

## 構成論的方法論から見たイノベーションの諸相 —建築を題材として

藤井 晴行<sup>†1</sup> 中島 秀之<sup>†2</sup> 諏訪 正樹<sup>†3</sup>

構成論的方法論の概念に基づいてイノベーションの事例を考察する。構成論的方法論は人工物を構成する人間の認知プロセスを理解し、制作の方法論を構築しようとするものである。建築における鉄筋コンクリートの発明と発展という長い時間をかけたイノベーションの契機となる大小の出来事の連鎖を事例として考察し、構成論的方法論の中心的概念である縦の因果関係およびシンセシスとアナリシスの螺旋的繰返しがいノベーションにおいて果たす役割を明らかにする。イノベーションの定義よりもむしろ実践のためのヒントを重視する。

## Aspects of Innovation in Constructive Methodology —Investigating Architecture as a Material

HARUYUKI FUJII,<sup>†1</sup> HIDEYUKI NAKASHIMA<sup>†2</sup>  
and MASAKI SUWA<sup>†3</sup>

Some aspects of innovation are revealed by investigating some cases of innovation in architectural design and engineering through the constructive methodology. It is found that two major aspects are important to facilitate innovation. One is to find causal relations between the different levels of understanding concerning the subject in question. The other is to develop such causal relations through the repetition of synthesis and analysis of the subject.

<sup>†1</sup> 東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

<sup>†2</sup> 公立はこだて未来大学

Future University - Hakodate

<sup>†3</sup> 中京大学

Chukyo University

### 1. はじめに

「イノベーション」の字義は新しいものごとや方法を導入することである。イノベーションという概念の持つ意味はこれだけではなく、技術の革新や既存のものごとについての新しい解釈の帰結として社会が良い方向に変化して行くことを含んでいる。このようにとらえ、建築に関わる技術におけるイノベーションのありようを構成論的方法論<sup>1)</sup>の概念を通して眺めてみる。近代建築および現代建築にとって重要な構造である鉄筋コンクリート (reinforced concrete) 造に関わるイノベーションを題材とし、建築の構造<sup>\*1</sup>の技術を取りあげ、イノベーションの過程における構造形式<sup>\*2</sup>の考案と建築の形 (かたち) の創造との関わり合い方を考察する。構成論的方法論の主たる概念である縦の因果関係<sup>2)</sup>およびシンセシスとアナリシスの螺旋的繰返しなどのイノベーションにおける役割を示す。

イノベーションを意識的になそうとする活動やイノベーションを対象とする研究が見られるようになってきている。吉川<sup>3)</sup>はその理由として、目前の課題を個々に解決すれば全体として好ましい変化が得られるという調和が失われており、変化を行動の結果とするのではなく、好ましい変化を帰結する行動を起こさなければならない状況に現代があることをあげている。加えて、イノベーションとは何かを定義分析するのではなく、イノベーションのために私たち1人1人が何をすればよいのかに基礎を与えるイノベーション行動論が必要であると論じている。近代科学の方法論だけではイノベーション行動論を提示することは困難であると筆者らは考えている。近代科学は普遍性、論理性、客観性の3つの原理<sup>4)</sup>に従うものごとのみを「科学的に正しい」知として扱う。イノベーションの実践に求められるのは科学的に正しい知を得ることではなく、好ましい変化を帰結することである。科学的な知は好ましい帰結を引き起こす一助となる。近代科学を応用した技術が私たちの生活に幸福をもたらしてきたことは歴然としている。しかし、近代科学の応用だけでは、その帰結として生じた地球環境問題のような望ましくない状況を解決するには必ずしも十分ではない。十分ならば地球環境問題を予測し、回避できたはずである。構成論的方法論によるイノベーションへのアプローチは近代科学的方法論の3つの原理では扱い難いものごとを扱う試みであり、構成論的方法論をイノベーション行動論とすることを期待するものである。

\*1 建物を物体として成立させるための架構や壁などの力学的システムとシステムを具現化する材料。

\*2 建物自身や積載物などが建物に作用する鉛直方向の力と地震や風などによる水平方向の力を建物の支持基盤に伝える方法。

## 2. 構成論的方法論の概念

構成論的方法論の中心的概念について述べる。制作するという行為におけるシンセシスとアナリシスの螺旋的繰返しとその経験を通じた新たな縦の因果関係の創出がイノベーションにおいて重要な役割を担う。

### 2.1 認識の多層性

認識にはスケール、抽象度、視座が異なる複数のレベルがあり、全体として1つの認識システムをつくっている<sup>2)</sup>。私たちは複数の認識レベルを臨機応変に用いる。現実の世界であると実感する世界は多層の認識レベルを通しての世界である。ものごとの認識は単一のスケールや抽象度でなされるのではなく、微視的スケールから巨視的スケール、具体的レベルから抽象的レベル、ある視座から別の視座など、いくつもの層における認識が関連しあってなされる。多層の認識レベルの層と層の間にはスケールの大小や抽象度のレベルによる上下の関係を定められる。巨視的な層は微視的な層の上であり、抽象性が高い層は具体性が高い層よりも上にあるとする。より実体的・身体的であるほど下層であるとする。視座が異なる層の間には上下に相当する関係が必ずしもあるわけではない。ある層における認識を他の層における認識に還元することはできない。たとえば、生命とは何かについて生理的現象に還元して十全に説明することはできないし、建物の美しさのすべてを建物を構成する要素の形や色や配置の組合せに還元して語りつくす理論はない。建物について論じるとき、都市レベル、建物単体レベル、壁や窓などの部位レベル、壁や窓を構成する材料のレベル、材料を構成する分子のレベルなど、様々なスケールが用いられる。個々の材料に注目するだけでは建物の全体的な空間構成について考えることは困難であるし、空間構成のみに注目するだけで、その空間構造を実現する材料に関心を払わなければ、具体的な建物について考えることはできない。また、物理学の視座から力の伝わり方や熱の流れを見たり、美学の視座から造形的な構成を見たりする。

