

極東アジアの木造屋根構造における「トラス度」の数値的推定*

Numerical Estimation of "Truss Likeness Factor" of Wooden Roof Structures in Far East Asia

小川直紀**・二宮公紀***・馬場俊介****・樋口輝久*****・羅平平*****

By Naoki OGAWA, Kouki NINOMIYA, Shunsuke BABA, Teruhisa HIGUCHI and Pin-Pin RA

土木史学における構造物の技術史という問題を考えると、石造アーチ橋については数多くの研究がなされ、アーチの建築への応用であるヴォールト天井については、さらに多くの研究がある。こうした研究成果を使えば、アーチ構造については編年的にその変化・発展過程を辿ることができる。しかし、アーチと並んで人類が発見したもう一つの重要な構造要素であるトラスについては、土木、建築の両サイドとも、これまでほとんど研究がなされてこなかった。もちろん、19世紀以降の木鉄混合トラス、鋼トラスなどの歴史は詳しく分析されているが、それ以前の木のトラスについては、ほとんど何も行われてこなかったと言っても過言ではない。

本論文では、トラス史の解明の第一歩として、その最も単純な構造である「叉首」構造に着目し、建築の分野では、極東アジアで最初のトラスと言われている「叉首」構造が、どれほど真のトラスに近いものなのかを、数値解析を用いて解明しようとする。本論文の内容は建築物（寺院の屋根）と、一見土木とは無関係だが、今後、世界の各時代、各地の屋根や橋について、同様の分析を進め、近代トラス誕生に至るまでのトラスの発達史を構築していきたいと考えている。

1. はじめに

トラス構造は、古代ローマの屋根構造や橋に使われたという説と、少なくとも、橋には使われなかったのではないかという説がある。石アーチにあればほど巧みだったローマ人が、木のトラスを知らなかったのか、知っていた造ったにせよ、朽ちて消えてしまっただけなのか、トラスが木で造られる以上、現物が残っていないだけに証拠は何もない（AD180年のマルクス・アウレリウス帝の蛮族平定記念柱のレリーフが唯一の証拠だが、ここからは、知っていたとも、知らなかったともいう曖昧な結論しか得られない）。古代から中世にかけての木のトラスの研究が、土木界だけでなく、建築史の分野でさえほとんど顧みられてこなかった背景には、この「現存していない」という制約が大きな壁になってきた。

著者らは、世界の各種の構造物の技術史を解明しようとする中で、この中途半端な状況に置かれた木造ト

ラスに対し、いざだちと同時に大きな興味を抱いた。土木の分野でも、木のトラスは、レオナルド・ダ・ヴィンチが描いた「木トラス橋」（1490年頃）や、パラディオのチズモン川橋（1552年）で突如歴史に登場し、グルーベンマン兄のリュムラングのグラット橋（1766年）でも、“ハウ・トラス”風の木組みが組み込まれている。

一方、建築物に目を転じれば、教会の屋根を中心に4・5世紀頃からトラス風の木組みが使われるようになり、日本でも、法隆寺の回廊の叉首屋根（8C前半）や、新薬師寺の本堂の叉首屋根（747年）が、現存する最も古い“トラス”構造だとされている。日本は、その後、理由は不明だが（屋根のスパンの巨大化か、技術の伝承の失敗か）、平安中期以降は寺院の叉首屋根は姿を消し、力学的に見れば不利な構造であるにもかかわらず、和小屋組（梁）構造にとって変わられていく（叉首屋根は一部の近世民家や、合掌造りの大屋根に残る）。日本の叉首屋根は、日本独自の発想であるというよりは、東アジア全体での発展過程の一時期を担っていたと考えるのが自然であるが、定説はない。もし、日本が叉首を真似たとすれば、中国か朝鮮半島しかないが、いずれの国にも、古い木造建築は現存していない。知り得る最古の叉首屋根は、本論文で取り上げる佛光寺大雄宝殿（中国、857年）と、

* Keywords: トラス構造、極東アジア、技術史

** 岡山大学大学院環境学研究科博士前期課程
(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

*** 正会員 博士(工学) 鹿児島大学工学部准教授

**** 正会員 工学博士 岡山大学大学院教授

***** 正会員 博士(学術) 岡山大学大学院助教

***** 岡山大学大学院環境学研究科博士前期課程

浮石寺祖師堂（朝鮮半島、1377 年）である。

こうしたトラスが、今日のような力学的に合理性のある構造要素として登場するのは、ようやく 19 世紀に入ってからで、それでも、初期のタウン・トラス（1880 年）、バー・トラス（1884 年）、ハウ・トラス（1885 年）、ホイップル・トラス（1874 年）は完全なトラスではなかった。改良型のハウ・トラス、そして、改良型のプラット・トラスが出て、ようやく真のトラスの誕生に至る。

著者らが目指す研究の対象は、こうした一連のトラスを、時代と、地域、対象構造物によって分類・評価することにある。そこで、“何が本当のトラスか” が分からない状態で、トラスとしての位置づけを客観的に行う方法として、ここでは単純な数値解析手法を応用することにした。すなわち、主構造の一部に三角形要素を含むような構造物を対象に、はり要素（微小変形、弾性）を用いた FEM 解析を行い、断面に発生する軸力、曲げモーメント、せん断力の分布状況を知り、その結果から「トラス度」を表すパラメータを抽出しようとするものである。単純な 1 次元はり要素で、本論文で扱うような複雑な屋根構造が、十分な正確さで解析できるかどうかという疑問はあるが、部材の細長比から考えて、3 次元アイソパラメトリック要素を用いる有意性はほとんどないこと、奥行き方向の連成は不連続、かつ、平行に配置された木構造の場合、トラスかどうかの判定にまで影響を及ぼす可能性はないことから、結果に大きな相違は生じないものと判断した。

なお、本研究は今後、欧米を中心とした世界各国へとその研究範囲を広げていくつもりである。本論文はその一端として、日本及びその近隣諸国である東アジア地域に研究の範囲を限定した。この地域では、木のトラス橋の存在を確認できず、分析の対象を寺院建築に限っている。しかし、本研究の目的は、あくまでトラス構造に主眼を置いた土木技術史の確立であり、決して、東アジアの寺院における小屋組の建築様式を調査することが目的ではないということを、改めて明記しておきたい。

以下、第 2 章では、分析及び解析の概要として、又首組について説明するとともに、本論文で分析の対象とした構造物の選定理由を述べる。

また、第 3 章では、各構造物が建立された歴史的背景、及び各構造物の小屋組についての概説を述べるとともに、各構造物における数値解析データをグラフで示し、各々の構造特性を考察する。

その解析結果に基づいて、第 4 章では、分析の対象とした構造物に対して「トラス度」の分析を行う。

2. 分析の対象と方法

本論文では、極東アジアの原初的トラス構造と言われる、「又首」（合掌造を含む）を、主な分析の対象とした。

又首の、発祥の地や年代は不明であるが、極東アジアでは、かなり古い時代から寺院等の屋根構造として用い

られてきた。日本においては 8 世紀にはすでに一部の寺院で使用され、9～10 世紀にはすぐ姿を消すが、17～19 世紀には一部の民家の屋根として使用されていた（平安中期～江戸期の日本の主流は「和小屋組」）。

