

ブリッジコンテスト公開授業

～ 学生が参加する授業を求めて～

設計製図の授業でのブリッジコンテスト及び膜構造模型製作の試み

松田 浩 (長崎大学工学部)

平成 12 年 12 月に「変えよう授業、変わろう大学」というテーマで第 1 回長崎大学 FD が開催されました。その時「学生が参加する授業を求めて」の授業実践例として、「構造設計製図の授業でのブリッジコンテスト及び膜構造模型製作の試み」を発表させていただきました。その後も構造設計製図の授業においてブリッジコンテストは継続しています。本稿はその時の原稿を加筆・修正したものです。

1 はじめに

日経新聞の日曜版に教育に関する欄があります。H12 年当時、「大学生の考える力を養成するために外部の協力で授業を活性化した」(明治大学: 水野教授)、「大学の教養教育に再評価の声が必要で、学術研究、技術革新、国際化・情報化の進展のためには、課題探求能力というものが要だ」(国際基督教大学: 絹川学長)、「自ら行動し人材を育てるために社会人も教育の現場へ」(IBM 最高顧問: 椎名武雄氏)とあります。また、文部省高等教育局から工学系分野における創造教育実践事例集が出版されており、創造的人材を育成するためには産業界との連結が必要であり、この事例集が FD を推進していくための資料集として役立つだろうと記載されています。さらに、土木学会誌 5 月号 (H12 年) には、「岐路に立つ大学教育」が特集されています。そこには、大学は何を保証できるのか、大学土木教育における今後の大きな変革と改革等々について記述されています。

ところで、高専や大学の機械・電気系の大学生によるロボコンはマスコミで広く報道されています。ロボコンは、若者の理工系離れ、学生のものづくりへの関心と技術の育成を目的として行われていると認識しています。ロボットのユニークな動きや奇抜なアイデアには感嘆させられる面が多々あることはいうまでもありませんが、それとともに学生のロボットづくりに対するひたむきさの映像に多くの人が惹き付けられています。

建設工学の分野におきましても、パデュー大学、テキサス大学をはじめ北米の多くの大学で、長年にわたりブリッジコンテストが盛んに行われています。これは、一定のルールのもとで自由に橋の模型を製作し、その強度を競い合うものです。一連の作業を通して楽しみながら工学的センスや創造性を高めることができるため、教育的見地からも高く評価されています。最近では、アメリカ鋼構造協会 (AISC) による全米大会 [1] も催されています。

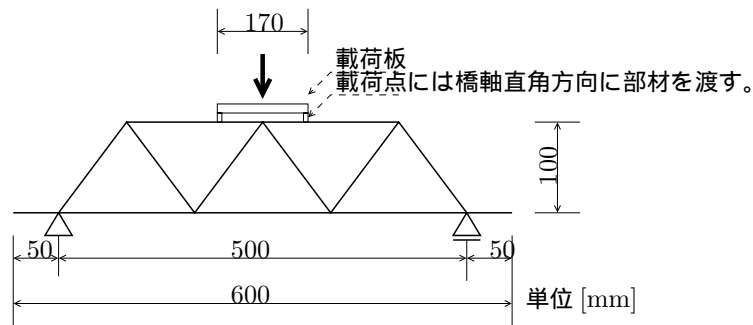
平成 7 年度にティーチングアシスタント (T.A.) 制度が設けられたのを機会に、構造設計製図 B(3 年生必修) の授業でブリッジコンテストを実施しています [2]。それまでは、合成桁橋やプレートガーダー橋の設計計算、H 빔橋の設計・製図を課していたのですが、T.A. 学生の補助のもとに、ブリッジコンテストと膜構造の模型製作を実施しています。平成 7 年度から、長崎大学と九州工業大学 [3] とで始めたのですが、その後、九州大学、熊本大学というように、いくつかの大学で同じ設計条件のもとで実施されるようになりました。

