

# 構造デザインを学ぶ学生に対して普遍的な工学原理を教える方法に関する考察

## A consideration of the teaching of general engineering principles to structural design students

岩崎 敏之

デザイン学部 デザイン学科

Toshiyuki IWASAKI

Department of Design, Faculty of Design

本稿では、建築構造学の体系の全体像を捉え直して、建築構造学をどのような形で教育していくべきかという点について考え、その教育方法を見出ししていくための視点を提示した。建築を実体あるものとするための「構造デザインを考える上で必要なことから」に向き合うためには、力学的なことから実際の構造物の両者をつなぐための知見が必要であることを確認した。

それを踏まえて、新たに建築構造学の全体像を示す図を作成した。その図において、「荷重と力学」「材料と構法」「建築として成立させるための要件」この3つを異なる平面に配置して表現し、それらを合わせて考えることにするための「つなぎ」が構造であることを示した。さらに、建築構造学の教育において、提示した全体像を意識して教えていくための項目案を示した。

In this paper, I re-examine the overall academic system of teaching construction science, and consider methods for teaching the subject. I further present a point of view for a new teaching method. I then affirm, when considering the “essence of structural design,” the necessity of knowledge that combines mechanics and construction.

Based on the above, I have created a diagram that shows a new image of construction science. In this figure, I show that three categories, “load and mechanics”, “materials and construction” and “requirements for establishment as architecture” are set on different planes. This report suggests that the structure is connected by these three categories. Finally, I present keywords for teaching this new academic system of construction science.

### 1. はじめに

建築構造学を学問体系として成り立たせるためには、建築を実体あるものとするための「構造デザインを考える上で必要なことから」が体系化されている必要がある。「構造デザインを考える上で必要なことから」は、構造デザインに関わる実務において必要とされていることから導き出せる。それらを一般化することは難しいが、ある構造家の次のような言葉がその大枠を言い表していると筆者は推察する。『構造には二つの側面があると思っています。それは一つは構造力学ですね、力の流れがどうこう、そしてそれに対する安全性がどうこうと。しかし、同じ構造でも、実はもう一つ、工法（システム）を考えることも構造なんです。』<sup>[1]</sup> 筆者もかねてより建築構造の教育に関わってきた中で、この言葉と同様に、「構造」という概念の中には二つのことがらが含まれているとの捉え方をすべきであると考えている。

建築系の教育機関では、教育課程の中に建築構造学に関する科目が複数設けられている。その中には、構造力学を始めとして建築一般構造に関する科目や構造計画や耐震工学に関わる科目がある。それらの教育機関では建築士の受験資格を得られることになっていることが多く、資格取得の観点からも構造力学と建築一般構造の科目を教育課程の中に設けることが必要条件となっている。そもそも建築構造学は、建築士の受験資格の有無に関わらず建築学の体系の中で不可欠な学問である。しかしながら、「構造デザインを考える上で必要なことからは何か？」ということの捉え方があいまいなまま、同時に学んでいくことがふさわしいことがらが科目ごとに分断されて教えられているのが現状である。そのため、多くの建築系の教育機関において、

学ぶべき内容を適切かつ効果的に学生に対して教育できていないのではないかとという問題意識を筆者は持っている。そして、この状況が改まらない原因は、教える立場にある者が自ら教えられたストーリーの呪縛から逃れることができず、そのストーリーに従って教える努力をしてしまうというサイクルが久しく続いているためではないかと推察している。

本稿では、建築構造学の体系の全体像を捉え直して、建築構造学をどのような形で教育していくべきかという点について考え、その教育方法を見出ししていくための視点を提示する。

### 2. 建築構造学の捉え方に関わる言説

本節では、建築学会で提供されている情報や構造研究者や構造設計者の著述から、「構造デザインを考える上で必要なことから」として何が求められているのかを再点検して、構造デザインの教育方法について、目指すべき方向性や現状における問題点を確認する。

#### 2.1 建築の構造設計 そのあるべき姿<sup>[2]</sup>

この出版物では、構造設計者の職能の本質に向き合い、構造設計者のあるべき姿の実現に向けての提言がなされている。その中に『構造設計にかかわる研究と教育』という項目があり、構造設計者を育てるための教育方法についての提言も盛り込まれている。学校教育に対して求めていることがらがその骨子の中で次のように示されている。『建築構造にとって必要な原理・普遍的な工学教育を重視すべきである。』<sup>[2-1]</sup> その解説内容には、『構造設計者が基・規準書の内容を背景を含めて適確に理解し、またコンピュー

タによる計算結果の妥当性を判断するなど、構造物の挙動を理解するため、さらには新たな構造を創出するためには、工学原理に精通することが極めて重要である。』<sup>[2-1]</sup>と書かれている。また、基礎的な専門知識の習得の必要性が述べられた箇所では、『実務教育としては、建物のつくられ方を認識しながら学習や研究を行えるようにするために必要な情報を与えればよく、資格取得、就職を重視しすぎた内容であってはならない。』<sup>[2-2]</sup>と戒めている。さらに体験的な実務教育やコンピュータを利用する教育の必要性についても触れられている。<sup>[2-3]</sup>

## 2.2 建築形態と力学的感性<sup>[3]</sup>

この出版物の企画の意図が冒頭のまえがきに次のように書かれている。『多種多様な形状を有する建築物が建てられるようになってきた。一方で大学などの教育機関で行われている教育は骨組みの力学が中心であり、一般の設計者には、骨組構造以外の建築物には馴染みがあまりない。』『構造設計を目指す大学院生や若手の構造設計者には勿論のこと、デザイナーにとっても有益な書籍を目指して本書の企画がなされた。』日本建築学会内のシェル・空間構造運営委員会のワーキンググループの活動が出発点となっているということもあるが、教育機関で骨組の力学を主に教えていることへの問題意識が表出されている。この出版物は、委員会として執筆者を分担して編集されている出版物であるため、節ごとの記述内容についてはそれぞれの執筆者に任された感があり、統一した体系が示されたものというよりも「力学的感性」というキーワードに対して各執筆者が向き合っただけの研究内容や実施設計の事例報告を集めたものとなっている。その中の第4章において、さまざまな構造設計者の構造設計に取り組む姿勢を知ることができる。

