

# 法隆寺金堂のトラス効果とその立体架構に関する実験的研究

木本次憲



## 論文の内容の要旨

# 論文の内容の要旨

木本次憲

論文題目 法隆寺金堂のトラス効果とその立体架構に関する実験的研究

## 第1章 序論

世界最古の木造建築といわれる法隆寺金堂は昭和の大修理以来その脆弱な構造を指摘されてきた。また中国朝鮮半島に現存する古代の宮殿・仏教建築は総て扇垂木であるのに対し、日本では最古の法隆寺を含め総て平行垂木とされていた。ところが昭和31年難波の四天王寺講堂発掘現場から奈良時代の扇垂木落下跡が発見され、仏教移入当初は扇垂木を採用していた事が判明した。この時期に法隆寺金堂は尾垂木(斜材)を用いた立体架構により、扇垂木から平行垂木への転換を合理的に実現したと考えられる。そこで本研究では以下の仮説をたて、1/2縮尺モデルによる垂直加力実験に基づいた考察を行った。さらに中国大陸・朝鮮半島・日本に残された古代建築の調査等から法隆寺につながる構造的特徴を指摘し、世界最古の木造建築に秘められた「創意」と「技術的裏付け」を検証するものである。

仮説：1300年前に、法隆寺金堂は「トラス原理を応用した立体架構」を意図して創られた。

本論文は(Ⅰ)実験編と(Ⅱ)歴史編の2部構成とし、法隆寺の特殊な架構方法について実験的検証と歴史的考察の両面から論じている。

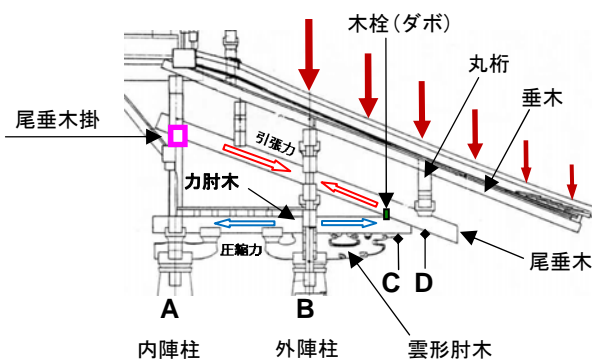


図1 金堂初層 軒先断面図

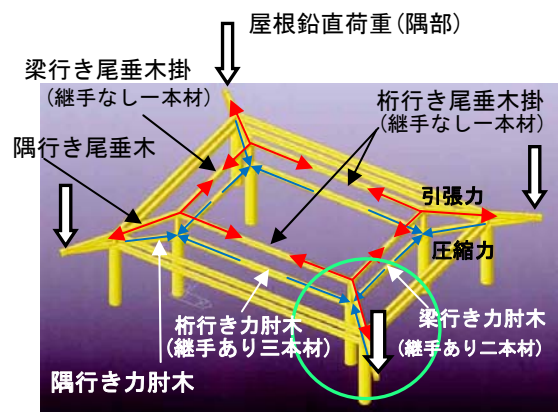


図2 立体架構概念図

## 第2章 (I) 実験編

**[実験概要]** 今回の実験では金堂初層の一隅部分を抽出し、各水平部材が軸力で釣り合っていると仮定して垂直荷重をかけた(図 1, 2, 3)。その時の尾垂木掛け(上段水平材)と通り肘木(中段水平材)の引張軸力、尾垂木(斜材)先端部分の垂直変位、主要部材の絶対変位と相対変位、トラスを構成する尾垂木と力肘木の表面歪を計測した。それらの実測結果から試験体全体の挙動、力肘木の破壊モードなどを検証した。さらに軒先荷重が「トラス抵抗要素」と「片持ち梁抵抗要素」に分担されていると仮定し、歪ゲージの値と尾垂木先端垂下値からその分担率を計算した。

**[実験結果とその考察]** 試験体 6 体に対し先端ダボあり 3 回・ダボなし 3 回の加力実験を行った結果(図 3)、ダボありが初期状態から剛性が大であった(図 4)。また外陣柱(B)点付近の力肘木(水平材)に取り付けた歪ゲージ値(図 5)から、力肘木の上辺仕口のせん断割裂による断面欠損が原因で軒先垂下が生じたと考えられた。修理工事報告書の写真と観察記録から保存部材にも同様の瑕疵が確認された。更に先端垂下に伴いダボは引張上げられ反時計回りに回転したが、ダボなし時に比べ試験体各部の変位が少なく三角形全体の変形は明らかに減少しダボの効果が確認された。

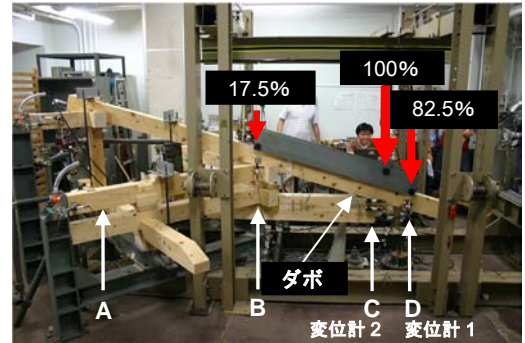


図3 実験装置全体写真

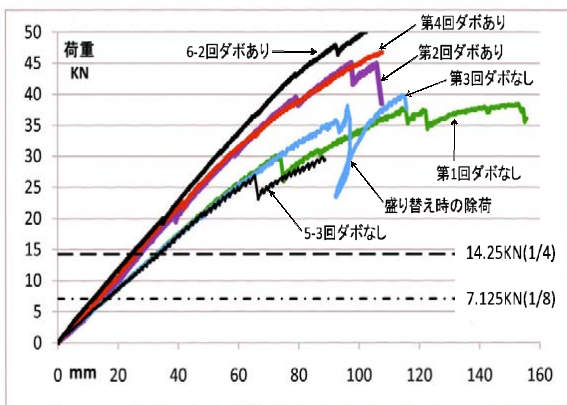


図4 尾垂木先端の垂下 (D点: 変位計1)

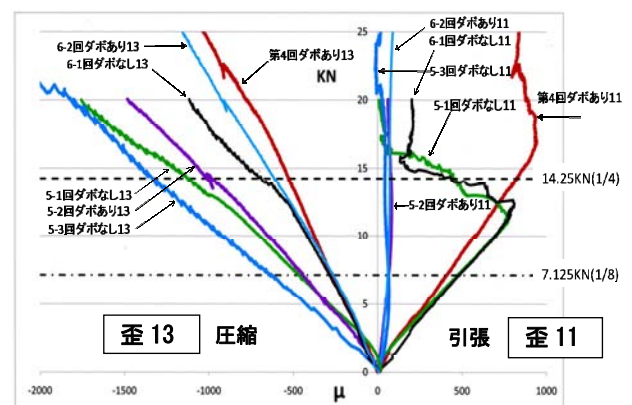


図5 力肘木 柱心近辺 (歪11, 歪13)

**[検証1] [検証2]** 歪ゲージから推測するトラス効果

軒先荷重を「トラス抵抗要素」(図6)「片持ち梁抵抗要素」(図7)に分担した力学モデルに基づき、尾垂木(斜材) B点付近での理論上の曲げモーメントを計算し実測された歪ゲージ値との比較からトラス抵抗要素の割合を推定した。その結果トラス効果は60%前後、そのうち摩擦効果40%前後、ダボ効果が20%前後と予測された。

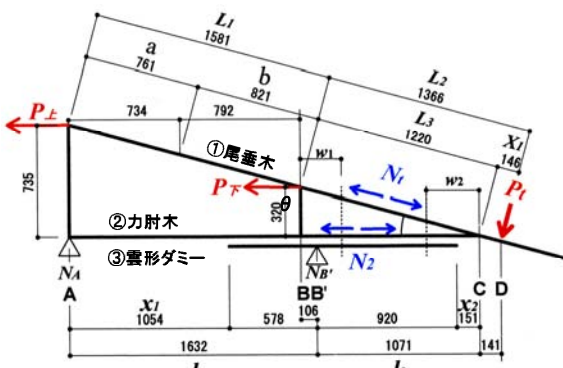


図6 トラス抵抗要素の力学モデル

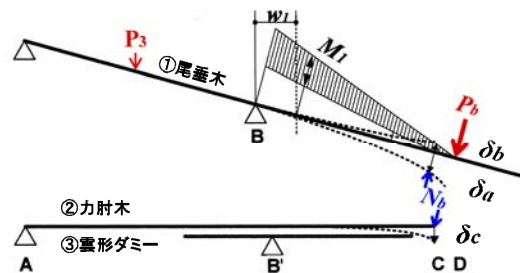


図7 片持ち曲げ抵抗要素の力学モデル

### [検証 3] 先端垂下から推測するトラス効果

同様に「片持ち梁抵抗要素」だけが作用するときの先端垂下変位が理論的に求められるので、実験での実測値との比較から「トラス抵抗要素」が推測できる。その結果トラス効果は40%前後、そのうち摩擦効果は20%前後、ダボ効果は20%前後と推定された。以上[検証 1, 2, 3]の結果を総合すると約50%をトラス架構による軸力で負担し、その内の約半分は境界面の摩擦力で負担していると推定される。

### [尾垂木軸力の立体架構成分]

測定結果から尾垂木(斜材)先端荷重に対して上段水平材(尾垂木掛け)と中段水平材(通り肘木)に引張応力が伝達された(図8)。さらに古代鎌継手の破断によりそれらの引張応力が四方にバランスしている事が確認された。

### [実験結果の結論]

- \* トラスにより四隅の尾垂木(斜材)にかかった引張軸力は尾垂木掛け(上段水平材)と通り肘木(中段水平材)に伝達され建物四周で立体的に釣り合っている。
- \* 法隆寺金堂は初層軒先にかかる垂直荷重の約50%をトラス架構による軸力で負担し、残りを片持ち梁の曲げで負担していると考えられる。
- \* トラス先端の尾垂木と力肘木のせん断力伝達には、尾垂木先端に挿入されたダボのせん断力と境界面の摩擦力が考えられ、せん断力伝達の約半分は摩擦力が負担していると推定される。
- \* 尾垂木先端ダボ挿入により尾垂木(斜材)と力肘木(下段水平材)の縁応力度減少が確認され、曲げ抵抗の割合が減少しトラス抵抗の割合が増加することで架構全体の鉛直方向の剛性が増大したと考えられる。
- \* 力肘木上端の「渡り腮」の初期亀裂が端緒となり、力肘木の断面2次モーメントは半減したと推測され、これが法隆寺金堂の軒先垂下の要因となったと考えられる。

## 第3章 (II) 歴史編

百濟聖明王による仏教伝来(552年)以降、日本最初の仏教寺院である飛鳥寺(588年)、四天王寺(593年)、創建法隆寺(若草伽藍607年)の建設に百濟の職人が関与したとされ、初期のものは扇垂木であったと推測される。

643年に竣工した山田寺金堂の特殊な柱配置も扇垂木架構の一形式と解釈できる(図9)。その後天智9年(670年)に創建法隆寺が焼失したとされるが、この直前663年百濟、668年高句麗が新羅・唐の連合軍により滅亡した。現存法隆寺の施工時期は確定できていないが、金堂再建にあたりこれら朝鮮半島から渡来した人々が関わった可能性は考えられる。7世紀中期の作とされる玉虫厨子は「平行垂木」であるが放射状に飛び出た組物に「扇垂木」の痕跡が残っている。再建された法隆寺(図10)は平行垂木を使用しているが、金堂・中門の架構には扇垂木を連想させるものがある。このように法隆寺には両方の要素が混在し成立過程には謎が多い。

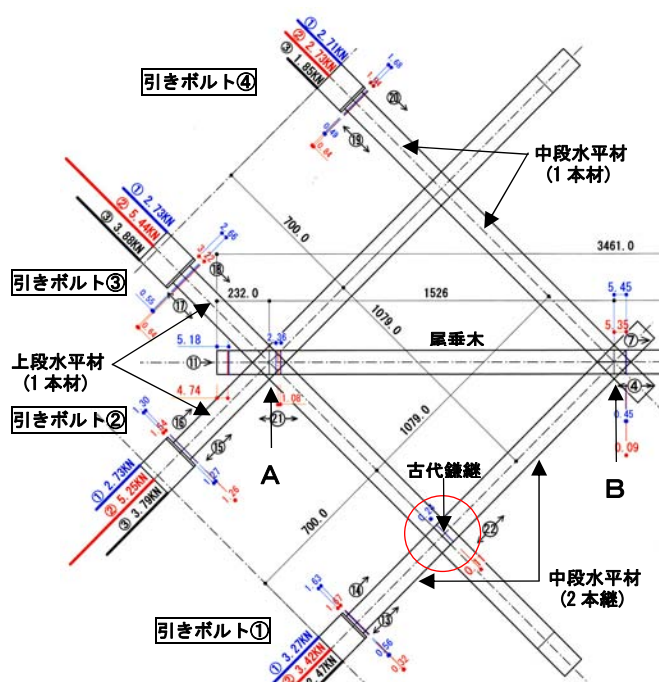


図8 引きボルト張力図  
第5-1回～第5-3回実験平面図  
第5-1回実験(ダボなし) 14.25KN(1/4)  
第5-2回実験(ダボあり) 14.25KN(1/4)  
第5-3回実験(ダボなし) 14.25KN(1/4)

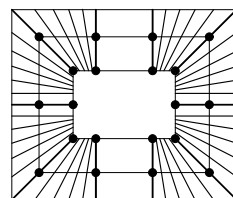


図9 山田寺 推定架構図

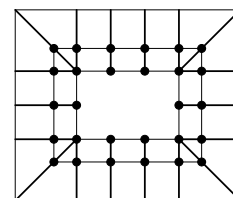


図10 法隆寺金堂

また伊東忠太が法隆寺の価値を発見して以来「北魏→高句麗」と「南朝→百済」の二つの流れが指摘されてきた。そこで軒先構造に関する部材に限ってその流れを整理してみると(表1)、百済から扇垂木と共に「尾垂木」が渡来している(c-2)。そこに高句麗から「平行垂木」の技法が数十年遅れて来たとするれば、それらが法隆寺金堂で合体した可能性を否定できない(図11)。当時では調達が困難であった長大部材を使って最大のボリュームを創出する為には、トラスに組んだ平行垂木を使用するのは合理的な方法であった。本論文の実験編からもそれは裏付けられる。法隆寺を創出した技術者たちが力の流れを正確に理解していたことが見て取れる(図12)。

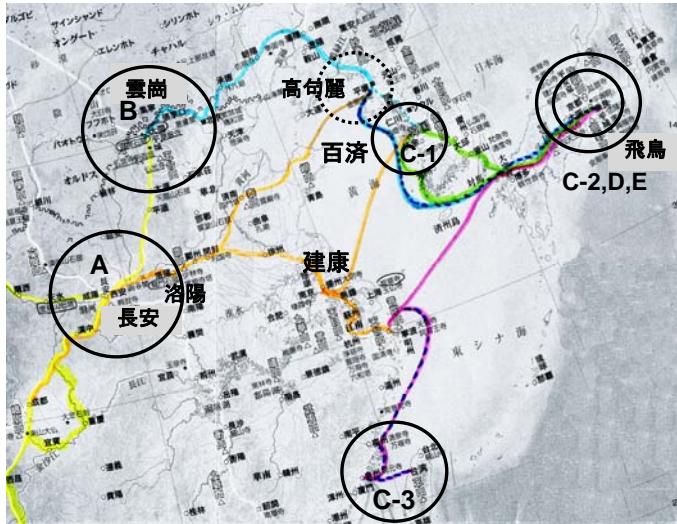


図11 古代仏教建築伝搬 想定図

表1 軒先構造の特徴の抜粋

分類	凡例	軒先構造の特徴
A	漢代明器(焼物)・石闕(AD1~3C)	尾垂木なし(例外1)+隅三組物なし
B-1	北朝時代の石窟・明器(6C)	扇垂木と平行垂木が併存+尾垂木なし
C-1	百済最後の首都扶余(6C半~7C半)	扇垂木+尾垂木+隅一組物
C-2	仏教伝来初期寺院(6C後~7C半)	扇垂木+尾垂木の可能性が高い
D-1	法隆寺(7C後半)	平行垂木+尾垂木+隅一組物+雲形肘木
D-2	奈良初期仏教寺院(8C)	平行垂木+尾垂木+隅三組物
E	正倉院(8C半)	校倉造
B-2	隋・唐代初期(6C末~7C末)	扇垂木+尾垂木なし
B-3	盛唐~晩唐・五代(8C初~10C)	扇垂木+尾垂木
C-3	台湾のグリッドに乗らない柱配置(18C)	扇垂木+尾垂木なし+隅三

一方唐代以降の中国に残る古代建築は平行垂木を捨ててしまったが、そこには法隆寺のルーツを見出すことができる。墨木・積み重ね方式は法隆寺金堂につながると考えられる。また日本国内において薬師寺東塔(図13)では尾垂木をトラスとする意識が薄くなる。尾垂木先端にダボを使用しているがその位置が側柱に近すぎトラス効果は小さいと思われる。

唐招提寺金堂(図14)では尾垂木尻に屋根荷重が乗っておらず梃子としては作用していない。さらに三角形先端は斗拱に組み込まれトラスとしての機能を失っていく。法隆寺金堂は扇垂木から平行垂木への構造的転換点に位置づけられ、「トラス原理を応用した立体架構」は7世紀後半の飛鳥の地で開発された可能性が考えられる。しかしその構造原理は後世に伝承される事はなかったのである。



図12-1 法隆寺 五重塔(隅一組物)



図13-1 薬師寺 西塔(隅三組物)



図14-1 唐招提寺金堂 平行尾垂木

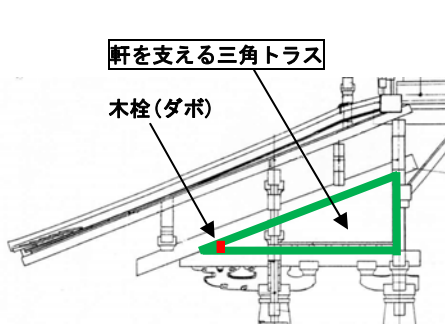


図12-2 法隆寺 金堂

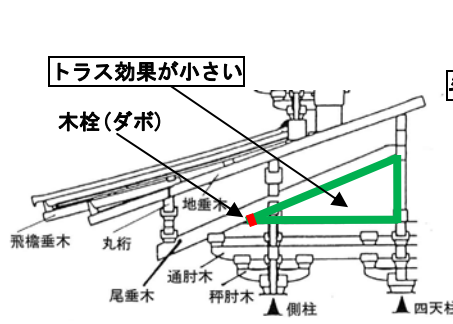


図13-2 薬師寺 東塔

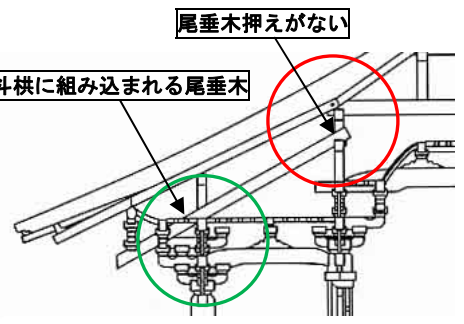


図14-2 唐招提寺金堂 復原断面図





## 目次

# 法隆寺金堂のトラス効果とその立体架構に関する実験的研究

論文の内容の要旨	3
目次	10
第1章 序論	13
1.1 問題提起	14
1.2 扇垂木と平行垂木に関する定説の再検討	15
1.3 修理工事報告書の再読とトラス仮説	16
1.4 法隆寺金堂の既存補強工事	18
1.5 本論文の目的と概要	20
1.6 本論文の構成	20
第2章 (I)実験編	21
2.1 実験の目的	22
2.2 実験概要	22
2.3 実験方法	22
2.3.1 試験体と実験装置	22
2.3.2 実験スケジュールと計測機器	26
2.4 実験結果とその考察	28
2.4.1 実験結果の概説	28
2.4.2 軒先先端垂下	30
2.4.3 試験体の全体的挙動	31
2.4.4 力肘木の破壊モード	32
2.4.5 修理工事報告書からの考察	34
2.4.6 [検証1][検証2] 歪ゲージから推測するトラス効果	35
2.4.6.1 算出根拠	35
2.4.6.2 実験スケジュールの詳細	38
2.4.6.3 検証結果[1][2]	39
2.4.6.4 トラス効果の計算表	40
2.4.7 [検証3] 先端垂下から推測するトラス効果	42
2.4.8 トラス先端部の挙動とダボWの回転	44
2.4.9 尾垂木軸力の立体架構成分	46
2.5 実験結果の結論	49

実験編 参考資料	51
・引用文献 注 図版出典	52
・扇垂木の軒先垂下計算	54
・実験データ(1)	57
・実験データ(2)	71
・木材試験体	119
・鉄骨治具	127
第3章 (Ⅱ)歴史編	137
3.1 法隆寺の構造的特異性に関する既往研究	138
3.2 中国古代建築の組物から法隆寺の雲形肘木へ	140
3.3 四天王寺の扇垂木	145
3.4 垂木先瓦	148
3.5 扇垂木から考察する山田寺	152
3.6 意図されたトラス原理と立体架構	155
3.6.1 扇垂木の特徴	155
3.6.2 平行垂木の特徴	155
3.6.3 法隆寺の立体架構	156
3.6.4 実験結果とその考察	157
3.7 構造的視点から試みる法隆寺の位置づけ	159
3.7.1 軒先の構造部材	159
3.7.2 垂木・尾垂木・組物・屋根形状の一覧表	162
3.7.3 構造部材とその合理性	164
3.7.4 歴史編のまとめ	165
3.8 今後の研究課題	167
*3.8.1 中国の木構造の起源	168
*3.8.2 井楼組と法隆寺	172
*3.8.3 掘立柱から礎石式へ	174
第4章 結論	177
歴史編 参考資料	181
・引用文献 注 図版出典	182
謝辞	193



## 第 1 章 序論

## 第1章 序論

### 1.1 問題提起

世界最古の木造建築といわれる法隆寺金堂(図1-1)はその構造上の不備を指摘されてきた。昭和の大修理に関わった竹島卓一は自著<sup>1)</sup>の中で「…梁皆無の構造法などは、全くでたらめで、到底、大成された中国の建築技法に対して、十分に心得のあるものが設計した建築とは思われない。」としている。はたして法隆寺金堂の特異な架構方法は構造上の欠陥であったのであろうか？

またその建築様式に関して村田治郎は、雲形三斗・皿板・天蓋・人字形割束などを精査し、中国大陸で異なった時代(漢・魏～南北朝)に使用されたものが法隆寺では「渾然統一した形」となっているとし、先に大陸から伝来した様式に後から移入された様式が合成されて一様式(推古様式)になったと推論している<sup>2)</sup>。たしかに肘木と斗が一体化し外壁に向かって挺出した雲形肘木そのものは現在までその類例がなく、さらに尾垂木(斜材)と組み合わせられ外壁隅から45度方向に大きく飛び出した隅部の組物は異様ですらある(図1-2)。



図1-1 法隆寺金堂+五重塔

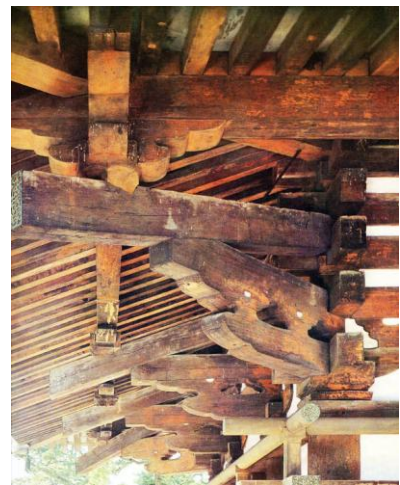


図1-2 法隆寺五重塔

さらに中国朝鮮半島に現存する古代建築が全て扇垂木である<sup>3)</sup>のに対して、日本の古代建築は(鎌倉時代に重源が大仏様として宋代の扇垂木を移入するまで)平行垂木を用いていたとするのが通説であった。しかし昭和31年(1956年)難波の四天王寺での発掘調査中に講堂跡から創建当時の扇垂木落下跡が発見され(図1-3)、仏教建築移入当初は日本でも扇垂木が使用されていたことが確認された。また中国でも北魏前期(470～494年)の雲崗石窟では扇垂木と平行垂木の併存した例が存在し、唐代では平行垂木が主流を占めていた可能性まで指摘されるようになった<sup>4)</sup>。では何故、法隆寺では扇垂木を捨て平行垂木を採用したのであろうか？

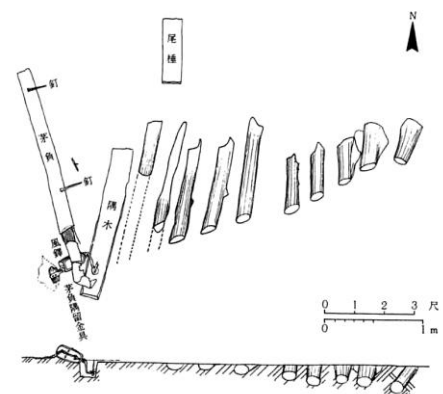


図1-3 四天王寺講堂 扇垂木落下跡

## 1.2 扇垂木と平行垂木に関する定説の再検討

太田博太郎は古代日本に流入した中国文化の影響に関して、我々は「無意識のうちに好むものだけ」を取り入れたと述べている<sup>5)</sup>。また後藤治は扇垂木の長所と比較して「平行垂木は隅で軒の荷重を支えることが困難という欠点をもつが、見た目の納まりがよいという利点を持つ」としている<sup>6)</sup>。今日までの定説では、洗練された美的感覚を持つ日本文化は「合理的」な扇垂木を否定し平行垂木を採用したとされている。

しかし詳細に検討してみると(参考資料 54 頁)、扇垂木は軒先隅部の荷重を満遍なく負担するが垂木の先端に行くほど負担荷重は増える(図 1-4)。一方「平行垂木」の長所は軒先に行くに従って垂木長さが短くなり先端に行くほど垂木 1 本ずつにかかる負担は減少する(図 1-5)。長大な部材の確保に苦勞していた当時<sup>7)</sup>、最小の部材で最大の効果を発揮するには平行垂木が最適であり、隅木に集中する軒先荷重を支えるシステムが必要とされたのではないだろうか。それを実現する為に創出されたのが、法隆寺金堂のトラス架構だったのではないかと考えられる。

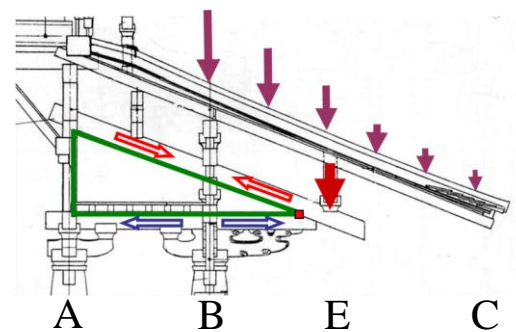
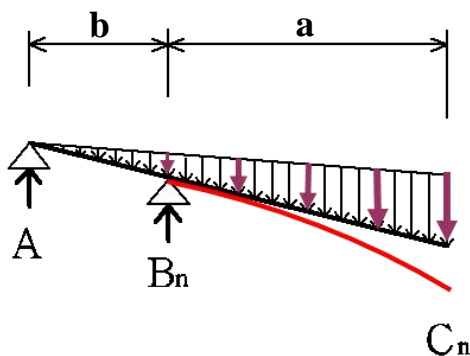
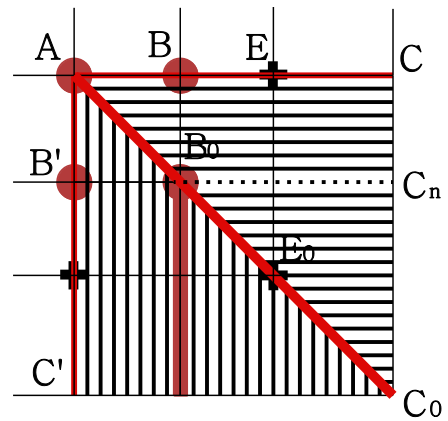
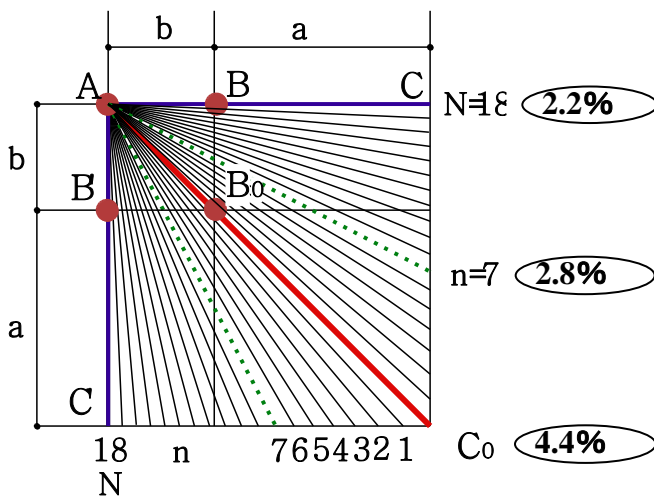


図 1-4 扇垂木の荷重分担図

(\*2.9.1 参考資料：扇垂木の軒先垂下計算)

図 1-5 平行垂木の荷重分担図

### 1.3 修理工事報告書の再読とトラス仮説

昭和の大修理にあたってその構造調査及び補強方針を立案した棚橋諒は、尾垂木と力肘木がトラスを構成していることを指摘している<sup>8)</sup>。但しそれらは個別の三角形パネルとして機能し、柱上において天秤作用で軒先を支えていると判断された。しかし、それらが本当にトラス効果を発揮しているとするれば尾垂木(斜材)にかかった引張軸力は反力を受けねばならない。特に四隅にかかった屋根荷重は尾垂木掛け(上段水平材)を通して全体的にバランスしているはずである。はたして修理工事報告書<sup>9)</sup>を精読すると、尾垂木尻と尾垂木掛けの仕口はその軸力が伝達されるように工夫され、しかも尾垂木掛けは1本材でリング状にぐるりと回っている事が判明した(図1-6)。

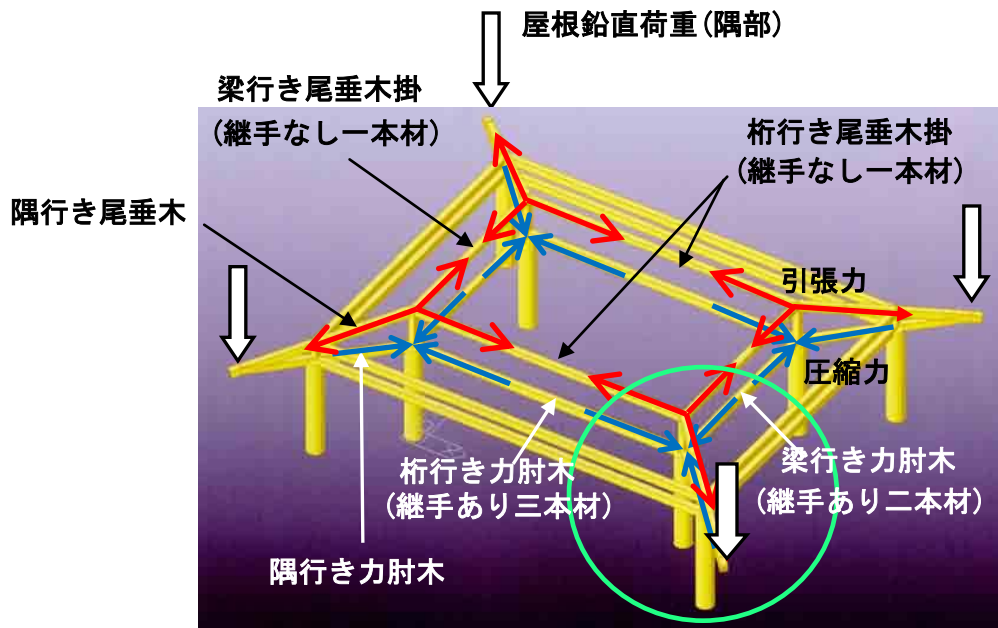


図 1-6 立体架構概念図

報告書によると尾垂木掛け(上段水平材)は桁行き・梁行き共に継手なしの一本材が使用され<sup>9-1)</sup>、相欠きに組まれた隅部の納まりと尾垂木(斜材)尻との仕口は、尾垂木自身が抜け出ないように工夫されている(図1-7, 8, 9, 10)。これにより尾垂木(斜材)にかかった「引張軸力」は尾垂木掛け(上段水平材)を通して伝達される。四隅にかかった屋根荷重はリング状の尾垂木掛けによってバランスしていると考えられる。これに対し「圧縮軸力」のかかる力肘木(下段水平材)は尾垂木掛けと同じスパンでありながら、継手を用いた二本材・三本材を用いている<sup>9-2)</sup>。以上の事から、当時の技術者が力の流れを正確に判断して材料選択(木取り)をしていたと考えられる。

そこで本論文では以下の仮説に立ち、1/2縮尺モデルによる垂直加力実験に基づいた考察を行う。さらに中国大陸・朝鮮半島・日本に残された古代建築の調査等から、法隆寺につながる構造的特徴を指摘し世界最古の木造建築に秘められた「創意」と「技術的裏付け」を検証するものである。

仮説: 1300年前に、法隆寺金堂は「トラス原理を応用した立体架構」を意図して創られた。



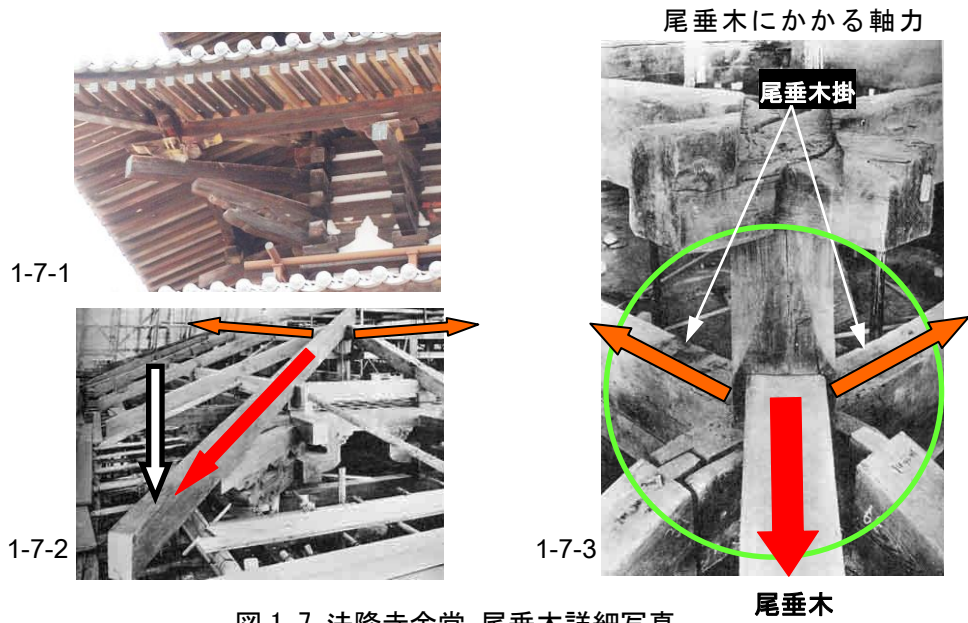


図 1-7 法隆寺金堂 尾垂木詳細写真



図 1-8 尾垂木掛け仕口写真

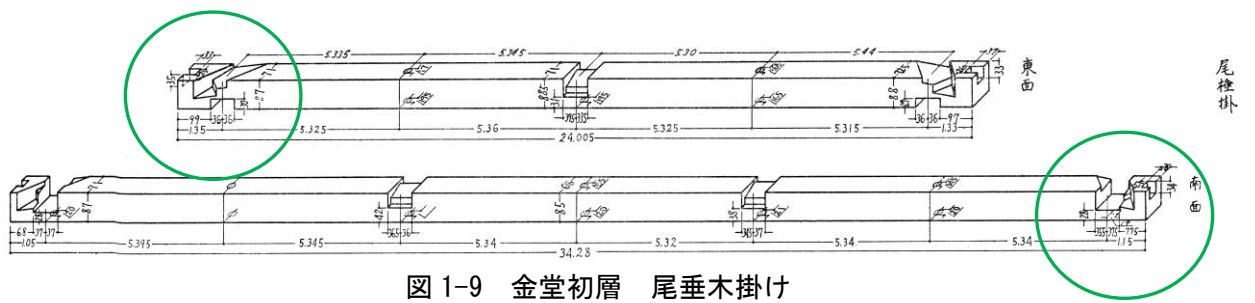


図 1-9 金堂初層 尾垂木掛け

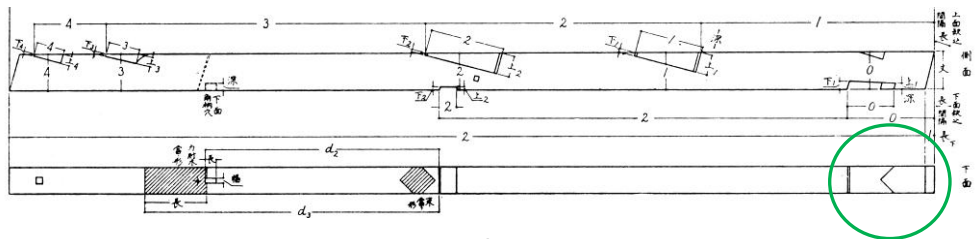


図 1-10 金堂初層 隅行き尾垂木

### 1.4 法隆寺金堂の既存補強工事

法隆寺金堂初層は28本の柱で構成されており(図1-11)、内陣(身舎)柱と外陣(庇)柱をつなぐ力肘木(水平材)はそのまま外部に挺出し、尾垂木(斜材)と組み合わせられ三角トラスを形成している(図1-12)。しかし内陣にそれらを繋ぐ当初材の梁が存在しなかったことから構造上の欠陥を持つといわれてきた。竣工後間もなく金堂初層の周りには裳階と呼ばれる回廊が付加され、雲形肘木の垂下を支えるようになったとされている。慶長の修理では上層の雲形肘木直下にも束が付加され、四隅の尾垂木上面に2本目の尾垂木が強引に挿入されていた(図1-13)。しかも上層では尾垂木下面を削って添尾垂木を挿入した事により創建時の三角トラスは消滅してしまった。残念ながら後世の大工にはトラスの意味と効果が理解できていなかったようである。

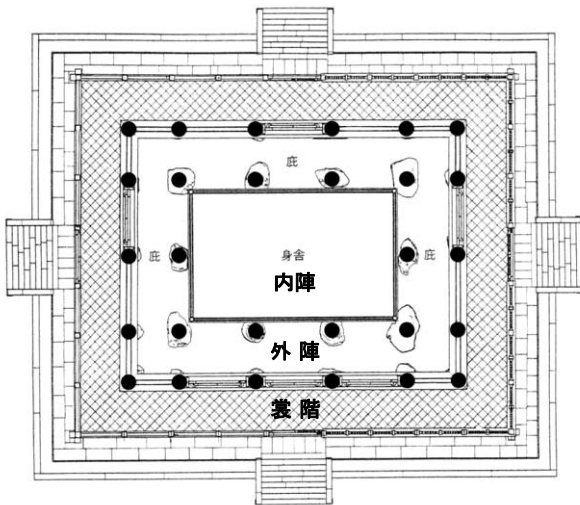


図1-11 法隆寺金堂初層 柱配置図

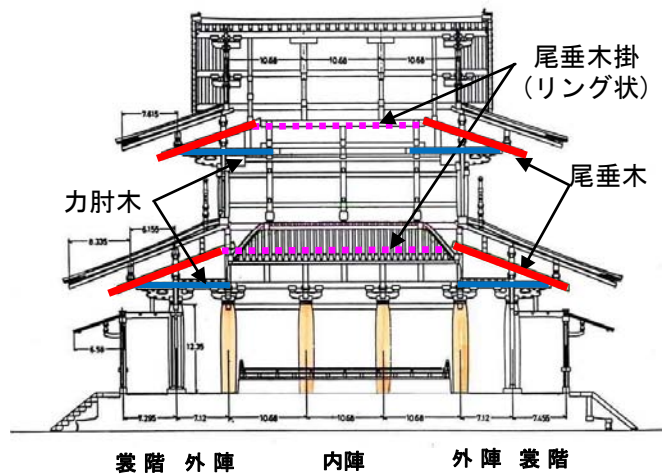
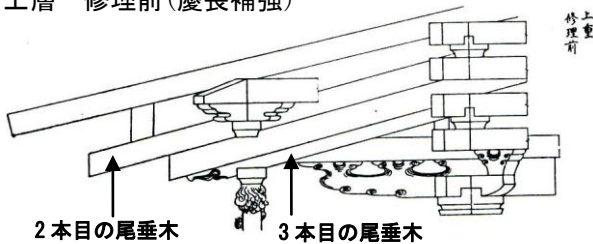
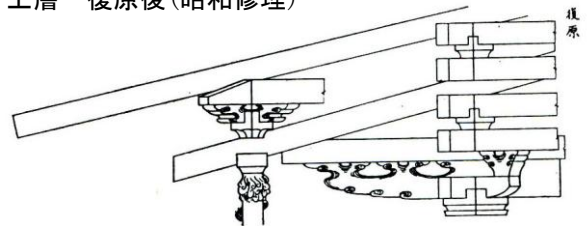


図1-12 法隆寺金堂 断面図

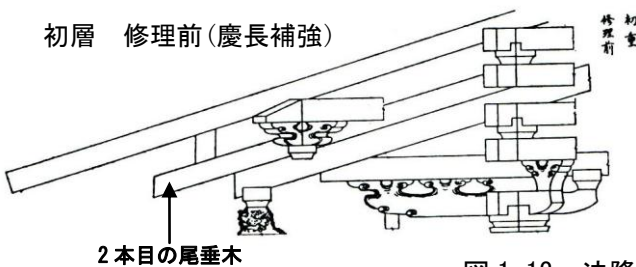
上層 修理前(慶長補強)



上層 復原後(昭和修理)



初層 修理前(慶長補強)



初層 復原後(昭和修理)

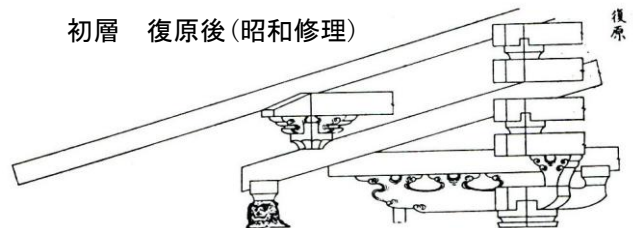


図1-13 法隆寺金堂 隅部組物

さらに修理工事報告書<sup>9-3)</sup>は、金堂創建時の特徴を繫梁や繫貫・飛貫のない「極めて脆弱な構造を持つこの建築の一貫した特異性」であると指摘している。ところが金堂は修理工事中昭和24年1月26日未明失火。内陣壁画と雲形肘木を含む初層主要部分を大きく毀損した。そこで復原にあたり主要構造材を全て新材とすることになった。その時点で「今日より遥かに脆弱な状態で創立の初めから慶長の修理まで保ってきたではないかという幾分神がかり的ではあるが、一種の安心感が暗々裡に作用していた点を否むわけにはいかない」と迷いながらも、当時修理工事所長を務めた竹島卓一は自身の直感を信じた。合理的根拠を持たないままに「有効に補強し得ていた」とされる繫梁を「構造学的には或は無謀な決断」を下し敢えて採用しなかったのである。しかも上層で実施されたような金属部材による補強工事さえ行わなかった。

昭和の大修理では後補部材を可能な限り除去し、竣工当時における法隆寺金堂の再現が試みられた。上層補強では鋼製フラットバーを平行き尾垂木の底に添わせ、反対側の尾垂木尻と緊結させている(図1-14)。しかし初層内部ではこの方法はとられなかった。内陣空間にタイバーが出てくるのを回避するためであったと思われる。竹島は法隆寺の特殊な架構に最後まで悩み、復原にあたって金属を使う事に逡巡していたことが窺がえる。

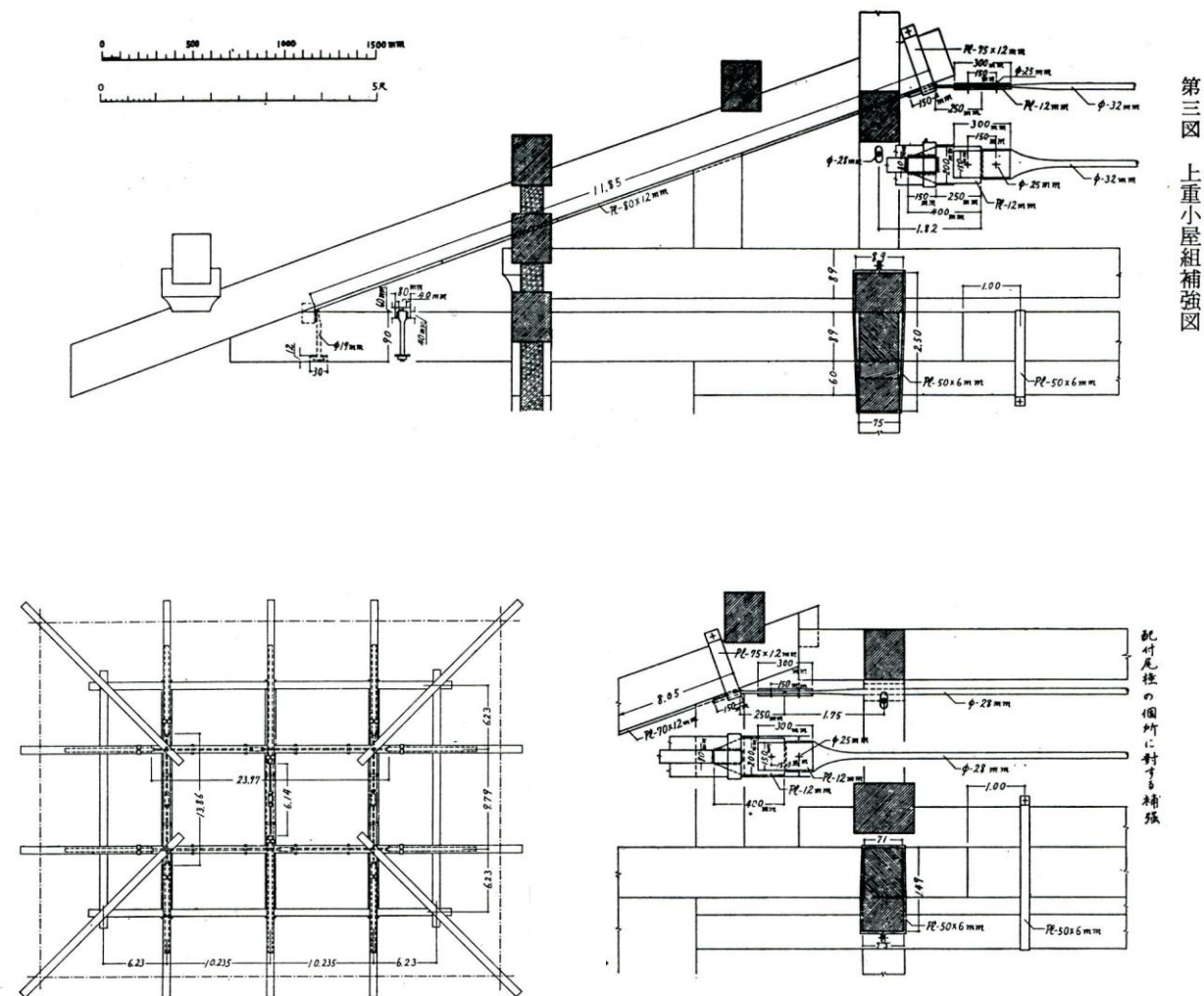


図1-14 法隆寺金堂上層 小屋組補強図

第三図 上重小屋組補強図

## 1.5 本論文の目的と概要

(Ⅰ)前項の「問題提起」と「定説の再検討」から、尾垂木(斜材)と力肘木(水平材)で構成される三角トラスが立体的にバランスしており、法隆寺金堂(図1-15)は「トラス原理を応用した木造立体架構」で成立していると考えられる。そこで1/2縮尺モデルに鉛直荷重を加え、その変形挙動の観察および数値解析から上記仮説を実験的に検証する。

(Ⅱ)中国古代建築の組物と法隆寺の雲形肘木との共通因子を挙げ、架構方法の特徴を構造的に指摘する。現存する扇垂木の架構方法から山田寺(図1-16)の特異な柱配置を説明し、飛鳥様式と呼ばれる飛鳥寺・四天王寺・山田寺が扇垂木を採用していたと推測される根拠を示す。その中において法隆寺金堂は扇垂木の痕跡を残しながらも平行垂木を採用した事を指摘し、そこに画期的な構造転換が意図されていた可能性を論証する。

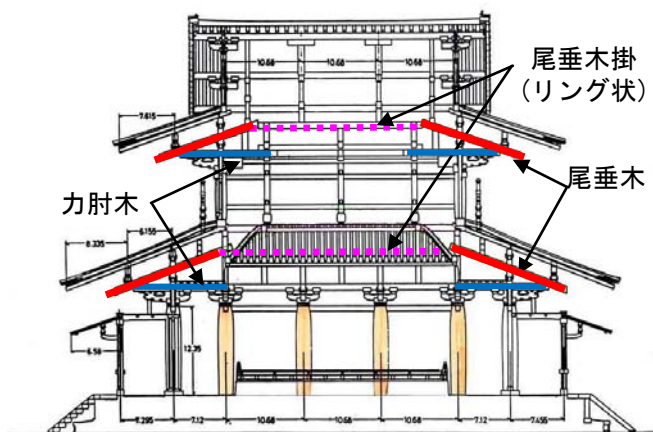


図1-15 法隆寺金堂 断面図

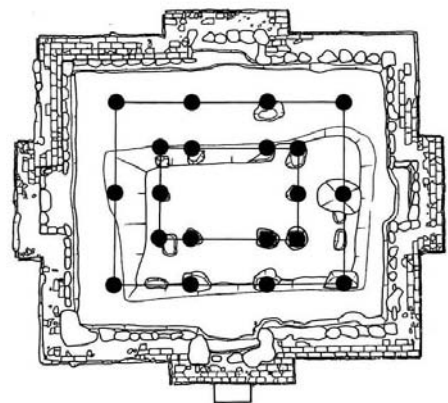


図1-16 山田寺金堂 復原礎石配

## 1.6 本論文の構成

本論文は(Ⅰ)実験編と(Ⅱ)歴史編の2部構成とした。法隆寺の特殊な架構方法について、それぞれ実験的検証と歴史的考察から論じており、(Ⅱ)歴史編から先に読んでも理解できる内容とした。

### 第1章 序論

### 第2章 (Ⅰ)実験編：1/2縮尺モデルを使っての実証実験

### 第3章 (Ⅱ)歴史編：法隆寺金堂の歴史的位置づけ

### 第4章 結論

## 第 2 章 ( I ) 実験編

## 第2章 (I) 実験編

### 2.1 実験の目的

序論で指摘した「法隆寺金堂のトラス原理を応用した木造立体架構」(図2-1,2)を検証する。法隆寺金堂初層の1/2縮尺モデルに鉛直荷重を加え、その変形挙動の観察解析を行う事により上記仮説を実験的に検証する。さらに修理工事報告書の記述と併せて考察する。

### 2.2 実験概要

今回の実験では金堂初層の一隅部分を抽出し、各水平部材が軸力で釣り合っていると仮定して垂直荷重をかけた。その時の尾垂木掛け(上段水平材)と通り肘木(中段水平材)の引張軸力、尾垂木(斜材)先端部分の垂直変位、主要部材の絶対変位と相対変位、トラスを構成する尾垂木と力肘木の表面歪などを計測した。それらの実測結果から試験体全体の挙動、力肘木の破壊モードなどを検証した。さらに軒先荷重が「トラス抵抗要素」と「片持ち梁抵抗要素」に分担されていると仮定し、歪ゲージの値と尾垂木先端垂下値からその分担率を計算した。

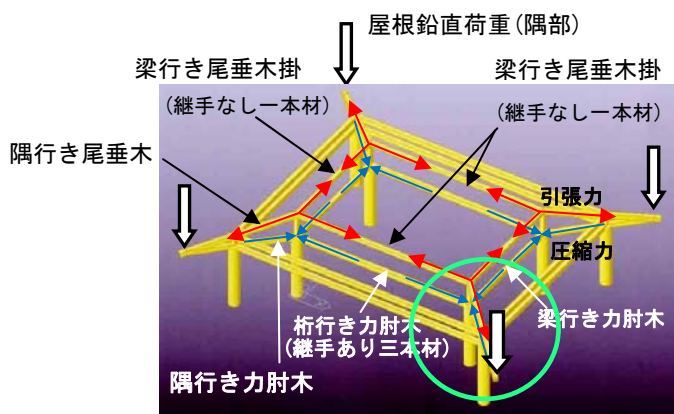


図2-1 立体架構概念図

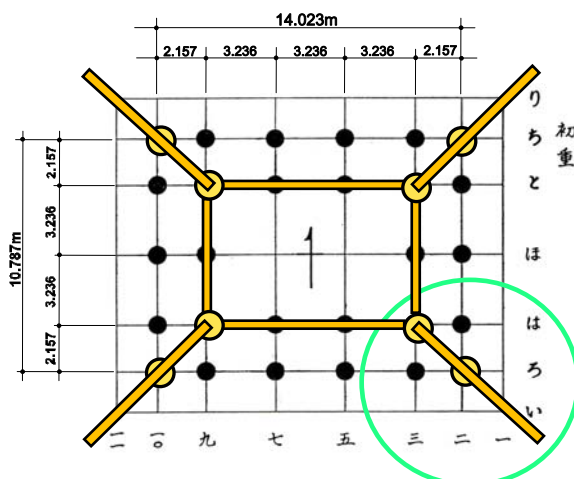


図2-2 法隆寺金堂初層 柱配置図

### 2.3 実験方法

#### 2.3.1 試験体と実験装置

報告書によると殆ど全ての部材が天然ヒノキの「割り材」で組み立てられており一つとして同一寸法のものが存在しなかった。従って本実験の立体モデル作成(図2-3)にあたり部材および仕口寸法は報告書に記載された各部材実測値<sup>2-2)</sup>を平均しその1/2に近い製材寸法(表2-1)を採用した。ヒノキは「芯持特一」と呼ばれる流通材(節有)とし木栓(ダボ)のみカシ材とした。仕口は報告書から読み取った形状を図面化し大工職人に刻んでもらった。

金堂初層の隅屋根部分にかかる実大鉛直荷重は単位重量  $W=2.4\text{KN/m}^2$  として屋根負担面積(図2-4)より柱と束位置での鉛直力を算出した。実大屋根荷重の割合は隅尾垂木に対し先端部から  $D\rightarrow 47\text{KN}$ ,  $B\rightarrow 10\text{KN}$ , 中間部 $\rightarrow 3\text{KN}$ , 内陣隅柱  $A\rightarrow 5\text{KN} + \alpha$  (上層隅柱からの鉛直荷重)となっている(図2-5,6)。

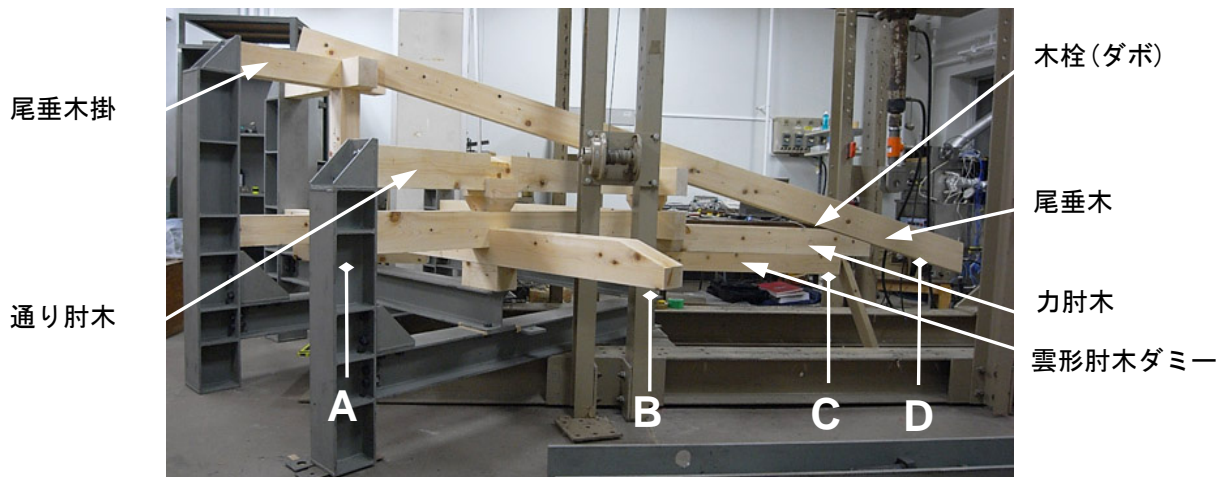


図 2-3 金堂隅部軒先架構 1/2 縮尺モデル試験体

今回の 1/2 縮尺実験で実大の挙動を推測する際、相似則に基づき荷重(体積)及び断面係数( $Z$ )は 1/8, 断面 2 次モーメント( $I$ )は 1/16, 断面積( $A$ )は 1/4 となるが、ヤング係数( $E$ )と材料強度( $F_b$ )は 1/1 である。本論文では軒先支持架構が「トラス抵抗要素」と「片持ち曲げ抵抗要素」との複合作用によると仮定し、その負担割合や破壊要因などの推定を主目的とするため、相似則の異なる  $EA$ ,  $EI/L$ ,  $ZF_b$  に対する解析実験荷重として実大荷重の 1/8 荷重 ( $P_0=7.125\text{KN}$ ) 時と 1/4 荷重 ( $P_0=14.25\text{KN}$ ) 時の挙動について注目し検討を行うこととした。但し  $P_0$  は (B 点+D 点) 上部にかかる実験荷重とする。

表 2-1 試験体リスト

特記なき樹種: ヒノキ 芯持特一	高さ H	幅 W	長さ L
ダボ樹種: カシ	mm	mm	mm
* ① 尾垂木	150	105	3,586
* ② 力肘木(隅)	130	105	2,937
③ 力肘木(平-A)	130	105	2,447
④ 力肘木(平-B)	130	105	2,447
⑤ 通り肘木1-A	130	105	1,829
⑥ 通り肘木1-B	130	105	1,829
⑦ 通り肘木1-A平	130	105	550+150
⑧ 通り肘木1-A隅	130	105	1,279
⑨ 通り肘木2-B	130	105	1,829
⑩ 尾垂木掛けA	130	105	750
⑪ 尾垂木掛けB	130	105	750
⑫ 方斗	119	150	150
⑬ 卷斗A	119	150	150
⑭ 卷斗B	119	150	150
⑮ 束	105	105	595
* ⑯ 雲形肘木ダミー-A	95	105	1,498
⑰ 雲形肘木ダミー-B	95	105	654
⑱ 雲形肘木ダミー-C	95	105	200
⑲ 雲形肘木ダミー-D	95	105	200
カシ	82+60	44	80
⑳ 角ダボW(原寸)	60	22	44
㉑ 丸ダボY 9本	直径23		深さ46

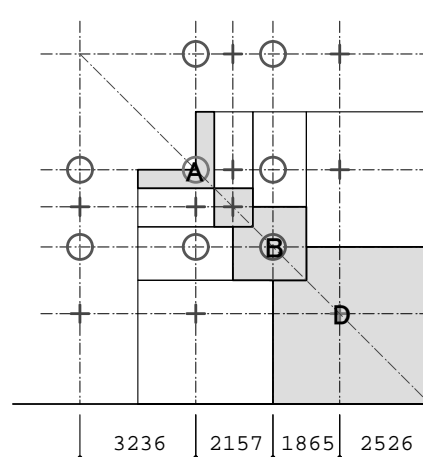


図 2-4 隅屋根荷重分布図

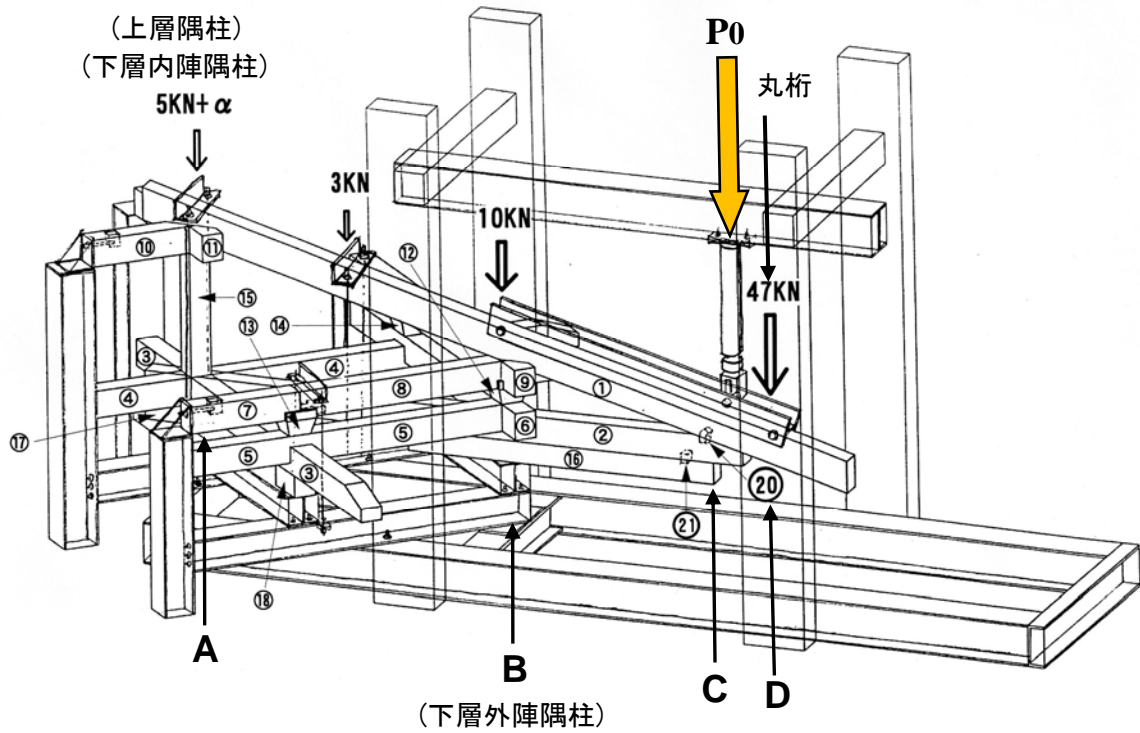


図 2-5 金堂隅部軒先架構の鉛直加力実験概要図

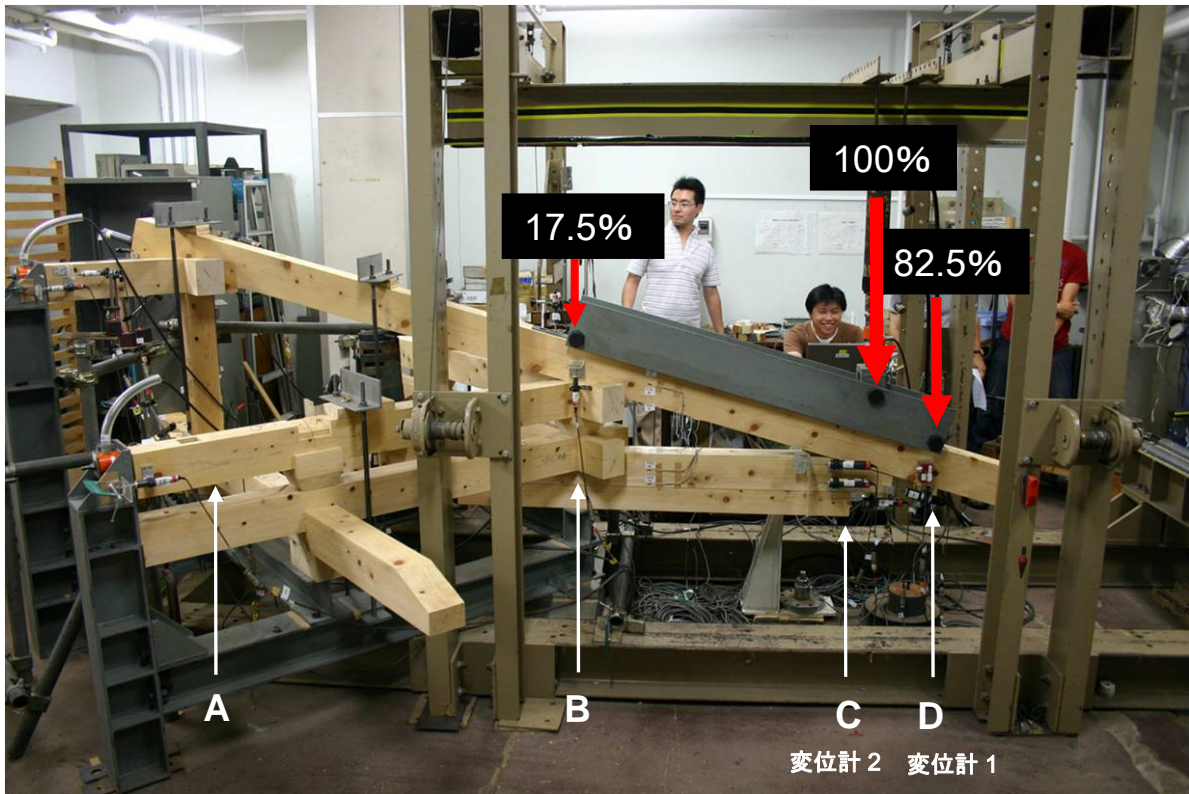


図 2-6 実験装置全体写真



四隅の尾垂木を支えている尾垂木掛け(上段水平材)は梁行き・桁行き共に継手なしの一本材を使用している。尾垂木中間部を支えている通り肘木(中段水平材)<sup>2-5)</sup>は梁行き方向は一本材であるが、スパンの長い桁行き方向は柱上で古代鎌継による二本継となっている(図2-7)。そこで本実験では部材⑦⑧間に古代鎌継を設けた(図2-8)。実際の力の流れを再現するために各水平部材(尾垂木掛け, 通り肘木)を引きボルトφ12mmで鉄骨治具に緊結した(図2-9)。その張力を測定することにより, 尾垂木(斜材)にかかった四隅の軒先荷重が立体架構としてバランスしていることを検証する。また下層内陣隅柱位置(A)では引きボルトφ16mmで下部鉄骨治具に緊結し浮上りを拘束した(図2-5, 6)。実大荷重3KNがかかる尾垂木中間部では約1/4荷重である70kgの錘を固定荷重とした。軒先部分は実大屋根荷重の割合から下層外陣柱(B)に実験荷重の17.5%, 丸桁(D)に82.5%がローラー接点(図2-10)でかかるようにH型鋼を用いて加力を行った。表2-2に主要部材の物性値を挙げる。

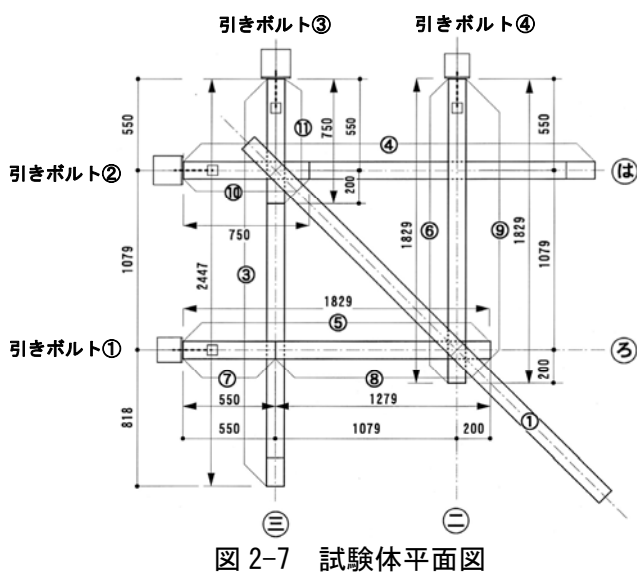


図2-7 試験体平面図

表2-2 主要部材 物性値

		試験体	ヤング係数	含水率
樹種: ヒノキ 芯持特一		記号	N/mm <sup>2</sup>	%
* ① 尾垂木	H:高(mm)	A	9,399	13.4
	W:幅(mm)	B	11,192	9.5
	L:長(mm)	C	8,253	9.9
	I:断面2次モーメント	D	9,048	11.0
	(x10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> )	E	8,364	9.0
		F	2,953	8,976
		平均	9,205	10.8
* ② 力肘木(隅)	H:高(mm)	A	7,924	9.8
	W:幅(mm)	B	7,358	15.8
	L:長(mm)	C	8,661	9.6
	I:断面2次モーメント	D	10,356	11.5
	(x10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> )	E	9,394	9.3
		F	1,922	9,612
		平均	8,884	10.9
* ⑬ 雲形肘木ダミーA	H:高(mm)	A	8,012	19.3
	W:幅(mm)	B	7,904	24.0
	L:長(mm)	C	10,718	15.9
	I:断面2次モーメント	D	10,781	17.8
	(x10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> )	E	6,855	19.8
		F	750	10,991
		平均	9,210	18.4



図2-8 ③③ 古代鎌継部



図2-9 引きボルト① 設置状況



図2-10 尾垂木先端 加力治具

### 2.3.2 実験スケジュールと計測器位置

試験体は6セット(A~F)用意し、基本的には「ダボWなし」3回(奇数回目)と「ダボWあり」3回(偶数回目)実験を行った。第1~2回では破壊まで単調載荷, 第3~4回では10KNと20KNで繰り返し除荷後→破壊まで載荷を行った。第5回では「ダボWなし」で20KNまで加力→除荷, 試験体(E)はそのまま「ダボWを挿入」→再セット→20KNまで加力→除荷, 試験体(E)はそのまま「ダボWを外し」→再セット→破壊まで載荷を行った。第6回では「ダボWなし」で20KNまで加力→除荷, 試験体(F)はそのまま「ダボWを挿入」→再セット→破壊まで載荷を行った。(表2-3)

表 2-3 実験スケジュール

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5-1回	第5-2回	第5-3回	第6-1回	第6-2回
試験体	A	B	C	D	E	E	E	F	F
⑳角ダボW	×	○	×	○	×	○	×	×	○
	セット	セット	セット	セット	セット	再セット	再セット	セット	再セット
	↓	↓	10KN→除荷 20KN→除荷	10KN→除荷 20KN→除荷	20KN→除荷	20KN→除荷	↓	20KN→除荷	↓
	破壊	破壊	破壊	破壊			破壊		破壊

