コンクリート	構造体全体の形に使う	構造体全体の量に合わせたスケールを対する横の長さに対する横の比を大きくする						

■事例8 リラクゼーションパーク・イントレ 構造形態:パターンA

元となる構造形態	構造体全体の量		材の形		質		材		材の形		構造体形成要素の量		材の量	
操作/未操作	操作		操作		操作		操作		操作		操作		操作	
条件・目的	人の活動の場として建築物の役割を果たす	最初から完成形を建設する	建設効率の良さ	建築物を支える	高強度な材	応力伝達の効率化	鋼材	鋼による応力伝達	鋼材により構成されたスライダルが働き異なるのを防ぐ	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	スライダルが構造体全体の形を形作る
操作内容	建築物に必要なスケールを与える	鋼材	高強度な材	鉄骨・木材を使用	高強度な材	スライダルに五角形のアルゴリズムを加える	スライダルの中に入ら	スライダルの中に入ら	必要強度を出せる守りをする	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	構造体全体の量に使う

■事例9 モントリオール万博ドメイン館 構造形態:パターンC

元となる構造形態	構造体全体の量		構造体全体の形		材の形		質		材		材の量		構造体形成要素の量		構造体形成要素の形	
操作/未操作	操作		未操作		未操作		操作		操作		操作		操作		未操作	
条件・目的	人の活動の場として建築物の役割を果たすための	安定した形状	最小エネルギー原理	美しい形態	屋根を軽くし、下部構造への負担を軽減する	鋼構造を支える	高強度の引張材を使用	鋼構造を支える	高強度の引張材を使用	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える
操作内容	8000㎡を覆う建築物に必要なスケールを与える	鋼材	高強度な引張材を使用	ザイルネット	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材

■事例10 フィレンツェ新駅コンベエ 構造形態:パターンBM

元となる構造形態	構造体全体の量		構造体全体の形		質		材		材の形		構造体形成要素の量		材の量	
操作/未操作	操作		操作		操作		操作		操作		操作		操作	
条件・目的	多くの力を兼ね効率的に導く	人の活動の場として建築物の役割を果たす	材の効率化	エネルギー最小原理	力学的最適化に人間の感性を与える	鋼構造を支える	高強度の鋼を使用	鋼構造を支える	高強度の鋼を使用	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える
操作内容	広い空間	建築物に必要なスケールを与える	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材

■事例11 せんだいメディアテーク スラブ 構造形態:パターンB

元となる構造形態	構造体全体の量		構造体全体の形		質		材		材の形		構造体形成要素の量		材の量	
操作/未操作	操作		操作		操作		操作		操作		操作		操作	
条件・目的	軽やかな建築	建築物に必要なスラブの形状	計算しやすさ	建設しやすさ	無駄のない材料配置、エネルギー最小原理	鋼構造を支える	高強度の鋼を使用	鋼構造を支える	高強度の鋼を使用	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える
操作内容	正方形の薄いプレートにする	建築物に必要なスケールを与える。50×50mの平面	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材

■事例12 せんだいメディアテーク 柱 構造形態:パターンA

元となる構造形態	構造体全体の量		構造体全体の形		質		材		材の形		構造体形成要素の量		材の量	
操作/未操作	操作		操作		操作		操作		操作		操作		操作	
条件・目的	高強度	建築物を支える柱としての役割を果たす	材の効率化	地覆時に効果的に対応	透明性のある建築	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える	鋼構造を支える
操作内容	掘り、産層に強い曲面を与える	建築に必要なスケールを与える。高約35m、直径3~3m	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材	鋼材

5. おわりに

本論文では、既存建築の事例、自然界の形態の分析により、建築と自然の関係について、収斂進化という説明を与え、それに基づき、自然界の形態から建築の構造体を取り入れる過程を「操作」という説明で一般化した。この「操作」による形態創生手法を、自然界の形態から、合理的な建築の構造体を得るための手法として取り上げた。

本論文では、「操作」による形態創生手法について、「操作」の具体内容を既存建築の事例から分析した。分析結果の考察から、「操作」対象となる構造体の構成要素を明確にし、「操作」によって得られる全ての構造形態のパターン化を行った。また、既存建築の事例をこの手法に当てはめて検証した。その結果、対象とした事例のパターン化が可能であった。このことをもって、「操作」による形態創生手法の整合性の実証とした。