構造設計の実例紹介の中で、榎田洋子が次のように記述している。『美しく完成した建築の舞台裏、中でも構造の形態を創造するプロセスは、力学の基礎知識をベースに、材料、施工、建築全般の知識を収集して編集する地道な作業の積み重ねである。直感には裏づけがあるし、感性は特別な才能ではない。』<sup>[3-1]</sup>『問題解決の突破口が見つかるときは、構造技術者と建築家が、あきらめずに同じ集中力で考え続けている時である。両者にデザインと構造に対する基礎的な理解力と知識が必要であることはいままでのない。』<sup>[3-1]</sup>と書かれ、「考え抜く努力」の重要性を訴えている。構造デザインを行っていく上で、『力学の基礎知識をベースに、材料、施工、建築全般の知識を収集して編集する地道な作業』をするための能力が必要であるとする構造設計者の認識が伝わってくる。

## 2.3 空間 構造 物語 ストラクチャル・デザインのゆくえ<sup>[4]</sup>

大学に在籍しながら空間構造を中心に数多くの構造設計の業務に携わった斎藤公男が、『大学・大学院において講義してきた「構造の計画と技術」「空間構造」「構造デザイン」などを基本として』<sup>[4-1]</sup>書かれた著作物である。『これらの講義では、1・2年生を対象とした「構造力学」、3・4年生を対象とした「構造設計」という通常の授業では含まれない「力学と構造・原理と応用」「空間と構造の相関

性」や「アーキテクトとエンジニアの協働の重要性」といった話題を中心としている。』<sup>[4-1]</sup>とあり、この本の内容からも興味を喚起される授業が行われていたであろうことが想像できる。また、このような興味深い授業内容が『通常の授業では含まれない』という一文から、通常の授業が十分なものではないと斎藤が認識していたと推察できる。さらに『「構造力学」はとかく学生諸君には人気がない。私も大学でいろいろ努力はしているが、「教えること」は難しい。「構造ごらいの学生」が長じてエンジニアや構造に対する妙な偏見をもつようになるのは、何も今日にはじまったわけではない。』<sup>[4-1]</sup>と書かれており、十分な経験と知識を持った斎藤においても構造力学を教えることの難しさに直面してきたであろうことをうかがい知ることができる。その悩みは次の一文からも感じ取ることができる。『力学をまず体感として理解させたいとの思いで行っている1年次生のペーパー・ストラクチャーは、それなりの効果が見られる。しかしその先が、なかなかうまくいかない。いつの間にか構造嫌いの学生が増え、そのうちの何人かは、4年生の卒業研究や修士論文でまた息を吹き返す。その繰り返しなのである。』<sup>[4-2]</sup>

この本の全体のテーマを斎藤は次のように説明している。『本書における大きなテーマは、「構造デザインとは何か」である。広い諸相の底に流れるものは「人間と自然」。構造デザインはその二つを結ぶものとして位置づけられよう。』<sup>[4-1]</sup>この一文は、構造設計（構造デザイン）の本質について言及されており、この中で『二つを結ぶ』とされていることに着目したい。

## 2.4 力学・素材・構造デザイン<sup>[5]</sup>

この出版物は、複数の構造設計者が執筆分担をする形で書かれたものであるが、意図することが、まえがきにおいて次のように説明されている。『いきなり立体モデルによる数値解析を始める構造設計⇔構造計算がはびこる今、いざとなれば基本原理に立ち返り、創造的な構造計画を行い得る力が今後ますます重要となります。』<sup>[5-1]</sup>『そのような構造設計者および建築家の知っておくべき建築構造形態に関する幾つかの“かんどころ”について、力学的な視点からの分析を行い、簡単な例題とそれを応用した歴史的建物から現代の建築例を紹介しながらレビューしようとするものです。』<sup>[5-1]</sup>『基本原理』の重要性と、その重要なことが単なる構造計算の方法ではなく『建築構造形態に関する幾つかの“かんどころ”』であると認識していることがうかがわれる。

坪井善昭は、構造設計者のトロハ (Eduardo Torroja) および坪井善勝の設計姿勢について、2人の著述からの引用を示している。トロハの『Philosophy of Structure』(構造の哲学, 1951年)の訳本の紀行文「日本語版よせて」を読んで『「計算より重要なのは着想である。着想とは材料を抵抗力のある一つの形にかたどり、機能を満たすことにある」とする、トロハの姿勢に「工学」の域を超えた「哲学」を』<sup>[5-2]</sup>思っただけで感銘を受けたとの記述がある。また坪井善勝の『連続体力学序説』について次のように記している。『「応用数学、応用弾性学が現実の中で生きるという具体的な感覚が必要である」と説いた。同書は、「実際問題へ寄与する」という強い信念のものと著された書で

あった。』<sup>[5-3]</sup> この一文においても、力学を実際の問題につなげるための『具体的な感覚』の必要性が強調されている。

## 2.5 建築構造学の全体像を捉えるために欠かせない視点

本節で参考にした文献の記述から、建築構造学の全体像を捉えるために欠かせない次のような視点を見出すことができる。それは、普遍性のある力学的な原理の知識と、材料や施工など工学的に考慮すべきものに関わる知識の両者を結ぶ形で建築構造学は捉えられなければならないという視点である。この視点を持つことの重要性については、著名な構造家たちが60年以上も前からすでに断言している。たとえば、トロハの『着想とは材料を抵抗力のある一つの形にかたどり、機能を満たすことにある』<sup>[5-2]</sup> や坪井善勝の『現実の中で生きるという具体的な感覚が必要』<sup>[5-3]</sup> という言葉に凝縮されている。

## 3. 構造力学の体系と教育方法についての模索

建築構造学の中から分断される形で構造力学の体系が捉えられてきており、それゆえに建築構造学の全体像を適切に教育されてきていないと筆者は考えている。そのことを確認するため、本節では、一般に用いられている構造力学の教科書の目次や構造力学の授業の教育効果についてのアンケート調査の既報の内容から、構造力学の教育において伝えられていることがらを確認する。

### 3.1 構造力学の体系

構造力学を解説した本は多数あり、それぞれの教育機関でそのいずれかがテキストとして用いられている。解説の文章や補足のための図などの表現の差、建築士の資格試験対策を重視するかしないかという差などはあるものの、骨子となる流れは、構造力学の体系をなぞる形でほぼ同じである。その一例として、ほぼすべての内容を網羅していると思われる『建築構造力学 図説・演習Ⅰ』<sup>[6]</sup> ならびに『建築構造力学 図説・演習Ⅱ』<sup>[7]</sup> の目次の項目を列挙する。