#### 主要計測器位置 立面表示 :

計測器は最終的に、変位計 16 箇所、引きボルト張力 4 箇所、歪ゲージ 20 箇所となった。

変位計①: 尾垂木 D 点垂下, 変位計②: 雲形肘木 C 点先端垂下, 変位計 3: 尾垂木と力肘木の相対変位

変位計④: 尾垂木 B 中央部の相対変位, 変位計⑦: 尾垂木中央部 B 点の絶対変位

変位計⑨: 力肘木 E 点の絶対水平変位, 変位計⑩: 尾垂木 E 点の絶対高さ

変位計⑪: 尾垂木エンドの絶対変位, 変位計⑰: 尾垂木エンドの相対変位

変位計⑫: 尾垂木エンドの絶対高さ,

歪計⑦⑨: 尾垂木 F 点上辺と下辺, 歪計⑪⑬: 力肘木 F 点上辺と下辺

歪計⑮⑰: 尾垂木 G 点上辺と下辺, 歪計⑱⑳: 力肘木 G 点上辺と下辺

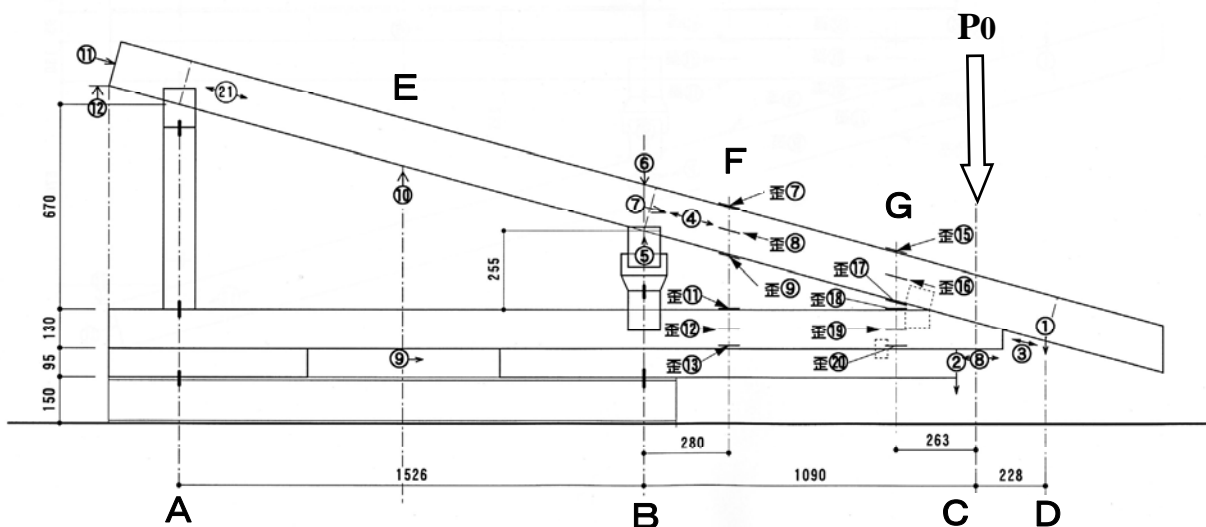


図 2-11 計測器 番号・位置 立面図

主要計測器位置 平面表示：

引きボルト 1：変位計⑬相対変位，⑭絶対変位，引きボルト 2：変位計⑮相対変位，⑯絶対変位

引きボルト 3：変位計⑰相対変位，⑱絶対変位，引きボルト 4：変位計⑲相対変位，⑳絶対変位

変位計 22：古代鎌継の相対変位，変位計 24・25：角ダボW回転

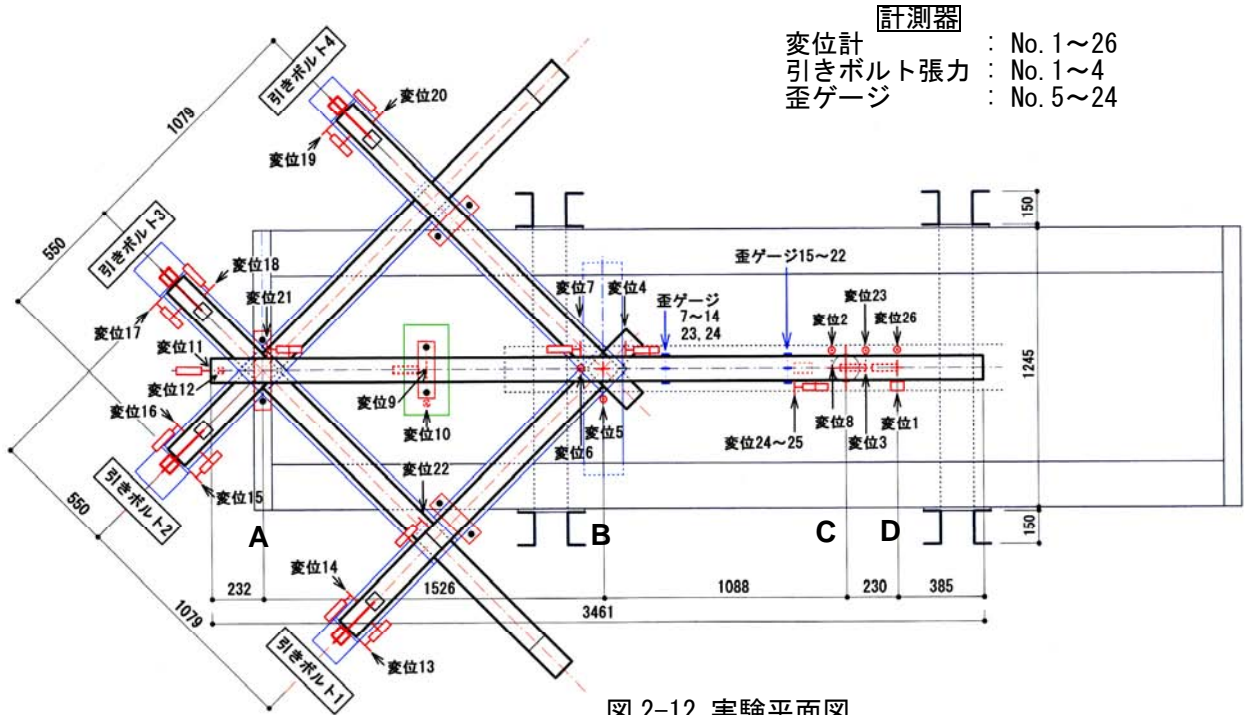


図 2-12 実験平面図

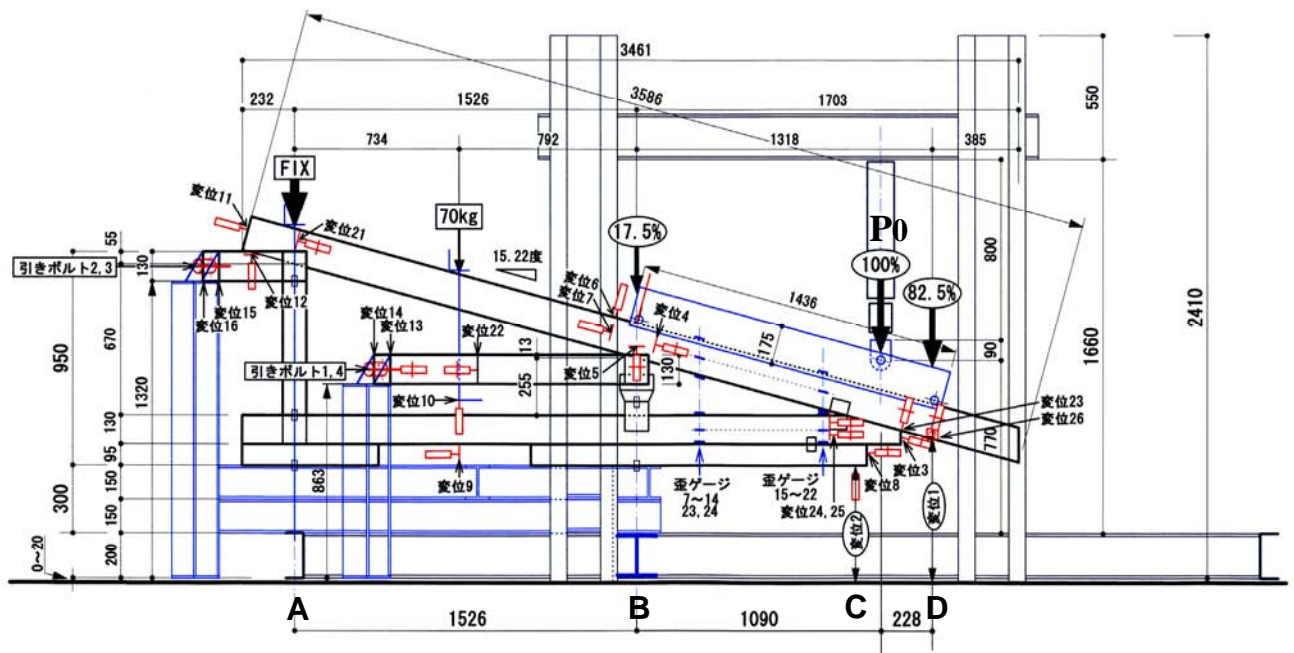


図 2-13 実験立面図

## 2.4 実験結果とその考察

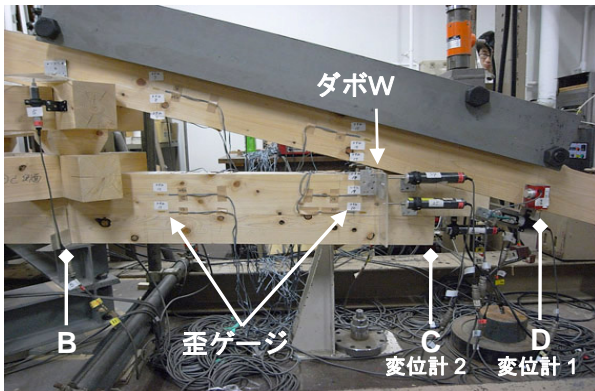


図 2-14 計測状況

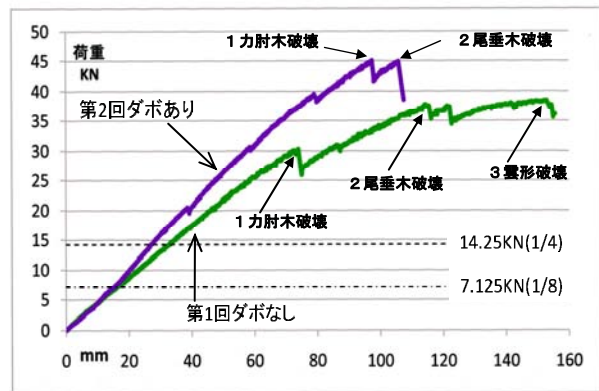


図 2-15 尾垂木先端垂下(D点:変位計1)  
第1回ダボあり,2回ダボなし実験

### 2.4.1 実験結果の概説

(注:以後ダボは全てダボWを表す)

実験中は尾垂木先端部分(D点:変位計1)の垂下を中心に観察を行った(図2-14)。第1回(ダボなし)実験,第2回(ダボあり)実験での垂直加力 $P_0$ (B点+D点)に対する,変位計1:尾垂木先端垂下(D点),変位計2:雲形肘木ダミー垂下(C点)の値を示す(図2-15)。

\* 第1回(ダボなし)実験  $P_{0max}=38.4KN$ : 荷重変位曲線は $P_0=30KN$ までほぼ直線的に推移した。

- (1) ②力肘木の上辺付近で割裂を起こし一旦落ちるが,持ち直した荷重は上がり続け
- (2) ①尾垂木が曲げ破壊し最大荷重となった。ただし尾垂木破壊後も更に荷重は緩やかに上昇し
- (3) ③雲形ダミーが曲げ破壊したところで終局を迎えた(図2-16)。

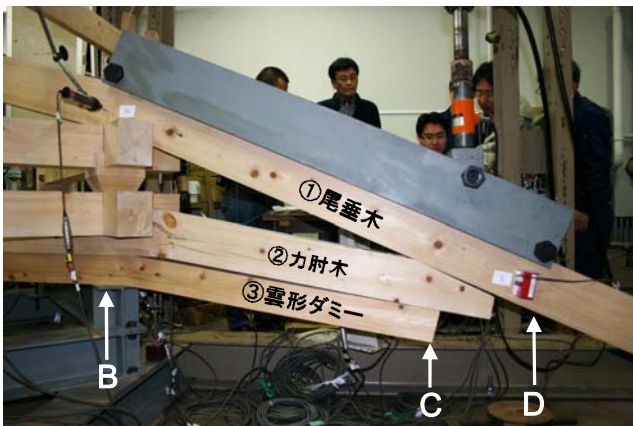


図 2-16 第1回実験 最終破壊

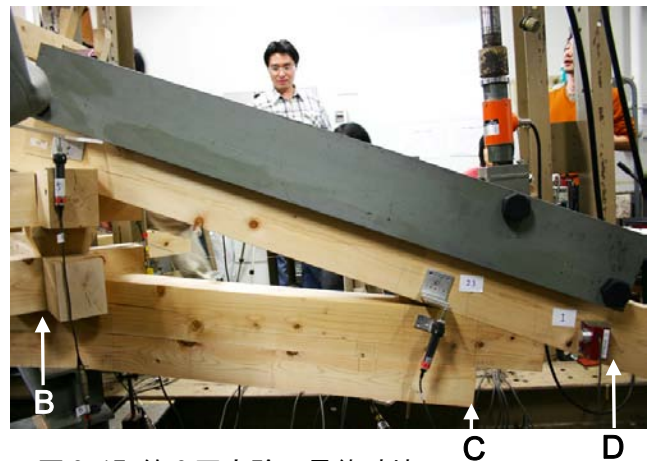


図 2-17 第2回実験 最終破壊

\* 第2回(ダボあり)実験  $P_{0max}=44.7KN$ : 第1回(ダボなし)実験と比較すると明らかに先端垂下は減少し(図2-15,16,17),尾垂木と力肘木の作る三角形はその形状を維持しようとした。また鉛直荷重が増大するに従い,尾垂木は力肘木に対して引き上げられるようにずれ,先端ダボWは大きく回転した(図2-18)。

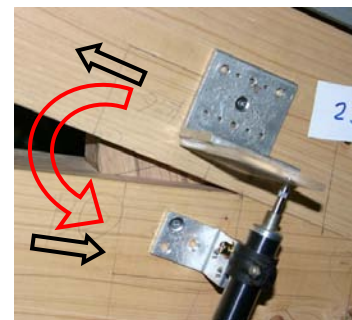


図 2-18 第2回実験 先端ダボWの回転

\* 第3回(ダボなし)実験  $P_{0max}=39.8KN$  : 最終破壊は尾垂木がちぎれるように破壊(図2-19)すると同時に、力肘木がB点内側でせん断破壊を起こし裂けた(図2-20)。

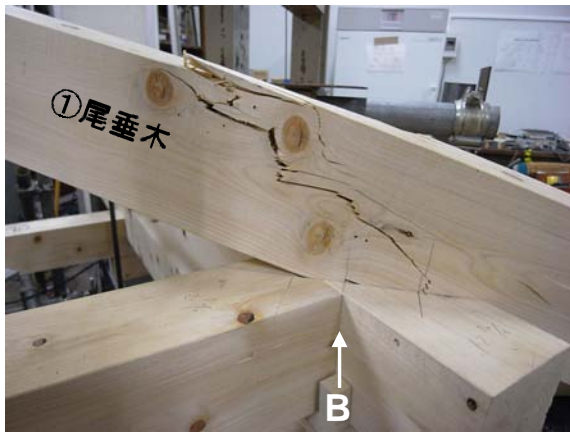


図2-19 第3回実験 最終破壊

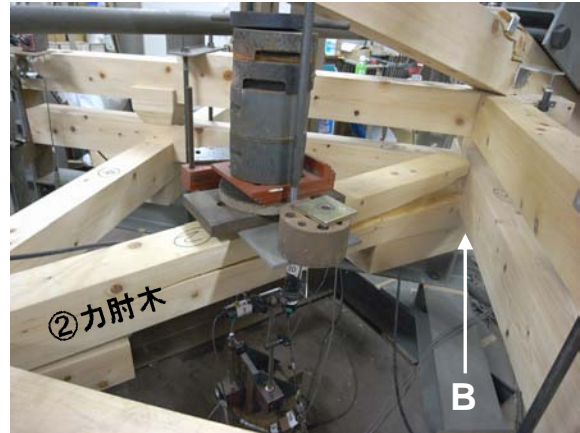


図2-20 第3回実験 力肘木破壊

\* 第4回(ダボあり)実験  $P_{0max}=46.7KN$  : 最終破壊では尾垂木が曲げによるせん断破壊を起こした(図2-21)。

\* 第5-3回(ダボなし)実験  $P_{0max}=29.8KN$  : 最終破壊は尾垂木が完全に引きちぎられると同時に力肘木、雲形ダミー全てが一気に折れた(図2-22)。

\* 第6-2回(ダボあり)実験  $P_{0max}=50.3KN$  : 力肘木と雲形肘木が同時に割裂するが、尾垂木は湾曲しながら耐え、せん断割裂を起こすが持ちこたえ最終的には完全に引きちぎられるように破断した(図2-23)。

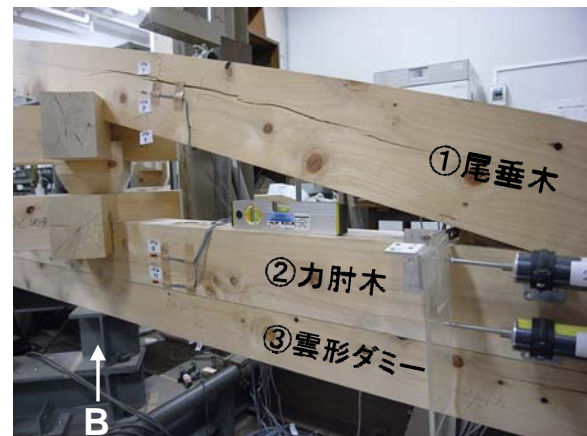


図2-21 第4回実験

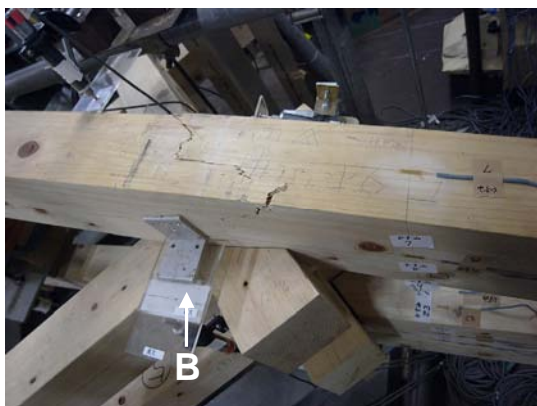


図2-22 第5-3回実験

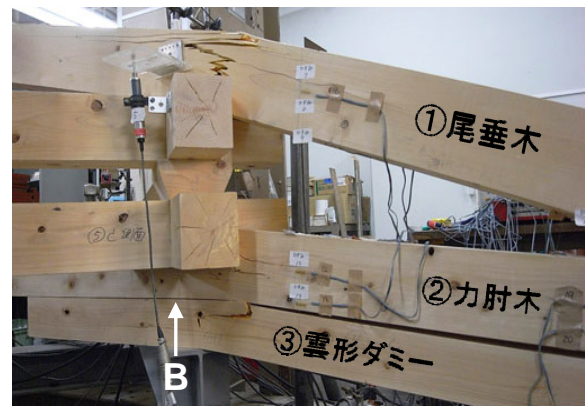
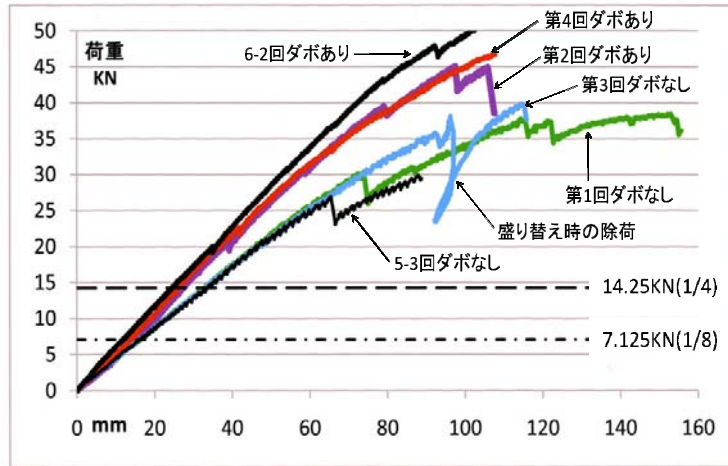


図2-23 第6-2回実験

## 2.4.2 軒先先端垂下

第1～6回実験を通してみると、荷重  $P_0=7.125\text{KN}$  (1/8) から  $P_0=14.25\text{KN}$  (1/4) までは試験体には目立った損傷は認められなかった。ただしこの時点で力肘木の「渡り腮」上端欠損部分に初期亀裂が入っていたことが後の精査により判明した。(2.4.4 力肘木の破壊モードで後述)



実験	P0max
第1回	38.4KN
第2回	44.7KN
第3回	39.8KN
第4回	46.7KN
第5-3回	29.8KN
第6-2回	50.3KN

図 2-24 尾垂木先端の垂下 (D 点 : 変位計 1)

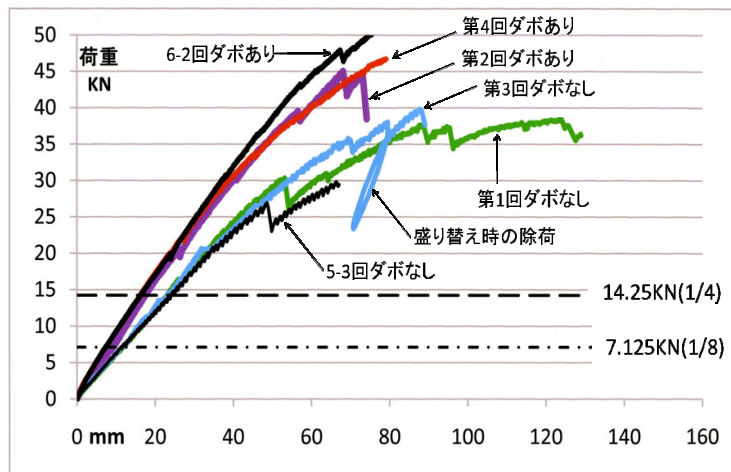


図 2-25 雲形ダミーの垂下 (C 点 : 変位計 2)

図 2-24 尾垂木先端 (D 点 : 変位計 1), 図 2-25 雲形ダミー先端 (C 点 : 変位計 2) とともに荷重変位曲線は、「ダボあり」が「ダボなし」と比較して明らかに初期状態から剛性が大であった。 $P_0=7.125\text{KN}$  (1/8) と  $P_0=14.25\text{KN}$  (1/4) での平均値を比較し「先端ダボW」のダボ効果とすると尾垂木先端 (D 点 : 変位計 1) で  $P_0=7.125\text{KN}$  (1/8) : 84% 減,  $P_0=14.25\text{KN}$  (1/4) : 78% 減, 雲形ダミー先端 (C 点 : 変位計 2) で  $P_0=7.125\text{KN}$  (1/8) : 69% 減,  $P_0=14.25\text{KN}$  (1/4) : 71% 減となった (表 2-4)。

これは「ダボなし」のとき尾垂木先端が力肘木に対して内側に引き上げられ尾垂木先端部の出 (C～D 間) が短くなり、同じ垂直荷重に対して尾垂木先端 D 点の曲げ変形が小さくなった結果と考えられる。

表 2-4 変位計 (No. 1, 2)

	1/8 荷重時			1/4 荷重時		
	ダボなし	ダボあり	比較	ダボなし	ダボあり	比較
荷重	7.12KN	7.13KN	減少率	14.22KN	14.23KN	減少率
変位計1 (mm)	16.23	13.65	84%	33.05	25.87	78%
変位計2 (mm)	11.61	7.99	69%	23.42	16.62	71%

\* 数値は実荷重 7.125KN (1/8), 14.25KN (1/4) の近傍前後の 5 測定点の平均値をとった。  
ダボなし : 第 1, 3, 5-3 回実験  
ダボあり : 第 2, 4, 6-2 回実験

### 2.4.3 試験体の全体的挙動

今回の実験では図 2-26, 27 のように外陣隅柱B点での鉄骨治具の雲形ダミーへのめり込みと丸ダボの変形状況や計測値(表 2-5)から、試験体はB点を支点として尾垂木が先端垂下すると同時に前方に倒れようとし、先端部分の尾垂木と力肘木との接点では力肘木が前方にずれようとする力が働いた。(図 2-28)



図 2-26 B点ダボ

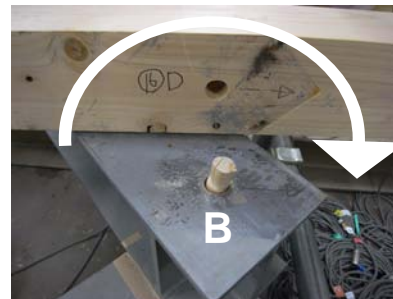


図 2-27 治具めり込み

\* 表 2-5 に  $P_0=14.25\text{KN}(1/4)$  時の 3~4 回実験での  
 尾垂木先端部分の絶対垂下(変位計 1)  
 力肘木先端部の絶対垂下(変位計 2)  
 尾垂木と力肘木の相対変位(変位計 3)  
 尾垂木中央部の絶対変位(変位計 7)  
 力肘木中央左寄り(70kg 固定荷重直下)の  
 絶対水平変位(変位計 9)  
 尾垂木尻と尾垂木掛けの相対変位(変位計 21)を示す。

表 2-5 14.25KN(1/4 荷重) 変位計測定

		14.25KN(1/4 荷重)					
変位計 (mm)		1	2	3	7	9	21
ダボ		尾垂木 ↓	尾垂木 ↓	尾垂木← 力肘木→	尾垂木 右下	力肘木 →	尾垂木掛←
x	第3回	32.92	23.1	6.73	3.70	0.94	0.95
○	第4回	26.18	16.2	2.54	5.26	0.63	2.45
x	5-1回	36.86	24.5	5.85	5.45	0.96	2.36
○	5-2回	28.58	19.3	3.29	5.35	0.85	1.08
x	5-3回	33.44	24.1	7.40	3.83	0.97	0.61
x	6-1回	32.58	22.9	6.37	3.83	0.79	1.37
○	6-2回	24.36	16.3	3.22	4.04	0.55	0.90

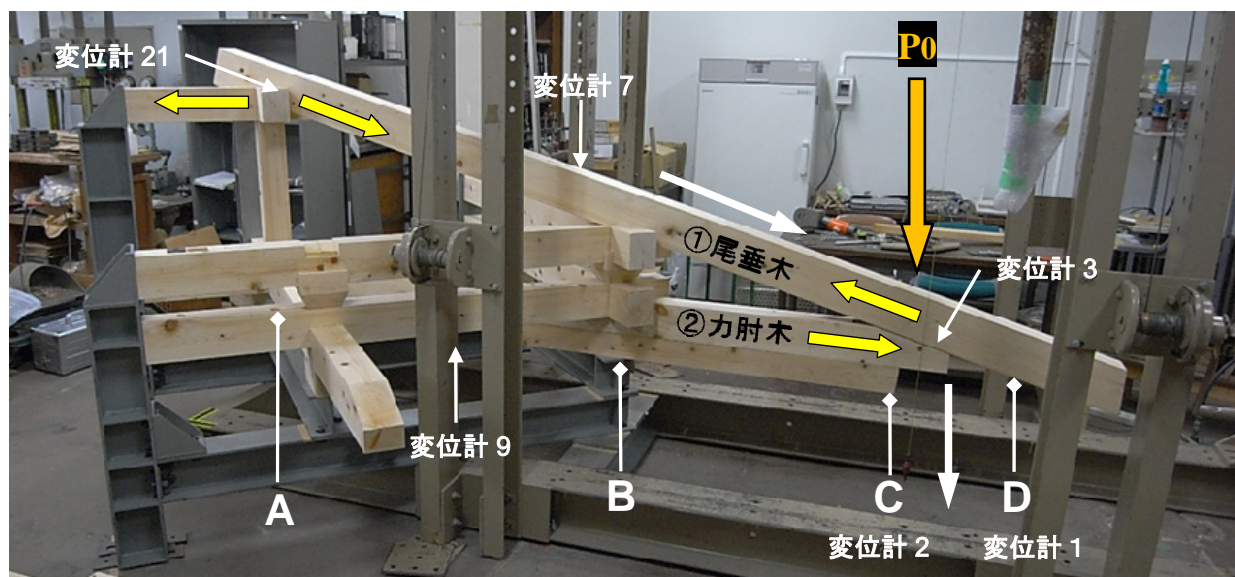


図 2-28 試験体の変形挙動

### 2.4.4 力肘木の破壊モード

トラスを構成する尾垂木(斜材)と力肘木(水平材)の内部応力を計測する為に第4回実験以降にB点付近と先端ダボW付近に歪ゲージを設置した(図2-29)。外陣隅柱(B点)から  $w_1=270\text{mm}$  外側の力肘木上辺に歪11, 下端から10mm上の側面に歪13を設置した。歪11は+側(引張), 歪13は-側(圧縮)の測定値を得たので図2-30では同じグラフに記載している。

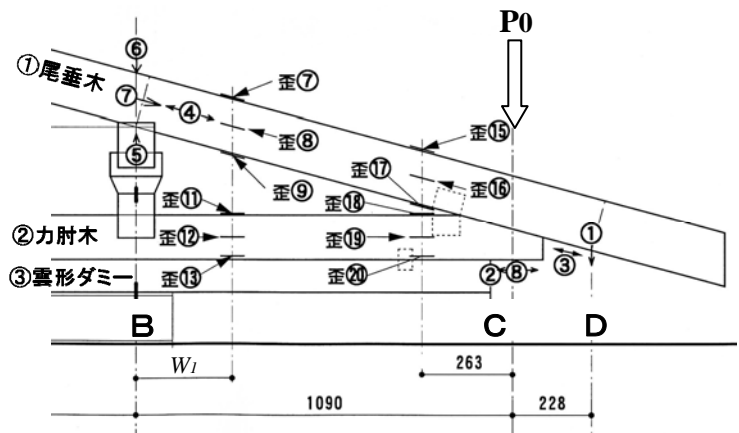


図 2-29 歪ゲージ位置

\* 第4回ダボありでは歪11, 13ともに最も勾配が急になっている。これは同じ実験荷重  $P_0$  を受けた時にB点付近の力肘木にかかる曲げモーメントが最小となっていることを表している。

\* ここで歪13(力肘木下辺)について考察すると

5-1回ダボなし→5-2回ダボありで勾配が幾分急になり,

5-3回ダボなしで勾配は5-1回ダボなしよりも緩やかになっている。

6-1回ダボなし→6-2回ダボありでは  $P_0=14.25\text{KN}(1/4)$  以降ダボありの方が急勾配になっている。

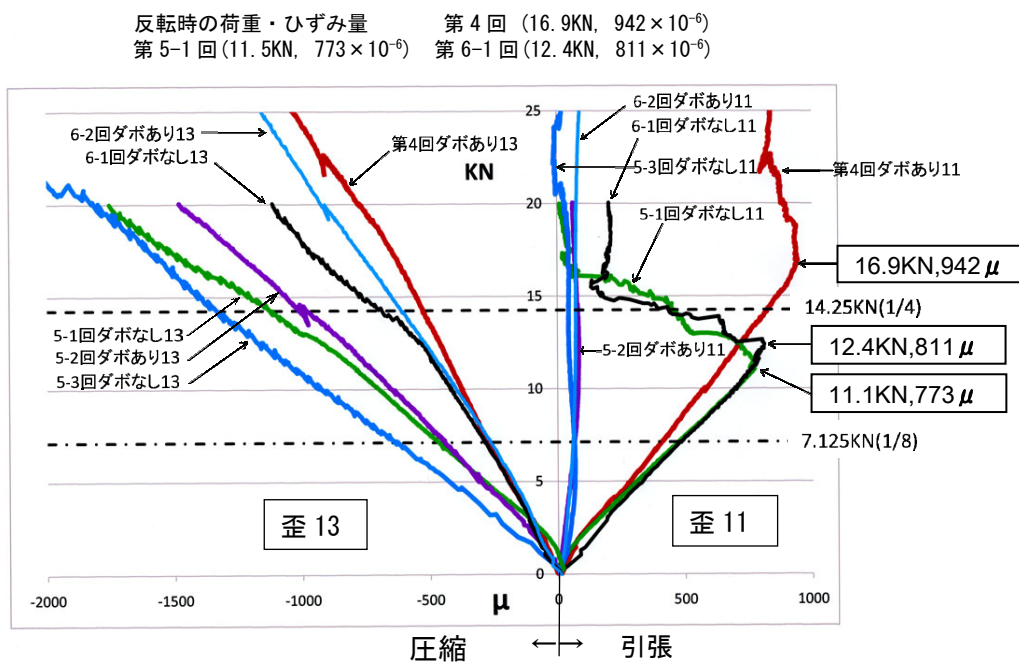


図 2-30 力肘木 柱心近辺 (歪11, 歪13)

これは力肘木下辺(歪13)では同じ試験体の場合「ダボあり」の方が「ダボなし」よりも縁応力度が小さくなることを表している。つまりトラス抵抗成分の増加による断面全体の圧縮応力度の増加分よりも、曲げ抵抗成分の減少による圧縮側の縁応力度減少のほうが大きいことを示唆している。



\* 歪 11 (力肘木上辺) について考察すると

各試験体最初の加力実験 (第 4 回, 5-1 回, 6-1 回) のみ  $P_0=14.25\text{KN}$  (1/4) 前後で張力反転が計測された。これは力肘木にかかった曲げ応力に対し「渡り腮(図 2-31)」入隅部分が割裂を起こした結果(図 2-31) ダメージを受け、2 度目以降の実験 (5-2 回, 5-3 回, 6-2 回) では曲げ応力を負担できなくなったと考えられる。

今回の 1/2 縮尺モデルで最初の割裂が生じたのは実大荷重の 1/8 荷重時の 2 倍程度:  $P_0=14.25\text{KN}$  (1/4) であったことから、荷重継続時間を考慮すると力肘木上端の女木加工部分からの初期亀裂発生が端緒となり「渡り腮」の 25mm が断面欠損となったと推定できる。

この時点で力肘木の断面 2 次モーメントは計算上 47% 減となったと推測され、これが法隆寺金堂の軒先垂下の一因であったと考えられる。

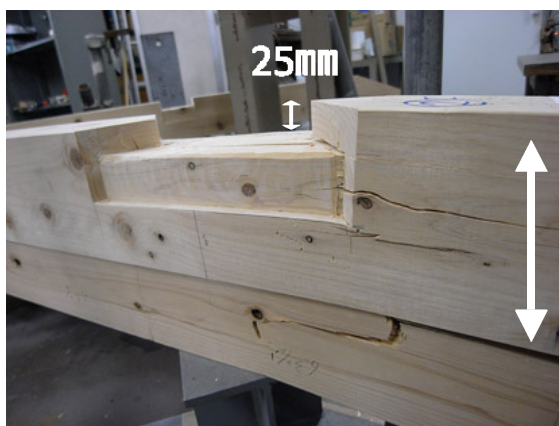


図 2-31 力肘木渡り腮(B点)



図 2-31 力肘木(歪 11~13)

\* ここで破壊までの実験結果を振り返ると

「ダボなし」:  $P_0=12\sim 13\text{KN}$  付近で力肘木の上辺が柱(B点)付近で割裂破断を起こした(図 2-31 矢印)。

「ダボあり」: 力肘木の割裂破断は遅れ尾垂木の三角形はその形を維持しようとした。変位計 1, 2, 3 は「ダボあり」のほうが変位が少ない(表 2-5)。

\* 力肘木がダメージを受けていない「ダボなし」(5-1 回, 6-1 回) と「ダボあり」(第 4 回) を比較する。反転時の荷重差を力肘木に対するダボWの「ダボ効果」とすると約 44% 増と推定される。

(図 2-30 より  $16.9\text{KN} \div \{(11.1+12.4)\text{KN} \div 2\} = 1.44$ )

\* 先端ダボの挙動については[2.4.7 トラス先端部の挙動と先端ダボWの影響]で述べる。

#### 2.4.5 修理工事報告書からの考察

解体修理工事中昭和24年の失火により金堂初層力肘木以下の部分が壁画を含めて再使用不能な損害を受けた。報告書は初層力肘木当初材については先端が幾分垂下していた<sup>2-10)</sup>としか述べていないが写真(図2-32)によれば側面にせん断割れのようなものが読み取れる。さらに焼失を免れた上層力肘木について「変形の主なものは先端の荷重による彎曲で、特に隅行の力肘木に著しく、先端の垂下は平の力肘木で九分から一寸二分、隅では西南隅のものなど二寸も下がっていた。また破損の主なものは隅の部分で三本の力肘木の尻が一点で欠組となるところが弱点となって、欠口から材の方向に裂けたものと柱の附近における折損、隅行き力肘木は総て、側柱の位置で下面に剪断亀裂を生じていた。<sup>2-11)</sup>(下線は筆者:側面の記述ミスと考えられる)」とある。写真(図2-33)では4本全ての隅行き力肘木側面「渡り腮」に沿ってせん断亀裂(矢印)が確認できるので、前段[2.6.4 力肘木の破壊モード]の考察と一致していると考えられる。

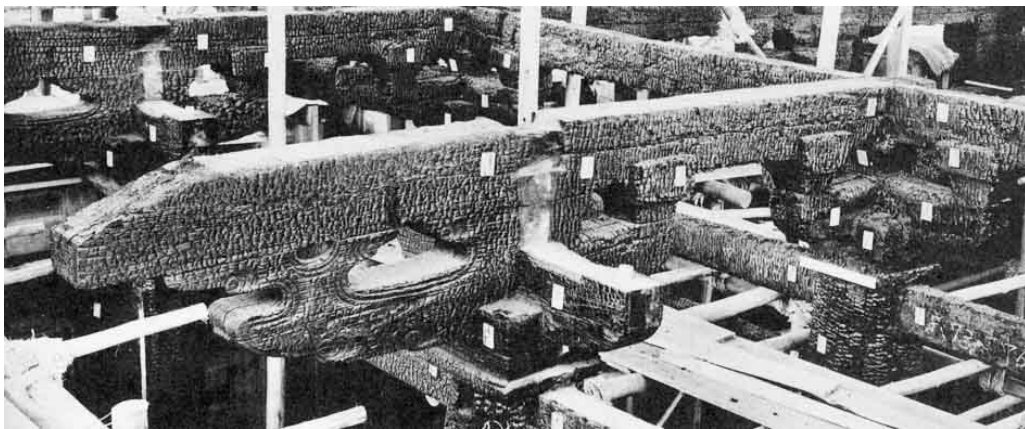


図 2-32 法隆寺金堂初層 平行き力肘木(焼失後)

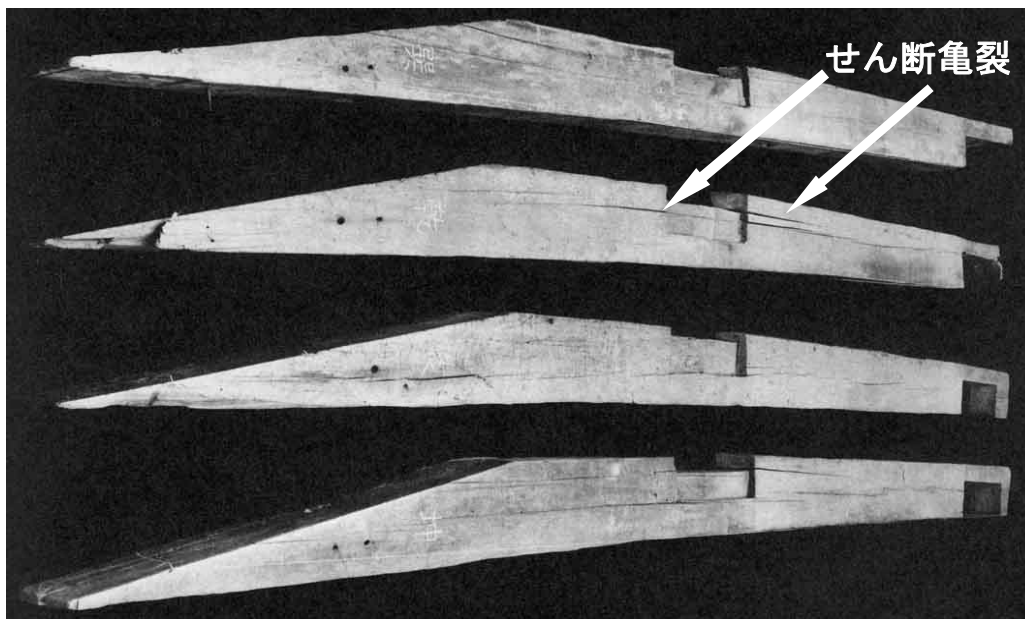


図 2-33 法隆寺金堂上層 隅行き力肘木  
(尾垂木補強用の後補材挿入のため先端がカットされていた)

## 2.4.6 [検証1][検証2] 歪ゲージから推測するトラス効果

### 2.4.6.1 算出根拠

ここでは軒先荷重を「トラス抵抗要素」と「片持ち梁抵抗要素」に分担した力学モデルに基づきその負担率を算定する。加力器具と尾垂木はローラー接点なので、軒先にかかる鉛直荷重  $P_1 (=P_0 \times 0.825)$  が尾垂木に直角にかかる成分は  $P_1 \div \cos\theta$  となる。それを(1)式のように  $P_b$  と  $P_t$  の二つに分ける。「トラス抵抗要素」として  $P_t$  が作用した時の力学モデルを図 2-34 に、「片持ち梁抵抗要素」として  $P_b$  が作用した時の力学モデルを図 2-35 に示す。ここでは  $P_b$  による曲げ変形のみで、①尾垂木と合成梁（②力肘木+③雲形ダミー）が反力  $N_b$  で釣り合っていると仮定する。トラス抵抗要素  $P_t$  は反力として軸力  $N_t$  と  $N_2$  に分解されるので(2)式となる。

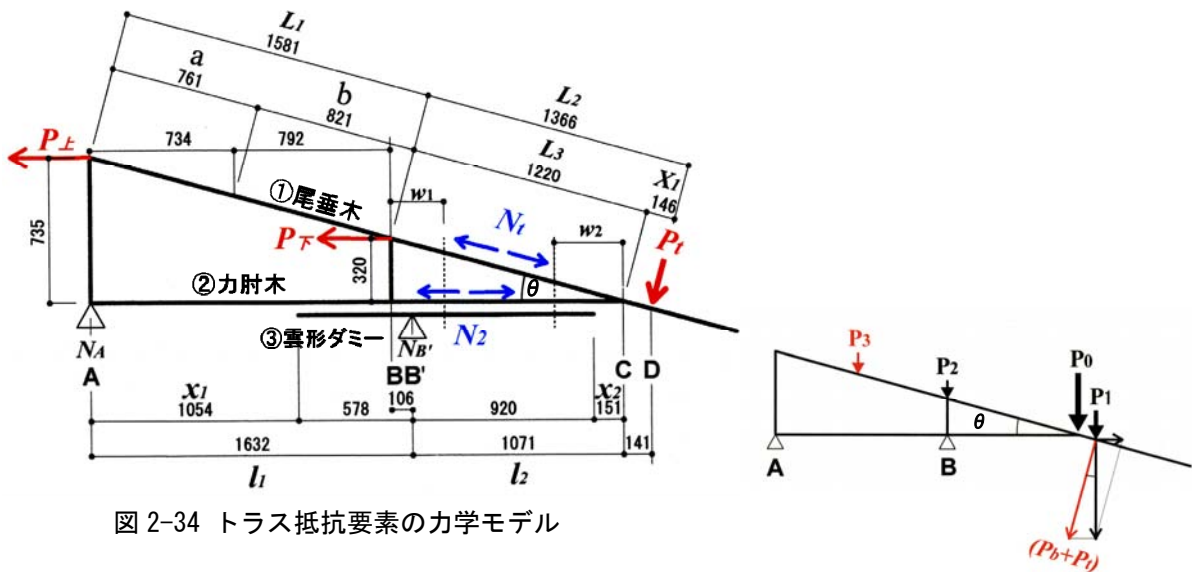


図 2-34 トラス抵抗要素の力学モデル

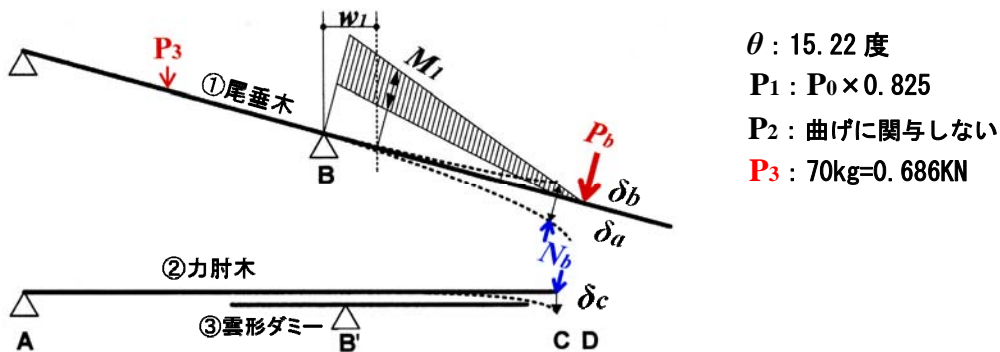


図 2-35 片持ち曲げ抵抗要素の力学モデル

$$\left. \begin{array}{l} P_b : \text{片持ち曲げ要素として負担する成分} \\ P_t : \text{トラス抵抗要素として負担する成分} \end{array} \right] \frac{P_1}{\cos \theta} = P_b + P_t \quad (1) \text{式}$$

$$\left. \begin{array}{l} N_b : \text{曲げとしての反力} \\ N_t : \text{トラス作用としての軸力} \end{array} \right] N_t = \frac{P_t}{\tan \theta} \quad (2) \text{式}$$

C点における変位  $\delta$  の釣り合いは(3)式となる。さらに仮想仕事の原理から求めた  $\delta a$ ,  $\delta b$ ,  $\delta c$  を代入すると,  $Pb$  と  $Nb$  の関係式(4)が導かれる。

$$(\delta a - \delta b) \cos \theta = \delta c \quad (3)式$$

$$\left[ \begin{array}{l} \delta a = \frac{PbX_1L_3^2}{2E_1I_1} + \frac{PbL_3^3}{3E_1I_1} + \frac{PbL_1L_2L_3}{3E_1I_1} - \frac{L_3ab(2a+b)}{6E_1I_1L_1} P_3 \cos \theta \\ \delta b = \frac{NbL_3^2}{3E_1I_1} (L_1 + L_3) \\ \delta c = \frac{Nb \cos \theta \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 x_1^3}{3E_2I_2} + \frac{Nb \cos \theta \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 (l_1^3 - x_1^3)}{3(E_2I_2 + E_3I_3)} + \frac{Nb \cos \theta (l_2^3 - x_2^3)}{3(E_2I_2 + E_3I_3)} + \frac{Nb \cos \theta x_2^3}{3E_2I_2} \end{array} \right]$$

$$Nb = kPb - K \quad (4)式$$

またB点からw1点での①尾垂木のモーメント  $M_1$  は(5)式となる。 $Nb$  として(4)式を代入すると, (6)式となり,  $M_1$  は  $Pb$  を変数とする関数で表せる。

$$M_1 = Pb \left( L_2 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) - Nb \left( L_3 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) \quad (5)式$$

$$M_1 = Pb \left\{ \left( L_2 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) - k \left( L_3 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) \right\} + K \left( L_3 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) \quad (6)式$$

第3回実験以降の各試験体の  $k, K$  と  $M_1$  を表 2-6-1, 2 に記す。

表 2-6-1 曲げ応力計算  $M_1$  と  $k, K$  値 (力肘木H : 105 mm)

実験	試験体	尾垂木			断面2次			(6)式による歪⑦点でのM1			(4)式		
		ヤング率	断面積	断面係数	モーメント			M1 = mPb + n			Nb = kPb - K		
		E <sub>1</sub>	A	Z	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	m	n	W <sub>1</sub>	k	K	
		KN/cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	尾垂木	力肘木	雲形	(Pb)KN × cm	KN × cm	cm		KN	
ダボあり	第4回	D	904.8	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	59.761	3.822	27	0.5197	0.0407
ダボなし	5-1回	E	836.4	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	63.055	3.564	27	0.4846	0.0379
ダボあり	5-2回	E	836.4	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	63.055	3.564	27	0.4846	0.0379
ダボなし	5-3回	E	836.4	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	63.055	3.564	27	0.4846	0.0379
ダボなし	6-1回	F	897.6	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	60.201	3.707	28	0.5096	0.0399
ダボあり	6-2回	F	897.6	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	60.201	3.707	28	0.5096	0.0399

表 2-6-2 曲げ応力計算  $M_1$  と  $k, K$  値 (力肘木H : 130 mm)

実験	試験体	尾垂木			断面2次			(6)式による歪⑦点でのM1			(4)式		
		ヤング率	断面積	断面係数	モーメント			M1 = mPb + n			Nb = kPb - K		
		E <sub>1</sub>	A	Z	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	m	n	W <sub>1</sub>	k	K	
		KN/cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	尾垂木	力肘木	雲形	(Pb)KN × cm	KN × cm	cm		KN	
ダボあり	第4回	D	904.8	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	47.313	4.796	27	0.6521	0.0510
ダボなし	5-1回	E	836.4	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	49.714	4.608	27	0.6266	0.0490
ダボあり	5-2回	E	836.4	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	49.714	4.608	27	0.6266	0.0490
ダボなし	5-3回	E	836.4	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	49.714	4.608	27	0.6266	0.0490
ダボなし	6-1回	F	897.6	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	48.122	4.652	28	0.6395	0.0500
ダボあり	6-2回	F	897.6	157.5	393.750	2953.125	1012.922	750.203	48.122	4.652	28	0.6395	0.0500

応力度とヤング係数の定義は (7)式。尾垂木に作用する曲げ応力と軸応力の関係は図 2-36 となるので、歪⑦= $\alpha$ 、歪⑨= $\beta$  の計測値(歪ゲージの単位は $\times 10^{-6}$ )から(8)式が成立するので(7)式を代入して(9)式となる。さらに曲げモーメント= $M$ 、縁応力度(最大歪)= $\sigma_b$ 、断面係数= $Z$ の関係は(10)式である。さらに(7)式から(11)式となる。

$$\sigma_b = \varepsilon E \quad \sigma_t = \frac{N_t}{A} \quad (7)式$$

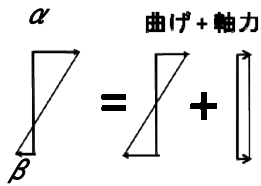


図 2-36 部材に作用する  
応力の関係

$$\left[ \begin{array}{l} \text{曲げ縁応力度: } \sigma_b = \frac{\alpha + \beta}{2} E \\ \text{引張り応力度: } \sigma_t = (\alpha - \beta) E \end{array} \right. \quad (8)式$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{曲げによる歪: } \varepsilon = \frac{\alpha + \beta}{2} \\ \text{軸力: } N_t = (\alpha - \beta) AE \end{array} \right. \quad (9)式$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (10)式$$

$$\varepsilon = \frac{M_1}{EZ} \quad (11)式$$

・先に(6)式で求めたように  $M_1$  は  $P_b$  の関数で表せるので、(10)式に代入すると(12)式となる。  
これにより歪ゲージの計測値(歪⑦= $\alpha$ 、歪⑨= $\beta$ )から曲げ抵抗要素  $P_b$  が推定できる。

・また(2)式に(9)式を代入すると(13)式となる。計測値(歪⑦= $\alpha$ 、歪⑨= $\beta$ )からトラス抵抗要素  $P_t$  が推定できる。

$$P_b = \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \frac{EZ}{m} - \frac{n}{m} \left[ \begin{array}{l} m \text{ は (6) 式の第 1 項 } \left\{ \left( L_2 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) - k \left( L_3 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) \right\} \\ n \text{ は (6) 式の第 2 項 } K \left( L_3 - \frac{w_1}{\cos \theta} \right) \end{array} \right. \quad (12)式$$

$$P_t = (\alpha - \beta) AE \tan \theta \quad (13)式$$

以上の結果からトラス抵抗要素  $P_t$  と曲げ抵抗要素  $P_b$  の分担比率を求める。

[検証 1]  $P_b$ =(12)式,  $P_t$ =(13)式を比較したものを軸力分担率:  $e_t$  と定義する。

これにより鉛直荷重に対するトラス効果が予測できると考える。

$$\text{軸力分担率: } e_t = \frac{P_t}{P_t + P_b} \times 100\% \quad (14)式$$

[検証 2] (1)式から外力  $P_1$  をそれぞれの抵抗要素が分担する場合、

トラス抵抗要素  $P_t$  が増大すると曲げ抵抗要素  $P_b$  が減少すると考えられる。

想定 A : ①尾垂木先端にかかった垂直荷重を全て曲げ抵抗要素で負担する場合、

《尾垂木に軸力が作用しないならば  $P_t=0$   $N_t=0$  で  $P_1 \div \cos\theta = P_b$  となり曲げ歪  $\varepsilon = M_1 \div EZ$  は最大値》

想定 B : 逆に垂直荷重を全てトラス抵抗要素で負担する場合、

《軸力のみが作用すれば  $P_b=0$   $N_b=0$  で  $P_1 \div \cos\theta = P_t$ 、曲げ歪  $\varepsilon=0$ 、軸力は  $N_t=P_1 \div \sin\theta$ 》となる。

想定 A 条件下で尾垂木先端 D 点に垂直荷重  $P_1$  が作用した時の歪ゲージ⑩点での最大曲げモーメント

$M_1$  は(6)式より求められるので、(11)式から計算上の最大曲げ歪は  $\varepsilon_{max} = M_{1max} \div EZ$  となる。

ここで予測される最大曲げ歪  $\varepsilon_{max}$  と(9)式による実測値  $\varepsilon$  を比較すると①尾垂木にかかった軸力の分担割合を推定できる。これをトラス効果 :  $ef+d$  と定義すると(15)式となる

$$\text{トラス効果: } ef+d = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \times 100\% \quad (15)\text{式}$$

#### 2.4.6.2 実験スケジュールの詳細

表 2-8 実験スケジュール

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5-1回	第5-2回	第5-3回	第6-1回	第6-2回
試験体	A	B	C	D	E	E	E	F	F
⑩角ダボW	×	○	×	○	×	○	×	×	○
	セット	セット	セット	セット	セット	再セット	再セット	セット	再セット
	↓	↓	10KN→除荷 20KN→除荷	10KN→除荷 20KN→除荷	20KN→除荷	20KN→除荷	↓	20KN→除荷	↓
	破壊	破壊	破壊	破壊			破壊		破壊

\*\* 基本的に奇数回はダボなし、偶数回はダボありで最終破壊まで加力する計画であった。

第1回実験 : 試験体 A にダボWなしでセット後→破壊まで

第2回実験 : 試験体 B にダボWありでセット後→破壊まで

\* 引きボルト①②③④に設置した歪ゲージをホール型ロードセルに変更

第3回実験 : 試験体 C にダボWなしでセット後→10KN まで加力→完全除荷

再セットせずに→20KN まで加力→完全除荷後→再セットせずに加力→破壊まで

第4回実験 : 試験体 D にダボWありでセット後→10KN まで加力→完全除荷

再セットせずに→20KN まで加力→完全除荷後→再セットせずに加力→破壊まで

\* ①尾垂木と②力肘木に歪ゲージを設置

\* この時点から 1/8 荷重 (7.125KN) と 1/4 荷重 (14.25KN) 間の測定を重視

\* 5 回, 6 回は同じ試験体を使用してダボあり・ダボなし実験を行なった

第5-1回実験 : 試験体 E にダボWなしでセット後→20KN まで加力→完全除荷

第5-2回実験 : 試験体 E にダボWありで再セット後→20KN まで加力→完全除荷

第5-3回実験 : 試験体 E にダボWなしで再セット後→破壊まで

第6-1回実験 : 試験体 F にダボWなしでセット後→20KN まで加力→完全除荷

第6-2回実験 : 試験体 F にダボWありで再セット後→破壊まで

### 2.4.6.3 検証結果 [1] [2]

\* [2.4.4 力肘木の破壊モード]で考察したように②力肘木は「渡り腮」部分で損傷したと考えられるので、その断面を無傷(H:130mm)と欠損(H:105mm)の場合とで計算を試みた。

「渡り腮」の欠損を考慮したものを次ページの表 2-7-1、欠損なしを表 2-7-2 に示す。

#### [検証 1]

表 2-7-A(力肘木H=105mm) : 4~5 回実験では軸力分担率  $e_t$  は 69.7%~79.3%となった。

6-1 回実験では  $(\alpha-\beta)$  が負となり圧縮軸力が計測された。

表 2-7-B(力肘木H=130mm) : 4~5 回実験では軸力分担率  $e_t$  は 64.5%~74.5%となった。

6-1 回実験では  $(\alpha-\beta)$  が負となり圧縮軸力が計測された。

#### [検証 2]

表 2-7-A(力肘木H=105mm) : 4 回, 5-2 回, 6-2 回 ダボあり

トラス効果  $e_{f+d}$  : 61.7%~72.3%で検証 1 より小さめとなった。

表 2-7-B(力肘木H=130mm) : 4 回, 5-2 回, 6-2 回 ダボあり

トラス効果  $e_{f+d}$  : 51.5%~65.1%で検証 1 より小さめとなった。

\* ここでダボWなし実験でのトラス効果  $e_{f+d}$  を①尾垂木と②力肘木の摩擦効果  $e_f$  と考えると、ダボWあり実験でのトラス効果  $e_{f+d}$  との差を先端ダボ効果  $e_d$  とみなすことができる。

表 2-7-A(力肘木H=105mm) :

4, 5-2, 6-2 回 ダボあり

トラス効果  $e_{f+d}$  : 61.7%~72.3%

5-1, 5-3, 6-1 回 ダボなし

(摩擦効果  $e_f$  : 45.4%~52.2%)

先端ダボ効果  $e_d$  : 16.3%~20.1%

表 2-7-B(力肘木H=130mm) :

4, 5-2, 6-2 回 ダボあり

トラス効果  $e_{f+d}$  : 51.5%~65.1%

5-1, 5-3, 6-1 回 ダボなし

(摩擦効果  $e_f$  : 31.0%~39.7%)

先端ダボ効果  $e_d$  : 20.5%~25.4%

\* [2.4.4 力肘木の破壊モード]で検討したように各試験体の最初の加力実験(4, 5-1, 6-1 回)では 1/8 荷重(7.125KN)と 1/4 荷重(14.25KN)間の前後で力肘木の「渡り腮」部分が割裂し、剛性が低下していると予想される。

従って、欠損あり(力肘木H=105mm)で予測される[トラス効果  $e_{f+d}$  : 61.7%~72.3%]と[摩擦効果  $e_f$  : 45.4%~52.2%]は過大評価と考えられる。[先端ダボ効果  $e_d$  : 16.3%~20.1%]は過小評価となる。

逆に、欠損なし(力肘木H=130mm)で予測される[トラス効果  $e_{f+d}$  : 51.5%~65.1%]と[摩擦効果  $e_f$  : 31.0%~39.7%]は過小評価と考えられ、[先端ダボ効果  $e_d$  : 20.5%~25.4%]は過大評価となる。

以上を考慮するとトラス効果  $e_{f+d}$  : 60%前後、そのうち摩擦効果  $e_f$  : 40%前後、先端ダボ効果  $e_d$  : 20%前後と推定される。

2.4.6.4 トラス効果の計算表

表 2-7-A 軸力分担率とトラス効果の計算表 力肘木H : 105 mm (左)

		加力	先端荷重	歪⑦	歪⑨	曲げ応力度	軸力度	曲げ分担	軸力分担	
1/8荷重(7.125KN)		尾垂木	P0	Pb	$\alpha$	$\beta$	$(\alpha+\beta')/2$	$(\alpha-\beta')$	Pb	Pt
	実験	試験体	KN	KN	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$	KN	KN
ダボあり	第4回	D	7.15	6.11	352	244	298	108	1.78	4.21
ダボなし	5-1回	E	7.13	6.10	677	449	563	228	2.94	8.17
ダボあり	5-2回	E	7.13	6.10	503	284	393	219	2.05	7.85
ダボなし	5-3回	E	7.11	6.08	757	490	623	267	3.26	9.58
ダボなし	6-1回	F	7.13	6.10	533	558	545	(25)	3.20	(0.97)
ダボあり	6-2回	F	7.15	6.11	400	337	368	63	2.16	2.44
1/4荷重(14.25KN)		尾垂木	P0	Pb	$\alpha$	$\beta$	$(\alpha+\beta')/2$	$(\alpha-\beta')$	Pb	Pt
	実験	試験体	KN	KN	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$	KN	KN
ダボあり	第4回	D	14.24	12.18	669	468	569	201	3.39	7.79
ダボなし	5-1回	E	14.26	12.19	1370	918	1144	452	5.98	16.21
ダボあり	5-2回	E	14.21	12.15	1138	654	896	484	4.68	17.36
ダボなし	5-3回	E	14.20	12.14	1552	997	1274	554	6.66	19.87
ダボなし	6-1回	F	14.22	12.16	1103	1160	1132	(57)	6.64	(2.21)
ダボあり	6-2回	F	14.20	12.14	821	733	777	88	4.56	3.39

表 2-7-B 軸力分担率とトラス効果の計算表 力肘木H : 130 mm (左)

		加力	先端荷重	歪⑦	歪⑨	曲げ応力度	軸力度	曲げ分担	軸力分担	
1/8荷重(7.125KN)		尾垂木	P0	Pb	$\alpha$	$\beta$	$(\alpha+\beta')/2$	$(\alpha-\beta')$	Pb	Pt
	実験	試験体	KN	KN	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$	KN	KN
ダボあり	第4回	D	7.15	6.11	352	244	298	108	2.24	4.21
ダボなし	5-1回	E	7.13	6.10	677	449	563	228	3.73	8.17
ダボあり	5-2回	E	7.13	6.10	503	284	393	219	2.60	7.85
ダボなし	5-3回	E	7.11	6.08	757	490	623	267	4.13	9.58
ダボなし	6-1回	F	7.13	6.10	533	558	545	(25)	4.00	(0.97)
ダボあり	6-2回	F	7.15	6.11	400	337	368	63	2.70	2.44
1/4荷重(14.25KN)		尾垂木	P0	Pb	$\alpha$	$\beta$	$(\alpha+\beta')/2$	$(\alpha-\beta')$	Pb	Pt
	実験	試験体	KN	KN	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$	KN	KN
ダボあり	第4回	D	14.24	12.18	669	468	569	201	4.28	7.79
ダボなし	5-1回	E	14.26	12.19	1370	918	1144	452	7.58	16.21
ダボあり	5-2回	E	14.21	12.15	1138	654	896	484	5.94	17.36
ダボなし	5-3回	E	14.20	12.14	1552	997	1274	554	8.44	19.87
ダボなし	6-1回	F	14.22	12.16	1103	1160	1132	(57)	8.31	(2.21)
ダボあり	6-2回	F	14.20	12.14	821	733	777	88	5.70	3.39



表 2-7-A 軸力分担率とトラス効果の計算表 力肘木H : 105 mm (右)

軸力	軸力分担率	曲げ応力	縁応力度	歪	トラス効果	摩擦効果	ダボ効果	
引張り	Pt/(Pt+Pb)	M1	$\sigma_b$	$\epsilon_{max}$	$ef+d$	$ef$	$ed$	1/8(7.125KN)
KN	$et$ (%)	KN*cm	KN/cm2	$\mu$	%	%	%	実験
15.46	70.3%	369	0.938	1036	71.2%	?	?	第4回
30.03	73.5%	388	0.985	1178	52.2%	52.2%	-	5-1回
28.84	79.3%	388	0.985	1178	66.6%	52.2%	14.4%	5-2回
35.21	74.6%	387	0.983	1175	46.9%	46.9%	19.7%	5-3回
(3.56)	-43.4%	371	0.941	1049	48.0%	48.0%	-	6-1回
8.97	53.0%	372	0.944	1052	65.0%	48.0%	17.0%	6-2回
引張り	Pt/(Pt+Pb)	M1	$\sigma_b$	$\epsilon$	$ef+d$	$ef$	$ed$	1/4(14.25KN)
KN	$et$ (%)	KN*cm	KN/cm2	$\mu$	%	%	%	実験
28.65	69.7%	731	1.858	2053	72.3%	?	?	第4回
59.58	73.1%	772	1.962	2345	51.2%	51.2%	-	5-1回
63.79	78.8%	770	1.955	2337	61.7%	51.2%	10.4%	5-2回
73.04	74.9%	769	1.953	2335	45.4%	45.4%	16.2%	5-3回
(8.12)	-49.9%	736	1.868	2081	45.6%	45.6%	-	6-1回
12.45	42.6%	735	1.866	2078	62.6%	45.6%	17.0%	6-2回

表 2-7-B 軸力分担率とトラス効果の計算表 力肘木H : 130 mm (右)

軸力	軸力分担率	曲げ応力	縁応力度	歪	トラス効果	摩擦効果	ダボ効果	
引張り	Pt/(Pt+Pb)	M1	$\sigma_b$	$\epsilon_{max}$	$ef+d$	$ef$	$ed$	1/8(7.125KN)
KN	$et$ (%)	KN*cm	KN/cm2	$\mu$	%	%	%	実験
15.46	65.2%	294	0.747	825	63.9%	?	?	第4回
30.03	68.7%	308	0.781	934	39.7%	39.7%	-	5-1回
28.84	75.1%	308	0.781	934	57.9%	39.7%	18.2%	5-2回
35.21	69.9%	307	0.779	932	33.1%	33.1%	24.8%	5-3回
(3.56)	-31.9%	298	0.757	843	35.4%	35.4%	-	6-1回
8.97	47.4%	299	0.759	846	56.4%	35.4%	21.1%	6-2回
引張り	Pt/(Pt+Pb)	M1	$\sigma_b$	$\epsilon$	$ef+d$	$ef$	$ed$	1/4(14.25KN)
KN	$et$ (%)	KN*cm	KN/cm2	$\mu$	%	%	%	実験
28.65	64.5%	581	1.475	1630	65.1%	?	?	第4回
59.58	68.1%	611	1.551	1854	38.3%	38.3%	-	5-1回
63.79	74.5%	609	1.546	1848	51.5%	38.3%	13.2%	5-2回
73.04	70.2%	608	1.545	1847	31.0%	31.0%	20.5%	5-3回
(8.12)	-36.2%	590	1.498	1669	32.2%	32.2%	-	6-1回
12.45	37.3%	589	1.496	1666	53.4%	32.2%	21.2%	6-2回

### 2.4.7 【検証3】 先端垂下から推測するトラス効果

今回の実験における試験体各部分の変形挙動を視覚化するために、立面図にトラス先端部分の垂下を10倍に強調したものを作成した。図2-37は第5-1回ダボなし、第5-2回ダボあり実験の1/8荷重(7.125KN)時での変形挙動を強調したものである。図2-38は同実験の1/4荷重(14.25KN)時での変形挙動である。比較するとダボW挿入により尾垂木先端部分の垂下は減少したことが判る(表2-8)。

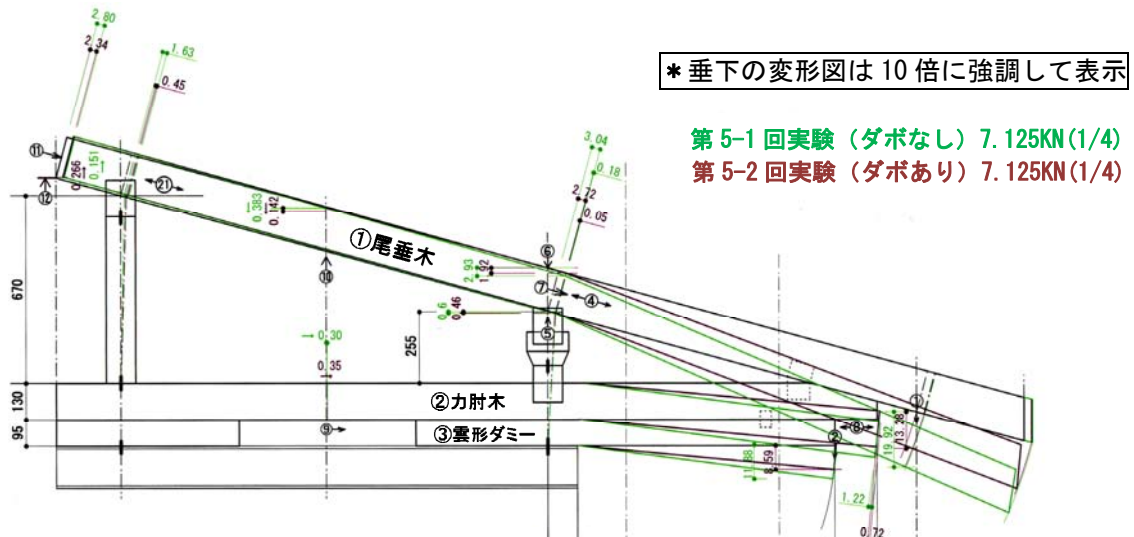


図 2-37 第 5-1, 5-2 回 1/8 荷重 (7.125 kN) 変位図

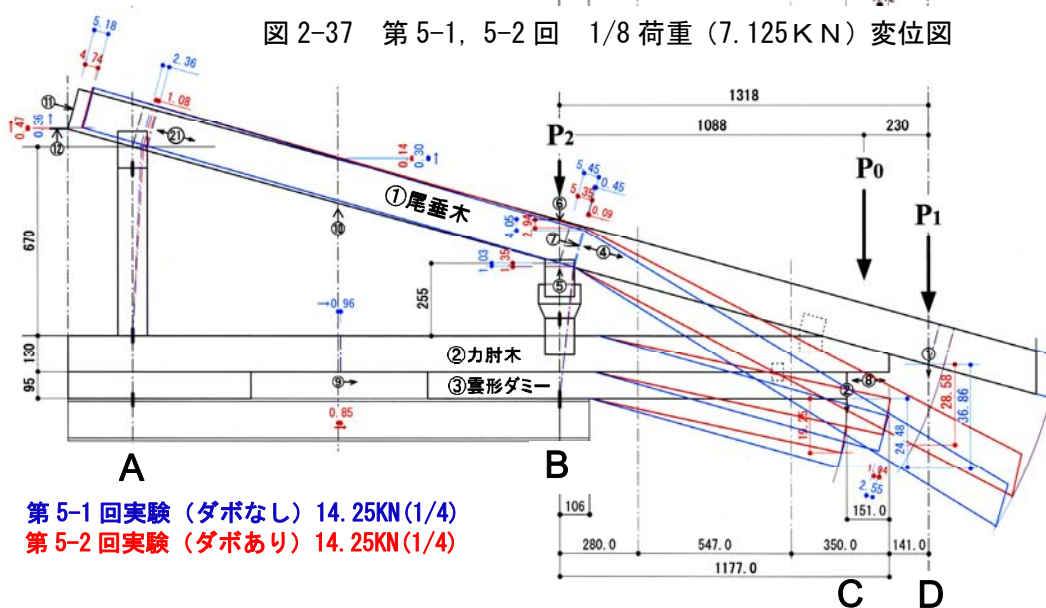


図 2-38 第 5-1, 5-2 回 1/4 荷重 (14.25 kN) 変位図

表 2-8 先端垂下率

実験	1/8(7.125kN)		1/4(14.25kN)		1/8(7.125kN)		1/4(14.25kN)	
	変位計①	減少率 %	変位計①	減少率 %	変位計②	減少率 %	変位計②	減少率 %
ダボなし 第1回	16.24		32.78		11.81		23.06	
ダボあり 第2回	15.18	93%	27.08	83%	9.17	78%	17.42	76%
ダボなし 第3回	16.16		32.92		11.65		23.11	
ダボあり 第4回	13.68	85%	26.18	80%	7.45	64%	16.18	70%
ダボなし 第5-1回	19.92		36.86		11.88		24.48	
ダボあり 第5-2回	13.28	67%	28.58	78%	8.59	72%	19.25	79%
ダボなし 第5-3回	16.28		33.44		11.48		24.1	
ダボなし 第6-1回	16.02		32.58		10.69		22.93	
ダボあり 第6-2回	11.92	74%	24.36	75%	7.34	69%	16.25	71%

[検証 3]

[2.4.6.1 算出根拠]の(3)式より、①尾垂木と②力肘木の接点での片持ち梁抵抗要素だけが作用するときの垂下変位  $\delta c \max$  が計算で求められる(表2-9)。それらと尾垂木先端垂下：変位計①を比較すればトラス抵抗要素が推測できる。

**ダボなし**：第1, 3, 5-1, 5-3, 6-1 回実験での 1/8 荷重時 ( $P_0=7.125\text{KN}$ ) と 1/4 荷重時 ( $P_0=14.25\text{KN}$ ) の  $\delta c \max$  からの減少率を[摩擦]効果と考える。

**ダボあり**：第2, 4, 5-2, 6-2 回実験での 1/8 荷重時と 1/4 荷重時の  $\delta c \max$  からの減少率を [トラス=摩擦+ダボ]効果と考える。

**考察**：トラス効果は20~38%，そのうち摩擦効果は8~23%，ダボ効果は2~31%となった(表2-10)。

尾垂木のB点は下向きの「渡り腮」仕口であるのでトラス効果は過小評価と考えられる。

検証3の結果：トラス効果：40%前後，摩擦効果：20%前後，先端ダボ効果：20%前後と推定される。

表 2-9 計算上の 先端垂下  $\delta c \max$

$Nb = kPb - K$					$P_0=7.125\text{KN}$	$P_0=14.25\text{KN}$
$\delta c = C \times Nb \times \cos \theta$					$P_b=6.092\text{KN}$	$P_b=12.18\text{KN}$
H:105mm	C=C1+C2	k	K	$Nb=kPb-K$	$\delta c=C*Nb*\cos \theta$	$\delta c=C*Nb*\cos \theta$
	cm	-	KN	KN	cm	cm
第1回	0.827	0.432	0.0338	2.599	2.07	4.15
第2回	0.873	0.372	0.0291	2.240	1.89	3.77
第3回	0.707	0.512	0.0400	3.076	2.10	4.20
第4回	0.627	0.520	0.0407	3.125	1.89	3.78
第5-1回	0.767	0.485	0.0379	2.914	2.16	4.32
第5-2回	0.767	0.485	0.0379	2.914	2.16	4.32
第5-3回	0.767	0.485	0.0379	2.914	2.16	4.32
第6-1回	0.654	0.510	0.0399	3.065	1.94	3.87
第6-2回	0.654	0.510	0.0399	3.065	1.94	3.87