### 2.2 縦の因果関係

多層の認識レベルを1つの認識システムとして用いることができるのは、私たちが認識レベルの層をまたぐ関連づけをしているからである。このような関連づけを縦の因果関係と措定する。「縦」は層間の関係であることを示すための語である。上下を定められない層間の関係も縦の因果関係とよぶことにする。縦の因果関係は互いに還元できない層にあるものごとの関係を記述する。近代科学における法則は単一層内の因果律である。これらは現代の制作に不可欠である。しかし、近代科学的法則を適用するだけでは人工物を制作するこ

とは困難であるというのが筆者らの直観である。縦の因果関係の認識とその適用が制作する行為において重要な役割を担う。

イグルーを対象にして縦の因果関係の役割を示す。イグルーはブロック状に固めた雪の塊をドーム型に積み上げてつくられるイヌイットの簡易住居である。雪の塊は地面から離れるほど半径が小さくなる螺旋を描くようにして徐々に高く積み上げられる。雪の壁が風を遮り、熱貫流を抑え、ツンドラ地帯の厳しい環境の中で短期的な寝泊まりや煮炊きが可能な環境を形成している。住居内の湿度は高い。壁には換気用の穴が設けられており、雪の塊でこの穴を開閉することによって換気量が調節される。住居内の気温が高いと雪の壁の表面が融解する。融解が耐え難い状態であると感じるとイヌイットは反射的に雪の塊を取り除き、換気用の穴を開く<sup>5)</sup>。すると、壁の融解が抑制される。自分の許容限度を超える雪の壁の融解という現象を雪の塊を換気口から取り除くという行為とを結び付ける縦の因果関係(前者が上層、後者が下層)、雪の塊が換気口から取り除かれているという行為の結果と雪の壁の融解が抑制されるという現象とを結び付ける縦の因果関係(前者が下層、後者が上層)がイグルーに生活するイヌイットの知恵となっている。イグルーにおいて雪の壁の融解が許容限度に達すると換気用の穴が開けられるのは、ある状態を観察したら特定の行為をなすという定石的な知を持つからであり、換気口が開いている状態では雪の壁の融解が許容範囲内であるという縦の因果関係を経験的に認識しているからであろう。イグルーの壁に穴を開けているイヌイットに何をしているのかと尋ねれば、壁が溶けるのを抑えようとしていると応えるであろう。物理学的な因果関係を用いれば、雪の壁の融解が抑制されるのは換気用の穴から冷たい外気が住居内に導入され、住居内の気温が換気用の穴を閉じている状態よりも低くなるからであると説明できる。このような物理学的因果関係とは異なる認識レベルでイヌイットはイグルーについての認識を持っている。環境の創出という行為において上であげたような縦の因果関係が意識的に適用されている。

### 2.3 構成的方法論

構成的方法論とはものごとを制作する行為を生成(シンセシス)プロセスと分析(アナリシス)プロセスの共進化的な螺旋的繰返しとしてとらえ、このモデルをものごとの制作に活かそうとする方法論である。建物、工業製品、社会システム、理論、仮説、芸術作品などの人為的なものごと(人工物)が制作される。人工物を制作することは有目的(purposive)な行為であり、人工物が持つべき特徴が目的として関与する。

構成的方法論の原型は行為の成果と帰結の関係づけにある。行為とは意図的な行動であるとする。ある行為をなすとき、意図された帰結(consequence)が得られることが想定され

ている。その帰結を得るための適切と思われる働きかけ（身体動作）を環境に対してなし、環境が変化した結果（result）を帰結として認識し、先に意図していた帰結と比較する。行為の帰結が意図した帰結と同じであると評価されれば行為は成功したことになる。そうでない場合、新たな帰結を意図し、その帰結を得るための行為をなし、得られた帰結を評価する。意図した行為が成就するまでこれが繰り返される。帰結を想定して身体動作をなして結果を得るプロセスがシンセシスであり、結果から帰結を認識するプロセスがアナリシスである。シンセシスとアナリシスの繰返しはあらかじめ定められた変数の値を求める収束計算のような反復ではない。繰返しの過程でシンセシスとアナリシスに関わる新たな縦の因果関係やパラメータが定立され、継続する繰返しは新しい縦の因果関係やパラメータを意図的に適用するものになる。このような性質を強調するために螺旋的繰返しとよぶ。有意義な縦の因果関係やパラメータを定立することが創造的な構成の契機になる。

人工物を制作する行為についても同じことがいえる。人工物を制作する者は人工物そのものが完成するという結果を目的としているのでは必ずしもなく、完成した人工物をつくることによって想定した帰結（人工物が使用者の生活を便利にするとか、使用者を幸福にするとか、デザイン賞を獲得するとかなど）が実現されることを目的としている。人工物を制作するという行為はその帰結となる、あらかじめ想定されたものごとを構成しようとする行為である。このプロセスをシンセシスとよぶ。人工物と人工物が引き起こすものごととの間に見出される縦の因果関係に基づいてあるものごとが想定される。このプロセスをアナリシスとよぶ。制作するという行為はシンセシスとアナリシスを合成したものとなる。制作者はシンセシスやアナリシスに関する知や直観に基づいて目的に合う人工物をつくる。

### 3. 建築技術に見るイノベーション

鉄筋コンクリート造の発明に関わるイノベーションを黎明期、発展期、成熟期にわけて考察する。鉄筋コンクリート造が革新的である点は、圧縮力と引張力で建物を成立させる構造形式の考案が建物の造形的な自由度を増し、造形的な美しさを追求する形の構成手法が構造形式および構造解析理論の発展を促進するという交互関係が生まれ、両者が共創的に進歩してきている点である。新しいものごとの導入それ自体がイノベーションであるのではなく、導入の帰結として社会が良い方向に変化したか否かを評価することによって、それがイノベーションのきっかけであったかが判断される。また、「これがイノベーションである」と断定できる決定的な出来事があるのではなく、いくつもの出来事が関連することによって時間をかけてイノベーションがなされると考える。イノベーションに関わる重要な出