2 ブリッジコンテスト

1 グループ 5 ～ 6 人からなる班での共同作業により、トラス構造を製作し、鉛直荷重を作用させ、その破壊性状を観察し、トラス構造の力学的特性を理解させることを目的に、ブリッジコンテストを実施しています。以下にブリッジコンテストでの設計条件とそのときの判定結果を記載します。

2.1 コンテストの条件

- (1) 使用材料および器具 : パルサ 5mm 角棒 (定尺 900mm: パルサ材強度にはバラツキがあるが、概ね引張強度 $250\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、圧縮強度 $100\text{kgf}/\text{cm}^2$ を用いて設計すること)、接着剤、載荷板、カッター、紙やすり
- (2) 供試体条件 橋 (模型) は以下の条件で製作すること (図 1 参照)。
 - (a) 橋の重量と許容最大荷重の比を最大限にするような橋を製作する。
 - (b) トラス構造を基本とし、アーチ構造にしてはならない。
 - (c) 支間は 500mm とし、支点外側に 50mm ずつ余裕を設け、橋長を 600mm とする。
 - (d) 橋の幅は、最大 80mm 以内とする。
 - (e) 支点上部から上または下までの最大高さは 100mm 以内とする。
 - (f) 載荷点は載荷板の範囲内で何点でも自由に決めてよいが、載荷板が橋の床上で静止できるようにしなければならない。
 - (g) 橋の端支点部は平らでなければならない。
 - (h) 美的に優れた橋を製作すること。



(3) 実験概要および結果の整理

- (a) 実験当日までに、どのような橋を製作するか検討し、レポート用紙に詳細に設計図 (製作図) を書いておく。そして、レポート用紙に製作する橋を 2 次元的に解析し、どの部材が圧縮か引張りか図示する。また、なぜその形状を選んだのかという理由と、どの部分から破壊すると思うかを記述しておく。
- (b) 設計図に従って橋を製作する。
- (c) 接着剤が乾いた後、橋重量を測定し、載荷装置にセットし徐々に荷重をかけて破壊させる。
- (d) トラス模型の耐荷力に対する重量効率^{1.5}は次式に従う。(橋の重量は 1.5 乗することに注意)

$$\text{重量効率}[A] = [\text{耐荷力}]/[\text{重量}]^{1.5} \quad (1)$$

(4) 製作上の注意

- 載荷点部や支点部の圧壊を防ぐため、部材に補強材を付けるとよい。
- 断面において、ねじれが生じにくくするような補強材を付けるとよい。

- 接着材は適所適量に気をつけて使用すること。引張部には多めに接着剤をつける。

式(1)において分母を1.5乗しているのは、橋梁の重さにも十分に配慮させ、極度に重い橋の製作を抑えるためであり、パデュー大学のコンテスト条件[4]に準じたものです。これらの条件は、文献[4][5]を参考にするとともに、載荷装置の物理的制約と、講義時間内で製作するといった時間的な制約条件を加味して決定しました。そのため、連続した直線状の上・下弦材には1本のバルサ材を用いてトラス橋を製作することを認めています。厳密にはトラス構造ではなくなりますが。

製作に際しては詳細な設計図と、その設計を採用した理由および破壊性状の予測を記したレポートを製作日まで提出することを義務づけています。なお、このレポートでは、各部材に生じる軸力の計算も要求しています。バルサ材は非常に軽い材料であるため、接着剤の重さも無視できません。良いA値を得るためには、部材に作用する軸力の符号や大きさに応じて接着剤の使用量を調整することが重要であり、設計時のみならず橋梁模型製作時においても、軸力分布図は大きな役割を果たします。