又首の当初型は、図-1 中央上部の濃灰色に塗りつぶした部分が示すように、三角形の構造要素を持った「二材を山形に組み合わせたもの¹⁾」の総称である。「梁の上に組んで、棟木や母屋を受ける構造、また、人文字に組んだ屋根の骨組み²⁾」とも言い表される。

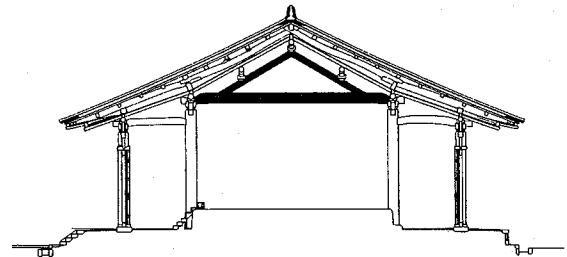


図-1 又首組

（出典：「本堂梁行断面図」³⁾に加筆・修正）

この又首組を含む中世以前の構造物として、今回、分析の対象としたのが、表-1 に示す 3 件の建築物である。これらの構造物は、それぞれの国で、現存する最古の又首組の建築物とされているものである。以後、「分析対象構造物」とは、これらの建築物を指す。

表-1 分析対象構造物 1

構造物名称	地域	完成年代
新薬師寺本堂	日本	747 年～780 年
佛光寺大雄宝殿	中国	857 年
浮石寺祖師堂	朝鮮	1377 年

本論文では、これら以外にも、分析対象構造物と比較することを目的に、以下の 4 件の建築物・構造物を分析の対象とする。

表-2 分析対象構造物 2

構造物名称	地域	完成年代
東大寺本坊経庫	日本	8 世紀第 2 四半期
柳井醤油醸造蔵 1	日本	1880 年以降
柳井醤油醸造蔵 2	日本	1880 年以降
鋼ワーレントラス	日本	現在の標準設計

4 件のうち、上 2 棟は、又首組の対極にあるとされる「和小屋組」の例である。東大寺本坊経庫は、新薬師寺本堂とほぼ同年代の建立であるため、分析対象として選んだ。両者の建築物が造られた時期は、又首組と和小屋組が共存した稀な時期であり、両者が共存できたということは、当時の建築主・施工者にとって、構造上、大きな差はないと考えられていたものと推測できる。

次の 2 件としては、近代の民家建築を選択した。それ

らは、山口県柳井市の稲田家所有の柳井醤油醸造蔵（2棟、1880年以降）である。この醤油醸造蔵は、同年代の建物でありながら、1棟が和小屋組、もう1棟が洋式トラスによる屋根構造を有している。特筆すべきは、これら2棟の建物が、大きさも規模も同程度で、なおかつ同じ敷地の中に並んで建てられていることである。この、同規模・同時期・同地域でありながら、別種の屋根組を持つ2つの建物を分析・比較することで、非トラスと、純トラスによる違いを、より明確に示すことができると考えたのが、選定理由である。

最後に、本論文が、最終的には、世界のあらゆるトラス（当然、木橋を含む）の分析にあることから、分析はあらゆる形態のトラスに対しても有効でなければならない。そこで、表1と対極にあるものとして、形態も材質も異なる、現在の標準設計下での鋼ワーレントラスを解析対象とした。以上の4件を「指標構造物」と呼ぶ。

以上合計7件の構造物の解析データを比較することで、「又首組」、「トラス構造」、「和小屋組＝梁構造」の三者に固有の力学的特徴を表現できるようなパラメータとして、「トラス度」を提案する。そして、極東アジア特有の又首組が、トラス構造とどの程度似ているのかを、分析・結論付けようと試みる。

3. 各構造物の概説

(1) 分析対象構造物の概説

本節では、本論文において「トラス度」の分析対象とする又首組を有する3棟の分析対象構造物について、以下、a)～c)の小節で、その建立の背景や屋根構造の断面図等を示す。

また、本文中で使用する建築史特有の用語については、図-2を参照されたい。

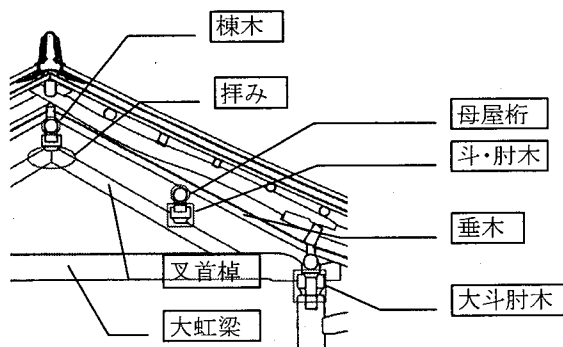


図-2 又首組、各部材名称図
(出典:「本堂梁行断面図」⁴⁾に加筆・修正)

a) 新薬師寺本堂

新薬師寺は、聖武天皇の眼病平癒祈願のため、747（天平19）年、光明皇后により建立された寺院である。780（宝亀11）年に西塔に雷が落ち炎上、現・本堂のみが焼失を免れた⁵⁾。この本堂の、創建当初の使用形態については確定していないが、食堂であったという説が最も一

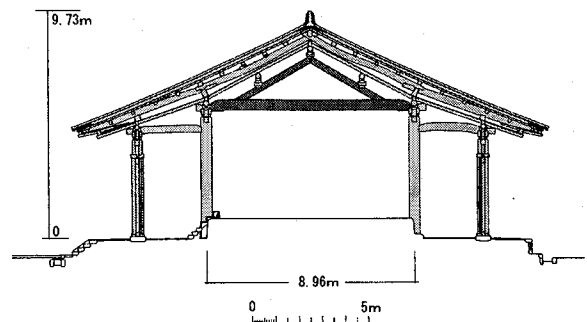


図-3 新薬師寺本堂断面図
(出典:「本堂梁行断面図」⁶⁾を修正)

般的である。

本堂は国宝にも指定されており、建物自体の創建年は明らかではないが、その様式からして奈良時代、特に天平末期（～748年）の建造と考えられている（ということは、建立時のものということになる）。入母屋造、本瓦葺きの低平な印象の堂であり、内部は土間のままで、天井を張らず、垂木などの構造物をそのまま見せる「化粧屋根裏」になっている⁷⁾。屋根構造を詳細に記述すれば、大斗肘木に長い大虹梁を架けて又首を組み、中間の1ヶ所に母屋桁を受ける斗・肘木が載り、又首の杵みにも斗・肘木を載せて棟木を受ける⁸⁾、構成をとっている。

b) 佛光寺大雄宝殿（フーグワンズー、ダーシュンノウディエン）

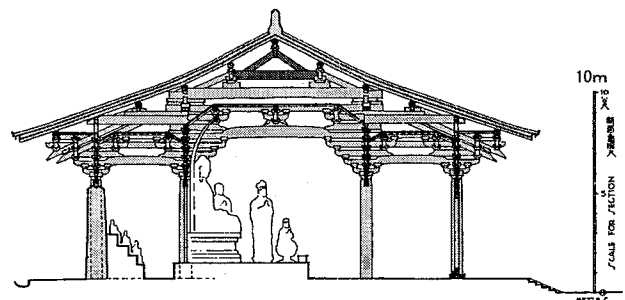


図-4 佛光寺大雄宝殿断面図
(出典:「山西五台山佛光寺大雄宝殿断面及平面」⁹⁾を修正)

