

## 研究ノート

## 建築構造の教育的模型

花岡 尚之

日本福祉大学 情報社会科学部

## Educational models of architectural structure

Naoyuki Hanaoka

Faculty of Social and Information Sciences, Nihon Fukushi University

**Keywords:** 建築構造, 軸組み, 筋かい, 教育, architecture, framework, brace, education

## 1. はじめに

力学的な基礎知識が必ずしもない学生に、建築への興味を涵養する一環として、建築強度を生み出すための工夫を定性的に理解させようと試みた。そのため、身近にある素材で模型を作成し、そこに現れる性質を観察してレポートにする演習を行った。模型を作成する過程において、紙に印刷した教科書では見過ごしがちな事柄もあったので、概要を報告する。

福祉住環境コーディネーターやインテリア・コーディネーターなどの呼称が一般化し、コーディネーターが職業的な役割として認められている。コーディネーターは、ユーザーから話を聞いてその希望を明確化するとともに、一方では設計や施工をおこなう専門家と協議して適切な計画を作成する役割がある。したがってこれからコーディネーターをめざす学生は、人々の日常生活やさまざまな障害についての知識や人間工学的な特性について理解があるとともに、建築についても知っていることが求められる。建築について構造力学的な知識は必要とされていないものの建築構造の知識は必要とされる<sup>1)</sup>ことからその定性的な意味を分かっていることが望ましいといえる。

関係した演習科目は「かたちと福祉の空間」といい、日本建築学会(1994)<sup>2)</sup>から示唆を受けて「かたち」

の意味を体験するような内容を含めることにした。紙を丸めたり、折ったりすることによって紙の強度が飛躍的に増す演習は、ほぼこのテキストに準じて、実施した。折板の製作は、ストレートな波板をコピー紙で作成して強度を競わせたほか、波板をコの字形に折って波板の強さを確かめることを行った。

ここでは独自に考えた模型による演習を、軸組み模型とパネル模型について述べる。

## 2. ストローによる軸組み模型

軸と軸をつなぐ節点には滑節点と剛節点がある。滑節点は節点に繋がる軸が相互に自由に回転するものである。剛節点は節点でつながる軸が固定されているものである。剛節点のモデルは、部材を接着したり、金具を打ち付けたりすることで容易に実現できる。それに対し、滑節点は、節点で接合する3～5本の軸に対して自由継ぎ手の機能を果たさなければならないので、モデル化が難しい。ただし、2軸のあいだの自由継ぎ手であれば、針金のループで接続することによりかなり近いモデルになる。

ここでは、ストローに木綿の水糸(たこ糸)を通し、水糸をつなぎ合わせることによって、自由な継ぎ手のモデルを実現した。水糸は柔軟に折れ曲がることのできる

とともに、伸び方向に多少の弾性があり、捩れにも自由に追従できる。そのため、モデルを動かすときに無理なく滑らかに変形させることが可能である。

軸組みの最も単純なモデルは、3本のストローに水糸を通して結び合わせることでできる三角形である。次に単純なものは、4本のストローに水糸を通して結び合わせるモデルである。4本のストローは平面内にあるという拘束条件があれば、モデルは正方形から任意の角度の平行四辺形まで変形する。教科書的に説明するときは、暗黙裡に2次元の平面が前提とされていて、滑節点は不安定である（四辺形の形が一定しない）が筋かいを入れることによって安定化すると図示されることが多い。このような説明の範囲であれば、折尺をつかって三角形や四角形を作ってその変形から説明することができる。また、工作材に穴を開けてボルトとナットで固定し筋かいの効果を示す模型でも、変形は2次元の範囲になっている。

4本のストローに水糸を通して結び合わせると、模型は一つの平面の内には必ずしもなく、形は平行四辺形にはならない。ひとつの節点を挟んだストローの対がひとつの平面を張るので、対の選び方によって4つの平面が模型によって表現されている。4本のストローにやや長い5本目のストロー（長さは1.41倍にする）を対角軸として追加して水糸で結合する。すると対角軸を共有する2つの直角三角形が2つの平面を表現する模型になる（図1a）。対角軸は建物の筋かいをイメージしたものであるが、対角軸を挟んで2つの三角形が張る面は相互に任意の角度を取ることができる。