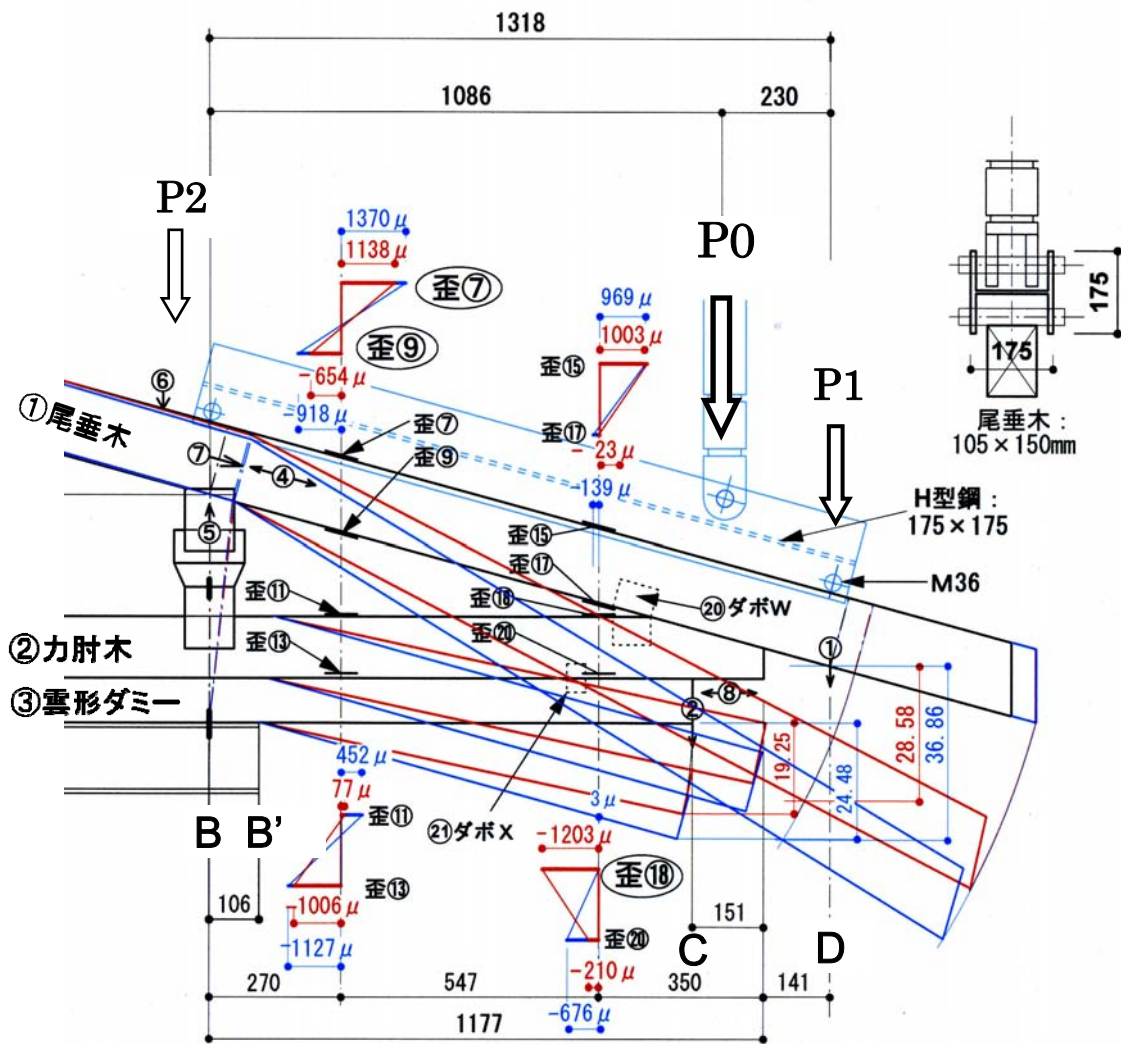
表 2-10  $\delta c$  先端垂下から推測するトラス効果

$P_0=7.125\text{KN}$		$P_b=6.092\text{KN}$	$\delta c$		計算上
実験	変位計①	曲げ	トラス効果		$\delta c \max$
	cm	cm	ダボ	摩擦	H:105
1	1.624	78%	22%	2.073	
		80%	20%		
2	1.518	80%	-2%	1.887	
3	1.616	77%	23%	2.098	
		72%	28%		
4	1.368	72%	5%	1.889	
5-1	1.992	92%	8%	2.158	
		62%	38%		
5-2	1.328	62%	31%	2.158	
		62%	38%		
5-3	1.628	75%	25%	2.158	
6-1	1.602	83%	17%	1.935	
		62%	38%		
6-2	1.192	62%	21%	1.935	
		62%	38%		
$P_0=14.25\text{KN}$		$P_b=12.18\text{KN}$	$\delta c$		計算上
実験	変位計①	曲げ	トラス効果		$\delta c \max$
	cm	cm	ダボ	摩擦	H:105
1	3.278	79%	21%	4.146	
		72%	28%		
2	2.708	72%	7%	3.773	
3	3.292	78%	22%	4.197	
		69%	31%		
4	2.618	69%	9%	3.779	
5-1	3.686	85%	15%	4.317	
		66%	34%		
5-2	2.858	66%	19%	4.317	
		66%	34%		
5-3	3.344	77%	23%	4.317	
6-1	3.258	84%	16%	3.870	
		63%	37%		
6-2	2.436	63%	21%	3.870	
		63%	37%		

## 2.4.8 トラス先端部の挙動とダボWの回転

図 2-39 は第 5-1 回, 5-2 回実験でのトラス先端部分の垂下を 10 倍に強調して示したものである。加力用の H 型鋼は  $\phi 36\text{mm}$  ボルトで尾垂木に 2 点のローラー接点で設置されている。破壊時において, 尾垂木は目立った湾曲を起こさず H 型鋼のウェブに試験体が触れることはなかった。(破壊時変形角は図の半分以下である。)

さらにトラス三角形内側での尾垂木と力肘木の上辺と下辺に設置した歪計の勾配を比較すると, 全ての個所で「ダボWなし」より「ダボWあり」の方が歪ゲージ値の勾配が緩やかになっている。これはダボが挿入されることにより各部材にかかる縁応力度が軽減され, 「片持ち梁抵抗要素」が減少したと考えられる。



第 5-1, 5-2 回  $P_0=14.25\text{KN}(1/4)$

第 5-1 回実験 (ダボなし) 14.25KN(1/4)

第 5-2 回実験 (ダボあり) 14.25KN(1/4)

①尾垂木と②力肘木の上辺・下辺の歪  $\varepsilon$  ( $\times 10^{-6}$ ) と先端垂下 (mm) を示す。

ただし垂下の変形図は 10 倍に強調して表示している。

図 2-39 尾垂木と力肘木の歪ゲージ値

また先端ダボWは図 2-40-1 のように鉛直荷重増大に伴って①尾垂木により引き上げられ反時計回りの回転運動を起こした。尾垂木が破壊した終局状態での回転角は第 2 回:17 度, 第 4 回:12 度, 6-2 回:18 度であった。(5-2 回は 20KN まで加力:5 度であった)

先端ダボW(カシ)は前後両面でわずかな「めり込み」が生じたが(図 2-40-2), ダボ穴(ヒノキ)では顕著であった(図 2-40-3)。このとき図 44 の歪⑩では, 尾垂木により左方向に引張られたダボWの圧迫により圧縮ひずみ ( $-1203 \times 10^{-6}$ ) が計測された。

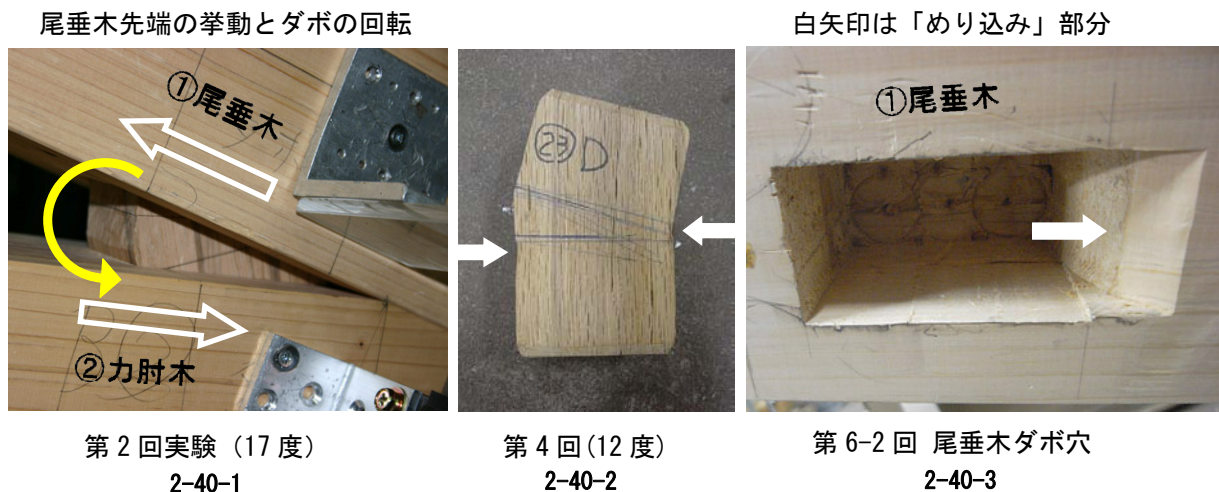


図 2-40 先端ダボWの実験写真

昭和大修理の工事所長を務めた竹島卓一は自著の中で, 尾垂木の太枅に関して「尾垂木と力肘木の接合は力肘木を斜めに切つてのせただけで, 繋ぎに太枅は入っているが極めて柔軟である。……解体すると, ちぎれた太枅が多かった。」と記述している<sup>12)</sup>。工事報告書の写真(図 2-41)も先端ダボは「ちぎれた」ように見える。

そこで我々は太枅(ダボ)が破断しなければ軒先の三角形はトラス効果を発揮すると考え, この先端ダボWのみ原寸サイズとした加力実験を実施した。しかしカシの太枅は少し変形しただけなのにヒノキのホゾ穴は「めりこみ」により大きく潰れてしまった(図 2-40-3)。工事報告書には太枅の当初材樹種を明記していないが, 再組み立ての際には太枅をカシで作ったと記述してある<sup>10-5)</sup>。おそらく当初の太枅は堅木ではなかったと考えられる注 8)。

奈良文化財研究所前所長: 鈴木嘉吉は談話の中で「一般的には太枅は折れても, ちぎれないもので, 法隆寺の尾垂木に埋め込まれた太枅はカシではないと思う」と語っている。現存物の樹種の確認は今後の課題としたい。



図 2-41 金堂初層尾垂木先端太枅 火災

### 2.4.9 尾垂木軸力の立体架構成分

図 2-42 は試験体の部材変位量と、引きボルトにかかった引張軸力を視覚化したものである。ここでは第 5 回実験の例を抽出している。

さらに図 2-43 に示されるように尾垂木先端荷重に対して上段水平材(尾垂木掛け)と中段水平材(通り肘木)に引張り応力が伝達された。第 5 回実験の中段水平材(引ボルト①④)の張力は[5-1 回ダボなし]と[5-2 回ダボあり]では殆ど変わらなかったが[5-3 回ダボなし]では 30%減少した。

一方、上段水平材(引ボルト②③)の張力は[5-2 回ダボあり]では[5-1 回ダボなし]の倍増、[5-3 回ダボなし]では 5-1 回の 40%増となった。6-1 回、6-2 回では 5-1 回、5-2 回とほぼ同じ挙動を示した。各実験での引きボルトの総和を比較する(表 2-9)と[5-1 回ダボなし]と[5-3 回ダボなし]は上段と中段のバランスが変化するが総和は殆ど変わらないので各実験での先端ダボWの効果は 7.125KN(1/8)で 38~44%増、14.25KN(1/4)で 29~39%増と推測される。

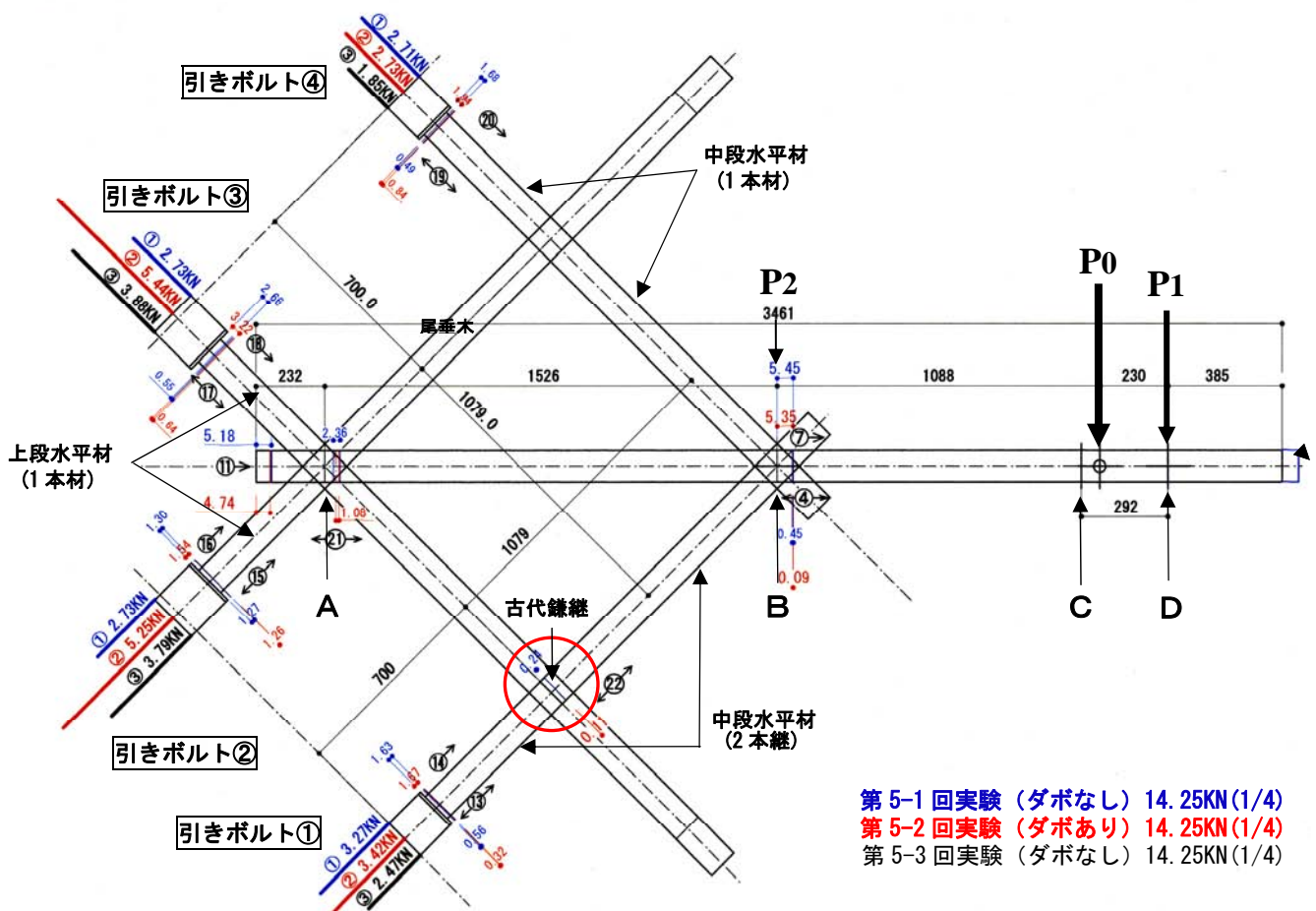


図 2-42 引ボルト張力図 第 5-1 回～第 5-3 回実験平面図

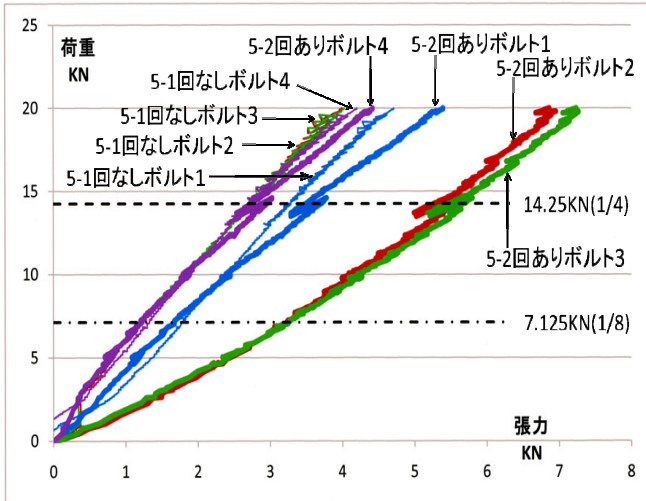


図 2-43 第 5-1 回, 第 5-2 回 引きボルト張力

表 2-9 引きボルト張力比較

	荷重	引ボルト1	引ボルト2	引ボルト3	引ボルト4	合計	ダボなし/あり
1/8(7.125KN)	KN	KN	KN	KN	KN	KN	%
ダボなし第5-1回	7.13	1.78	1.24	1.20	1.32	5.54	80%
ダボあり第5-2回	7.13	1.66	3.21	3.23	1.21	9.31	100%
ダボなし第5-3回	7.11	1.19	1.98	1.98	0.59	5.74	82%
ダボなし第6-1回	7.13	1.05	1.56	1.44	1.28	5.33	56%
ダボあり第6-2回	7.15	1.31	3.28	3.05	1.87	9.51	100%
1/4(14.25KN)	KN	KN	KN	KN	KN	KN	
ダボなし第5-1回	14.26	3.27	2.73	2.73	2.71	11.44	68%
ダボあり第5-2回	14.21	3.42	5.25	5.44	2.73	16.84	100%
ダボなし第5-3回	14.20	2.47	3.79	3.88	1.85	11.98	71%
ダボなし第6-1回	14.22	2.64	2.56	2.47	2.82	10.49	61%
ダボあり第6-2回	14.20	2.96	5.41	5.30	3.62	17.29	100%

しかし第 4 回(ダボあり 10KN と 20KN で繰り返し除荷後→破壊)実験では引ボルト①④と引ボルト②③との張力差は計測されなかった(図 2-44)。これは「先端ダボWあり」でも最初の試験体がダメージを受けていなければ、隅尾垂木の引張力が建物の四周横架材に流れる立体架構において、内陣柱上部の尾垂木掛け(上段水平材)に流れる割合と側柱上部の通り肘木(中段水平材)に流れる割合に差がないことを示している。

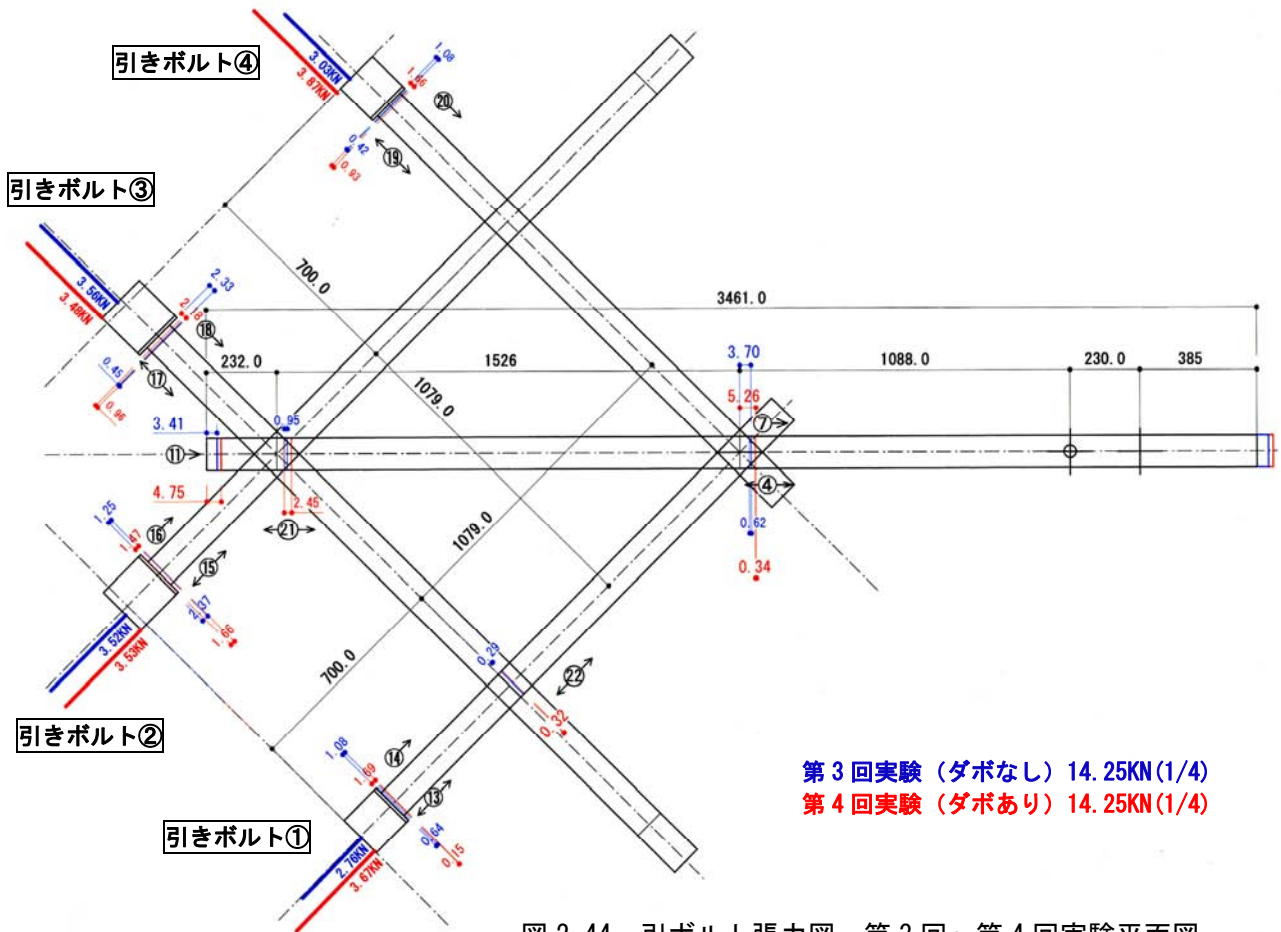


図 2-44 引ボルト張力図 第 3 回～第 4 回実験平面図

また合計6回の破壊実験の中で第4回のみ引きボルト①と連結した通り肘木⑦⑧を接合する古代鎌継がせん断破壊した(図2-45, 46)。

引きボルト①の張力は一瞬弱まり連動して引きボルト④にも一瞬ノイズが入るが、反対側(引きボルト①)を負担するように張力が増大した。しかも古代鎌継手にかかる力を初期状態から一部負担しているかのように張力が上昇している。以上のことから片側の継手破壊に対して対称側の水平材がこれを補っていると考えられる。

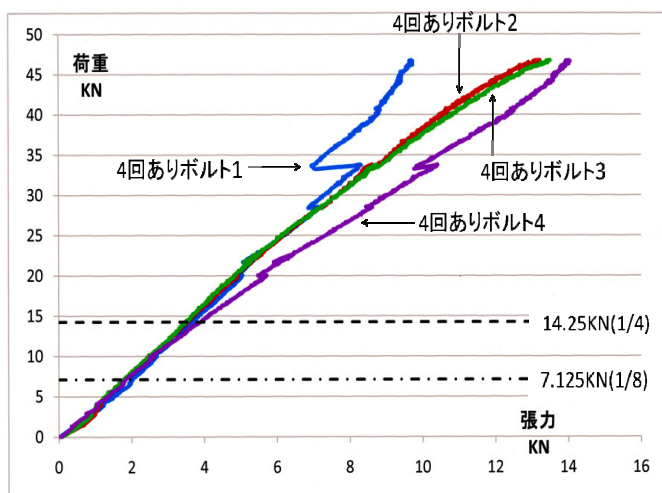
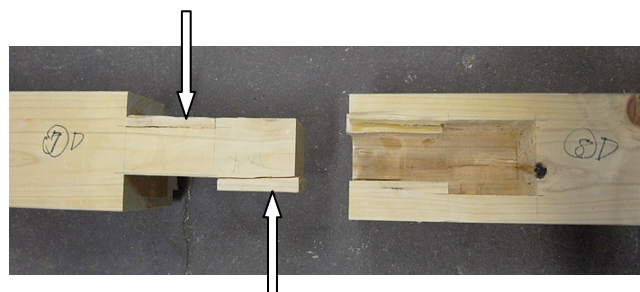


図2-45 第4回ダボあり 引きボルト張力



せん断破壊して鎌継内に残った女木部分



せん断破壊してずれた鎌の部分

図2-46 古代鎌継のせん断破壊状況



## 2.5 実験結果の結論

[2.4.4 カ肘木の破壊モード]より

\*カ肘木上端の「渡り腮」の初期亀裂が端緒となり、カ肘木の断面2次モーメントは半減したと推測され、これが法隆寺金堂の軒先垂下の要因となったと考えられる。

[2.4.6 検証1,2 歪ゲージから推測するトラス効果]

[2.4.7 検証3 先端垂下から推測するトラス効果]より

検証1と検証2の結果からトラス効果:60%前後、そのうち摩擦効果:40%前後、先端ダボ効果:20%前後と推定されたが、検証3ではトラス効果:40%前後、摩擦効果:20%前後、先端ダボ効果:20%前後と推定された。ただし検証3では尾垂木の断面欠損の影響を考慮するとトラス効果は過小評価と考えられる。以上を総合的に判断すると

\*法隆寺金堂は初層軒先にかかる垂直荷重の約50%をトラス架構による軸力で負担し、残りを片持ち梁の曲げで負担していると考えられる。

\*トラス先端の尾垂木とカ肘木のせん断力伝達には、尾垂木先端に挿入されたダボのせん断力と境界面の摩擦力が考えられ、せん断力伝達の約半分は摩擦力が負担していると推定される。

[2.4.2 軒先先端垂下]

[2.4.8 トラス先端部の挙動とダボWの回転]より

\*尾垂木先端ダボ挿入により尾垂木(斜材)とカ肘木(下段水平材)の縁応力度減少が確認され、曲げ抵抗の割合が減少しトラス抵抗の割合が増加することで架構全体の鉛直方向の剛性が増大したと考えられる。

[2.4.9 尾垂木軸力の立体架構成分]より

\*トラスにより四隅の尾垂木(斜材)にかかった引張軸力は尾垂木掛け(上段水平材)と通り肘木(中段水平材)に伝達され建物四周で立体的に釣り合っている。

以上を実験結果からの結論とする。



## 実験編 参考資料

第1章:序論, 第2章:実験編 参考資料

引用文献

- 1) 竹島卓一：建築技法から見た法隆寺金堂の諸問題，中央公論美術出版 pp264-265, pp294-295, pp321-326, 1975
- 2) 村田治郎：支那建築より見たる法隆寺系建築様式の年代，寶雲第 36 刷，寶雲刊行會 昭和 21 年 pp39-42, 1946
- 3) 藤島亥治郎：韓の建築文化，芸艸堂 pp359, 1976
- 4) 田中淡：中国壁画墓の建築図と唐代初期の建築様式，中国建築の歴史，弘文堂 pp337-338, 1989
- 5) 太田博太郎：日本建築史序説 増補第二版，彰国社 pp7, 2005（第1版 1947）
- 6) 後藤治：日本建築史 建築学の基礎⑥，共立出版 pp51, 2003
- 7) 村田健一：伝統木造建築を読み解く，学芸出版社 pp48-51, 2006
- 8) 棚橋諒, 高原道夫：法隆寺五重塔及び金堂の構造補強，建築雑誌 Vol.70, No.821, 法隆寺昭和修理特集 pp10-12, 1955
- 9) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告附圖, 法隆寺國寶保存委員會 1956 (9-1) 同上 pp249, 9-2) 同上 pp237, 9-3) 同上 pp133~137, 9-4) 同上 pp, 9-5) 同上 pp

図版出典

\* 特記なき写真は筆者撮影

\*\* 特記なき図表は筆者作成

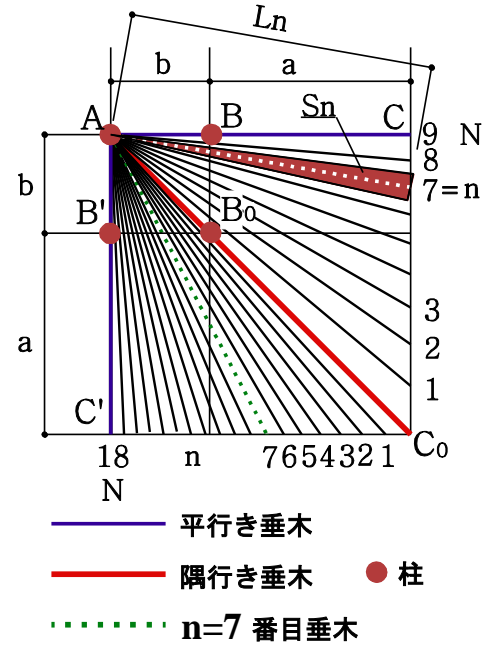
- 1-1) \*
- 1-2) 世界文化遺産 法隆寺:毎日新聞社 pp42,1995
- 1-3) 埋蔵文化財発掘調査報告 第六 四天王寺：文化財保護委員会 昭和 42 年, 第 87 図, pp194,1967
- 1-4) \*\*
- 1-5) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13,1995  
法隆寺金堂 上重初重矩計図反転に筆者加筆
- 1-6) \*\*
- 1-7-1) \*
- 1-7-2) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告(附図): 法隆寺國寶保存委員会, 第 218 図反転 pp107,1956
- 1-7-3) 同上 第 500 図 pp179,1956
- 1-8-1) \*
- 1-8-2) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告(附図): 法隆寺國寶保存委員会, 第 511 図 pp182,1956
- 1-9) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告: 法隆寺國寶保存委員会, 第 51 図 pp248
- 1-10) 同上第 50 図 pp243
- 1-11) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp12,1995  
法隆寺金堂 初重平面図に筆者が柱を加筆
- 1-12) 同上 pp13,1995 法隆寺金堂 桁行き断面図に筆者加筆
- 1-13) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告: 法隆寺國寶保存委員会, 第 18 図 pp128,1956
- 1-14) 同上第 3 図 pp68,1956
- 1-15) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13,1995  
法隆寺金堂 桁行き断面図に筆者加筆
- 1-16) 山田寺発掘調査報告:奈良文化財研究所学報第 63 冊 図版編 Pl.11,2002 遺構実測図 10 に筆者が柱加筆

- 2-1) \*\*
- 2-2) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告: 法隆寺國寶保存委員会,  
第 41 図 pp212,1956 に筆者加筆
- 2-3) \*筆者撮影に加筆
- 2-4)~2-31) \*または\*\*
- 2-32) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告(附図): 法隆寺國寶保存委員会,  
第 165 図 pp90,1956
- 2-33)同上第 545 図 pp192,1956
- 2-34)~2-40) \*または\*\*
- 2-41) 法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告(附図): 法隆寺國寶保存委員会,  
第 164 図 pp89,1956
- 2-42)~2-46) \*または\*\*

**参考資料**

**扇垂木の軒先垂下計算（一般解）**

大規模建築：景福宮勤政殿 垂木 18 本  
 小規模建築：華溪寺大殿 垂木 9 本  
 をモデルとして扇垂木コーナー部分（ $C_0$ ）の軒先垂下  $\delta_0$  と 平行き先端部分（ $C, C'$ ）の軒先垂下  $\delta_9, \delta_{18}$  算出式を求める。



図⑩ 扇垂木のモデル 1

- 1) 垂木 1 本当りにかかる荷重負担面積  $S_n$  を求める。
- 2) 隅行き垂木（ $AC_0$ ）が負担する屋根荷重面積  $S_0$  を大規模（垂木数 18 本）と小規模（垂木数 9 本）について求める。
- 3) 四天王寺での扇垂木痕跡の隅から 7 番目の垂木が負担する割合を大規模と小規模の場合で想定し求める。
- 4) 扇垂木が平行き垂木（ $AC, AC'$ ）となる部分での荷重負担面積  $S_9, S_{18}$  を求める。
- 5) 扇垂木の過重負担率の図
- 6) 隅行き垂木コーナー部分（ $C_0$ ）での軒先垂下  $\delta_0$  の算出式を求める。
- 7) 平行き垂木部分（ $C, C'$ ）での軒先垂下  $\delta_9, \delta_{18}$  の算出式を求める。

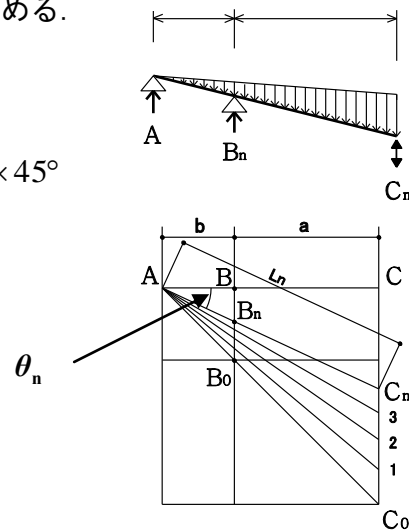
- 1) 扇垂木 1 本当りの屋根荷重を負担する面積  $S_n$  を求める。  
 $45^\circ$  を  $N$  等分するように垂木を配置する。

隅行きから数えて  $n$  番目の垂木の長さ  $L_n$  は

$$L_n = \frac{(a+b)}{\cos\left\{\left(1-\frac{n}{N}\right) \times 45^\circ\right\}} \quad \theta_n = \left(1-\frac{n}{N}\right) \times 45^\circ$$

$n$  番目の垂木が負担する扇部分の面積  $S_n$  は

$$\begin{aligned} S_n &= \pi L_n^2 \times \frac{45}{360N} \\ &= \pi \frac{(a+b)^2 \times 45}{\cos^2\left\{\left(1-\frac{n}{N}\right) \times 45^\circ\right\} \times 360N} \\ &= \frac{\pi(a+b)^2}{8N \cos^2\left\{\left(1-\frac{n}{N}\right) \times 45^\circ\right\}} \quad \dots (1) \end{aligned}$$



図⑪ 扇垂木のモデル 2

2) N本の垂木を架けた時の隅行き垂木 (AC<sub>0</sub>) の負担面積 S<sub>0</sub> は

$$S_0 = \frac{\pi(a+b)^2}{8 \times N \cos^2 \left\{ \left( 1 - \frac{0}{8} \right) \times 45^\circ \right\}} = \frac{\pi(a+b)^2}{8 \times N \cos^2 \{45^\circ\}} = \frac{\pi(a+b)^2}{4N} = 0.785 \times \frac{(a+b)^2}{N}$$

N=18 大規模建築(18本の垂木を架けたとき)  $S_0 = 0.0436 \times (a+b)^2 \dots (2)$

\* 大規模建築 N=18の隅行き垂木 はコーナー荷重の **4.4%** を負担している。 図⑫

N=9 小規模建築 (9本の垂木を架けたとき)  $S_0 = 0.0872 \times (a+b)^2 \dots (3)$

\* 小規模建築 N=9の隅行き垂木 はコーナー荷重の **8.7%** を負担している。 図⑬

3) 隅から n=7 番目の垂木の荷重負担 S<sub>7</sub> は

N=18 大規模建築(18本の垂木を架けたとき)  $\theta_n = \left( 1 - \frac{n}{N} \right) \times 45^\circ = 27.5^\circ$

$$S_7 = \frac{\pi(a+b)^2}{8 \times 18 \times \cos^2 \{27.5^\circ\}} = \frac{\pi(a+b)^2}{144 \times (0.887)^2} = 0.0277 \times (a+b)^2$$

\* 大規模建築 N=18の時7番目の垂木 はコーナー荷重の **2.8%** を負担している。 図⑫

同様に N=9 小規模建築(9本の垂木を架けたとき)  $\theta_n = \left( 1 - \frac{n}{N} \right) \times 45^\circ = 10^\circ$

$$S_7 = \frac{\pi(a+b)^2}{64 \times \cos^2 \{10^\circ\}} = 0.0506 \times (a+b)^2$$

\* 小規模建築 N=9の時7番目の垂木 はコーナー荷重の **5.1%** を負担している。 図⑬

4) 隅から 18 番目の平行き垂木 (AC') の荷重負担 S<sub>18</sub> (大規模建築 N=18の場合) は

$$S_{18} = \frac{\pi(a+b)^2}{8 \times 18 \times \cos^2(0^\circ)} = 0.0218 \times (a+b)^2 \dots (4)$$

\* 大規模建築 N=18の時平行き垂木 (AC') はコーナー荷重の **2.2%** を負担している。 図⑫

同様に隅から 9 番目 (平行き) の垂木の荷重負担 S<sub>9</sub> (小規模建築 N=9の場合) は

$$S_9 = \frac{\pi(a+b)^2}{8 \times 9 \times \cos^2(0^\circ)} = 0.0436 \times (a+b)^2 \dots (5)$$

\* 小規模建築 N=9の時平行き垂木 (AC) はコーナー荷重の **4.4%** を負担している。 図⑬

5) 扇垂木の荷重負担率の図

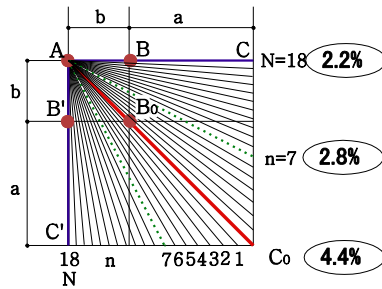


図12 扇垂木の荷重負担率(大規模)

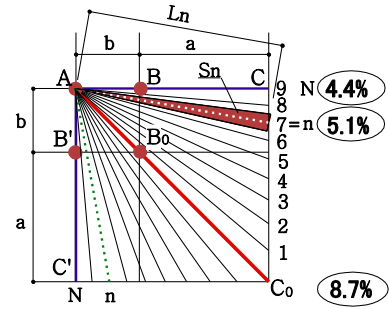


図13 扇垂木の荷重負担率(小規模)

6) 隅行き垂木コーナーの垂下  $\delta_0$  の計算

AB間は固定されているので片持ち梁の不等分布荷重とみなす  
軒先先端  $C_0$  部分の垂下  $\delta_0$  は (先端荷重  $W_1$ 、B荷重を  $W_2$ )

E: 曲げヤング率 I: 断面2次モーメント

$$\delta_0 = \frac{(11w_1 + 4w_2)}{120EI} \alpha^4 \quad w_1 = \frac{2SnW}{a + \beta} \quad w_2 = \frac{\beta}{a + \beta} w_1$$

$$\alpha = \sqrt{2}a \quad \beta = \sqrt{2}b \quad \alpha + \beta = \sqrt{2}(a + b)$$

大規模建築 (N=18の場合) 隅木 (n=0) にかかる

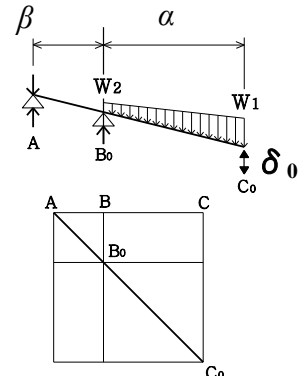


図14 隅行き垂木の垂下

$W_1 W_2$  は (非常に重い屋根の単位荷重を  $W=0.00024\text{KN/cm}^2$  とする) \*21 (2) 式より

$$w_1 = \frac{2S_0 W}{a + \beta} = \frac{2W}{\sqrt{2}(a + b)} \{0.043(a + b)^2\} = 0.0617(a + b)W \quad \dots (6)$$

$$w_2 = \frac{\beta}{a + \beta} w_1 = \frac{\sqrt{2}b}{\sqrt{2}(a + b)} \times 0.0617(a + b)W = 0.0617bW \quad \dots (7)$$

故に垂下  $\delta_0$  は (6) (7) 式を代入して

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \frac{(11w_1 + 4w_2)}{120EI} \alpha^4 = \frac{\{11 \times 0.0617(a + b)W\} + \{4 \times 0.0617bW\}}{120EI} \times (\sqrt{2}a)^4 \\ &= \frac{0.0617(11a + 15b)}{30EI} \times a^4 W \quad \dots \dots \dots \text{大規模建築 N=18、n=0 の場合表1} \end{aligned}$$

小規模建築 (N=9の場合) 隅木 (n=0) にかかる荷重  $W_1 W_2$  は (3) 式より同様に

$$\delta_0 = \frac{0.1233(11a + 15b)}{30EI} \times a^4 W \quad \dots \dots \dots \text{小規模建築 N=9、n=0 の場合表1}$$

7) 平行き垂木部分の垂下  $\delta_{18}$ ,  $\delta_9$  の計算

$$\delta_{18} = \frac{(11w_1 + 4w_2)}{120EI} \alpha^4 = \frac{0.043(11a + 15b)}{120EI} \times a^4 W \quad \text{大規模建築 N=18、n=18 の場合表1}$$

$$\delta_9 = \frac{(11w_1 + 4w_2)}{120EI} \alpha^4 = \frac{0.0872(11a + 15b)}{120EI} \times a^4 W \quad \text{小規模建築 N=9、n=9 の場合表1}$$



## 実験データ (1)

**\* 実験スケジュールと計測器位置**

試験体は6セット(A~F)用意し、基本的には「ダボWなし」3回(奇数回目)と「ダボWあり」3回(偶数回目)実験を行った。第1~2回では破壊まで単調載荷, 第3~4回では10KNと20KNで繰り返し除荷後→破壊まで載荷を行った。第5回では「ダボWなし」で20KNまで加力→除荷, 試験体(E)はそのまま「ダボWを挿入」→再セット→20KNまで加力→除荷, 試験体(E)はそのまま「ダボWを外し」→再セット→破壊まで載荷を行った。第6回では「ダボWなし」で20KNまで加力→除荷, 試験体(F)はそのまま「ダボWを挿入」→再セット→破壊まで載荷を行った。(表D-1)

表D-1 実験スケジュール

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5-1回	第5-2回	第5-3回	第6-1回	第6-2回
試験体	A	B	C	D	E	E	E	F	F
⑳角ダボW	×	○	×	○	×	○	×	×	○
	セット	セット	セット	セット	セット	再セット	再セット	セット	再セット
	↓	↓	10KN→除荷 20KN→除荷	10KN→除荷 20KN→除荷	20KN→除荷	20KN→除荷	↓	20KN→除荷	↓
	破壊	破壊	破壊	破壊			破壊		破壊

**主要計測器位置 立面表示 :**

計測器は最終的に、変位計16箇所、引きボルト張力4か所、歪ゲージ20か所となった。

変位計①: 尾垂木D点垂下, 変位計②: 雲形肘木C点先端垂下, 変位計③: 尾垂木と力肘木の相対変位

変位計④: 尾垂木B中央部の相対変位, 変位計⑦: 尾垂木中央部B点の絶対変位

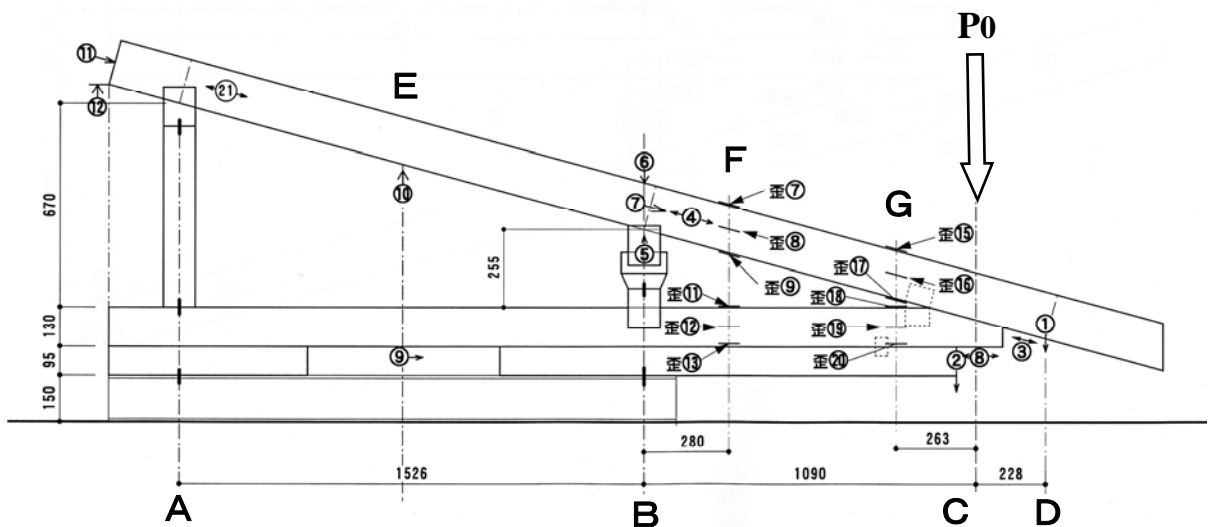
変位計⑨: 力肘木E点の絶対水平変位, 変位計⑩: 尾垂木E点の絶対高さ

変位計⑪: 尾垂木エンドの絶対変位, 変位計⑫: 尾垂木エンドの相対変位

変位計⑬: 尾垂木エンドの絶対高さ,

歪計⑭⑮: 尾垂木F点上辺と下辺, 歪計⑯⑰: 力肘木F点上辺と下辺

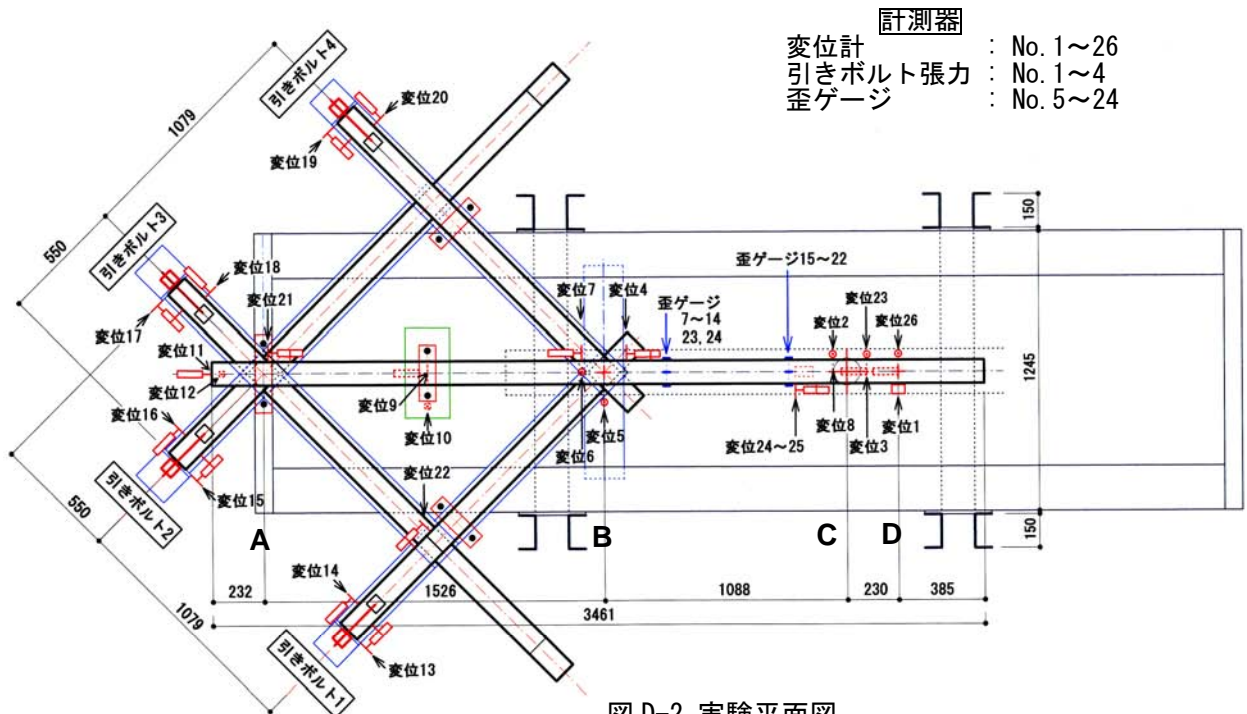
歪計⑱⑲: 尾垂木G点上辺と下辺, 歪計⑳㉑: 力肘木G点上辺と下辺



図D-1 計測器 番号・位置 立面図

主要計測器位置 平面・立面表示：

引きボルト 1：変位計⑬相対変位，⑭絶対変位，  
 引きボルト 2：変位計⑮相対変位，⑯絶対変位  
 引きボルト 3：変位計⑰相対変位，⑱絶対変位，  
 引きボルト 4：変位計⑲相対変位，⑳絶対変位  
 変位計 22：古代鎌継の相対変位，変位計 24・25：角ダボW回転



計測器  
 変位計 : No. 1~26  
 引きボルト張力 : No. 1~4  
 歪ゲージ : No. 5~24

図 D-2 実験平面図

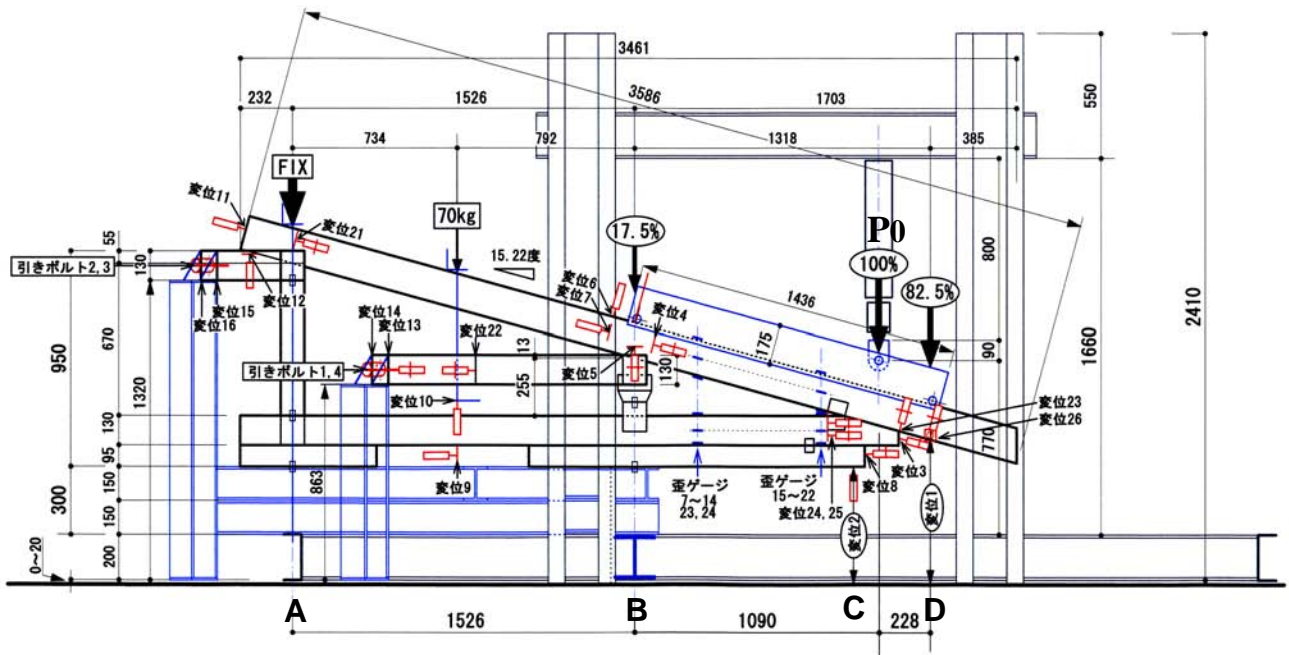
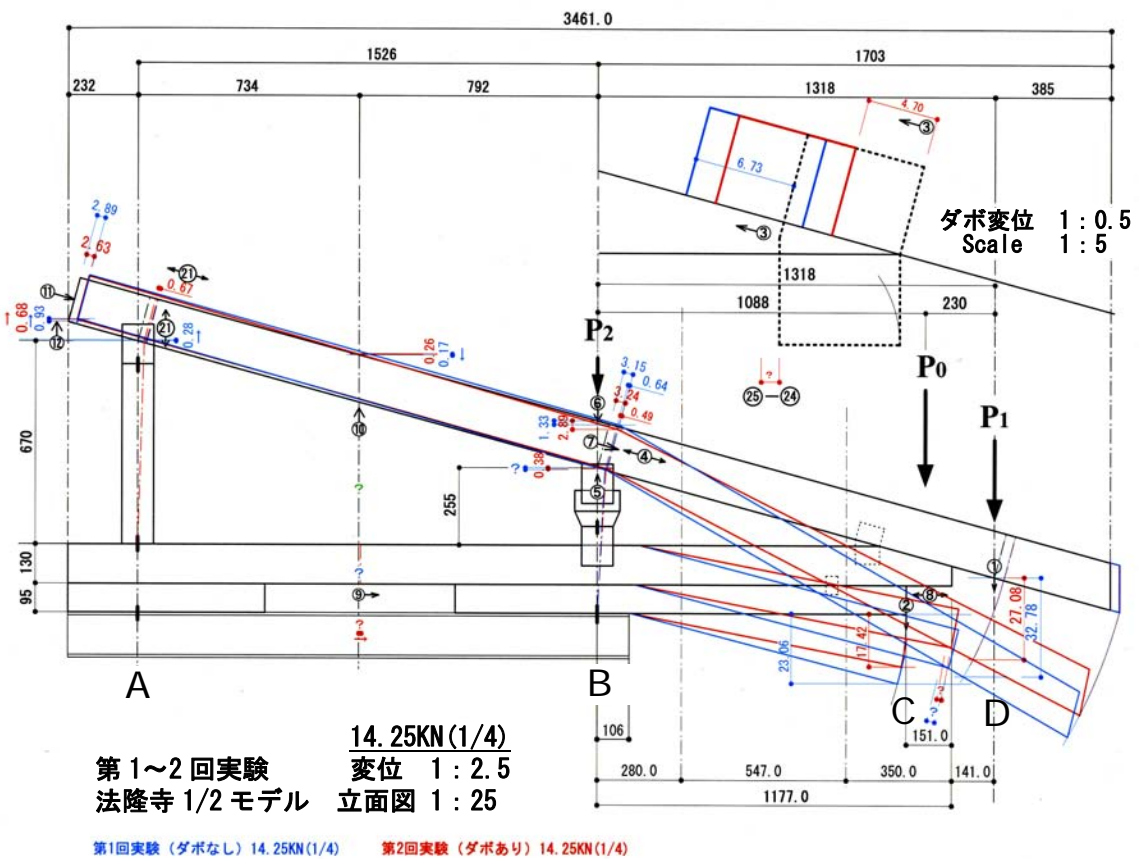
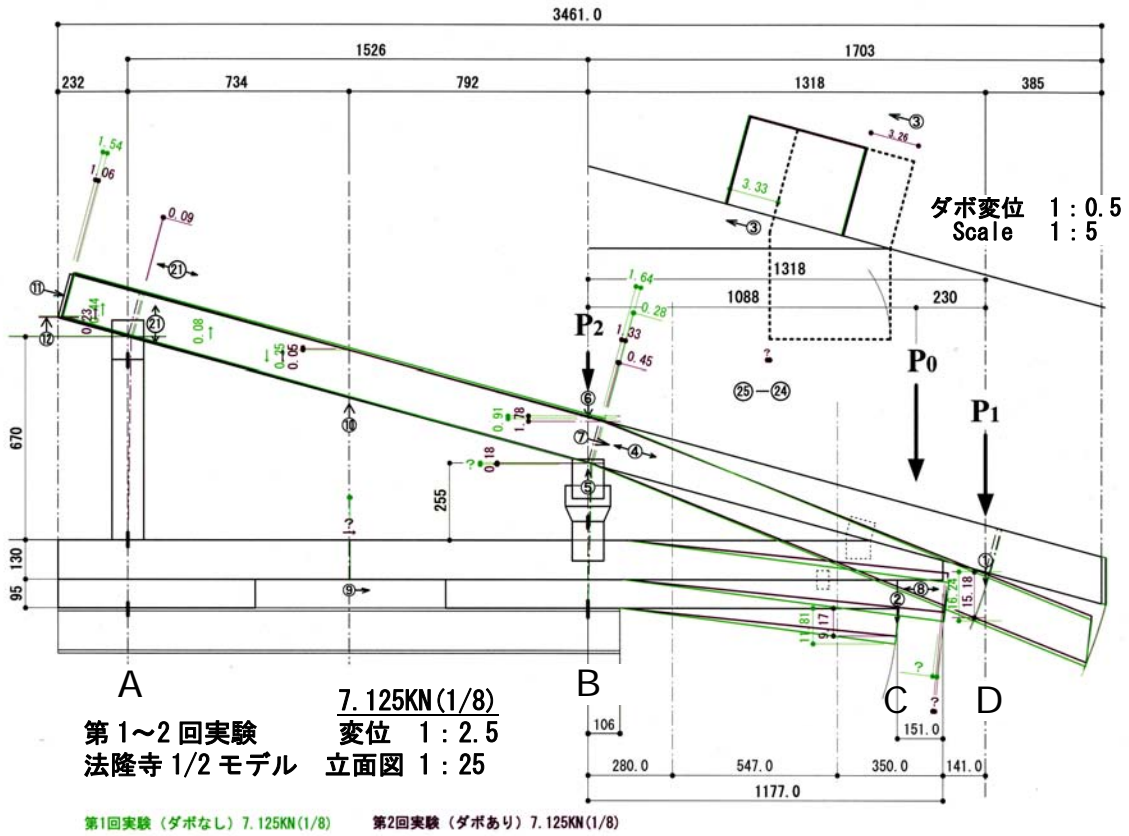
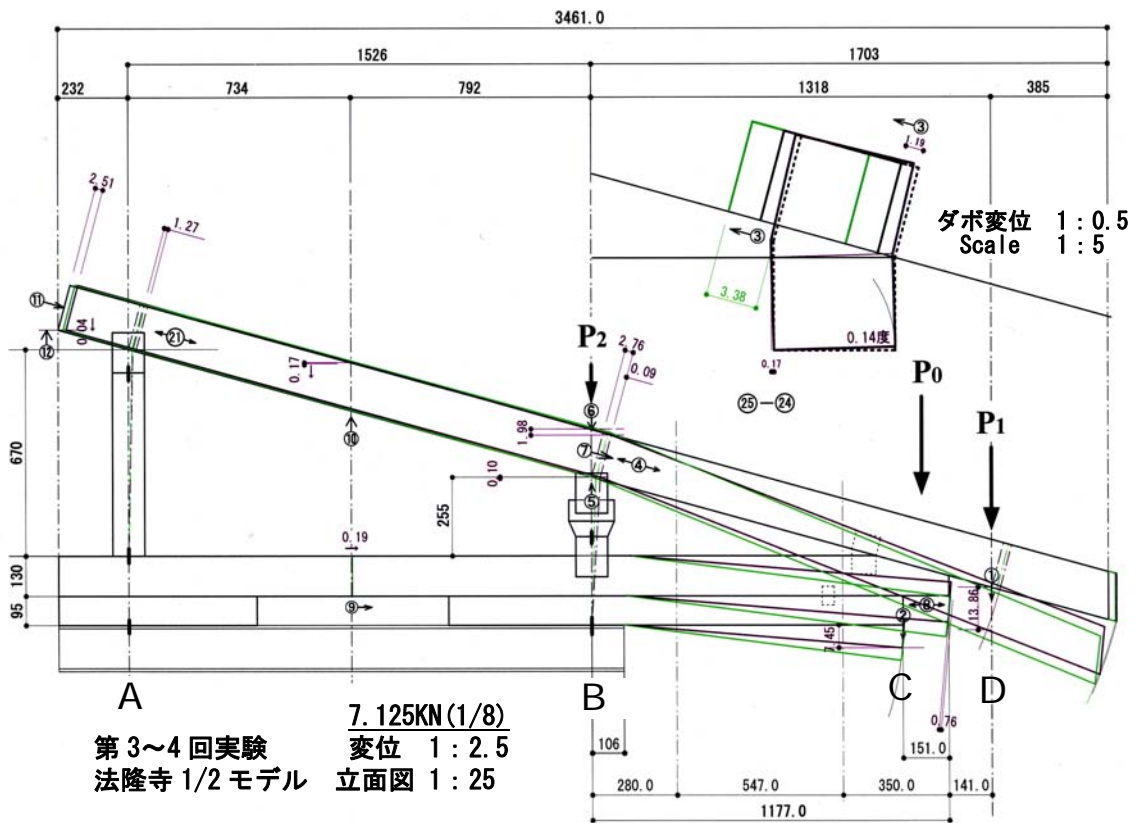
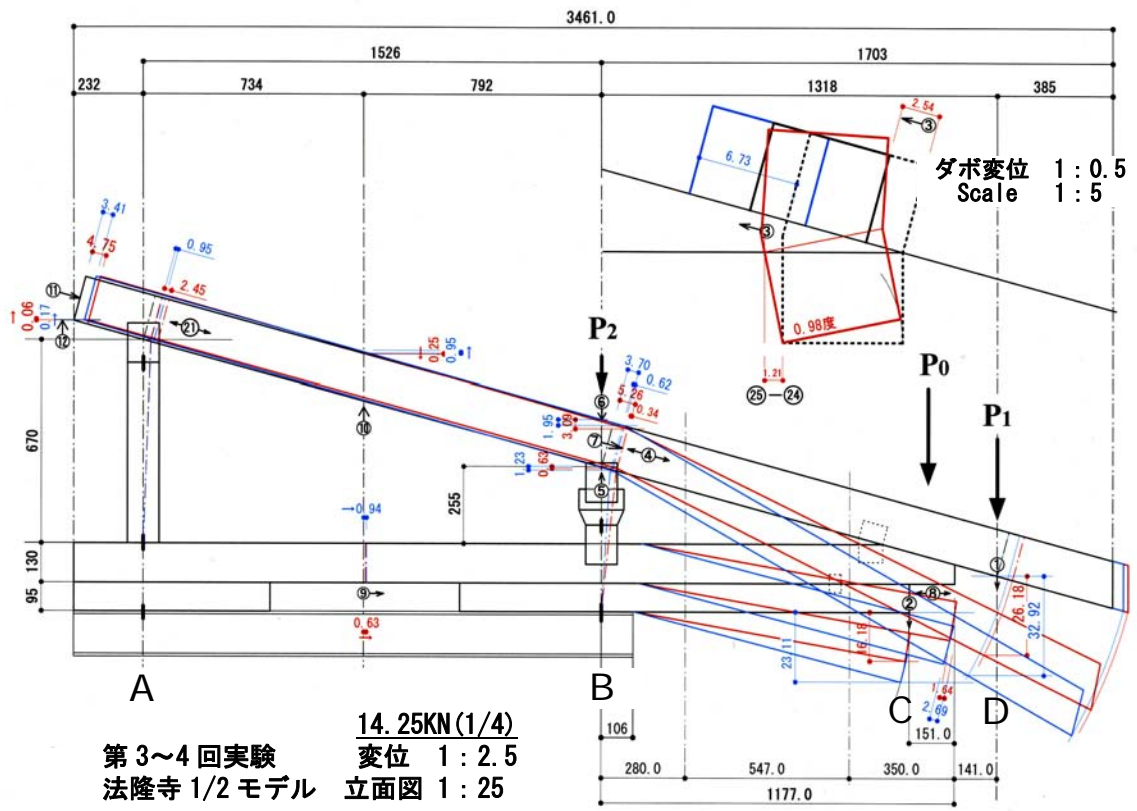


図 D-3 実験立面図

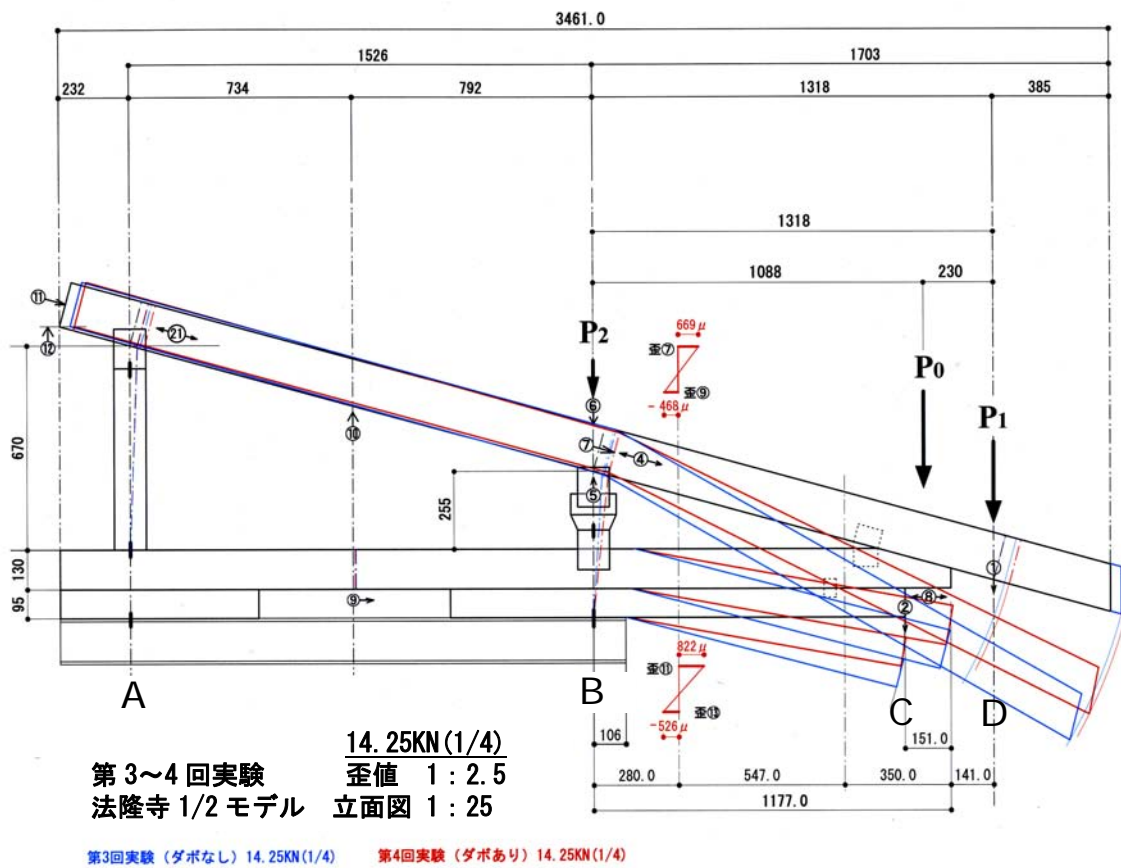
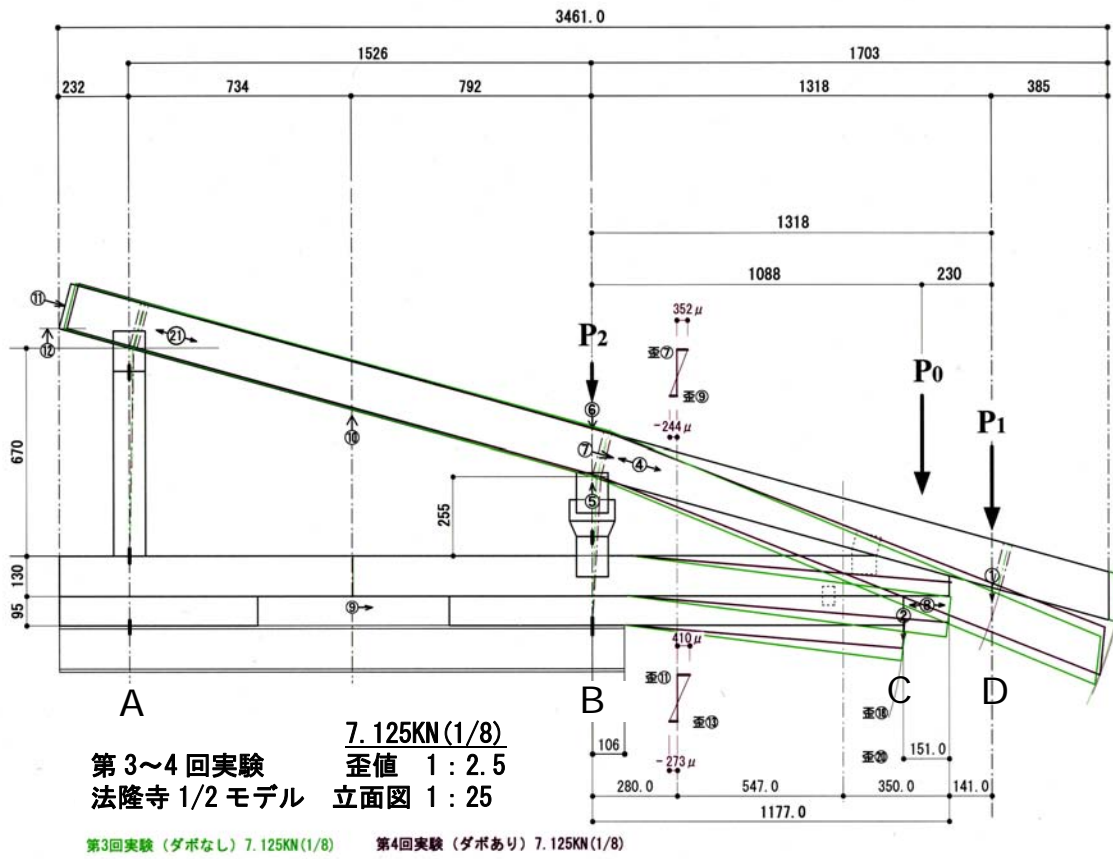


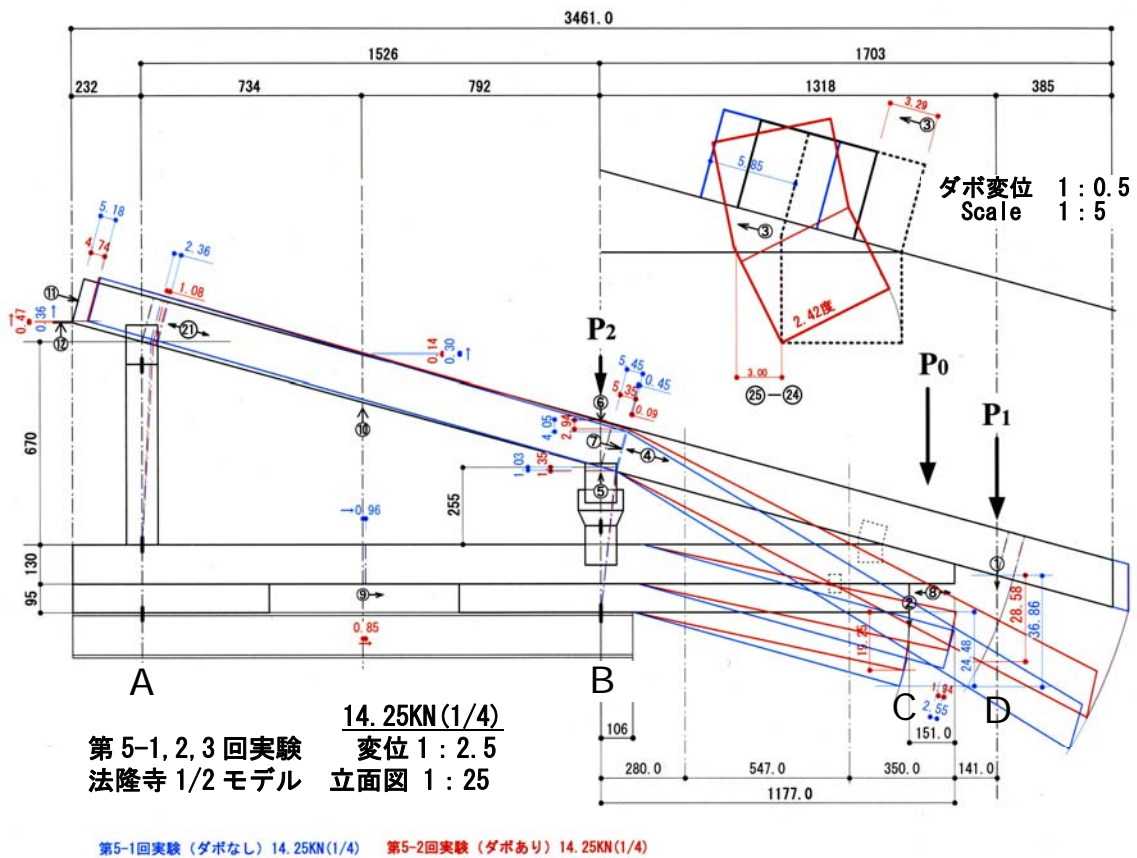
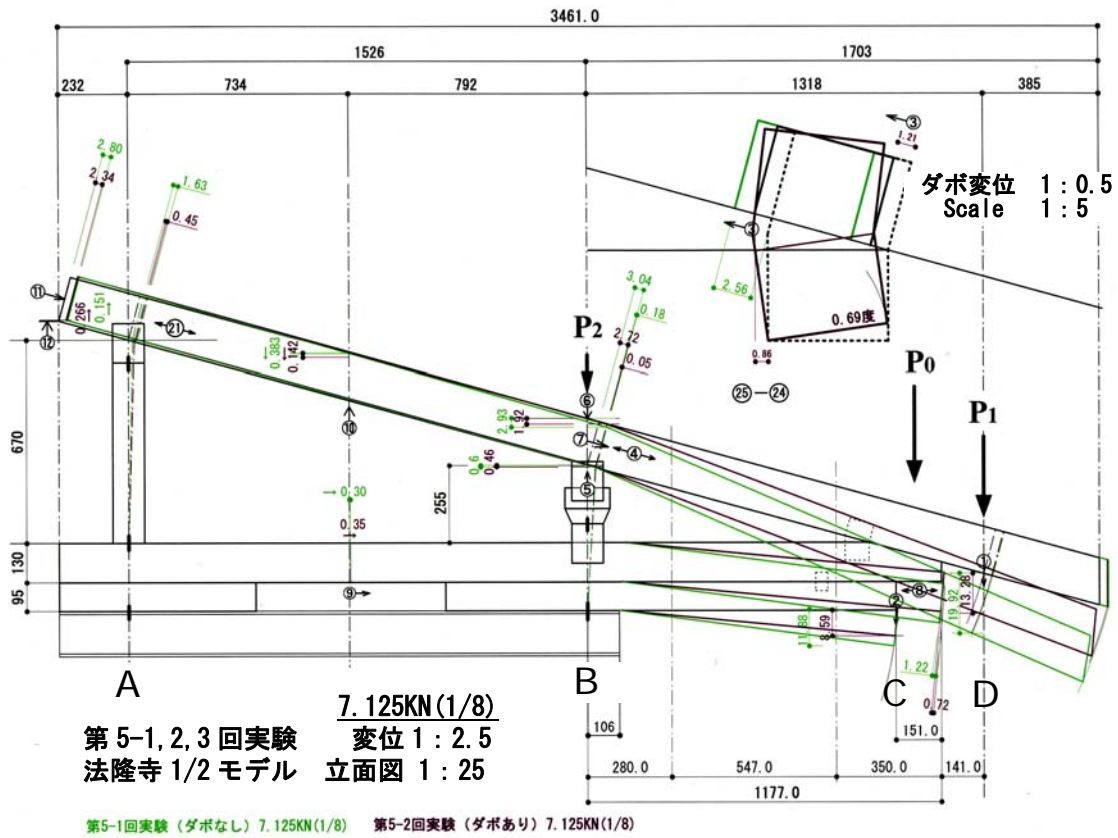