現段階では、「操作」対象の構成要素の項目以外に指標を示していない。あらゆる可能性の中から、合理的な建築を目指し、一つの形態パターンを得る本手法において、例えば「操作」の程度を示す指標など、合理的な形態への道筋を明確にするなどの対応が考えられる。

謝辞

本研究の調査は当研究室所属の杉山まどか氏による。ここに記して謝意を表する。

引用文献・引用URL

- 1) 須賀吉富：建築デザインのための構造計画，学芸出版社，第1版（1969）
- 2) フライ・オットー，他：自然な構造体，鹿島出版会，第1版（1986）
- 3) 内藤 廣：構造デザイン講義，王国社，第1版（2008）
- 4) ウィキメディア財団：ウィキペディア，<http://ja.wikipedia.org/wiki/>，2010年12月30日。
- 5) 池田博明：蜘蛛の糸とその性質，<http://homepage3.nifty.com/~hispidr/spiderwebbook/ikedah/spidertthread.html>，2011年1月12日。
- 6) Structural Design Group：海の博物館／重要有形民俗文化財収蔵庫，http://www25.big.or.jp/~k_wat/umihaku/index.htm，1997年8月19日。
- 7) 博物館∞情報工房：ミュージアムレポート，http://www.museum.or.jp/IM/report/museum_report/report.html，1997年8月。
- 8) 川崎悟司：古世界の住人，<http://ameblo.jp/oldworld/entry-10016810729.html>，2011年1月12日。
- 9) フォトライブラリー：写真素材，<http://www.photolibrary.jp/>，2011年1月12日。
- 10) 日本建築学会：アーキニアリング・デザイン展2010カタログ（2010）
- 11) 佐々木 朗：木材の自然な振じれ，<http://www.sasakivn.com/werkstatt/report/nezire.htm>，2011年1月12日。
- 12) 中野達夫：木は万能選手，<http://www.asahinet.or.jp/~hf2t-nkn/wood/property.html>，2008年8月20日。
- 13) 剣持勝衛：青葉山サイエンス・サマースクール「数学者によって発見された美しい曲面」，東北大学・東北大学院理学研究科・同関連3COE（2007）
- 14) ヨドコウ迎賓館：米国ライト建築探訪記，<http://www.yodoko.co.jp/geihinkan/himitu/tanbouki03/index.html>，2011年1月12日。
- 15) 半田雅俊：ぱんだのたわごと，<http://mhanda.exblog.jp/7506570/>，2008年2月19日。
- 16) テレビ朝日：素敵な宇宙船地球号，<http://www.tv-asahi.co.jp/earth/contents/osarai/0548/>，2008年8月31日。
- 17) 小島生安，小林 浩：サボテン&多肉植物，日本放送出版協会，初版（1992）
- 18) 伊東豊雄建築塾：けんちく世界をめぐる10の冒険，彰国社，第1版（2006）
- 19) 佐々木睦朗：FLUX STRUCTURE，TOTO出版，第1版（2005）
- 20) 高木隆司：巻き貝はなぜらせん形か，講談社，第1版（1997）
- 21) 小野学園：佐々木先生のおもしろ理科実験，<http://onogakuenblog.typepad.jp/rika/2008/02/13-bc7d.html>，2011年1月12日。
- 22) 木質材料部門委員会：<http://www.jsms.jp/word/contents/reactionwood.html>，2011年1月12日。
- 23) 川崎道夫：トンボの体，<http://www4.airnet.ne.jp/sakura/tombo/details.html>，2011年1月12日。
- 24) 渡邊政俊：Bamboo Home Page，<http://www.kyoto.zaqa.ne.jp/dkacd107/A.html>，2011年1月12日。