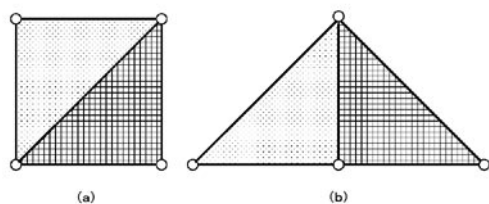


図1 単純なストローのモデル。実線はストロー、小さな丸は滑節点を示す。模様は三角形が決める2つの面を表している。a) ストロー4本に対角軸のストローを加えることによって、2つの平面が決まる。b) 共通する軸に直交する方向にストローをつなぐと、2つの面に角度をつけることによってモデルは自立する。

ここまで来て理解されることは、3本のストローを結び合わせてできる三角形は、「3辺の長さが決まれば三角形が決まる」ということ以上に、「三角形は一つの平面を形成する」ということに意義がある。建築は3次

元の空間に存在するものであるから、3本のストローによって空間に平面が定義されることは大変に重要な点である。平面と平面をほぼ直角に配列すれば、自立する構造とすることも可能であるからである（図1bのモデルを共通する軸で折ってみよ）。実際、ツーバイフォーなどパネル構法は平面と平面を箱型に組むことにより自立させており、筋かいを使って三角形を形成する軸組み構法とこの点で共通するといえる。

ストローを12本使って立方体を作るべく、一つの節点において3本のストローが出会うように水糸で結びつけると、その模型は自立することができない。おなじ12本のストローでも、一つの節点で4本のストローが出会うように結ぶと正八面体となって自立する安定した形になる。この2つのモデルの相違は、上に述べたように3本のストローからつくる三角形は形（平面）が決まるが、4本のストローでは形（平面）が決まらないことに由来する。そこで、対角軸を追加して模型を安定化させ、自立させることを考える。

つぎの図2aは、対角軸をもつ正方形（図1a）を4つ繋げたかたちの展開図である。このモデルの両端を一

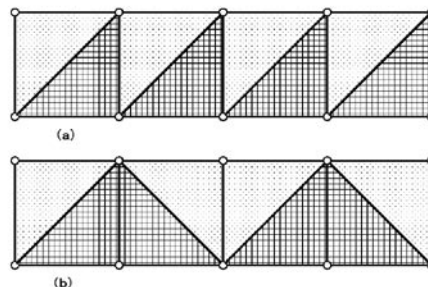


図2 ストローによる立体モデルの展開図。(a) 図1aのモデルを4つ並べて両端を一致させると4つの壁を持つ立体になる。(b) 図1aのモデルを一つおきに裏返して並べている。

致させて組み立て、テーブルの上に置くと、4つの面を持つ立体として立てることができる。テーブルの上に置くことによって底面が平面になるように強制しているため、底面を正方形にして置くと模型は立方体になる。このとき4つの側面のそれぞれは一つの面になっており、同じ形の図1aのモデルが2つ面からなっているのとは異なっている。垂直な軸を共有する2つの三角形が相互に直交する面を張るように支えあっていると解釈される。図2bのモデルは、対角軸の向きを交互に変えているが、モデルをテーブルに置いたときの安定性は図2aの立方体と変わらない。これらのモデルよりストローに

よる立方体を自立させるためには筋かいが必要であり、その本質は三角形にあるので筋かいの向きを変えても同じであることが説明できる。また、このモデルの上辺の節点に水平な力を加えると、底辺の一部が浮き上がって形が歪むことが観察される。これは底辺の軸がモデル化している建物の土台と布基礎が密着していないと軸組み構造は弱いこと示している。

建物の壁面に窓が大きく取ってあって筋かいが不足しているとき、建物の強度に欠陥があらわれる。図3は図2aのモデルのうち1つの壁面に対角軸がないとしたモデルの展開図である。対角軸のない壁面の右隣の対角軸の向きによって、2つのモデルを表示している。図3の展開図の両端を一致させてテーブルの上に立てると、図3aと図3bはともに立方体の形を維持することができない。図3aの理由は、Aと表示した節点を含む三角形の面の向きが定まらないからである。図3bのモデルでは、節点AとBに接する対角軸においてモデルは屈してしまう変形をする。

