

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

Abstract

In a technological history of the structure, a lot of researches exist about the stone arch bridge, and there are more researches about the vault ceiling that is the application of the arch to the architecture. However, the truss that is another important structural element as well as the arch has been hardly researched up to now with both sides of the civil engineering and the architecture. Of course, the history about truss made from tree and iron, or the steel truss which was made after the 19th century is analyzed in detail. But, it is no exaggeration to say that the research about wooden truss made before that has been hardly done.

In this thesis, as the first step of the elucidation of the technical history of the truss, we pay our attention to structure named "Sasu" which is truss likeness roof structure in Far East Asia. And we make simple one-dimensional numerical value structure analysis about "Sasu". Finally, we conclude how similar is "Sasu" to a genuine truss by date from numerical analysis.

1. はじめに

人類の木構造との「付き合い方」は、もっぱら試行錯誤の歴史であった。今日から見れば、軸力が卓越するトラス構造と、曲げモーメントが卓越する梁-柱構造、あるいは、主として集成材を用いたアーチ構造に分かれているが、それは、断面力の発想が生まれた19世紀末以降の分類であり、それまでは、経験の積み重ねによって「壊れないような木組」の方法が、各時代、各地域により独自に編み出されてきた。

本論文では、今日的な見方に立って、トラスという表現を用いているが、19世紀以前の人々がトラスの持つ力学的特性をどの程度理解していたかを証明する史料は残っておらず、あくまでトラス的な形態を有する構造物という表現を使わざるをえない。ここで言う、トラス的とは、全体構造のいずれかの部分に、木材を斜めに使用した構造物、言葉を換えれば、三角形あるいは台形が挿入された構造物のことを指している。これらが、実際の

程度、今日で言うところのトラス、すなわち、引張力と圧縮力の巧みなバランスを考慮して造られたシステムに近いかは、これまで調べられてこなかった。わが国では、古代の叉首組が、きわめて三角形に近いことから、中世の和小屋組屋根ができあがる前に、一時期トラス屋根の時代があったとする有力な説があるが、それも、外観上の類似に引きずられた上での仮説である。

著者らは、トラスの歴史の中で、19世紀以前のトラス的、すなわち、斜材を使用した木組が、果たして、今日で言うところのトラス構造であったのか、あるいは、表面は似ているものの、トラスとは別物であったかを知ること、トラスの発達の歴史を解明したいと考えた。そして、そのための手立てとして、「トラス度」という判定基準を導入することにした。

以下、第2章では、トラス的構造の簡単な歴史を、第3章では、本論文で解析対象とした構造物についての詳細を、第4章では、数値解析手法の説明と結果の分析を、第5章では、数値解析の妥当性と、解析対象構造物の「トラス度」の判定結果を示す。

2. トラス的構造物の歴史

トラス的構造は、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

* 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

はないかという説がある。石アーチにあれば巧みだったローマ人が、本当に木のトラスを知らなかったのか、あるいは、知っていたが朽ちてしまったのか、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、木のトラスの有無を判断する唯一の手掛かりとされるが、レリーフからは、三角構造が高欄に用いていたことは推定できても、橋の主構造として使われていたという確証は得られない。

その後の歴史は、橋に限定した場合、レオナルド・ダ・ヴィンチが描いたダブルワーレントラス風の橋（1490 年頃）や、パラディオのチズモン川橋（ハウトラス風、1552 年）としてルネサンス期に登場し、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、ハウトラス風の本組みが使われている。

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本組みが使われるようになり、日本でも、前述したように、法隆寺の回廊の又首組屋根（8C 前半）や、新薬師寺の本堂の又首組屋根（747 年）が、現存する最も古いトラス的構造だとされている。日本は、その後、平安中期以降は寺院の又首組屋根は姿を消し、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（梁一柱）屋根に移行していった。又首組屋根が、もし本当に今日的なトラス（以後、近代トラスと呼称）に近いのであれば、力学的に見て、より優れた構造が淘汰された要因は、屋根のスパンの巨大化や、技術の伝承の失敗だと考えられている。それでも、トラス的な屋根構造は、一部の近世民家や、合掌造りの大屋根にわずかに痕跡を留めている。この、わが国古代の又首組屋根は、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端であると考えるのが自然であるが、定説はない。もし、日本が借用したとすれば、発祥の地は、中国か朝鮮半島しかないが、いずれの国でも、残存する木造建築は僅少である。両国における、知り得る現存最古の又首組屋根を有する建築物は、中国では佛光寺大雄宝殿（857 年）、朝鮮半島では浮石寺祖師堂（1377 年）である。

こうしたトラス的構造が、力学的合理性を有する構造形式として登場するのは、ようやく 19 世紀後半に入ってからである。それでも、初期のタウン・トラス（1880 年）、パー・トラス（1884 年）、ハウ・トラス（1885 年）、ホイップル・トラス（1874 年）は、理論的に完成の域に達した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・トラスが提案されて、ようやく近代トラスが誕生する。

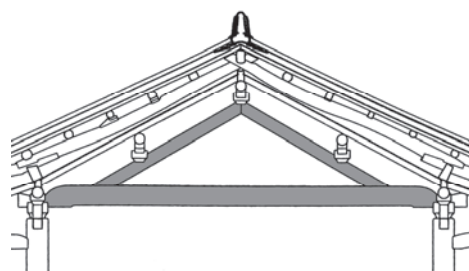
著者らが目指す研究の対象は、こうした一連のトラスを、時代、地域、対象によって分類・評価することにある。しかし、時代を遡ると、そこで造られたのは、トラスとも梁一柱構造とも区別しにくい中間的な構造体であり、「どこまで、近代トラスに近いのか」が分からない状態となっている。

3. 各構造物の概説

(1) 分析の対象と方法

本研究は、本来、橋を対象として開始したものであるが、本論文では、その第一歩として、地域と構造対象を限定し、主構造の一部に三角形要素を含むような、極東アジアの木造屋根構造を、その対象とする。

古代の極東アジアの屋根構造を代表する又首組は、**図－1**の中央の濃灰色に塗りつぶした部分であり、二材を山形に組み合わせることで、三角形を造り出している。又首組は、また、「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¹⁾」とも言い表される。ただ、**図－1**を詳しく見ると、山形の 2 材は、下梁の上に載っており、近代トラスとは異なることも、明らかである。