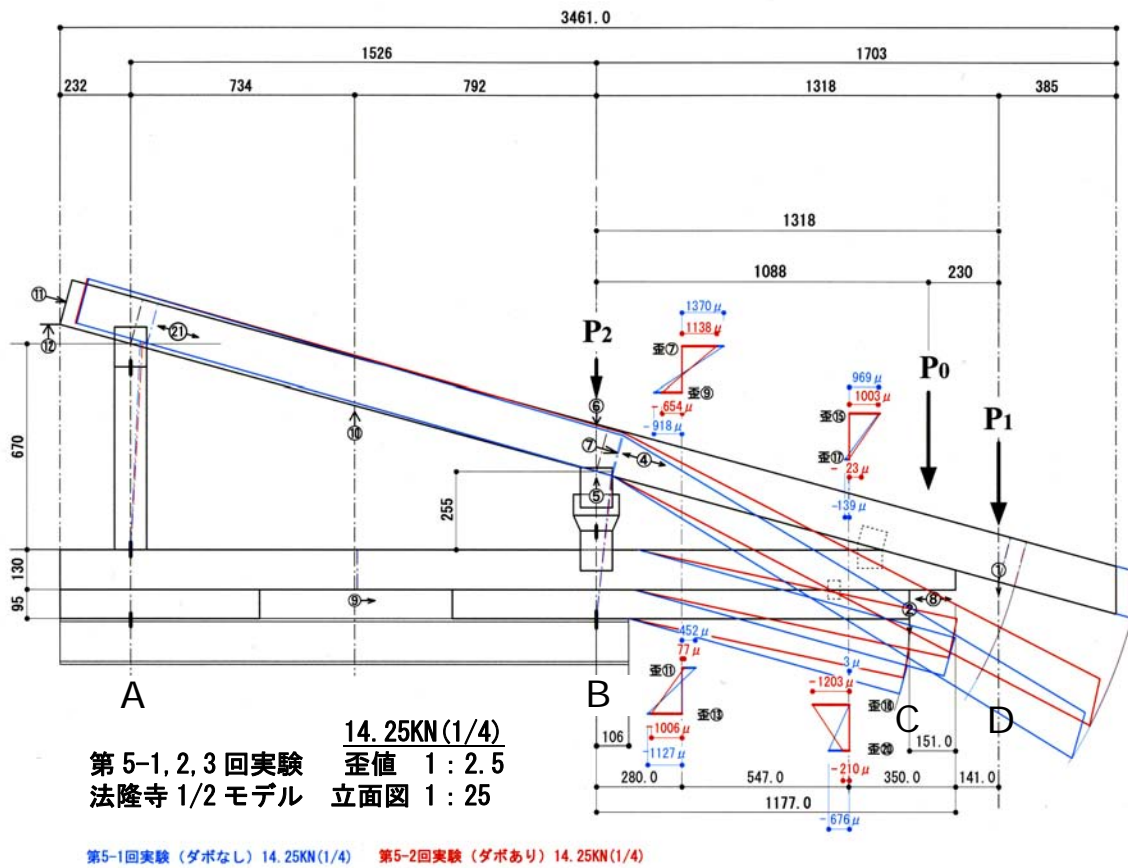
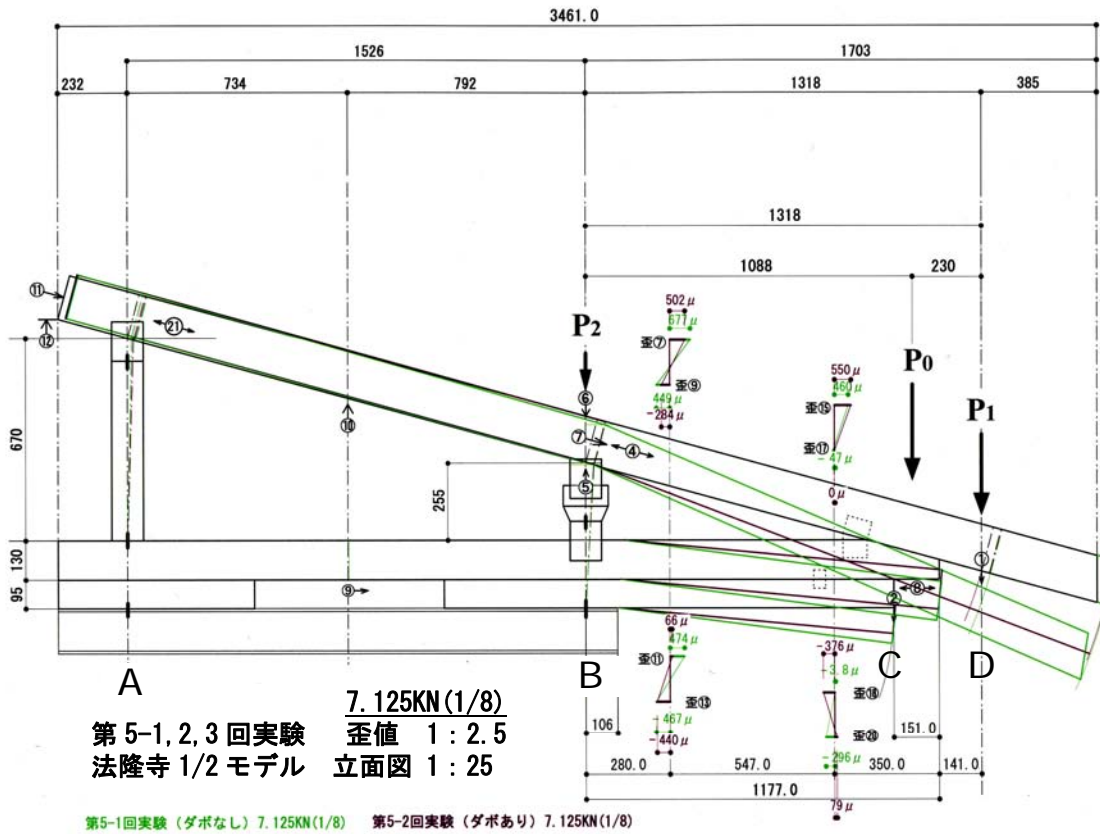
第3回実験 (ダボなし) 7.125KN(1/8)      第4回実験 (ダボあり) 7.125KN(1/8)



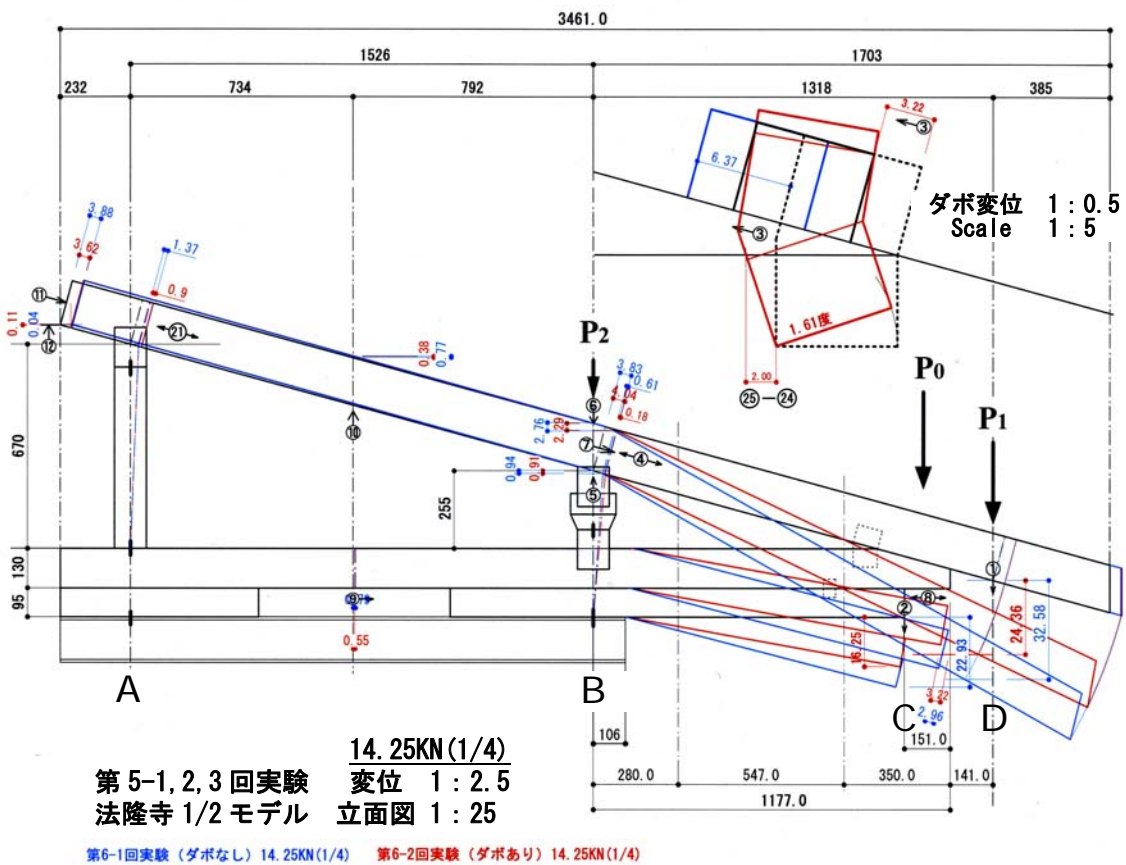
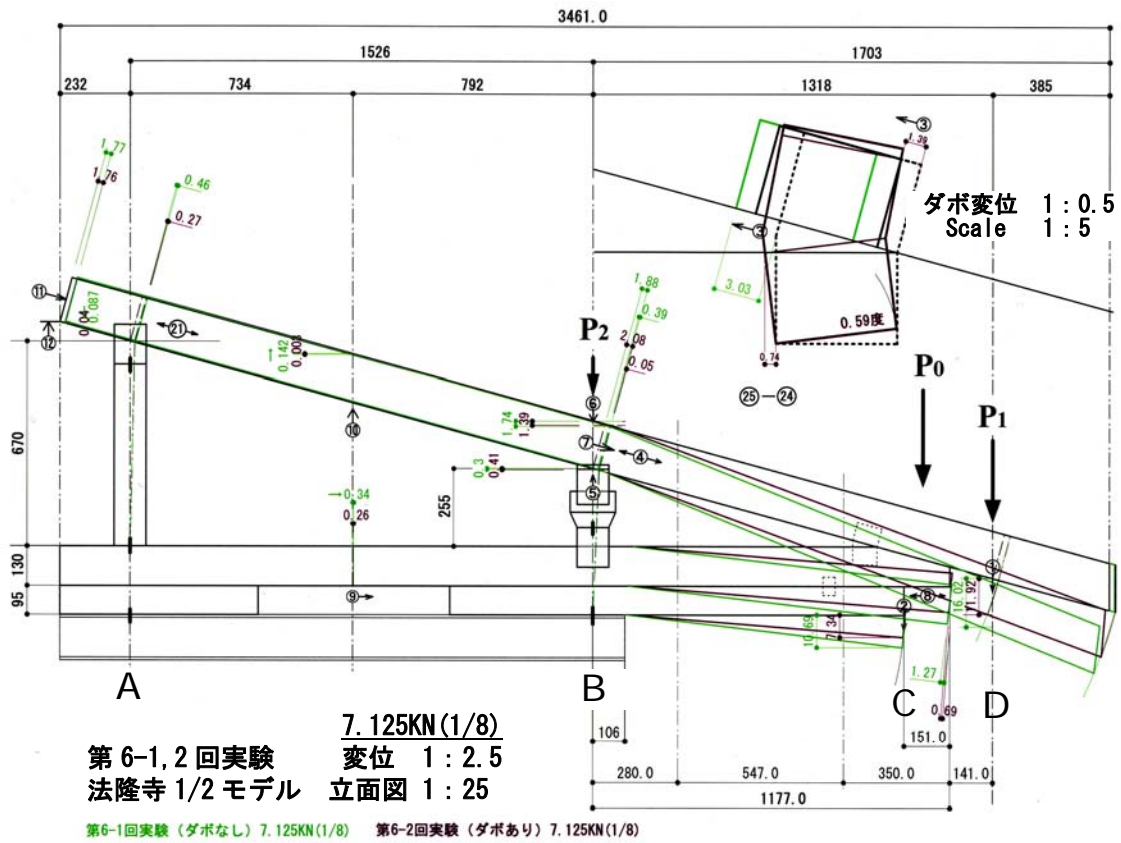
第3回実験 (ダボなし) 14.25KN(1/4)      第4回実験 (ダボあり) 14.25KN(1/4)

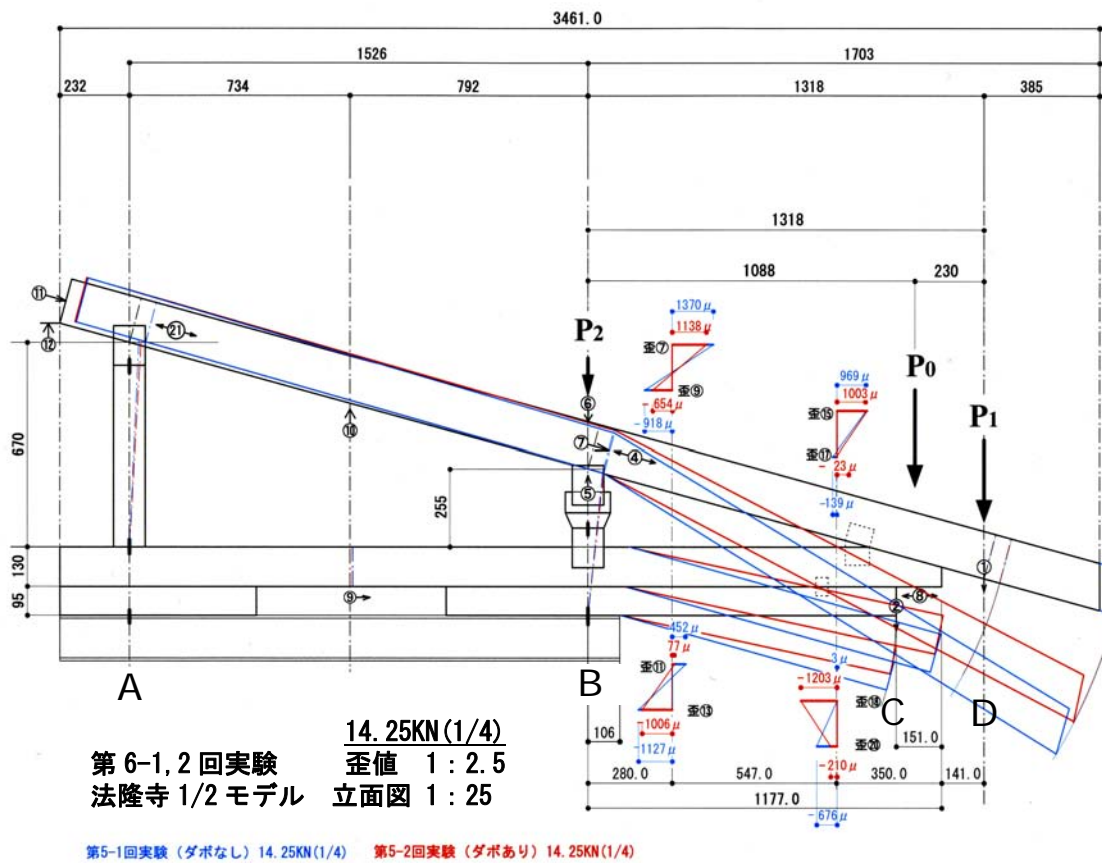
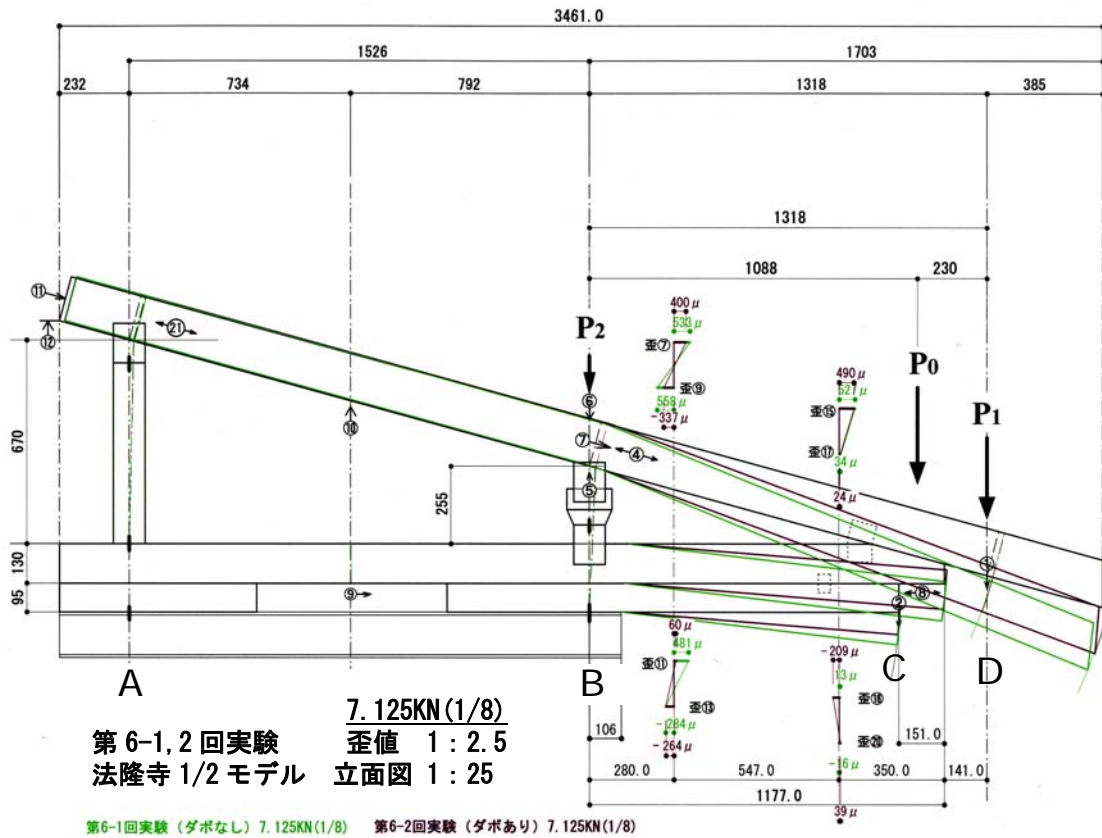


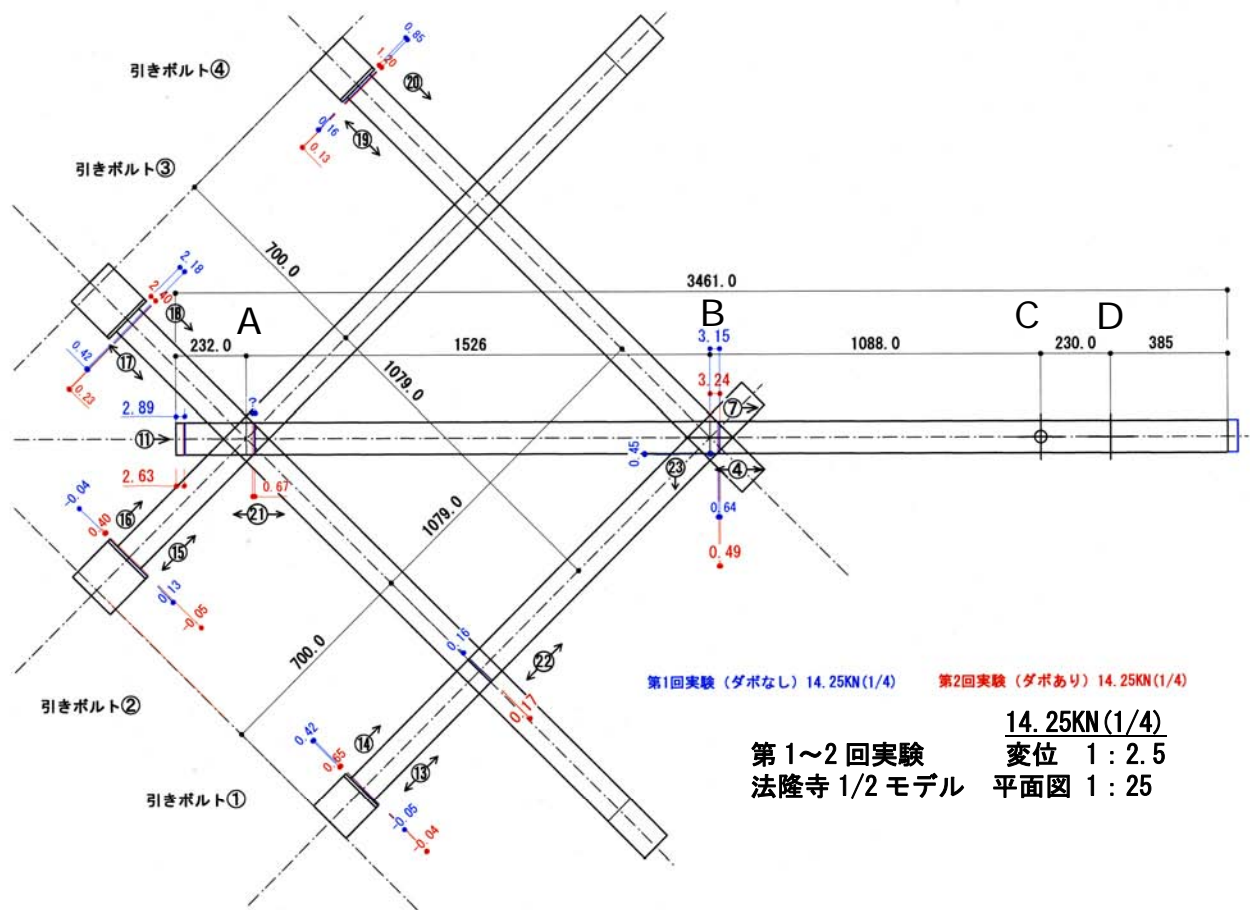
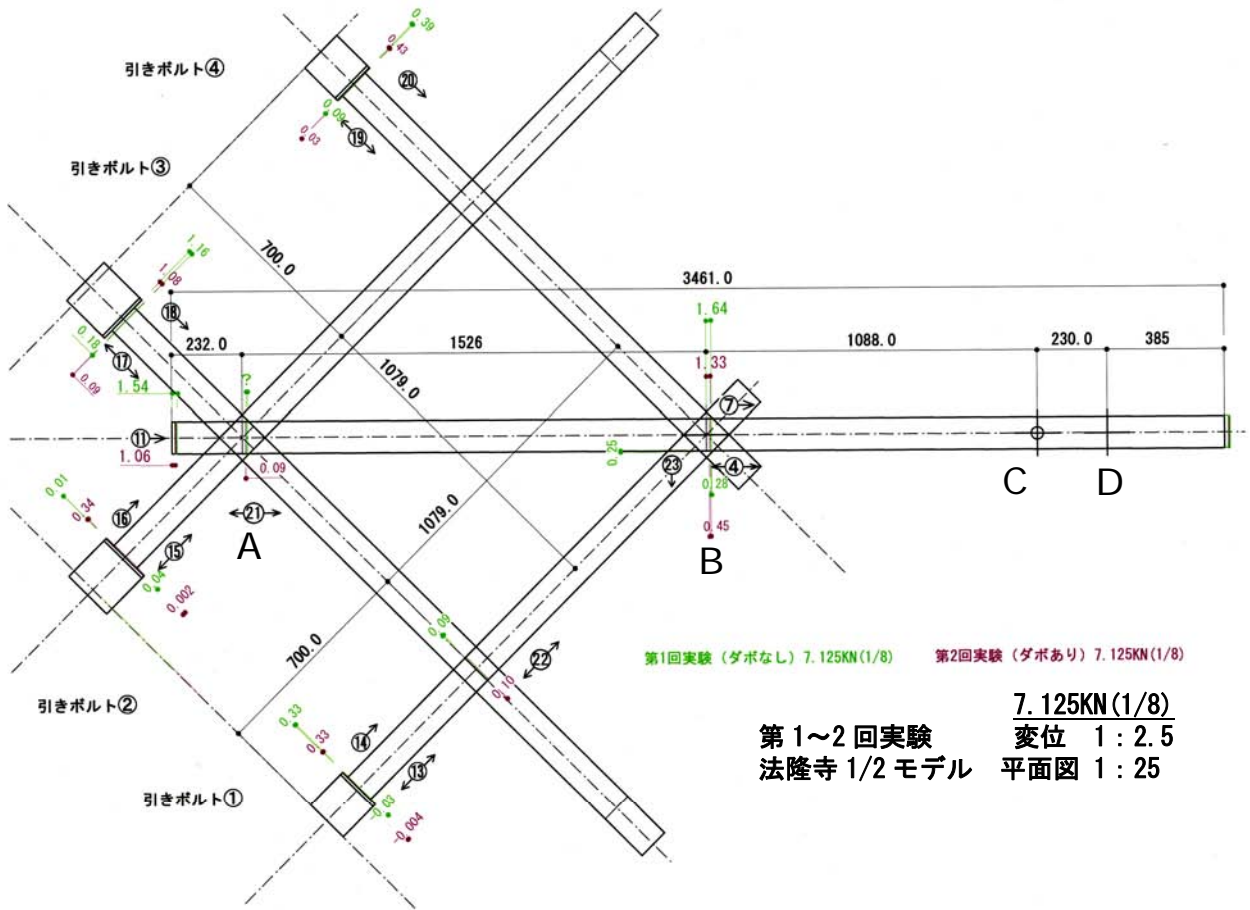


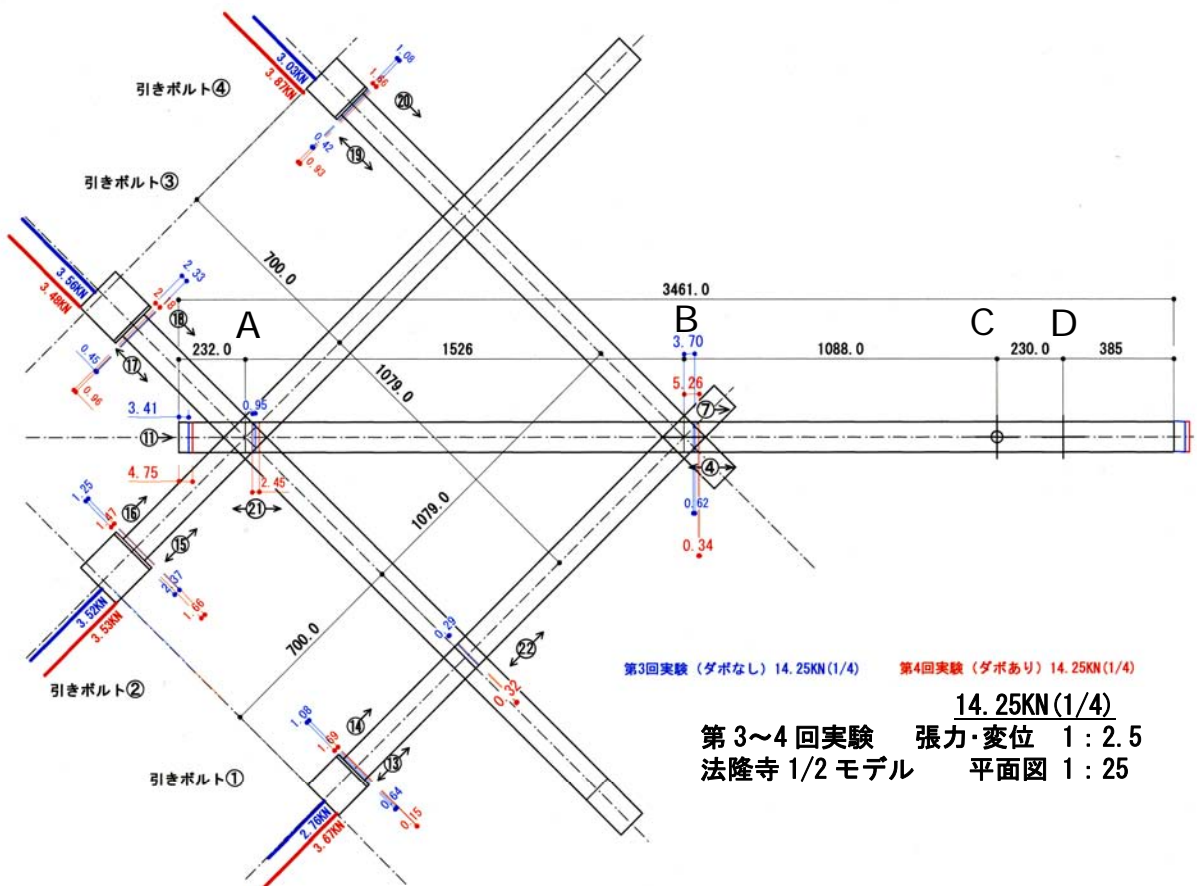
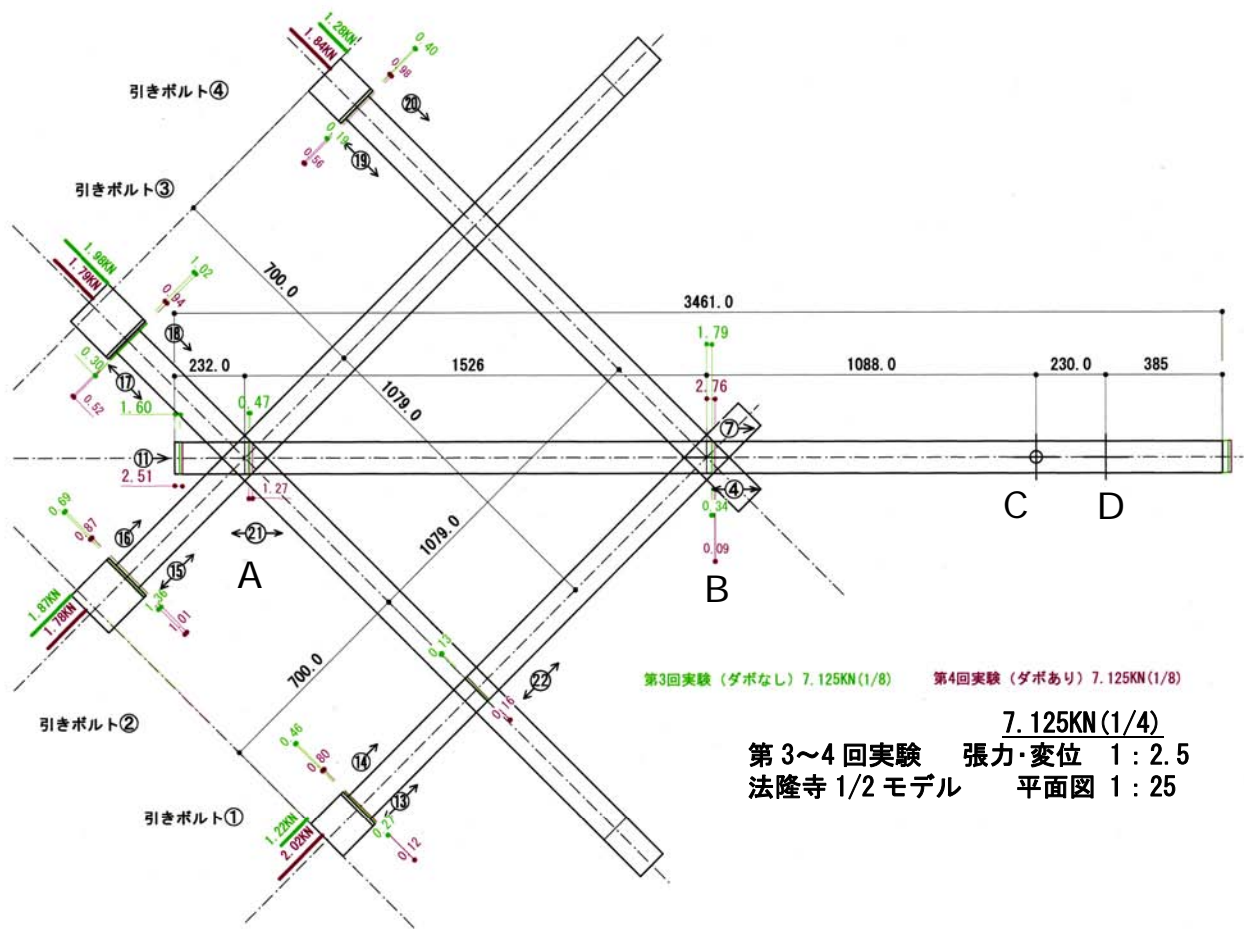


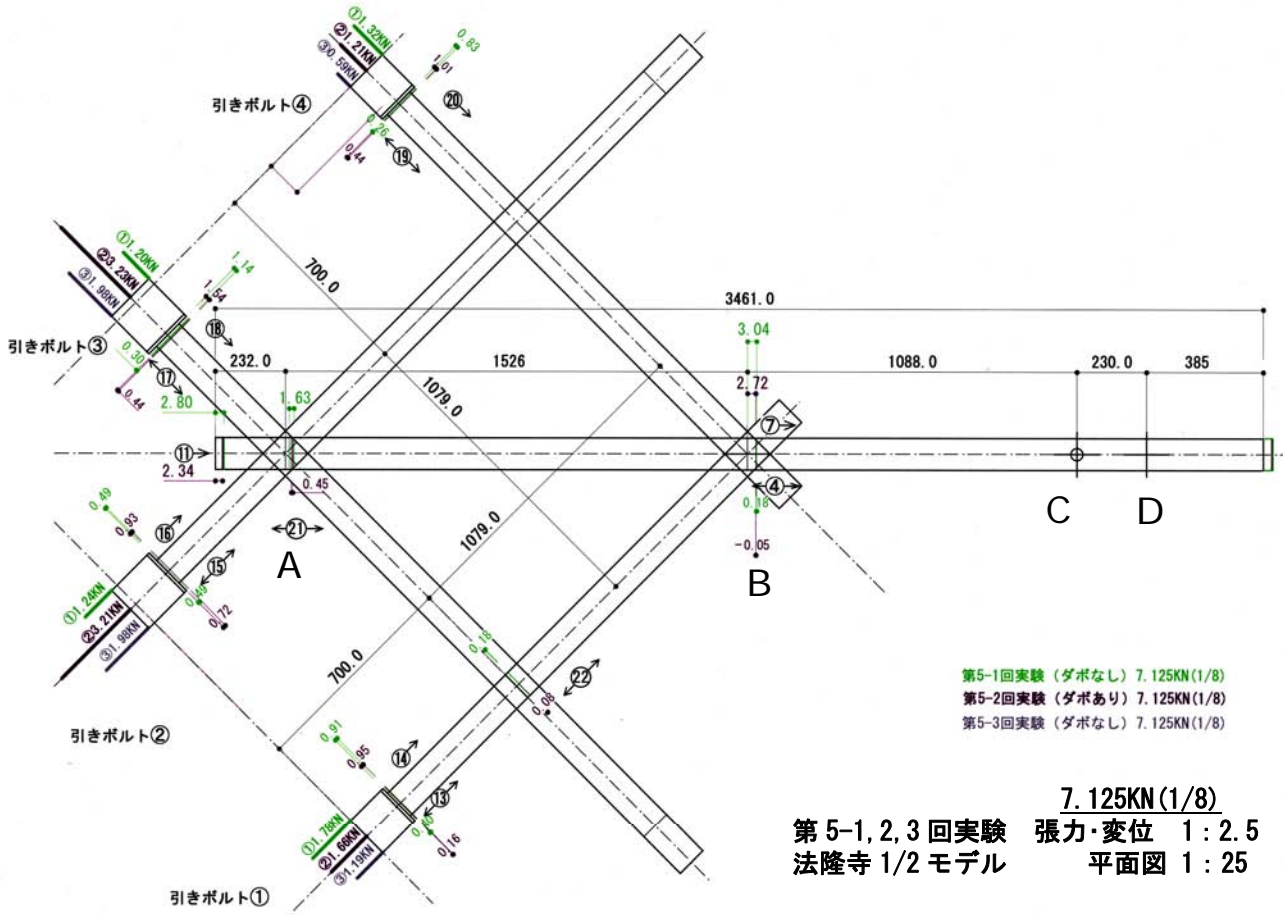




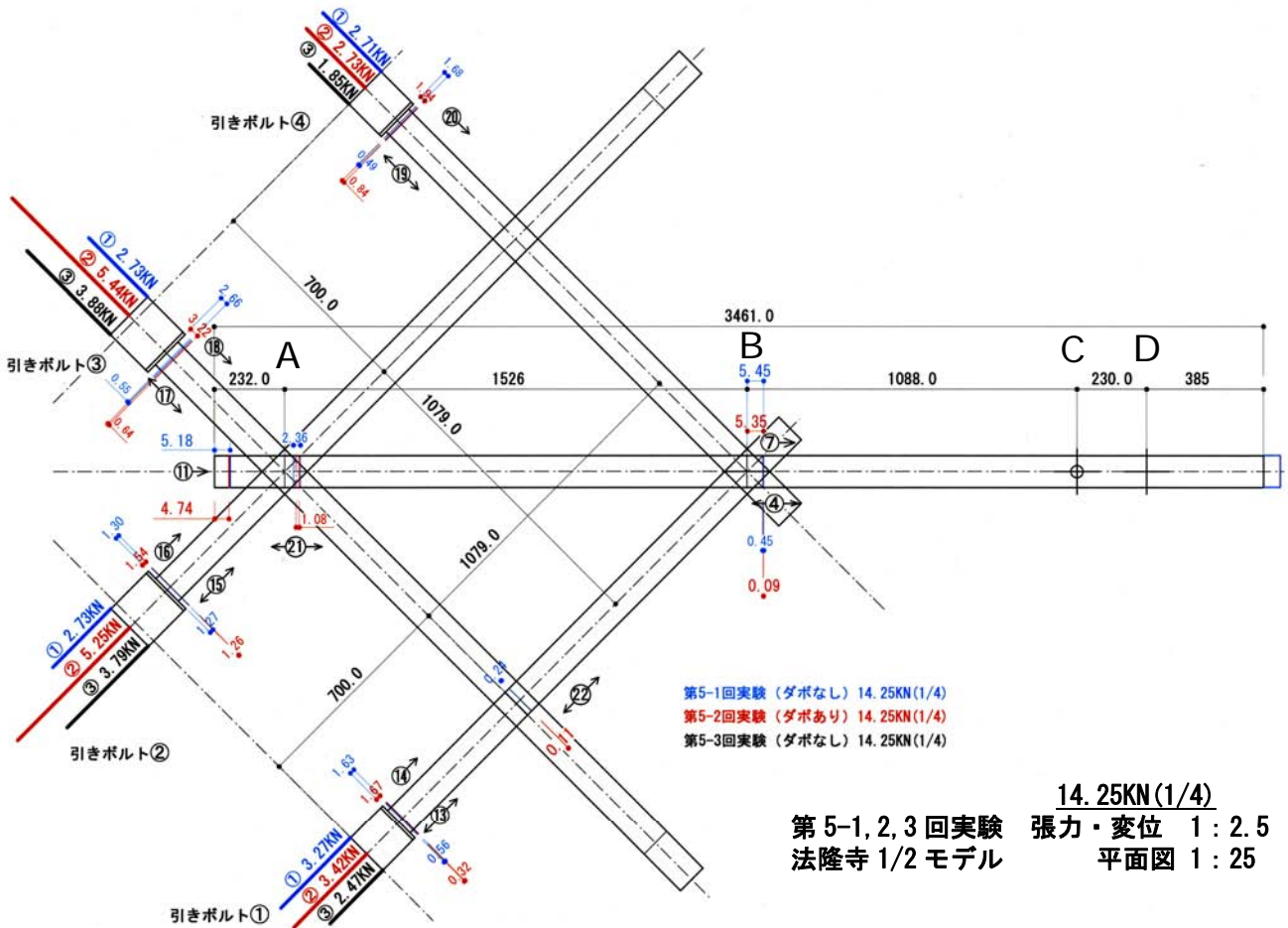




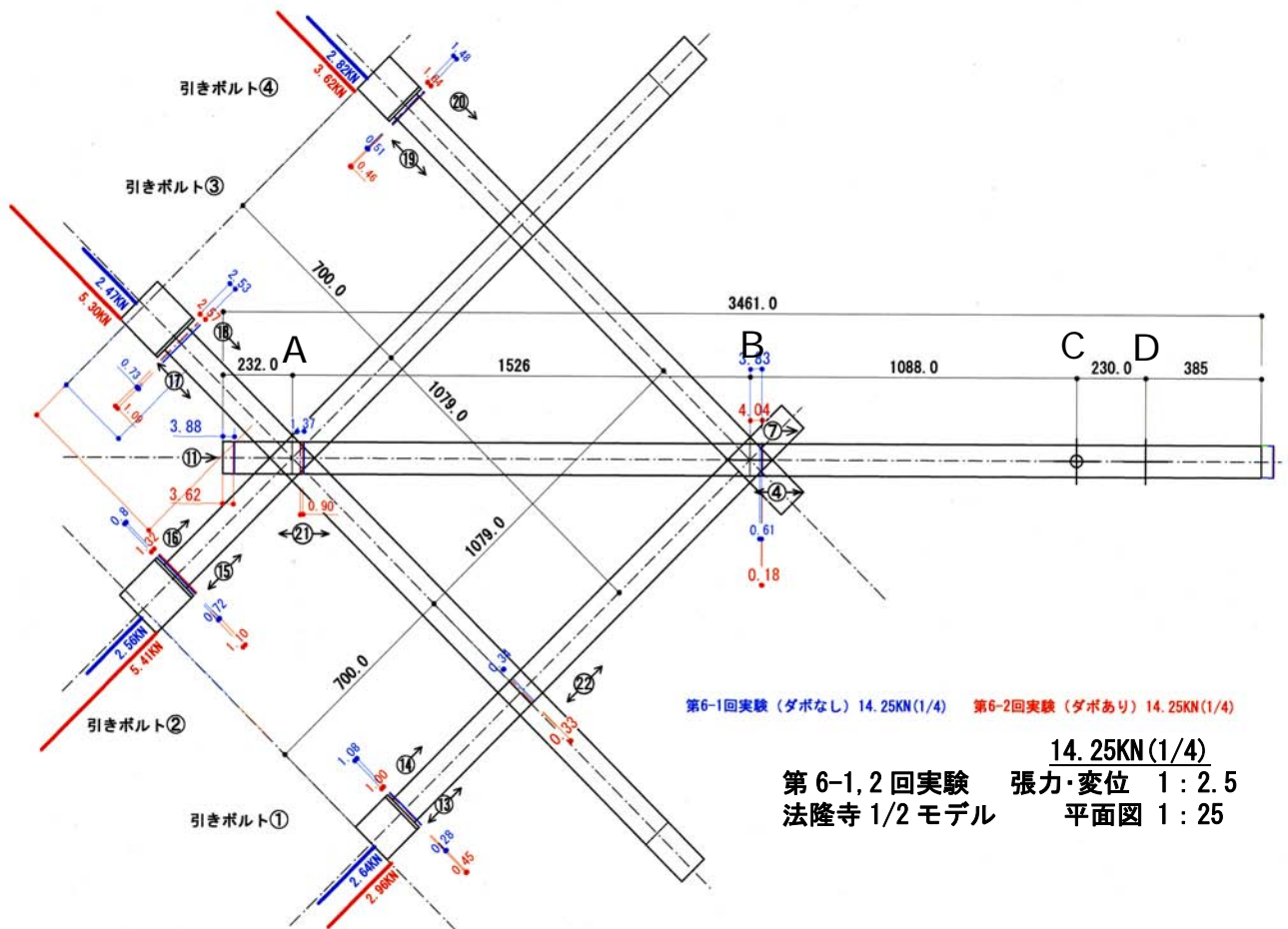
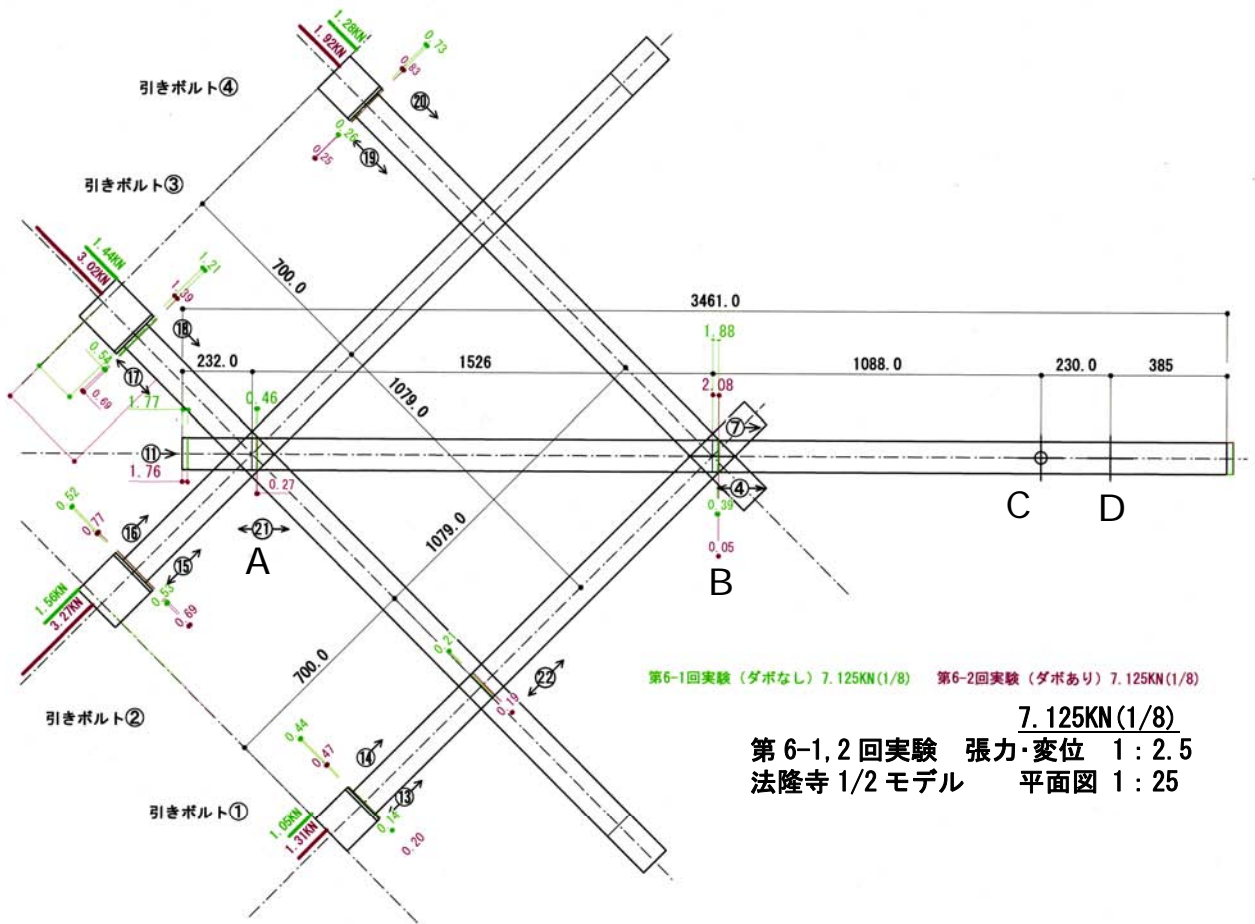




7.125KN(1/8)  
 第5-1, 2, 3回実験 張力・変位 1 : 2.5  
 法隆寺 1/2 モデル 平面図 1 : 25



14.25KN(1/4)  
 第5-1, 2, 3回実験 張力・変位 1 : 2.5  
 法隆寺 1/2 モデル 平面図 1 : 25



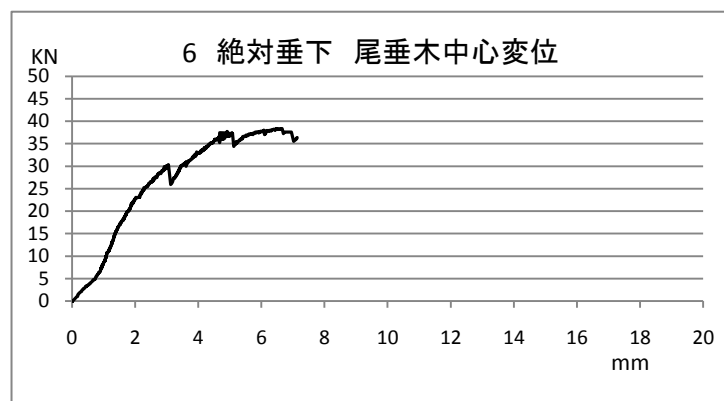
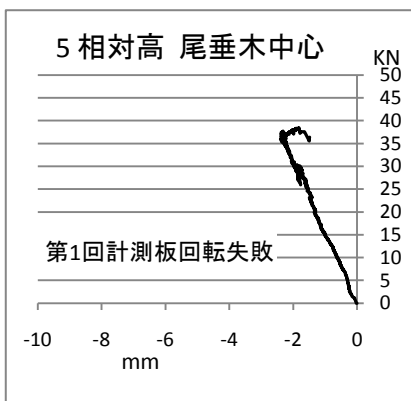
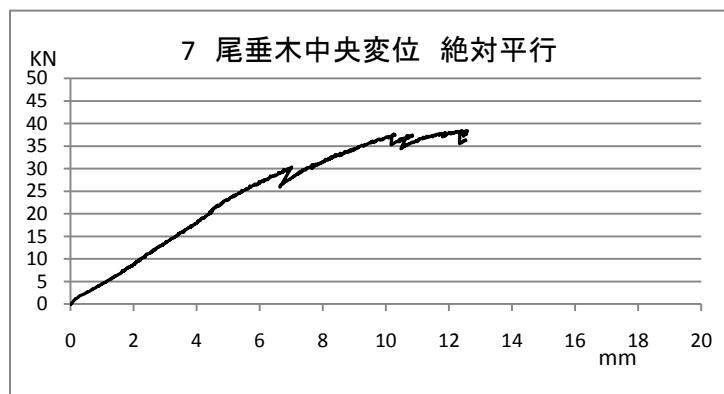
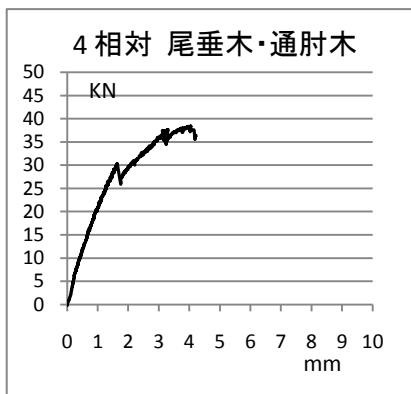
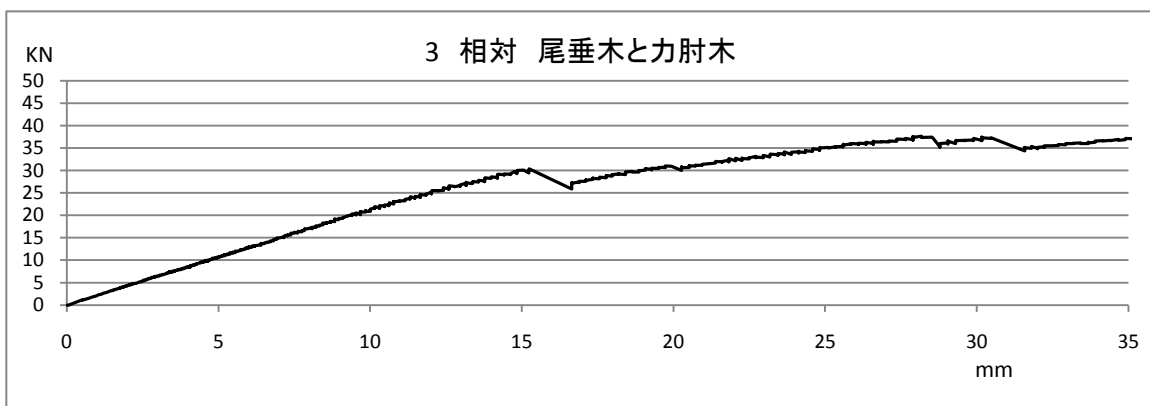
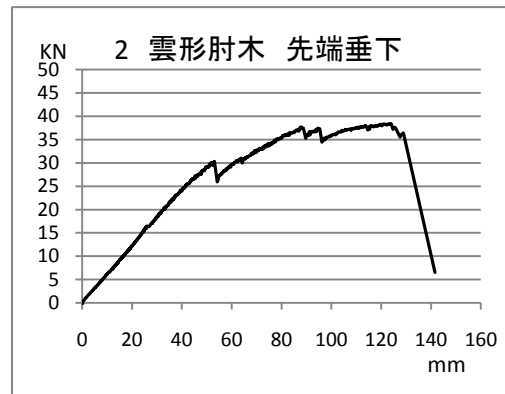
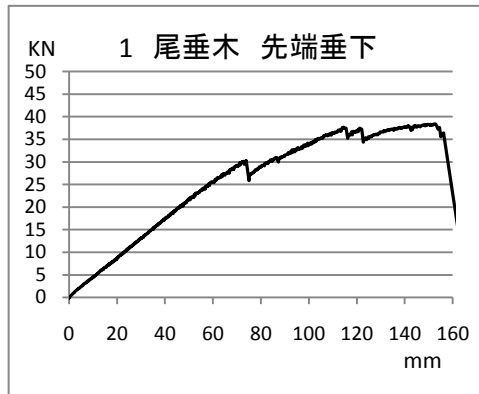
## 実験データ (2)

## 第 1 回実験データ

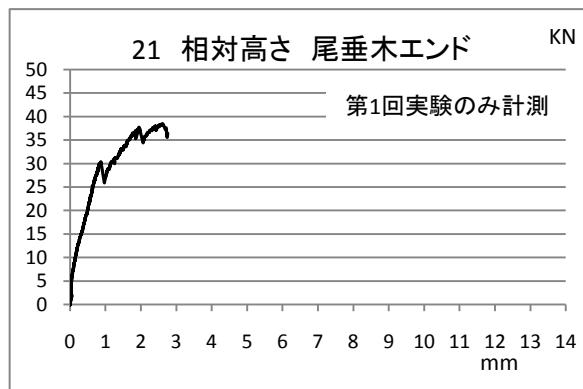
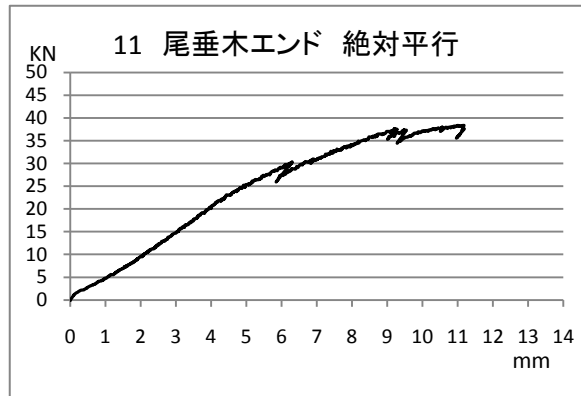
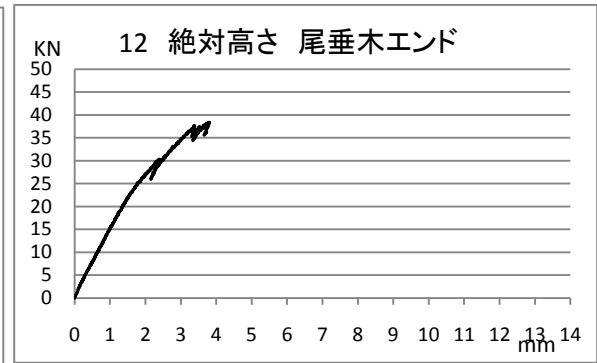
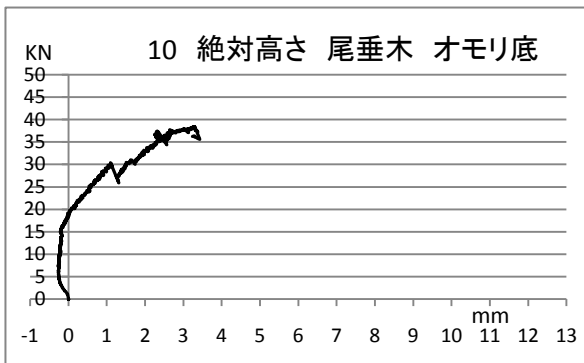
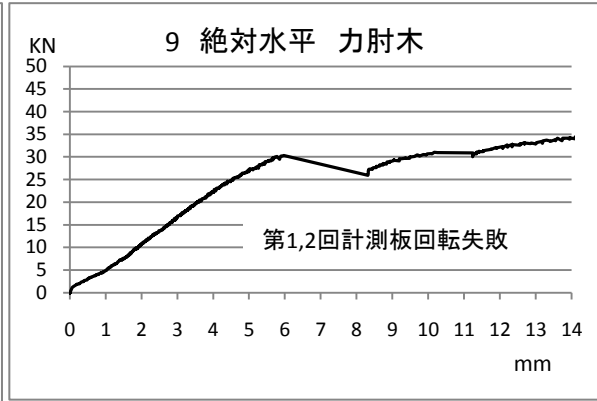
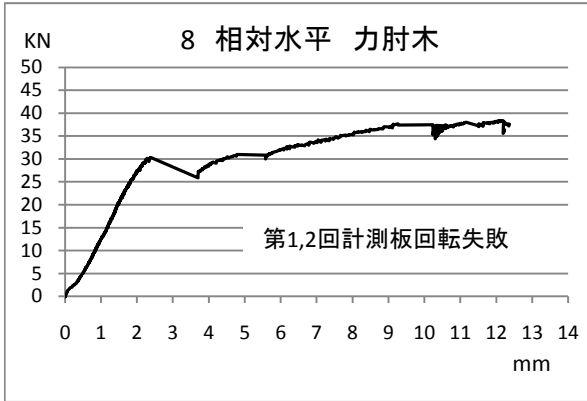
E1-1～E1-5



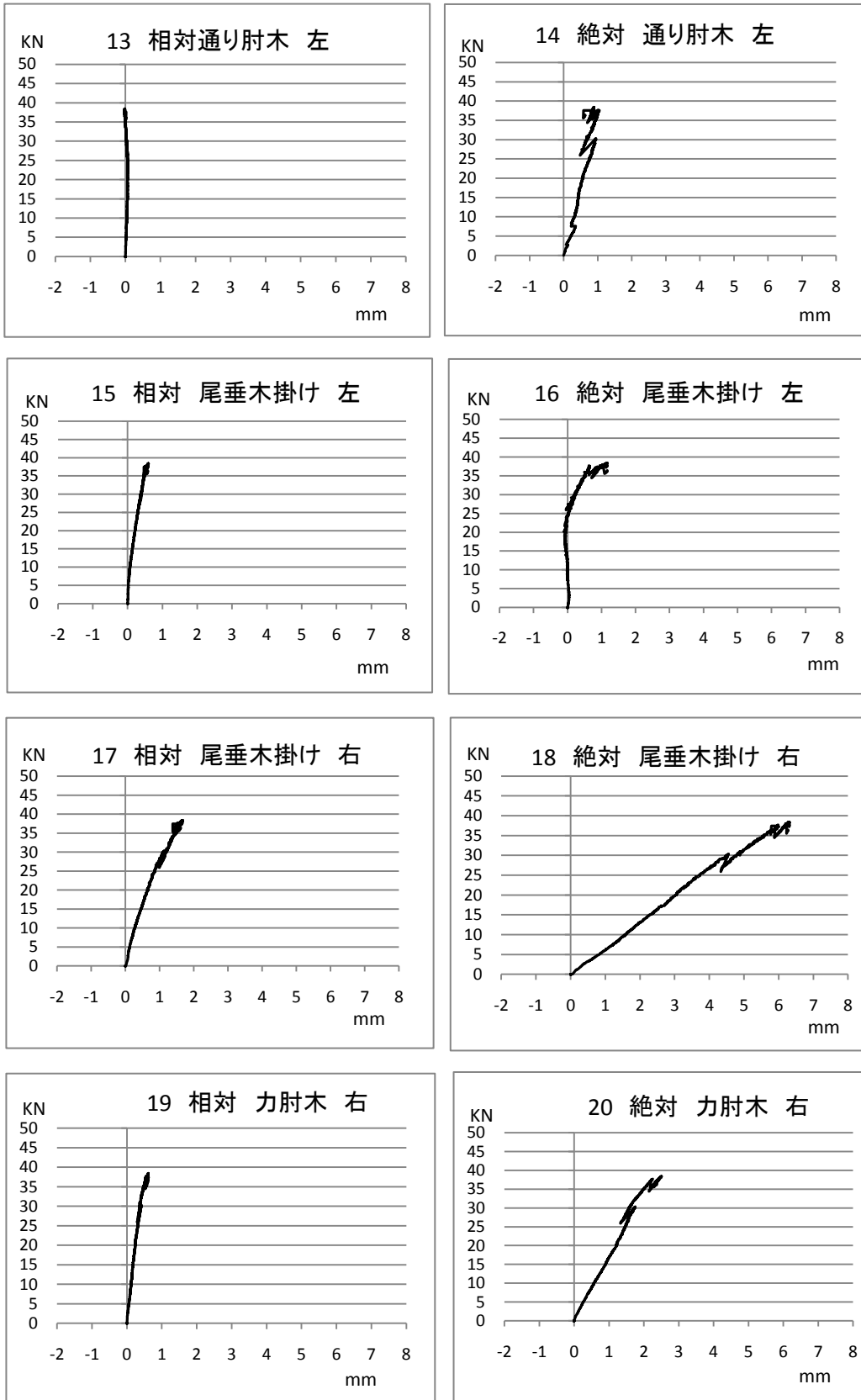
法隆寺 第1回実験(ダボなし) 測定点1~7 2008.04.19



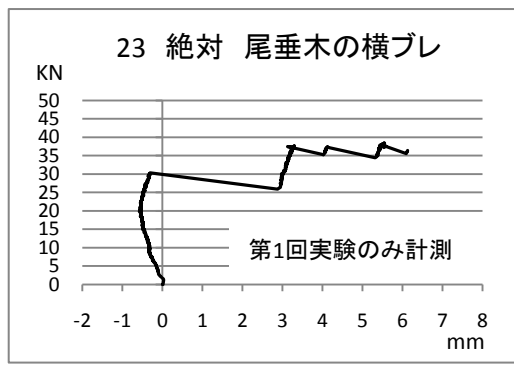
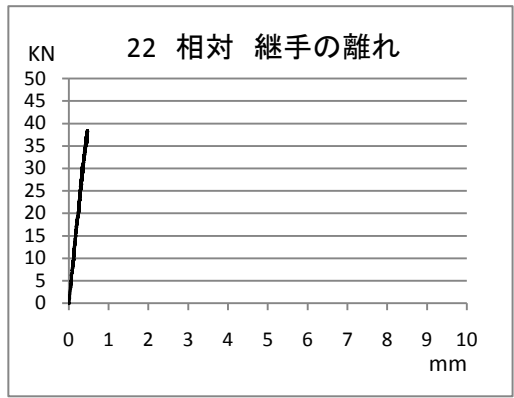
法隆寺 第1回実験(ダボなし) 測定点8~12,21 2008.04.19



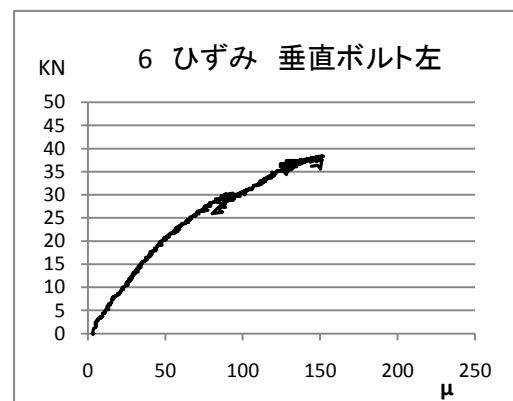
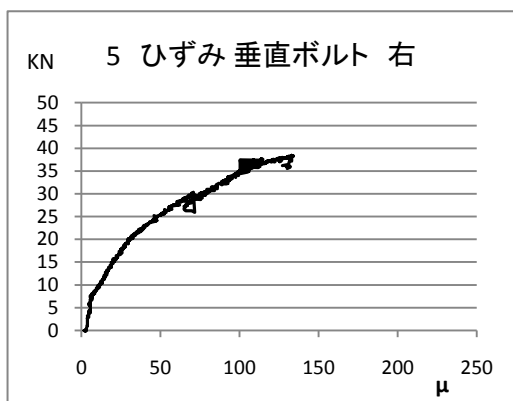
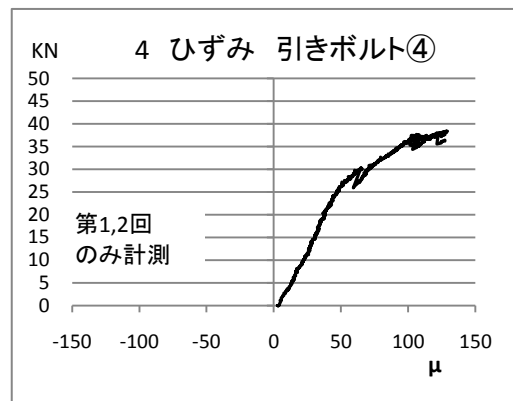
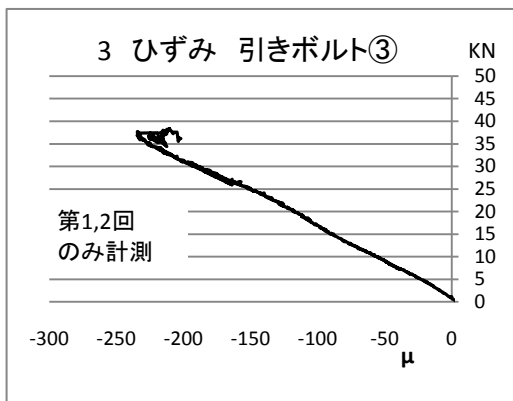
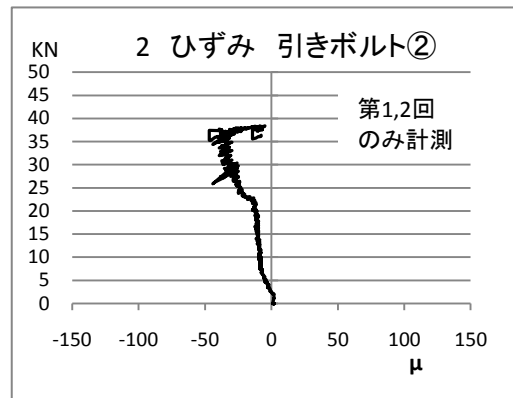
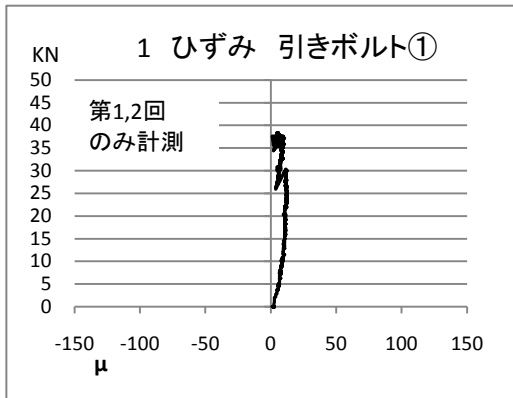
法隆寺 第1回実験(ダボなし) 測定点13~20 2008.04.19