来事を「契機（きっかけの意）」とよび、諸契機の関連を見る。

#### 3.1 鉄筋コンクリートの特徴

鉄筋コンクリートの2つの特徴に注目する。1つは構造力学的な特性を人為的に定められることである。鉄筋コンクリートの構造力学的特性を解析することが可能であり、ある範囲内で特定の構造力学的特性を持つ鉄筋コンクリートを生成することが可能である。1つは比較的自由的な形をつくれるということである。コンクリートは液状の生コンクリートを型枠の中で固めることによって固体になる。型枠がつくれ、配筋<sup>\*1</sup>が可能な範囲で形を自由に定められる。

コンクリートはセメントと骨材（石と砂利）と水を混ぜ合わせ固めてつくられる人工的な建築材料である。セメントは水和反応によって固まる粉体である。固まると石のような材料になる。性質は石と似ており、圧縮力に強く、引張力に弱い。固める際には型枠が用いられ、型枠の形によってコンクリートの形が定まる。鉄筋コンクリートはコンクリートと鋼鉄の筋からなる。鉄鋼は引張力に強く、圧縮力はコンクリートと同程度である。コンクリートと鉄鋼の熱膨張率は、偶然、同じである<sup>6)</sup>。コンクリートはアルカリ性であり、コンクリートによって外気から絶縁された鉄筋は錆びにくくなる。これらの性質が鉄筋コンクリートを成立させ、圧縮力を主にコンクリートが負担し、引張力を鉄筋が負担する建築構造を可能にしている。近代および現代の建物や土木構造物に広く用いられている。

#### 3.2 黎明期：ローマン・コンクリートの発明

ローマン・コンクリートを発明し、建築に用いたことがイノベーションの第1の契機である。ローマン・コンクリートは近代的なコンクリートと同類の建築材料である。骨材には割った石が、セメントには周辺から産出された火山灰や石灰が、それぞれ、用いられた。

歴史は古代ローマ時代に遡る。教会、宮殿、邸宅などの大規模な建物は石材を積み重ねてつくられていた。組積造という構造形式である。建物の自重や建物の積載物の重さを支えるため、組積造では構成材が圧縮強度<sup>\*2</sup>を持つことが不可欠である。組積造の構成材である石材の代用品としてローマン・コンクリートが用いられるようになった。ローマン・コンクリートは石材に比べて安価である<sup>7)</sup>。圧縮強度が石材と同程度である建築材料が石材よりも安価に利用できるという特徴がローマン・コンクリートの普及に寄与したことは想像に難くない。組積造の力学的構成という抽象的な層とローマン・コンクリートや石などの具体的な

\*1 鉄筋をコンクリート内に配置すること。

\*2 圧縮に耐える強さ。

材料という層を関連づけることによって、ローマン・コンクリートが石材と同程度の圧縮強度を持ち、石材よりも安価に調達できるという、石材の代用品となりうる性質が確かめられた。ここには建物の構成という上層と材料という下層との間の縦の因果関係がある。

ローマン・コンクリートの利用を通して、セメントの産地によって強度が異なること、骨材の構成を変えることによって重量が変わること、型枠の形状によってローマン・コンクリートの形状を定められることに古代ローマ人は気づいた。石材は天然の材料であり、強度や重量を人間が決めるわけではない。また、硬い石材を思いどおりの形に加工することは容易ではない。目的に合う材料の調達という層と具体的な材料の層を関連づけることによって、特定の形状、寸法、重量、強度を持つローマン・コンクリートを調達することは同等の石材を調達するよりも容易であることに気づいた。ここには材料の調達という上層と材料という下層との間の縦の因果関係がある。この気づきがイノベーションの第2の契機となる。ローマン・コンクリートの圧縮強度、重量、形状が新しいパラメータとなり、これらの値を意識的に定めるといふプロセスを生み出し、ローマン・コンクリートに石材の安価な代用材料にはとどまらない意味が付与された。石材の代用品として見れば副次的な特徴がローマン・コンクリートにとって重要な特徴となった。

ローマン・コンクリートの強度、重量、形状の制御性が活かされている建物はローマのパンテオン（118～128年）である。パンテオンは組積造の大きなドームが特徴的である。ドームは中空の半球を伏せたような形をした屋根架構であり、ドームの構成材の重量は材の間に働く圧縮力によって支えられる。ドームの構成材およびドームを支える円筒状の壁の構成材にはローマン・コンクリートが用いられている。この構成材は上部にあるものほど、段階的に、重量が軽く、厚さが薄くなっている<sup>7)</sup>。このような構成が可能であったのは石材ではなくローマン・コンクリートを用いたからである。ドームの構成という層とローマン・コンクリートの制御性という層を関連づけることにより、特定の形状、寸法、重量、強度を持つローマン・コンクリートを調達することが石材に比べると容易であることから、ドームを形状と重量の異なる数種類のローマン・コンクリート製部材で構成することを発想した。ここにはドームの構成という層とローマン・コンクリートの制御性という層との間の縦の因果関係がある。形状・寸法と骨材の構成を変えることによって上部は軽く薄く、下部は重厚につくられ、結果として、ドーム全体にわたってほぼ均等な力が働き、屋根が構造力学的に合理性のある構成になっている<sup>7)</sup>。パンテオンの屋根架構は今日の構造力学的分析が拠り所とするニュートン力学の構築よりもはるか昔に考案されている。構造力学的に合理的な安定した屋根架構とその構成材の形状・寸法と重量の按配の関係は今日あるような構造解析理論

をふまえて考案されたものではない。ドームの建設と自然環境（重力や気候）によるドームの淘汰の繰返しの結果であると推量する。形状・寸法と骨材構成が均一の構成材でドームをつくるとドーム頂部に近づくほど構成材に働く力が大きくなり、構成材が十分な強度を持たなければドームは崩壊しやすくなる。加えて、ドームを支える壁に働く力に耐えるため、壁を厚くすることになる。このような経験からドームを構成するローマン・コンクリートの形状・寸法および骨材構成とドームの強固さの関係性に気づいたのであろう。この気づきがイノベーションの第3の契機となった。値を求めるべきパラメータが明確になり、継続するシンセシスとアナリシスの繰返しによって、上部のものほど薄く軽い構成材を用いるドームは強固であるというドームの強固さの層とドームの構成という層との間の縦の因果関係が明確にされた。縦の因果関係が明確になれば、それを他の建物にも適用することが可能となる。ドームの強固さとドームの構成との間の縦の因果関係の発見が第4の契機となり、パンテオン型の強固なドームの構成が他の建物にも適用されたのであろう。