図－1 又首組

（出典：「本堂梁行断面図」²⁾に加筆・修正）

こうした又首組屋根の日中韓の代表的な建築物として、今回、分析の対象としたのが、**表－1**に示す 3 つの寺院の屋根構造である。これらの寺院は、それぞれの国で、現存する最古の又首組屋根とされている。以後、これらの寺院を「分析対象構造物」と呼ぶ。

表－1 分析対象構造物

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、又首組屋根と比較することを目的に、下記**表－2**の 5 件の建築物・構造物を「指標構造物」として、分析の対象とする。

表－2 指標構造物

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
柳井醬油醸造蔵 1	日本	1880 年以降
柳井醬油醸造蔵 2	日本	1880 年以降
鋼ワーレントラス 1	日本	現在の標準設計
鋼ワーレントラス 2	日本	現在の標準設計

表－2うち、上の 2 つは、和小屋組の例である。そのうち、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。

2 例目としては、近代の民家建築を選択した。すなわち、山口県柳井市の稲田家所有の柳井醤油醸造蔵の倉庫（1880 年以降）である。表-2 の 3 番目も、同じ醤油醸造蔵の倉庫だが、同年代の建物でありながら、洋式トラスが使われている。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、梁・柱構造と、近代トラス構造の違いを、より鮮明に示すことができると考えた。

4・5 例目は、木構造の屋根とは全く異なる、鋼構造の橋梁である。本研究の最終目的は、世界のあらゆるトラス的な構造の比較検討をすることで、そのために導入した数値計算と、「トラス度」の判定基準に、汎用性がなければ意味がない。この 2 例は、汎用性のチェックのために追加した。なお、4 例目は斜材と上・下弦材からなる平行弦ワーレントラス、5 例目は垂直材を含む曲弦ワーレントラスである。

以上合計 8 件の構造物の解析データを比較することで、近代トラス、又首組、和小屋組の三者に固有の力学的特徴を表現できるような判断指標として、「トラス度」を提案する。そして、極東アジア特有の又首組が、トラスにどの程度近いものかを、分析・結論付けようと試みる。

(2) 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構造を有する 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。

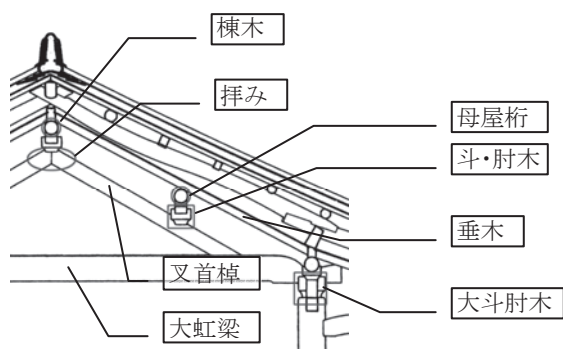


図-2 又首組、各部材名称図
(出典:「本堂梁行断面図」³⁾ に加筆・修正)

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⁴⁾。この本堂の、創建当初の使用形態につい

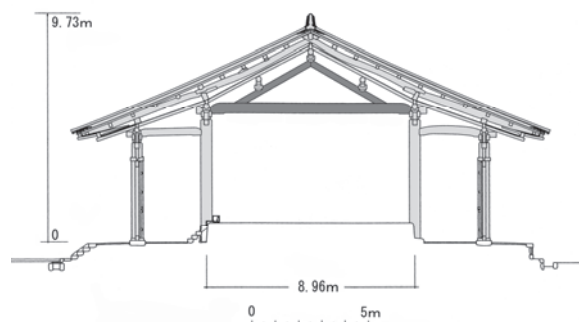


図-3 新薬師寺本堂断面図
(出典:「本堂梁行断面図」⁵⁾ を修正)

ては確定していないが、食堂であったという説が最も一般的である。

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。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、垂木などの構造材をそのまま見せる化粧屋根裏になっている⁶⁾。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組を組み、中間の 1 ヶ所に母屋桁を受ける斗・肘木が載り、又首の押みにも斗・肘木を載せて棟木を受ける構成をとっている⁷⁾。

b) 佛光寺大雄宝殿 (フォーグワンスー、ダーシュンバウディエン)

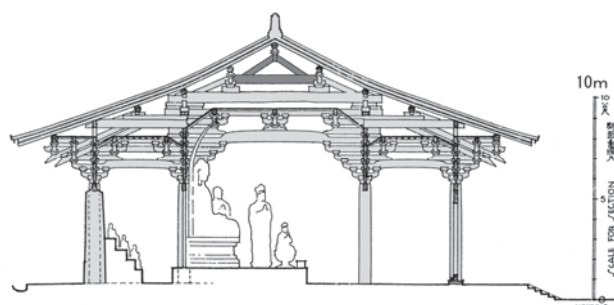


図-4 佛光寺大雄宝殿断面図
(出典:「山西五台山佛光寺大雄宝殿断面及平面」⁸⁾ を修正)

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⁹⁾。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。又首組は上部の梁の上に組まれ、又首の押みに斗を設け棟木を受けている。

c) 浮石寺祖師堂 (ブソクサ、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) に戦災で焼失されたのを、1041 年に円融国師が再建したと

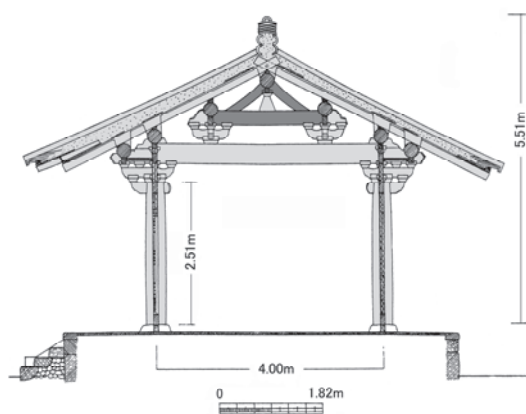


図-5 浮石寺祖師堂断面図
(出典:「浮石寺祖師堂架構図」¹⁰⁾を修正)

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¹¹⁾、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(叉首組の中心に垂直に立つ束材)を立てて叉首組を組んでいる。

(3) 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

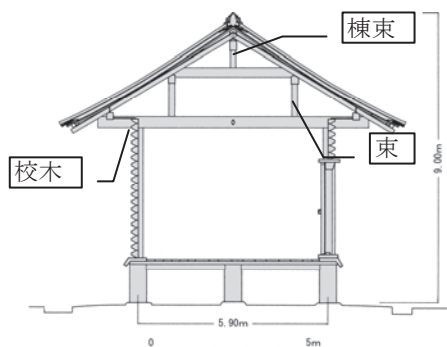


図-6 東大寺本坊経庫断面図
(出典:「竣工梁行断面図」¹²⁾を修正)