2.2 載荷実験および判定結果

コンテストの順位は次式で判定しています。

$$GG = 0.2 \times AE + 0.2 \times SS + 0.6 \times LW \quad (2)$$

AE: 美的評価、SS: 構造上の評価、LW: 耐荷力の重量効率で、AE、SSは[得票数]/[最大得票数]、LWは[A値]/[最大A値]として評価しています。T.A.の学生からLWの係数0.6が大きいので形状が決まると評されましたが、そうすること自体が構造力学がわかってきた証だと考えそのままにしています。

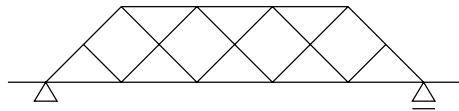
載荷実験の前に、各グループごとに製作した模型に対して、①その形状を選んだ理由、②破壊する部分、③製作模型のPR、④他グループ模型の美的・構造上の評価等を発表させ、学生全員に上記の美的評価および構造上の印象や概念に対して評価させています。

平成10年度に製作された橋梁模型のうち20例を図2および写真1、2に示します。トラスには多種多様の構造形式がありますが、ワーレントラス、ハウトラス形式の橋を多く製作しています。美観を重視して曲弦プラット形式の橋もありました。また構造解析の結果、部材力が0となる部材を取り去った構造形式もあります。実際の橋梁では移動荷重が作用するので部材力が常に0となることはありませんが、本コンテストでは載荷点が固定されているため重量を軽減するには最善の策であると考えられます。また、載荷荷重を分散させ耐荷力の増大を図るため、垂直材および斜材を密に配置したものや、載荷荷重分散と重量軽減化の両面を考慮して載荷点近傍だけ部材を密に配置したものもありました。さらに、補強に際しても全断面を一様に補強するのではなく、接合部を中心に補強するなど重量の軽減化を図った橋梁もみられました。

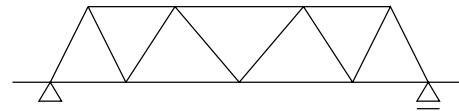
載荷実験結果は構造上の印象や概念に対する評価とはかなり異なる結果となりました。これは、断面変形し横倒れ座屈したものや、接着剤で接合した箇所が壊れることにより引き起こされる場合が多く、破壊に至る過程での製作誤差などの初期不整が大きく影響しているものと考えられます。

参考のため、九州工大で行われたブリッジコンテストの結果の比較を図3に示します。教官同志でも、学会等で「今年は重量効率が200を超えた」とかの話題がでています。

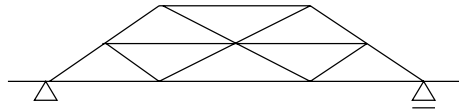
当初、模型製作は1回だけ行っていましたが、T.A.の学生の「2回製作させたときの効果をみよう」との強い意見で、2回の模型製作を実施しました。その結果が図4です。図4は各班の1回目および2回目の重量効率を示したものです。この図から2回実施することの効果が大いことが明確にわかります。



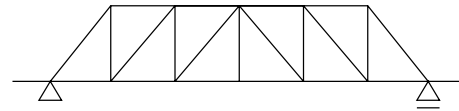
A 班 (1 回目)



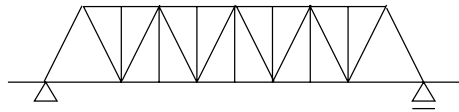
A 班 (2 回目)



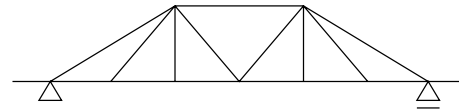
B 班 (1 回目)



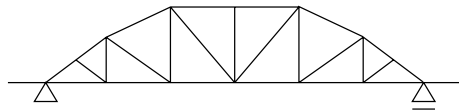
B 班 (2 回目)



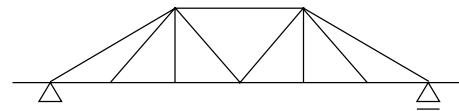
C 班 (1 回目)



