

材料屋が構造を知ること

——材料を活かす構造・設計に向けて——

豊田 政男／大阪大学工学部

構造設計は力のミスマッチを解決すること

退屈な講義は教授の責任である。しかし、あまりに豪快に眠られると責任も感じなくなる。講義中に居眠りをする学生は、まず、正面を向きながら瞼を閉じ始め、頭が下がりはじめると、それを支えるため頬杖をつくが、それでも支えられないとなると、机にどかんと伏せ、まことに快適な(?)眠りにつく。人間は普段は首の筋肉を緊張させ、頭を直立に支えている。これにはエネルギーがいる。それが眠りに入ると、筋肉が弛緩し頭が前の方に倒れ、それを支えるために杖が必要となるのである。この杖は、構造でいう方杖にあたる。

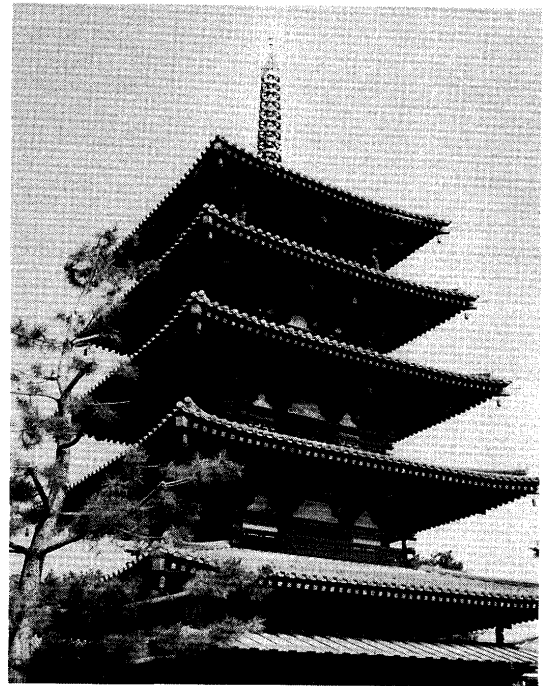
三角形に部材が結びつくことによって力に耐える構造をトラスという。それぞれに働く力が釣り合うには、力が閉じた三角形とならなければならない。三角形の一つの頂点に力が働くとき、その頂点につながる二つの部材(合掌という)には圧縮力が、対辺(梁)には引張力が働く。この形のままで大きな寸法にすると、合掌が座屈して折れたりするようになる。構造を造るということは、働く力と部材強度のマッチングを図ることに他ならない。

構造には、三角形が基本となるトラス(アーチはトラスの変形)、剛接が基本となり接合部が角変形しないことで支えるラーメン、引張って支えるケーブル構造、などがある。どのような構造をとっても、各部材に働く力は、いろいろな変化があり、構造詳細の選び方で力の働き方が変わる。材料の方からすると、材料の特性を活かすには構造の力関係を知ることが必要なのである。

例えば、ケーブルは引張りに強ければ良いわけで、材料の持つ強度を最大限に利用でき材料の高強度化が生きる。鋼材は高強度にしても弾性係数は変わらないので、曲げ剛性、座屈強度などを上げることができない。高強度を生かすためには引張り部材に使うようにするとよい。高強度材料を生かすには、構造設計的な配慮が必要で、材料屋がそこまで入り込むことも重要となる。

材料を知った構造設計 ー力のバランスを活かすー

去年は伊勢神宮の20年ごとの式年遷宮の年であった。こ



「心柱」が生きる法隆寺五重塔

の式年遷宮の20年は実に適切な間隔が選ばれており、技術継承に意義がある。この伊勢神宮の建物の構造形式は神明造りと呼ばれ、神社建築の一つの基本的な様式であるが、構造的に非常におもしろい。構造としては堀立て柱形式で、堀立ての丸い柱が屋根を支えているように見える。その両側の切り妻の方に2本の太い棟持ち柱があり、名の通り棟を支える重要な柱であると信じられてきた。ところがこの棟持ち柱やその他の柱が屋根を支えているのではなく、支えているのは側面の板壁なのである。木材の板は年を経るに従って収縮するので、屋根が下がることも考えて、柱の頭と桁との間に当初から隙間が設けてある。つまり、丸柱は、荷重を支えるというよりは、飾り要素が強く、「いつわりの柱」で、材料の経年変化さえも取り込んだ見事な設計がなされているのである。

一般に、構造強度を支えるものは、縁の下の力持ち的なものが多く、いかにも支えていますよという風にでしゃばるようなものは、得てしてももの中心でないことが多い。このような一見ミスマッチ的な中に、そのバランスを