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面に建つ校倉である。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、一番下の太い梁に、曲げモーメントが発生する構造である。詳細に述べれば、大梁を上から 2 段目の校木に載せ、その上に束を立てて二重梁としている。そして二重梁上に棟束を立て棟木を受ける作りとなっている¹⁴⁾。

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⁾。

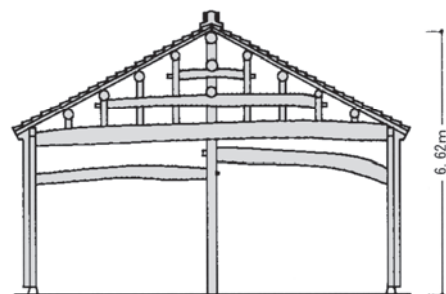


図-7 和小屋組断面図
(出典:「断面図」¹⁶⁾を修正)

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¹⁷⁾。すなわち、両端の柱だけでは、強い曲げを受ける梁を支え切れなかったためであり、次の図-8 の洋トラスと比較して、和小屋組みの欠点を明確に示している。

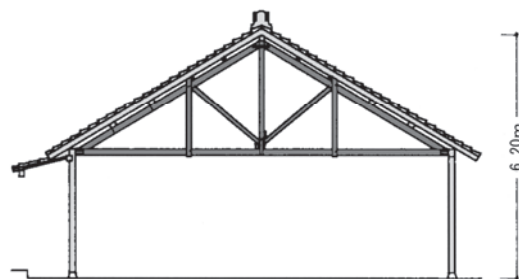


図-8 洋トラス組断面図
(出典:「断面図」¹⁸⁾を修正)

次に、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(特に、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(2 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である。比較対象と

して、19世紀後期のピン結合のプラット・トラスをととも考えたが、①木と鋼という材料の違い、屋根と橋という構造体の違いさえつければよい、②二次応力の発生を許容した普通の鋼ワーレントラスの方が、剛接合の木トラスに近い、という2点から鋼ワーレントラスを採用した。

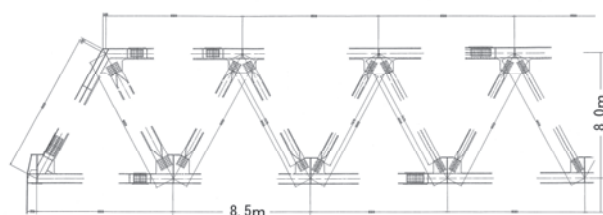


図-9 鋼ワーレントラス橋の設計図
(出展：「トラス橋設計図」¹⁹⁾を修正)

まず、図-9のワーレントラスは、『橋梁工学』²⁰⁾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。

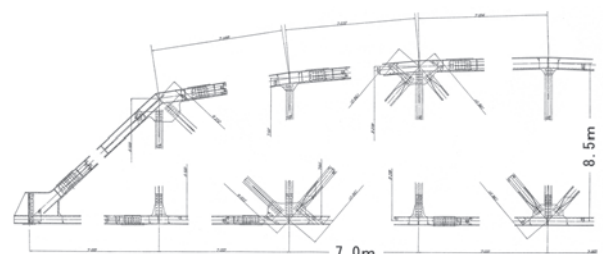


図-10 曲弦ワーレントラス橋の設計図
(出展：「道路橋設計例」²¹⁾を修正)

図-10の曲弦ワーレントラスは、『大学課程橋梁工学（別巻）橋梁設計例』²²⁾中の付図：道路橋設計例〔I-1〕一般図に記されている事例で、支間56.0m、幅員5.4mの下路曲弦トラス橋である。トラスは、図-9と異なり、垂直材が付加されている。この垂直材の影響を、和小屋組の垂直材とそれと比較し、最終的に「トラス度」の算定方法に反映させるため、この形式を追加した。

4. 各構造物の数値解析結果

(1) 数値解析の方法

対象とする木構造の詳細な形状がわからない状況では、3次元的な数値解析を適用することが不可能なため、本研究では、単純なはり要素を用い、微小変形・弾性という仮定でFEM解析を行う。そして、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＝近代トラスにどれほど近いのか」を表す判断指標を提案しようとする。本論文で扱うような複雑な屋根構造が、単純な1次元はり要素で、正確に解析できるかどうかという妥当性については、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。

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する。

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、解析に先立ち、解析結果の数値がほぼ収束することを確認し、最適な要素分割を採用した。節点番号は、解析の精度を上げるため、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解析対象の範囲は、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。それは、古代～中世においては、礎石の上に柱をそのまま置くだけの構造だったためである。時代が下ると、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。トラス橋の場合は、支承部で回転自由の他、片端を水平移動自由とした。また、それぞれの部材の結合部分は剛結合と仮定した。

④部材の断面積と断面2次モーメントは、各要素の中央値を用いて、長さと高さについては、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。すなわち、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たためである。具体的な数値は、 $E = 10192 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ²³⁾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、個々の瓦の重量は不明なため、ここでは、文部省の「重要文化財（建造物）耐震診断指針」²⁴⁾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 を仮定的に使用し、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た。なお、ヒノキ材の質量を算出する際、比重値は0.44²⁵⁾を使用した。

なお、これら仮定の妥当性については、第5章(2)で詳しく述べる。

(2) 分析対象構造物の構造解析結果

本節では、叉首組の屋根構造の各部材に作用する軸力

と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。建物の屋根を除く主構造はラーメン構造なので、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調べる。

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、解析結果を示すのは、**図-11**のように、主柱で挟まれた部分の屋根構造に限定する。その方が、トラスに係わる特徴が、視覚的に理解しやすくなるためである。

図-13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つの部材に分けて表示している。このうち、①と②は同じ部材であるが、②は又首組を構成する「トラス」の一部、①はその両端の梁的な役割を担っている。①の存在は、又首組と柱部材との接合上の問題とも考えられるが、その割には長すぎることは確かで、同時代のヨーロッパのトラス屋根との大きな違いとなっている。③は、又首組を構成する斜材である。

解析結果を見ると、①は完全な梁であり、一方、②と③により構成される三角形は、曲げによる二次応力の発生したトラス（②が引張、③が圧縮）と解釈することができる。言葉を換えれば、完全な三角形状でなく、①の