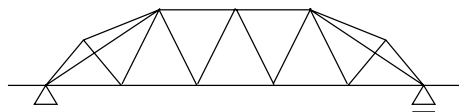
C 班 (2 回目)



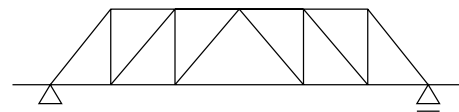
D 班 (1 回目)



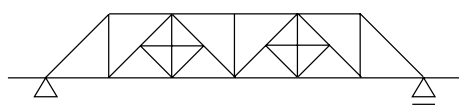
D 班 (2 回目)



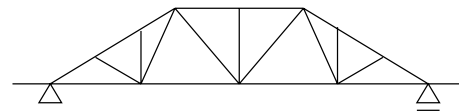
E 班 (1 回目)



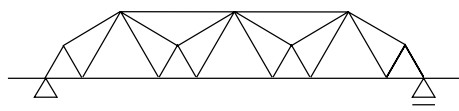
E 班 (2 回目)



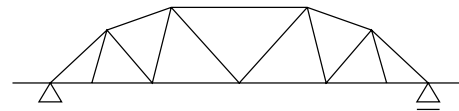
F 班 (1 回目)



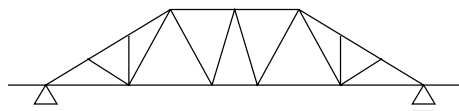
F 班 (2 回目)



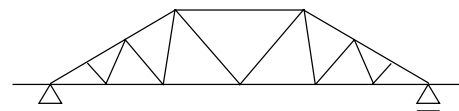
G 班 (1 回目)



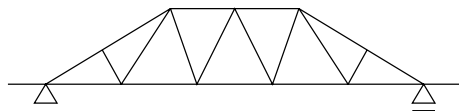
G 班 (2 回目)



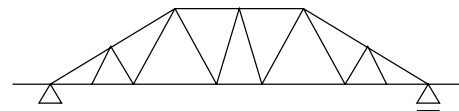
H 班 (1 回目)



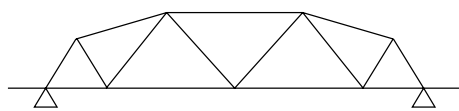
H 班 (2 回目)



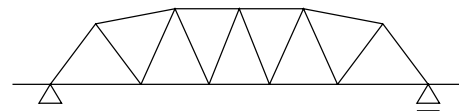
I 班 (1 回目)



I 班 (2 回目)



J 班 (1 回目)



J 班 (2 回目)

図 2 トラス模型



写真 1



写真 2

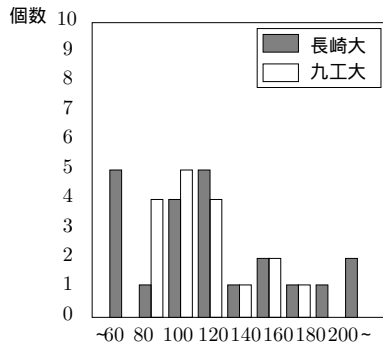


図 3 重量効率 (A 値) 分布

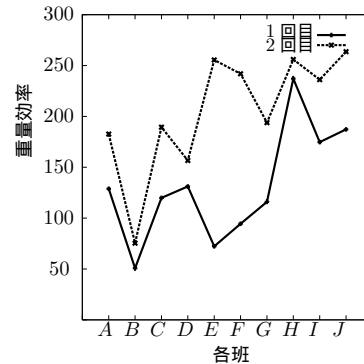


図 4 各班の 2 回の重量効率

3 膜構造の模型製作

構造工学科は、建築、土木、造船、機械の構造工学分野を集めた横割り学科として教育・研究が行われていますが、構造工学科を志望してくる学生は、建築を希望してくる学生が多いようです。土木構造物である橋には、桁橋、アーチ橋、吊橋、斜張橋とありますが、各構造形式の力学原理とスパン長には深い関係があります。一方、三次元的な大空間を覆うドームなどの建築構造物には、膜、シェルといった構造があります。その力学原理はアーチ、ケーブル構造を面的に拡張したものと理解することができます。設計製図の授業で、三次元的な空間構造と張力構造の原理の感覚を体験することを目的として、共同作業による膜構造模型の製作(写真3)を課しています。写真4、5は膜構造の製作風景です。以下に、使用材料と製作順序を示しておきます。