どう求めるかが問題なのである。一般社会活動では飾り的要素は、世の動きの潤滑油であるなどといって、必要視する、あるいは仕方ないものであるとされている。あまりにもそれが続くと、飾りがあたかも重要な要素であるがごとく変わってしまい、それこそ「ミスマッチ」そのものである。材料研究・開発屋が飾りものにならないことが重要である。

力のミスマッチの解決 ー構造設計の妙ー

構造、特に現存する古来の構造物では驚くほどの巧みな工夫がなされているものが多い。

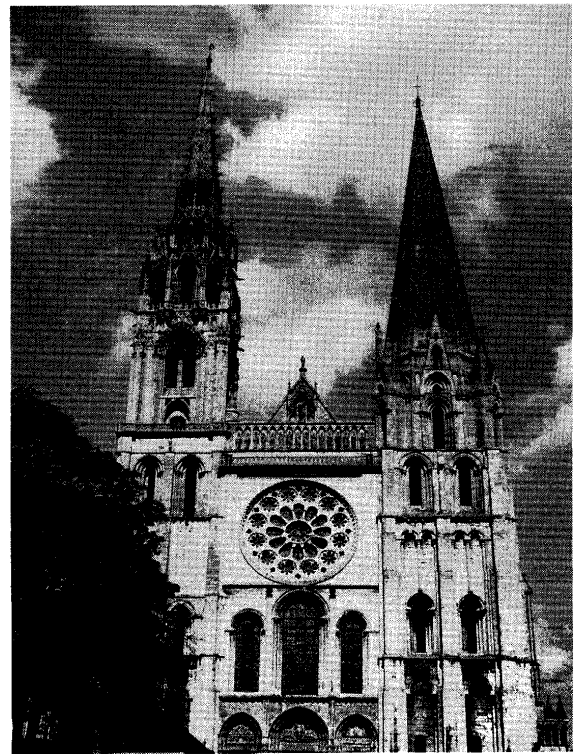
法隆寺の五重塔は、見るものに一瞬の静寂と驚異を感じさせるほどのバランスと垂直指向を実感させる。仏塔の起源はインドのストゥーパにあり、中国語の音訳「卒塔婆」から塔婆、塔へと変化したという。我が国の塔には、一般に心柱と呼ばれる太い柱が中央に一本通っている。塔はこの仏舎利を安置する心柱のためにあるのであって、その大事な心柱を囲うがごとく塔が形成されているのである。

建築構造的にも、この心柱をもつ塔構造は非常に特異な構造となっている。心柱というからには、構造としての荷重を大きく受け持つかのように思われる。しかし、塔が通常の状態にあるとき、心柱にはほとんど荷重がかかっておらず、少し持ち上げる荷重さえ生じているという。それは、各層の長く突き出た軒の重みと上層階の重みとが「てこの原理」で釣り合うように各層の柱で支える構造形式となっているためである。ただ、風荷重や、地震時には心柱が大きな役割を果たすことになる。いずれにしても、心柱構造を持つこの塔は、我が国のような地震国に超高層ビルを生み出した、いわゆる「柔構造」建築のモデルといえる。

柔構造の耐震性を示す端的な例が、中国の北京の東方百キロあまりの蘇県にある二つの構造に見られる。一つは白樂寺の観音閣（中国で現存する最古の木造建築）で、もう一つはその寺の南200メートルほどのところの白塔寺のレンガ造りの仏舎利塔である。この一見安定感があって、レンガのがっしりした塔が、1967年の唐山の大地震で全面的に崩壊してしまったのに、大空間の柔構造木造建築の観音閣は残った。我が国の塔は柔構造の代表例として知られ、その建築技術の高さが評価されているが、多分に中国建築の影響を受けたことが予想される。

このように心柱は、構造的には大きな負荷を与えないような工夫がなされており、いざというときのみそれが働く。これこそが「心柱」であり、常に力を支え、疲れ切っているようでは、「心（しん）」にはなれないのであり、疲れ切らない技術者でなければならない。

天に昇るといふ願望は、洋の東西を問わず古くからのものである。ヨーロッパでよく見られる大聖堂も高い尖塔を



ゴシック初期の様式を残すシャルトル ノートルダム大寺院（フランス）

持つものが多い。カテドラル（大聖堂）は、ヨーロッパの大都市の観光スポットでもある。ローマ教会が5世紀頃司教座のある都市を定め、大聖堂は、司教の座の椅子のカテドラのある聖堂のことである。聖堂の建築様式は中世から近代へは、ビザンティン様式（4-11世紀）、ロマネスク様式（同11-12世紀）、ゴシック様式（同12-14世紀）、ルネッサンス（同15-16世紀）、バロック様式（同16-17世紀）へと移る。初期のロマネスク時代は、質素・素朴な建築様式で、半円アーチを基本としたトンネル型ヴォールトであった。しかし、この構造では、天井の重みが全面的に壁にかかるため、十分な強度を持った厚い壁構造が必要となり、壁には大きな窓を作ることができない。そこで新しいゴシック建築が、パリ北部のサン・ドニ修道院で始まった。