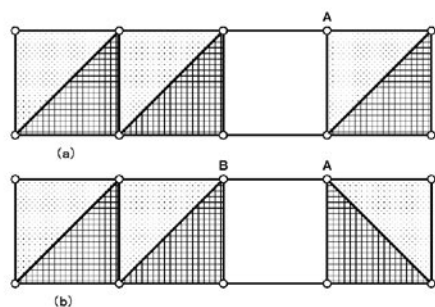


図3 ストローによる脆弱な立体モデルの展開図。一部の対角軸を欠くことによって脆弱となったモデルである。(a)と(b)とは、右端の対角軸の向きが異なる。

壁面の一部に強度からみて欠陥があるとき、床面と天井面の剛性を高めて補うことができる。4本のストローに内接するかたちで4本のストローからなる正方形を縫い付けると、火打ち梁で補強した床面がモデル化できる(図4a)。そこで図3aに示した立方体として自立しないモデルの底面と上面に火打ち梁となるストローを縫い付けると、安定した立方体になる(写真1a)。これによって、建物の強度には壁だけではなく水平面の剛性も関係してくることが説明できる。この立方体の模型は、そのままでは安定しているが、不均質な力が横から加わり上面から見て反時計まわりの回転力が加わったとき、上面と底面の僅かな歪を經由して模型は折り畳まれてしまう(写真1b)。したがって、立方体の安定のためには、

4つの側面と2つの平面のすべてに筋かいなどを入れて剛性を高くしなければいけないことが理解される。

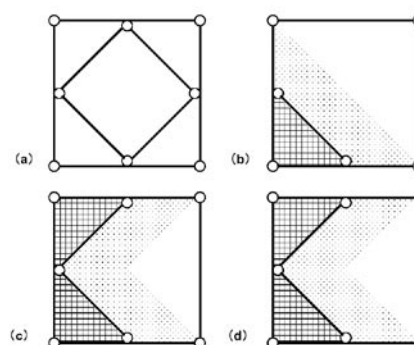


図4 火打ち梁のモデル。火打ち梁は滑節点によって外側のストローに接合している。(a) 火打ち梁によって剛性を高めて平面を作る。(b) 一つの火打ち梁が形成する三角形(格子模様)と2辺のストローが伸びて張る平面(ドットによる影)を示す。(c) 隣り合う角の火打ち梁によって一つの平面をつくる。(d) 右側の梁がないとき、隣り合う火打ち梁は左側の軸を共有する2つの面を張る。

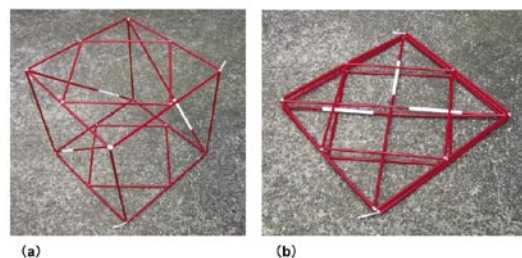


写真1a 脆弱な立体モデルを火打ち梁によって自立させた立方体(参照:図3a)

写真1b 回転力をうけて折りたたまれた状態

ここで、図4aのモデルを使って、火打ち梁の意味を考えてみたい。平面図としてみれば、正方形となる4つの角を火打ち梁による直角三角形によって角度を固定したので、安定した正方形になった、といえる。平面図では、少なくとも一つの角が直角になれば正方形として形が決まる。3次元空間の文脈では、火打ち梁は三角形を形成することによって一つの面を定義している。その範囲は、三角形で囲われた部分だけではなくストローの剛性によって2本のストローが伸びている部分が張る平面と考えることができる(図4b)。したがって、対向する角に火打ち梁があるだけでは、形成される2の平面は重なるところがなく、一つの面にはならない。それに対し隣接する角に火打ち梁を作ると、正方形は一つの面を形成することができる(図4c)。これはそれぞれ2本のストローが張る平面に重なる部分ができ、一つの平面に統合されるからであろうか?図4dに示すように右辺の