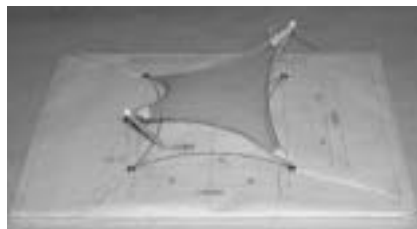


写真 3 膜構造物の例



写真 4



写真 5

使用材料

スチレンボード：1枚、膜：1枚、デザイン用紙：1枚、割ピン：4個、画鋸：10個、支柱(割箸)：2本、糸、両面テープ、針

製作手順

- ① ストッキングを均一に伸ばし 8 箇所ピンで止め、マジックでストッキングに線を描く。

- ② 線に沿って4辺を縫い、三角形の両面テープを4隅、裏表に8枚張る(カバーは取らない)。
- ③ ストッキングの線から5mm外側をカッターで切りとる。(このとき糸を切らないようにする)
- ④ 割ピンを4個所に取りつけ、割箸の先端に画鋸を刺し他端を削ってボードに取りつける。
- ⑤ 糸を割ピン2個所、支柱2個所に取りつける。
- ⑥ 三角形両面テープの上から2/3の所に上糸、下糸を通す。(針で指を刺さないように気をつける)
- ⑦ 余った糸をテープで固定して、無駄な糸を切る。

4 シュツットガルト大学での模型製作の事例

平成11年3～5月の2ヶ月間、文部省海外研究開発動向調査の目的でドイツのシュツットガルト大学を訪問する機会を得ました。

シュツットガルト大学では、山岳地帯のロープウェイ駅舎の設計コンテストが行われていました。設計対象はレストラン、事務所、サニタリー施設を併設したロープウェイの駅舎です。設計条件として、雪荷重、風荷重、ロープウェイの荷重が与えられていました。写真6は1等賞の製作模型です。

写真7、8は、建設設計工学研究所の本棚の上で見つけた模型です。シュライヒ教授を訪問した際、撮らせて戴いたものです。シュライヒ教授はミュンヘン・オリンピック競技場の膜構造の設計、シュツットガルト市内の吊形式橋梁をはじめとする数多くのユニークな橋[6]の設計者として日本でも有名で、コンクリート工学年次大会(横浜)でも招待講演が行われています。シュライヒ教授の研究所と会社のオフィスには、至る所にこのような製作模型がありました。シュライヒ教授は、アイデアが浮かんだら、まず模型製作に取り掛かると話されていました。



写真6 一等賞作品



写真7



写真8

5 授業内容アンケート

学生が、設計製図の授業をどのように考えているか、トラス模型製作によるブリッジコンテスト、および膜構造模型製作をどのように考えているかを調べるために、授業の最後にアンケート調査を行いました。

合成桁の設計では、設計断面が許容応力度内に収まるように設計するためには、クリープや乾燥収縮や温度差による応力度算定など結構面倒な計算を必要とします。それにもかかわらず、「設計はやった方がよい」との回答があるのは、構造工学科の学生が計算することを苦にしない証拠でしょうか。

Hビームの設計・製図では約3割の学生が製図はやらない方がよいと回答しています。実社会でもCAD化が進んでおり、手書きの図面を描くことはなくなってきています。しかし、図面を読むことができるようになるためにも一度は描いた方がよいとの判断のもと製図を課してきましたが、現在は取り止めています。今後、CAD化するなど検討する必要があると考えています。現在、そのための準備段階として、4主桁合成桁橋の設計図面を用いて厚紙による1/40の実教模型製作(ブリッジコンテスト当日、会場に展示する予定です)を課しています。CADと