ローマン・コンクリートの石材の代用品となりうる特徴に気づいたことが第1の契機となり、前者が多く用いられるようになった。ローマン・コンクリートを石材の代用品として用いる過程で、石材の代用品にとどまらない特徴をローマン・コンクリートが持つことに気づいたことが第2の契機となり、新しいパラメータであるその特徴を意識した建物がつくられるようになった。その過程で、ドームの構成材であるローマン・コンクリートの形状・寸法および重量とドームの強固さとの関係性に気づいたことが第3の契機となり、その関係性が縦の因果関係として明確にされた。縦の因果関係の構築が第4の契機となり、その関係がそれ以降の建築に用いられるようになった。

### 3.3 発展期：鉄筋コンクリート造の発明

鉄筋コンクリート造の発明はコンクリートを用いる構成材に圧縮力だけでなく引張力を負担させることを可能にした。これが第2のイノベーションである。建物の形は構造的制約から解放され、形の自由度が大きくなり、自由な形の建物とそれを支える構造形式が考案される契機となった。このことにより、建物の構造形式と造形的美しさの構成手法が大きく進歩した。

鉄筋コンクリート造はコンクリートと鉄を組み合わせることで建物に働く力を支える構造形式である。組積造との大きな違いは、構成材が引張力を負担できるという点である。主にコンクリートが圧縮力を負担し、鉄が引張力を負担する。圧縮力をどのようにして負担するかという問題に終始していた組積造を基本とする構造形式に引張力を負担させるという新しい考え方が付加された。組積造の建物は構成材を積木のように積んでつくられる。開口部（窓

や出入口)や空間を設ける場合は、下で支えてくれるものがない構成材を周囲の構成材で押さえつけるようにして(圧縮力を利用して)支持する。このような力の伝わり方を実現する構造形式がアーチ、ヴォールト、ドームである。これらの構造形式では下に支えがない構成材の重量が接触する構成材に圧縮力として作用する。水平な屋根を組積造で構成することは現実的ではない。圧縮力を十分に確保できず、構成材は落下し、建物は崩壊する。一方、四角い布を四隅から強く引っ張って浮かせると布の下に空間ができる。引張力によって空間が構成されている。鉄筋のないコンクリートでこれと同じことをしようとすると、コンクリートは自重を支持するだけの引張力に耐えられず、断裂する。鉄筋コンクリート造では鉄筋がこの引張力を負担する。また、コンクリートが圧縮力を負担する。極端にいうと、石を積み上げてできる形と布を引っ張ってできる形を合成したような形を実現することができる。

コンクリートと鉄を組み合わせる構造体をつくるアイデアの提案は19世紀の半ばすぎである<sup>6)</sup>。フランスのジョセフ・モニエが1866年にコンクリート製の植木鉢に鉄棒の網を入れて補強する方法で特許を取得した。ひび割れてもその形を保持する植木鉢をつくらうとしてこの方法にたどりついた。この動機が上記の植木鉢を発明する契機となった。ここにもシンセシスとアナリシスの繰返しがあつたのであろう。モニエは発明した方法を階段や水槽など、建物の部位にも適用し、いくつかの特許をとつた。しかし、適用範囲は植木鉢と同等のスケールで見られる部位のレベルにとどまった。建物の構造形式の考案には至らなかった。モニエのアイデアを鉄筋コンクリート造という建物の構造形式に発展させたのはドイツのグスタフ・A・ヴァイスとマティアス・ケーネンである。彼らはコンクリートがひび割れても鉄棒の網が植木鉢の形を保持するという現象(鉄筋がひび割れたコンクリート片を緊結して一体化すること)から鉄の引張強度に気づくことにより、鉄が引張力を負担し、コンクリートが圧縮力を負担するというメカニズムを考案した。このメカニズムを建物の構造形式に適用することによって鉄筋コンクリート造が生まれた。この過程は植木鉢と建物を、それぞれ、ベース・ドメインとターゲット・ドメインとするアナロジと見ることができる。植木鉢のスケールの層と建物のスケールの層とが力を伝えるメカニズムの層を媒介して結び付けられる。植木鉢のスケールの層と力の伝達メカニズムの層との間の縦の因果関係、力の伝達メカニズムと建物のスケールの層の間の縦の因果関係がアナロジの成立に寄与している。

ヴァイスとケーネンにとっては偶然のものごと鉄筋コンクリート造の成立に寄与している。コンクリートと鉄筋に圧縮力を鉄筋に引張力を負担させて建物を支えるメカニズムが具体化できた背景には、コンクリートと鉄の圧縮強度が同程度であり、互いに付着しやすく、アルカリ性であるコンクリートが鉄の酸化を防止するという性質がある。これらの性質はコ

ンクリートと鉄を組み合わせた後に確かめられたことであり、これらの性質を持つものとしてコンクリートと鉄が組み合わせられたのではない。植木鉢から見出した力の伝達メカニズムを試しにコンクリートと鉄を組み合わせた構造体に適用したら(シンセシス)、鉄筋コンクリート造の実現が可能であり、実現に寄与する他の性質もあることが確かめられた(アナリシス)のである。