ストローを取り除いてみると、隣り合う火打ち梁によってできる2つの三角形の面は共通する軸のまわりに滑節点によって自由に角度を取りうる。したがって図4cでは、図4dにおいて取り外したストロー（梁）が両端の節点の間の距離を固定しているので、隣接する2つの三角形が決める2つの平面が一つの面に拘束されているといえる。その結果として、隣接する角に火打ち梁があれば一つの面が形成されると考えられる。逆に言えば、強い力が加わって図4cの右辺のどちらかの節点が外れたとき、左辺の強度にも影響が出ることになる。

一つの壁面の一部に柱と筋かいが入っているモデルが図5である。2つのモデルは筋かいの入っている幅が異なっている。ストローで作成した模型の右辺に軸に沿う力を加えると、モデル（b）の方が筋かいの入っていない部分（窓）が大きく歪むことが観察される。それはBCの長さの違いによること、より正確にはモーメントの大小によって理解できることを説明できる。模型の上辺に軸に沿う力を加えたときの影響は筋かいの歪として現れるはずであるが、筋かいに加わる応力を表現するものがないと違いを見せることができない。

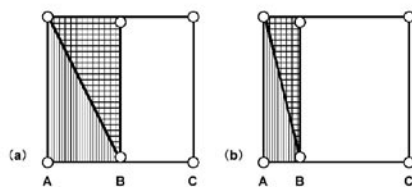


図5 柱と筋かいのモデル。(a) ABとBCの長さが等しい。(b) ABはACの1/4の長さである。

なお、この図5のモデルでも図4cで説明したことと同様に、右辺の軸の節点が外れたときには、筋かいのつくる2つの三角形が2つの平面を張ることになる。そのときでも筋かいの部分が一つの平面になるように維持するためには、2本の筋かいを交差させるか、合板を貼り付けるかしなければならない。これは構造壁を構成することに相当する。軸組み構法では軸が力を伝えてお互いに支えあっているの、軸の節点が外れないように金具で粘り強く結合することが重要であることが説明できる。

### 3. 画用紙によるパネルモデル

ツーバイフォー構法（枠組壁構法）は、2インチ4インチ角の構造材で構成する枠に構造用合板を貼り付けて

パネルを構成する工法である。枠組みと合板を一体化することによって強度を生み出している。しっかりしたパネルができれば、6枚を組み立てることによって部屋をつくることができる。その時に重要なことはパネルが外力によって外れないようにすることで、そのために接合金物を使用する。

実習材料は、画用紙と割り箸代わりの桧材である。桧材は3ミリ×10ミリの工作材を画用紙にあわせて切りそろえる。A4判ほどの大きさの画用紙は横長において、コピー紙よりも厚いとはいえ柔らかな感触を味わう。画用紙の長さよりもやや短い桧材4本に両面テープをはり、縦方向にしてほぼ等間隔に画用紙に貼る。すると画用紙は異方性を帯びて、桧材とおなじ方向をもつ曲面をつくるのはこれまでとほとんど変わらない容易さであるが、それ以外の方向には剛になったことを体感する。その後、画用紙の横幅と同じ長さの桧材に両面テープを貼り、画用紙の上辺と下辺に貼り付ける。すると画用紙と桧材が一体化してパネルが形成される。学生の表現では「障子のような感じ」の強さが現れる。この演習では、障子のように桧材によって枠組みをあらかじめ作ることにはしていないが、画用紙は桧材によってたわみがなくなり、桧材は画用紙によって結合され枠組みと同じように構造化されている。個別には柔らかな素材にすぎないものやばらばらな部材であったものが、貼りあわされることによって強いパネルになる変化の大きさに驚きがある。

このパネルの強さを、上辺に沿って横向き力を加えてその大きさとしてバネはかりで示すと、より具体的に認識できるはずである。しかし、貼り付けた桧材のあいだに隙間がなくぴったりしていると、手の力で歪ませることができない強さがある。

### 4. 大きな空間と小さな空間

同じ部材によって大きな空間を構成したときと小さな空間を構成したときに、何が違うのだろうか、と学生に考えてもらうことを考えた。

模型制作の道具に、Zometool<sup>3)</sup>とよぶものがある。節点となる穴あきのプラスチックボールと同じ断面をもつ長短の軸部材からなる。大小の立方体によって大きな空間と小さな空間のモデルをつくり、その違いを考えるのが演習である。プラスチックボールはすべて同じものであるから、部材を穴に差し込んだときの結合の強