法隆寺 第1回実験(ダボなし) 測定点22, 23 2008.04.19



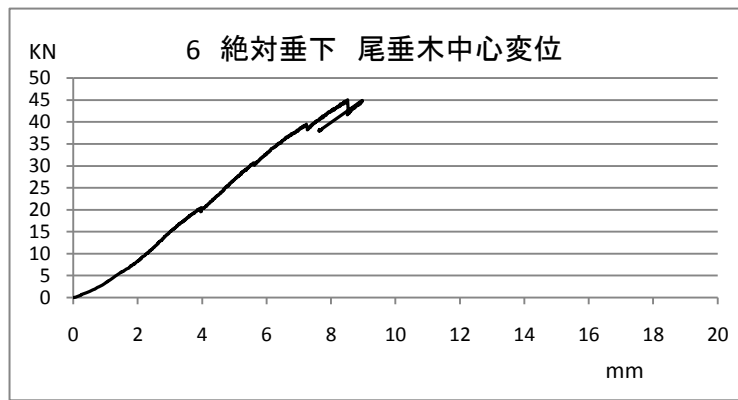
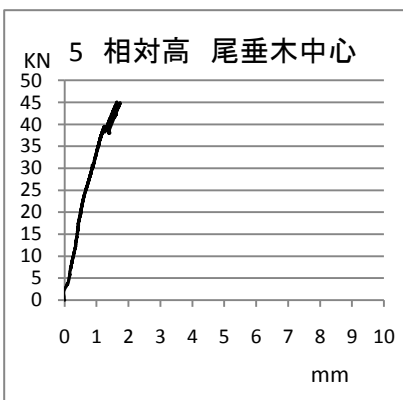
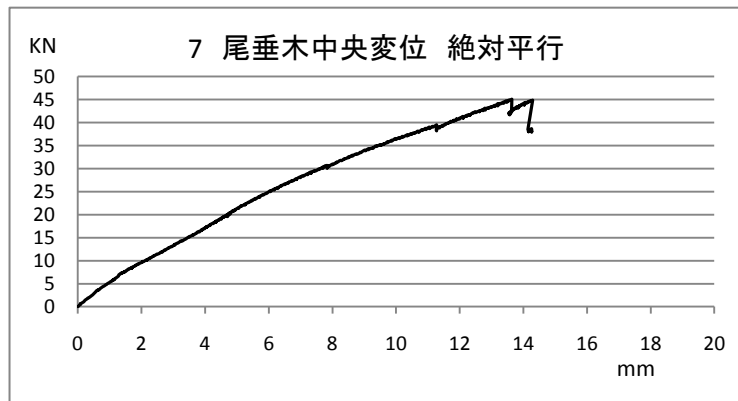
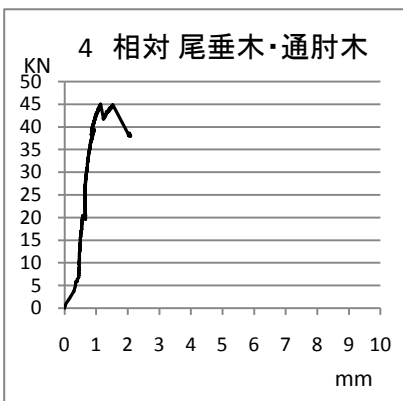
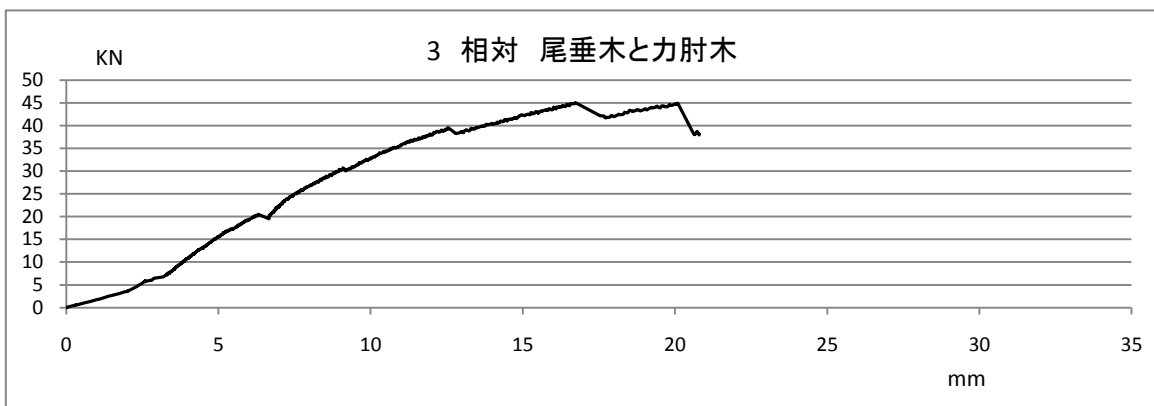
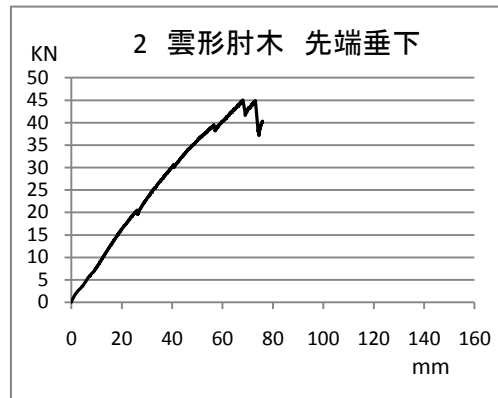
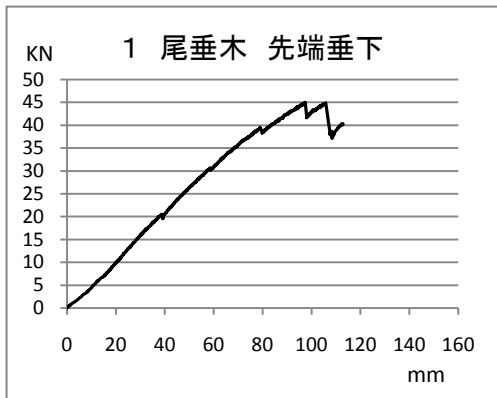
法隆寺 第1回実験(ダボなし) 歪1~6 2008.04.19



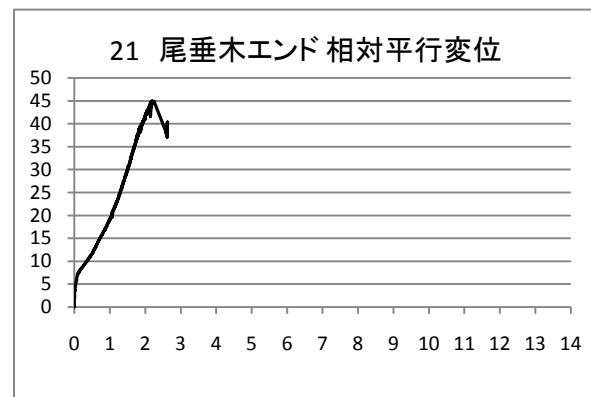
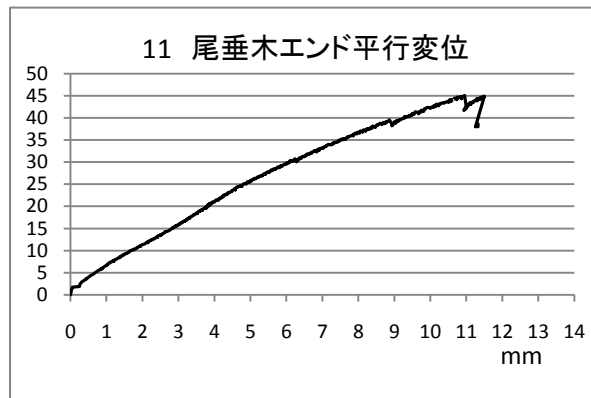
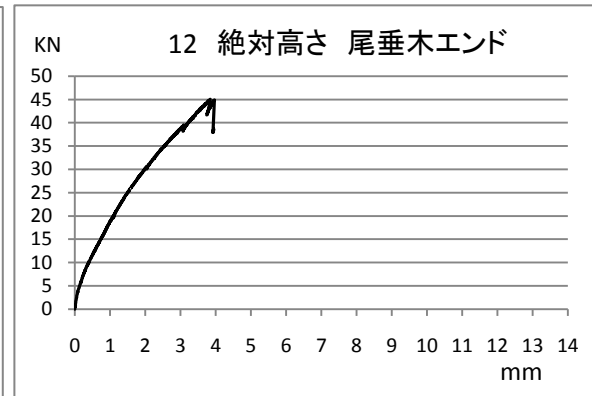
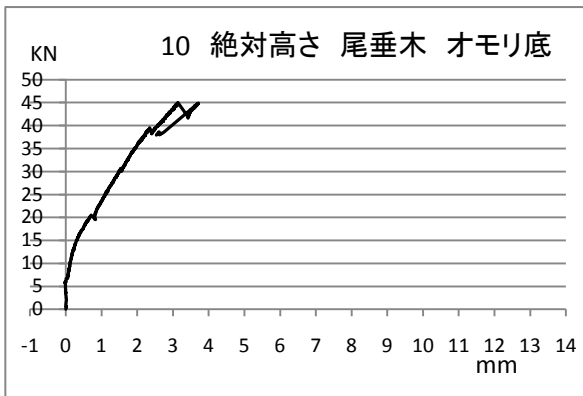
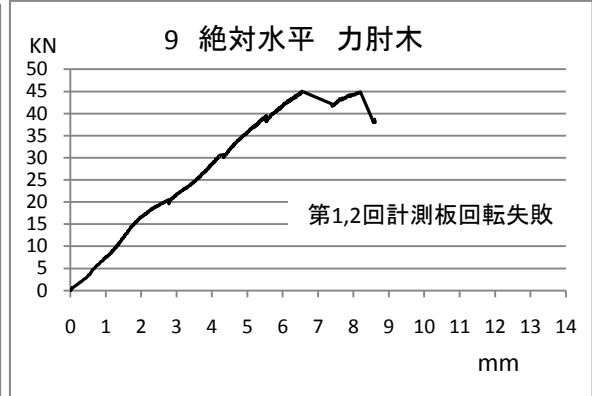
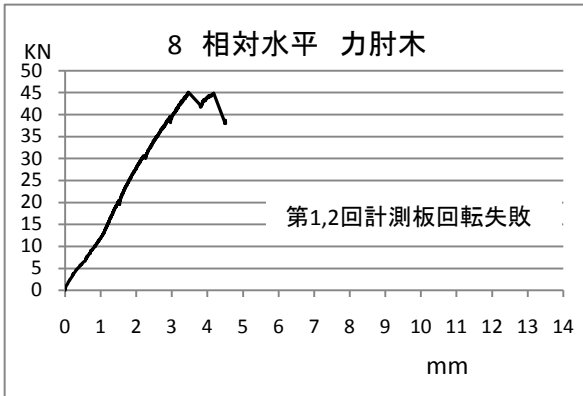
## 第 2 回実験データ

E2-1～E2-5

法隆寺 第2回実験(ダボあり) 測定点1~7 2008.04.24

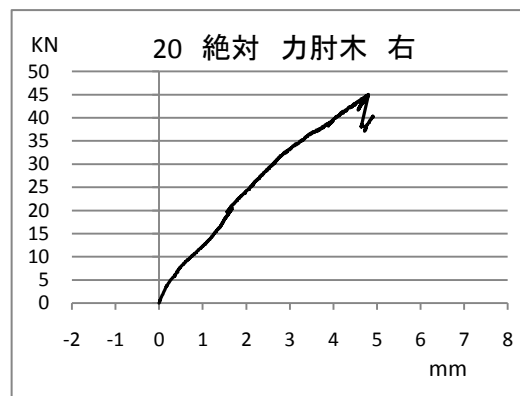
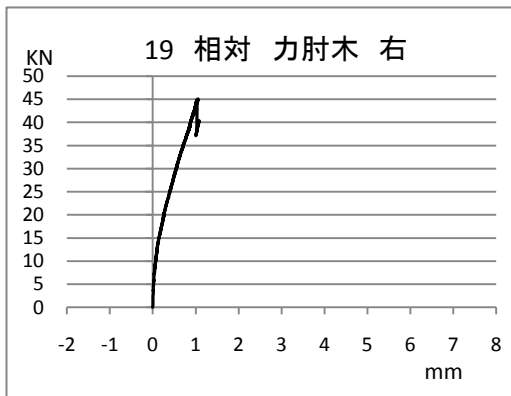
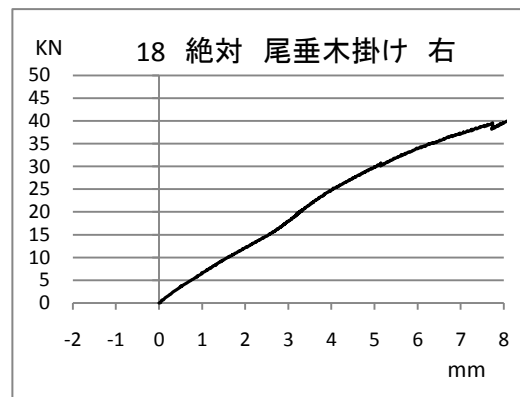
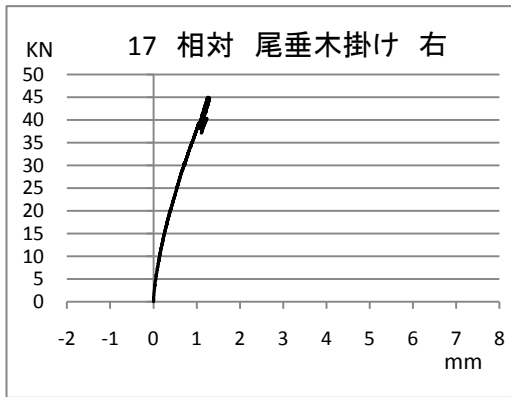
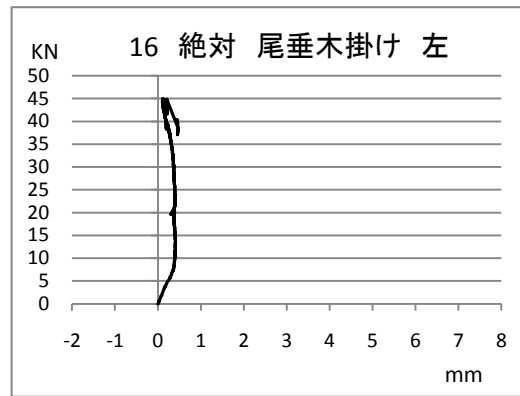
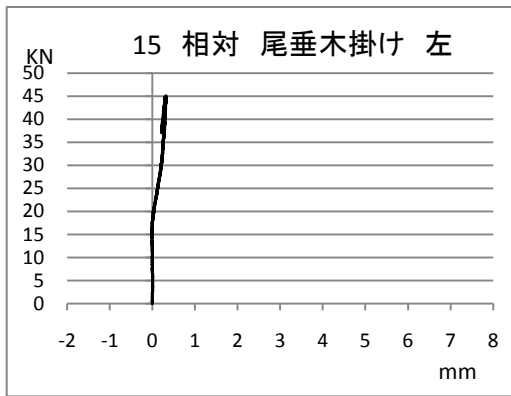
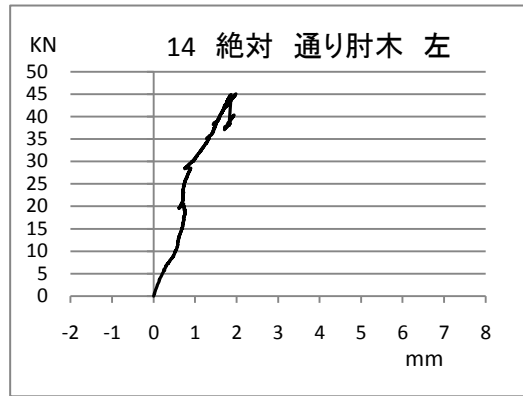
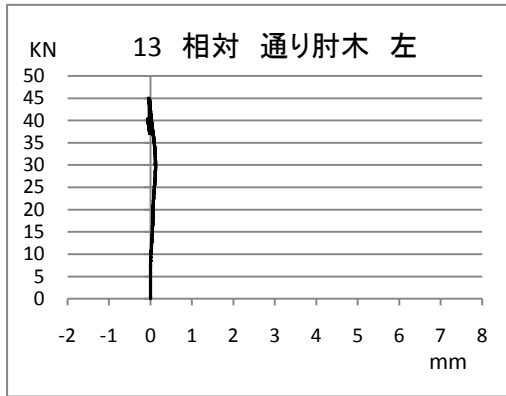


法隆寺 第2回実験(ダボあり) 測定点8~12,21 2008.04.24

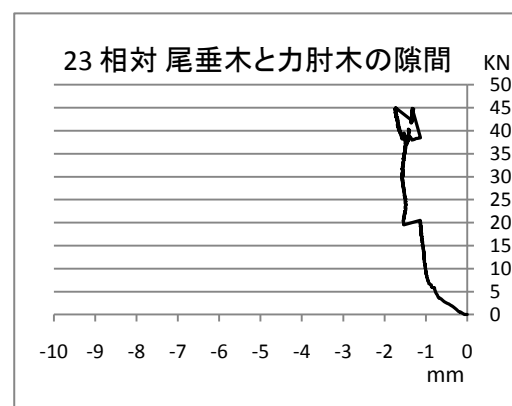
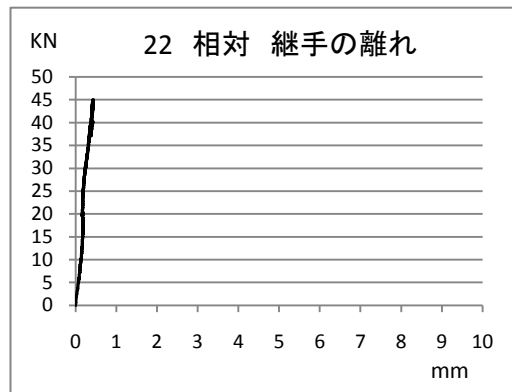




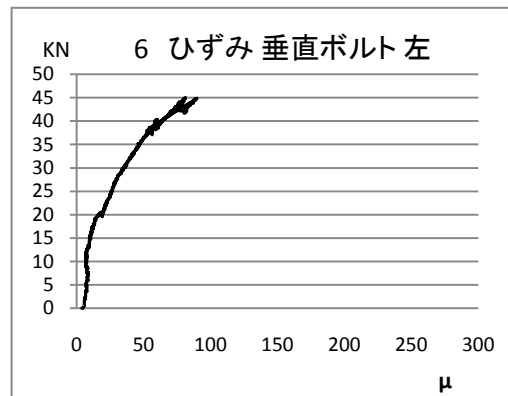
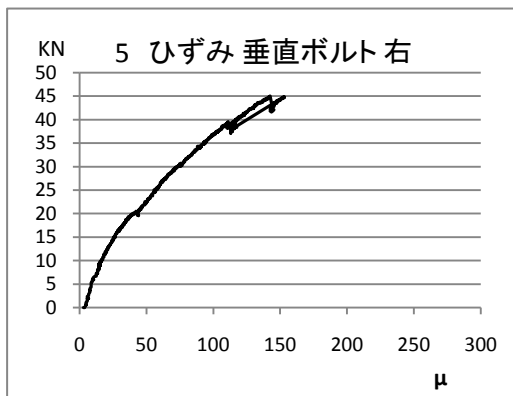
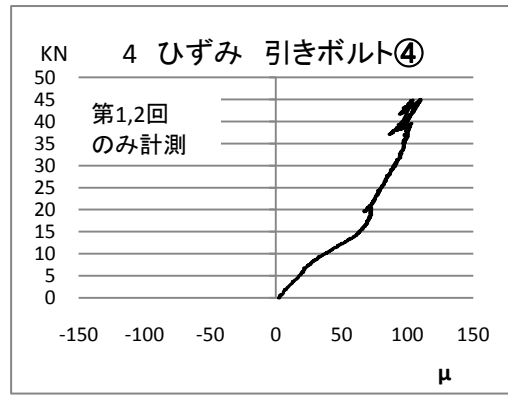
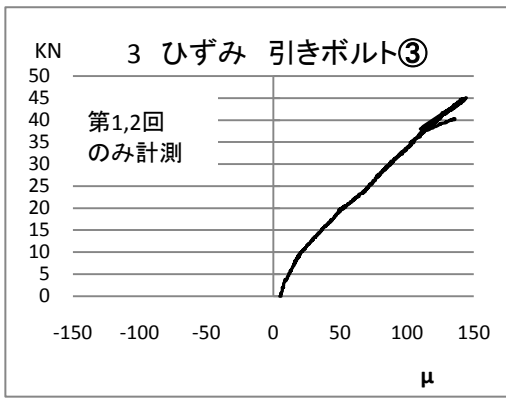
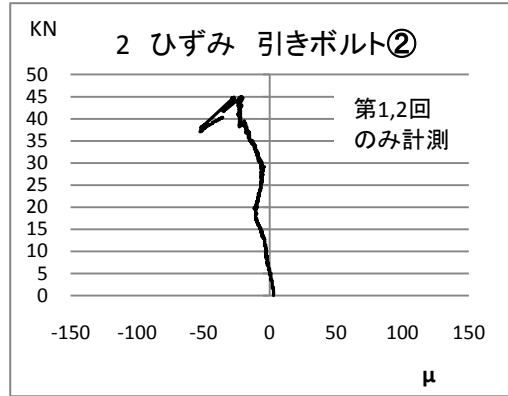
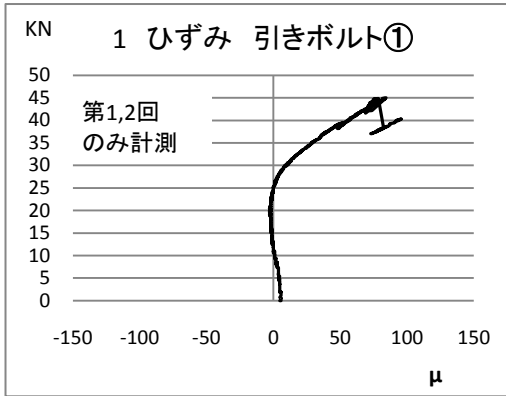
法隆寺 第2回実験(ダボあり) 測定点13~20 2008.04.24



法隆寺 第2回実験(ダボあり) 測定点22, 23 2008.04.24



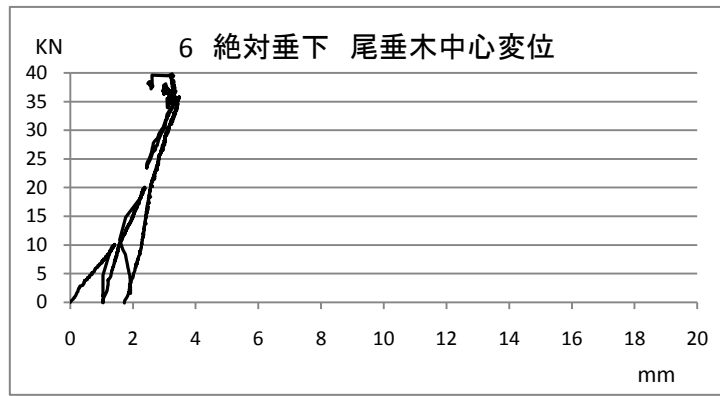
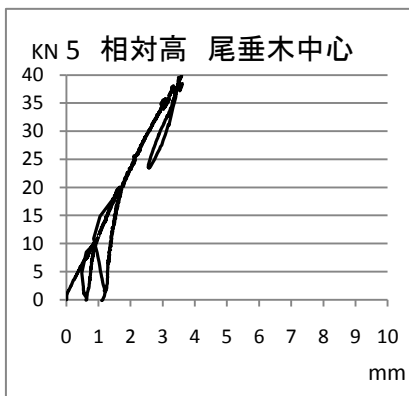
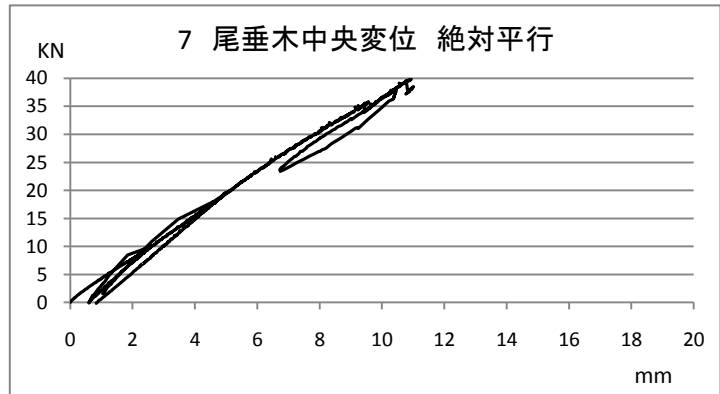
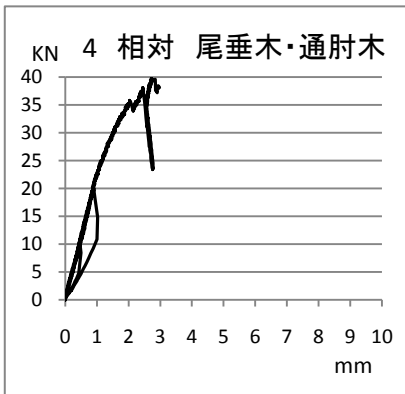
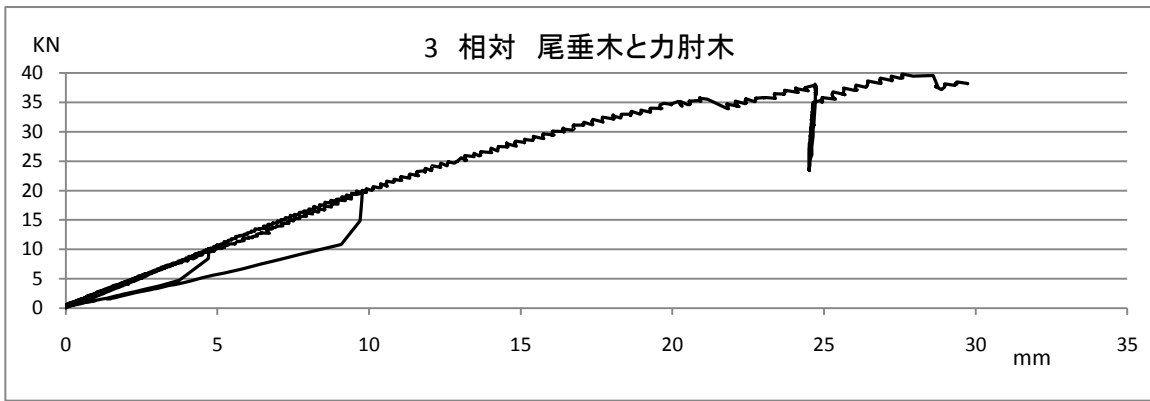
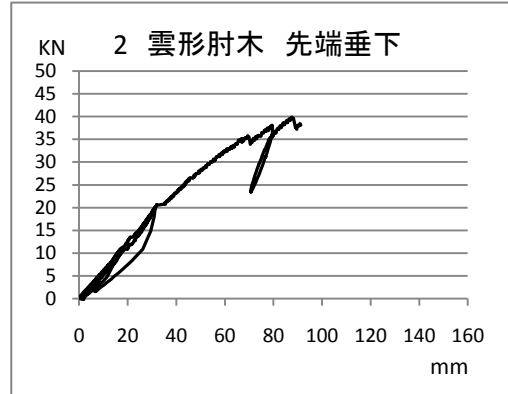
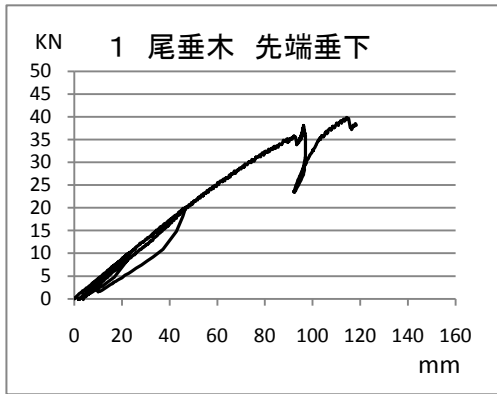
法隆寺 第2回実験(ダボあり) 歪1~6 2008.04.24



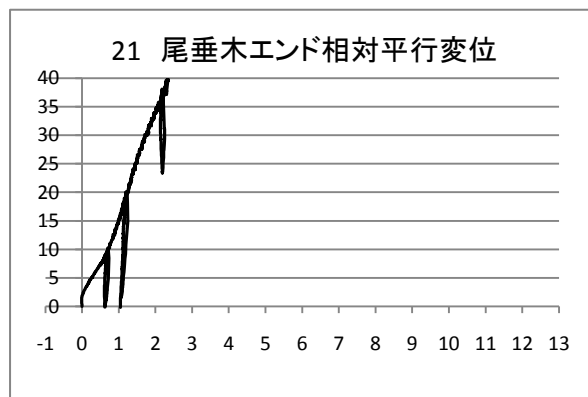
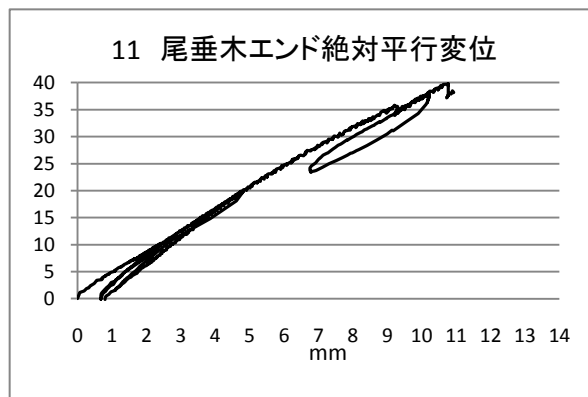
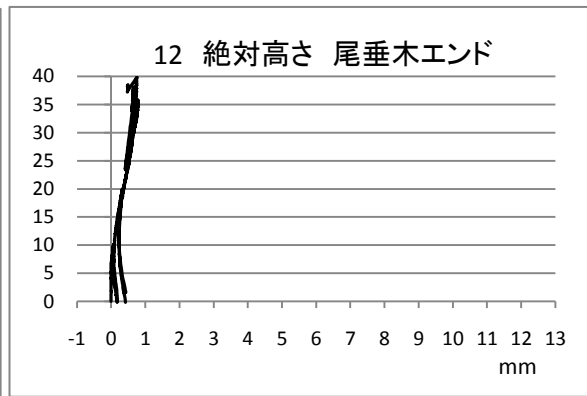
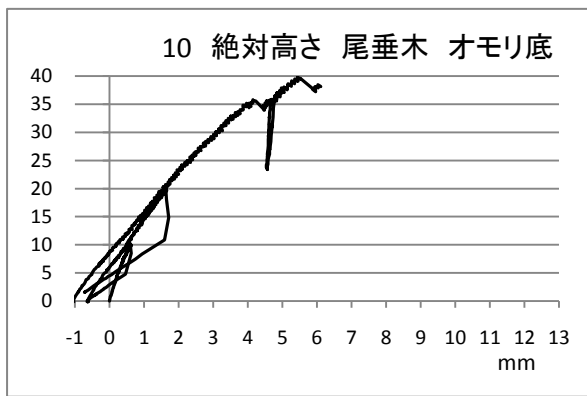
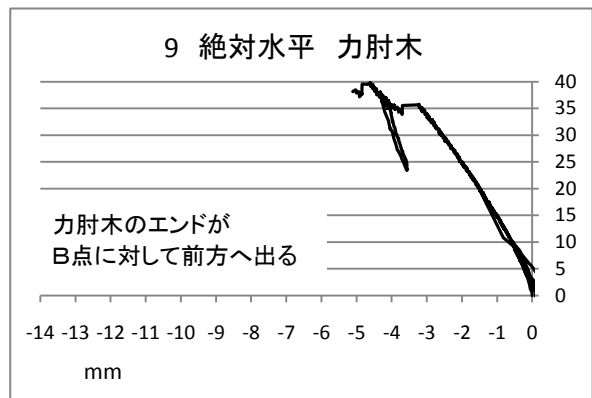
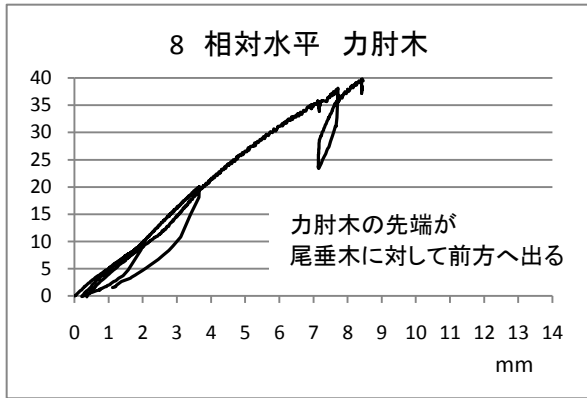
## 第3回実験データ

E3-1 ~ E3-5

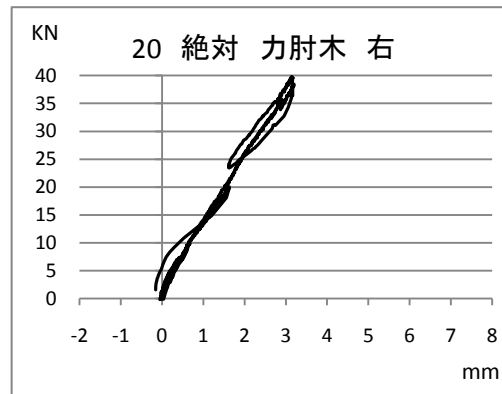
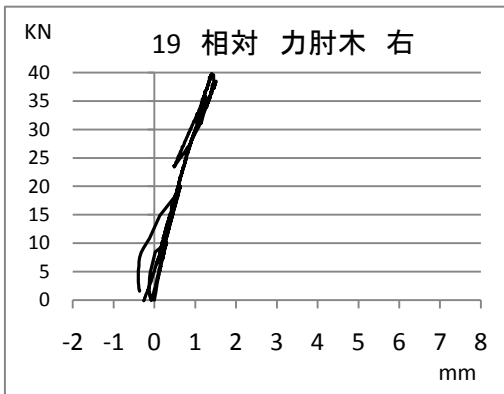
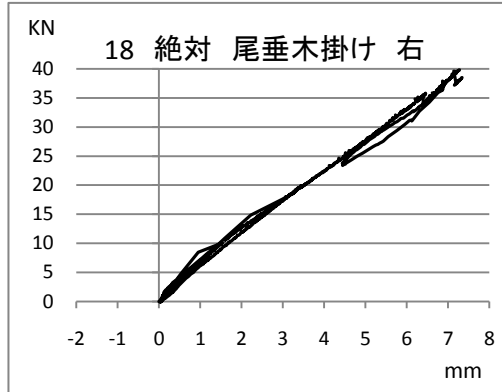
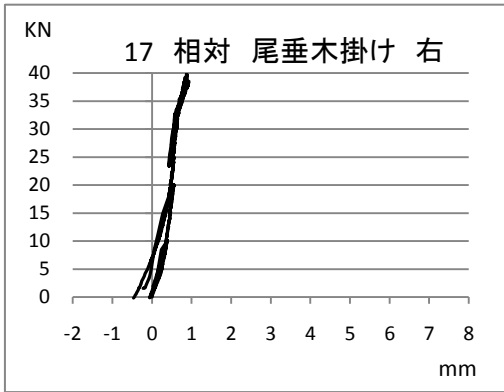
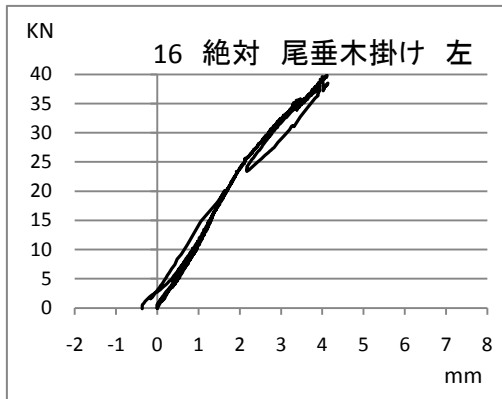
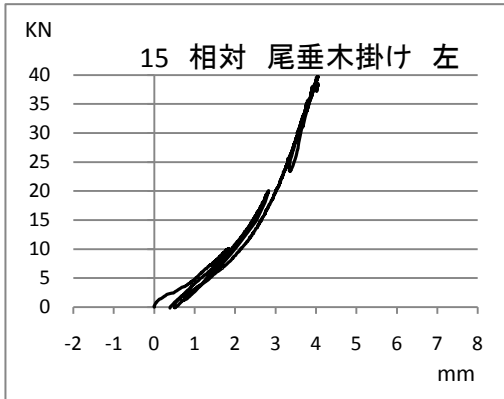
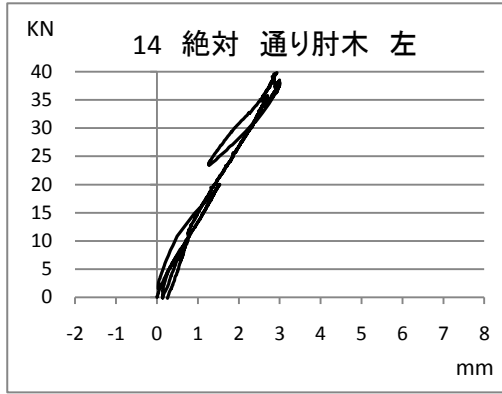
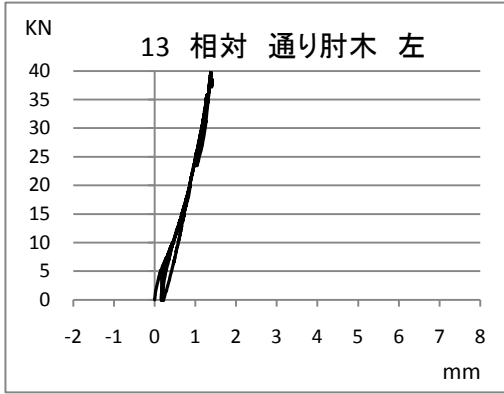
法隆寺 第3回実験(ダボなし) 測定点1~7 2008.07.15



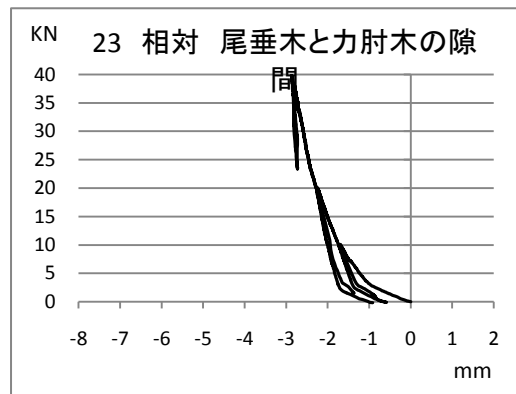
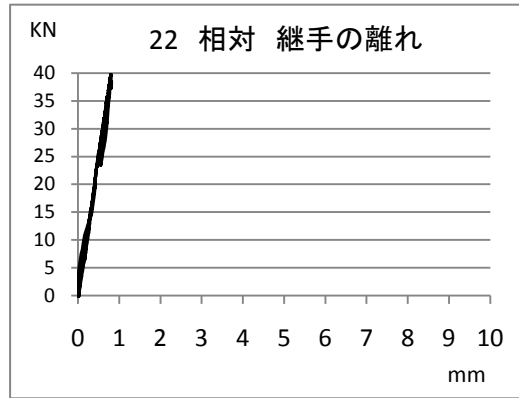
法隆寺 第3回実験(ダボなし) 測定点8~12,21 2008.07.15



法隆寺 第3回実験(ダボなし) 測定点13~20 2008.07.15

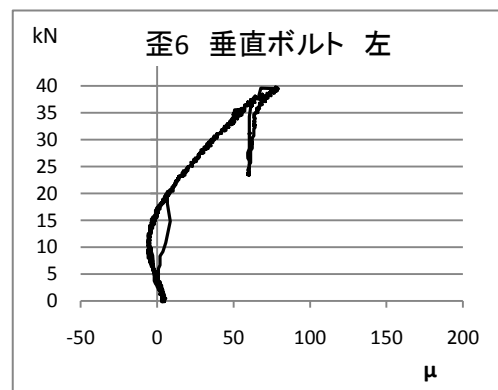
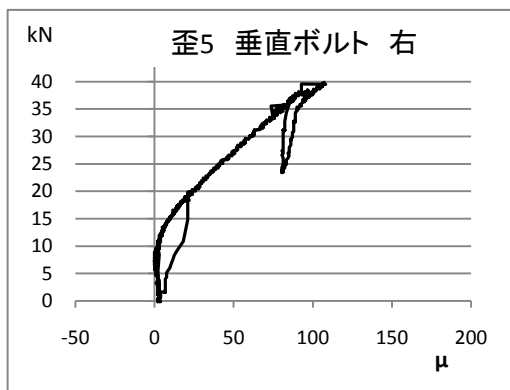
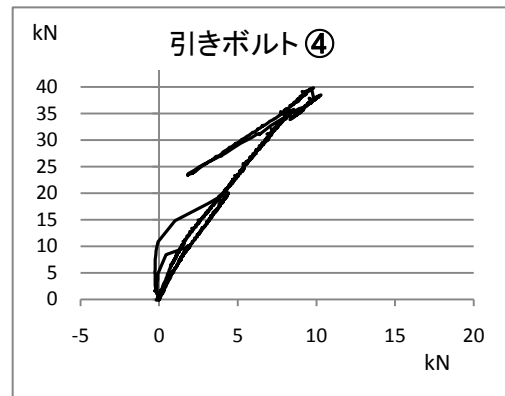
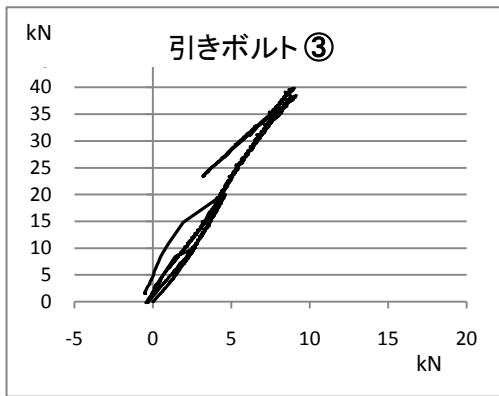
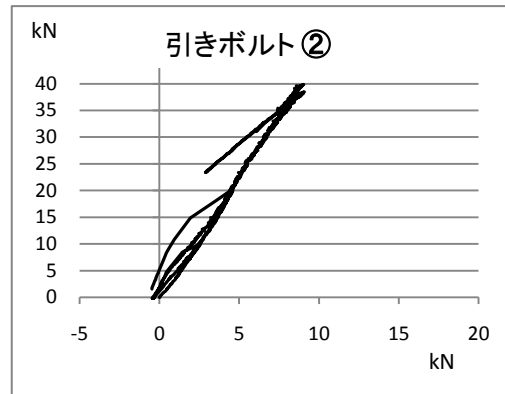
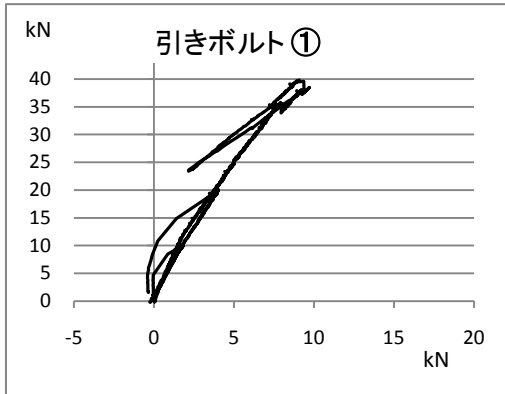


法隆寺 第3回実験(ダボあり) 測定点22, 23 2008.07.15





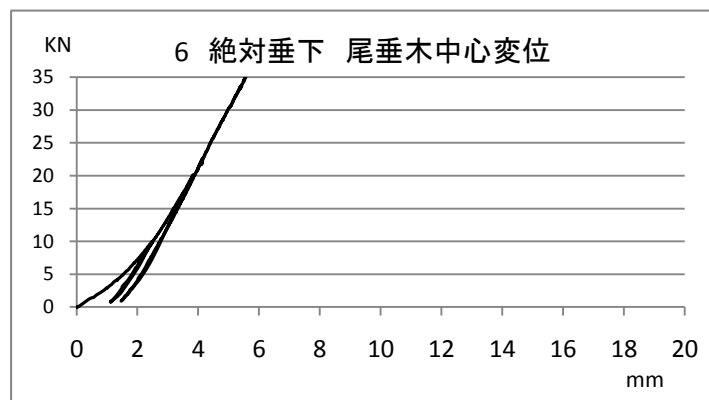
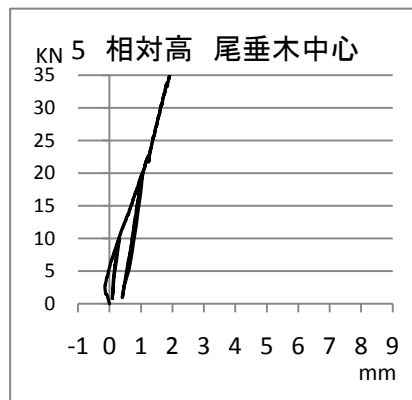
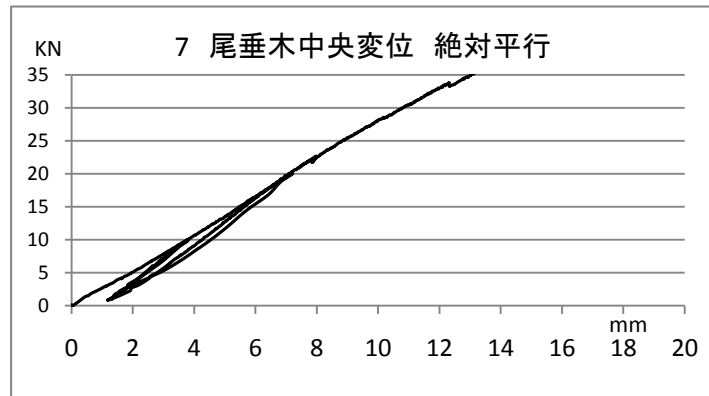
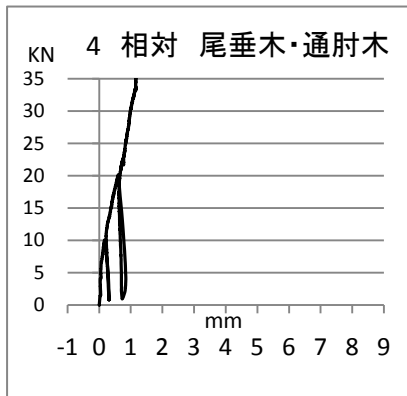
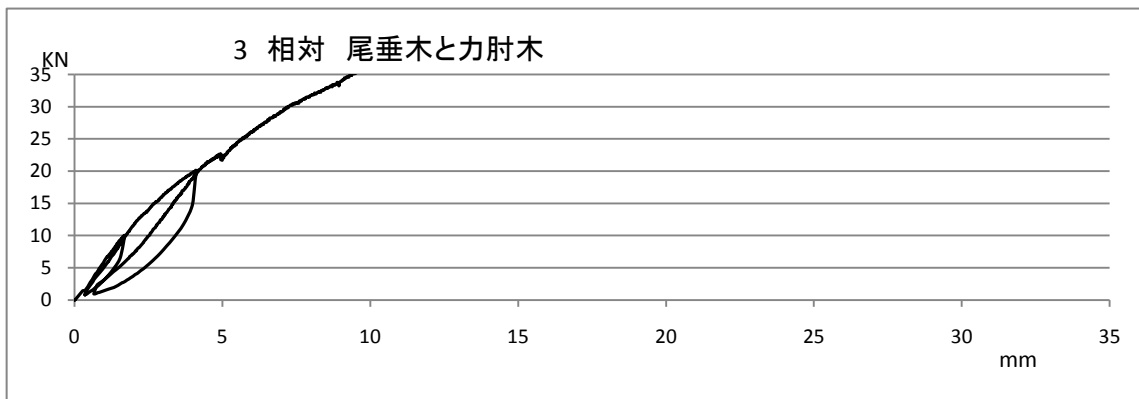
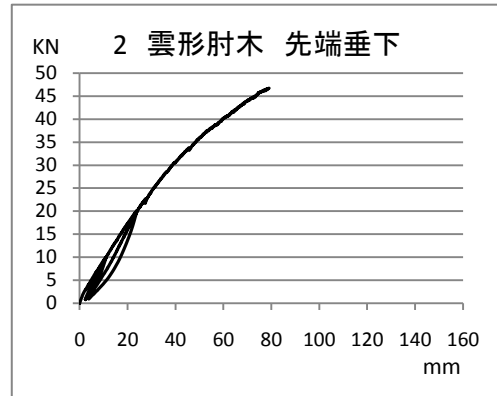
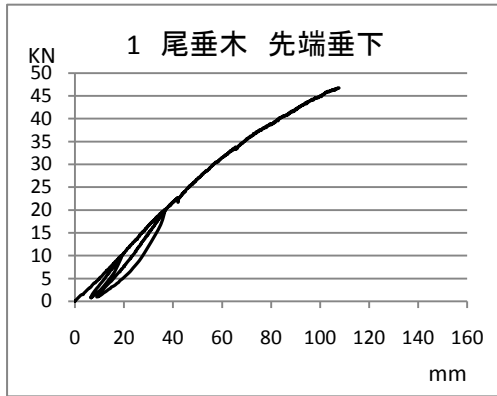
法隆寺 第3回実験(ダボなし) 歪1~6 2008.07.15



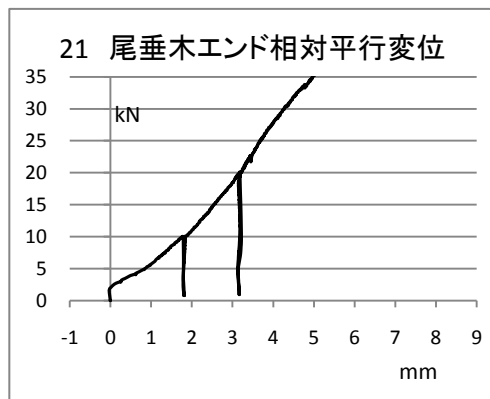
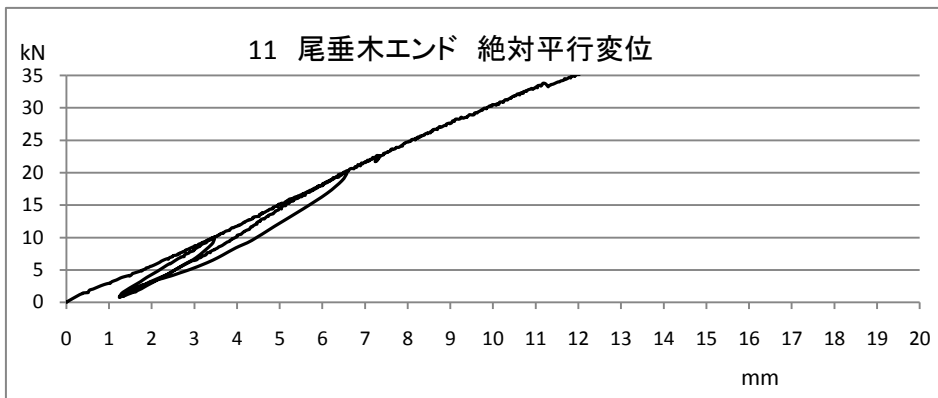
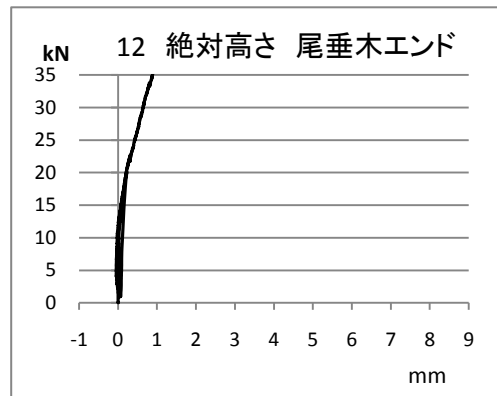
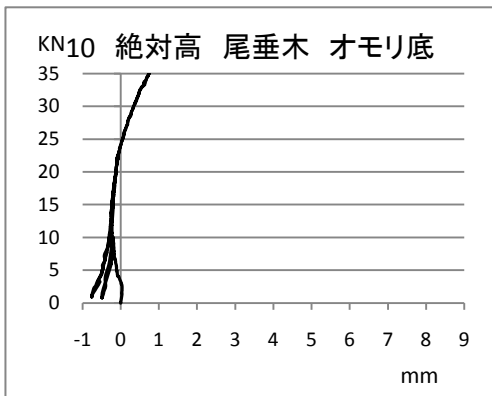
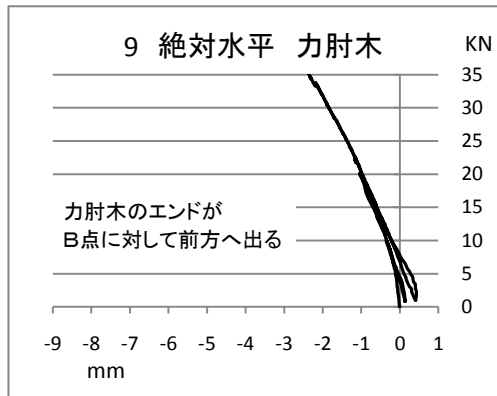
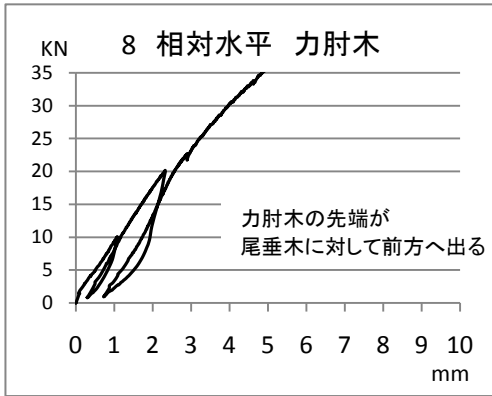
## 第 4 回実験データ

E4-1～E4-7

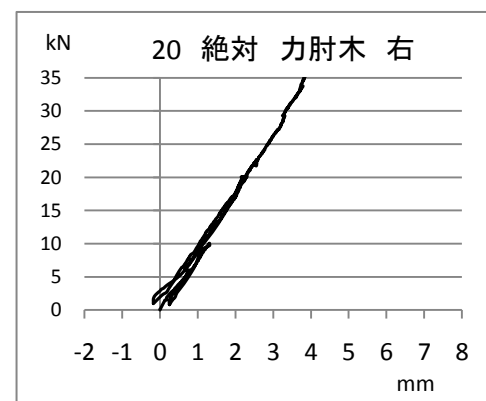
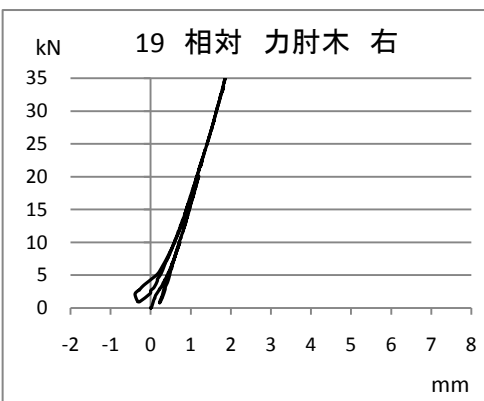
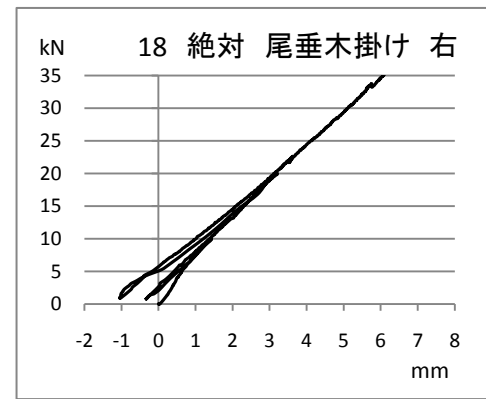
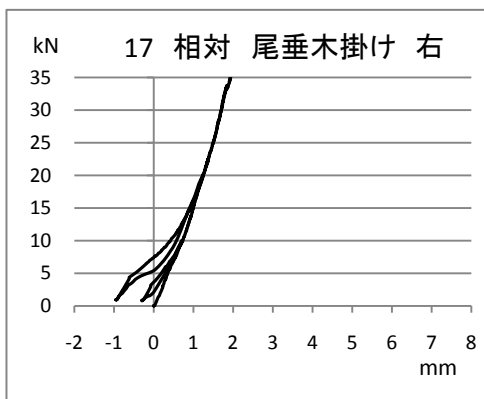
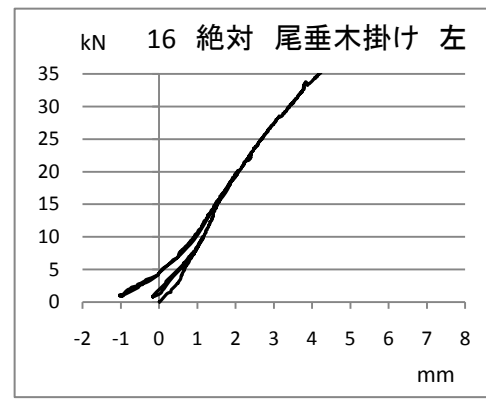
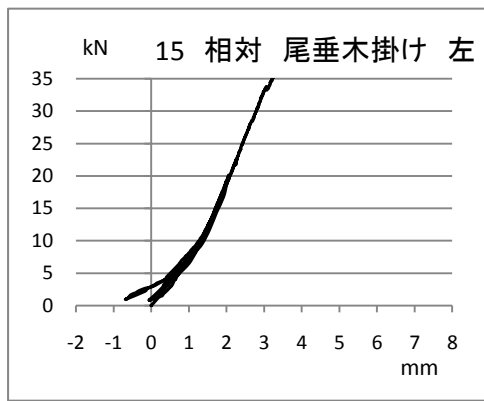
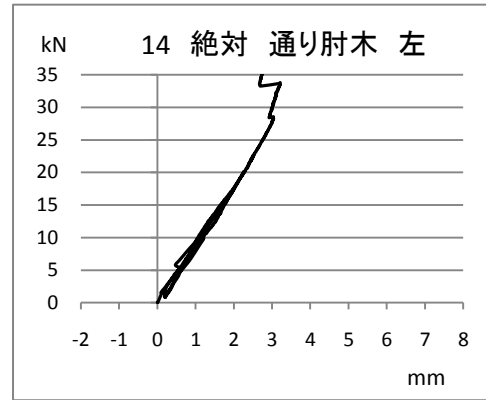
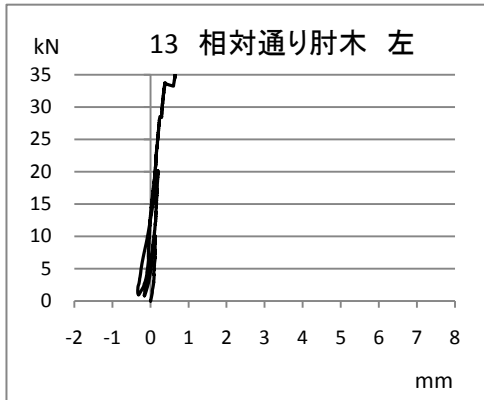
法隆寺 第4回実験(ダボあり) 測定点1~7 2008.07.25



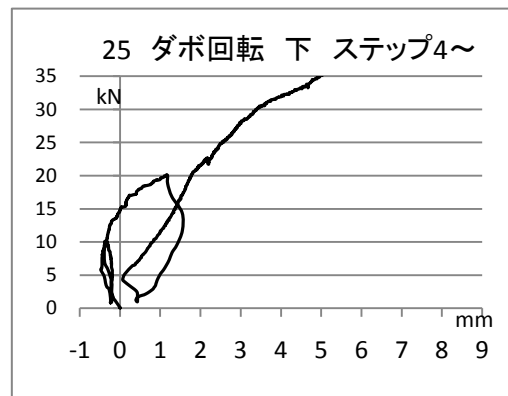
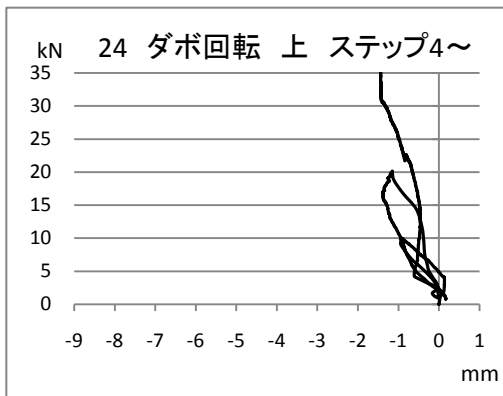
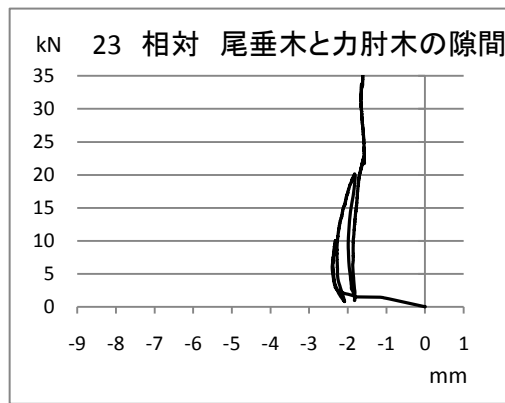
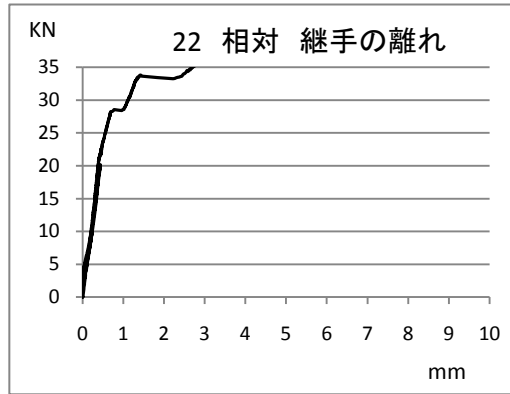
法隆寺 第4回実験(ダボあり) 測定点8~12,21 2008.07.25



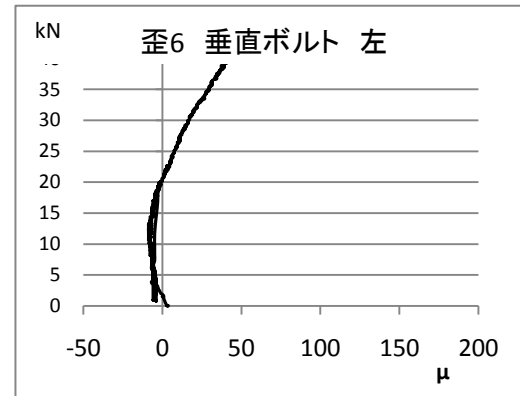
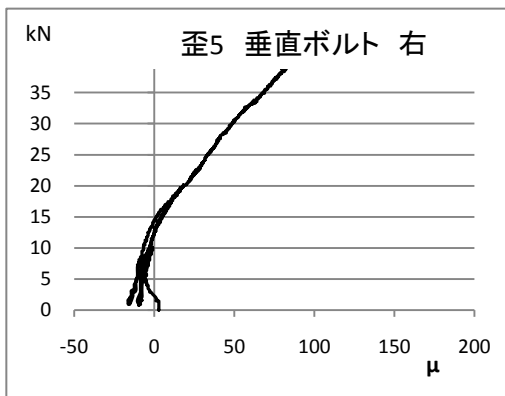
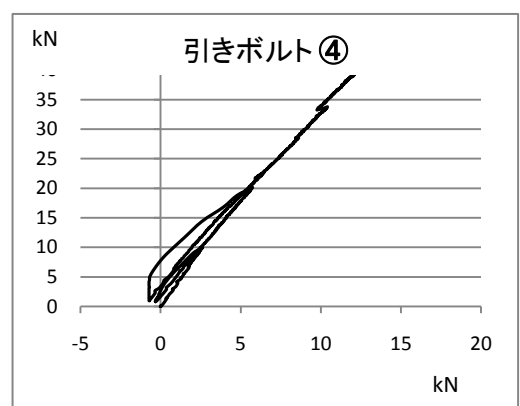
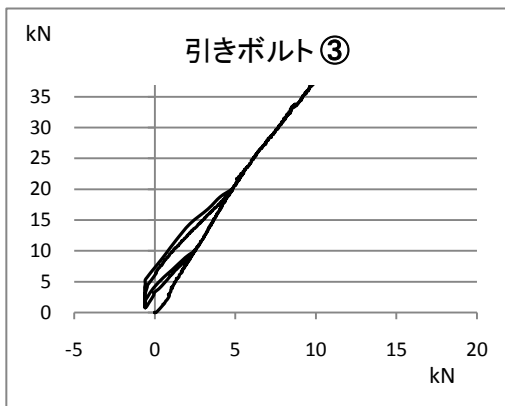
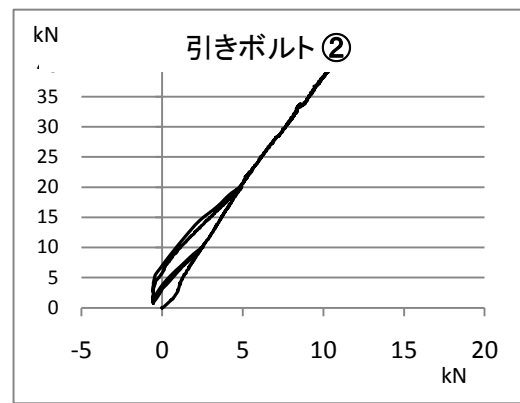
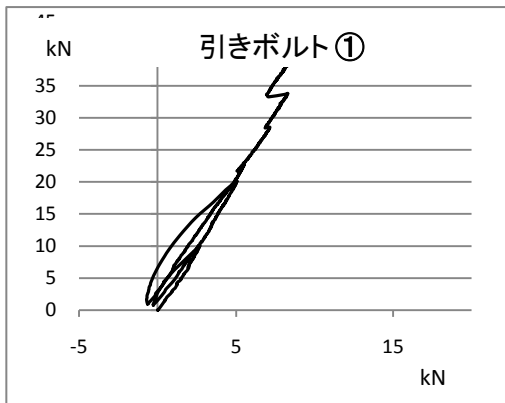
法隆寺 第4回実験(ダボあり) 測定点13~20 2008.07.25



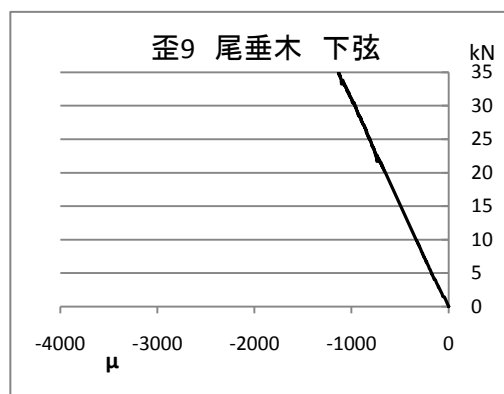
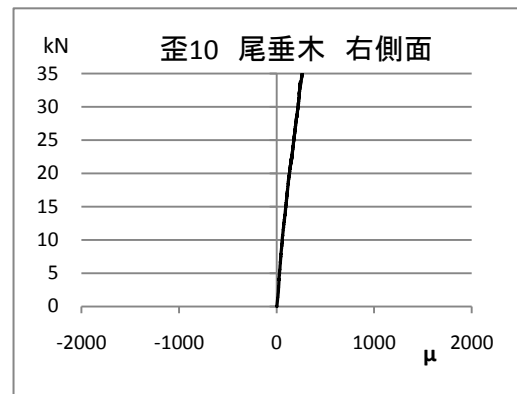
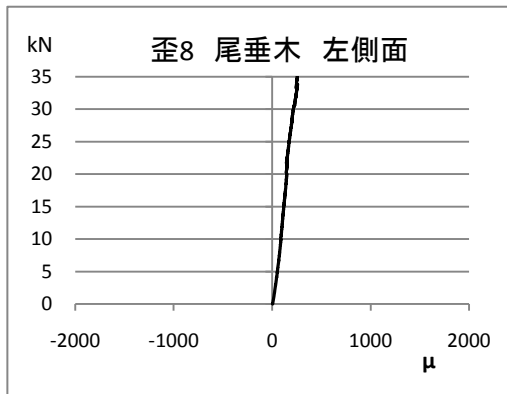
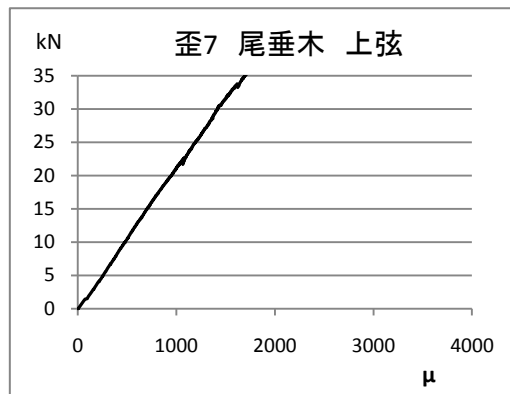
法隆寺 第4回実験(ダボあり) 測定点22, 23 2008.07.25



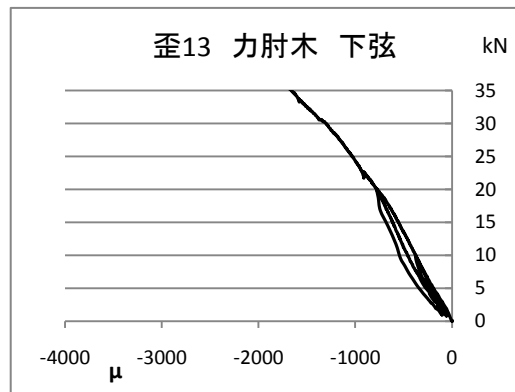
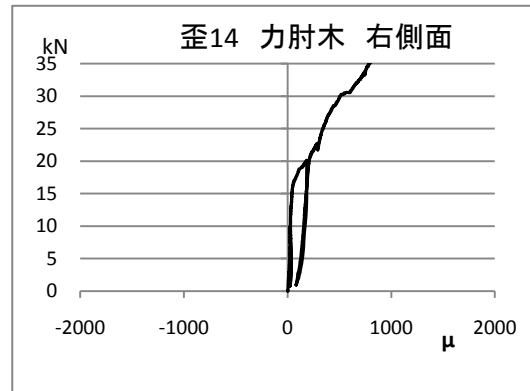
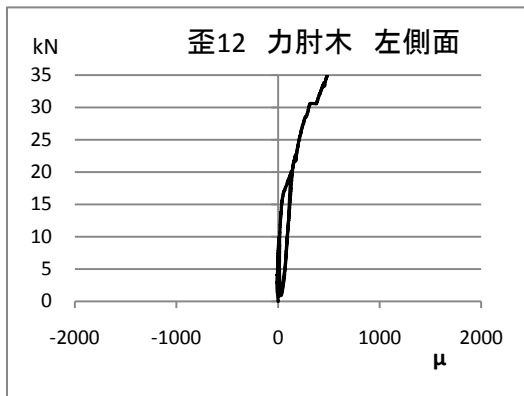
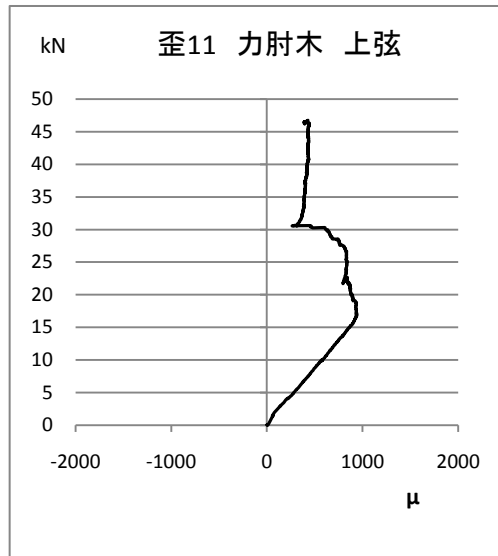
法隆寺 第4回実験(ダボあり) 歪1~6 2008.07.25



法隆寺 第4回実験(ダボあり) 歪7~10 尾垂木(柱心より270mm下がり) 2008.7.25







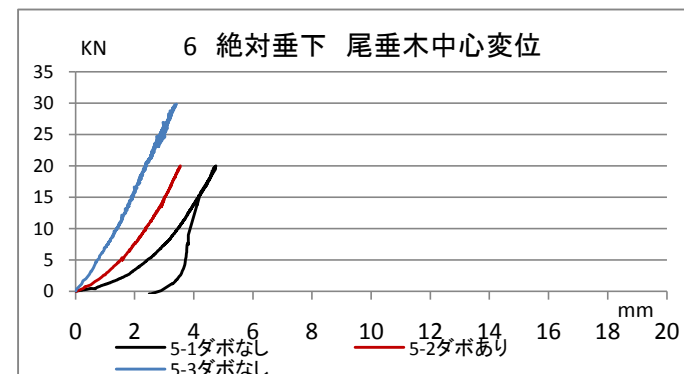
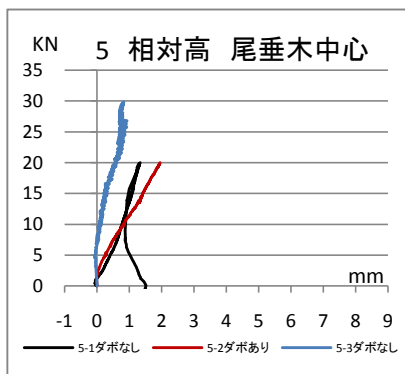
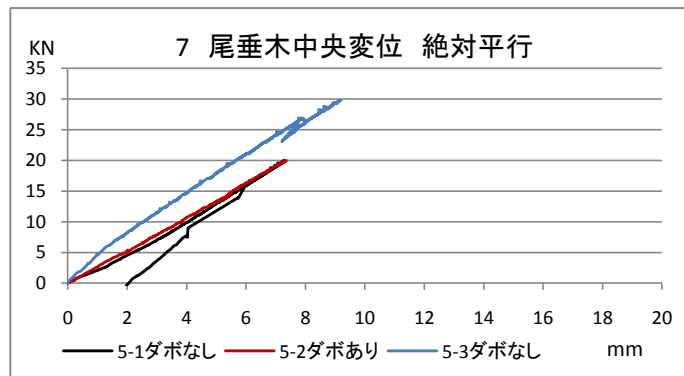
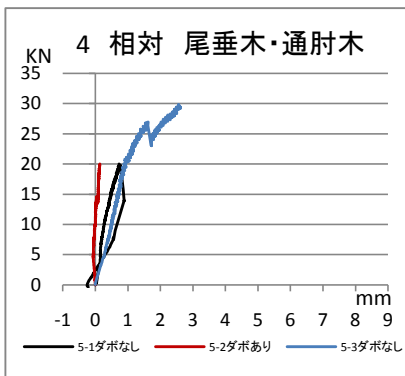
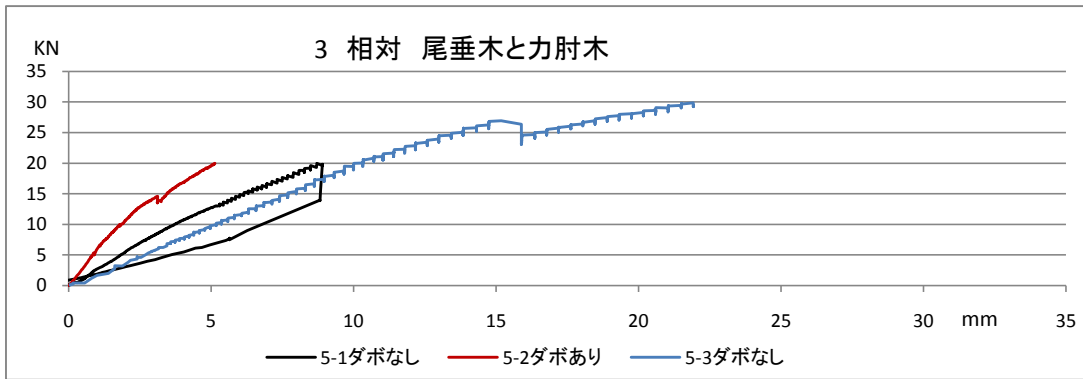
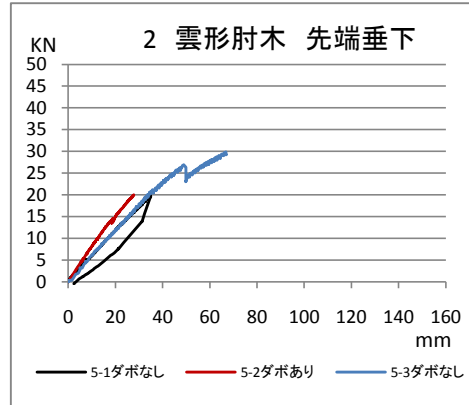
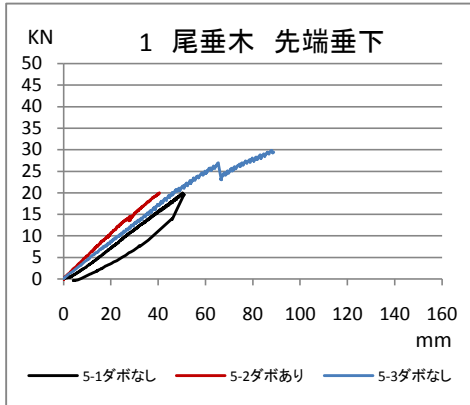
## 第 5 回実験データ