部分を有している分、新薬師寺本堂はトラスから離れている。そして、それが日本の又首組の特徴なのである。

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、又首組を二層の水平材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、水平材①の中間に載った垂直材である。

この屋根構造の断面力図を、**図-14**に示す。図によれば、①の左端から③の荷重がかかる位置までの間に曲げが発生しており、新薬師寺の水平材より梁構造に近づいている。一方で、上部の三角形（部材⑤⑥）とそれに連続する②は、圧縮力が卓越する結果になっており、トラス構造部材の挙動に極めて近い。ここで、⑤に引張力ではなく圧縮力が生じているのは、梁の両端が固定されることで、部材の伸びようとする力が圧縮方向に生じるためと考えられる。この特徴は次頁**図-16**の④も同様である。また、短い垂直材③は、柱でありながら、曲げを多く受ける特殊な応力状態にある。ただ、図全体を通して見れば、新薬師寺とさほど大差ない状況にあることが見てとれる。

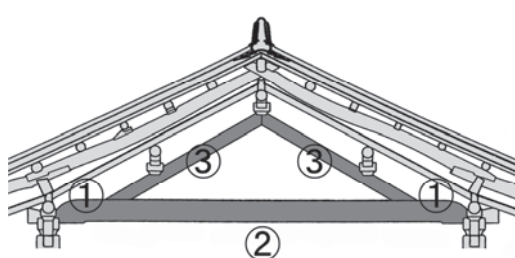


図-11 新薬師寺本堂、屋根構造の部材図

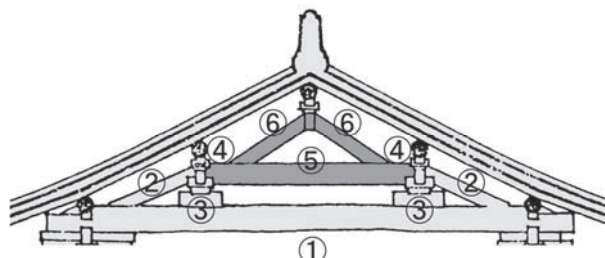


図-12 佛光寺大雄宝殿、屋根構造の部材図

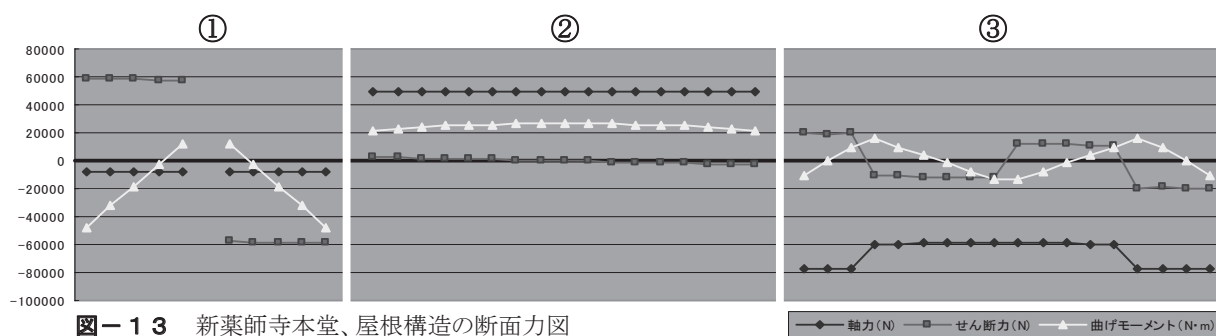


図-13 新薬師寺本堂、屋根構造の断面力図

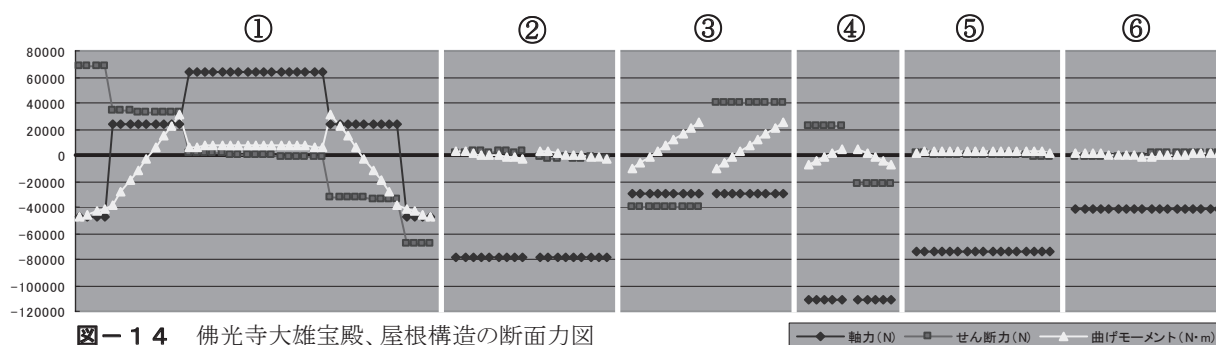


図-14 佛光寺大雄宝殿、屋根構造の断面力図

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（又首内部の垂直材）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、極東3国を通じて、必ず現れるものである。

この、又首組の発展形に対する断面力図（図-16）の特徴は、意外なことに、又首束の有無ではなく、佛光寺にあった第2斜材（図-14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、又首束の断面力がほぼゼロ（あってもなくても変わらない）であるのに対し、第2斜材がなくなった分、一番下の水平材①は、梁そのものであり、上部の又首組が活かされていないことが分かる。全体として見れば、新薬師寺や佛光