さは部材の長さによらずほぼ一定である。最も長い部材と最も短い部材でそれぞれ立方体を作成すると、一辺がそれぞれ約 20 cm と約 8 cm になる。学生に力を加えたときの印象を聞くと、「大きな模型は柔らかい感じがする」という意見が多い。そこから、大きな空間を作るためにはより太い部材を使う必要があること、節点の接合もより強力にする必要があること、したがってリフォームで大きな部屋を作るときに柱や梁の強度を吟味しなければいけないことを説明できる。

大きな模型は柔らかい感じがする理由を理解するために、各自が持っているペンを使って、ペンをつかむ右手の指先にかかる力が左手で加える力の位置によって大きく異なることを体験させた。その違いは、力のモーメントの違いとして説明し、学生が知っている槌子の原理あるいはシーソーのバランスと同じことであることを指摘できる。そのほか柔らかさには長い部材による変位の累積も与えていることを補足する。

## 5. まとめ

身近な素材を使用して、建物に見られる構造の意味を定性的に理解するための演習を試みた。ストローによる軸組みモデルは滑節点を表現するために水系を使用して組み立てた。実現した滑節点は 3 次元的に方向を選ばない性質を持っている。構造力学では 2 次元的に自由に回転する節点を想定している<sup>4)</sup>ので、ストローのモデルは過剰に自由な節点になっている。そのために構造力学入門としては普通には考えない動きを考えることになった。

建築の実際に明るくないのであるが、軸組み構法といっても現代の建築は大黒柱と太い梁で構成されている伝統的な構法ではなく細い部材を組み合わせている。そこで構造的な強度を出すために筋かいが重要視され、部材の接合強度を確保する金具<sup>5)</sup>が使われるようになっている。したがって、接合部はいざというときに外れないことを最低限の条件にしていると解されるので、ストローによる滑節点は過剰に自由度があるとしてもそのような極限のときのよいモデルとなっていると考えられる。

これまで授業時間内に作成しあるいは説明したモデルは報告したものの一部であるが、身近な素材によって示される事実に新鮮な興味を示す学生がいる。演習を行う立場からは、そのような印象あるいは驚きが記憶に残っ

て欲しいという狙いがある。素材は台所にあるものなので興味があれば簡単に自作することができ、自分で考えることができることもこの演習の良さであろう。

建築からは離れるが、ストローを使った模型で驚きを与えることは、ともに 12 本のストローを使った正 6 面体と正 8 面体の違いである。正 6 面体にするべくストローを水系で結び合わせても形が定まらない。それに対し正 8 面体はしっかりした形を保っている。ここからストローで正 6 面体をつくるために何をしたらよいかという問いかけを学生にすることができ、ストローによる軸組みモデルの項に述べた演習につなげていくことができる。

ストローによる軸組みモデルの問題点は、ストローが柔らか過ぎることである。使用したストローはポリプロピレン製の径 3.5 mm のものであるが、建築部材のモデルとしてはもう少し硬い素材を使用した方が、形と力の関係をもっともらしい歪の大きさを考えることができるであろう。ストローを硬くするために紙を巻きつけることを試みたが、20 cm の幅の紙を細く巻くのは容易ではない。更に工夫が必要である。

## 参考文献

- 1) 福祉住環境コーディネーター検定試験 1 級テキスト, pp. 263-270, 東京商工会議所 (2002) およびインテリアコーディネータハンドブック技術編, pp.124-134, インテリア産業協会 (2003)
- 2) 日本建築学会: 構造入門教材 ちからとかたち, 日本建築学会 (1994)
- 3) Zometool Manual 2.0. Zometool Inc. (1999)
- 4) たとえば, 上田耕作, 廣瀬幸男, 小葉 聡: わかる! 建築構造力学, pp.42-45, オーム社 (2002)
- 5) 建築図解事典編集委員会: 図解事典 建築の仕組み, pp.74-75, 彰国社 (2001)