E5-1～E5-9

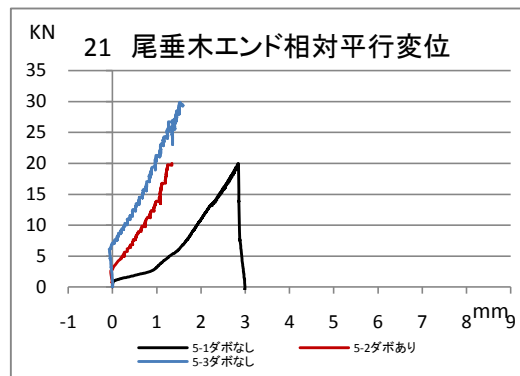
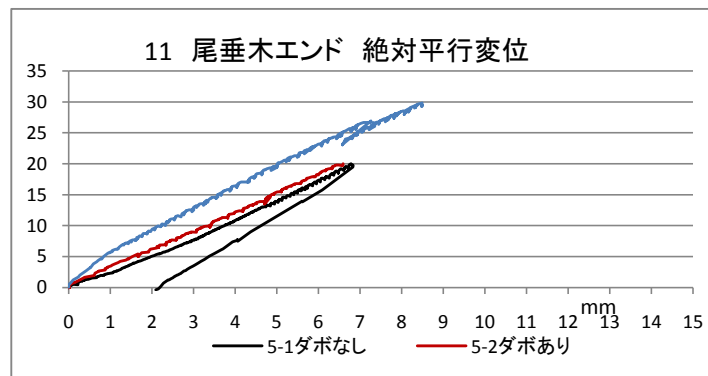
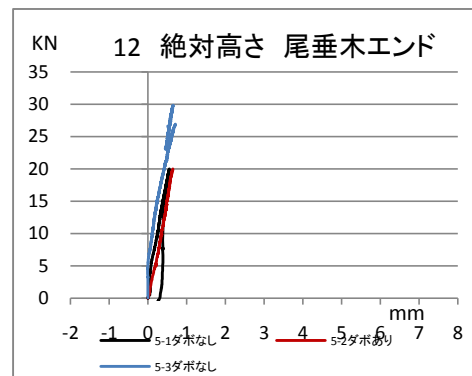
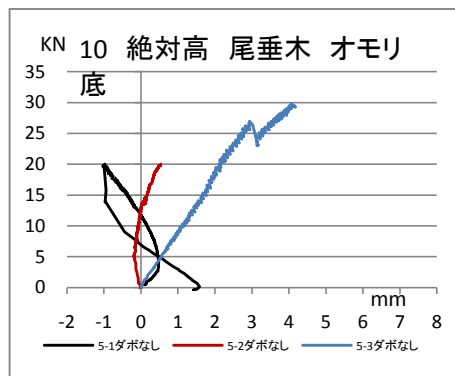
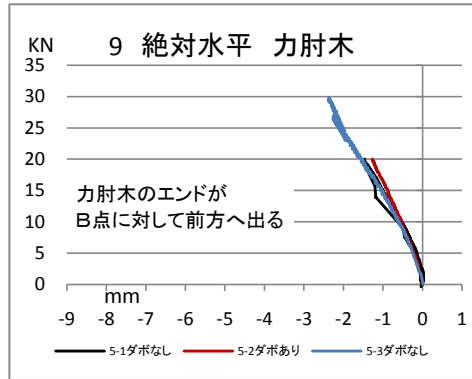
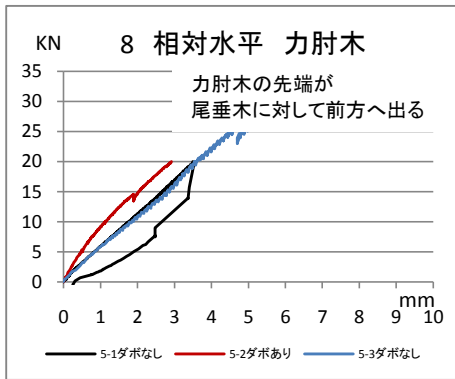
法隆寺 第5-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点1~7 2008.08.28

第5-2回実験(ダボあり20KNまで) 測定点1~7 2008.09.02

第5-3回実験(ダボなし終局まで) 測定点1~7 2008.09.02



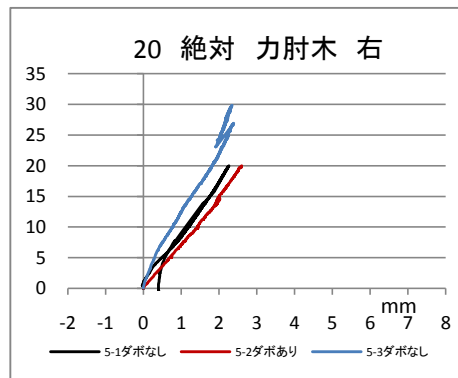
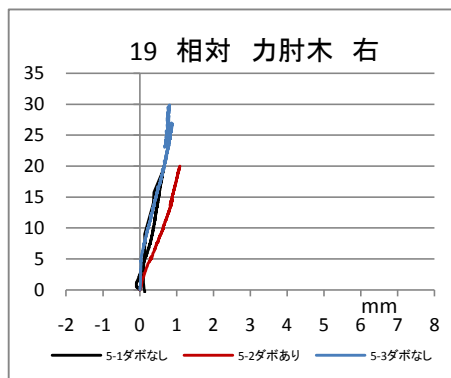
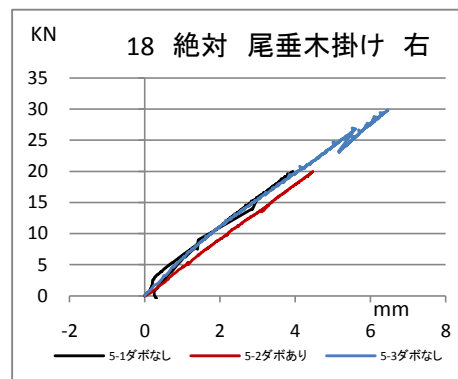
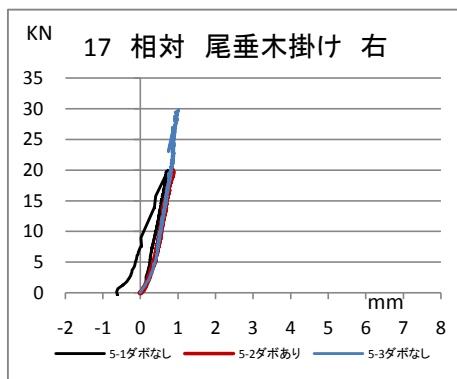
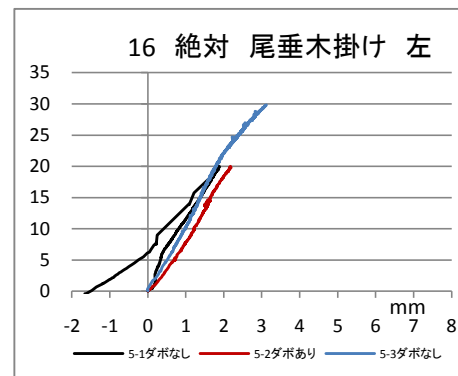
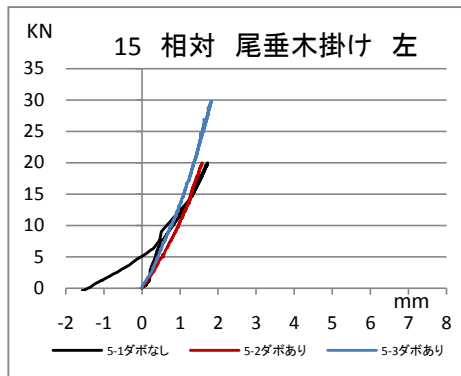
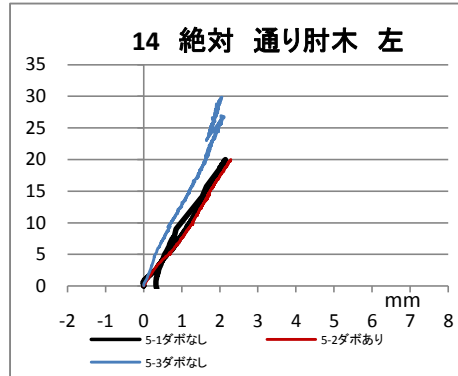
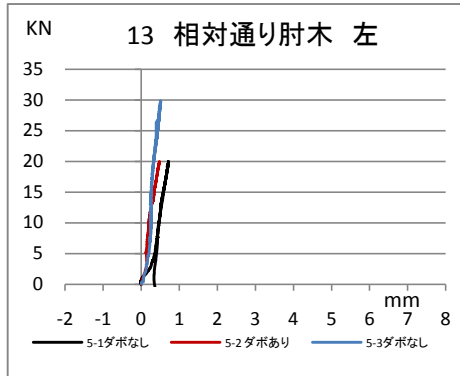
法隆寺 第5-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点8~12,21 2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり20KNまで) 測定点8~12,21 2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし終局まで) 測定点8~12,21 2008.09.02



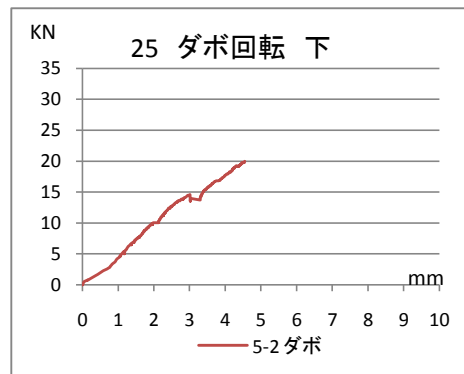
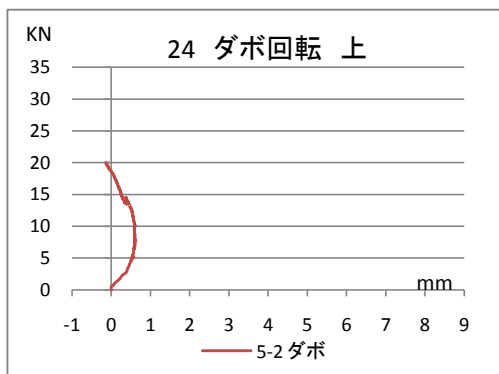
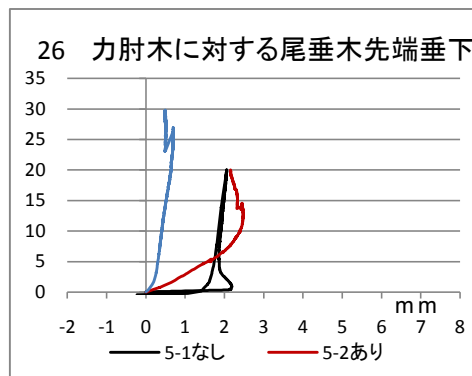
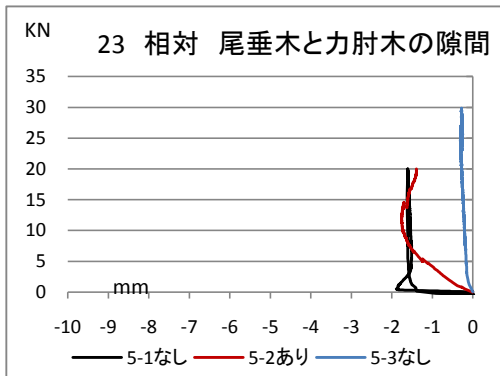
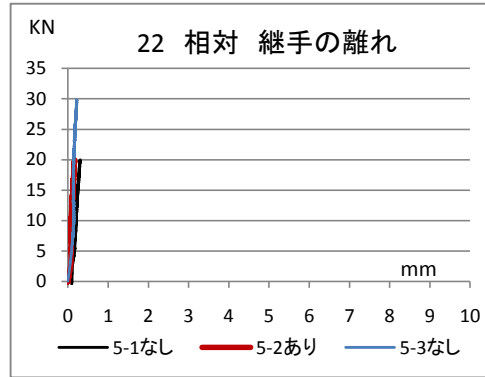
法隆寺 第5-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点13~20 2008.08.28

第5-2回実験(ダボあり20KNまで) 測定点13~20 2008.09.02

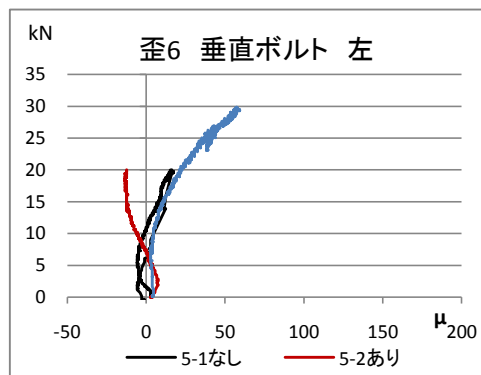
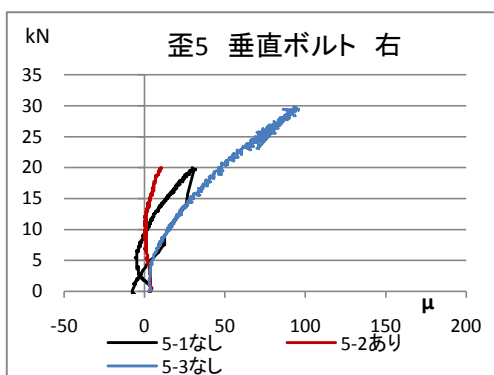
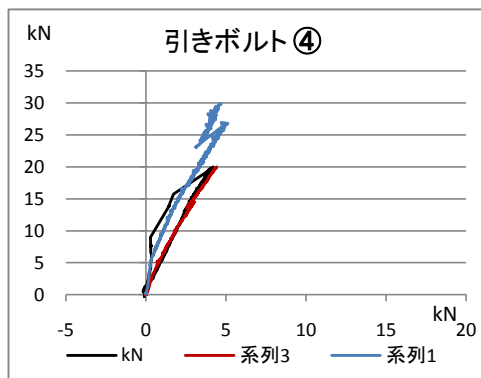
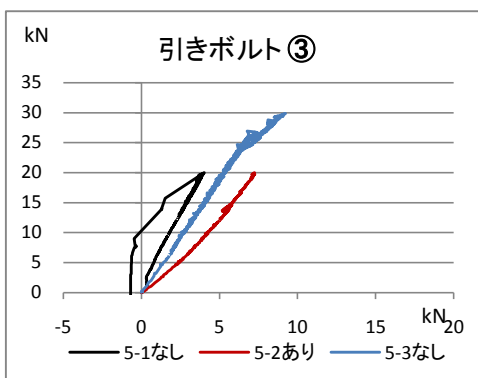
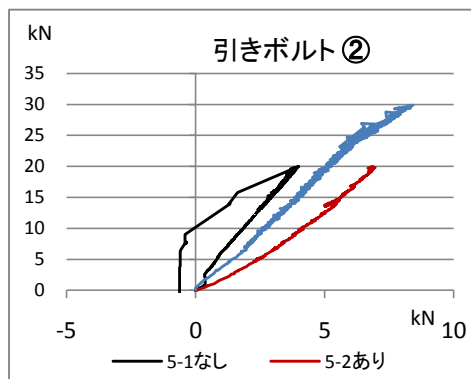
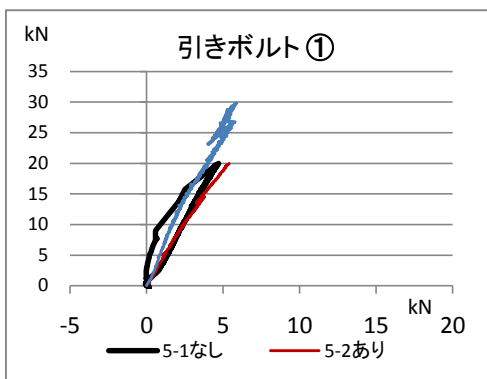
第5-3回実験(ダボなし終局まで) 測定点13~20 2008.09.02



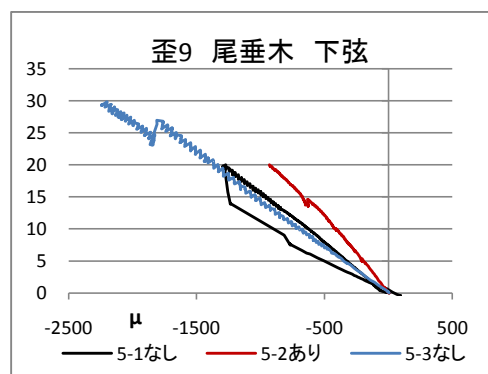
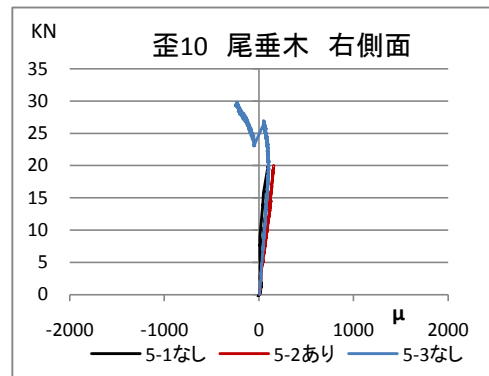
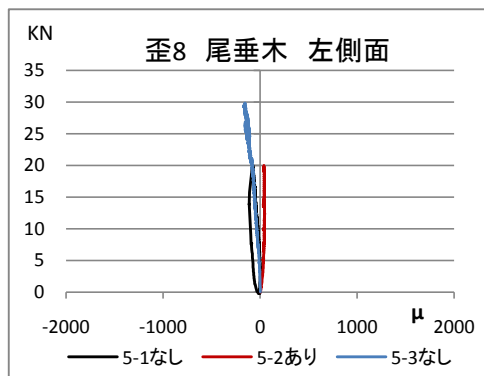
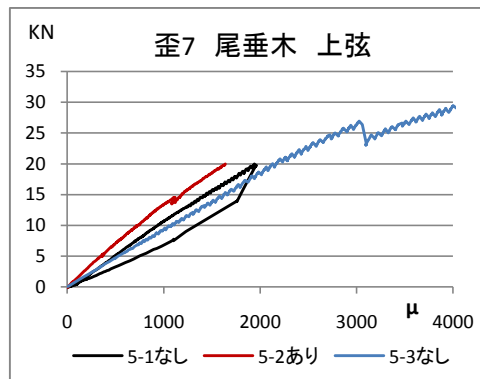
法隆寺 第5-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点22~26 2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり20KNまで) 測定点22~26 2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし終局まで) 測定点22~26 2008.09.02



法隆寺 第5-1回実験(ダボなし20kNまで)引きボルト1~4、歪5~6 2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり20kNまで)引きボルト1~4、歪5~6 2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし終局まで)引きボルト1~4 歪5~6 2008.09.02

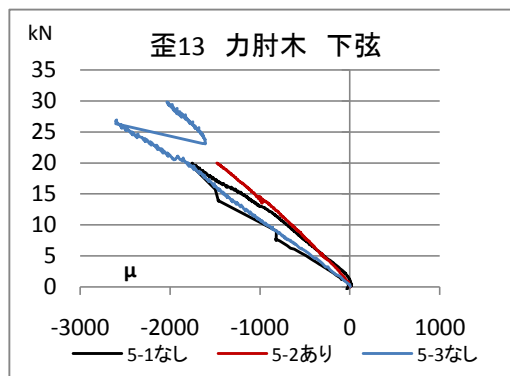
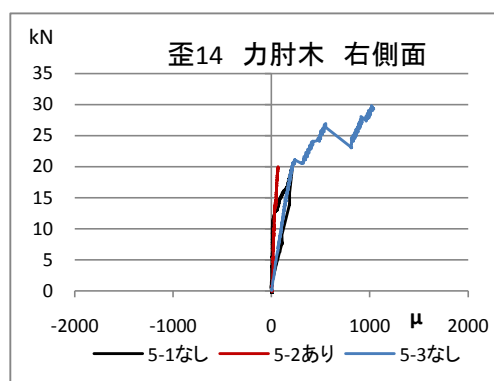
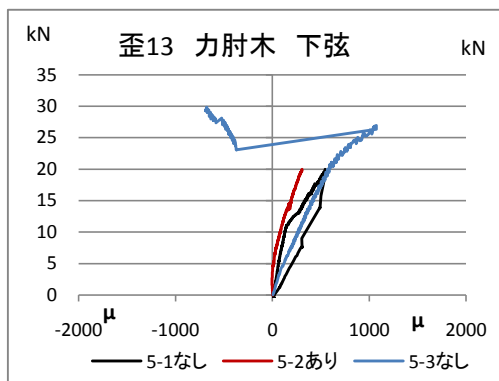
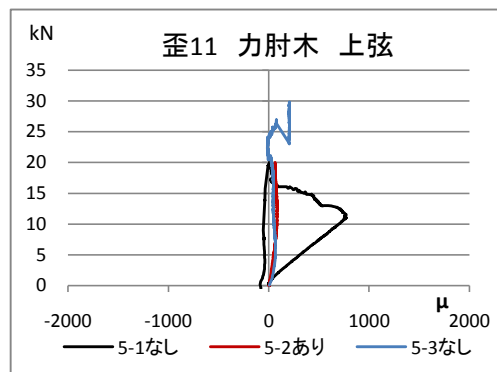


法隆寺 第5-1回実験(ダボなし) 歪7~10 尾垂木(柱心より270mm下がり)2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり) 歪7~10 尾垂木(柱心より270mm下がり)2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし) 歪7~10 尾垂木(柱心より270mm下がり)2008.09.02

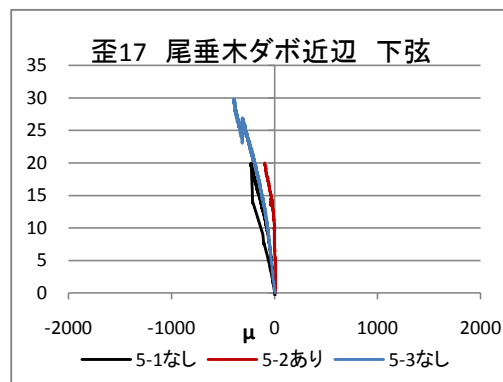
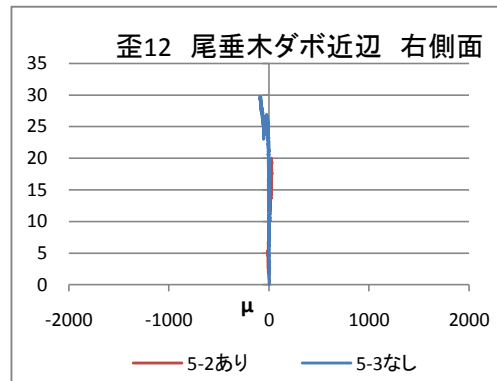
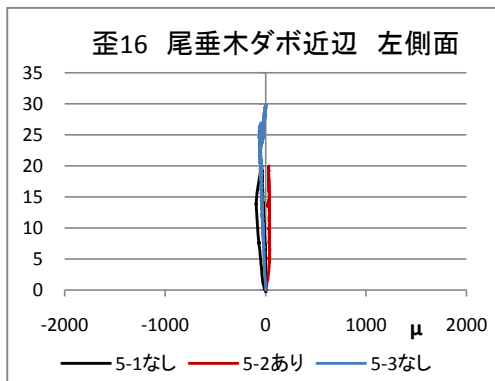
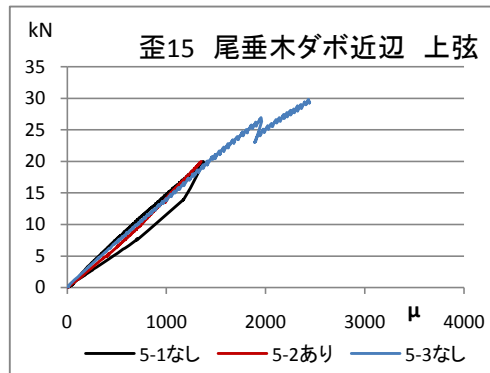




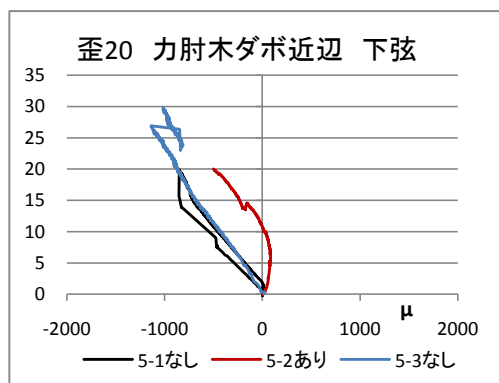
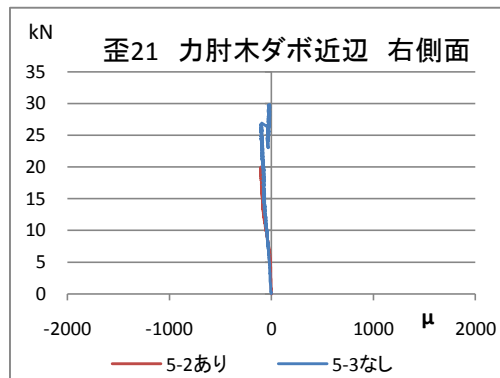
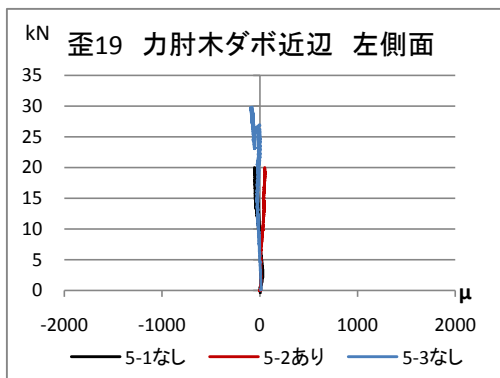
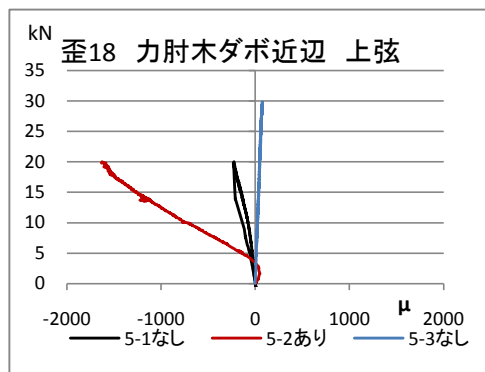
法隆寺 第5-1回実験(ダボなし) 歪11~14 力肘木(柱心より270mm下がり)2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり) 歪11~14 力肘木(柱心より270mm下がり)2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし) 歪11~14 力肘木(柱心より270mm下がり)2008.09.02



法隆寺 第5-1回実験(ダボなし) 歪15~17, 22 尾垂木ダボ近辺 2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり) 歪15~17, 22 尾垂木ダボ近辺 2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし) 歪15~17, 22 尾垂木ダボ近辺 2008.09.02



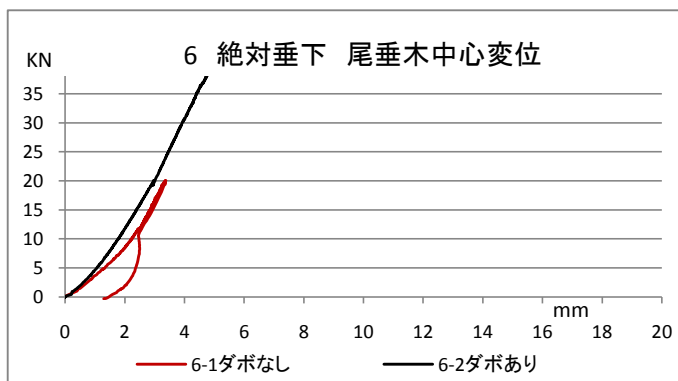
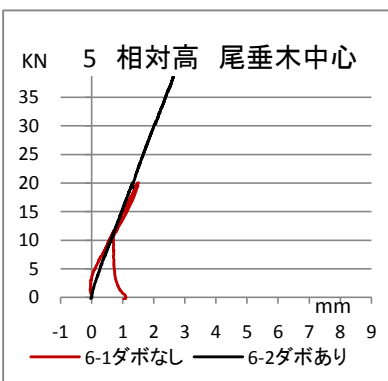
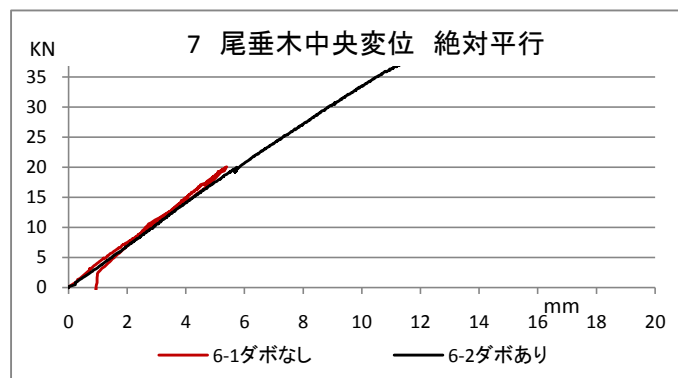
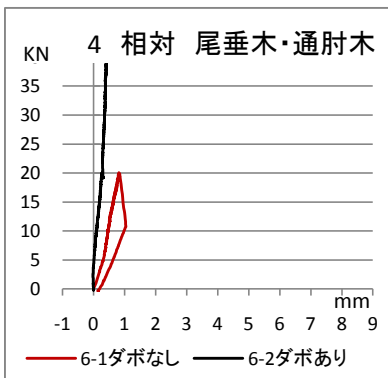
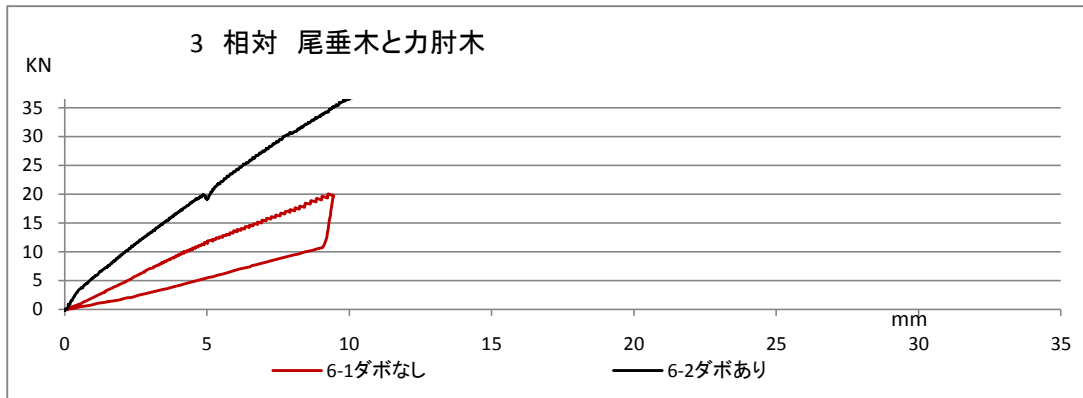
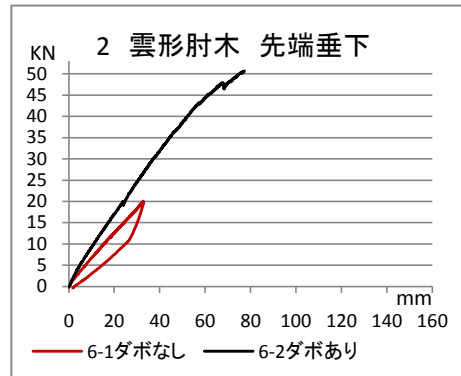
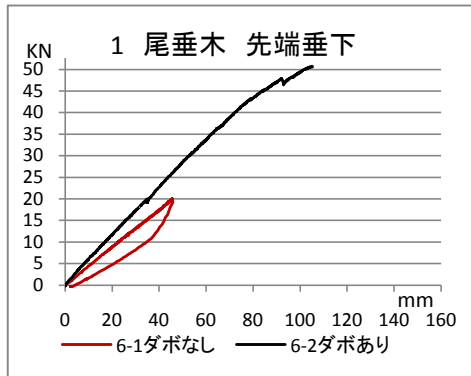
法隆寺 第5-1回実験(ダボなし) 歪18~20, 21 力肘木ダボ近辺 2008.08.28  
 第5-2回実験(ダボあり) 歪18~20, 21 力肘木ダボ近辺 2008.09.02  
 第5-3回実験(ダボなし) 歪18~20, 21 力肘木ダボ近辺 2008.09.02



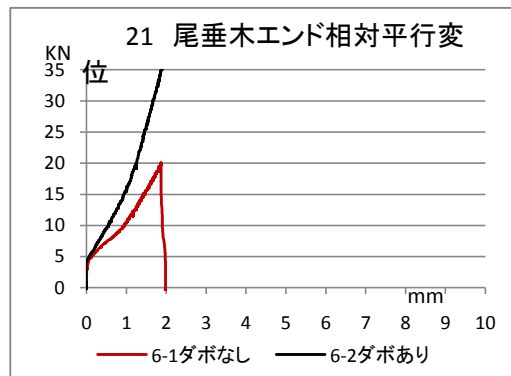
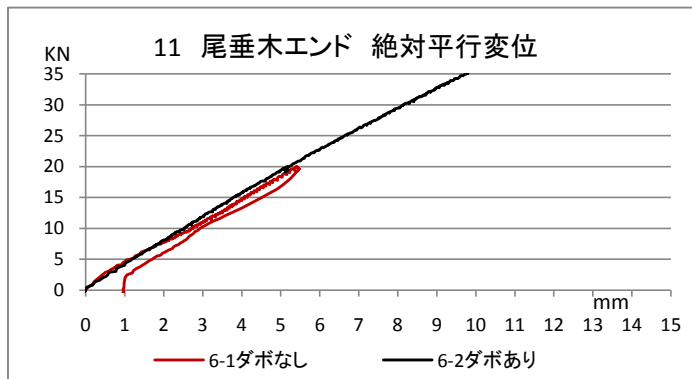
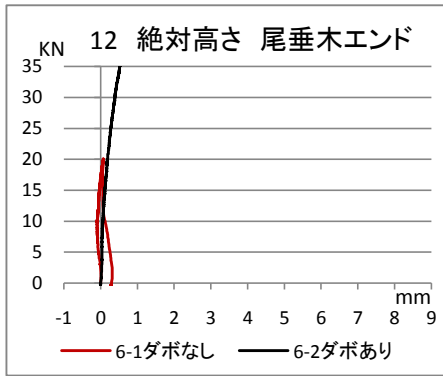
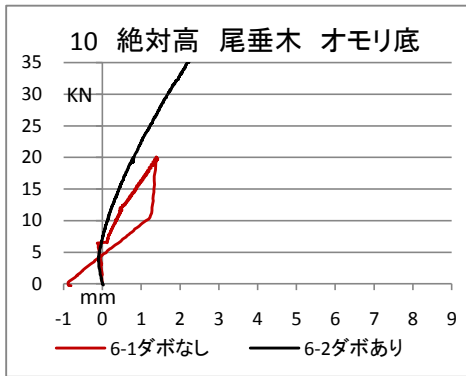
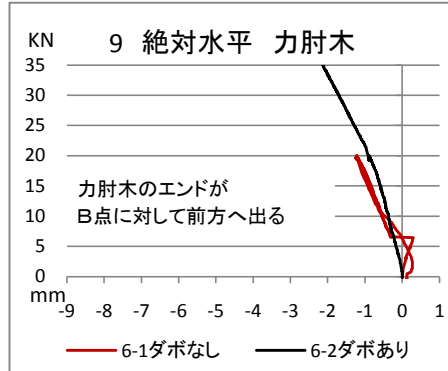
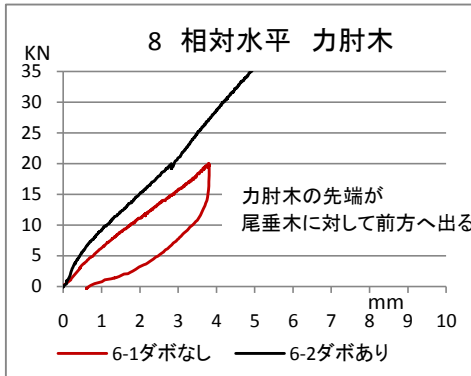
## 第 6 回実験データ

E6-1～E6-9

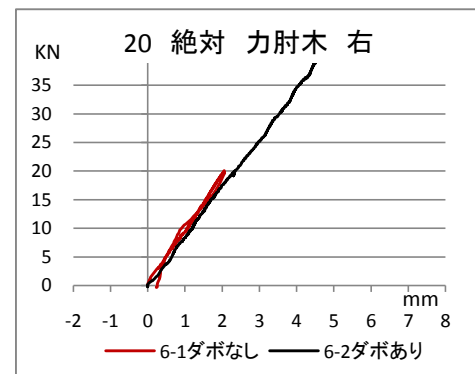
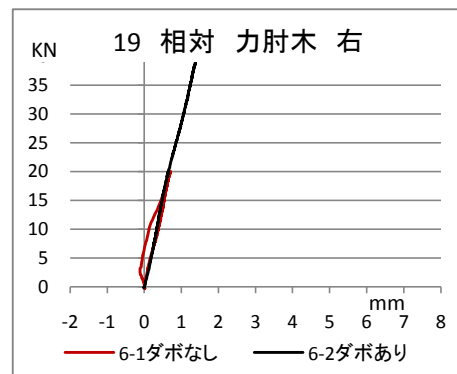
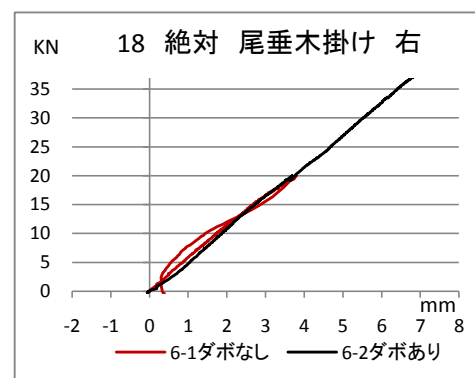
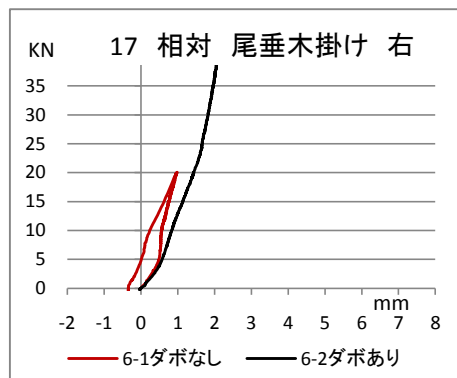
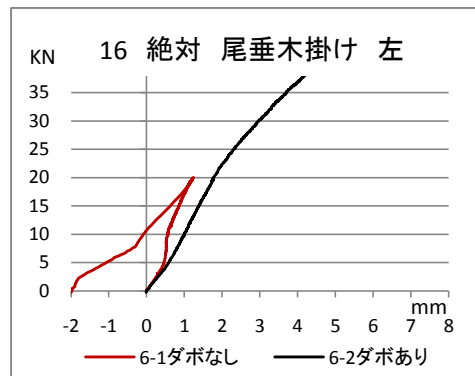
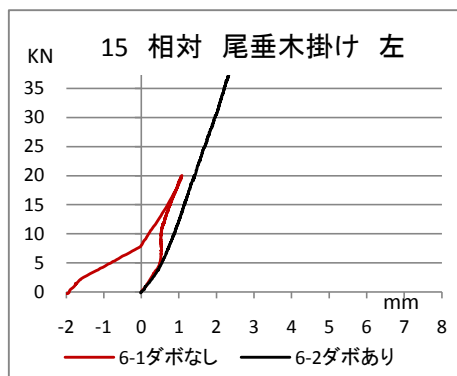
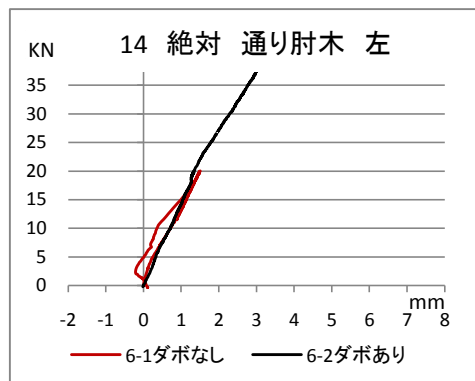
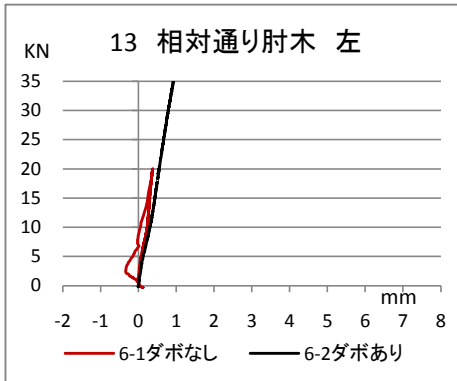
法隆寺 第6-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点1~7 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり終局まで) 測定点1~7 2008.10.02



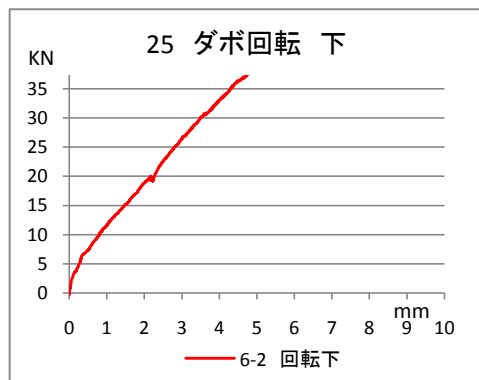
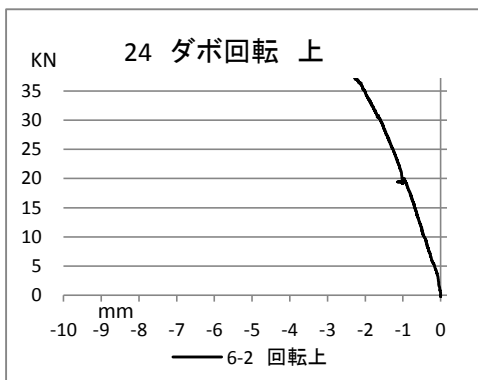
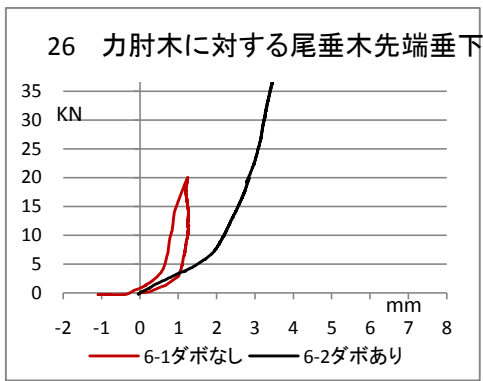
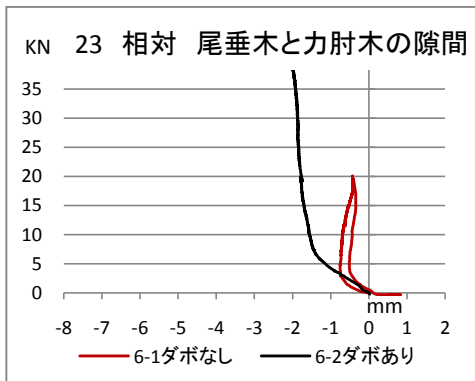
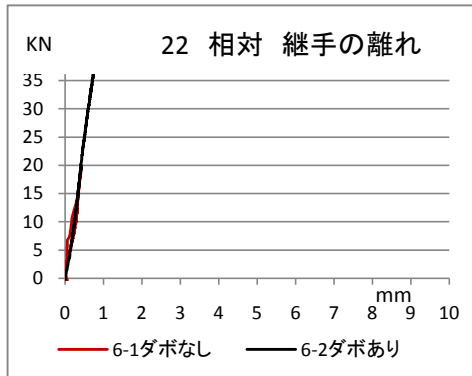
法隆寺 第6-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点8~12,21 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり終局まで) 測定点8~12,21 2008.10.02



法隆寺 第6-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点13~20 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり終局まで) 測定点13~20 2008.10.02

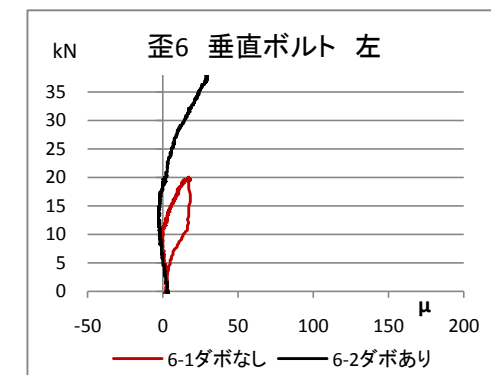
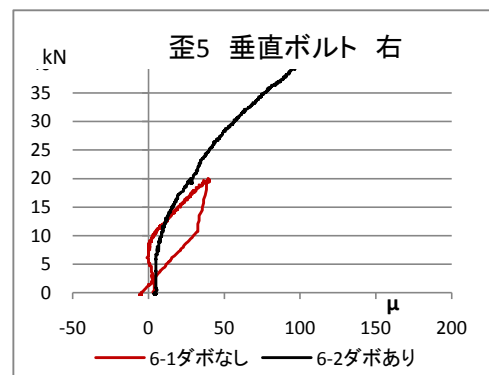
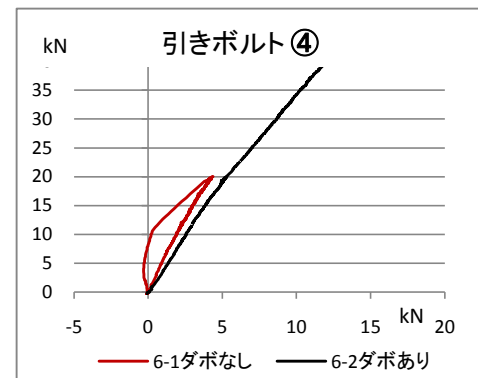
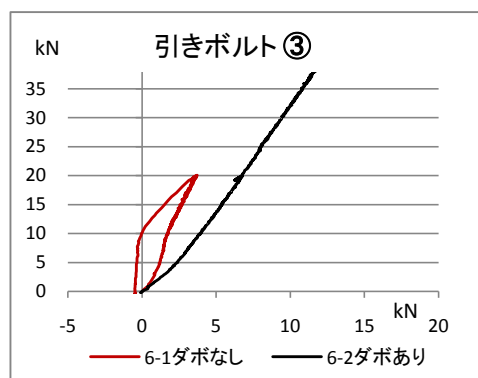
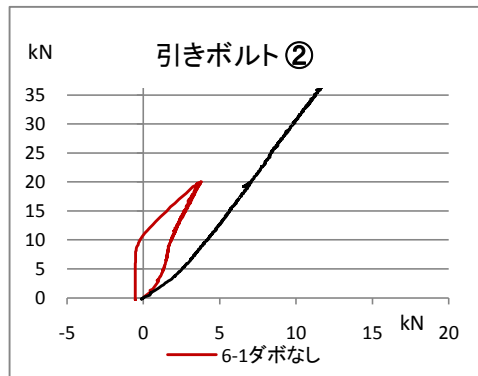
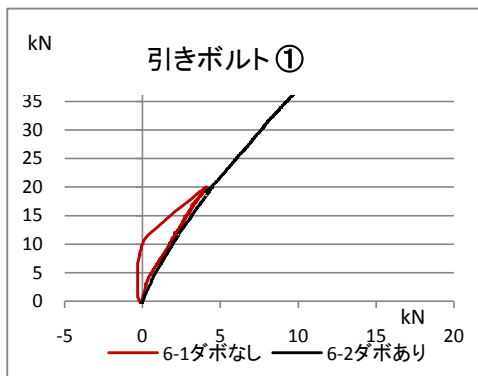


法隆寺 第6-1回実験(ダボなし20KNまで) 測定点22~26 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり終局まで) 測定点22~26 2008.10.02

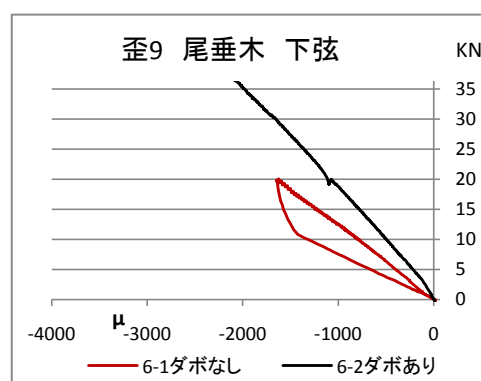
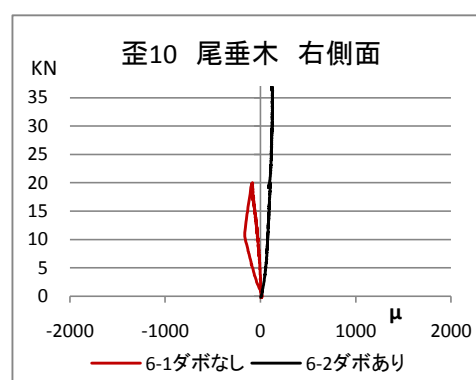
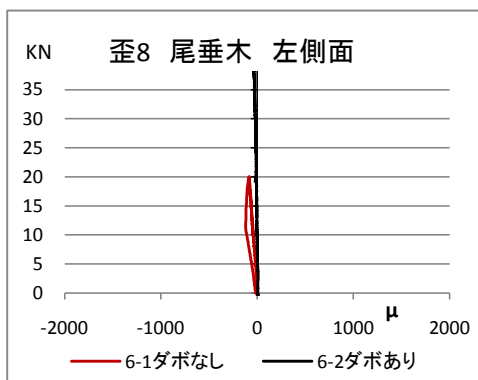
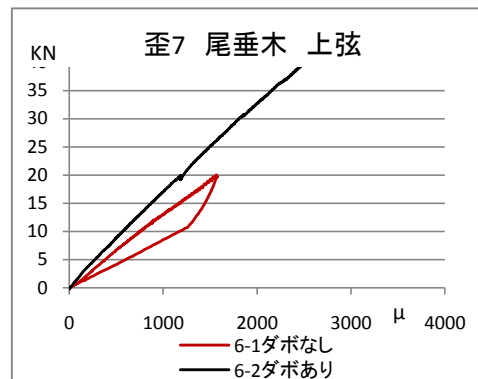




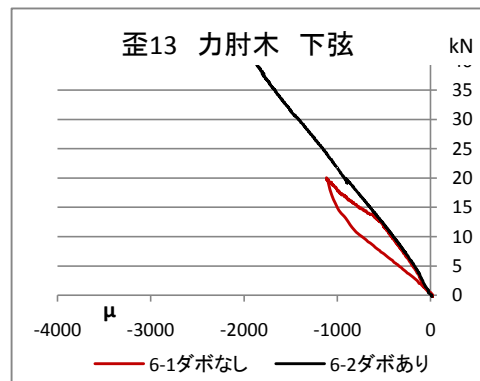
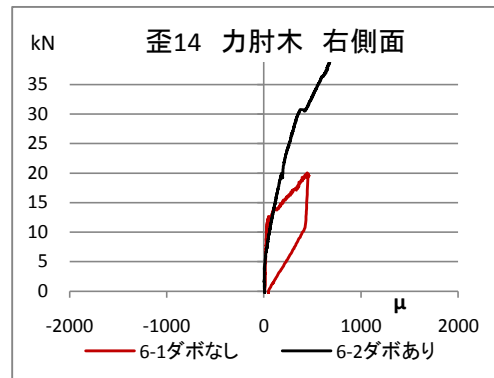
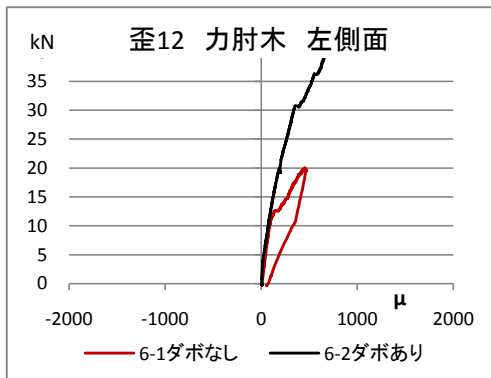
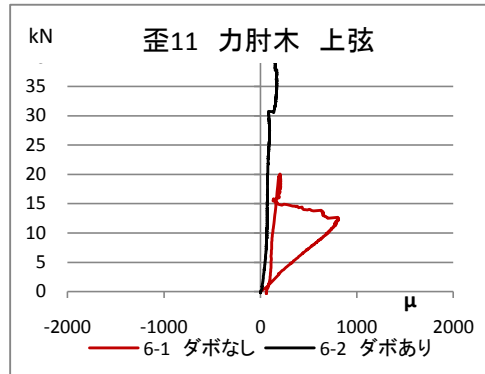
法隆寺 第6-1回実験(ダボなし20kNまで) 引きボルト1~4、歪5~6 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり終局まで) 引きボルト1~4、歪5~6 2008.10.02



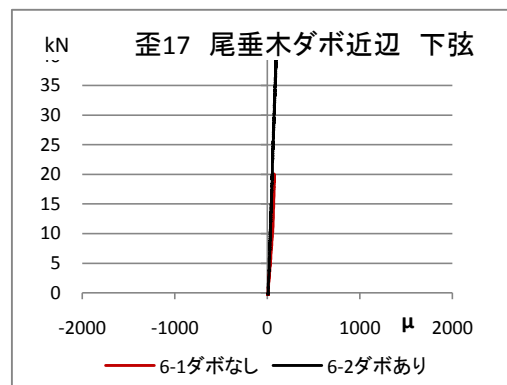
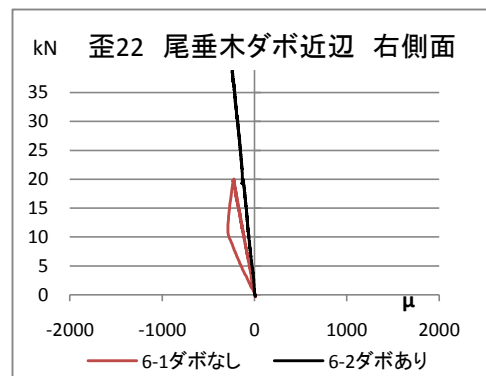
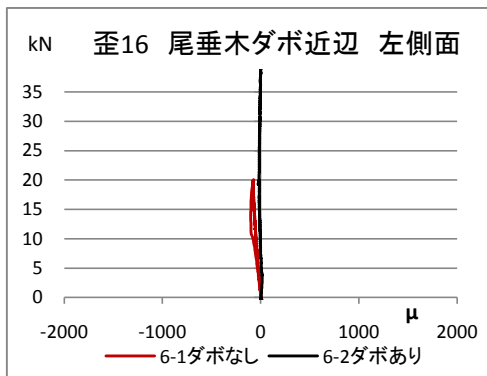
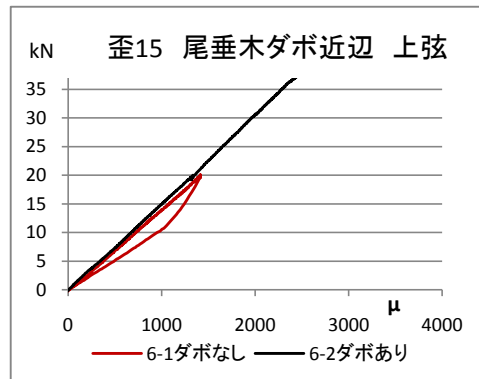
法隆寺 第6-1回実験(ダボなし) 歪7~10 尾垂木(柱心より280mm下がり) 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり) 歪7~10 尾垂木(柱心より280mm下がり) 2008.10.02



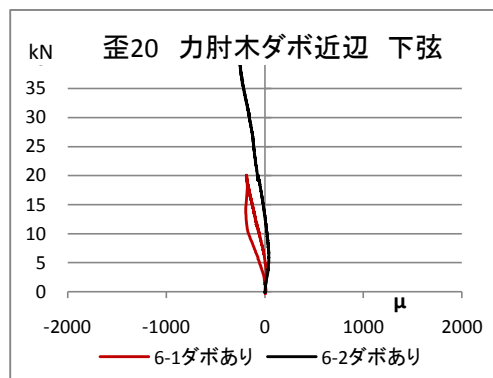
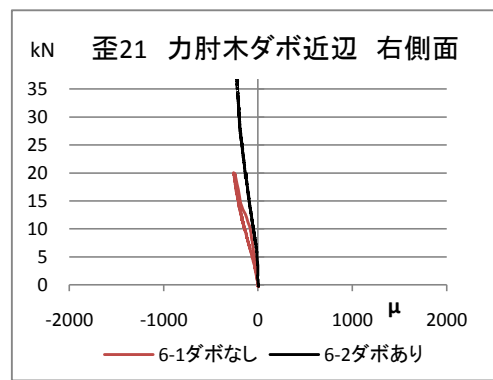
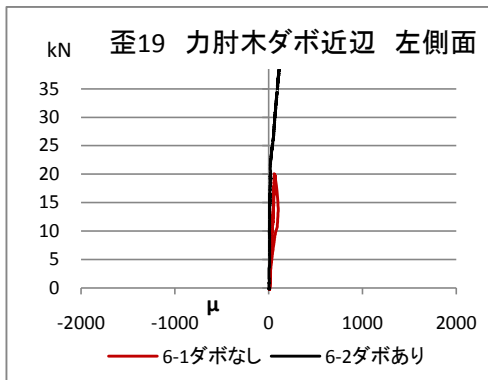
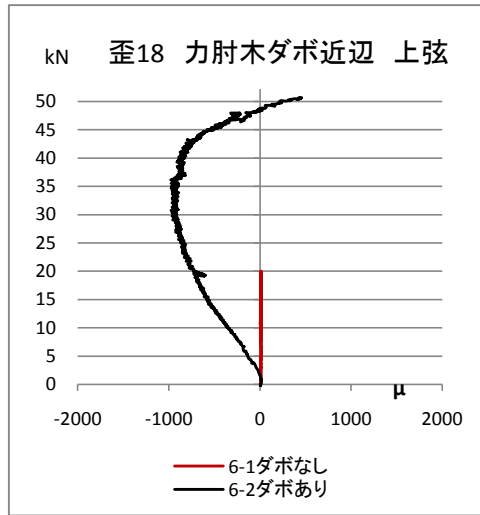
法隆寺 第6-1回実験(ダボなし) 歪11~14 力肘木(柱心より280mm下がり)2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり) 歪11~14 力肘木(柱心より280mm下がり)2008.10.02



法隆寺 第6-1回実験(ダボなし) 歪15~17, 22 尾垂木ダボ近辺 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり) 歪15~17, 22 尾垂木ダボ近辺 2008.10.02



法隆寺 第6-1回実験(ダボなし) 歪18~20, 21 力肘木ダボ近辺 2008.10.01  
 第6-2回実験(ダボあり) 歪18~20, 21 力肘木ダボ近辺 2008.10.02





## 木材試験体

含水率20%以下とする  
実験前にヤング率を測定

\* 特記なき樹種：全てヒノキ ~~杉~~  
\* ダボ樹種：カシとする

① 尾垂木 150x105x3,586

② 力肘木 (隣行き) 130x105x2,937

③ 力肘木 (平行き) A 130x105x2,447

④ 力肘木 (平行き) B 130x105x2,447

⑤ 通り肘木 1-A 130x105x1,829

⑥ 通り肘木 1-B 130x105x1,829

⑦ 通り肘木 2-A 平 130x105x(550+150)

⑧ 通り肘木 2-A 隅 130x105x1,279

⑨ 通り肘木 2-B 130x105x1,829

⑩ 尾垂木掛けA 130x105x750

⑪ 尾垂木掛けB 130x105x750

⑫ 方斗 150x150x119

⑬ 巻斗A 150x150x119

⑭ 巻斗B 150x150x119

⑮ 束 105x105x595

⑯ 雲形肘木ダミーA 95x105x1,498

⑰ 雲形肘木ダミーB 95x105x654

⑱ 雲形肘木ダミーC1 95x105x200

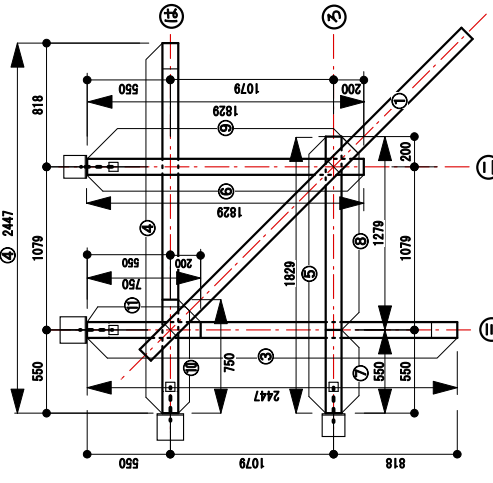
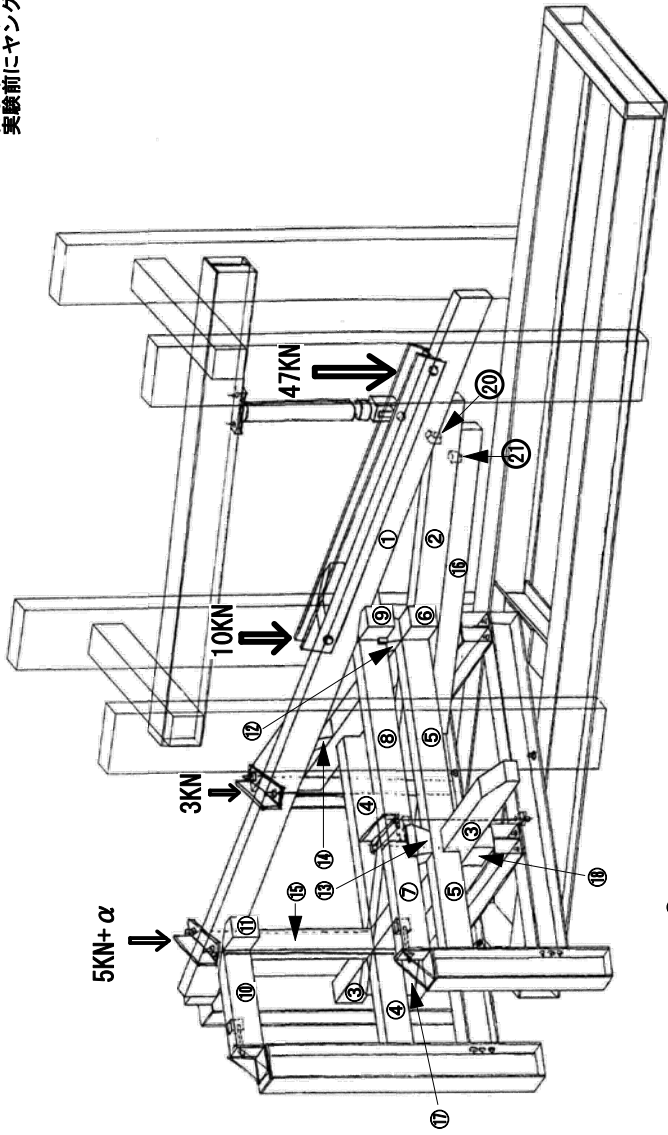
⑲ 雲形肘木ダミーC2 95x105x200

⑳ 角ダボW 尾垂木先端2倍形状 1本 44x80x82x60

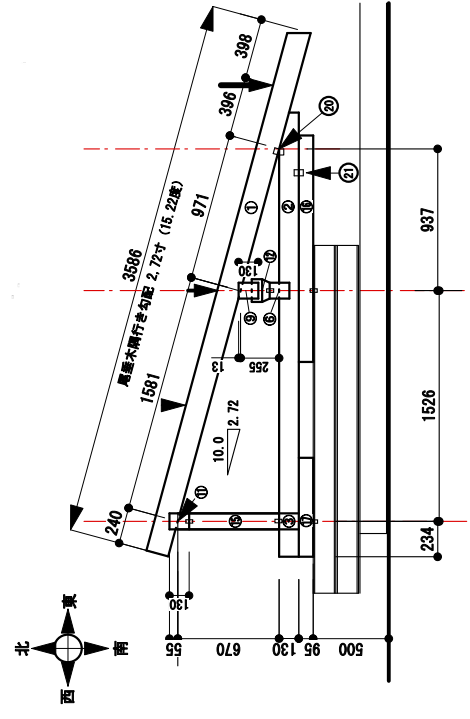
㉑ 角ダボX 雲形肘木ダボ 1本 22x40x60

㉒ 丸ダボY 直径:23mm 深さ:46mm 9本

簡略化を検討する



隣行き架構 伏図 1:50

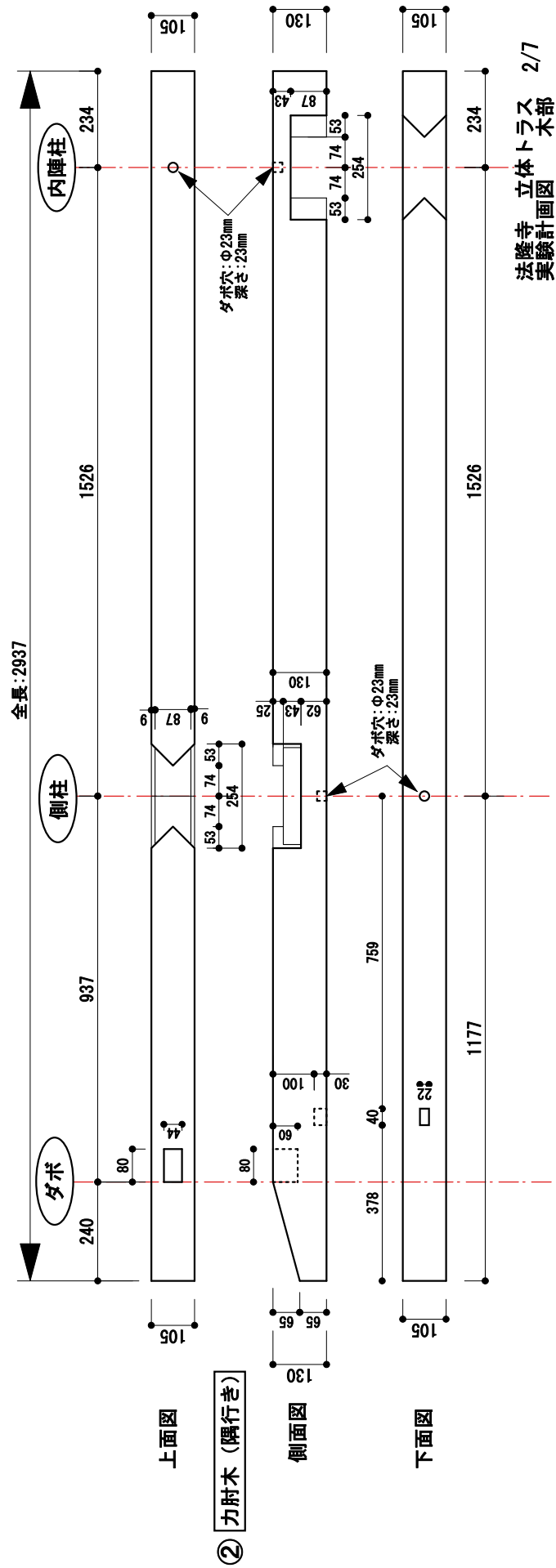
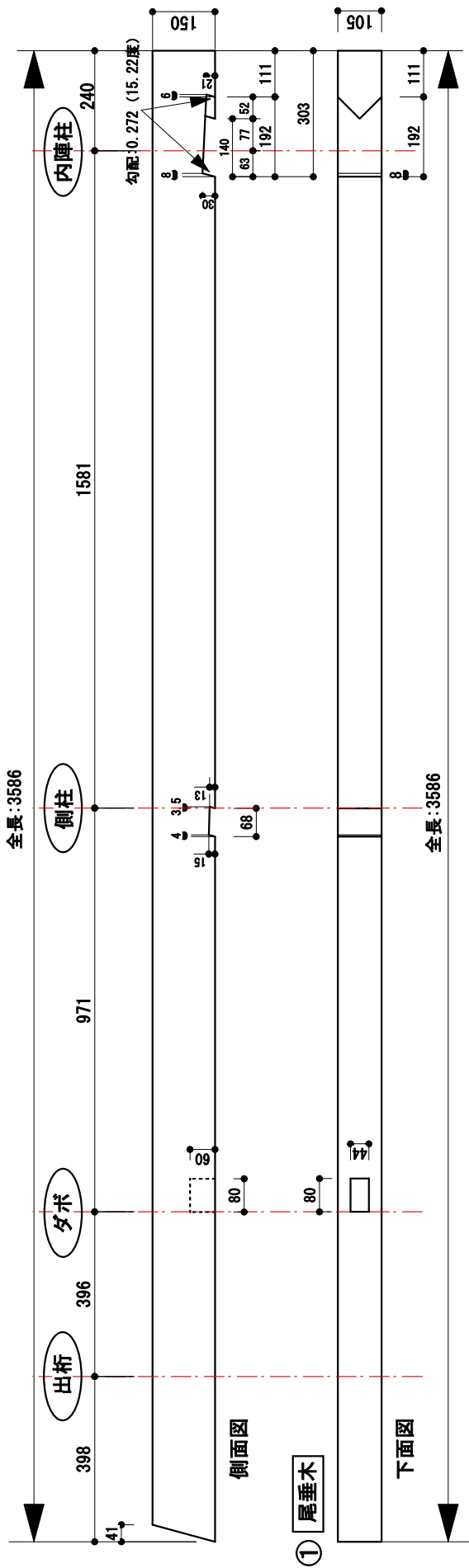