ゴシック建築は、光と高さの二つの願望を実現するために生まれた。光を取るためには、十分な大きさの窓が必要であり、高さを実現するには、高さを感じさせる構造様式が必要となる。ゴシック建築の特徴は、次の三つの技法にある。まず、高さを実現するために尖塔アーチが取り入れられた。ところが尖塔形式でアーチヴォールトを幾つか組み合わせるとき、交差部の稜線には大きな力が生じることになり、大スパンにすることが難しい。そこで採用されたのが、リブ・ヴォールトと呼ばれる交差部をリブ（肋骨）で補強した構造である。このリブ・ヴォールトを採ると、リブが入ってくる柱には大きな横方向（建物空間を押し広

げる方向)の力が働くことになる。したがって、外部からその圧力を受けるため周囲に小尖塔が設けられ、フライング・バットレス(飛梁)と呼ばれる蜘蛛の足のよう支える梁で、小尖塔へアーチの荷重が伝わるようになっている。この構造は、一つ一つのプロセスで生じる力のミスマッチを解決した例である。一つの要求によって構造形式を変えるとき、別の所にまた大きな力をもたらすという連鎖的問題の解決が必要となる。そこでは総合的な解決が求められる、問われるのは多面的判断力である。これは材料開発のアプローチに共通するところが多いのではないか。

ミスマッチは開発研究の駆動力

ここでは、幾つかの具体的な例を挙げて、構造の妙を示

してきたが、構造を造る上で、多くのミスマッチが生じ、それを巧みに解決してきている。本誌の読者の多くは材料関連技術者であろうが、材料開発には、いかにミスマッチを見いだすかが駆動力となる。最適化とは、ミスマッチの解決に他ならないが、多くの場合、従来の延長上の発想による解決は、いわゆる改良・改善の域以上のものは出てこない。現在、我が国の製造業に問われているのは、人事管理も含めた大きな発想の転換であり、その展開の駆動力である。しかし、その展開を図るのは人であり技術者である。技術者が評価されない社会になってしまえば、次の時代は見込めないであろう。

(平成6年6月13日受付)

マサチューセッツ州立大学滞在記

須山 真一 / 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所

筆者は1992年11月より1年間社費により、米国Massachusetts州AmherstにあるUniversity of Massachusetts(通称UMASS)の化学工学科において、Ka M. Ng教授(Ngはインと発音)の下へ留学する機会を得た。UMASSについては伊藤氏の留学記¹⁾があるので、あまり重複しないように留学中の出来事・感想について述べさせていただく。

Amherst

Massachusetts州は人口約600万、米国では人口規模で上から12番目の州で、州都は東海岸にあるBostonである。AmherstはBostonの西約150kmに位置する、Massachusetts州西部の人口約3.2万の町である。Amherstには、私の在籍したUniversity of Massachusettsの他に2つの大学(Amherst CollegeとHampshier College)があり、さらに近郊の2大学(Mount Holyoke College, Smith College)と合わせた5大学が、互いに提携している(無料バスの運行、図書検索、催し物の案内等)。University of MassachusettsはAmherstにある本部以外にも、Bostonなどに一部の学科をもつ総合大学であり、他の4大学はLiberal ArtsのCollegeである。Amherstは3大学を抱えているので、上記した人口3.2万のうち、大学院生も含めた学生

数が約2.4万人であり、大学と附属施設(病院、学校、幼稚園など)の関係者を考えると教育がこの町の産業である。住宅事情は家族向けの住宅が月700~800ドルで、年度変りの7~8月以外は空きが少なくかなり厳しい。しかし、それを別にすれば、治安もよく(ある調査によれば、全米での凶悪犯罪発生率が少ない方から2番目²⁾)、文教地域であるため短期生活者(1~数年)が多いので、転入者が生活しやすい町といえる。

大学及び学科

化学工学科は、都市工学科、電気工学科などとCollege of Engineeringを構成しており、14名の専任教官(教授8名、準教授5名、助教授1名)と数名の兼任教授が在籍している。さらに、化学工学科は化学科・高分子研究センターとの関係が深く、歴史的には1951年に学部講義を開始し、1966年に化学科と共同で高分子研究センターを設立している。

Ng教授は、香港出身で高校卒業後渡米し、Houston大学でPh. D.を得た後、UMASSに移ってきた41才の研究者である。化学工学科内には、Ng教授を含めて4名の教授(他は、J. M. Douglas, M. F. Doherty, M. F. Maloneの3教授)でProcess Design and Control Center(PDC)が設立さ