#### 建築構造力学 図説・演習Ⅰ

1. 建築構造力学の役割
2. 静力学の基礎
3. 材料の力学的性質
4. 構造解析と近似
5. 静定梁
6. 断面に作用する応力
7. 部材の弾性変形
8. 簡単な不静定梁の解法
9. 静定ラーメン
10. 静定トラス
11. 梁の塑性曲げ
12. 柱の座屈

#### 建築構造力学 図説・演習Ⅱ

1. 骨組理論の特徴
2. たわみ角法
3. モーメント分配法（固定モーメント法）
4. 建築骨組の近似解析
5. 変位法（剛性法）

6. 仮想仕事の原理
7. エネルギー法
8. 応力法（柔性法）
9. 極限解析と弾塑性解析
10. 構造設計の応用

これらの出版物においては、言葉の定義や計算式の誘導方法など基本の説明が多くなされている。構造力学の類書は、計算式の使い方、計算方法、演習問題に多くのページを割いて計算テクニックを身につけることを目指したものなども数多くある。建築における構造力学の教科書的な本の共通点として、梁の曲げ理論、骨組構造、不静定骨組を対象としたたわみ角法や固定モーメント法の解法を示している。この一連の流れは骨組構造の建築物を対象とした構造力学の体系を伝えることを主眼として編集されているものと思われる。

これらの出版物はⅠが基本編、Ⅱが応用編となっており、例えば1年次にⅠ、2年次にⅡが教科書として用いられることもあろうかと推測できる。

複数の執筆者により分担して書かれているこの出版物の中で、応用編の位置付けのⅡの最後の10.において、構造設計に応用できることがらの説明が記述されている。その内容には基本編のⅠを飛ばして読んでも理解できるものも含まれており、実際の設計時にも生かせる知見が複数紹介されている。その章の中で、担当執筆者の須賀好富は次のように述べている。『構造計算以前に、まず骨組の形状と寸法を選定する作業の過程がある。この過程では構造力学の知識や過去の設計資料などに基づいて、多くの試行錯誤を繰り返して、目的に最適の構造形式と寸法が選定される。これを構造計画という。特に構造設計者の創意工夫が生かされるのはこの部分である。』<sup>[7-1]</sup> 構造計算の手法の基本が分からないと理解できない部分もあるものの、計算手法の習得以上に、この章で紹介されているような力学の原理と実際の建築物をつなげる知見を理解しておくことの重要性を意識させられる。学ぶ順序においては、基本的な計算手法を学ぶ段階で、この章に示されているような形状と寸法を選定するために考えなければならないことを早い段階で同時に学んでいく方が、計算手法の習得にも全体像をつかむためにも有用であると思える。なお、須賀には、主にこの部分を取り出した形の著作物がある。力学と実際の建築物をつなぐ知見を得られるという点において、構造設計の勘所が的確に解説されている良書である。<sup>[8]</sup>

### 3.2 構造力学の教育方法についての模索

本節では、構造力学の教育方法についてのアンケート調査報告や取り組みの実践例紹介、さらには米国での教育課程についての報告などの確認を通じて、建築学という枠組みの中での建築構造学の位置付けについて考察する。

#### 3.2.1 構造力学の項目

久木章江は、建築士の受験資格の認定を受けるために認定校において構造力学4単位以上の履修が義務付けられたことに伴い、「構造力学授業の理解状況等についての調査結果について」<sup>[9]</sup> 報告している。ここでは、構造力学Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの内、Ⅰについての調査がなされている。学習内容

の項目として掲げられている概要は、梁などの反力 曲げ応力（度）M図、N図、Q図、（単純な梁 複雑な形状）である。構造力学の授業の理解度についての同様の調査は、他の大学等でもe-learningの効果の検証なども含めて複数行われているが、いずれの調査項目もこの報告と同様に力学の体系をなぞっている。

報告結果からは、構造力学の初歩的な内容を対象とした科目であるものの、ここで文系学生と呼ばれている学生の理解度を上げることへの日頃の苦勞がうかがえる。久木は『学習到達度を高めていくことや、個人差に台頭するためにはe-Learning型の教材作成が必要だと考える。』<sup>[9]</sup>と結んでいる。

### 3.2.2 構造力学 実践的な演習

単に計算方法を教授するのではなく、体験や実験を通じて教える方法を実践している大学等も複数あるものと思われる。その中の一つとして、精力的な取り組みが石川孝重、平田京子により報告されている。<sup>[10]</sup>そこには、初年次の構造力学の授業における実践例が示されている。掲げられている工夫のポイントは、次の3点である。

- 「①毎回、何か手を動かして学ぶ」
- 「②力学の原理を可視化する」
- 「③考察力を育てる」

準備作業等にかかる労力は大きいものの、理解度を向上させる効果を実感されていることが伝わってくる。この報告の中にも他大学においても様々な実践的な取り組みがあることにも触れられている。

### 3.2.3 米国大学における構造教育

米国大学における構造教育の概要が西谷章により報告されている。<sup>[11]</sup>この報告によると、米国では土木も建築も関係なく、『建築のための構造教育も、civil engineering系の学科で行われる。』<sup>[11]</sup>と書かれている。すなわち米国では、構造力学の体系は建築学の体系の中にあるものではないものと理解できる。日本において建築学の体系の中に建築構造学が含まれている形は、米国とは異なるものである。西谷は米国と日本とどちらの枠組みの方が良いかというとは一概に言えないと記しているのみで、建築構造学ならびに構造力学の位置付けをどうすれば良いかということへの答えは示してはいない。

### 3.2.4 建築学の中の建築構造学

建築学の中に建築構造学が含まれている日本のような体系においては、米国のように建築学とは別な工学の体系に位置付けられている構造力学をも含むことになっている。建築デザインを学ぶ指向を持つ学生が構造力学を学ぶことへの動機付けが希薄であったり、構造力学を学ぶことへの苦手意識があったりすることから、さまざまな建築系の教育機関において構造力学を教えることに対する苦勞があり、いろいろな工夫がなされていることがうかがわれる。そのような中でも、実験を通じて手を動かしながら力学的な原理を可視化して考察するという一連の流れを組み込んだ授業なども展開され相応の効果を上げていることも確認できる。しかしながらこのような意欲的に工夫をして取り組まれている授業でさえ、建築構造学の全体像を捉えることよ