佛光寺大雄宝殿は、山西省五台県の東北にある五台山に位置し、唐後期の857年に建立された「中国国内に現存する最古」の木造建築である¹⁰⁾。その内部構造は非常に複雑で、梁や斗が何重にも重なった特殊な構造をしている。

屋根構造の上部にだけ注目すると、二重梁に似た構造で、上部の梁両端に斗組と斜め部材が入る。又首は上部の梁の上に組みまれ、又首の杵みに斗を設け棟木を受けている。

c) 浮石寺祖師堂（フクサ、ソサダン）

韓国の榮州市浮石面北枝里鳳凰山の麓に位置する浮石寺は、統一新羅が誕生した676年に、名僧の義湘大師が文武王の命に応じて創建した華嚴宗の根本道場で、韓国10大名刹の一つである。高麗時代初（10世紀初）に

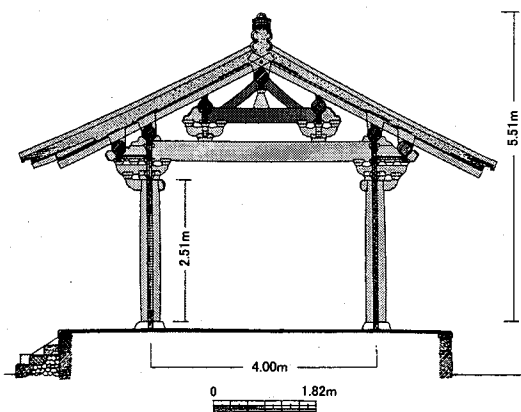


図-5 浮石寺祖師堂断面図
(出典:「浮石寺祖師堂架構図」¹¹⁾を修正)

戦災で焼失されたのを、1041年に円融国師が再建したと伝えられている。

祖師堂は国宝第19号に指定されており、高麗末期の1377年の創建とされる。その屋根構造は、大虹梁に2つの斗を設けて二重虹梁とし¹²⁾、二重虹梁上部の梁に垂直方向下に沿って部材幅を広げる特殊な叉首束(叉首の中心に垂直に立つ束材)を立てて叉首を組んでいる。

(2) 指標構造物の概説

本節では、「指標構造物」として構造解析の対象とした東大寺本坊経庫、柳井醤油醸造蔵2棟、鋼ワーレントラス橋(標準設計)について、それらの基本的情報を提示する。

a) 東大寺本坊経庫

東大寺本坊経庫は、国宝にも指定されており、東大寺南大門の東脇築地の内側、旧東南院の跡地、現在の本坊のある一画に建つ校倉である。創建時は油蔵の宝蔵で、1714(正徳4)年に現在の位置に移築された。創建年代は明らかではないが、その様式から、奈良時代、特に天平時代の建立と考えられている¹³⁾。

経庫の屋根構造は、典型的な和小屋組であり、一番下の太い梁が、曲げモーメントを受ける構造である。詳細に述べれば、まず大梁を梁行に2通りを上から2段目の校木に載せ、大梁から側面校木の上より2段目に各面2丁の繫梁が入る。そして大梁上に束を立てて二重梁とし、

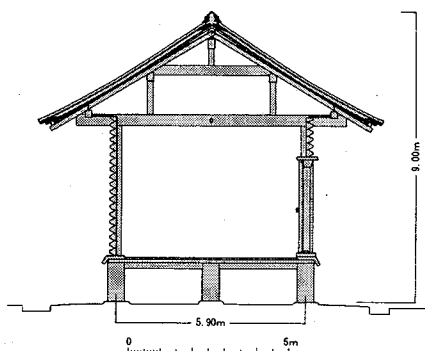


図-6 東大寺本坊経庫断面図
(出典:「竣工梁行断面図」¹⁴⁾を修正)

繫梁中間に梁行の束踏が載るが、これは2丁とも当初の転用材で、この上に3ヶ所束を立てて母屋桁を四面に廻している。二重梁上に棟束を立て棟木を受け、寄棟造の隅木を架けている¹⁵⁾。

b) 稲田家柳井醤油醸造蔵(2棟)

柳井醤油の醸造蔵を有する稲田家は、山口県柳井市の重要伝統的建造物群保存地区である古市・金屋の地域外に位置しているが、この地区は江戸末・明治にかけて建造された白壁の町家群が集中して残存し、稲田家の柳井醤油醸造蔵もその一翼を担っている。分析対象とした醸造蔵2軒は、稲田家主屋の両隣に位置し、その完成年代はいずれも明治期(1880年以降)と考えられている¹⁵⁾。

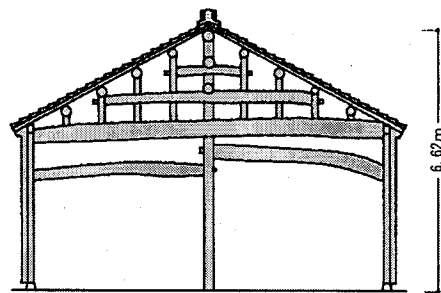


図-7 和小屋組断面図
(出典:「断面図」¹⁷⁾を修正)

まず、図-7の蔵は、梁と束部材を主体とする典型的な和小屋組で造られている。詳しく見れば、下屋庇をもたない形式で、長い梁を両側に渡し中央に設けた柱で梁を受けている。これは、下屋庇を設けることが一般的な柳井では、特殊な部類に入る¹⁸⁾。

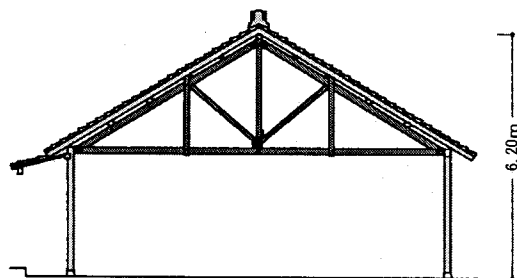


図-8 洋トラス組断面図
(出典:「断面図」¹⁹⁾を修正)