寺と大きな違いはないが、細部ではかなり異なった挙動を示している。

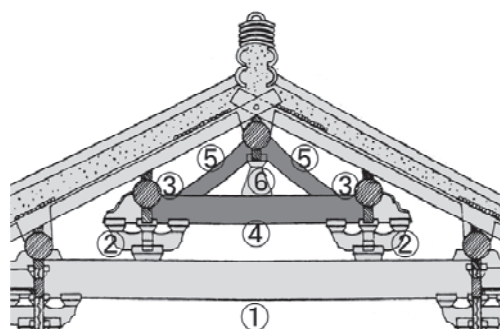


図-15 浮石寺祖師堂、屋根構造の部材図

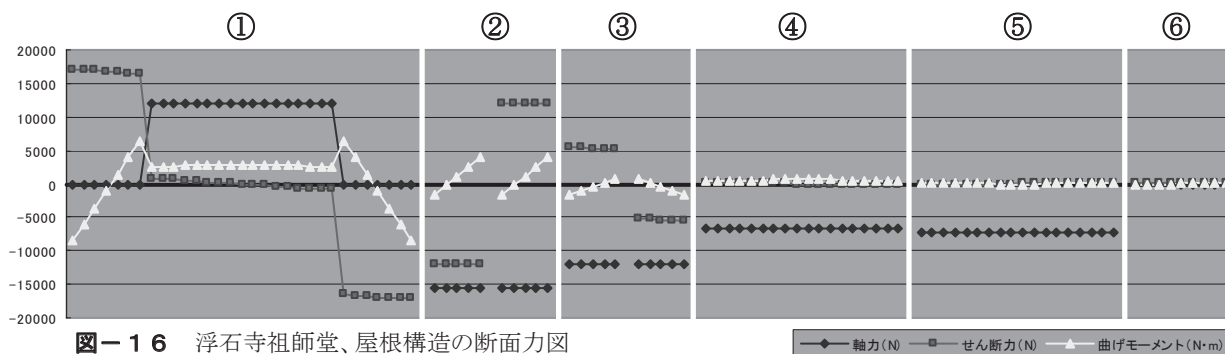


図-16 浮石寺祖師堂、屋根構造の断面力図

(3) 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、曲弦ワーレントラス橋（いずれも標準設計）について、断面力図を算出し、(2)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

図-17は東大寺の屋根構造の部材図である。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、ラーメン構造であり、トラスの要素は微塵も感じられない。

それは、断面力の値を示した次ページの図-20でも、その結果は明らかである。すなわち、垂直材②と④は、当然のことながら、屋根荷重を支えるため、圧縮力が異様に大きな値を示す。一方、上部の水平材③は、典型的な梁構造、下部の水平材①は、両端部で梁構造となっている。

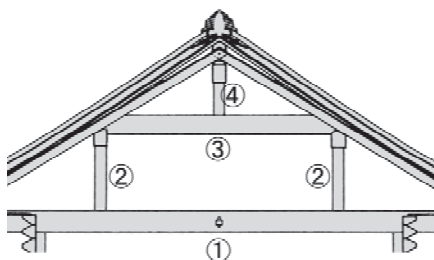


図-17 東大寺本坊経庫、屋根構造の部材図

b) 稲田家柳井醤油醸造蔵（2棟）

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水平材も採用されている。

この断面力分布を示すのが、次ページの図-21である。太い水平材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、垂直材④～⑧では、いずれも、圧縮力が卓越している。全体的な傾向は東大寺本坊経庫と大きな差がないようにも見えるが、水平材①に強い軸力が発生し

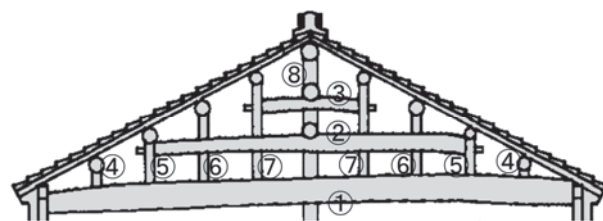


図-18 柳井醤油（和小屋組）、屋根構造の部材図

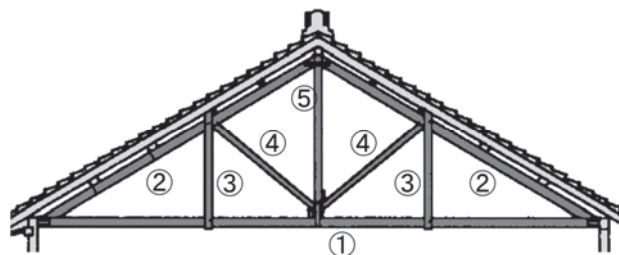


図-19 柳井醤油（洋トラス）、屋根構造の部材図

ている分、少し異なる構造体のようにも見える。

同じ柳井醤油の蔵でも、前ページの図-19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-22に示す。

下弦材にあたる①が引張、上弦材にあたる②が圧縮、

垂直材にあたる⑤が引張、斜材にあたる④が圧縮と、トラスらしい断面力がきれいにれている。若干の乱れは、部材②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。