りも構造力学そのものの理解と計算方法の習得に重点がおかれているように思える。

構造力学の体系は工学の体系として明確であり、学習時の習熟度の評価も計算問題を解くことができるかどうかという客観的な観点で行いやすい。そのため、本来は建築構造学全体をどのように教えなければならないかという視点を持たなければならないはずであるが、往々にして、その一部の構造力学をどう教えるかという問題に着目しすぎている傾向が見受けらる。

## 4 建築士の受験資格に関わる科目構成

国家資格である建築士については、国土交通省および公益財団法人建築技術教育普及センターのサイトにおいて、その内容等が公開されている。日本国内で一級建築士の有資格者となるためには、「計画」「環境・設備」「法規」「構造」「施工」の5科目の筆記試験において必要とされる点数を取る必要があり、それらの科目の設問内容が、この資格を持つ人材に求められる事柄であると言える。受験資格を得る教育機関には、構造力学、建築一般構造、建築材料の科目を教育課程に設けなければならないこととなっている。試験科目の「構造」中にこれら3つの科目内容が盛り込まれている。設問は30問、そのうち力学の計算問題が5問、残りの25問が一般構造と材料に関する設問である。

構造力学に関する設問は、試験問題として成立させるために、①時間内に手計算で解くことができる、②事前学習の成果が問えるという条件を満たした簡単すぎず難しすぎない問題となっているものと推察できる。また、当然のことながら正解のある計算問題が提示されている。一般構造に関する問題も、理解しておくべき事柄について問われるが、事前学習により正解を選ぶことができる問題が設けられている。

建築系の教育機関が建築士の資格試験の構成に沿った形で教育過程を構築した場合、異なる科目間でのつながりを確認して運営していくことを怠った場合、分断して提供されて得た知見が、実際の構造デザインに行う際に効果的に活かせない可能性をはらんでいる。構造力学において単なる計算手法の習得を目指すだけであれば、その習得した計算手法は、実際の構造デザインに役立つものとならない。

そうならないために、模型を使った実験を行うなどして、力学的な原理と構造物をつなぐ知見を得ることができるよう工夫された授業も展開されている。しかしその場合ですら、構造計算手法を理解することへ目標が向けられる傾向にあるように思われる。構造デザインを実際に行うときには、計算して答えが見出せることはなく、存在する正解を得るためではなく、ある形を見出して実現に向けての決断をしていくことが求められる。ゆえに唯一の成果を持つ力学の計算手法を身につけることを目的の主眼とすると、本来学ぶべきことがらから逸れることにつながる可能性がある。建築系の教育機関においては、建築士の資格取得を意識しすぎて本質を見失っていないかどうかという点に関して、教育課程の内容および科目運営の実情について常に懐疑的な視点を持って点検し続ける必要がある。

## 5 建築構造学の全体像を見据えた教育

ここまでの節で、「構造デザインを考える上で必要なこ

とがら」を体系化した建築構造学の全体像を捉えるためには、普遍性のある力学的な原理の知識と材料や施工など工学的に考慮すべきものに関わる知識の両者を結ぶ視点を持つことが重要であるにも関わらず、構造力学だけが分断されていることを観てきた。本節では、重要な視点を見失うことのない建築構造学の全体像を示し、分断させない構造力学の中身として何を教えれば良いのかという項目案を提示する。さらに全体像を捉えるためのどのような姿勢で望めば良いのかという点について、既存の考え方を紹介する。

## 5.1 建築構造学の全体像

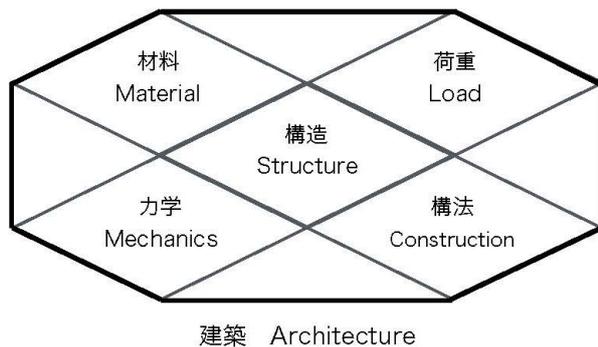


図1 構造を取り巻く4つの要素

建築構造学の全体像を示すものとして図1の形を提示する。図1には、「荷重」、「材料」、「力学」、「構法」という4つのキーワードを「構造」を囲む形で配置している。この図では、「荷重と力学」、「材料と構法」という2つの組み合わせを意識し、荷重に対してどのように対応するかを力学的に考えること、材料を組み合わせる構法を考えること、この両者について考えることが構造について考えることだと捉えて表現している。現状の多くの建築系の教育機関では、この2つの軸を別々に認識する形で、構造力学という科目において、荷重に対して応力や変形量を求める方法が教えられており、一般構造の科目において、さまざまな材料において構法上の知識も深めることを中心にして関連する力学的な仕組みについても教えられている。

一般に実際の構造物と計算的なモデルが一致するわけではないため、力学的なモデルを考えることと、実際の構法的なことを考えることを、別々に教えることは全く不合理であるとはいえない。この図においても、2つの軸は、同一平面上にはない形で表現すべきである。しかし、それら2つは全く別のものではなく、数多くの構造家が経験的につかんでいることの言説から推察すると、構造デザインについて考える際には、その一致しない点についての考察を深めることこそが重要であるということが分かる。そのことを再確認するため、これまでに観てきたことに加え、新たに2人の構造家の著述を次に掲げておく。

佐々木睦朗は、その著書の中で、『構造設計とは、(自分のこだわりの中から) 発想した構造コンセプトを自然法則や経済条件の中で具体的な構造として実現していくことである。』<sup>[12]</sup> と述べており、そこからは『具体的な構造』という語への意識が強いことが読み取れる。佐藤淳は、構造計算のプログラムを掲載して関わったプロジェクトを紹介

している著書のはじめに、『もうひとつ載せたいと思ったのが素材リストです。私の事務所で書き溜めたものですが、こういうリストは、ありそうでなかなか見つかりません。』<sup>[13]</sup> と記載しており、構造設計をする際に、素材を考えることの重要性を意識していることがうかがわれる。これらの文面からも、具体的に用いる材料、材料を用いて具体的な構造にするための構法に思いを致さなければ構造物を設計できないということが追認できる。