図-8の蔵は、同年代の築造でありながら、屋根構造に洋トラス構造が採用されている(弦材の内側に斜材と垂直材等の腹材を配置した典型的な洋風の小屋組)。本格的なトラス組であり、上記の図-7よりも若干広い幅がありながら、中間柱で支えることなく、しかも、格段に細い部材(トラスの下弦材)を使って、広い空間を支えている。本格的なトラス組の力学的合理性を端的に示すだけでなく、和小屋組の非合理性(美的、民族的、伝統的な視点とは別のもの)をも示している好例、と言えよう。

c) 鋼ワーレントラス橋

本研究が、将来、いろいろな形式のトラスの判定に耐えられるような「トラス度」を提案できるかどうかの、いわば試金石として導入した構造体。いっそ、19世紀後期のピン結合のプラットトラスをとも考えたが、二次応力の発生を許容した普通の鋼ワーレントラスを解析対象とすることにした。

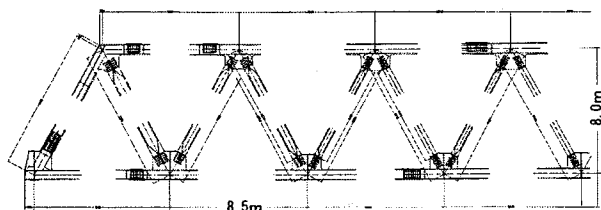


図-9 鋼ワーレントラス橋の設計図
(出展:「トラス橋設計図」²⁰⁾を修正)

ここで使用したワーレントラスは、『橋梁工学』¹⁹⁾書中の付図:トラス橋設計図に記されている事例である。道路構造令第35条の第3種1級(ただし、歩道橋を設けない場合)に基いた設計例であり、支間68.0m、幅員車道幅7.0mの両側に路肩部0.75mをとった橋梁である。

4. 各構造物の数値解析結果

(1) 数値解析の方法

はり要素を、木造建築の断面図の構造解析に適用するにあたり、いくつかの工夫や仮定を導入したが、以下その内容について簡単に説明しよう。

①はり要素を用いた構造解析の精度は、主として要素数と節点番号の付け方によって左右される。要素数は、解析に先立って、解析結果の数値がほぼ収束するまで細分化した。節点番号は、全体行列のバンド幅が最小になるよう配慮して付けた。

②解析対象の範囲、屋根構造だけでなく、建築物の断面全体とした。トラス橋であれば、支承上のトラス部だけで十分だが、木造構造の場合、屋根と柱が一体となって挙動するためである。

③柱の基礎部分の境界条件は、水平・鉛直方向を固定、回転は自由とした。時代が下ってくれば、回転はある程度拘束されるようになるが、拘束の度合いが不明なため、すべてのケースで回転自由とした(この仮定の過程の妥当性については、後述)。トラス橋の場合は、支承部で回転自由の他、定石通り、片端を水平移動自由とした。

④断面積、断面2次モーメントは部材の各要素の中央値を用いた。長さ高さについては、断面図から読み取ったが、奥行き方向の幅について記載のない場合は、著者独自の方法で仮定した(構造物の規模や他の部材の大きさ等を考慮した上で、部材同士の比較を行い、幅を割り出した)。また、材料定数(ヤング率E)については、鋼トラスを除き、木構造はすべてヒノキ材と仮定した。材料定数の差は、強度には大きく影響するが、弾性範囲

内での、断面内の応力分布にまでは大きく影響しないと想定されるからである。使用した具体的な数値は、 $E = 10192 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ²¹⁾である。

⑤荷重として構造体に作用するのは、瓦等の被覆材による死荷重と、木材の自重とした。このうち、個々の瓦の重量は全く不明なため、ここでは、文部省の「重要文化財(建築物)耐震診断指針」²²⁾を適用して、本瓦葺については、床面積当り 3300 N/m^2 、柳井の2棟については、棧瓦葺 1300 N/m^2 を準用し、奥行き方向の柱間隔に相当する幅の全重量を屋根材に載荷させた。瓦の積載荷重と、木材の自重のバランスが、計算結果に誤差を与える可能性はあるが、圧倒的に前者の方が大きいため、弾性範囲内での断面力比較だけなら、大きな問題はないと考える(この妥当性については、後述)。なお、ヒノキ材の質量を算出する際、比重値は0.44²³⁾を使用した。

(2) 分析対象構造物の構造解析結果

本節では、又首系の屋根構造の各部材に作用する「トラス」的な力、すなわち、軸力と、「非トラス」的な力、すなわち、曲げモーメントとせん断力について、3つの分析対象構造物について、その分布状況を示す。建物の主構造はラーメンなので、ここでは、柱や、付属的な構造を除いた屋根構造に絞って、断面力の分布状況を見ている。

a) 新薬師寺本堂

上述したように、構造解析は全体構造について行ったが、ここで示すのは、図-10のように、主柱で挟まれた部分の屋根構造に限定する。

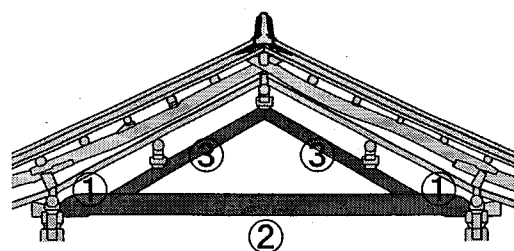


図-10 新薬師寺本堂、屋根構造の部材図

次ページの図-11には、上記図の①②③に該当する部材に生じる3種類の断面力(軸力◆、曲げモーメント▲、せん断力■)を、3つに分けて表示している。このうち、①は、「又首」のトラス部と、柱の間の梁であり、結局、①と②は同じ部材であるが、斜材である②が梁の端でなく途中にあるため、①の部分が派生している。なお、図-11の①には、図-10の①の左側部分と右側部分が一緒に描かれている(中央で、左右に分かれる)。

図-11を見ると、①と、②③とが、全く異なる性状を示していることが分かる。すなわち、①は曲げと軸力が卓越した完全な「梁」であり、一方、②と③は、軸力の方が卓越した「トラス」(②が引張、③が圧縮)である。この混在が、新薬師寺の又首構造の特徴と言える。

b) 佛光寺大雄宝殿

佛光寺の屋根組は、新薬師寺と同様、又首束（垂直材）の入らない、最も古いタイプの又首組である。ただし、新薬師寺と違う所は、又首を二重の梁で支えている点である。構造が複雑な分だけ、部材番号は①～⑥までと倍増した（図-12参照）。このうち、図中で分かりにくいのは③で、これは、梁①の中間に載った柱である。