FEMを統合したCAEの授業ができればと考えています。トラス橋の製作・実験の実施、および膜構造の模型製作に関しては、高い評価を得ています。学生が提出したレポートには、以下のような記述がありました。

(1)ブリッジコンテストの感想

- どうすれば耐力が増すかを考えることは楽しい時間であって、模型製作の1週間は様々なことを考えた。
- 2回の製作で、前回の反省や他班の良い箇所を取り入れたり、設計と製作の面で考える機会ができた。実験では予想外の破壊結果となり、その原因を討論し貴重な時間ももてた。
- 同一部材からなるのに様々なアイデアやセンスのある橋ができていた。製作上の丁寧さも耐力に大きく影響した。
- 耐力実験ではどの程度の強度があるのか緊張感を感じた。
- 製作したトラス橋には愛着が湧いて破壊された時には切なさがかみあげてきた。構造力学の大切さを実感した。
- トラスの耐力実験を通して、溶接工学や構造力学などとの関連性が大きいことを再認識した。
- とても楽しかった。できれば構造力学の講義でトラスを習った頃にやればもっと学校が好きになったかもしれない。
- グループワークであったため、班員の意見や考えを評価し合い、実力を高め合うことができた。
- 最初はさっさと作れば一週間で楽になると考えていた。いざ製作段階になると細部にまで拘るようになった。
- トラスの製作を通じて、これまで交流のなかった人との交流ができた。
- 班員全員で議論し、参考書をひっぱり出して調べたことは有益だった。
- 横倒れ防止の方策をもっと慎重に考えるべきだった。
- 美観、構造ともに得票数が多かったが、重量効率で皆の期待を裏切ってしまった。製作の丁寧さが強度に反映することを実感した。

(2)膜構造の製作の感想

- 膜材が変形するので安定させるのに苦労した。最適な引張り具合はどれくらいかなと思った。
- 不安定な膜に張力を与えることで安定化するのは、作っていて興味が湧いた。左右のバランスを考えて作るともう少しきれいな形になるのではと思った。今度、暇なとき、自分で大きなものや別の形で作成してみたい。
- 糸を強く引張りすぎたため形が角ばってしまった。
- 平面曲面構造論で習った応力計算を模型と結びつけて考えていきたい。
- 今までなじみのなかった膜構造を作成してみて、自由度が大きい曲面構造物に興味をもった。
- さまざまなものに膜が使われているが、あまり安全でないような気がしていた。しかし、張力を与えることで安定した構造物となることがわかった。楽しみながら理解できたので大変よかったと思う。
- アホな間違いをしたため時間がかかってしまった。その分膜構造についてはほかの班より理解できたはず。
- 詳しいことはわからないけど、引張りには強いが圧縮には抵抗しない膜材料も、引張り力を導入することで安定した構造になることが理解できた。
- 以外と簡単にできたが、膜の張り方がピンと張った方がいいのか、少し緩めに形を保つ程度でいいのか悩んだ。
- 形状がきたなくなってしまった。隣の班がきれいに仕上げているので見劣りした。
- 膜曲面は美観がいいと思った。しかし、製作では張力の導入に注意して慎重に作業する必要性を実感した。
- 膜の張力が均一になるように張ることが意外と難しいことを知った。

6 あとがき

授業では、「軽くて強く、かつ見栄えのよい橋梁模型の作成」という課題を学生に与えています。しかし、「良い」橋梁模型を作成するための明確な方法が存在するわけではありません。学生は構造力学などの講義で学んだ知識をもとに、自らアイデアを出し、創意工夫を施して橋梁模型を設計・製作します。ブリッジコンテストをはじめて8年が経過しましたが、製作された橋梁模型、またその設計に至った思考プロセスは多種多様であり、本取組みは学生の創造性育成に大いに寄与しているものと思われま