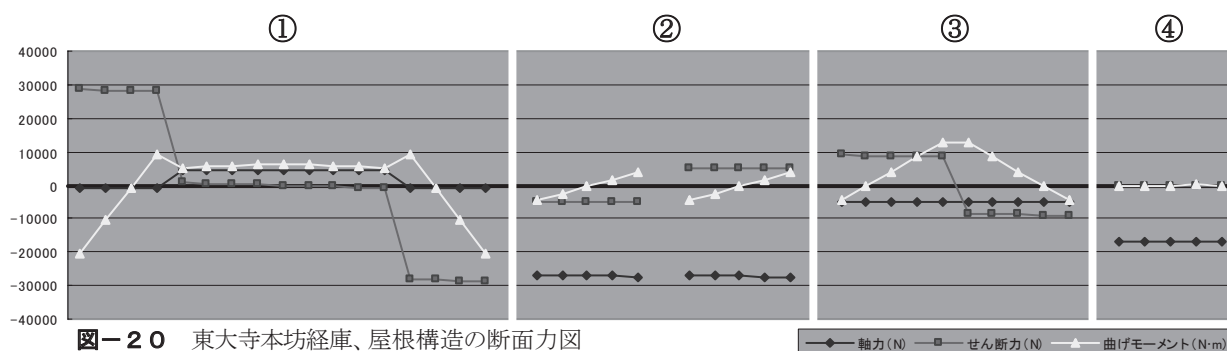


図-20 東大寺本坊経庫、屋根構造の断面力図

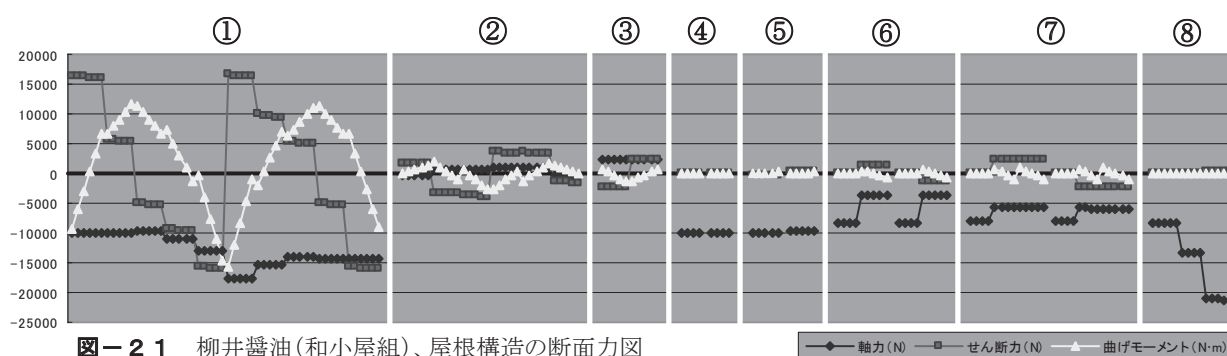


図-21 柳井醤油(和小屋組)、屋根構造の断面力図

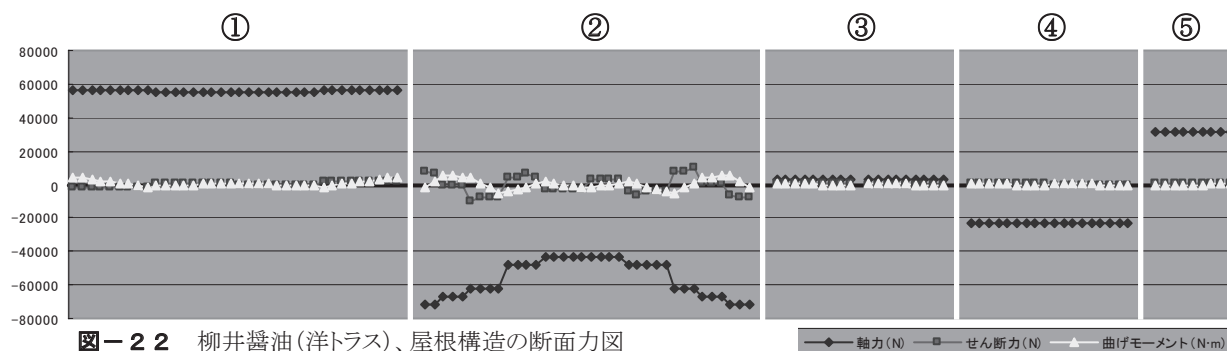


図-22 柳井醤油(洋トラス)、屋根構造の断面力図

c) 鋼ワーレントラス橋 (2橋)

図-9のワーレントラス橋の断面力図を、次ページの図-23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。

最後に図-10の曲弦ワーレントラス橋の断面力図を、次ページの図-24に示す。①が下弦材、②が斜材、③が上弦材、④が垂直材に該当する。①～③は上記のワーレントラス橋と同様、トラスとしての特徴を綺麗に示しているが、ここで注目すべきは④の垂直材であり、この材が上記の洋トラスの垂直材同様、引張り材として働

いていることがわかる。これは、佛光寺大雄宝殿や浮石寺祖師堂、柳井醤油和小屋組や東大寺本坊経庫の屋根構造に含まれる垂直材が全て圧縮材となっているのは大きく異なっている。ハウ・トラスのような、理論的に提唱された近代の木トラスにおける垂直材(鉄ロッド製)は、引張材であることが一つの特徴であった。このことを再確認する意味で、図-10の解析結果を示したのである。

なお、橋に作用する荷重として、死荷重は鋼材の一般的な単位体積重量 $7,850\text{kg/m}^{326)}$ を使用し、活荷重は道路橋示方書によるL荷重を用いた²⁷⁾。

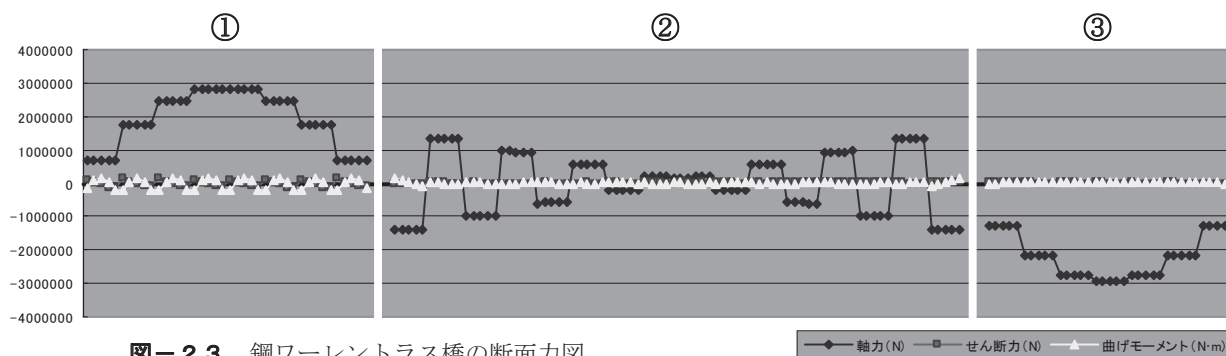


図-23 鋼ワーレントラス橋の断面力図

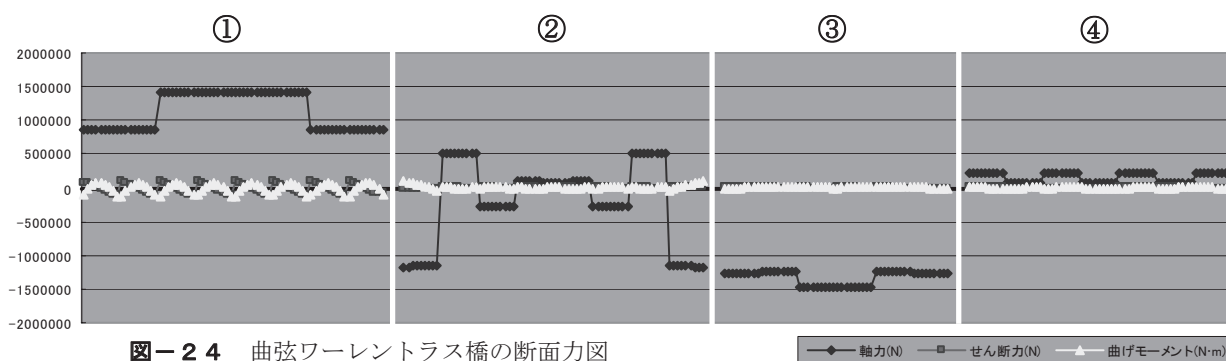


図-24 曲弦ワーレントラス橋の断面力図

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

第4章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、図を見ているだけでは、該当する構造物がどの程度、近代トラスに近いかを定量的に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、判断指標を提示することを、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（屋根と橋）が、どの程度近代トラスに近いかを、表現することが可能になる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-11、図-12、図-15、図-17、図-18、図-19）と図-9、図-10の部材に対し、

$$\textcircled{1} \log \left\{ \left(\int [\text{曲げモーメント}]^2 \, dn \right) / [\text{トラス部のスパン}]^2 \right. \\ \left. / \int [\text{軸力}]^2 \, dn \right\}$$

$$\textcircled{2} \log \left\{ \int [\text{せん断力}]^2 \, dn / \int [\text{軸力}]^2 \, dn \right\}$$