鉄筋コンクリート造の出現以降、引張力を設計パラメータに加えた建物がつくられるようになった。様々な建物の形が提案され、それを支える構造形式が考案された鉄筋コンクリート造の初期に登場した構造形式は柱梁構造<sup>\*1</sup>である。柱梁構造は線材をジャングルジムのように組み合わせる建物の骨組みを構成する構造形式であり、現代でも代表的な構造形式である。柱梁構造とその工法はアンピックによって発明され1892年に特許がとられた。複数の柱の頂部に水平材(梁)を架け、柱と梁で囲われた空間を実現させるには、梁を両端の柱からの引張力によって支えることが必要である。鉄筋コンクリートに引張力を負担させられるということが引張力を設計パラメータとして考慮する柱梁構造を実現させた。構造形式における力の伝達メカニズムという上層から鉄筋コンクリートという下層を見ることにより、柱間の水平材に引張力を負担させる構造形式が発想されたのである。ここには上記の2層間の縦の因果関係がある。

柱梁構造の発明が契機となり、壁を主要な構造体とする壁構造に依存したり、アーチ、ヴォールト、ドームによって屋根を支えたりするということから解放された。構造に規定された形態的制約からの解放は建築の形の自由度を高めることになった。ある形を支えるジャングルジム状の骨組みをつくるのが可能であれば、そのような形を持つ建物は成立する。構造を成立させるための構造形式に規定される形と意匠的な形が両立するパラメータとして意識されるようになった。ル・コルビジエは「近代建築の5原則」として、建物にピロティ<sup>\*2</sup>、自由な平面計画(間取り)、自由なファサード、横長水平連続窓、屋上庭園を持たせることを唱えた。いずれも組積造では実現できないことである。建物の形という層から建物の構造形式という層を見ることにより、組積造では実現不可能であり、鉄筋コンクリート造では実現可能である建物の形が提唱されたのである。ここには建物の形という層と建物の構造形式という層の間の縦の因果関係がある。

\*1 柱や梁などの線材による剛節架構。

\*2 地面と地面に接していない床との間の空間。

### 3.4 成熟期：形と構造形式の共進化

新しい構造形式の出現は新しい建築意匠を考案する契機にもなった。構造に対する形の自由を得た建築家は次々と新しい形態の実現を試みる。制約が強い構造形式においては、形態の自由はファサードの装飾やプロポーション、主要構造部の装飾に限られていた。新しい構造形式では空間構成や建物の全体的な形を建築意匠のパラメータとすることが可能である。装飾の美しさを追求するという考え方に建物や空間構成の構成を規定する造形的な美しさの構成手法を追求するという考え方が加わった。造形的な美しさの構成手法を構造形式に意識的に関係づけるという考え方も生まれた。構造形式を造形的な美しさに関する操作のパラメータとして位置づけるようになった。建築家は2種類の意味で構造形式と形との関係を意識した。1つは新しく考案された構造形式をそれまでに存在しない新しい形を実現させるための手段とするという関係、1つは構造形式自体を建物の意匠的な表現とするという関係である。これらは形という層から構造形式という層を見る縦の因果関係である。形に応じた構造形式を考案することが可能になったからこそ、このような縦の因果関係を意識することが可能になったのである。モニエ、ヴァイス、ケーネン、アンピックらはこのような効果を想定してはいなかったであろう。イノベーションに関わる1つの出来事がさらなる出来事を連鎖させる契機となった例である。新たなパラメータ（構造形式）を意識し、建物の形の層と構造形式の層との間の縦の因果関係を意識しすることがイノベーションに関わる出来事の連鎖の契機となっている。

このことをやや詳細に説明する。建築家は構造形式の範囲内で形を考案することもあるし、構造形式の新たな可能性を追求するような形を考案することもある。構造力学的なメカニズムや構造形式による裏付けは不十分であっても、経験的直観に基づく確信がそのような形を生み出すことの原因力となりうる。造形的な美しさという層と構造的な合理性という層を結び付ける縦の因果関係が建築家の直観にあれば新しい形の試みは成功しうる。可能性を広げる形の実現のために構造形式が進歩すれば、さらにそれを超える可能性を追求する形を考案しようとする動機が生じる。また、既存の構造形式に対して新たな意味や解釈を与えようとする形が考案されたり、新しい構造形式を実現させてみせるために新たな形が考案されたりする。このような関係によって鉄筋コンクリート造による新しい形と新しい構造形式が次々と生まれている。ただし、日本では、既往の構造を鉄筋コンクリート造で実現することから始まった。大正時代頃、鉄筋コンクリート造と木造との類似性が注目され、木造より優れたものとして鉄筋コンクリートが評価され、鉄筋コンクリート造には柱梁構造がふさわしいと考えられていた<sup>8)</sup>。大型ドーム、キャンティレバ（片持ち梁）、フラット・スラブ

（無梁版）など、多様な形が鉄筋コンクリート造によって実現できることは認識されていたものの、注目されていたのは柱梁構造である。実験や解析が不可能に近く、構造の妥当性を手探りで検証していた当時、従来の構造形式を新しい材料によって具現化した。ローマン・コンクリートが石材の代用品として用いられたことと同等である。

形の考案（シンセシス）とその形の建物の成立を担保する構造形式および構造解析技術の螺旋的繰返しによって造形的美しさの構成手法と構造形式が共進化するように発展していくプロセスを2種類のエピソードによって説明する。鉄筋コンクリート造の経験を積み重ね、鉄筋コンクリート造に関する理解が深まるにつれて新しい構造形式が提案されるようになった。構造解析理論が整備されていなかった当時、既存の構造解析理論によって新しい構造形式の妥当性を計画時に検証することが不可能であった。設計者の経験的直観に基づく構造上の冒険が新しい構造形式を実現させる契機となった。新しい形を実現させたいという設計者の熱意がその成立を検証するための構造解析理論の発達を促進した。第1の事例は単一の建物（シドニーオペラハウス）の設計における螺旋的繰返しである。シドニー・オペラハウスの実施設計のプロセスは三上<sup>9)</sup>に基づく。第2の事例は日本における鉄筋コンクリート造建物の進歩における形の考案と構造解析技術の考案の螺旋的繰返しである。近代日本の鉄筋コンクリート造建築の流れは文献<sup>8)</sup>に基づく。造形的美しさの構成手法と構造解析技術が共進化には造形的美しさの構成手法の層と構造解析技術の層の間の縦の因果関係が関与している。