尾垂木 (隣行き) 立面図 1:50

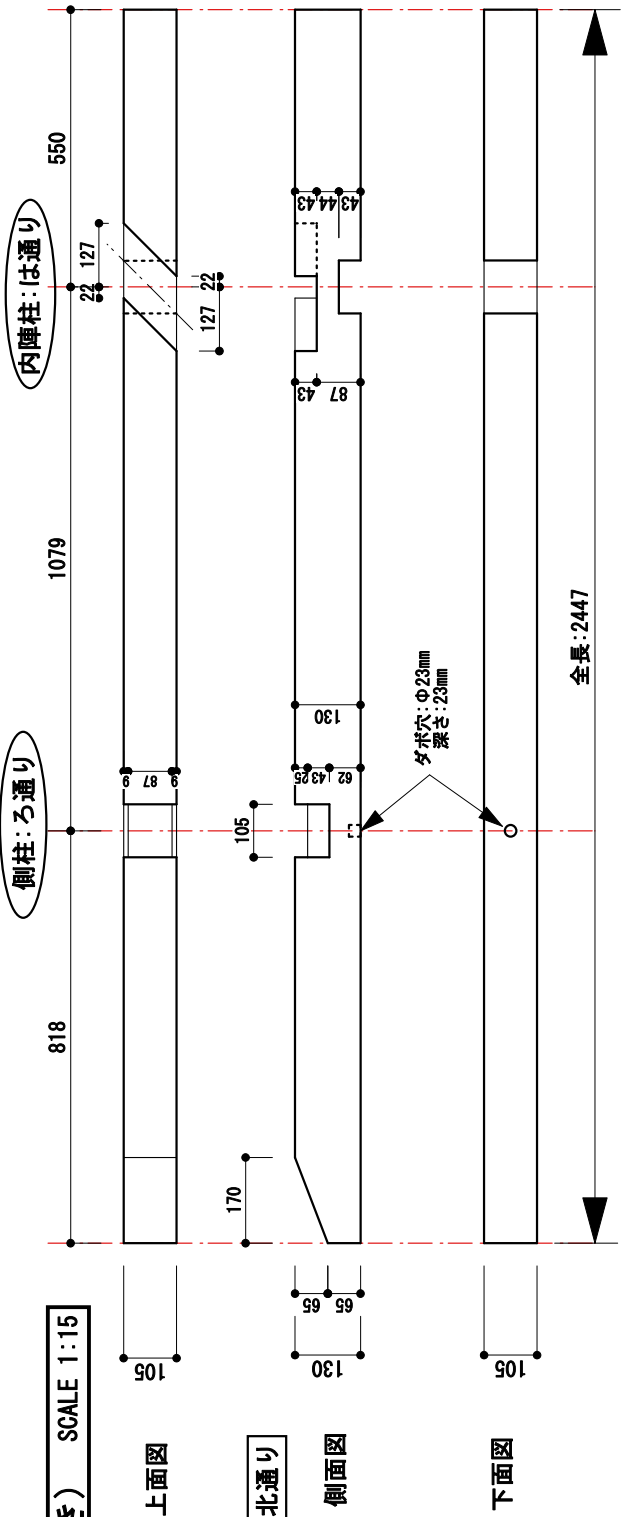
\* 木部試験体は実大の1/2のスケール  
\* ①尾垂木 ②力肘木の先端ダボ ㉑のみ実大寸法とする



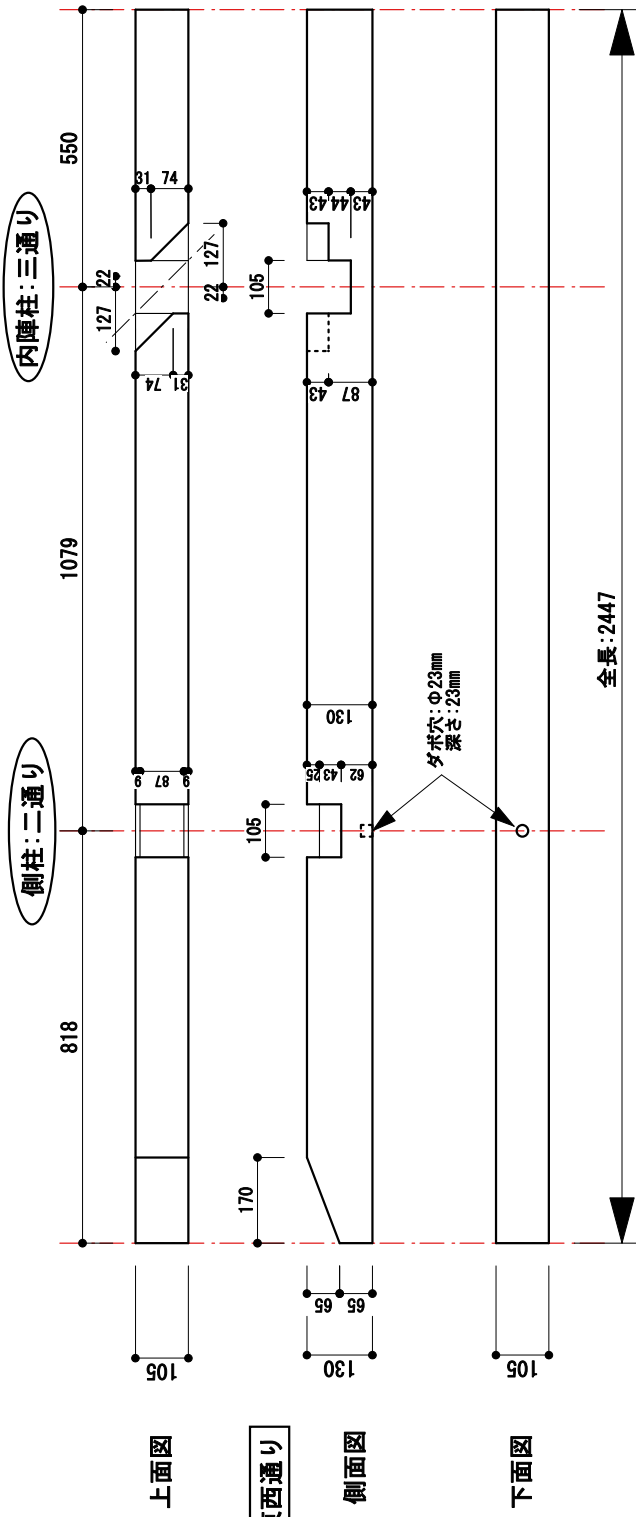
尾垂木 力肘木 (隅行き) SCALE 1:15



力肘木 (平行き) SCALE 1:15

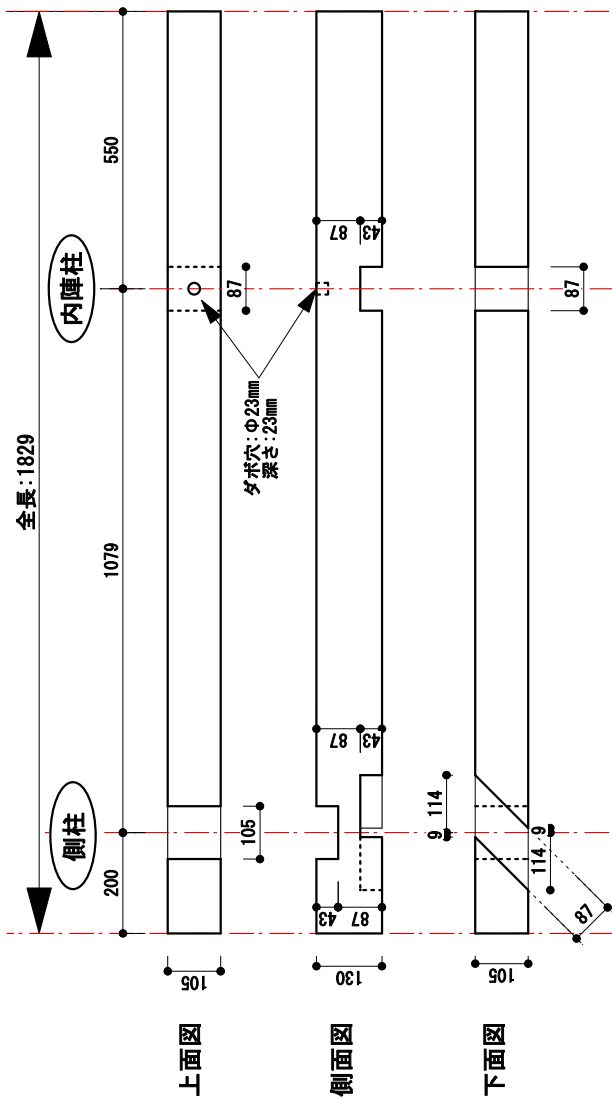


③ 力肘木 A 三: 南北通り

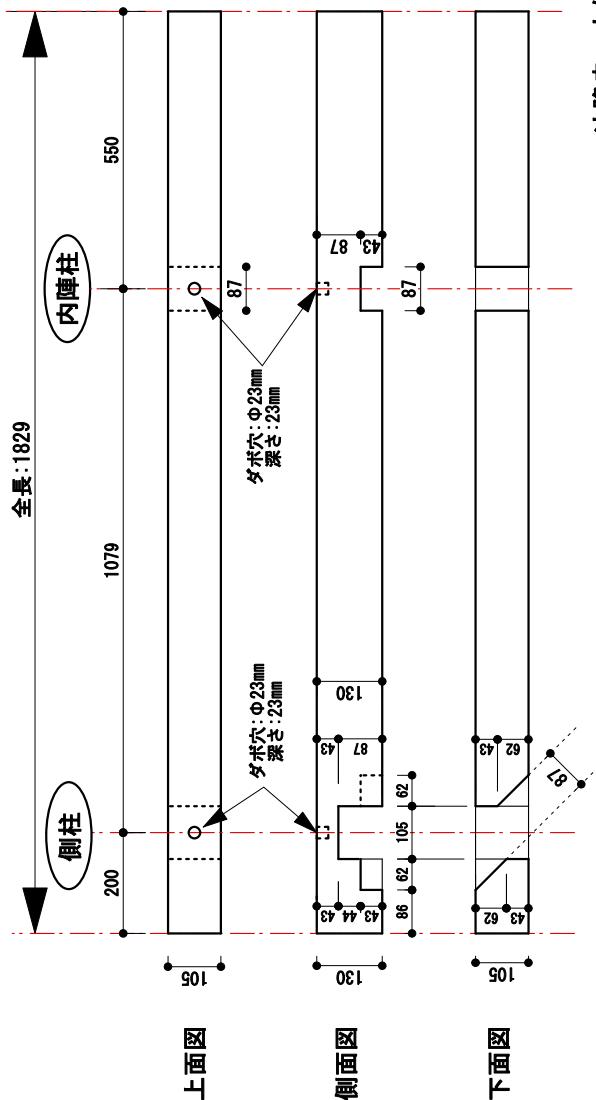


④ 力肘木 B は: 東西通り

通り肘木 1 SCALE 1:15

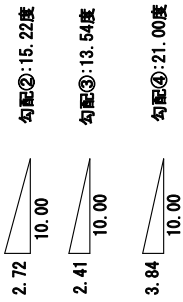


⑤ 通り力肘木 1-A



⑥ 通り力肘木 1-B

詳細図 通り肘木2 SACALE 1:8

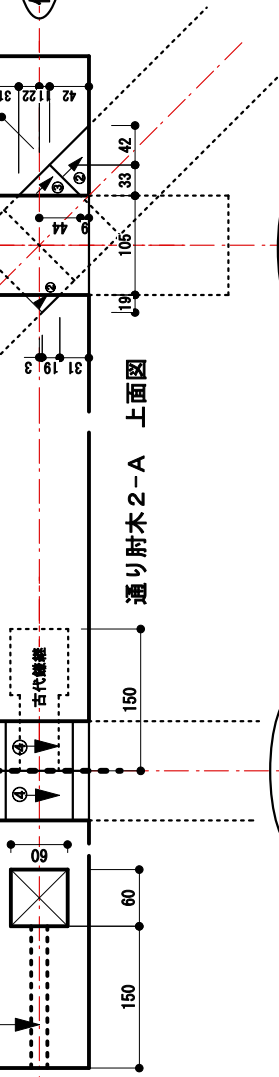


⑦ 通り肘木2-A平  
長さ:550+150

⑧ 通り肘木2-A隅  
全長:1279

継手位置

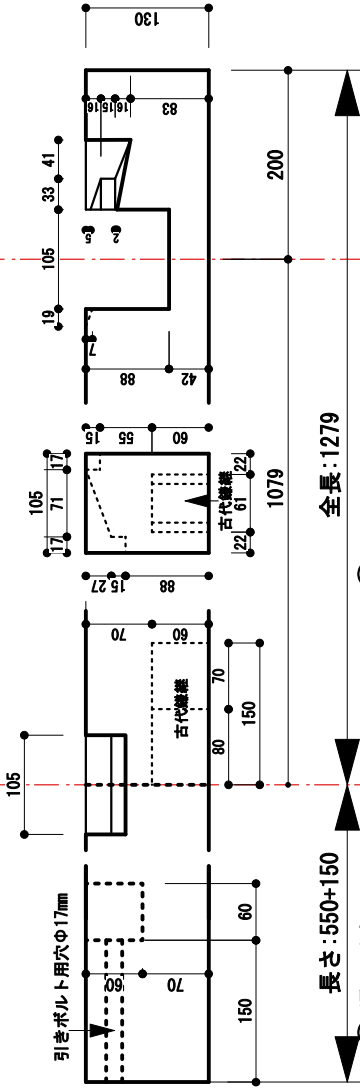
引きボルト用穴φ17mm



通り肘木2-A 上面図

側柱:三通り

側柱:二通り



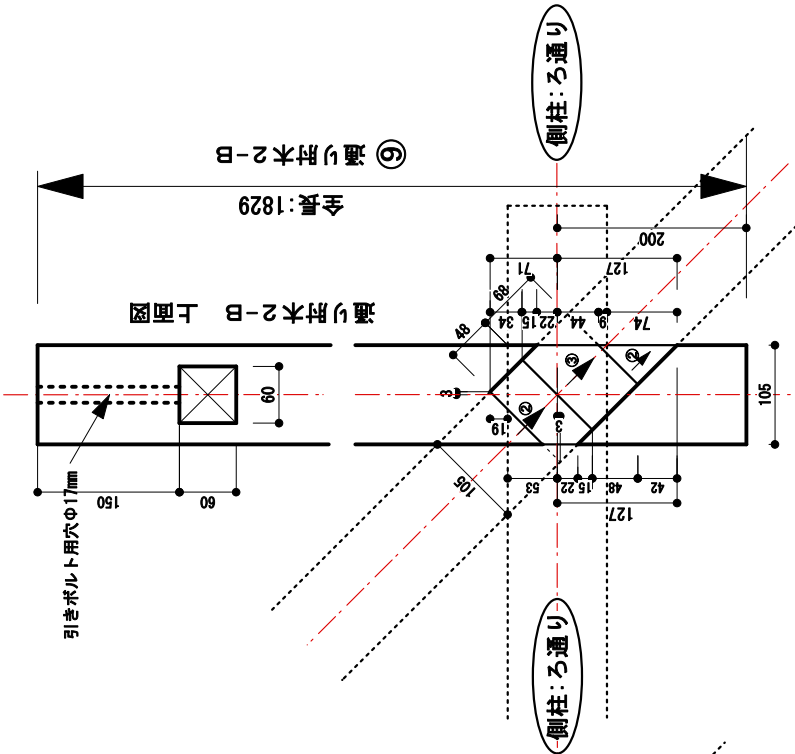
⑧ 通り肘木2-A隅 側面図

側柱:三通り

側柱:二通り

側柱:ろ通り

側柱:ろ通り

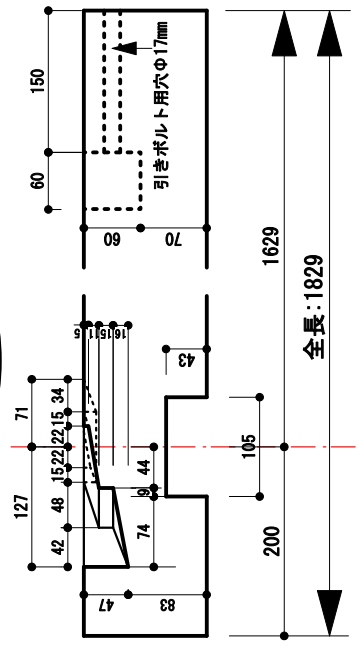


通り肘木2-B 上面図

⑨ 通り肘木2-B  
全長:1829

側柱:ろ通り

側柱:二通り

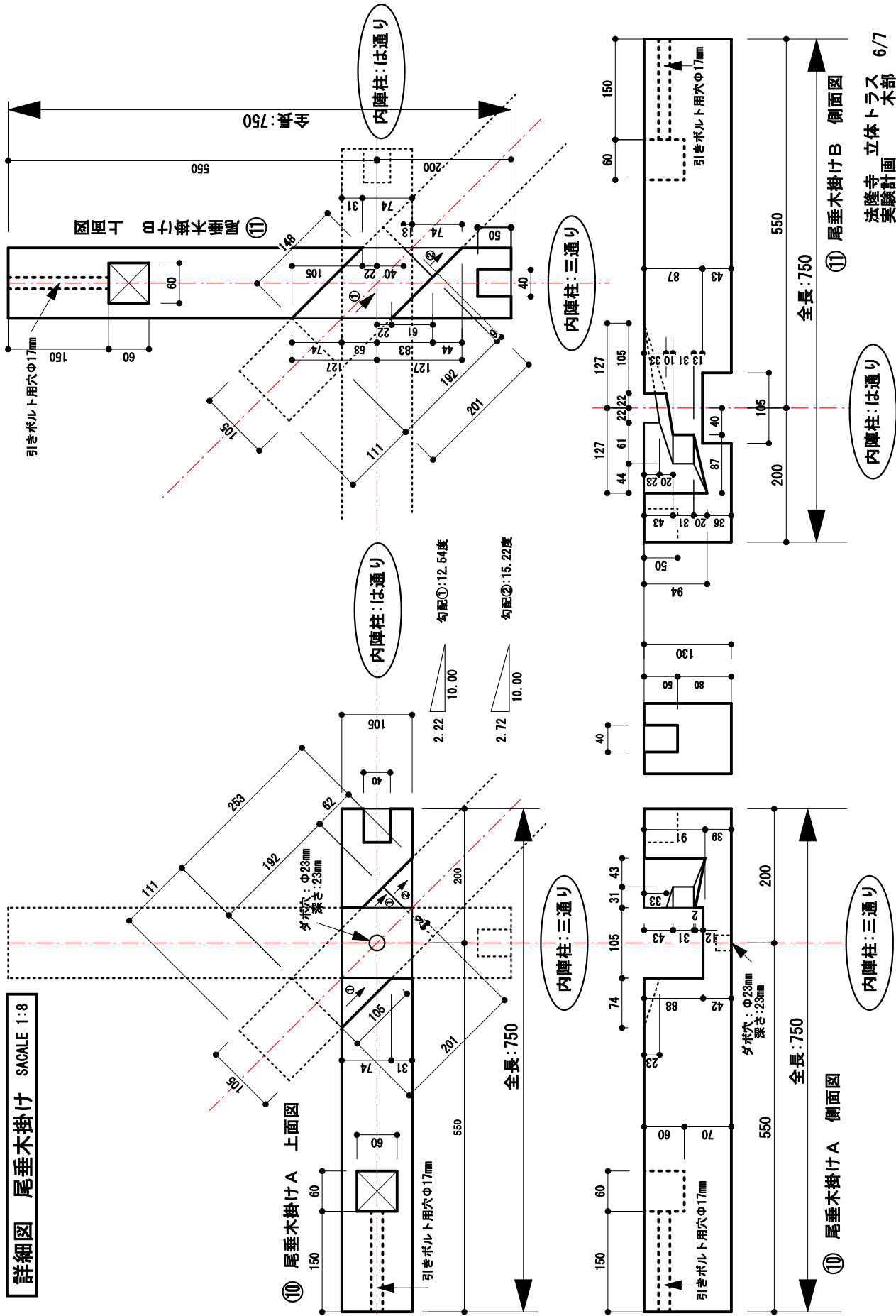


⑨ 通り肘木2-B 側面図

側柱:ろ通り

側柱:ろ通り

詳細図 尾垂木掛け SACALE 1:8



法隆寺 立体トラス 木部 実験計画 6/7

内陣柱: は通り

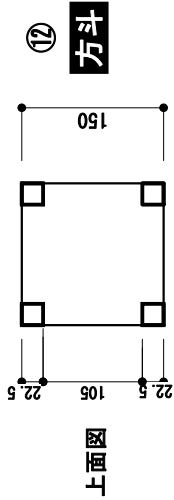
⑩ 尾垂木掛けA 側面図

内陣柱: 三通り

⑪ 尾垂木掛けB 側面図

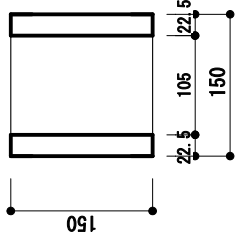
内陣柱: は通り

詳細図 斗組 ダボ SCALE 1:8

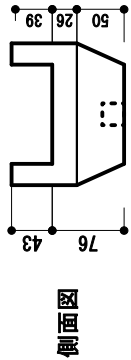


上面図

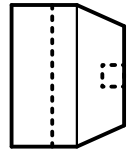
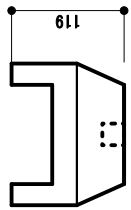
⑬ ⑭ 巻斗



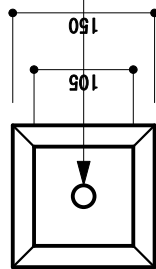
上面図



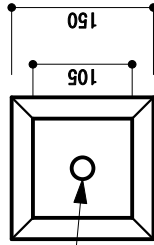
側面図



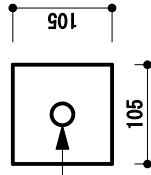
\*「斗」形状の簡略化を検討する



下面図

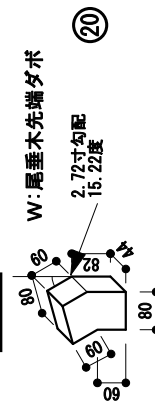


ダボ穴:  $\phi 23\text{mm}$  - 22mm  
深さ: 23mm - 22mm

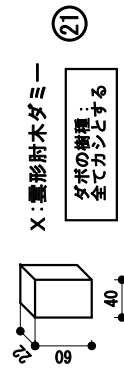


ダボ穴:  $\phi 23\text{mm}$  - 22mm  
深さ: 23mm - 22mm

角ダボ



⑳



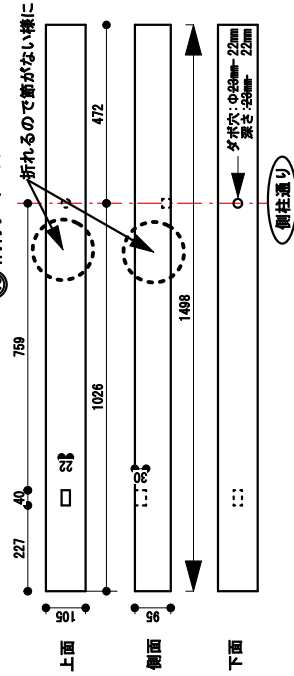
㉑

丸ダボ

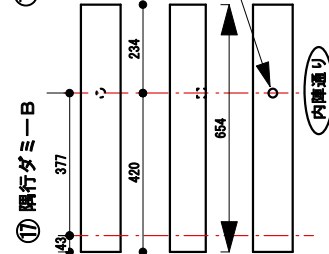
直径: 23mm 9本  
長さ: 46mm

雲形肘木ダボ一 SCALE 1:20

⑮ 隅行ダミーA

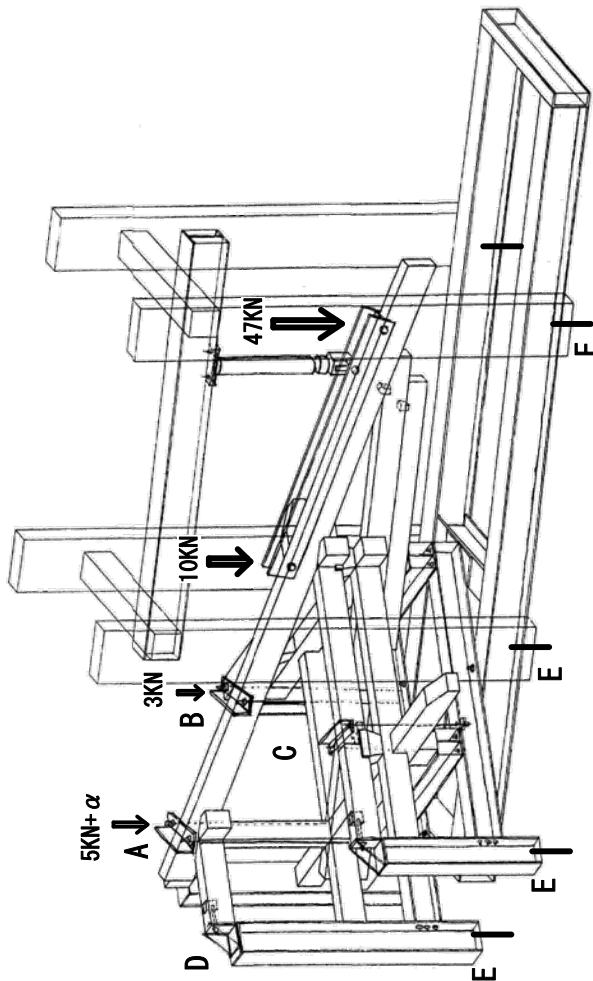


⑯ ⑰ 平行ダミーC



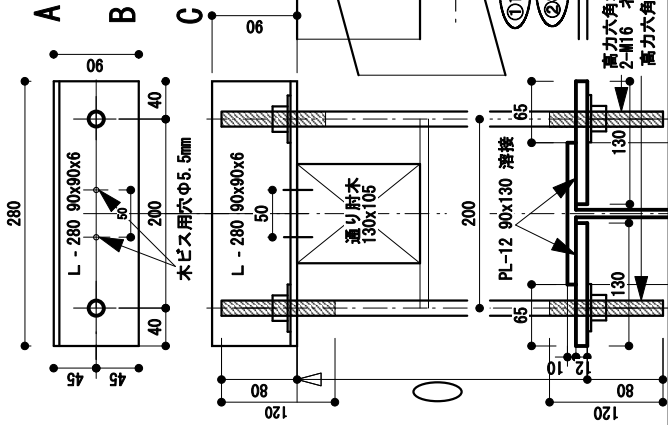
## 鉄骨治具

法隆寺 立体トラス 実験計画 鉄骨治具

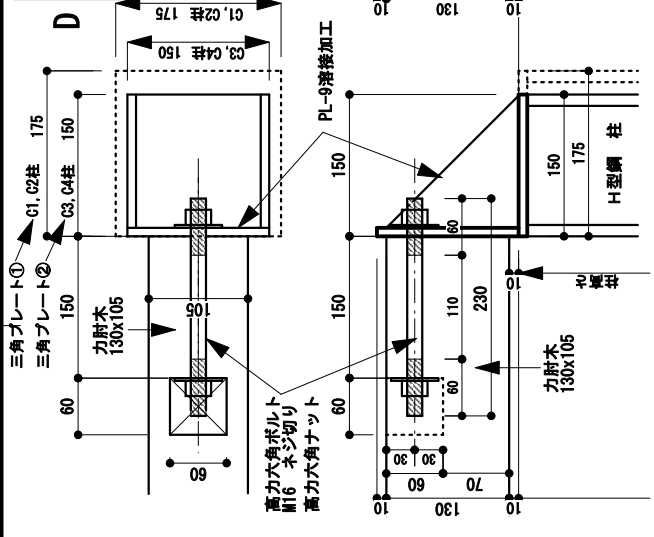


E 後施工ケミカルアンカー  
 内ネジ式: 深さ150mm 内径: M16  
 註: 鉄骨はさび止め塗装とする

- A 浮上り防止アングル L-350 90x90x6 2-M16 1セット  
 ①高力引きボルト長さ: 1535mm
- B 浮上り防止アングル L-280 90x90x6 2-M16 1セット  
 ②高力引きボルト長さ: 1036mm
- C ③高力引きボルト長さ: 835mm 2セット

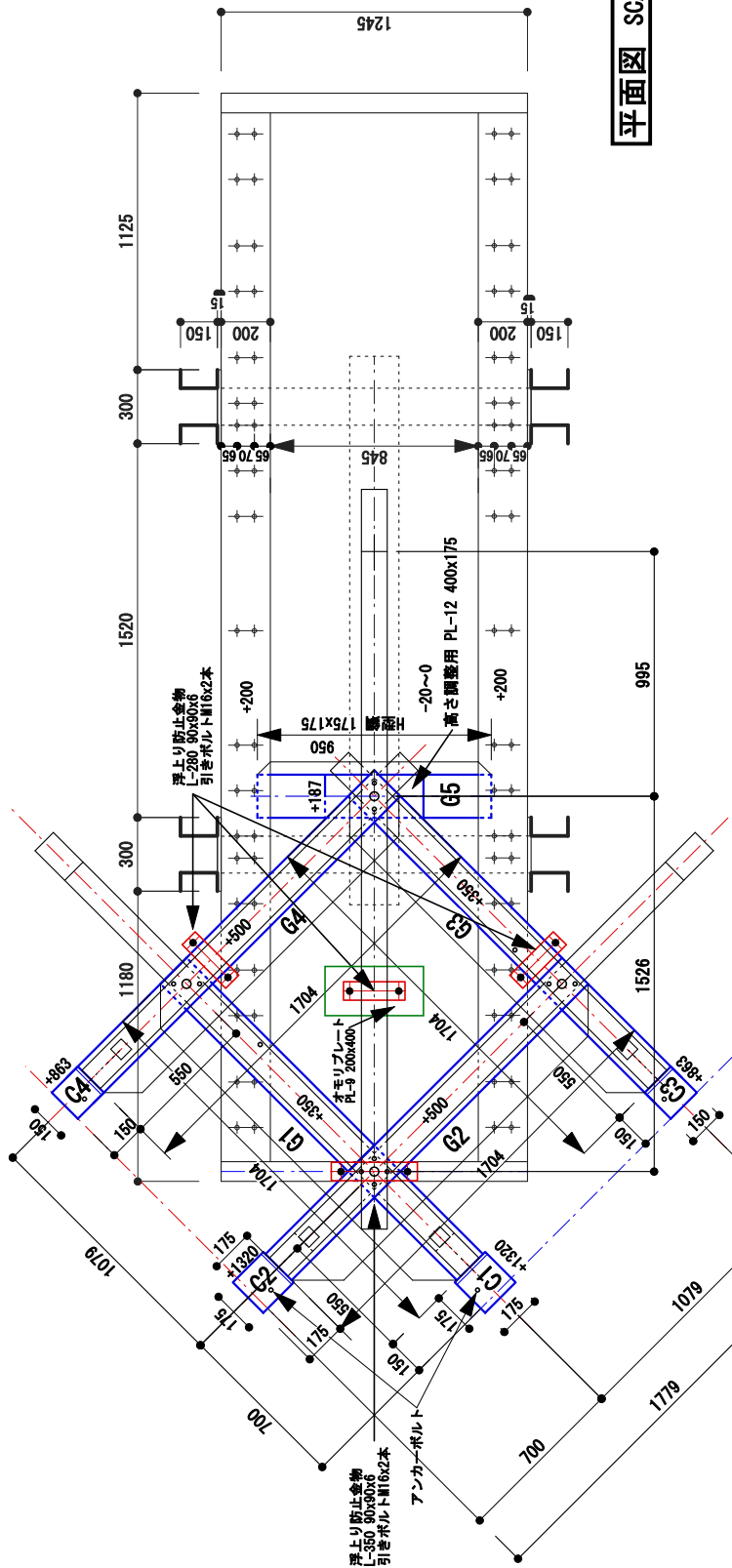


- 三角プレート①②2セットずつ  
 力耐木固定金物 PL-9溶接 2-M16  
 高力六角ナット 230mm M16  
 高力引きボルト 230mm M16

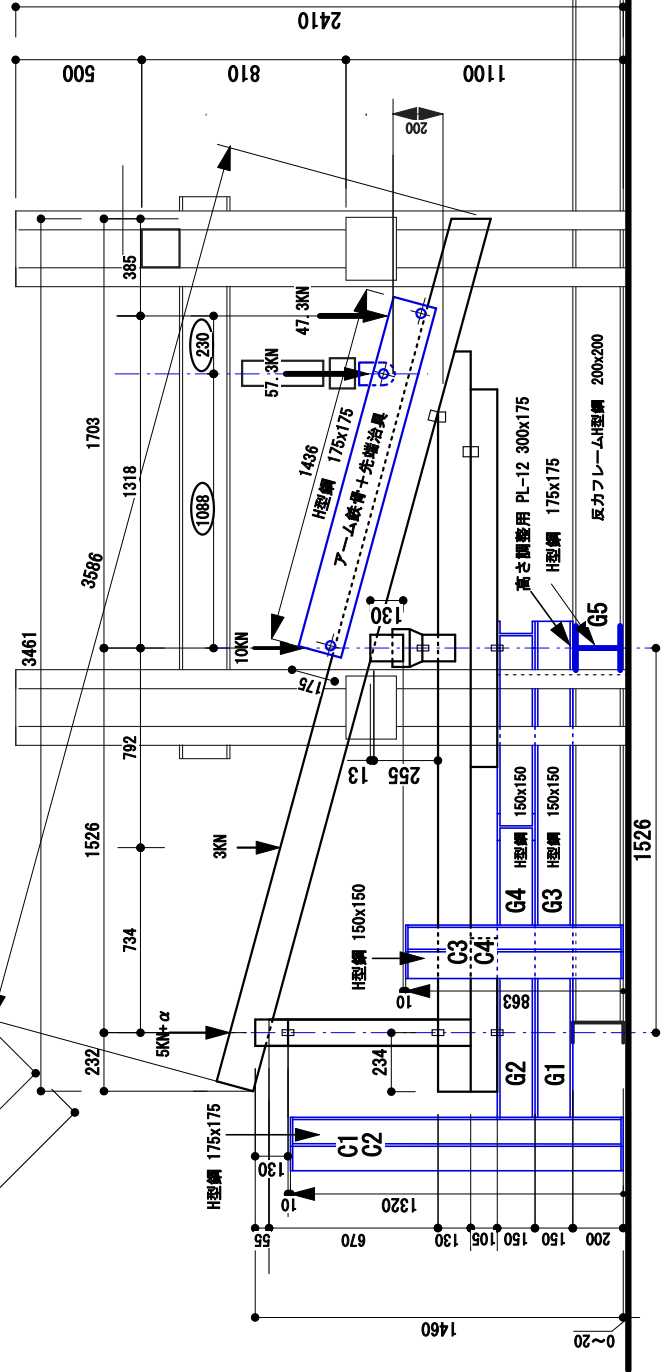


法隆寺 立体トラス 治具 1/7  
 実験計画図

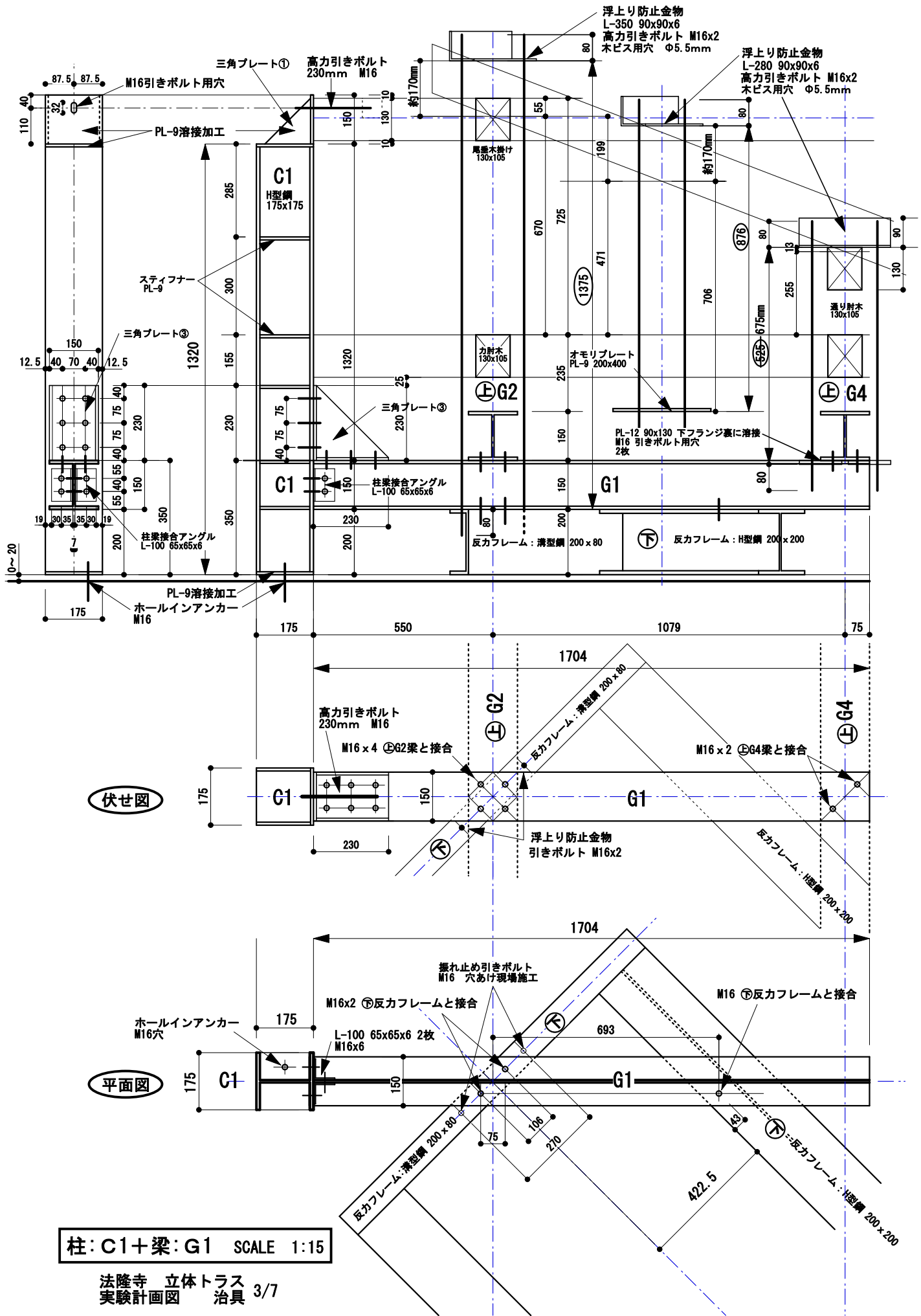


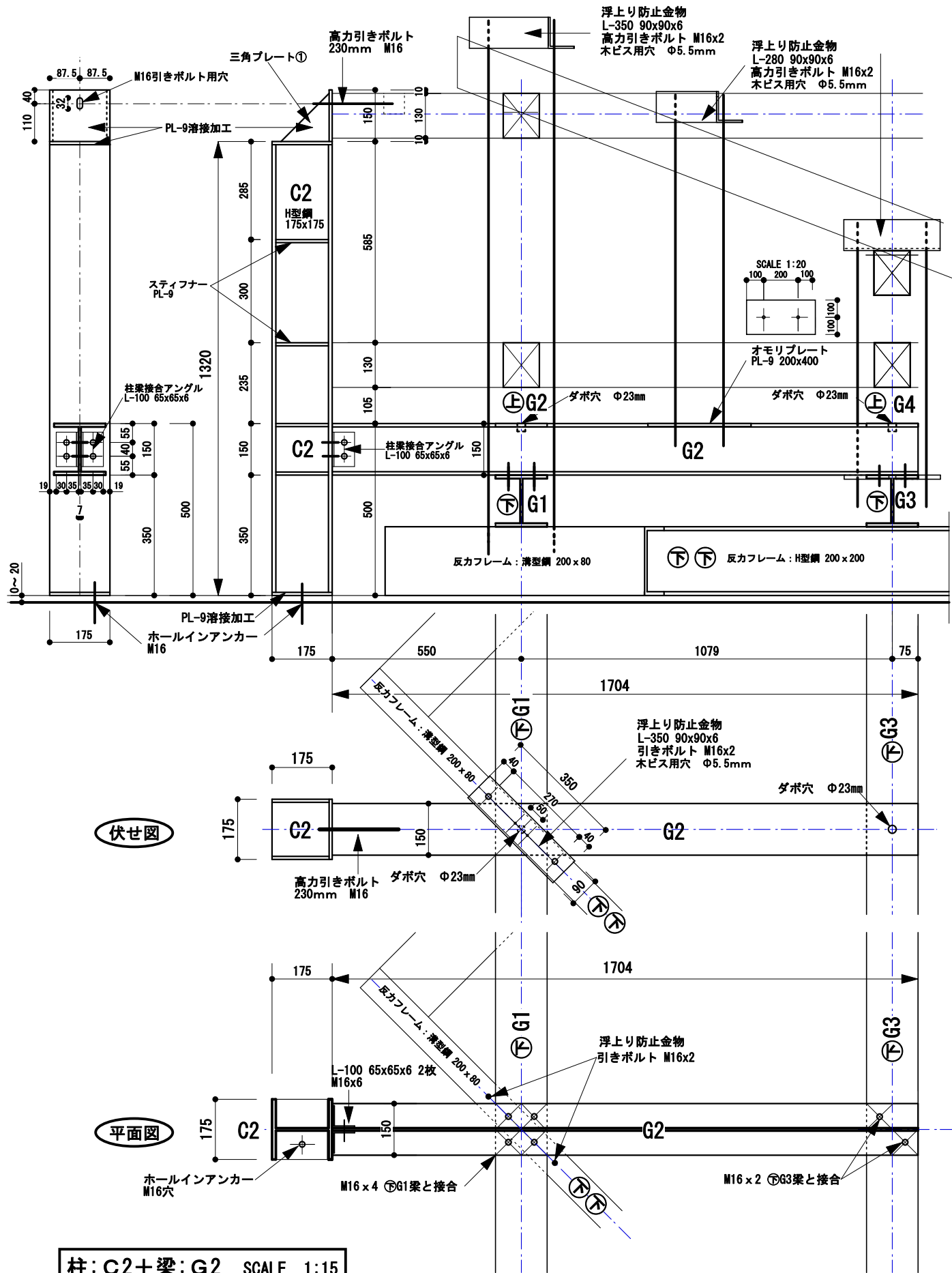


平面図 SCALE 1:30



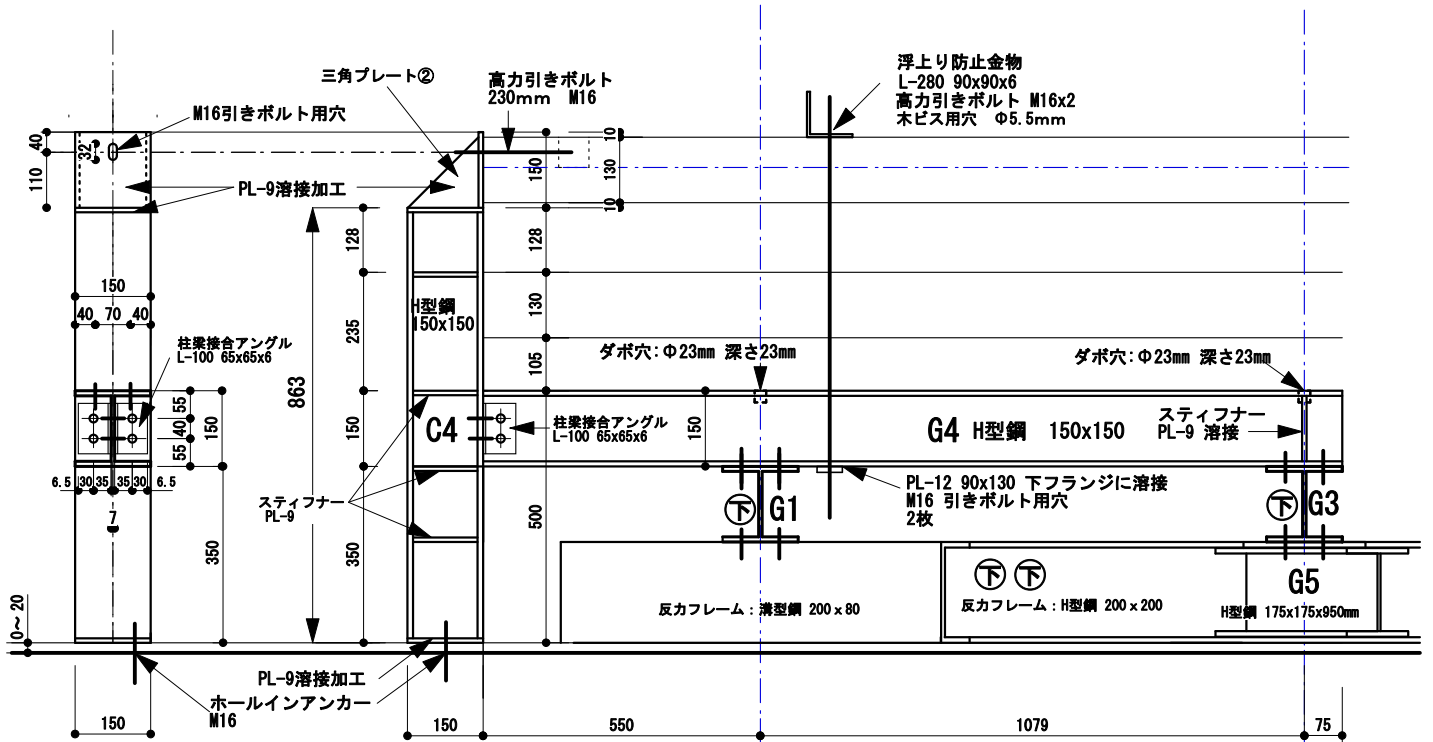
立面図 SCALE 1:30



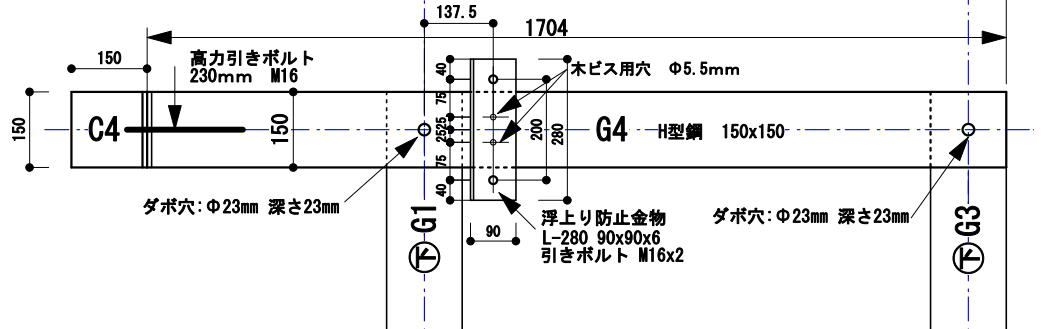


柱：C2+梁：G2 SCALE 1:15

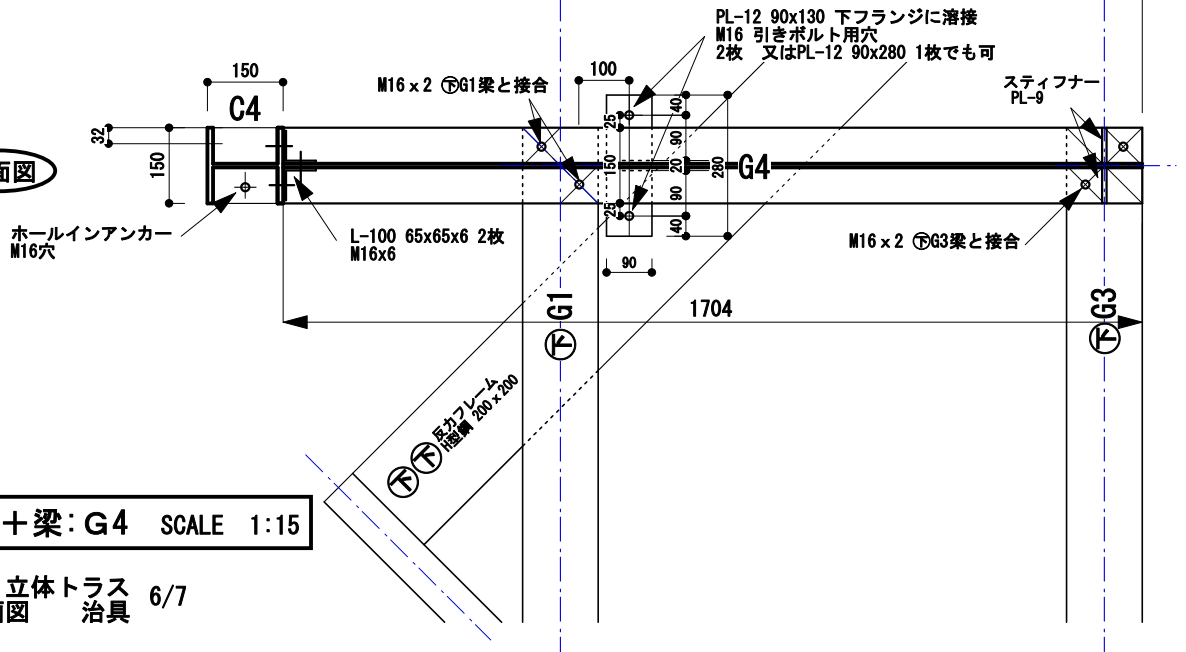




伏せ図



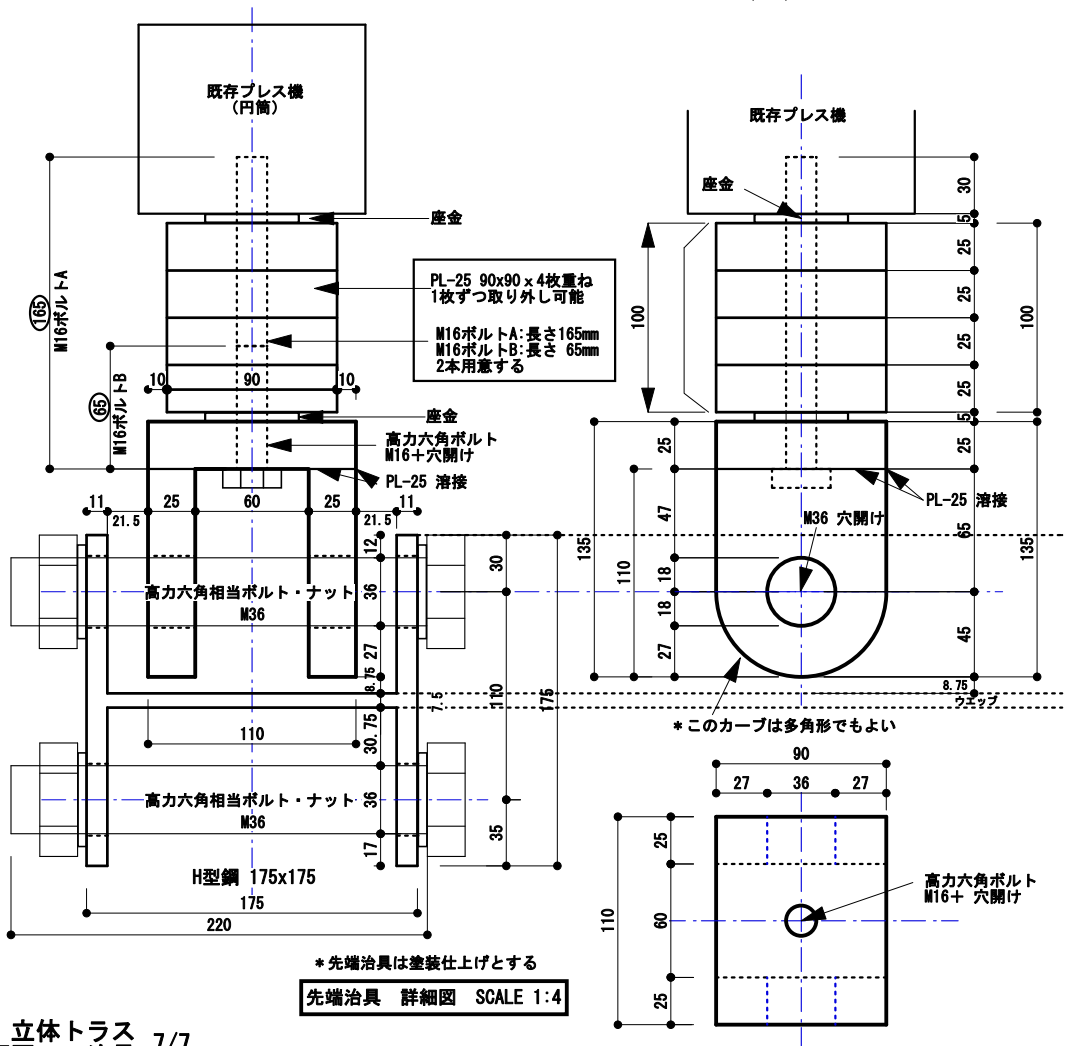
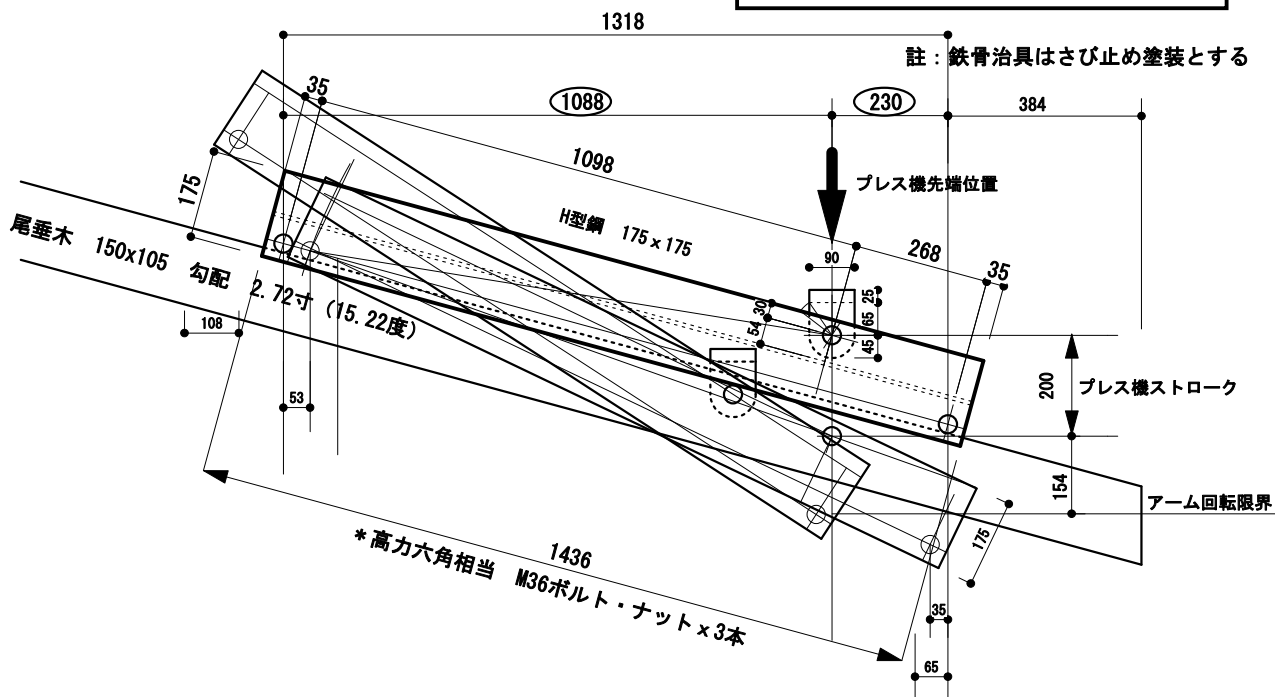
平面図



柱: C4 + 梁: G4 SCALE 1:15

法隆寺 立体トラス 6/7  
 実験計画図 治具

垂直荷重試験用 アーム鉄骨 SCALE 1:15



先端治具 詳細図 SCALE 1:4

法隆寺 立体トラス 7/7  
実験計画図 治具







## 第3章 (II) 歴史編

### 第3章 (II) 歴史編

#### 3.1 法隆寺の構造的異性に関する既往研究

澤村仁<sup>1)</sup>は世界最古の木造建築である法隆寺金堂について「その外観上の様式、内部の構造とも、唐以前の形式に属するものであることが早くから注目され…天平以前の古建築は法隆寺・法起寺等の斑鳩古寺群しか現存しないので、この様式が飛鳥時代の代表的実例と考えられていた。ところが戦後、各地で寺院跡の発掘調査が進み、単に伽藍配置の点だけではなく、構造や細部まで示すような成果が挙げられるようになると、飛鳥・白鳳時代の寺院建築はかなり多様な形をもつことが知られ、法隆寺様式が飛鳥時代の代表としてよいかどうか、疑問がもたれるに至った。」とし、また法隆寺を特徴づけている雲形肘木に関して「組物の構造的な考え方としては力肘木・尾垂木・入り側の束からなる直角三角形が垂木の奥・中・先をそれぞれ桁で支えて屋根面をつくるのが基本になっている。この三角形を力肘木の下面に沿って雲肘木が受けるわけである。」と述べている。

さらに「法隆寺建築の特異性は、雲斗雲肘木や柱胴張などの外見や架構のみでなく、伽藍全体に対する营造法式注1) 的企画の面をも重視すべきである。わが国ではこれ以前にもこれ以後にも徹底しなかった計画法であったことを考えると、これは再建時期に外国からまとまった一流派として持ち込まれたのではなからうか。その源は細部の様式では高句麗との親近性は認められるが、他の要素があることも軽視できない。やはり、当時滅亡した百済の建築を考えねばならないのではなからうか。これには中国南朝あるいは隋の江南の様式も細かく知る必要があると思われる。」と述べ、法隆寺の持つ複雑な一面を指摘している。

また鈴木嘉吉<sup>2)</sup>は「法隆寺様式の最大の特徴である雲形組物は、中国にも例がなく比較が難しい。二世紀ごろの漢代の石造物に曲がりくねった肘木を用いた例があり、それから発展したと推定はされるが、あまりに時代の開きがありすぎる。」とし薬師寺東塔の組物と比較している。図3-1, 2より外陣柱Bから出桁Dまでの距離は両者ほぼ等しいが、外陣柱Bから力肘木先端Cまでの距離は法隆寺の方が前に突き出ている。尾垂木尻は薬師寺の方が内陣柱Aまで引き込んで押さえているが、法隆寺は中間の束で支えている。両者を比較すると力肘木先端Cと出桁Dの距離は内部の引き込み長さと同比例している。したがって「薬師寺が尾垂木を梃子として用いているのに対し「法隆寺では天秤のように力のバランスが意図されている」と述べている。

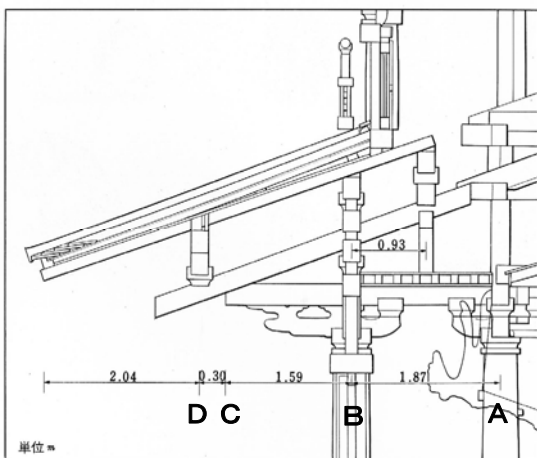


図3-1 法隆寺五重塔初重 断面図

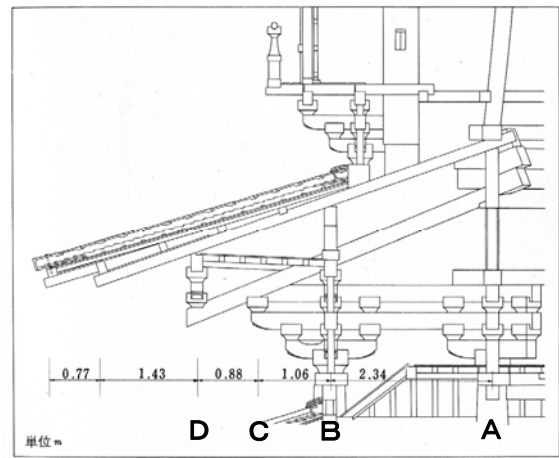


図3-2 薬師寺東塔初重 断面図

さらに「法隆寺の構造が極めて理論的であり、余分な材が全くないことがわかる。しかし力の均衡がいったんどこかで破られると、全体へ及ぼす影響は著しい……法隆寺様式は理論的ではあるが安全率の低い構造であり、長い経験に裏付けされない未熟な構法といえよう。」とし頭貫注2)にも言及している。法隆寺上層には頭貫がなく初層の頭貫も柱の上部に渡されただけと指摘し「頭貫は奈良時代になると柱へ釘止めされて柱同士をつなぐ構造材となり、鎌倉時代になるとさらに結合が強化される(図3-3)。法隆寺はまだその前段階にあり、地震や風による横揺れに対抗するためには、柱を必要以上に太くした。」と述べ、「雲崗では柱上の大斗を結んで横架材がかかり、その上に平三斗と人字束を配列する例が多く、頭貫はまだない。高句麗古墳の壁画も頭貫を欠き法隆寺も上層にはない。中国で頭貫を用いるのがいつ頃かよくわからないが、こうした点一つでも法隆寺の構造が薬師寺以下の奈良時代のもの、かなり掛け離れていることが明らかであろう。」としている。

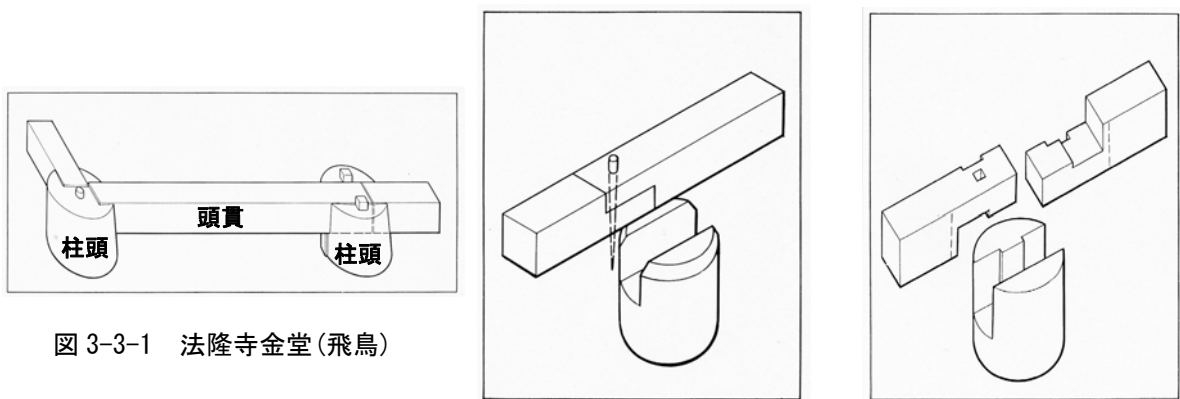


図 3-3-1 法隆寺金堂(飛鳥)

図 3-3-2 法隆寺伝法堂(奈良)

図 3-3-3 太山寺本堂(鎌倉)

また昭和の大修理で行われた補強工事に参加した棚橋諒<sup>3)</sup>は尾垂木と力肘木の三角形に対して「尾垂木を引張材として、雲肘木を圧縮材とするトラスの作用を兼ね備える」と指摘しているが、図3-4-Aのように軒先にかかった鉛直荷重 $P$ に対する水平反力 $T$ が十分に働かなかつたので軒が下がったと説明している。そこで五重塔では図3-4-Bのように三角トラスの回転防止用カウンターバランス $P''$ を作用させるために丸鋼タイバー8本で3, 4, 5層を締め付ける補強を行った。

棚橋は金堂の補強工事に関して、上層は図3-4-Aと同様な補強工事を行なったが(図1-14参照)、初層に関しては関与していないと述べている。

一方最後の修理工事所長を務めた竹島卓一<sup>4)</sup>は、法隆寺金堂架構の不可解さに最後まで悩み続けた。金堂初層内陣補強のため「有効に補強し得ていた」とされる慶長修理時に付加された繫梁を、「構造的には或は無謀な決断」をして最終的にはすべて撤去した。さらに内陣上層小屋組で実施されたような金属部材による補強工事を「今日より遥かに脆弱な状態で創立の初めから慶長の修理まで保ってきたのではないかと言う幾分神がかり的」な心境の中、合理的根拠を持たないにもかかわらず実施しなかったのである。

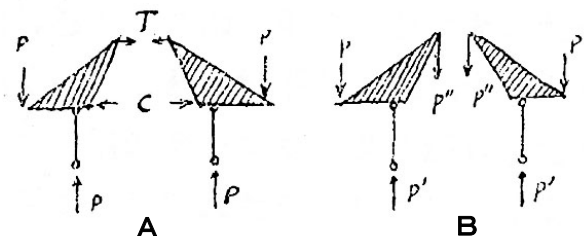


図3-4 法隆寺五重塔 力の作用図

### 3.2 中国古代建築の組物から法隆寺の雲形肘木へ

日本の古代仏教建築(図3-5)は基壇・礎石上に据えられた軸部(柱, 梁)と、軒・屋根を支える組物(斗拱)で構成されている。それらは中国大陸で発達し朝鮮半島を経由して、仏教伝来と共に日本に移入されたといわれている。中国に仏教が広まったのは後漢時代の紀元1世紀後半とされているが、春秋(BC770~BC476年)戦国(BC475~BC221年)時代の境頃には斗拱の原型が現れた<sup>5)</sup>といわれている\*3.8.1。残念ながら当時の斗拱そのものは現存しないが、漢代の陶製明器注3)にその具体的使用例が残されている。



図3-5 法隆寺金堂

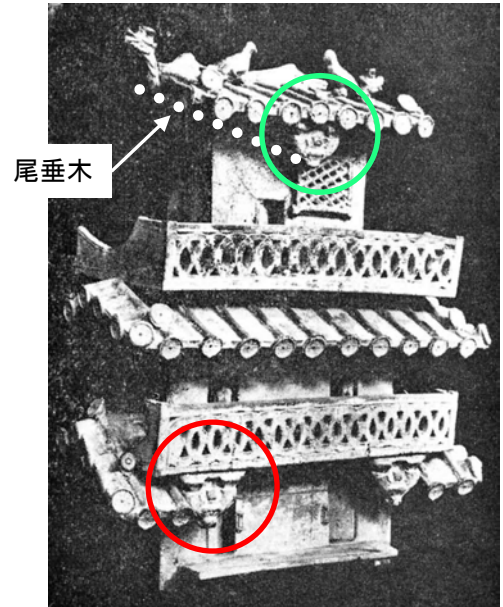


図3-6 漢代明器  
(ペンシルベニア大学蔵)

図3-6は竹島卓一が「营造法式の研究」<sup>6)</sup>の中で昂(尾垂木:白点線筆者加筆)の説明に使ったもので「尾垂木の原点は壁の上に支点を置いた」簡単なものであったという。最上層の軒先を詳細に見ると、「双斗」と呼ばれる秤肘木が尾垂木の先端に乗っている。「双斗」(図3-8)は「三斗」の先行型で組物発生の原形<sup>7-1)</sup>と考えられ、高句麗を経由して海を渡り法隆寺の雲形肘木(図3-7緑丸, 図3-9)に影響を及ぼしたとされている<sup>8)</sup>。

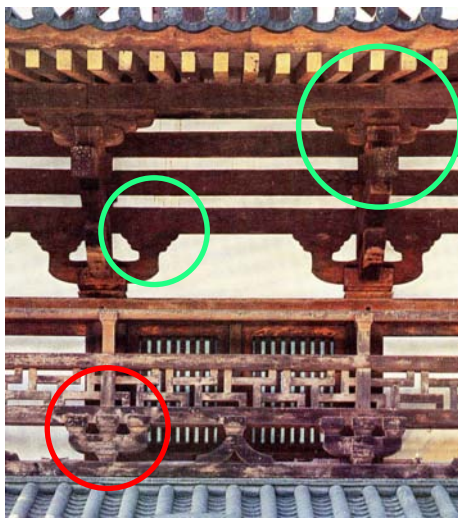


図3-7 法隆寺金堂 組物と高欄

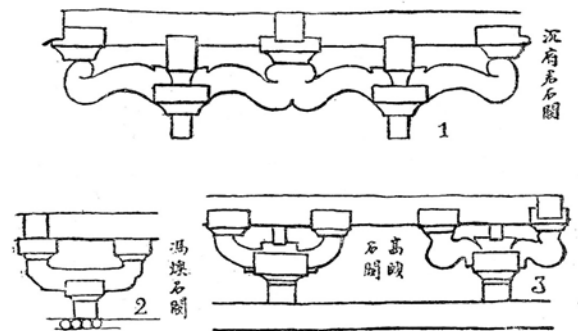


図3-8 漢代 四川省石閣 斗拱



図3-9 法隆寺金堂 雲斗

更にここで注目すべきは下層の高欄を支える斗拱が垂木(瓦)の上に乗っている事で、これはまさに法隆寺金堂の高欄を支える三斗の原型であると考えられる(図 3-7, 10 赤丸)。(中国南北朝・北魏の雲崗石窟の第 2 期 470~496 年頃には、卍崩しの高欄と共に殆ど同じデザインのものが残されている 図 3-11)

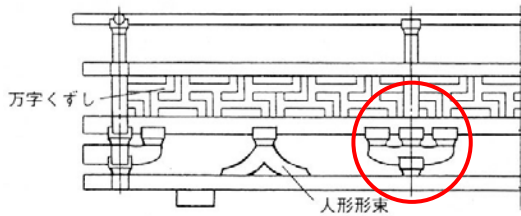


図 3-10 法隆寺金堂 高欄



図 3-11 雲崗石窟 第 10 窟

これ以後中国の尾垂木はしばらく姿を隠し、初唐時代(618~704 年)の敦煌壁画(図 3-12)や慈恩寺大雁塔(704 年)線刻仏殿図(図 3-13)までは尾垂木を使用していないが、盛唐時代(705~780 年)の敦煌壁画(図 3-14)や晚唐時代(848~907 年)の壁画では二重尾垂木が確認できる。しかし現存する中国最古の南禅寺大殿(782 年 図 3-15)では何故か尾垂木は使用されていない。また晚唐の仏光寺大殿(857 年 図 3-16)・独楽寺観音閣(遼 984 年)・隆興寺摩尼殿(北宋 1052 年 図 3-17)・仏宮寺釈迦塔(遼 1056 年)では尾垂木尻は内陣柱筋まで延びずに天井裏の繫梁で押さえられている。これらの架構は柱から上の部分を固めており(図 3-18)、水平剛性を高める点では合理的であるが隅部の配付尾垂木は十分に機能していない。その後北朝では善化寺大殿(遼 11 世紀 図 3-19)のように天井裏の尾垂木は短くなり華拱(挺出肘木)の先端化粧となってしまう。

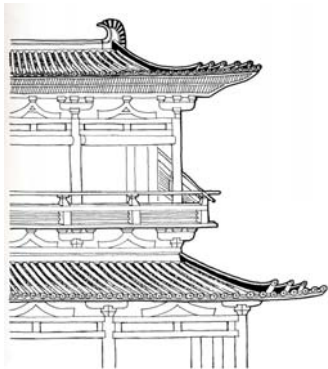


図 3-12 敦煌第 431 窟(初唐)  
初唐: 618~704 年

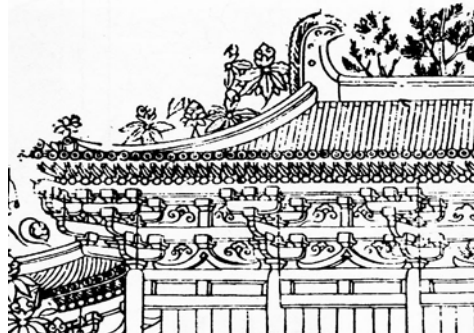


図 3-13 慈恩寺大雁塔 仏殿図(初唐)



図 3-14 敦煌第 172 窟(盛唐)  
盛唐: 705~780 年

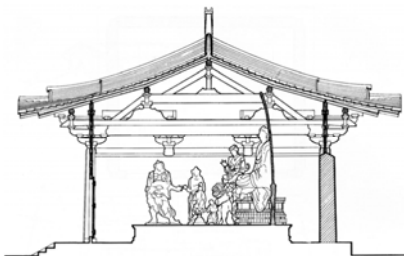


図 3-15 南禅寺 大殿(中唐)  
中唐: 781~847 年

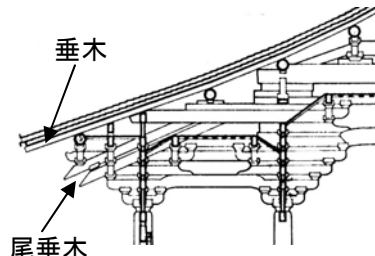


図 3-16 仏光寺 大殿(晚唐)  
晚唐: 848~906 年

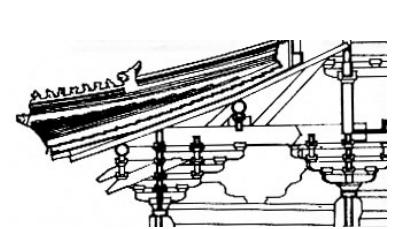


図 3-17 隆興寺 摩尼殿(北宋)  
北宋: 960~1127 年

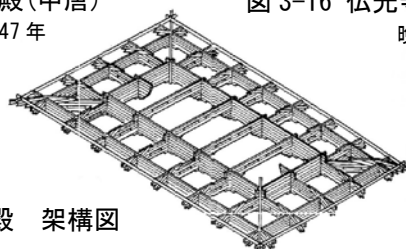
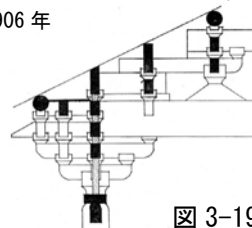