の2種類の値を求めた。ここで、log は常用対数を、 $\int \, dn$ は、軸方向の積分を意味している。

上式は、各部材に生じる①曲げモーメントと軸力の比率、②せん断力と軸力の比率を、屋根全体について算出するものである。屋根には、又首組といえども、曲げ部材が入っているし、和小屋組では、水平材は曲げ部材だが、垂直材は圧縮材となっている。従って、和をとるにあたっては、2つの原則を立てた。すなわち、本来この指標は、トラス的な構造物の近代トラスとの類似性を判

断するものなので、できるだけ屋根全体での性能を求めることが重要であり、積分は可能な限り屋根部材全体に対して行う。ただし、和小屋組の短い垂直材は、圧縮力のみを受け、曲げモーメントは生じないため、一見、軸力が卓越する近代トラスのような錯覚を与える。そこで、近代トラスを構成するに相応しいだけの長さがない限り、その部材は積分対象から外すことにし、その判断は部材の細長比で行うことにした。全ての垂直材における細長比を求め、それらの値を比較した結果、細長比10以下のものは、梁-柱構造の圧縮材に相当するものとして除外した。また、式①でトラス部のスパンで割ったのは、無次元化のため、式①と式②で二乗和をとったのは、絶対値化、プラス、差を強調するため、また、式①と式②を常用対数化したのは、図上での違いを鮮明にするためである。なお、式①の「トラス部のスパン」とは、建築物の場合、佛光寺と柳井の和小屋組を除き、柱間距離、佛光寺は3径間の中央部の柱間距離、柳井の和小屋組は中間柱と端柱の距離を使用した。トラス橋では、ワーレントラスの1パネルの水平長を使用した。

以上の式①、式②から求めた値をそれぞれ縦軸、横軸にとり、二次元の平面上で「トラス度」を判定する。

(2) 種々の仮定の妥当性

前述したように、数値解析にあたっては、前述したように、3つの仮定を導入した。再録すれば、

- ①柱の基礎部分の境界条件は、水平・鉛直方向が固定、回転は自由。
- ②瓦等の被覆材による死荷重値に、既往の標準値を使用。
- ③屋根の各部材は剛結。

これらの仮定の影響を調べるため、①については、回転を自由でなく固定と仮定した場合、②については、死

荷重を70%に減らした場合、③については各接合部の全部材に極小のバネ要素を挿入し、バネを木材の弾性定数の60%まで下げた場合について「トラス度」を計算し、結果にどの程度の違いが出るかを検証した。図-26には、①の場合の計算値が□印で、②の場合の計算値が△印で示されている。それによれば、和小屋組に近い一部で逆転があるものの、大きな傾向は変わらないことが確認できた。図-25には、新薬師寺本堂について、各部材を剛結合とした最終的なトラス度の分析結果(●印)を基準に、結合部分の部材要素の弾性定数を90%、80%、70%、60%と変化させた場合の誤差を示す。それによれば、結合部としてあり得ないほど柔構造の60%まで下げても、生じる誤差は、曲げモーメント・軸力比で+0.35%、せん断力・軸力比で-0.068%にとどまっている。すなわち、各部材の接合条件によらず、解析結果は安定した数値を算出できることが検証された。

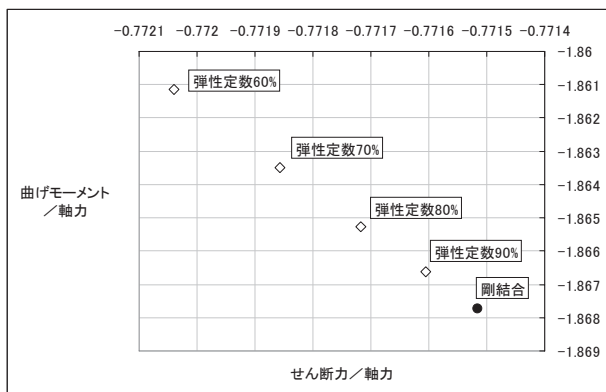


図-25 部材結合条件による誤差

(3) トラス度の分析結果

(1)で示した式①、式②をもとに、分析対象構造物3件、指標構造物5件の「トラス度」を計算した結果(●印)を、図-26に示す。図は、縦軸が①曲げモーメント・軸力比、横軸が、②せん断力・軸力比である。

結果を見ると、断面力図の上からも、最もトラスに近いかった柳井醤油(洋トラス)と、鋼ワーレントラス2橋が、最も左下隅に近い位置にある。この2グループから右方に、2つの又首組屋根(佛光寺と新薬師寺)がある。このことから、又首組が、それなりにトラスに近い構造であることを示している。

それに対し、又首に1本垂直材が入っただけの浮石寺は、計算上その垂直材は効いていないにもかかわらず、両者とは全くことなる性状を示す。その理由は、上部の又首組と、下部の梁が分断されていて、全体としては、梁構造に近い形になってしまっているからであろう。

一方、和小屋組の2例は、又首組グループの右上に独立して位置している。

以上の分析により、本論文で提案した「トラス度」を用いれば、近代トラス、又首組、和小屋組を明快に区別することが可能となった。そして、これまで、「日本の古代にもトラス構造はあった」と言われてきた根拠である又首組が、トラスと和小屋組の中間的な存在であること、すなわち、一種のトラスと呼べなくはないことも裏付けられた。