シドニー・オペラハウスの設計競技でデンマークの建築家ヨーン・ウツソンの設計案が入選した。1957年のことである。1950年代、シェル構造<sup>\*1</sup>に関する関心が高まり、大空間を薄い鉄筋コンクリートで覆うことによる造形の可能性と経済性が注目されていた。ウツソンはシェル構造による実現を確信し、帆船の帆が重なりあうような形の設計案を制作した。この設計案は「形は構造形式の正直な現れである」というウツソンの美の考え方に基づくものであった。卵の殻のような曲面に美しさを見ていた。しかし、シェル構造を成立させるための重要な条件を理解せずに形を決めてしまった。形の実現に関わる構造形式についての不十分な知が軽快で彫刻的な形の提案を可能にしたのかもしれない。ウツソン案はシェル構造の成立条件を満たさない形式の建物であった。加えて、当時のシェル構造の解析理論は数学的に表現できる明確な幾何学的定義を与えられた曲面を要求しており、ウツソン案のフリーハンドによる曲面は構造解析できなかった。構造技術者オブ・アラップはウツソンを諭した。

\*1 貝殻のような薄い曲をなす鉄筋コンクリートによる構造形式。

ウツソンと構造技術者は基部を固定した垂直のアクリル棒の上端部に水平の力を加えてできる曲線に基づく曲面を用いた修正案の作成に着手した。この曲線を吟味するとパラボラ曲線にきわめて似ていることが分かった。修正案はパラボラ曲線を用いて制作されることになり、初期の実施案が完成した。ウツソンはこの設計案に非常に満足した。パラボラ曲線を導入した曲面の考案により、建物全体が優雅で洗練されたものになった。副次的に、設計競技入選案では十分に提供できなかった音楽ホールとしての機能がこの実施案によって充実することになった。ただし、構造解析が可能になったものの、シェル構造の成立条件は依然として満たされていなかった。定義した形をどのような材料と構造形式で実現させるかを考案する課題への取り組みが始まった。技術者は曲面と地面が接する部分を要とし曲面の稜線に向けて放射状に広がる扇子のような骨組を持つ構造形式（リブ構造）を提案した。この案は卵の殻のような曲面を求める形態的な美と適合せず、退けられた。代わって、曲面を2枚のコンクリートスキンと内部の骨組みで構成するダブルシェルによって構成し、ダブルシェルが重なりあう部分に原案にはなかった構造要素を入れる構造形式が提案された。この構造形式は解析可能であったはずなのだが、模型実験による検証の結果と複雑な計算との結果が合わず、信頼を得られずに廃案となった。これらのシンセシス（考案、試作）とアナリシス（解析、実験）の螺旋的繰返しを経て、形の再修正案が提案された。複雑な曲面は単純な曲面のユニットに分割され、各ユニットに加わる曲げ力を受け持つ小さなシェルを付加された。構造が明快になり、前案よりも解析がしやすくなった。この形の実現のために2種類の構造形式が提案された。1つは鉄製のフレームをコンクリートスキンで覆うダブルシェル構造である。卵の殻のような形を実現できる。1つは、形態的な美と適合しないために退けられた経緯のあるリブ構造を洗練させたものである。ウツソンはリブ構造を選択した。ダブルシェルによる卵の殻のような形はウツソンの美意識と適合せず、むしろ、卵の殻のような形にはならないリブ構造が美意識に合うという評価によって、後者が実施案となった。形態的な美よりも美意識が選択された。このように、シドニー・オペラハウスはシンセシスとアナリシスの螺旋的繰返しによって、失敗案を生成しながらも、今日見られる姿の実現に至った。

日本においても、あらかじめの解析を十全にできなくても新しい形を提案し、その形が構造的に成立することが分かると、その成立を理解して説明するための構造解析理論が洗練され、洗練された構造解析理論や新しい構造形式の登場がその可能性の限界を追求する新しい形への志向の契機となるというアナリシスとシンセシスの螺旋的繰返しが見られる。アナリシスとシンセシスの交互浸透的（transactional）な関係によって、新しい構造形式を必要とする形と新しい構造解析理論の共進化が繰り返され、鉄筋コンクリート造の可能性が広がっ

た。当時の構造解析理論と建物の形態との関係を象徴する設計事例が藤岡<sup>8)</sup>によって紹介されている。堀口捨己（1895–1984）は柱型を見せず、水平・垂直の平面を組み合わせる意匠デザイン住宅をいくつか設計した。このような意匠にするのであれば、現代の構造解析理論に基づけば、壁構造にするのが合理的である。しかし、それらの住宅には柱梁構造が用いられている。当時の構造解析理論は壁構造を解析できなかった。解析できるようにするために柱梁構造とし、柱間を埋めて柱型を隠す壁は意匠的な壁であり、構造体とは見なされていなかった。意匠的な形と構造形式の不整合がこれらの住宅にある。その後、壁構造の解析が可能となり、壁構造が新しい形の提案を促すことになる。鉄筋コンクリート造には木造のような繊細な表現が容易ではない。特に、鉄筋コンクリート造の解析理論が発達し、耐震性が新しい評価パラメータになると、構造力学的合理性のある建物の形は重厚にならざるをえなくなった。鉄筋コンクリート造を鉄筋コンクリート造らしく見せないように建物の形を決めるという考え方や鉄筋コンクリートを鉄筋コンクリートらしく見せるように建物の形を決めるという考え方が導入された。2種類の考え方は別々のアナリシスとシンセシスの螺旋的繰返しに分岐した。前者に関しては、たとえば、ピロティによって構造体の中に浮かせ、柱梁をファサードに出さないようにして、建物全体を軽やかに見せるという形式の建物が丹下健三によっていくつか設計された。広島平和記念資料館（1955年）はその一例である。後者に関しては、コンクリートの表面を仕上げ材で覆わず、コンクリートのテクスチャを建物の外壁あるいは内壁に露出する、打放しコンクリート仕上げが形式を具象化する手法として登場した。丹下健三による東京カトリック教会マリア大聖堂（1964年）や安藤忠雄の設計による多くの建物はこの考え方によるものである。その技術的特性を生かしてそれまでに存在しない形を鉄筋コンクリート造によって実現しようとするこの段階は、構造解析理論が整備されるにつれて、素材としてのコンクリートのテクスチャに関心を払って形を決める段階へと発展し、さらに、鉄筋コンクリート造の架構や厚みに意味を持たせようとする段階に発展している<sup>8)</sup>。鉄筋コンクリート造建築のアナリシスとシンセシスの螺旋的繰返しを通して、単なる構造材であった鉄筋コンクリートが造形のための素材としての役割を持ち、さらに、何かを意味するための媒介としての役割を持つに至っている。