構造デザインを考えて具体化する構造物を建築物として成り立たせるためには、さらに美的な側面、文化的な側面や機能や用途に見合うかどうかという観点についても合わせて考えなければ設計はできない。そこに構造設計者と意匠設計者の協働が必要であるとの指摘は以前からなされている。山本学治はさらに踏み込んで、単に互いの理解が必要だということではなはいとして、次のように指摘している。『もし、ある材料を適切に用いて、ある目的のために適切に機能づけられた建物を形作ることを建築の設計、すなわちデザインと呼ぶならば、デザインと構造などという言葉の使い方自体がへんである。現代建築の不幸は、デザインが構造と分離していることにあるのではなく、構造計画を含められない設計行為をデザインとしているところに始まっている。』<sup>[14-1]</sup> それを解消するための一つの条件として、『構造技術者は構造工学という、建築の設計とは別個に存在し得る一つの工学体系と建物を構築する方法である構造計画を分けて考えなければならない。』<sup>[14-2]</sup> と山本は述べている。この山本の『構造計画』を含む『建築の設計』に思いをいたそうとすれば、図1には、さらに建築そのものを踏まえたもう一つの平面、すなわち「建築として成立させるための要件」を加えなければならない。

「荷重と力学」「材料と構法」「建築として成立させるための要件」この3つが異なる平面に位置するものであり、これらについて合わせて考えるための「つなぎ」が構造であると捉えて表現するにあたり、本論では坂本賢三の提言に習うことにする。坂本は、『「分ける」こと「わかる」こと』<sup>[15]</sup> の中で、対象を分類して捉えることについての考察を試みている。その中で坂本は、『対象を体・用・相の三つの面からとらえる仕方は、古くから仏教の中にあっただが、これらの語を用いて表現したのは、『大乘起信論』が最初であったように思われる。』<sup>[15-1]</sup> として、「体」「相」「用」の3つに分ける分類方法の有用性と妥当性について考察している。この3つについて坂本は、『「体」はまさに「そのもの」であり、「相」は漢和辞典を見ればわかるように、「木へん」ではなく「目」の部に出てくる「見える姿」であり、「用」は垣根の形に材木を組んだ象形で、「はたらき」(作用・効用)である。』<sup>[15-2]</sup> と説明している。『人を見るときにも、道具や技術を見るときにも、社会や芸術や学問をあつかうときにも、いつでも体と相と用の三つの面から見ていたのではないだろうか。この三つは同じものでありながら、局面が違う。上下関係や同一平面には並べられない関係である。』<sup>[15-3]</sup> と坂本は述べているが、この3つの平面の関係性に注目すると、建築構造学の全体像を捉える表現として図2のような立体的な関係を意識した図を示すことができる。

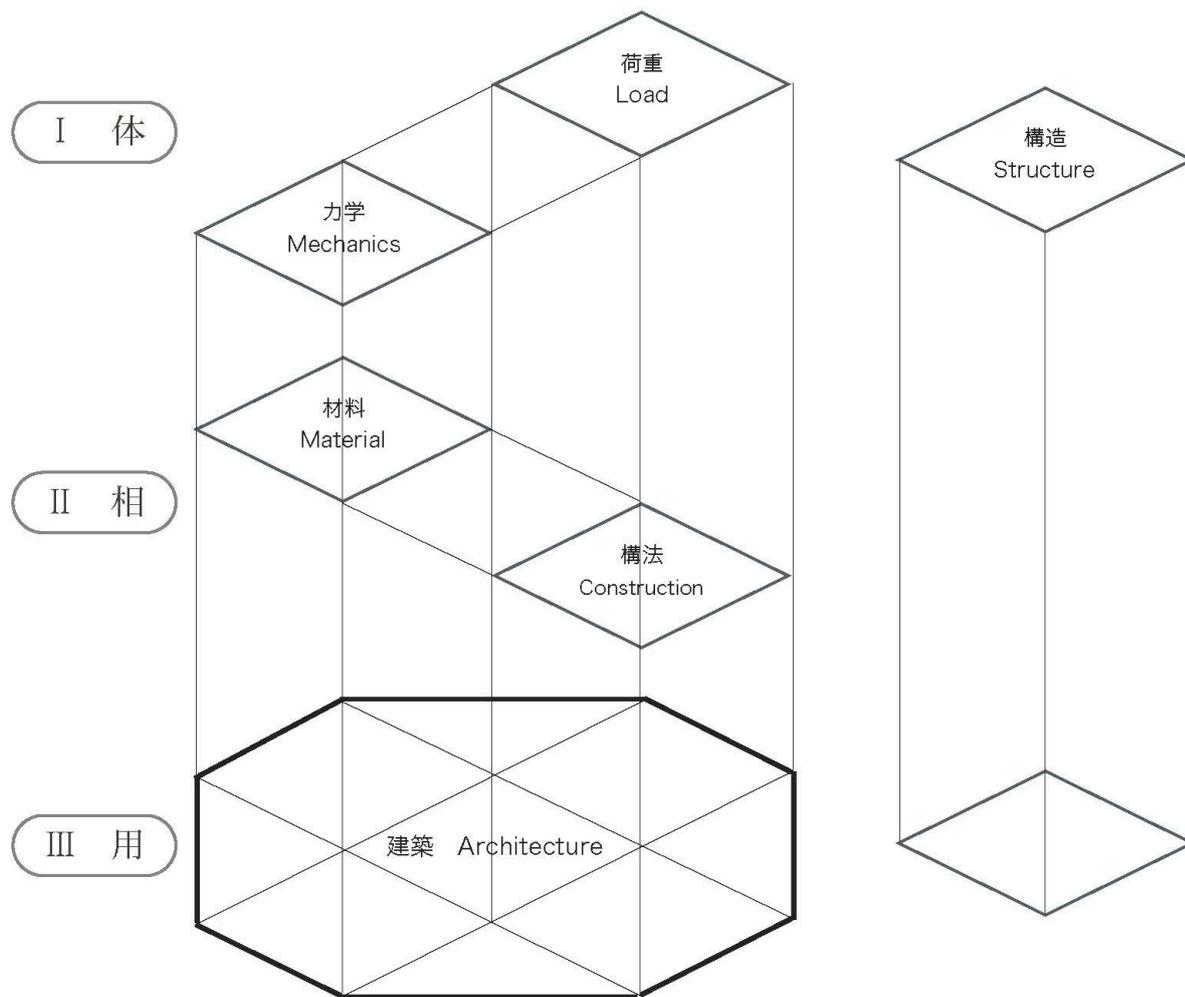


図2 構造を取り巻く要素 体・相・用の三面

図2の三面について、下から順に説明する。

### III 用

建築については、用、強、美の3つの要素を考えるということが常識として語り継がれているが、この面には、機能的なことから指し示す用、外観や美観、様式美なども含む美、この両者を合わせて最終的に表現されるものすべてを含むものとして考える。よって、図2に示す「用」は、「用、強、美」の中の用と美の両者を含むこととなり、半ば常識的に言われている「用、強、美」の中の用とは一致するものではない。