その中で、一見すると、又首組の延長線上にあるかのように見える浮石寺が、実は、和小屋組に近い構造であることも指摘できた。

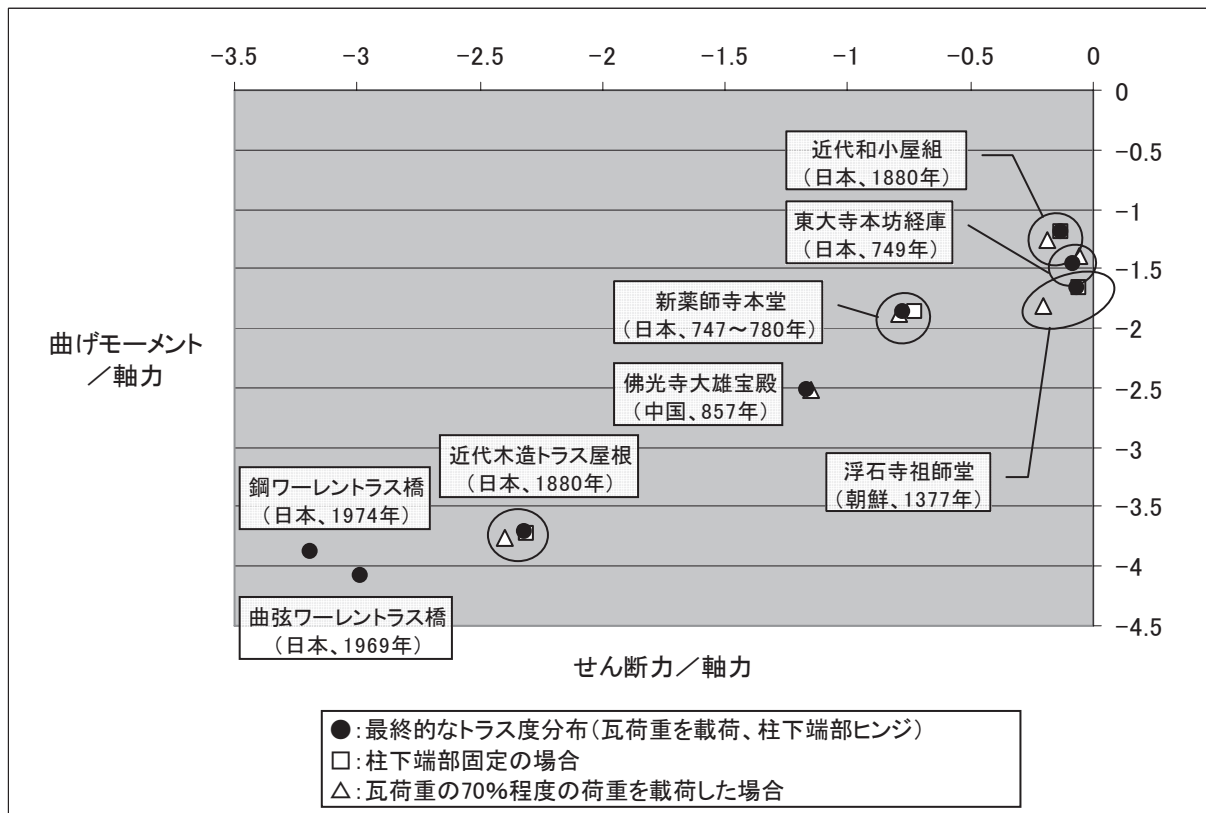


図-26 8件の構造物の「トラス度」

6. まとめ

本論文では、下記の5つの結論が得られた。

- ① 極東アジアが起源と考えられている又首組は、従来、日本でも、古代に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、又首組のもつ形態的な特性、すなわち、梁の上に Λ を載せた軽快な姿に、重苦しい和小屋組とは異質の大陸文明を感じさせたからであろう。今回の分析により、その推定はある程度正しいこと、すなわち、又首組は、近代トラスと和小屋組の中間的な存在であることが証明された。
- ② 又首組を、トラスから遠ざけている理由は、上部の Λ の部分が、水平材の端部でない部分に接続しているためである。この隔たりは、単に部材同士の接合の困難さのみに起因するとは思えないほど広い。この点を考えると、又首組を考え出した人物が、トラスの概念を理解していたかどうか定かではない。
- ③ 本論文では、日本、中国、韓国に残る最古の又首組について検証を行ったが、中国・韓国のものは、最古のものが現存しているだけでなく、結局、又首組がどこで生まれ、どのように伝承されていったかの手がかりは得られなかった。
- ④ 本論文で提唱した「トラス度」の判断指標は、ごく限定された構造物に対して、妥当と思われる結果を示したに過ぎない。今後、より多くの時代、地域、目的のトラス的な構造物を取り上げ、また、より完成度の高い「トラス度」を提案することで、世界のトラス的な各種構造物の相関的な関係を導き出せるよう努力したい。特に、今回は又首組に着目したため建築物が多くなったが、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各種案（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橋群（18世紀後半）、そして、19世紀アメリカのトラス特許競争で出現した各種トラス橋について、分析を進めていきたい。
- ⑤ 解析を行う際、柱の下端部のヒンジ仮定と、瓦荷重、剛結合の仮定については、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に準じて新しい判断基準を設定する際には、教会建築などをどう扱うかが、大きな課題となるであろう。

謝辞

東京工業大学附属科学技術高等学校の中西章氏には、韓国の浮石寺祖師堂に関する詳細な図面を提供いただいた。心から、感謝申し上げたい。

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. 511、1969
- 2) 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
- 3) 前掲 2)、付図：第六図本堂梁行断面図
- 4) 新薬師寺公式ホームページ
<http://www.k5.dion.ne.jp/~shinyaku/>
- 5) 前掲 2)、付図：第六図本堂梁行断面図
- 6) 前掲 5)
- 7) 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、2005
- 8) 梁思成、『中国建筑史』、明文書局、p. 69 第二十図山西五台山佛光寺大雄宝殿断面及平面、1994
- 9) 前掲 8)、p. 69
- 10) 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
- 11) 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.tshs.titech.ac.jp/~nakanisi/k_archi/k019.html
- 12) 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、付図：第七図竣工梁行断面図、1983
- 13) 前掲 12)、p. 1
- 14) 前掲 7)、p. 27
- 15) 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
- 16) 前掲 15)、p. 103
- 17) 前掲 15)、p. 102
- 18) 前掲 15)、p. 103
- 19) 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
- 20) 前掲 19)
- 21) 福田武雄他、『大学課程橋梁工学（別巻）橋梁設計例』、オーム社書店、付図：道路橋設計例〔I—1〕一般図』、1969
- 22) 前掲 21)
- 23) 平井信二、『木の百科』、朝倉書店、p. 52、1996
- 24) 文部科学省ホームページ
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t20010410002/t20010410002.html
- 25) 前掲 23)
- 26) 前掲 19)、p. 128
- 27) 「橋梁工学ハンドブック」編集委員会編、『橋梁工学ハンドブック』、技報堂出版、p. 49-p. 51、2004