#### 4. イノベーションの諸相

前章では、イノベーションの一例として鉄筋コンクリート造を取り上げ、構成論的方法論の観点からイノベーションの契機や様相を黎明期、発展期、成熟期に分けて、説明した。本章では、前章をふまえ、イノベーションの諸相を考察する。

前章を要約すると次のようになる。ある目的に関わる観点から見て、既存のものと同程度もしくはそれよりも優れている特徴を持つ人工物がつくれ、既存のもの代用品としての意味を付与される。これが契機となり、代用品としての人工物が普及する。代用品としての位置づけでは注目されていない人工物の特徴に気づくと、その特徴を新たな設計パラメータに加える。特定のパラメータを対象とする解探索ではなく、新しいパラメータを加えるなどパラメータを更新していくシンセシスとアナリシスの螺旋的な繰返しにより、解にたどりつく。制御可能なパラメータと制作の目標を示すパラメータとの間の法則性を縦の因果関係としてとらえる。縦の因果関係を適用し、新たなシンセシスを行う。このような過程が帰結としてイノベーションを起こしている。この過程では、別の目的で考案されたものごとを当の目的に適用してみることで、当の目的にとっては偶然の出来事に助けられること、認識の層を超えたものごとを縦の因果関係によって関係づけることが重要な役割を演じている。

新しいものごとや方法の導入がいかんしてイノベーションの契機となりえたのかについての経緯はその行為の帰結から遡って考察することが可能であるが、契機となるものごと以前のものごとから当のものごとを必然的に導くことは難しい。このことはイノベーションを確実に起こす十分条件を示す方法論の構築は困難であることを暗示している。しかし、イノベーションには何が必要かを推論することは可能である。以下にその推論に寄与するイノベーションの諸相を整理する。

1) イノベーションの契機となるのは新しいパラメータに気づくことである。ローマン・コンクリートが石材の代用品としての地位を超える建築材料となりえたのは、ローマン・コンクリート独自の特徴に気づいたからである。鉄筋コンクリート造が発明されたのは植木鉢のコンクリートがひび割れても鉄棒の網が形を保持するという現象から鉄が負担する引張力というパラメータに気づいたからであろう。建物の形と構造形式の関係づけが造形的な美しさの構成手法の1つとなったのは、構造形式が造形的な美しさを追求するときのパラメータとなることに気づいたからである。

2) 新しいパラメータに気づくためには、とりあえず、ものごとを導入してみることが肝要である。ローマン・コンクリート独自の特徴に気づくことができたのは、石材の代用品として多く利用していたからである。新しい構造解析理論が構築されたのは、構造解析を待たずして、とりあえず、形が考案され、その形の成立を担保する構造形式を見つける必要に迫られたからである。コンクリートと鉄をとりあえず組み合わせたから両者の相性を示す特徴(圧縮強度、付着強度、酸・アルカリ度)に気づいたのである。

3) とりあえずものごとを導入するためには、縦の因果関係についての知または直観が重

要である。とりあえずといっても、任意のものごとを闇雲に導入するわけではない。縦の因果関係をふまえて、導入するものごとの方向性が絞られる。シドニー・オペラハウスの形が考案された背景にはその形はシェル構造によって成立するという縦の因果関係の直観があった。この直観は形の原因をただちに成立させる程度には十分ではなかったが、形とシェル構造の具体的手法との共進化による、原案に近い形の成立の契機となっている。

4) とりあえず導入したものごとをイノベーションに発展させるにはシンセシスとアナリシスの螺旋的な繰返しが重要である。また、偶然も重要である。シドニー・オペラハウスが実現したのは、形の生成とその構造力学的成立の検証を繰り返したからである。この繰返しは固定した構造解析技術から見た最適な形を求める反復ではなく、形と構造解析技術が共進化する螺旋的繰返しである。ローマン・コンクリートの強度が制御可能であると分かったのはセメントの産地によってローマン・コンクリートの強度が異なったからである。これは偶然のことである。コンクリートと鉄の相性が良いのも偶然である。とりあえず導入したものごとは必ずしもイノベーションに至るわけではなく、シンセシスとアナリシスの螺旋的繰返しの過程で淘汰されるものごともあると考えられる。私たちが、現在、イノベーションとして見ているものは淘汰に生き残ったものごとなのであろう。

5) 縦の因果関係によって結び付けられる2種類のものごとは共創的な関係を持ちうる。イノベーションの成熟期に見る、形の考案と形を成立させるための構造形式や構造解析技術との共進化的関係はその現れである。2種類のものごとが共進化的関係を持つとき、一方のアナリシスがもう一方のシンセシスの契機となり、一方のシンセシスがもう一方のアナリシスの契機となる。また、縦の因果関係における2つの層の上下関係は局面に応じて両者の間で入れ替わる。イノベーションの成熟期における、建築家による形の考案と建築技術者による構造形式と構造解析技術の考案はこの関係を示す事例である。既存の構造解析技術が適用できない形がシンセシスされるとそのアナリシスのために構造解析技術がシンセシスされたり、構造形式や構造解析技術の可能性を試す(アナリシスする)ために新たな形がシンセシスされたりする。

6) イノベーションにとって特効的で確実な単独の出来事があるわけではない。新しいパラメータへの気づき、直観的なシンセシス、縦の因果関係をふまえたシンセシスとアナリシス、シンセシスとアナリシスの螺旋的繰返し、縦の因果関係によって結び付けられる2種類のものごとの共進化的な関係などが相乗的に働き、その帰結としてイノベーションを起こしている。