この用を具現化して成立させるために構造を考えなければならない、この一番下の底面から縦に柱のように貫くものとして「構造」があるものとする。

### II 相

建築物を成り立たせるためには、さまざまな材料を組み合わせて作り上げなければならない。そのような材料をどのような構法によって作り上げるかということを考えることを「相」として捉える。

### I 体

存在するものには、さまざまな力が作用する。これを構造学では荷重（固定荷重、積載荷重、積雪荷重、地震荷重、風荷重など）と呼ぶが、それら荷重に対して、どのような力の負担が加わるか、どのような変形をするかを把握するために力学的な検証を行う。このことを示す面が「体」である。

「用」が求められ、それを実現化させるためには「相」について考えなければならない、その「相」を成り立たせるために「体」について考える。そのプロセスの中で、これら貫く形で考えるべきことを「構造」と捉える。この3つの面について、それぞれについて考えるべきことながらも、最終的に一つの建築物を成り立たせるためには、それぞれの面での検討を行き来するか、同時に行うかは別としても、それら貫くような考察を行う必要がある。その考察こそが構造について考えるということであり、建築構造学の体系を形で示す際には、この貫くという位置付けが表現されている必要がある。図2は、構造という概念が3つの面を貫くものであるということを視覚的にイメージできるものとなっている。

## 5.2 建築構造学において全体像を伝えるための項目案

建築構造学の教育方法についての問題の本質は、単なる構造力学の教え方にあるのではなく、建築構造学の体系の捉え方とその全体像を伝えることを目的に据えるという点にある。構造デザインを学ぶ学生に対して建築構造学を教える場合、前節で示した建築構造学の全体像を伝えて、縦に貫く位置付けがなされる構造について考えることができる知見を授けることができれば、その知見を、学生はその後のデザイン活動に生かすことができる。構造力学における個々の数式の扱い方だけを学んだとしても、実際の構造物との関わりを見出せないままであると、実際の構造デザインには活かすことはできない。分断化された知見を提供することを避けるためには、科目ごとに分担しているということそのものも疑ったほうが良いと思われる。これまでに確認してきたように建築構造の工学的原理は、単に力学の計算方法を意味するものではない。その教育方法について一番重要なことは、常に実際の構造物について考えることである。その過程において、力学的なことがらを検討して定量的に評価せざるを得ない際に、計算式を用いた考察を必要に迫られる形で行うようにするような状況をつくることが望まれる。

具体的な内容を考えていく上で、「I 体」において、特に力学的なことがらを伝える際のキーワードとなるのは動詞ではないかという仮説を筆者持っている。すでにあるも

のをどう解析するかというよりも、これからどう作り上げていくかという観点を持つためには、常に能動的なキーワードを念頭におくことが構造デザインの実際の行為につながっていくのではないかと考えている。たとえば、次のようなキーワードをもとに、その意味を考える機会を提供していくことが一案として想定できる。①基本的発想、②力と変形、③応用的方策の3つに分けて掲げておく。

### ①基本的発想

「在る」「支える」「架ける」「覆う」

### ②力と変形

「耐える」「粘る」「壊れる」

「圧す」「引く」「曲げる」「ねじる」

「縮む」「伸びる」「曲がる」「ねじれる」

### ③応用的方策

「積む」「吊る」「張る」「並べる」「せり出す」「交差する」

「固める」「折り曲げる」

また、力学と構法をつなぐ観点から、構造形態を分類して伝える必要がある。その際には、増田一眞の著作物にある『架構形態の分類表』<sup>[16]</sup>が参考になるものと思われる。

「II 相」の内容についても「I 体」で考えなければならぬ力学的なことを常に関連付ける形で思考できるように伝えていく必要がある。「I 体」と「II 相」で伝えるべき項目を一覧にして図3に示す。