この屋根構造の断面力図は、下の図-13に示す。図によれば、①と③の部材以外は、④を含めて「トラス」的な状態となっていることが分かる。①でも、軸力が卓

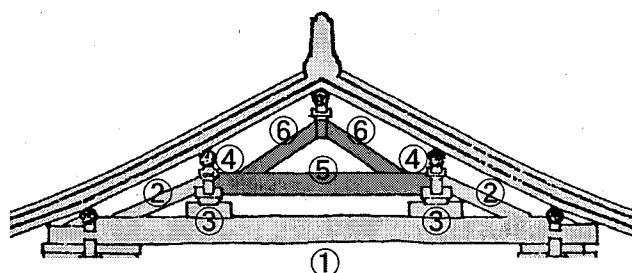


図-12 佛光寺大雄宝殿、屋根構造の部材図

越している部分があり、総じて見れば、新薬師寺よりも、トラスに近いような挙動を示している。

c) 浮石寺祖師堂

浮石寺の屋根組は、新薬師寺、佛光寺と異なり、又首束の存在が大きな相違点となっている。この又首束は、古代の又首組の発展過程の中で必ず表れるものである。

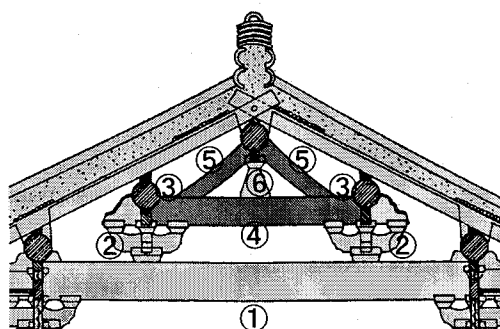


図-14 浮石寺祖師堂、屋根構造の部材図

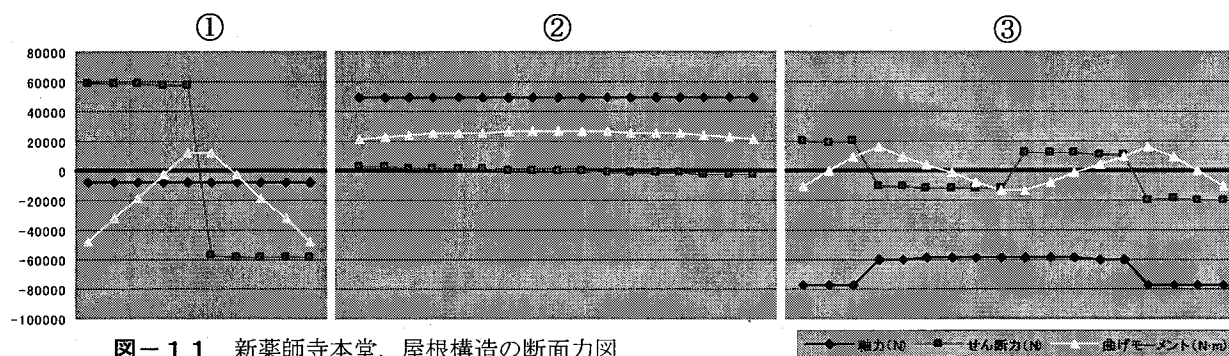


図-11 新薬師寺本堂、屋根構造の断面力図

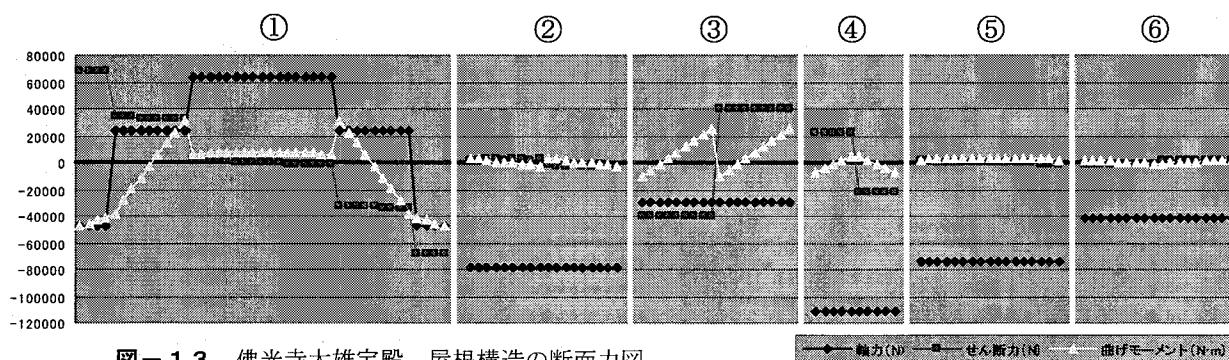


図-13 佛光寺大雄宝殿、屋根構造の断面力図

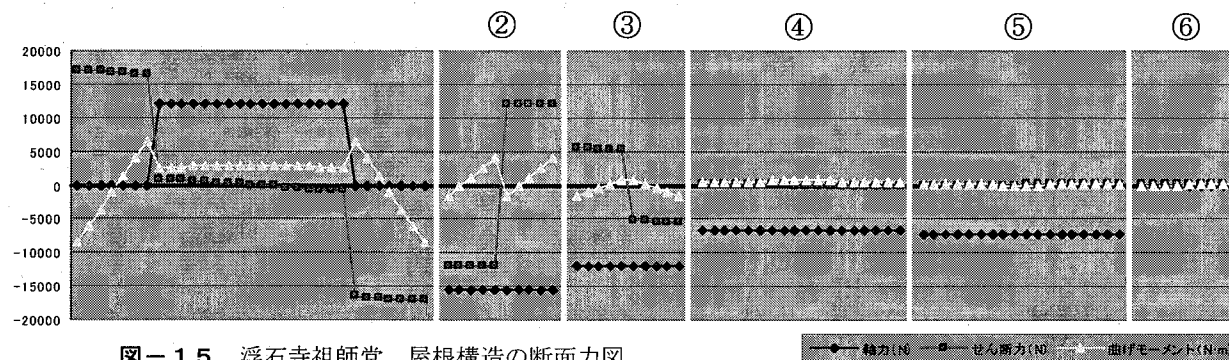


図-15 浮石寺祖師堂、屋根構造の断面力図

この、叉首組の発展形に対する断面力図（前ページの図-15）の特徴は、意外なことに、叉首束の有無ではなく、佛光寺にあった第2斜材（図-13の②）の欠如の影響の方が、はるかに大きいことであった。すなわち、叉首束の断面力がほぼゼロであるのに対し、第2斜材がなくなった分、一番下の梁①は、より「梁」的になり、その一方で、柱②は垂直力を支えるため、軸力が卓越する形となった。全体として見れば、新薬師寺よりは、「トラス」的であるが、佛光寺とは別の挙動を示している。