- 25) シェル・空間構造形態創生小委員会：コロキウム，
<http://news-sv.ajj.or.jp/kouzou/s17/htm/colloquium.htm>，2010年5月9日。
- 26) 城所竜太：先進の技術と構造システム（植物），
 建築技術，**710**，122（2009）
- 27) アーキヤマデ(株)：施工事例，<http://www.a-yamade.co.jp/works/results/post-333.html>，
 2011年1月20日。
- 28) 新建築：『新建築』2009年1月号作品，<http://www.japan-architect.co.jp/japanese/2maga/sk/magazine/sk2009/sk01/works/05.html>，2011年1月20日。
- 29) 渡辺 誠，アーキテクトオフィス：RIBBONS 2009 アルゴリズムック・デザイン INDUCTION DESIGN 誘導都市，http://www.makoto-architect.com/minamatamon/shinMON_3Ja.html，2010年12月29日。
- 30) 新建築：『新建築』2009年5月号作品，<http://www.japan-architect.co.jp/japanese/2maga/sk/magazine/sk2009/sk05/works/03.html>，2011年1月20日。
- 31) 新居千秋都市建築設計：architectual design，
 建築技術，**715**（2009）
- 32) 新建築：『新建築』2009年5月号作品，http://www.japan-architect.co.jp/japanese/2maga/sk/magazine/sk2009/sk05/w_frame.html，2011年1月20日。
- 33) 東京ガス：建築環境デザインコンペティション，
http://kenchiku.tokyo-gas.co.jp/sumika_project/report/sumika_pavilion/index.php，2011年1月20日。
- 34) パスコ：GIS用語集，<http://www.pasco.co.jp/recommend/word/word048/>，2011年1月20日。
- 35) みかんぐみ：作品，<http://www.mikan.co.jp/public.html>，2011年1月20日。
- 36) 金箱構造設計事務所：プロジェクト，<http://www.kanbako-se.co.jp/>，2011年1月20日。
- 37) 新建築：『新建築』2009年6月号作品，<http://www.japan-architect.co.jp/japanese/2maga/sk/magazine/sk2009/sk06/works/13.html>，2011年1月20日。
- 38) 与那嶺仁志：先進の技術と構造システム（自由な造形），
 建築技術，**710**，128（2009）
- 39) 中国国際放送局：ニュース，<http://japanese.cri.cn/541/2008/08/01/1s123222.htm>，2008年8月16日。
- 40) ダーシー・トムソン：生物のかたち，東京大学出版，初版（1973）
- 41) 株式会社クリエイティヴ・リンク：AFPBB NEWS，<http://www.afpbb.com/article/life-culture/life/2769826/6350739>，2010年10月26日。
- 42) ケン・リブレクト：雪の結晶—小さな神秘の世界—，河出書房新社，初版（2008）
- 43) 岡田 章：今こそ「構造レビュー」を，
 建築技術，**710**，92（2009）
- 44) ウィキメディア財団：ウィキペディア，<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8E%E6%96%82%E9%80%B2%E5%8C%96>，2010年12月29日。
- 45) 渡辺 誠，アーキテクトオフィス：新水俣門 アルゴリズムック・デザイン INDUCTION DESIGN 誘導都市，http://www.makoto-architect.com/minamatamon/shinMON_3Ja.html，2010年12月29日。
- 46) ウィキメディア財団：ウィキペディア，<http://ja.wikipedia.org/wiki/>，2010年12月30日。
- 47) フライ・オットー，他：自然な構造体，鹿島出版会，第1版（1986）
- 48) 海遊社：海遊社ホームページ，http://www.kai-you.com/sailboat-sub/swage_nicopress.htm，
 2010年12月30日。
- 49) 池田博明：クモの巣の網の不思議，<http://homepage3.nifty.com/~hispider/spiderwebbook/ikedah/spiderthread.html>，2009年1月1日。
- 50) シェル・空間構造形態創生小委員会：コロキウム構造形態の解析と創生2008，<http://news-sv.ajj.or.jp/kouzou/s17/collo2008/colloquium08.htm>，2010年5月9日。
- 51) 保育環境ギビングツリー：臥竜塾，http://www.caguya.co.jp/blog_hoiku/archives/2009/02/，
 2009年2月17日。
- 52) フライ・オットー，他：自然な構造体，鹿島出版会，第1版（1986）
- 53) ダーシー・トムソン：生物のかたち，東京大学出版，初版（1973）
- 54) ウィキメディア財団：ウィキペディア，<http://ja.wikipedia.org/wiki/>，2011年1月10日。
- 55) フォトライブラリー：写真素材，<http://www.photolibrary.jp/>，2011年1月12日。
- 56) 鴉工房：STUDIO D'ARTE CORVO（2011）
- 57) Chilton J.：Heinz Isler, Thomas Telford Ltd，
 初版（2000）
- 58) ケン・リブレクト：雪の結晶—小さな神秘の世界—，河出書房新社，初版（2008）