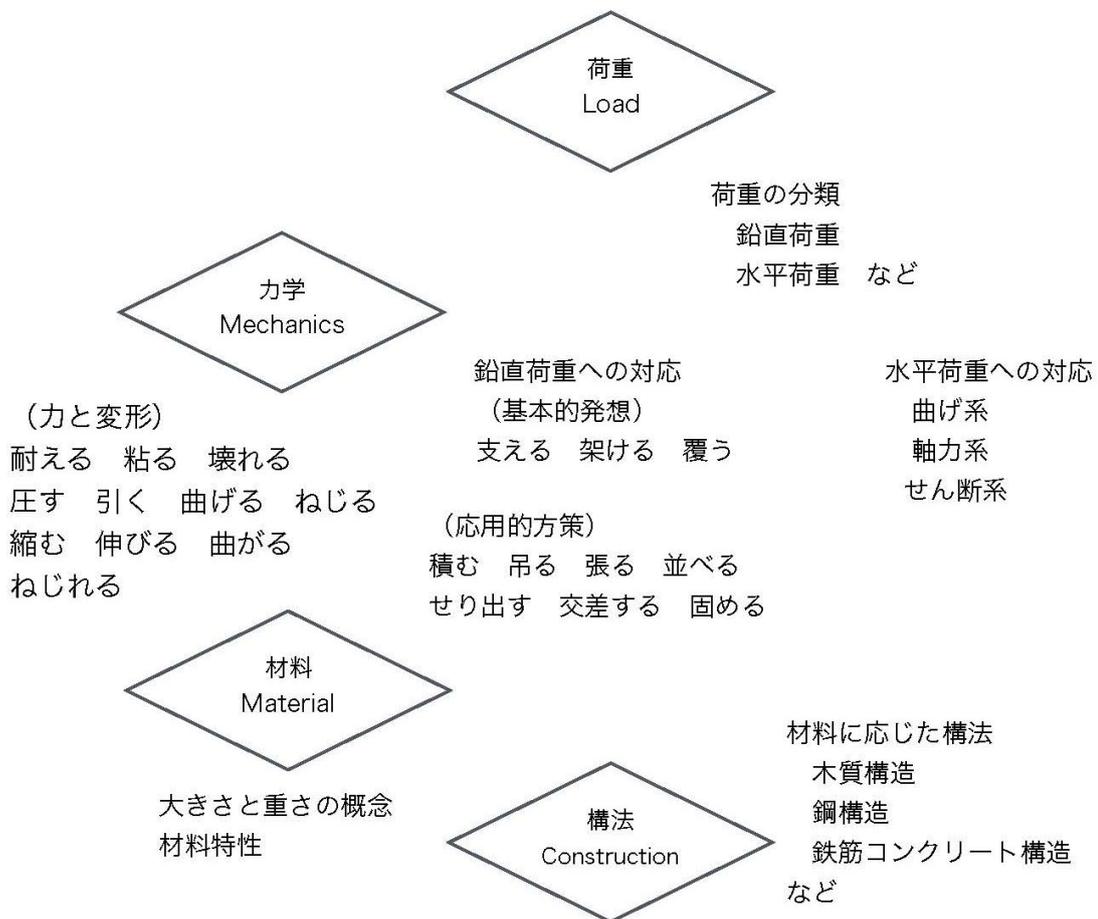


図3 建築構造学の全体像を伝えるための項目案

「Ⅲ用」との関連は個別の構造の科目で行うのではなく、設計の演習系の科目に構造関係の教員が関わる形で、体、相と同時に考えていくという機会を提供していくことが望ましいと考える。

### 5.3 全体像を伝えるための姿勢

建築構造学の全体像を伝え、図2における上下を貫くものを構造に対する考え方を示していくためには、力学的な知見と現実にある具体的なものをつなげる思考体験が必要である。そのためには実際につくって壊すというような実験をすることが有効である。また、実際に実験をしなくても思考実験として具体的なことに想像を巡らして理解することもできる。梁の曲げと梁の内部の応力との関係を理解する際には、トランプの束について洞察することが有効であると思われ、そのような説明を行っている著作物は複数存在する。<sup>[17]</sup>

田中基八郎は、著書『植物のデザイン 形と力学』<sup>[18]</sup>において、さまざまな植物の形に着目して、その形が力学的に合理的であることの説明を試みている。中には、リングとミカンの異なる特徴とその特徴が力学的な仕組みとどう関係しているかを述べている箇所がある。<sup>[18-11]</sup> 実際の形を力学的な捉え方で見る方法が示されている点において興味深い見方が学べる著作物であり、そこに示されているようなことを考える機会を提供することも有効であると考えられる。

エンジニアリングの世界を一般人に伝えることを企図してつくられた著作物『エンジニアに学ぶ 101のアイデア』(訳書)<sup>[19]</sup>は、工学的なものを見方をイラストと短文で示したユニークな本である。そこには、体系的に捉えることの重要性を強調する箇所が複数あり、全体を観ることの重要性が繰り返し説かれている。そのまえがきにおいて、『この本は木のことと同じくらい、森について明快な理解をもたらすものになっていると確信しています。』と記載されている他、『数量化はそれ自体において厳密なものですが、現実に対しては厳密なものではありません。』『コンセプトから細部まで可能な限りすべての尺度で、あなたの考えを問題の他のすべての側面に首尾一貫して、徹底的に照らし合わせましょう。』『すべてのエンジニアは計算をする。良いエンジニアはコミュニケーションをとる』というように計算結果のみに注視することなく、木を見て森を見ずというようなことにならないよう示唆に富む言葉が書かれている。そのようなものを見方を根底に据えていれば、全体像を見失うことなく「構造デザインを考える上で必要なことから」を伝えていくことができる。

## 6. 静岡文化芸術大学の教育課程におけるこれまでの建築構造学

海野敏夫の論文「見える力学：変形・応力の可視化」<sup>[20]</sup>において、静岡文化芸術大学における建築構造学の教え方について目指す方向性が示されている。抄録には次のように記載されている。少し長い引用となるが、現状に対応するための著者の工夫と尽力されていた様子が実感できるため、その全文を引用する。『デザイン学部の学生に構造力学や構造計画を教えることはかなり困難なことであることを、筆者は日々実感している。力学や建築の構造の説明を

するとき、どうしても数式を伴う。高校で物理を学習していない学生や数学が苦手な学生にとって、これはかなりの苦痛である。そこで、力学の世界が目に見えればだれでも直観的に理解ができ、少しでも学習に役立つのではないかと考えるのは自然である。有限要素法を用いて簡単な力学モデルを解析し、これをスクリーンに投影することは容易であるが、学生は力学そのものに興味をあまり示さない。解析モデルが自分の作品であったり、歴史的に有名な建築であったら、学生の関心を惹くだろうと考えた。本稿は、学生制作の椅子と有名建築2点の解析を行い、椅子の部材や建物全体の変形と応力の強弱をカラーリングで表示し考察を加えている。』

海野は構造力学の計算方法を教えることの困難さを実感する中で、応力解析を行うソフトを用いた計算結果が応力の状況を色で示されていることを利用して、学生の作品の解析結果を視覚的に示すなどの工夫を行っていた。また、構造力学の授業でパスタで橋をつくる演習を行い、力と形の関係を学ぶ機会を提供したことを伝え聞いている。しかしながらそれらの試みは一部であり、力学の計算方法を教えるということと、実際の構造デザインで求められる知見を結びつける形で教える方法を確立させていたとまではいえないと思われる。

## 7. まとめ

建築構造学の学問体系について考え、建築を実体あるものとするための「構造デザインを考える上で必要なことから」が何かということについて構造家の言説などから、力学的なことから実際の構造物の両者をつなぐための知見が必要であることを確認した。それを踏まえて、新たに建築構造学の全体像を示す図を作成した。その図において、「荷重と力学」「材料と構造」「建築として成立させるための要件」この3つを異なる平面に配置して表現し、それらを合わせて考えることにするための「つなぎ」が構造であることを示した。建築構造学が対象とする工学原理は、単に計算方法の習得にあるのではないことを確認し、教育の場において、構造力学のみを単独で教えることそのものに懐疑的になるべきであるという視点を見出した。建築構造学の教育において、提示した全体像を意識して教えていくための項目案を示した。