(2) 指標構造物の構造解析結果

本節では、指標構造物として解析を行った東大寺本坊経庫、柳井醤油醸造蔵2棟（和小屋組、洋トラス）、鋼ワーレントラス橋（標準設計）について、断面力図を算出し、(1)の特性と比較することで、各構造系の持つ力学的な特徴について考察する。

a) 東大寺本坊経庫

東大寺の屋根構造の部材図を、図-16に示す。和小屋組の原型とも言える、非常に単純明快な構造が採用されている。いわゆる、梁と柱の連成構造であり、トラス

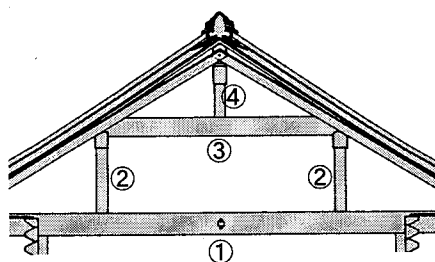


図-16 東大寺本坊経庫、屋根構造の部材図

の要素は微塵も感じられない。

しかし、断面力の値を示した図-17では、その印象は100%継承されてはいない。すなわち、柱②と④は、当然のことながら、屋根荷重を支えるため、軸力が異様に大きな値を示す。そのため、それを図に示せば、あたかも「トラス」のように、軸力の卓越した部材となるのである。一方、すべての荷重を支える梁①は、軸力はほぼゼロ、曲げモーメントとせん断力の卓越する状況ではあるが、左右の柱②の間の部分では、「トラス」的な傾向が現れている。

b) 柳井家柳井醤油醸造蔵

東大寺における和小屋組の原型を極度に発達させた典型が、図-18に示す柳井醤油の蔵の屋根組である。近世の民家建築特有の巨大な梁も採用されている。

この断面力分布を示すのが、図-19である。太い梁①には大きな曲げモーメントとせん断力が働いているが、それに拮抗するほどの軸力も存在している。また、柱材④～⑧では、いずれも、軸力が卓越している。それゆえ、結果として、期待したほど明確に、「梁-柱」構造らしい断面力図は得られなかった。