7) イノベーションにはスケールや抽象度が異なる認識レベルが関与する。イノベーショ

ンの契機となるものごとは具体性の高いレベルのものである。具体性が高いレベルでの考案は抽象性が高いレベルの考案に波及することがある。抽象性が高いレベルの考案に波及したとき、さらに抽象性が高いレベルの考案がなされる可能性も生じている。前章の例でいえば、具体的な構成材レベルでのイノベーションの契機が構造形式レベルの考案を経て構造を成立させる原理的なメカニズムの考案（圧縮力のみで建物を支えることから圧縮力と引張力によって建物を支えることへ）に達したとき、それまでの原理的なメカニズムに規定されていた構造形式に新たな構造形式が加わり、構造形式の考案がさらに続く。さらに、それまでの構造形式に規定されていた建物の具体的な構成に新たな形が加わり、先の契機とは異なる具体的な構成材レベルでの考案に波及する。シドニー・オペラハウスのシェル構造を成立させる構成材の形状の考案はその例である。

## 5. ま と め

イノベーションの様相を構成論的方法論の概念を通して概観した。建築の鉄筋コンクリート造に関わるイノベーションを題材にし、建物の構成材と構造形式と形の考案がどのようにイノベーションと関わっているのかを整理し、縦の因果関係やシンセシスとアナリシスの螺旋的繰返しとしての構成論的方法論に関連づけて考察した。イノベーションにはそれを促進する特効的な単独の方法があるのではなく、複数の契機が相乗的に関連し合い、その帰結としてイノベーションが生じていることを事例より読み取った。

建物をつくる目的の1つは住まい方に適合する人工物を具現化することである。建物を具現化するためには構造の強固さに関する物理学的な原理に適合することも必要である。さもなければ、その建物は構造的に成立しない。美しいことも重要である。もう1つの目的は上記の要件を満足する建物の構成法を構築することである。縦の因果関係は構成法において重要な働きをする。ここでも建物の具現化を目的として含む場合もあるが、この場合、具体的な建物は構築しようとする構成法の現れであると位置づけられる。また、建築家が建物を作品（芸術作品）として位置づけ、美意識や美造形的美しさの構成手法を建物の形として表現することを目的の1つと加えることは珍しいことではない。これらの目的の絡み合いが具体的なレベルから抽象的なレベルにわたるシンセシスとアナリシスの共進化的な関係を生み出している。

技術はものごとを規定する。技術的に不可能なものごとを実際につくることはできない。技術的に可能であり、技術との適合が良いものごとがつくられる。一方、技術は既存の技術による規定を変えるものごとを生み出そうとする契機ともなる。そのようなものごとを実現

するために、すなわち、既存の技術では不可能または既存の技術との適合が良くないと信じられているものごとが実際のところは不可能でも不適合でもないことを示すために、既存の技術に対する理解が深まり、一部は拡張され、可能性が広がる新しい技術へと進化する。新しい技術は新たな規定を生み、その規定を変革しようとするものごとへの志向の契機となる。

## 参 考 文 献

- 1) Nakashima, H., Suwa, M. and Fujii, H.: Endo-System View as a Method for Constructive Science, *Proc. 5th International Conference of the Cognitive Science (ICCS2006)*, pp.63-71, ICCS (2006).
- 2) 中島秀之, 諏訪正樹, 藤井晴行: 縦の因果関係, 日本認知科学会第24回全国大会予稿集, Vol.24, pp.42-47 (2007).
- 3) 吉川弘之: イノベーションの行動理論, 産総研 TODAY, Vol.2007-01, pp.8-15 (2007).
- 4) 中村雄二郎: 臨床の知とは何か, 岩波書店 (1992).
- 5) Alexander, C.: *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press (1964).
- 6) 宮内 康, 布野修司 (編): 現代建築—ポスト・モダニズムを超えて, 新曜社 (1993).
- 7) Ward-Perkins, J.B.: *Roman Architecture*, Electa (1979). 桐敷真次郎 (訳): ローマ建築, 本の友社 (1996).
- 8) 藤岡洋保: 日本の建築家が鉄筋コンクリート造に見た可能性—形と技術のインタラクション, 材料・生産の近代, 鈴木博之 (編), pp.17-68, 東京大学出版会 (2005).
- 9) 三上祐三: シドニーオペラハウスの光と影—天才建築家ウツソンの軌跡, 彰国社 (2001).

(平成 19 年 6 月 30 日受付)

(平成 20 年 1 月 8 日採録)



藤井 晴行

東京生まれ。早稲田大学理工学部卒業。同大学院理工学研究科建築学専攻博士前期課程修了。カーネギーメロン大学大学院人文科学研究科哲学専攻修士課程修了。博士(工学)。清水建設株式会社技術研究所基礎研究室を経て、現在、東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻准教授。デザイン科学の方法論、デザインに関わる知、象徴的空間の構造と音楽の構成との関係、建築のあり方に関心を持つ。これらのものごとに関心を持ってアプローチしている。



中島 秀之 (正会員)

1952年兵庫県生まれ。1977年東京大学工学部計数工学科卒業。1983年同大学院工学系研究科情報工学専門課程修了。博士(工学)。同年電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター長。2004年公立はこだて未来大学学長。編著書に『知的エージェントのための集合と論理』(共立出版),『思考』(岩波講座認知科学8),『Prolog』(産業図書)等。



諏訪 正樹

1962年大阪生まれ。1984年東京大学工学部卒業。1989年同大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士)。同年(株)日立製作所基礎研究所入社。1994~1996年スタンフォード大学 CSLI 研究所にて客員研究員。1997年オーストラリアシドニー大学建築デザイン学科主任研究員。2000年より中京大学情報科学部助教授。2004年より同教授。2006年より同大学情報理工学部教授。高次認知,特に,身体知の学習,感性の開拓,創造プロセスの認知分析の研究に従事。