平成 15 年度の長崎県の高校生ものづくりコンテストの橋梁模型部門の審査員として参加しました。詳細は「ものづくりアイデアコンテスト in 長崎」の講演会でご紹介されると思います。作品の中で佐世保工業高校の生徒の作品に目がとまりました。それは、構造形式としてはサスペンションとアーチがそれぞれの利点を発揮しながら、端部で水平反力を相殺する、いわゆるサスペンアーチ構造を用いた橋でした。別府市にあるイナコスの橋を思い浮かべ、軽快さと重量効率と美観はベストだなと考えながら、「この橋のモデルとなった橋はありますか」とその生徒に尋ねましたところ、「何度も製作して壊しているうちに、この構造が強いということがわかりました」と話していました。高校でアーチやサスペンション構造などの力学原理は習っていないはずなのにと感心しました。そう言えば、現代のように数学や物理などの科学が発達していなかった古代ローマ時代にもガールの水道橋などのように現代の工学理論で造った橋と十分に競合できる橋が造られ、今でも現存しています。2000 年後の西暦 4000 年には明石海峡大橋はどうなっているだろうとふと考えてしまいます。

現在、ブリッジコンテストは構造工学科 3 年生を対象として、授業中の限られた時間で実施しているため、トラス橋のみを製作させています。将来的には、自由な形式の橋も取り入れ、1 年生から大学院生まで、さらには他学科の学生まで広げたコンテストが行えたらと考えています。ブリッジコンテストは熊本大学でも行われており、崎元先生も『いずれ、九州大会、全国大会が開けないかと夢見ている』と橋梁と基礎 [7] に書いておられます。

最後に、最近印象に残った言葉を掲載してむすびにしたいと思います。工学教育を考える上で、創造工学センターの発展に向けて、また、国立大学法人化の未知の道を進んでいく上で相応しい言葉だと感じました。

若し工学が唯に人生を繁雑にするのみものならば何の意味もない事である。是によって数日を要する所を数時間の距離に短縮し、一日の労役を一時間に止め、人をして静かに人生を思惟せしめ、反省せしめ、神に帰るの余裕を与えないものならば、吾等の工学は全く意味を見出すことはできない。

廣井勇 (札幌農学校、東京帝大教授、6 代土木学会会長)

(土木学会誌 Vol.89-1,2004 高崎哲郎氏「博士号と専門分野」より抜粋)

本来、創造行為は他人に教えられない。創造とは終(つい)に個人的営みでしかなく、ほんの少しの手助けさえ拒むものだ。だが、創造する姿勢、志を伝えることはできる。天才は必要でない。常識に縛られるな。粘っこく人間を追求し、無人の広野に向かって走り出す勇気を持って。

(今村昌平「私の履歴書」 日経新聞 2003/12/31(朝刊))

参考文献

- [1] AISC : 1995 Steel Bridge-Building Competition、AISC、1995。
- [2] 松田浩・崎山毅ほか：構造設計製図でのブリッジコンテストの試み、長崎大学工学部研究報告、第 27 巻第 49 号、pp.253-259、1997。
- [3] 山口栄輝ほか：コンテスト形式の構造工学実験、土木学会年次学術講演会講演概要集 (CS)、pp.216-217、1996。
- [4] Purdue Student Chapter of ASCE : The 14th Annual Bridge Model Contest, 1995。
- [5] 春日昭夫：トラスは強し、橋梁と基礎、93-8、pp.112-113、1993。
- [6] 上阪康雄・松田浩：橋のお国事情、ドイツ - シュライヒの橋を中心に -、橋梁と基礎、99-11、pp.41-49、1999。
- [7] 崎元達雄：大学における構造系の教育について、橋梁と基礎、2000-7、p.1、2000。