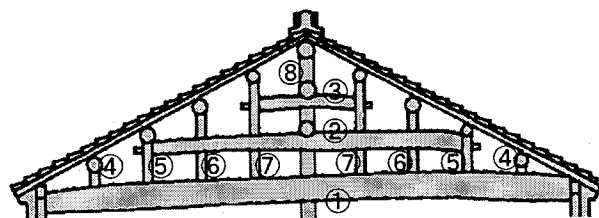


図-18 柳井醤油（和小屋組）、屋根構造の部材図

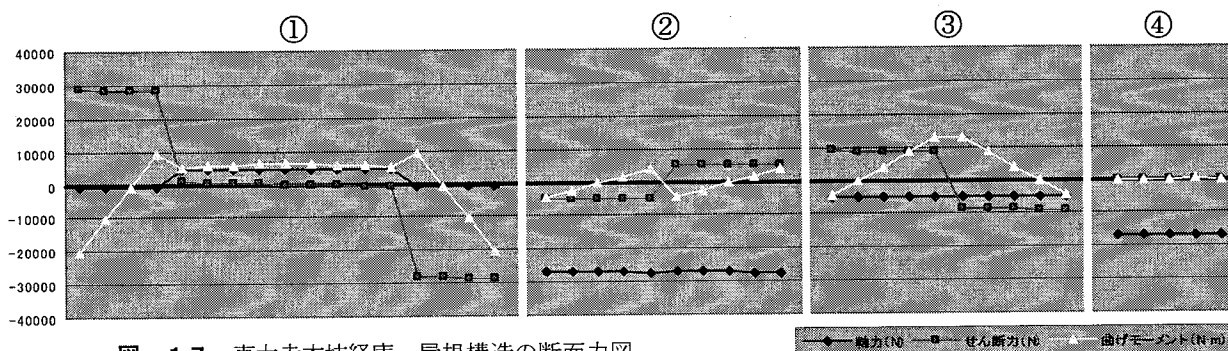


図-17 東大寺本坊経庫、屋根構造の断面力図

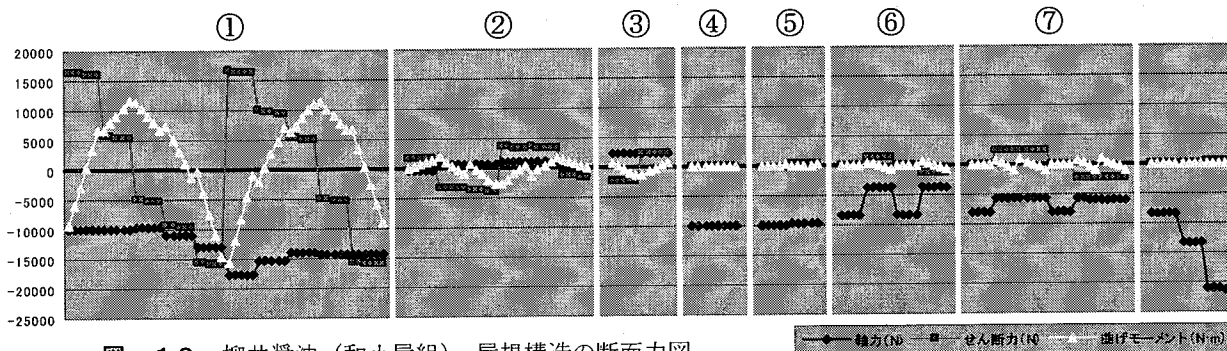


図-19 柳井醤油（和小屋組）、屋根構造の断面力図

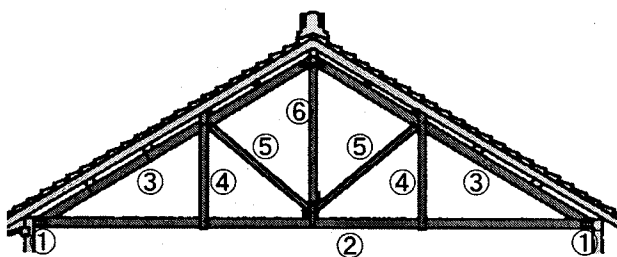


図-20 柳井醤油（洋トラス）、屋根構造の部材図

同じ柳井醤油の蔵でも、上の図-20のように、本格的な洋トラス組の屋根を持つ蔵も、同年代に造られた。この構造の断面力図を、図-21に示す。下弦材にあたる

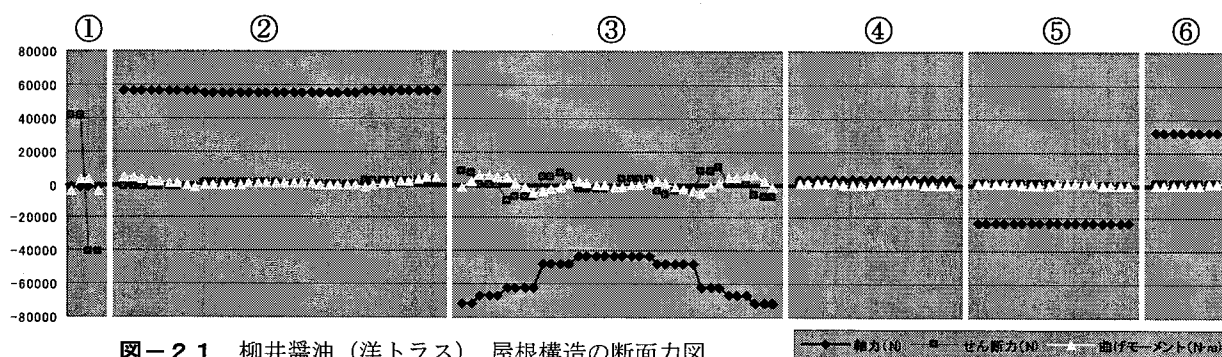


図-21 柳井醤油（洋トラス）、屋根構造の断面力図

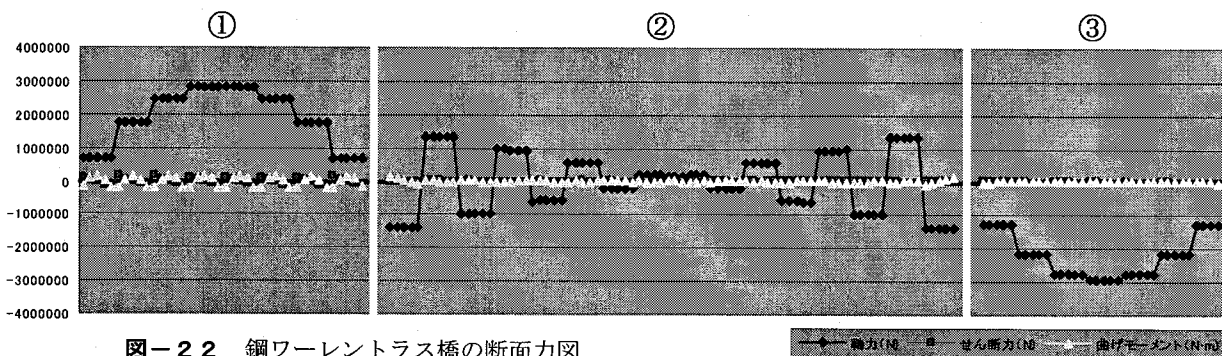


図-22 鋼ワーレントラス橋の断面力図

5. 分析対象構造物における「トラス度」の分析

(1) 「トラス度」の分析方法

3の断面力図によって、個々の部材の傾向は産出されるものの、それらをもって、該当する構造物が「どの程度、真性のトラスに近い」を指標の形で判断することはできない。そこで、本論文では、「トラス度」という概念を導入し、何度も同じことを書くが、「どの程度、真性のトラスに近い」を指標の形で表すことを、主要な目的としている。もし、その指標に、ある程度の客観性と適応性と蓋然性があれば、世界中で造られてきた、古代～近代に至る種々の「トラス」的な構造物（橋と屋根）が、どの程度トラスらしいかを、表現することが可能ではないかと考えたからである。

本論文では、その「トラス度」として、屋根構造（図-10、図-12、図-14、図-16、図-18、図-20）と図-9の橋の部材に対し、

る②が引張、上弦材にあたる③が圧縮、垂直材にあたる⑥が引張、斜材にあたる⑤が圧縮と、トラスらしい断面力がきれいに表れている。若干の乱れは、部材③の中間3ヶ所に、集中荷重の形で屋根荷重が作用していることくらいである。

最後に、図-9のワーレントラス橋の断面力図を、図-22に示す。図中、①が下弦材、②が斜材、③が上弦材に該当する。わざわざ示すまでもないが、若干の二次応力の発生は見られるものの、引張と圧縮がきれいに分かれている。なお、橋に作用する荷重としては、死荷重は鋼材の一般的な単位体積重量 $7,850\text{kg/m}^3$ を使用し、活荷重は道路橋示方書による L 荷重を用いた²⁴⁾。

曲げモーメント・軸力比、せん断力・軸力比

$$\frac{\{\log \int [\text{曲げモーメント}]^2 \text{dn}\}}{\{\log \int [\text{軸力}]^2 \text{dn}\}} \quad \frac{\{\log \int [\text{せん断力}]^2 \text{dn}\}}{\{\log \int [\text{軸力}]^2 \text{dn}\}}$$

の2種類の値を求めた。なお、 $\log$ は常用対数を、 $\int \text{dn}$ は、軸方向の積分を意味している。個々の数値の二乗和をとったのは、絶対値化、プラス、差を強調するため、常用対数をとったのは、分母、分子間に見られる「表面的な」大きな桁の差を除去するためである。

(2) トラス度の分析結果

上式をもとに、分析対象構造物3件、指標構造物4件の「トラス度」を計算した結果を、次ページの図-23に示す。図は、縦軸が曲げモーメント・軸力比、横軸が、せん断力・軸力比である。理想的なトラスであれば、軸力しか発生しないので、この図の左下隅に近づいていくはずである。

結果を見ると、断面力図の上からも、最もトラスに近かった柳井醤油（洋トラス）と、鋼ワーレントラスが、最も左下隅に近い位置にある。両者の位置がずれているのは、材質の違いではなく、支承に載ったトラスか、柱の上に載ったトラスかの違いによるものであろう。

この2グループからはかなり離れて、中国の佛光寺がある。又首を梁で受けるような構造だが、基本的に梁が引張り、二段になった斜材が圧縮というトラスらしい応力配分が、こうした位置づけを与えたと思われる。

日本の新薬師寺と、韓国の浮石寺は、性質は異なるものの、トラスからはさらに離れた場所に位置している。新薬師寺の場合は、梁の上に Λ が載ったような形態が、浮石寺の場合は、二段となった下の梁まで斜材がきていないことが、その理由であろう。いずれにせよ、古代から中世にかけての極東アジアに出現した「又首」構造は、トラス的かもしれないが、言われているほどトラスに近くなく、荷重の支持機構がかなり異なっていることを示唆している。

最後に、「和小屋」の2ケースについては、概念的にはトラスと全く異なるにもかかわらず、右上隅の近い位置にはりついた結果となった。この座標系の上での距離が、そのままトラスとの違いをストレートに表しているわけでは決していないが、「又首」は「トラス」よりも「和小屋」に近いというのは、意外な結果であった。

(3) 境界条件と荷重の仮定の検証

4 (1)の「計算にあたっての仮定」の項で、③柱の基礎部をヒンジとした点、ならびに、⑤瓦の積載荷重の妥当性について、これらの仮定が、最終的な結果である図-23に及ぼす影響について概説する。

新薬師寺の場合、柱の下端部をヒンジとするか、固定とするかで、曲げモーメント・軸力比に与える影響は

-0.016%、せん断力・軸力比に与える影響は+0.422%と1%以下である。これは、他の構造物の場合も変わらない。すなわち、柱の下端部の境界条件は、屋根構造の断面力特性にまで影響しないことが立証された。

さらに、新薬師寺の場合、瓦の荷重として100%載荷した場合と、70%載荷した場合との差は、曲げモーメント・軸力比で-0.378%、せん断力・軸力比で-0.390%となり、ここでも1%を割った。他の事例でも同様の結果が得られている。従って、瓦の荷重は、実際には不明であるが、仮定的な値を用いても、結果に大きな誤差は生まないことが立証された。