## 8. おわりに

本稿で見出した視点に基づいて、静岡文化芸術大学デザイン学部デザイン学科でどのような建築構造の授業を行っていくかという展望について書き留めておく。平成27年度入学生より、建築に興味を持つ学生は、これまでの空間造形学科ではなく、デザイン学科で学ぶこととなった。その教育課程において、建築士の受験資格が得られることに変わりはないものの、構造力学Ⅰ・Ⅱ、構造計画Ⅰ・Ⅱの科目が1、2年次ではなく、すべて3年次に開講される科目となった。平成29年度以降、4科目とも筆者が担当する予定となっている。すべての科目が3年次に行う形が理想的であるかどうかは分からないが、構造力学と構造計画の科目を同一の学年次に同一の担当者が運営することで、相互の科目を関連づけて教えることができるため、本稿で示した建築構造学の全体像を伝えていく実践が図れるもの

と考えている。1年次、2年次に構造関連の科目がないことについては、科目で教えることが良いのかどうかという点の検討は先に送るものとして、構造関連科目の担当者が設計演習の授業時に何らかの形で関わることで、構造的な知見を提供していきたいと考えている。

デザイン学科において建築構造学の科目を教えることは、建築学科などの建築を主軸におく学科に比べて、「構造デザインの普遍的な工学原理を教える」ことがより行いやすいのではないかという印象を筆者は抱いている。それは「デザイン」という概念の捉え方に関係している。横山禎徳は編者である出版物<sup>[21]</sup>のはじめにの文中においてデザインの技能について次のように述べている。『デザインとは帰納的でも演繹的でもないし、まして学問でもない。通常、大学院で博士号をとれるような分野ではない。しかし、長い訓練が必要な高度なプロフェッショナル技能である。その仮説・検証型推論を、座学とは違う「身体知」的訓練で得た技能を使いながら繰り返すのである。統合というのは方法論のない作業であるが、そのための唯一のアプローチは繰り返し作業なのである。』ここに描かれている繰り返し作業のアプローチこそが、「構造デザインの普遍的な工学原理」を身につけるために必要であるように思える。この出版物の中で、横山は対談者との『デザイナーが簡単に育たない』やり取りの中で次のように発言している。『私は大学の建築学科を出て設計事務所に就職したんですが、そこでボスは「エンジニアは小さな間違いはしないが、大きな間違いをするのだ」と言っていた。つまり、「エンジニアは常に誰かから与えられた境界条件の中で作業をしている。」それに対して、「境界条件を決めるのが建築家なのだ」ということでした。』<sup>[21-1]</sup> この発言は、あくまで横山の個人的な経験談ではあるものの、その真意を汲み取ると、工学系ではなくデザイン系の学部・学科であるからこそ、全体像を見失わない教育がより行いやすいように思われるのである。

## 参考文献

- [1] 小野晁彦 他 編著, 『ヴィヴィッド・テクノロジー 建築を触発する構造デザイン』, 学芸出版社, 2007, pp.40

- [2] 日本建築学会 編, 『建築構造設計 そのあるべき姿』, 日本建築学会, 2010  
 [2-1] 前掲書 pp.41 [2-2] 前掲書 pp.65 [2-3] 前掲書 pp.66  
 [3] 日本建築学会 編, 『建築形態と力学的感性』, 日本建築学会, 2014  
 [3-1] 前掲書 pp.228  
 [4] 斎藤公男, 『空間 構造 物語 ストラクチャル・デザインのゆくえ』, 彰国社, 2014  
 [4-1] 前掲書 pp.7 [4-2] 前掲書 pp.249  
 [5] 坪井善昭 他, 『力学・素材・構造デザイン』, 建築技術, 2012  
 [5-1] 前掲書 pp.4 [5-2] 前掲書 pp.192 [5-3] 前掲書 pp.199  
 [6] 中村恒善 他, 『建築構造力学 図説・演習Ⅰ』, 丸善, 1982  
 [7] 中村恒善 他, 『建築構造力学 図説・演習Ⅱ』, 丸善, 1982  
 [7-1] 前掲書 pp.233  
 [8] 須賀好富, 『構造計画とやさしい力学Ⅰ、Ⅱ』, 学芸出版社, 1979  
 [9] 久木章江, 「構造力学の教育手法に関する研究 -その1 文系学生の多い建築系大学における授業理解度の調査-」, 『2008年度日本建築学会 関東支部研究報告集』, 日本建築学会, 2008, pp.473-476  
 [9-1] 前掲書 pp.476  
 [10] 石川孝重 平田京子, 「体験・実験・考察を通じて育む「初年次構造力学教育」」, 『建築雑誌 vol.128 No.1640』, 日本建築学会, 2013.1, pp.62  
 [11] 西谷章, 「米国大学における構造教育 建築全般にわたる素養か、幅広い力学的素養か?」, 『建築雑誌 vol.120 No.1537』, 日本建築学会, 2005.9, pp.11  
 [12] 佐々木睦朗, 『構造設計の詩法』, 住まいの図書館出版局, 1997, pp.6  
 [13] 佐藤淳, 『佐藤淳構造設計事務所のアイテム』, INAX出版, 2010, pp.4  
 [14-1] 山本学治, 『造形と構造と』, 鹿島出版会, 1980, pp.99  
 [14-2] 前掲書 pp.100  
 [15] 坂本賢三, 「分ける」こと「わかる」こと, 講談社学術文庫, 2006 (原本1982), [15-1] 前掲書 pp.180 [15-2] 前掲書 pp.184 [15-3] 前掲書 pp.186  
 [16] 増田一真, 建築構法の変革, 建築資料研究社, 1998, pp.62  
 [17] Christopher Williams, 小竹由加里 訳, 『かたちの理由 自然のもの、人口のもの。何がかたちを決め、変えるのか』, ビー・エヌ・エヌ新社, 2014, pp.39  
 [18] 田中基八郎, 『植物のデザイン 形と力学』, 共立出版株式会社, 1983  
 [18-1] 前掲書 pp.32-36  
 [19] John Kuprenas with Matthew Frederick, 美谷広海 訳, 『エンジニアに学ぶ 101のアイデア』, フィルムアート社, 2013  
 [20] 海野敏夫, 「見える力学: 変形・応力の可視化」, 『静岡文化芸術大学研究紀要巻13』, 静岡文化芸術大学, 2013, pp.91-96  
 [21] 東大EMP・横山禎徳, 東大エグゼクティブ・マネジメント デザインする思考力, 東京大学出版会, 2014, [20-1] 前掲書 pp.234