6. まとめ

本論文では、下記のいくつかの結論が得られた。

- ① 極東アジアが起源と考えられている「又首」構造は、従来、日本の古代でトラスが使われていたことを示す証拠として重視されてきた。それは、「又首」のもつ形態的な特性、すなわち、梁の上に Λ を載せた特徴的な姿に“古代のロマン”が感じられたからであろう。なぜなら、こうした構造は、平安中期には完全に失われ、近世になるまで再び現れることはなかったからである。しかし、今回の分析を通じて、「又首」構造は、トラスというよりは、梁の上に Λ 型の柱が載り、屋根荷重を梁に伝達しているような機能が勝っていることが確認できた。
- ② そうは言っても、「又首」構造で、梁（下弦材）が引張、斜材が圧縮というトラスの原則は保持されており、トラス構造の本質に関する「何らかの理解」が考案者にあった可能性は否定できない。

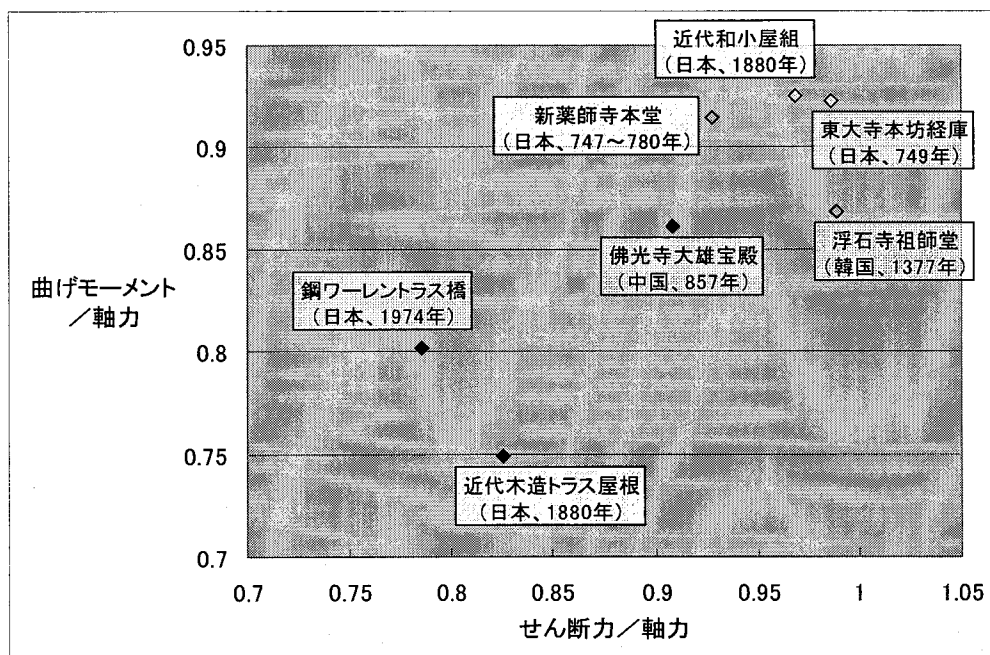


図-23 7件の構造物の「トラス」度

- ③ ここでは、日本、中国、韓国に残る最古の「叉首」について検証を行ったが、それぞれ形態が異なっており、「叉首」がどこで生まれ、どのように伝承されていたかの手がかりは、全く得られなかった。
- ④ 今回提唱した「トラス度」の判定基準は、「叉首」と「和小屋」が接近し過ぎていることから、完全なものとはとても言えない「過渡的」なものである。「和小屋」のような梁・柱構造でも、圧縮を受ける柱では軸力が卓越し、あたかもトラスのように見えてしまうことから、この影響を除去するような何らかの工夫が必要であろう。
- ⑤ 解析を行う際、柱の下端部のヒンジ仮定と、瓦荷重の推定については、少なくとも現時点での評価基準には影響のないことが分かった。今後、④に準じて新しい基準を設定する際も、この点での検証は常に避けて通れない。

今後の課題として、恐らく最も重要なことの一つは、3ヶ国の編年的な「叉首」の変化をデータとして把握し、かつ、それらの中に潜むであろう“違い”を浮き立たせられるような、新しい「トラス度」の判定基準の提案であろう。それにより、文献上は確認できない謎、「叉首はどこで生まれ、どのように伝わり、なぜ消滅していったか」が、分かるかもしれないからである。

残るもう一つの重要な課題は、世界の構造物への拡大である。その中には、初の本格的なトラス屋根と言われる4世紀ローマのキリスト教会も含まれるし、15世紀のレオナルド・ダ・ヴィンチの描いたトラス橋(1490年頃)、パラディオのチズモン川のトラス橋(1552年)、ケンブリッジの数学橋(1750年起源)、グルーベンマン兄弟のトラス(18世紀後半)、そして、19世紀アメリカのトラス特許競争なども含まれるからである。

参考文献

- 1) 浅野清、『奈良時代建築の研究』、中央公論美術出版、p. 513、1969
- 2) 前掲 1)、p. 511
- 3) 奈良県教育委員会事務局文化財保存事務所、『国宝新薬師寺本堂 重要文化財地蔵堂 重要文化財南門 重要文化財鐘楼修理工事報告書』、奈良県教育委員会、付図：第六図本堂梁行断面図、1996
- 4) 前掲 3)、付図：第六図本堂梁行断面図
- 5) 新薬師寺公式ホームページ
<http://www.k5.dion.ne.jp/~shinyaku/>
- 6) 前掲 3)、付図：第六図本堂梁行断面図
- 7) 前掲 5)
- 8) 岡田英男、『日本建築の構造と技法[下] 岡田英男論集』、思文閣出版、p. 30
- 9) 梁思成、『中国建筑史』、明文書局、p. 69 第二十回山西五台山佛光寺大雄宝殿断面及平面
- 10) 前掲 9)、p. 69
- 11) 鄭寅國、『韓国建築様式論』、一志社、p. 249 第3.11 図浮石寺祖師堂架構図、1974
- 12) 東京工業大学付属高等学校中西章先生ホームページ
http://www1.ths.titech.ac.jp/~nakanisi/k_archi/k019.html
- 13) 奈良県教育委員会事務局奈良県文化財保存事務所、『国宝東大寺本坊経庫修理工事報告書』、奈良県文化財保存事務所、p. 1、1983
- 14) 前掲 13)、付図：第七図竣工梁行断面図
- 15) 前掲 8)、p. 27
- 16) 柳井市教育委員会、『柳井市古市金屋伝統的建造物群保存地区見直し調査報告書』、柳井市教育委員会、p. 102、2001
- 17) 前掲 16)、p. 103
- 18) 前掲 16)、p. 102
- 19) 前掲 16)、p. 103
- 20) 渡辺昇、『朝倉土木工学講座 11 橋梁工学』、朝倉書店、付図：トラス橋設計図、1987
- 21) コンピュータサイエンスファド(株)ホームページ
<http://www.fadam.co.jp/arakaruto/arakaruto.htm>
- 22) 文部科学省ホームページ
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t20010410002/t20010410002.html
- 23) ウインドクラフト一級建築士事務所ホームページ
<http://www.windcraft.co.jp/architect/facility/wood.html>
- 24) 高知工科大学島弘教授ホームページ
<http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/shima/bd/basics/load/load.html>