図 3-18 仏光寺大殿 架構図



遼: 947~1125 年  
図 3-19 善化寺大殿(遼)

山西省・仏光寺大殿(図3-20)と河北省・隆興寺大悲閣(図3-21)の組物を見ると、柱頭の一手先肘木と二手先肘木の間(白杵部分)には方斗がないが、詰組部分には方斗がある。この部分に「闇梨<sup>6)</sup>」(図3-22)と呼ばれる枋付板材が挟まれており、木材を積み上げる墨木式や板倉式に似ている。この納まりは河北省・独楽寺観音閣、山西省・仏宮寺釈迦塔でも同様である。(仏光寺では闇梨を白色に塗装している。)

日本でこの納まりに唯一近いものが法隆寺の雲形肘木である(図3-23、24)。伊東忠太は法隆寺の4段の通り肘木をさし「井楼式に組み四重に積み上げて…一種の校倉造の主義によっている」と記述している<sup>7-2)</sup>。伊東はこの時既に法隆寺金堂と古代中国建築の構造的共通性を直観していたのかもしれない。

(井楼組については\*3.8.2で述べる)

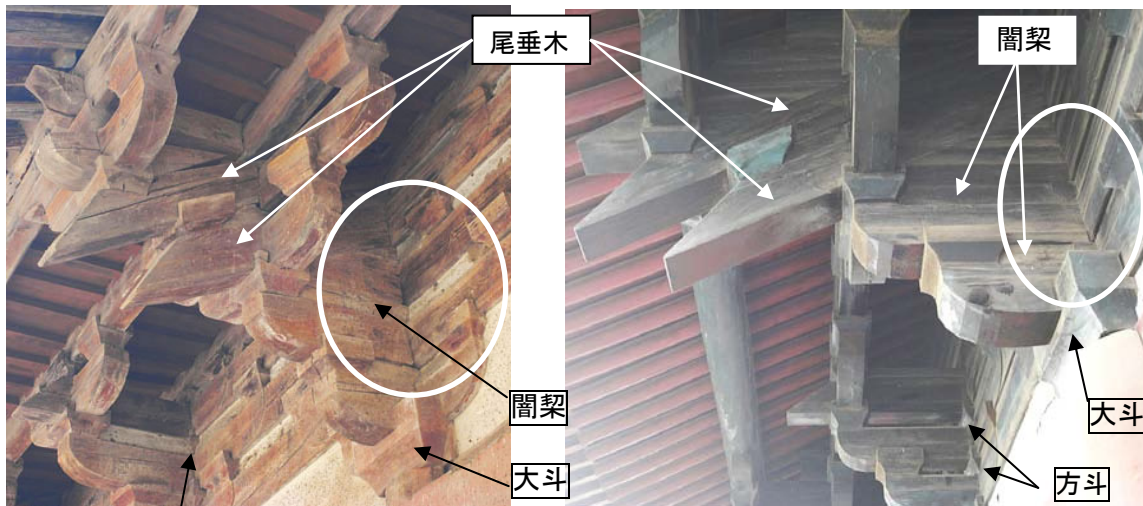


図3-20 仏光寺大殿

図3-21 隆興寺大悲閣

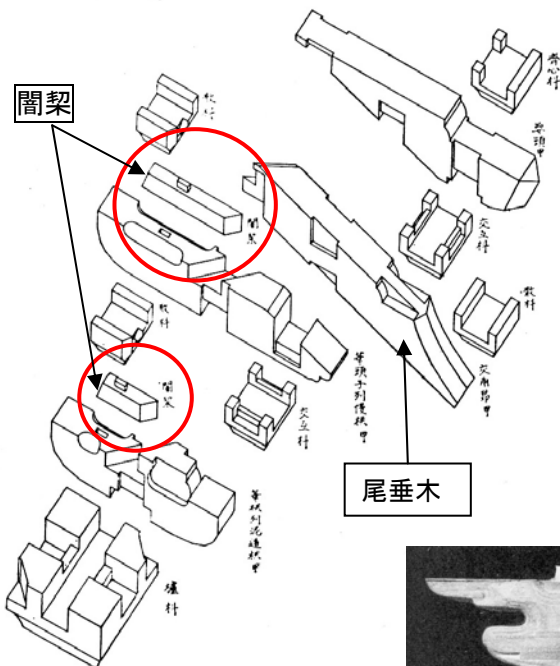


図3-22 营造法式 闇梨

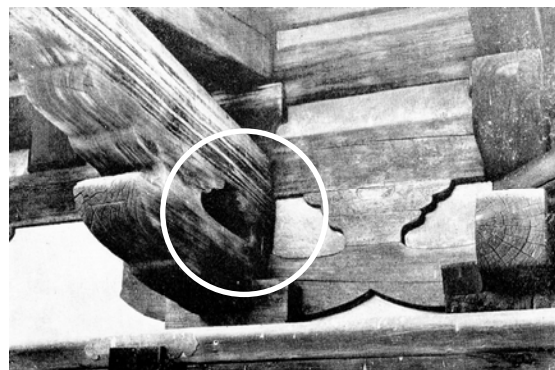


図3-23 法隆寺五重塔 雲形肘木

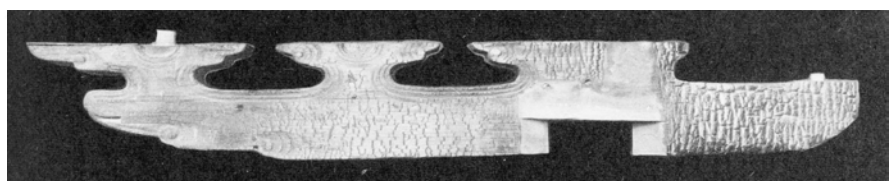
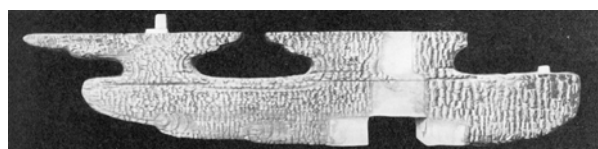


図3-24 金堂初層 雲形肘木

法隆寺の雲形部材は下の肘木と一体化し外壁から突き出ている(図3-23, 24)。さらに五重塔隅部(図3-25)では上の力肘木も含んで一本の部材から加工されている。構造的には組物を一部材から作り出した方が強い。この納まりは漢代明器の挺出型肘木(図3-26, 27)にイメージの原型があると思われる。それが中国・朝鮮半島を巡って進化したものが法隆寺であり、晩唐に至り山西省・河北省の地に生き残ったものが中国の古代建築であると考えられないだろうか。

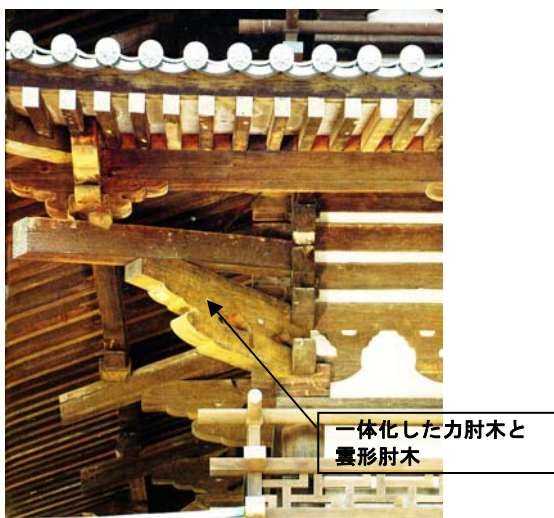


図 3-25 法隆寺五重塔 雲形肘木

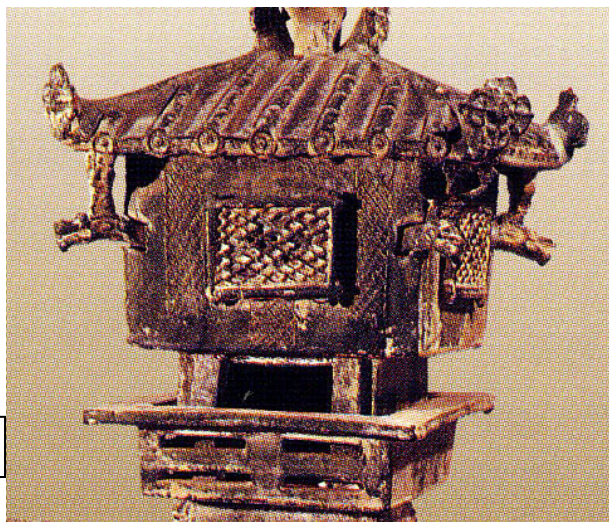


図 3-26-1 漢代明器 (出典注意)



図 3-27 漢代陶楼明器



図 3-26-2 漢代明器

\* 図3-26 は後漢代の陶楼明器で隅から45度方向に飛び出た肘木は「獸」の頭部で、底を支える双斗はまさに「角」を表現している。黒海北沿岸から流れて来た遊牧民族のスキタイ文化が、濱田耕作が指摘した雲崗石窟第12窟の柱上組物に掘りこまれた獸のデザイン<sup>8)</sup>などを通して法隆寺に影響を与えた可能性が考えられる。また白川芳郎はスキタイ文化が南シベリア・蒙古・トルキスタン・甘肅省を経由して陝西省または四川省・雲南省にまで伝搬したと文献的にも論じている<sup>9)</sup>。中国文化に取り込まれた「獸頭」は図3-27のように機能的に発展していく。

いっぽう朝鮮半島百濟(346~663年)の扶余で発掘された青銅小塔片(図3-28)には明らかに尾垂木が使われているが、現在の韓国では華嚴寺極楽殿(1605年図3-29)を除き尾垂木を使用した建築を確認できない。

法隆寺に残されていた工芸品「玉虫厨子」は三段の肘木に支えられた軽快に反った尾垂木を持っており、一枚の板を割りぬいて作られた軒先組物と一体化している(図3-30)。村田治郎はこれを法隆寺様式の「洗練」と解釈し金堂竣工後の製作としたが<sup>10-1)</sup>、現在では法隆寺金堂よりも様式が古く推古朝(593~629年)以降の作で7世紀中頃の早いころ<sup>11)</sup>とみなされている。

\* 青銅小塔片は角型(平使い)一軒扇垂木であり、玉虫厨子は丸型一軒平行垂木である。

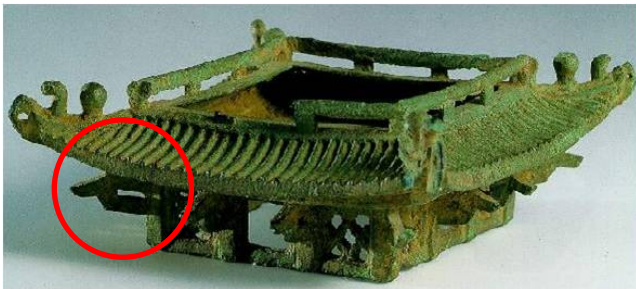


図3-28 青銅小塔片 扶余出土 百濟時代

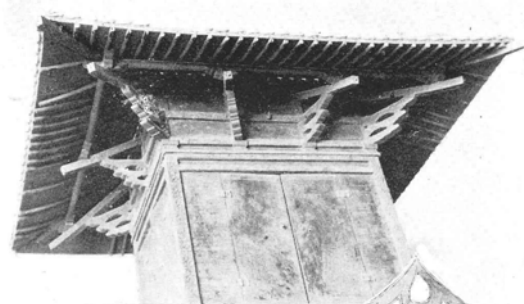


図3-30-1 玉虫厨子

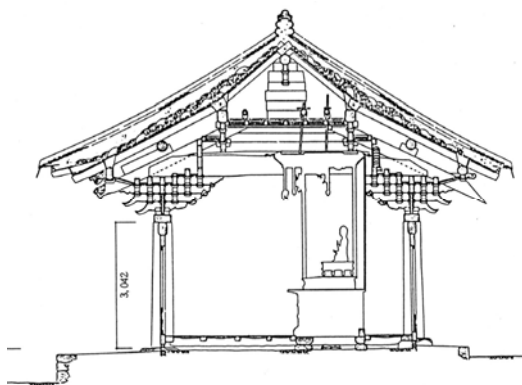


図3-29 華嚴寺極楽殿(切妻)

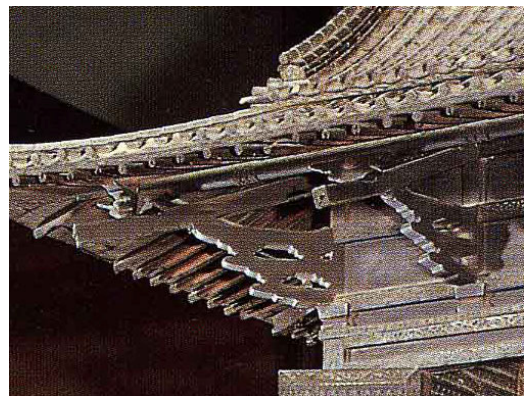


図3-30-2 玉虫厨子

中国の盛唐(705~780年)敦煌壁画において再登場した「尾垂木」は、晩唐の仏光寺大殿(857年)とほぼ同様の二重尾垂木・隅三組物注4)で完成されていた(図3-14)。しかし百濟の扶余(538~660年)で発見された尾垂木は極めてシンプルな一手先・隅一組物注4)である。おそらく長安・洛陽に起源をもつ「尾垂木」の発展過程で、①中国式の積層方式へと進んでいったものと②朝鮮半島日本へと流れてきた二つの流れが想定できる。

青銅小塔片・玉虫厨子ともに尾垂木(斜材)と力肘木(水平材)の三角形を正確に表現している。しかも隅一組物であることから、盛唐壁画より明らかに古い要素を持っていると考えられる。この「尾垂木+扇垂木」構法が仏教伝来(552年)に伴って日本に移入された事実は、四天王寺の「尾垂木+扇垂木」落下跡から確認できる(次節参照)。定説では6世紀末~7世紀半頃に創建された飛鳥寺・四天王寺・山田寺は扇垂木であったと推定されている。それが玉虫厨子・法隆寺金堂以降、「平行垂木」に転換していくのである。玉虫厨子の柔らかい曲線は雲形肘木の原型とみなすべきで、尾垂木の放射状配置は扇垂木の名残りである。玉虫厨子は法隆寺金堂の基本設計段階のコンセプトモデルであり、その実現にあたり金堂では直線部材を多用せざるを得なかったと考えられる。



### 3.3 四天王寺の扇垂木

昭和31年(1956年)その前年から行われていた発掘調査<sup>12)</sup>により、講堂地下から創建当時の扇垂木の落下跡が発見された。暴風により軒先がそのまま地面に落下したものであり、積み重なった屋根瓦の下から隅木や丸垂木の殆ど土と化した物が出てきたのである。木部は腐朽し丹土のみ残されて土中にその雛形を作っていたのである。その落下時期は同時に発掘された瓦の年代から平安時代前期と見られている。垂木の数は10本まで数えられ、金堂製風鐸や鉄鑿も同時に出土した(図3-31-1~4)。

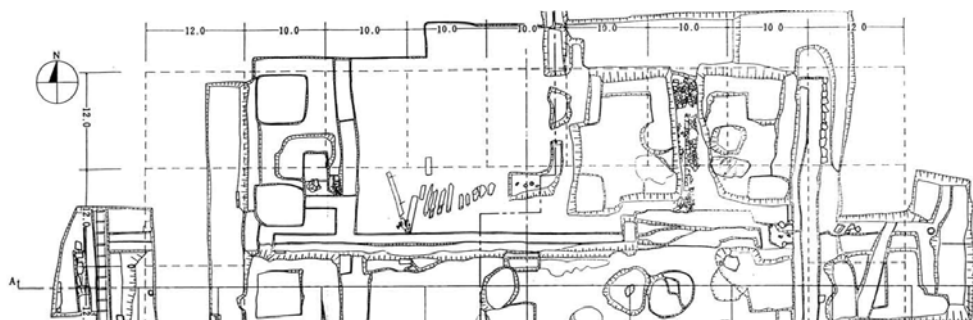


図 3-31-1 四天王寺講堂 発掘現場平面図 (一部)

報告書<sup>13)</sup>によると「このように一軒、丸垂木の扇垂木という形式はわが国では全く残されていないもので、建築史上極めて貴重な資料であるから、これを石膏型にとっておいた。」と記述してある。現在それらは四天王寺宝物殿ピロティーに保管しており、去る2006年12月7日に石膏型の実測調査を行った。それは5個のパーツに切り離して箱詰され保存状態は極めて良好であった(図3-32-1~3)。型をとった時に付着した土や砂がそのまま保存され発掘直後の雰囲気をよく伝えている。この発掘により仏教建築移入当初は日本でも扇垂木が採用されていたことが明らかとなった。

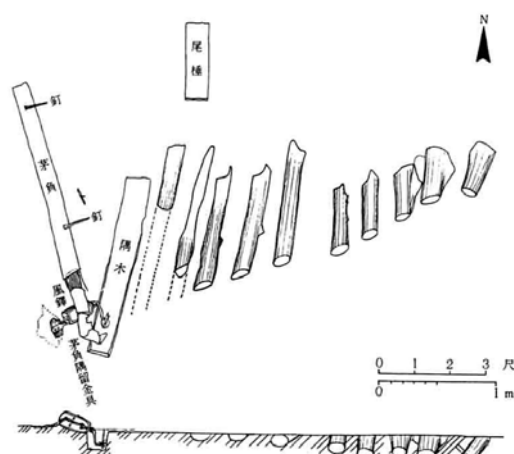


図 3-31-2 四天王寺講堂 尾垂木落下跡



図 3-31-3 発掘当時 南西側から



図 3-31-4 発掘当時 北東側から



図 3-32 四天王寺講堂 扇垂木石膏型



図 3-33 隅木から 6~7 本目

隅木から 7 本目の垂木先(図 3-32~34)の実測された楕円形カットの角度は約 55 度である。この角度は韓国ソウルにある景福宮(大型木造建築:軒先 4m ただし尾垂木を持たないかわりに飛檐隅木を持つ)(図 3-35)の 7 本目の扇垂木の角度に当てはまる。しかも発見された位置は景福宮の二重垂木先端位置にかなり近い。また垂木直径は 140~150mm で先端を軒先ラインに合わせて楕円形にカットしてあり(図 3-33, 34), 楕円の長径は 170~180mm で一部に塗装の丹が石膏型に付着し垂木表面の木目もはっきり確認できた。このことから講堂は尾垂木と丸桁を持った一軒扇垂木であろうと思われる。しかし後述するように扇垂木にしては垂木直径がいささか細い。逆説的であるが, その事によりサポート柱の追加を余儀無くされたのではないかと推測される。

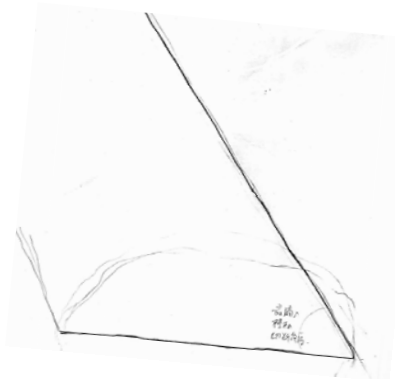


図 3-34 7 本目 垂木先実測図

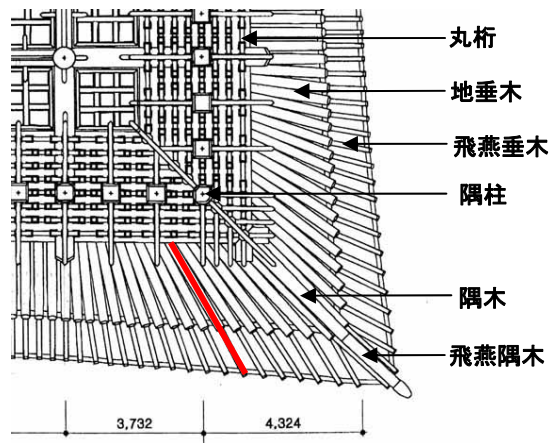


図 3-35 景福宮 天井伏図

また尾垂木(図 3-36)は幅 200mm 前後・高さ 200mm 以上で先端がカットされ勾配は約 0.37 であった。もしこれが平行き尾垂木であり, 先端が垂直にカットしてであると仮定すれば法隆寺金堂初層の尾垂木勾配 0.384 とほぼ等しかった事になる注 5)。しかし天地逆になった石膏型の尾垂木先端を観察すると平面的に 45 度回転した菊斗(鬼斗)らしきものが確認された。もし隅尾垂木の先端が垂直にカットされていたとしたら平行き尾垂木の勾配は 0.52 となり急勾配にすぎる。したがって四天王寺金堂の隅尾垂木は下端が前に出た仏光寺大殿(図 3-14)の納まりに近かったと考えられる。更に落下跡の状況から尾垂木は 45 度方向にだけ挺出する隅組物であったと推測される。

しかし日本の古代建築では尾垂木の先端下部が前に出る例が殆どなく、尾垂木の先端ぎりぎりに菊斗をつけたものもない。薬師寺東塔の菊斗(図 3-38)は比較的尾垂木先端に近いが、中国の例ほど先端ではない。その薬師寺と同様の位置に、法隆寺金堂と五重塔の隅尾垂木先端には菊斗らしき仕口の渡り臑がダブルで残されている(図 3-37)。五重塔の修理工事報告書<sup>14)</sup>では隅木先端を支えた束の仕口であった可能性を指摘している。さらに大宝蔵院に展示してある五重塔の模型では尾垂木先端に斗が二重に復元してあるが、仕口の距離が近すぎるのでその効果は薄いのではないだろうか。部材の刻み段階で隅尾垂木先端に菊斗を予定していたが、何らかの事情でその位置を変更したと考えることも可能であろう。(但し菊斗が隅尾垂木に対して 45 度振れているのは法隆寺だけに見られ、他の中国・日本の古代建築では殆ど見られない納まりである。)



図 3-36 四天王寺講堂 尾垂木先端

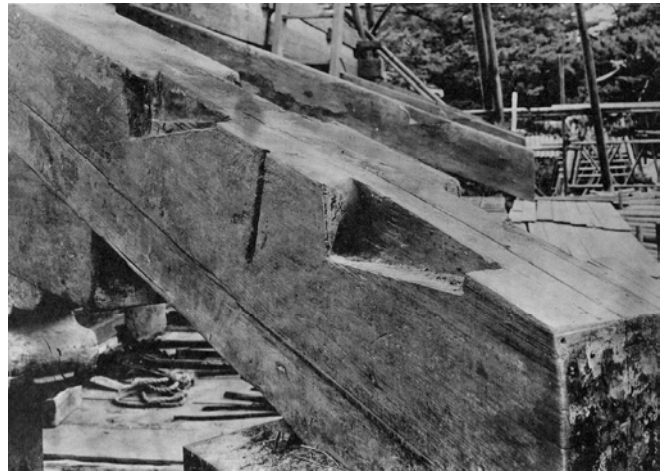


図 3-37 法隆寺金堂 尾垂木先端



図 3-38 薬師寺東塔 軒先隅部組物

### 3.4 垂木先瓦

関野貞は垂木先瓦について「これらは楽浪郡，百濟，新羅時代にも見られわが国上代に於いても発見されており…<sup>15)</sup>」と述べている。実際に出土しているのは飛鳥寺(図3-39-1)，山田寺(図3-39-2)，坂田寺，桧隅寺，大官大寺，栗原寺，京都の広隆寺，河内の新堂廃寺，九州の上岩田廃寺などである。広隆寺は聖徳太子と縁が深かった朝鮮渡来人の「秦」氏が太子追善の為に建てたといわれ，飛鳥はもちろん河内と筑紫は仏教到来初期の大陸との関係が深い地域である。また新堂廃寺(図3-39-3)の垂木先瓦は楕円形で，四天王寺の扇垂木落下跡石膏型の先端斜切りの実例から判断すると，新堂廃寺は扇垂木であったに違いない。



3-39-1 飛鳥寺  
124 mm~150mm



3-39-2 山田寺 E種瓦 176mm



3-39-3 新堂廃寺  
大きさ不明(大川清氏蔵)

図 3-39 A 垂木先瓦  
(特記なきものは奈良文化財研究所蔵)

表 3-1 日本の古代建築と韓国の復原建築の垂木寸法注6)

	平行垂木+二軒	丸：地垂木	角：飛檐垂木
日本	薬師寺東塔 <sup>*1</sup>	φ 136~152mm	角91X 121mm
	唐招提寺金堂 <sup>*2</sup>	φ 139~152mm	角 寸法不明
	新薬師寺本堂 <sup>*3</sup>	φ 126~138mm	角90X 112mm
韓国	風停寺極楽殿 <sup>*4</sup> (一層切妻)	φ 136~151mm	角82× 109mm
	華溪寺大雄殿 <sup>*5</sup> (一層入母屋)	φ 135~167mm	角73X 118mm
	景福宮勤政殿 <sup>*6</sup> (二層入母屋)	φ 242mm	角132X 194mm

また山田寺では7種類の垂木先瓦が発掘されており<sup>16)</sup>金堂周辺ではA種(167mm)とE種(176mm)，塔周辺ではB種(156mm) B'種(147mm) Ca'種(142mm) Cb種(142mm)，回廊周辺ではD種(139mm)が集中している。主要伽藍全てに丸垂木が使用され，しかも金堂で使用されたと推測される丸垂木の直径167~176mmは日本に現存する建物の丸垂木と比較するとかなり大きい。飛鳥寺で発掘された垂木先瓦の直径24mm~150mmは四天王寺の扇垂木の直径と似通っている。

表 3-1 で日本と韓国における丸垂木の直径を比較してみる。共に一軒丸垂木の例が殆ど残っていないので丸地垂木を対象とした。韓国では現存する寺院および宮殿建築で切妻屋根以外では全て扇垂木を採用している。華溪寺大雄殿(一層入母屋：7.3m×4.6m)は小規模寺院であるが垂木の最大直径167mmはかなり大きい。景福宮勤政殿(二層入母屋：30.2m×20.9m)は韓国最大の木造建築で軒先が4m以上張り出しており垂木の直径が242mmである。

図 3-39 B で韓国百済時代の発掘瓦を示す。軍守里寺と定林寺は共に塔・金堂が一直線に並んだ「四天王寺」式伽藍配置である。特に国立中央博物館の百済垂木先瓦は直径 190mm あり、その大きさが際立っている。さらに扶餘の窯跡から発見された方形垂木瓦から既に角垂木が使用されていたことがわかるが、103mm 角なので飛檐垂木に使用されたものかもしれない。方形の垂木瓦は福岡の井上廃寺でも発見されている(図 3-39-8)ので、小径の角垂木は朝鮮半島経由で日本に移入された可能性も考えられる。その時に扇垂木の一軒角垂木であったとするには断面が細すぎるように思われる。その根拠は次頁に添付した扇垂木の実例計算による。



3-39-4 軍守里寺址  
垂木先瓦 147 mm



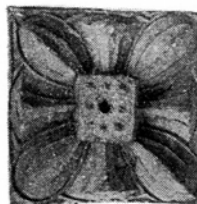
3-39-5 定林寺址  
垂木先瓦 157 mm



3-39-6 百済 垂木先瓦 190 mm  
(国立中央博物館蔵)



3-39-7 百済 佳塔里  
方形垂木先瓦 103 mm



3-39-8 福岡 井上廃寺 方形垂木先瓦  
大きさ不明(大川清氏蔵)

図 3-39 B 垂木先瓦  
(特記なきものは国立扶餘博物館蔵)

以上の事から日本の仏教移入直後に建てられたと思われる仏教寺院は丸垂木を採用し、その直径が比較的大きい傾向があり、実際に扇垂木を採用している韓国の建築では垂木直径は更に大きかったことが確認される。

\* 次頁に参考資料として筆者が過去に行った扇垂木の実例計算とその考察を添付する。  
実験編 54 頁「扇垂木の軒先垂下計算」と共に参照してほしい。

参考資料

韓国の扇垂木の直径

既に述べたように韓国に現存する寺院及び宮殿建築で切妻以外は全て扇垂木構造である。

**鳳停寺極楽殿**は切妻屋根であるが韓国最古(12~13世紀)の木造建築といわれている。

**華溪寺大雄殿**は小規模(7.307×4.574m)ながら入母屋二軒構造、**景福宮勤政殿**(1862年再建)は大規模建築(30.187×20.917m)で軒先が4m以上も張り出している。

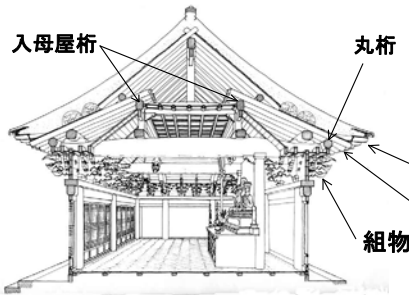
扇垂木	丸：地垂木	角：飛檐垂木
図①鳳停寺極楽殿(一層切妻)*4	: φ136~151mm	角：82X109mm
図②華溪寺大雄殿(一層入母屋)*5	: φ135~167mm(平均148.7mm)	角：73.3X118.1mm(平均)
図③景福宮勤政殿(二層入母屋)*6	: φ242mm	角：132X194mm



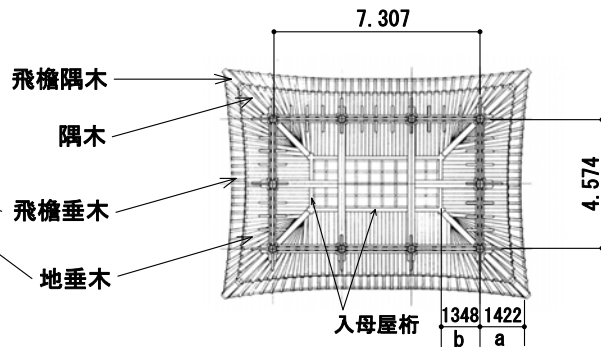
図① 鳳停寺極楽殿



図② 華溪寺大雄殿



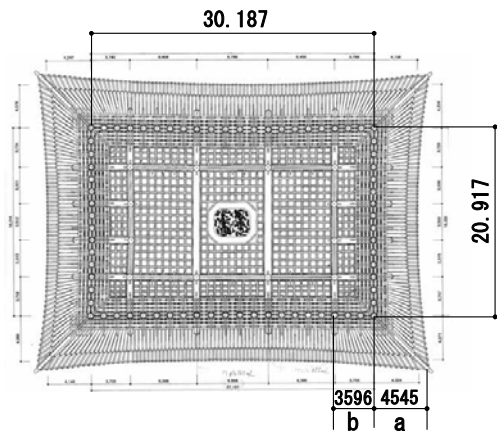
図② 華溪寺大雄殿 断面パース



図② 華溪寺大雄殿 小屋伏図



図③ 景福宮勤政殿



図③ 景福宮勤政殿 上層天井伏図

## 扇垂木の実例計算とその考察

次に以下の建築について軒先部分の垂下を予測する。

A) 華溪寺大殿 B) 景福宮勤政殿 C) 法隆寺金堂 D) 四天王寺 E) 山田寺

- それぞれの建築に関して、垂木、隅木、尾垂木の寸法から断面2次モーメントを算出する。
- 華溪寺と勤政殿は二軒なので、これを一軒と仮定して、外周柱心から軒先端までを **a** とする。  
内陣柱または入母屋までを **b** とし実測値を代入する。
- 法隆寺金堂を扇垂木で作ると仮定した時の軒先垂下を予測する。
- 四天王寺は軒先落下跡からの実測値、山田寺は垂木先瓦の実測値を代入する。  
**a b** の値は法隆寺と同サイズと仮定する。 **\*\* 計算根拠は実験編54頁参照**

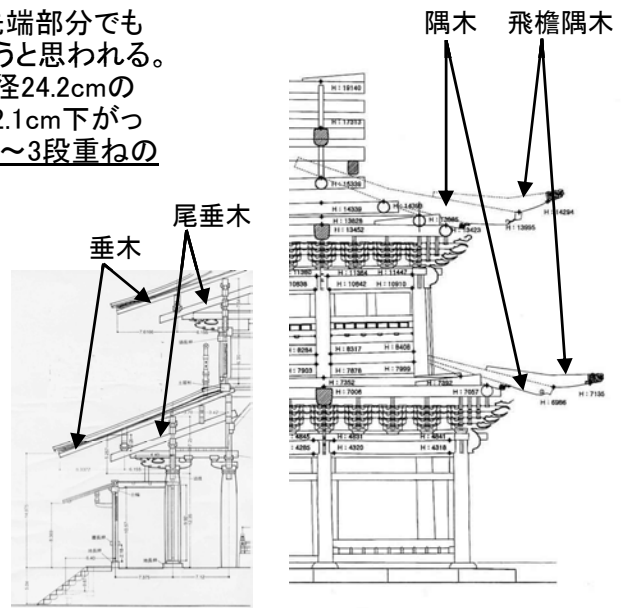
表1 扇垂木の軒先垂下計算 (\*1~\*6)

建築名称		A	B		C						D		E		
部材名称		華溪寺	勤政殿		法隆寺金堂 (扇垂木と仮定して)						四天王寺		山田寺		
形状		地垂木	地垂木	○	隅木	尾垂木	□	力垂木	地垂木	□	尾垂木	扇垂木	扇垂木		
巾		B cm	初重	上重	□	隅行き	平行き	□	初重	上重	□	○	○		
巾	B cm				23.0	21.5	21.5	13.6	12.1	11.8	20.0				
直径	φ cm	14.9	24.2	24.2								14.5	17.6		
高さ	H cm				24.8	30.0	27.0	19.6	14.7	14.6	20.0				
断面2次モーメント	I cm <sup>4</sup>	2400	16836	16836	29235	48398	35164	8533	3203	3060	13333	2170	4710		
ヤング率 上級検	E KN/cm <sup>2</sup>	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100		
a	cm	142.2	402.8	454.5	439.0	439.0	439.0	439.0	439.0	439.0	439.0	439.0	439.0		
b	cm	134.8	152.7	359.6	215.7	215.7	215.7	215.7	215.7	215.7	215.7	215.7	215.7		
瓦屋根	0.00024KN/cm <sup>2</sup>	*A		*B	*C					*D		*E	*D		
軒先垂下 δ (cm)	大規模 N=18 平	隅	0.3	4.7	11.8	4.6	2.8	3.8	15.8	42.0	43.9	10.1	61.9	28.5	
		平	0.0	0.8	2.1	0.8	0.5	0.7	2.8	7.4	7.8	1.8	10.9	5.0	
		小規模 N=9	隅	0.5	9.4	23.6	9.2	5.5	7.6	31.5	83.9	87.8	20.1	123.8	57.0
		平	0.1	1.7	4.2	1.6	1.0	1.4	5.6	14.8	15.5	3.6	21.9	10.1	

註1: ヒノキのヤング率 E=1100KN/cm<sup>2</sup> は日本建築学会の基準弾性係数  
「木質構造設計基準—許容応力度・許容耐力設計法—」2002年度版による  
註2: 屋根荷重 0.00024KN/cm<sup>2</sup> は(財)日本建築防災協会編  
「耐震診断プログラム」から「非常に重い建物」の屋根荷重による

### 考察:

- \*A 小規模な華溪寺では垂木直径14.9cmあれば隅行き先端部分でも0.5cmしか下がらないので、隅木なしでも充分であろうと思われる。
- \*B 勤政殿の上重庇は法隆寺と同様な規模であるが、直径24.2cmの垂木でも隅行きでは11.8cm下がる。平行き部分でも2.1cm下がってしまう。そのため隅行き部には日本の桔木に似た2~3段重ねの隅木が入っている。図⑤
- \*C 法隆寺の場合隅行き(45°)方向に隅木と尾垂木が出ているので断面2次モーメントは合算効果となり軒先垂下は1.7cmと予測される。図④
- \*D ただし扇垂木の場合隅行き方向のすぐ隣の垂木も隅木と同じ程度の過重負担をしているので40cm以上も下がる。法隆寺の角垂木はφ16cm相当の丸垂木に相当するので山田寺相当のφ17.6cmの垂木でも不十分(28.5cm下がり)で少なくとも勤政殿(φ26.2cm)以上の太い垂木が必要である。
- \*E 四天王寺で発掘された垂木(φ14.5cm)では韓国の例から言って華厳寺並の小規模建築が相応しいと思われるが、垂木の角度と本数、尾垂木の痕跡を考慮すると中規模以上のものが予想されるがそれにしても垂木が細過ぎる。二軒であった可能性もある。



図④ 法隆寺金堂

図⑤ 景福宮勤政殿

### 3.5 扇垂木から考察する山田寺

一般的に木造の仏教建築は身舎柱(内陣柱)と側柱(外壁柱)は正確にグリッド上に乗る。しかし山田寺金堂の特異な柱配置(図 3-40-1)はよく知られ、同様の柱配置を持つものに穴太廃寺、夏見廃寺、正家廃寺など山岳小規模寺院跡にその例が見られる。これは一般屋根架構からは発想しにくい柱配置であるが、法隆寺金堂(図 3-40-2)と扇垂木の特徴からその類推が可能である。

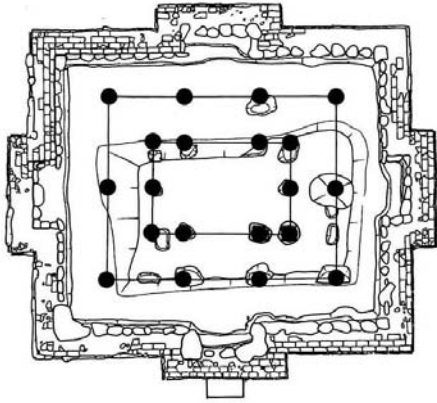


図 3-40-1 山田寺金堂 礎石復原図

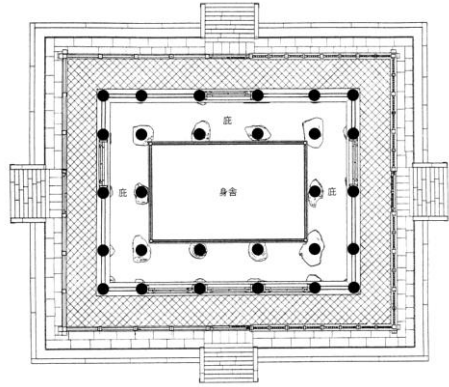


図 3-40-2 法隆寺金堂 礎石配置図

山田寺金堂(643年)は昭和57年に発掘された東回廊の木造遺構から法隆寺金堂(7世紀後半)と比較されることが多い。しかし建立時期も近く同規模の建築でありながら伽藍配置(山田寺は中門・塔・金堂が一直線の四天王寺式)・柱配置・垂木形状(法隆寺:角垂木, 山田寺:丸垂木)などその違いが際立っている。上図のように法隆寺の初層柱は一般的な28本であるが、山田寺はかなり少ない20本である。この事から山田寺金堂は二層(諸寺縁起集によれば「一間四面二階」)であったとすれば、上層平面が初層平面に比べかなり小さく見えていたことが予想される。

また法隆寺の平行き三角トラスの底辺を形成する力肘木は「は」「と」通りは3連結、「三」「九」通

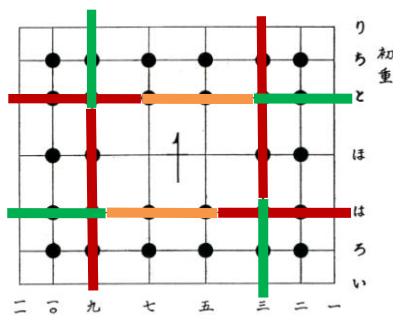


図 3-41-1 法隆寺金堂初重力肘木(一の通り肘木)連結状況

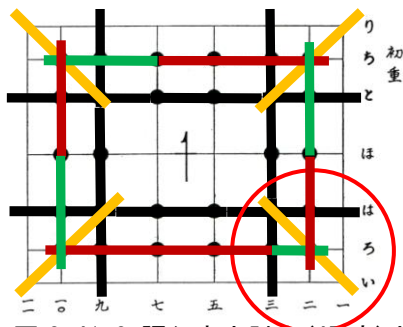


図 3-41-2 隅行き力肘木(45度)と二の通り肘木の連結状況

りは2連結され圧縮軸力を伝達している(図 3-41-1)。その上に隅行き(45度)の力肘木が同面で重なり、更にその上に「渡り腮」仕口で「一段目の通り肘木」が重なっている(図 3-41-2, 図 3-42-1)。それにより隅の4本柱は緊結され(赤丸), 架構は安定する。また中段水平材として斗を挟んで重なる「二段目の通り肘木」は、上段水平材の尾垂木掛けと共に引張軸力を負担している事が実験で確かめられている(図 3-42-2)。つまり法隆寺式トラス架構は「ろ」「三」と「は」「二」の2本の柱が大変効果的で、隅柱4本が一体化した構造となっている。これが金堂の立体架構を支える根幹と考えられる。

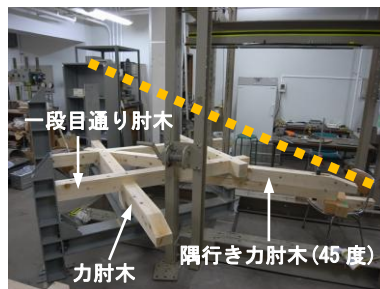


図 3-42-1 試験体 組立段階 1



図 3-42-2 同 組立段階 2



一方法隆寺と比較して隅柱の2本が欠けている山田寺(図3-43-1)では、平行き尾垂木に集中した垂直荷重を6mの桁梁のほぼ中央1点で支えるのは負担が大きいと考えられる。尾垂木が使用されていた可能性は残るが、おそらく法隆寺金堂(図3-43-2)とは異なる架構であったと推測される。発掘調査報告書によれば山田寺金堂の土壇上に残された割り込みのある2個の地覆石からサポート柱の存在が指摘されている<sup>16-2)</sup>。もし四天王寺講堂と同様に尾垂木が使用されていたとすれば、柱筋に対して直角に挺出(図3-42-1)していたであろうから、サポート柱は柱筋に位置していたと考えられる。本格的な組物を使用していたならば法隆寺金堂のような一般的な柱配置にするのが合理的(図3-43-2)と考えられるので、山田寺金堂では、尾垂木を効果的に使用することがまだ充分に出来ていなかったと推測される。

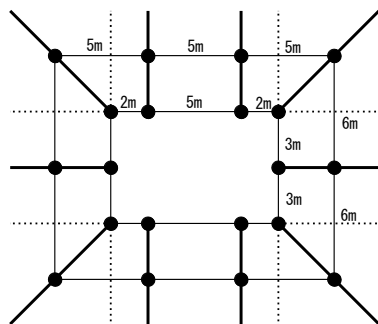


図 3-43-1 山田寺金堂 尾垂木想定図

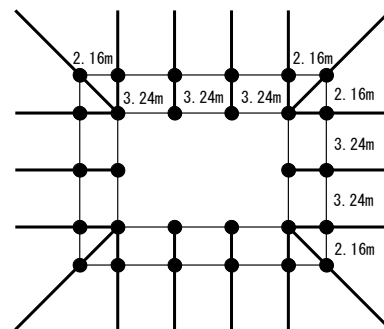


図 3-43-2 法隆寺金堂 尾垂木配置図

もし原型が三間×二間の小規模・扇垂木・入母屋(図3-44-1)であったとして、規模拡大の為に外陣柱を追加し側廊を付け足す(図3-44-2)と、扇垂木は「要」の位置まで延びる必要はなくなる(図3-44-3)。代りに軒先として外部へ伸ばすと図3-45となり、これは山田寺金堂の推定架構図と考えられる。

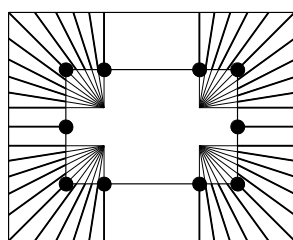


図 3-44-1

小規模 扇垂木架構想定図

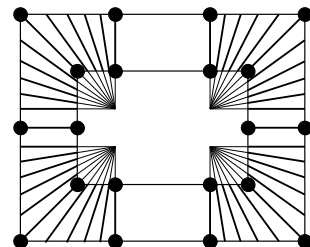


図 3-44-2

中規模・扇垂木 架構想定図

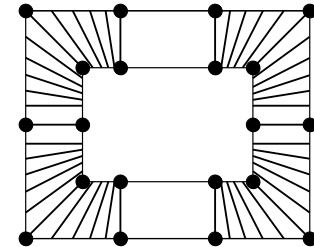


図 3-44-3

そこで垂木の「要」は必ずしも内陣隅柱位置にある必要はないが、隅屋根にかかった鉛直荷重は扇垂木の1本1本に均等に分担される。実験編で検討したように、扇垂木は軒先隅部の荷重を満遍なく負担するが、隅木と同様の太くて長い垂木が数多く必要とされる。その短所を補う架構法が「平行垂木」を使用した法隆寺式架構法であったと仮定すれば、法隆寺はまさに「扇垂木」から「平行垂木」への構造的転換点に位置する建築物であったと考えられる。いずれにしても山田寺金堂は、法隆寺金堂と同規模でありながら柱の本数が8本も少ないので、平屋を想定したものか一回り小規模なものを対象とした架構法であったと推定される。

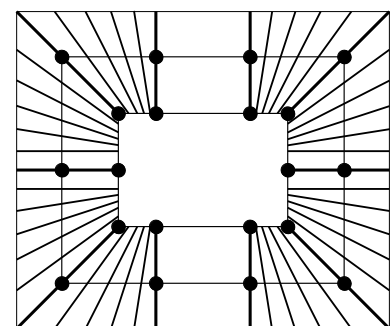


図 3-44-4 山田寺金堂 推定図

【参考】

筆者はこの山田寺式柱配置の中國大陸・朝鮮半島での報告例に接することができなかった。しかし偶然にも台湾鹿港の龍山寺山門(図3-46)を実見し、その柱配置が山田式を踏襲していることを確信した。これは山門で、しかも中心軸上に磚積壁が入り込んでいるので正確には山田寺と同様とは言えないが、入母屋二層門で貫を使用した宋様式に近いものである。扇垂木の形状は平角でグリッドに乗らない柱は扇の要からは少しずれているが二層目の外壁隅柱である。また龍山寺は18世紀に福建省から移築された台湾最古の仏教寺院といわれ、南朝首都建康(南京)から寧波経由で台湾までその様式が伝播してきたものと思われる。



図 3-45-1 台湾鹿港 龍山寺山門

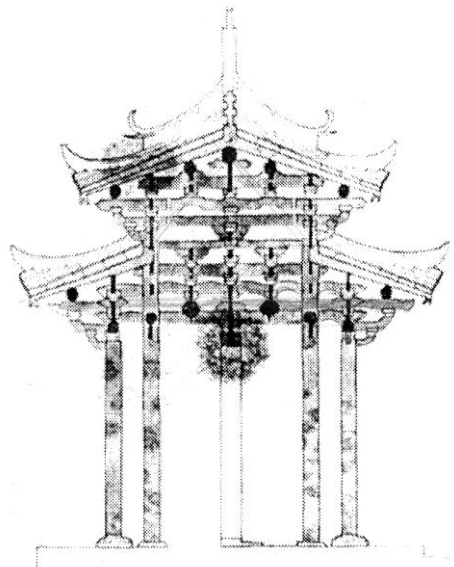


図 3-45-2 龍山寺山門 断面図

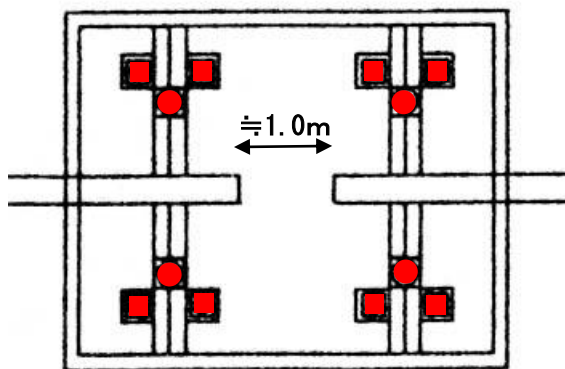


図 3-45-3 龍山寺山門 平面図



図 3-45-4 龍山寺山門 軒先隅部

### 3.6 意図されたトラス原理と立体架構

#### 3.6.1 扇垂木の特徴

[1.1 問題提起][3.3 四天王寺の扇垂木]で指摘したように扇垂木は大規模・小規模に関わらず其々の垂木が均等に屋根荷重を負担していることが分かる(図 3-47-1,2)。一方平行垂木では隅部の配付垂木は隅木にぶら下がっているため、荷重は隅木を通して隅行き尾垂木に集中することになる。以上の事から「扇垂木」は軒先隅部の荷重を満遍なく負担するが、垂木の先端に行くほど負担荷重は増える。さらに法隆寺を扇垂木で仮定したら隅木とほぼ同じ長さ(約10m)の垂木が数十本必要になってくる。しかし当時の調達可能限界10mに近い部材を大量に揃えるのは容易なことではなかったと思われる注7)。

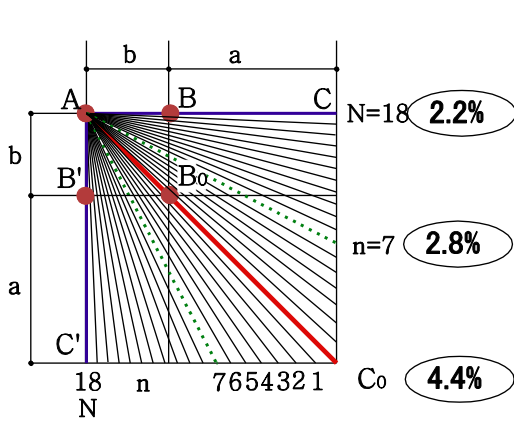


図 3-47-1 扇垂木の荷重負担率(大規模)

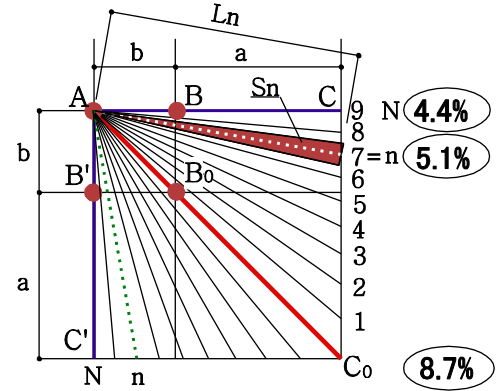


図 3-47-2 荷重負担率(小規模)

#### 3.6.2 平行垂木の特徴

一方「平行垂木」の長所は軒先の出隅方向(45°)にいくに従って垂木長さが短くなり先端に行くほど垂木1本ずつにかかる負担は減少する(図 3-42)。工事報告書<sup>17-1)</sup>によると法隆寺金堂上層の配付垂木の隅木尻4ヶ所に力垂木として一回り大きい部材が使用されており(図 3-43 赤線)、ここでも当時の大工は荷重負担の割合を熟知していたと思われる。この力垂木の位置は上層隅柱にかかり、隅三組物の直角挺出肘木が出る場所と同じである。報告書も「その位置を補強するという考えは、効果は兎も角として、一応首肯出来る。」と記している。

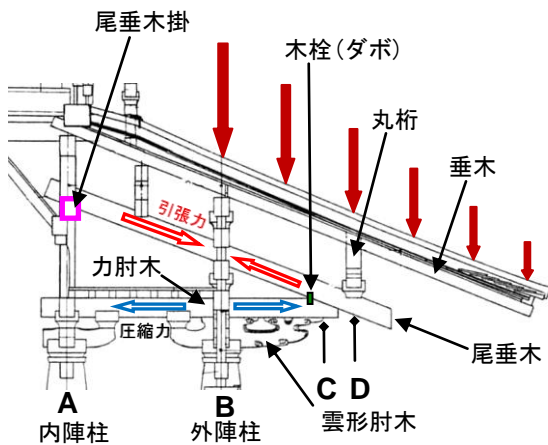


図 3-48 金堂初層 軒先断面図

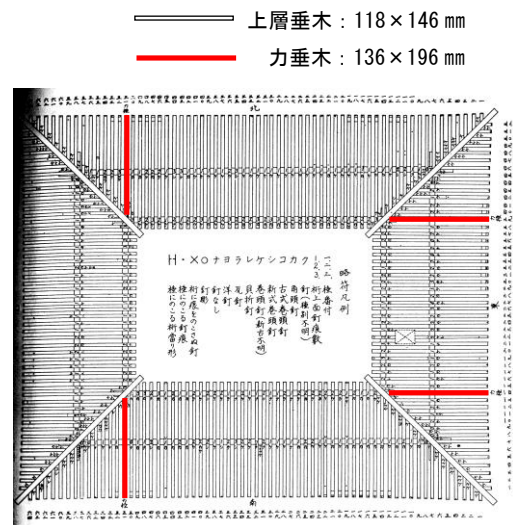


図 3-49 金堂上層 垂木配置

### 3.6.3 法隆寺の立体架構

平行垂木を実現するには軒先隅部の大半の荷重が隅行き尾垂木に集中するので、それを支える架構が必要とされる。それを実現する為に創出されたのが法隆寺金堂のトラス架構(図3-48, 50)ではないかと考えられる。工事報告書<sup>17-2)</sup>によると尾垂木掛けは桁行き・梁行き共に継手なしの一本材が使用され(図3-51)、相欠きに組まれた隅部の納まり(1.3参照)は、尾垂木にかかった「引張軸力」により尾垂木自身が抜け出ないように工夫されている。これに対し「圧縮軸力」のかかる力肘木は尾垂木掛けと同じスパンでありながら、継手を用いた二本材・三本材を用いており<sup>17-3)</sup>、明らかに当時の技術者が力の流れを正確に判断して材料選択(木取り)をしたと考えざるをえない。さらに初層の尾垂木掛けは平行き尾垂木の引張軸力により大きく外側に湾曲していたと記述されており、平行き部分でもトラス効果を発揮していたと考えられる。このとき平行き尾垂木の勾配は隅行きより大きいのでトラス効果は隅行き尾垂木より大きいと思われる。四隅のトラスによりプレ・テンションを受けたリング状の尾垂木掛けに、平行き尾垂木のエンドがかかる構造と考えられる。

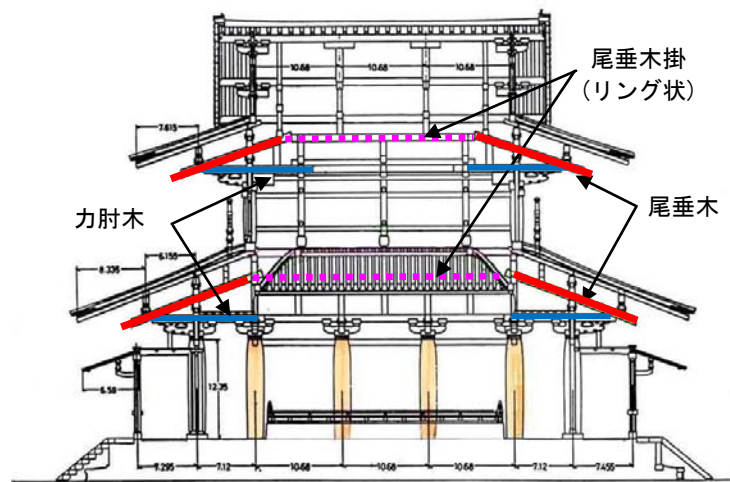


図 3-50 法隆寺金堂 断面図

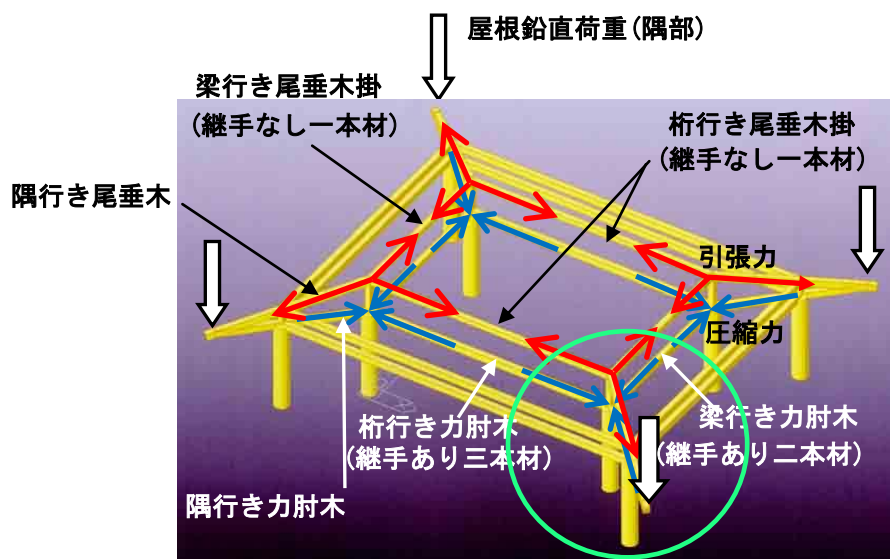


図 3-51 立体架構概念図

### 3.6.4 実験結果とその考察

#### 実験結果

- \* トラスにより四隅の尾垂木(斜材)にかかった引張軸力は尾垂木掛け(上段水平材)と通り肘木(中段水平材)に伝達され建物四周で立体的に釣り合っている。
- \* 法隆寺金堂は初層軒先にかかる垂直荷重の約 50%をトラス架構による軸力で負担し、残りを片持ち梁の曲げで負担していると考えられる。
- \* トラス先端の尾垂木と力肘木のせん断力伝達には、尾垂木先端に挿入されたダボのせん断力と境界面の摩擦力が考えられ、せん断力伝達の約半分は摩擦力が負担していると推定される。
- \* 尾垂木先端ダボ挿入により尾垂木(斜材)と力肘木(下段水平材)の縁応力度減少が確認され、曲げ抵抗の割合が減少しトラス抵抗の割合が増加することで架構全体の鉛直方向の剛性が増大したと考えられる。
- \* 力肘木上端の「渡り腮」の初期亀裂が端緒となり、力肘木の断面 2 次モーメントは半減したと推測され、これが法隆寺金堂の軒先垂下の要因となったと考えられる。

#### 考察

実験結果によれば実荷重の 1/8 荷重時の 2 倍程度で最初のせん断亀裂が発生している。1/2 縮尺実験の相似則を考慮して当時の軒先垂下を推測すると、竣工後徐々に下がっていった軒先が数十年後に「渡り腮」の一ヶ所がクリープ破壊\*を起し、その途端に四隅の荷重バランスが崩れ一気に軒が下がったと考えられる。

しかしこの立体架構により金堂内部には大きな梁材が不要となり、天井の高い広々とした内陣が創出された。また垂直荷重を内陣周りの外に向かう引張力として分散しバランスさせることにより、当時調達限界といわれていた長さ 10m<sup>第1章7)</sup>の隅木を勢一杯伸ばした隅屋根が可能となった。

残念ながら現実的には力肘木の「渡り腮」の欠点から軒先が大きく垂下しサポート柱が追加されることになったが、金堂の後に竣工したといわれる五重塔では隅力肘木の「渡り腮」による欠き込みを避けている\*\*。法隆寺伽藍全体を総合的に監理していた人材の存在が考えられる。以上の事実から現代の我々は、1300 年前の技術者の構造設計意図と力の流れを意識した仕口加工の巧みさを評価すべきであると考えられる。

\* クリープ：材料に外力を付加したまま放置しておくで、負荷の継続時間と共に変形が進行する現象で、木材のクリープは初期の弾性変形の 1.6~2.0 倍といわれている。クリープ過程では静的強さより低い応力で破壊することがありこの現象をクリープ破壊という。—木材科学ハンドブック：岡野建、祖父江信夫編 pp173-174, 2006—

\*\* 法隆寺國寶保存工事報告書 第 13 刷 國寶法隆寺五重塔修理工事報告 國寶保存委員會、第 102 図 pp221, 1955



参考写真：法隆寺大寶藏院に展示された五重塔の雲形肘木と一体化した隅力肘木の当初材



### 3.7 構造的視点から試みる法隆寺の位置づけ

主要な構造用部材と屋根形状について歴史的な変遷をたどり、法隆寺の成立過程を推測する。

#### 3.7.1 軒先の構造部材

【**胴張柱**】 「河北省定興県義慈恵石柱」(図 3-52, 53)は北齊時代に製作された(567~570年)仏殿形式の高さ7mほどの柱上に乗った小さな石彫である。竹島卓一はその「極めて太く、短く、膨らみのついた」列柱が高句麗を經由して法隆寺金堂に伝わった可能性を指摘している<sup>18-1)</sup>。(竹島はさらに突っ込んで掘立柱式から礎石式への柱脚処理の変遷過程について問題提起をしている。\*3.8.3参照)

いっぽう伊東忠太は法隆寺金堂の胴張りを最初にエンタシスと呼び、雲崗や敦煌から伝来したものでその起源は遠くギリシアに遡ると指摘したが<sup>7-3)</sup>現在では同時多発説もあり定説となっていない<sup>10-2)</sup>。中国での起源について関口欣也は後漢後期の四川省石刻柱(図 3-54)をあげ、高句麗では確認できる(図 3-55)が雲崗石窟には胴張柱はみられないとしている<sup>19-1)</sup>。

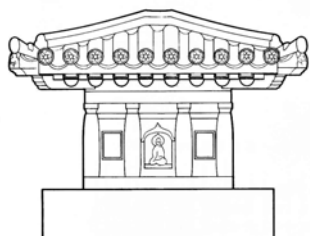


図 3-52 定興県義慈恵石柱



図 3-53 石柱 平行垂木

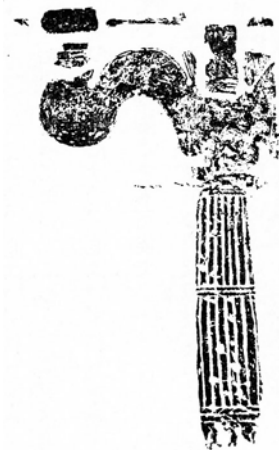


図 3-54 四川省柿子湾  
両門岩墓亭堂石窟柱

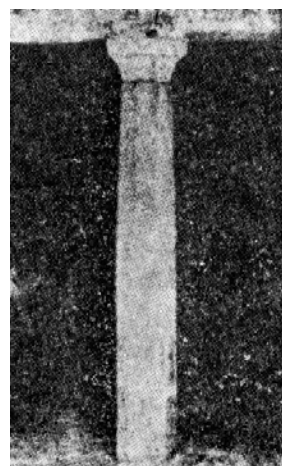


図 3-55 台城里1号古墳石柱

【**平行垂木**】 現存する建築遺構によれば、中国大陸、朝鮮半島の仏殿・宮殿は全て扇垂木であり、日本のものは平行垂木である。澤村仁は「平行垂木については従来、神社建築などの切妻屋根の垂木との関連で我国での建築細部様式における尊卑観から、平行垂木を上位のものとする向きがあったのではないかと推測があった<sup>20)</sup>と記しているが、田中淡は中国の平行垂木の遺構が極めて少ないとしながら「義慈恵県石柱」を筆頭に、敦煌石窟・雲崗石窟(図 3-56)や唐代壁画墓のなかに平行垂木の例があることを指摘している。

つまり平行垂木は日本独特のものではなく「李善(~689年没)の時代には扇垂木と平行垂木という二種類の手法が併行していたと考えざるを得ないが、唐代初期に主流を占めたのは平行垂木であった可能性が強い。」<sup>21-1)</sup>とまで述べている。(平行垂木についての文献資料として魏(220~265年)の何晏「景福殿賦」の一節を田中淡<sup>21-1)</sup>と竹島卓一<sup>18-2)</sup>がとりあげている。)



図 3-56 雲崗第1石窟 平行垂木

**[扇垂木]** 竹島卓一は中国では漢時代の石闕・古代建築から近年の一般建築まで、ほとんど例外なく扇垂木であると述べ「扇垂木の方が遥かに合理的であり施工も容易であるのに、それが遂に日本に受け入れられず、構造上にも無理があり施工も容易でない平行配列の手法が、(法隆寺)金堂を先発として日本本土を覆っているかという点に大きな疑問が控えている」と指摘している<sup>18-3)</sup>。

しかし本論文[1.1 問題定義]で述べたように「扇垂木は軒先隅部の荷重を満遍なく負担するが垂木の先端に行くほど負担荷重は増える。一方平行垂木の長所は軒先にいくに従って垂木長さが短くなり先端に行くほど垂木1本ずつにかかる負担は減少する。長大な部材の確保に苦勞していた当時注7), 最小の部材で最大の効果を発揮するには平行垂木が最適であり、隅木に集中する軒先荷重を支えるシステムが必要とされ、それを実現する為に創出されたのが法隆寺金堂のトラス架構であった」と推論する。

**[隅一組物]**注4) 法隆寺(法起寺・法輪寺を含む)独特の隅部納まりであるが、本論文[3.1 法隆寺の構造的特異性に関する既往研究]で述べたように「漢代明器(図3-57)の挺出型肘木にその原型があると思われる、洛陽を經由(図3-58)し朝鮮半島百済(図3-59)を經由して四天王寺から進化したものが法隆寺(図3-60)」と推論する。中国・朝鮮半島・日本を含め入母屋・寄棟屋根を持つ現存古建築は殆ど全て隅三組物(図3-61)となっており「隅三組物の配付尾垂木は十分に機能していない」といわれている。ただし尾垂木を使用しない隅二・隅三組物の場合構造的には合理的であるといえる。



図3-57 漢代陶樓明器



図3-59 百済扶余 青銅塔小片(隅一 尾垂木あり)



図3-58 洛陽 家形陶器(6世紀)  
隅一 尾垂木なし 入母屋



図3-60 法隆寺五重塔(7世紀)  
隅一 尾垂木あり 入母屋



図3-61 山西省 南禅寺(782年)  
隅三 尾垂木なし入母屋



【尾垂木】 [3.2 中国古代建築の組物から法隆寺の雲形肘木へ]で述べたように、現存する中国古代建築では尾垂木エンドが内陣柱まで伸びていないが、大梁で押さえる事により梃子として機能している。法隆寺では尾垂木が軒先から内陣柱まで延びて三角形を作りトラス効果を出しているが、薬師寺東塔以降そのトラス機能は失われてしまうと考えられる。

【屋根形状】 田中淡は「寄棟造は中国建築の屋根形式のうち、もっとも古くから確認されるもので…主要な記念的な建築に寄棟を用いる…入母屋造は唐代においては寄棟造に次ぐ第二級の屋根形式として規定されたものである。」<sup>21-2)</sup>と述べている。また村田治郎は玉虫厨子(図3-62)の屋根形状を考察するに当たって、中国の入母屋造について「漢代(25~220年)から魏(220~265年)、西晋(265~316年)ころまでの建築を知る資料としては、石造物・瓦製品・絵画などかなり豊富であるが、瓦葺きの屋根の形としては寄棟と切妻が圧倒的に多く、入母屋屋根が皆無に近いのは不思議なような現象である…南北朝(317~581年)になっても雲崗石窟(460~524年)では入母屋が絶無であり、龍門石窟(488~680年)では古陽洞に一例があり(図3-63)…北魏(386~534年)末頃にはこの入母屋屋根の彫刻も造られたことになろう…六世紀後半によく入母屋屋根が広まってきたことが推測される。」<sup>22)</sup>と書いている。



図3-62 玉虫厨子(7世紀)  
隅一 尾垂木あり 入母屋



図3-63 龍門石窟(洛陽)  
古陽洞 入母屋



図3-64 法隆寺(7世紀)  
隅一 尾垂木あり 入母屋

村田治郎はさらに日本への影響に関して、中国の傾向を継承した高句麗建築壁画について「寄棟屋根が断然多くて、入母屋屋根を見ない」と述べ、「中国建築の新傾向が日本に伝わるためには、およそ一世紀前後を要したようだから、瓦葺の入母屋屋根が金堂(図3-64)のような中心建築に広く用いられたのは、たぶん第七世紀の中葉前後、すなわち大化の改新(645年)ころ以後ではないかと推定」している。(同時に「草葺ではあったが日本では早くから入母屋屋根が用いられたことが、多くの家形埴輪によって証明されるからそれを無視できないだろう。」とし、瓦葺の入母屋形式の採用に日本在来の風習が影響を及ぼしたことを否定してはいない。どちらにしる「崇峻天皇元年(588年)百濟の瓦博士たちが来朝(日本書紀)してから約半世紀後と仮定すれば…年代的に大差ない」と判断している。)

玉虫厨子と法隆寺金堂は共に入母屋で平行垂木を採用している。しかし玉虫厨子の詰組(柱間)の組物は放射状に飛び出しており扇垂木の痕跡が残っている。また法隆寺の金堂・中門では上層の柱が初層の柱上に乗っていない。これを説明するのは容易ではないが一つの可能性として、扇垂木架構であったとしたら読み解けるかもしれない。日本に仏教と共に伝来した初期仏教建築は「扇垂木」を使用したと思われるが、法隆寺では「平行垂木」を採用して入母屋造を作ったのである。そこには本論文で考察したような合理的な理由と技術があったと考えられる。

\* 次頁に軒先構造部材について中国大陸・朝鮮半島・日本の遺構を時系列にまとめた。(表3-2)

3.7.2 垂木・尾垂木・屋根形状の一覧表

表 3-2-1 垂木・尾垂木・組物・屋根形状の一覧表（左）

カテゴリー	名称	年代	国	場所	垂木	平行
仏教伝来	→後漢AD67年					
A	1:漢代家型明器	?	漢	?	平:1軒丸	切妻
	2:後漢代陶樓明器	?	漢	?	?1軒	
	3:後漢代陶樓明器	AD1~3世紀	後漢	河南三門峽	?1軒	
	4:緑釉陶器(楼閣明器)	AD3世紀初	後漢	河北省阜城県	?	
	漢墓壁画	?	漢	内蒙古	?	
	漢代石闕	AD1~2世紀	後漢	四川省	扇:1軒丸	
仏教伝来	→高句麗372年 →百濟384年					
B-1	雲崗石窟第1窟	470~494年	北魏前期	山西省大同	平:1軒半丸	○
	同上 第2窟	470~494年	北魏前期	山西省大同	扇:1軒半丸	
	同上 第11窟	470~494年	北魏前期	山西省大同	?:1軒	
	龍門石窟古陽洞西壁	494~	北魏後期	河南省洛陽	平:1軒丸	○
	同上 南壁	494~	北魏後期	河南省洛陽	?	
	義慈惠石柱	567~570年	北齊	河北省定興県	平2軒:平角+半丸	○
	彩繪陶房(家型明器)	6世紀	北朝~隋	河南省洛陽	?1軒	
C-1	百濟青銅小塔片	538~660年	百濟	扶余	扇1軒:平角	
	王興寺	577~588年	百濟	扶余	—	
仏教伝来	→日本552年					
C-2	飛鳥寺中門	588~596年	日本	飛鳥	?扇?	
	四天王寺講堂	593~	日本	飛鳥	扇:1軒丸	
	山田寺金堂	643年	日本	飛鳥	?扇?	
D-1	玉虫厨子	7世紀中頃の早期	日本	飛鳥	平:1軒丸	○
	法隆寺金堂	670年前後	日本	斑鳩	平:1軒角	○
D-2	薬師寺東塔	730年	日本	平城京	平2軒:角+丸	○
	唐招提寺金堂	770~781年	日本	平城京	平2軒:角+丸	○
	新薬師寺本堂	747~780年	日本	平城京	平2軒:角+丸	○
E	正倉院正倉	756年	日本	平城京	平2軒:角+角	○
B-2	石棺	608年	隋	陝西省西安	?1軒	
	敦煌壁画(428窟)	557~580年	北周	敦煌	?1軒	
	敦煌壁画(433窟)	581~618年	隋	敦煌	?1軒	
	敦煌壁画(277窟)	581~618年	隋	敦煌	?2軒	
	敦煌壁画(423窟)	581~618年	隋	敦煌	平1軒	○
	敦煌壁画(431窟)	618~704年	初唐	敦煌	平2軒:角+丸	○
	慈恩寺大雁塔仏殿図	704年	初唐	陝西省西安	平2軒:角+丸	○
	懿德太子墓壁画の複製	706年	盛唐	陝西省乾県	平2軒	○
	韋洞墓門上壁画	708年	盛唐	陝西省長安県	平2軒:角+丸	○
	南禅寺大殿	782年	中唐	山西省五台山	扇:1軒丸	
B-3	敦煌壁画(172窟)	705~780年	盛唐	敦煌	平2軒:角+丸	○
	敦煌壁画(12窟)	848~906年	晚唐	敦煌	平2軒:角+丸	○
	仏光寺大殿	857年	晚唐	山西省五台山	扇:1軒丸	
	独楽寺観音閣	984年	遼	天津市薊県	扇2軒:角+丸	
	下華嚴寺薄伽教蔵殿	1038年	遼	山西省大同	扇2軒:角+丸	
	隆興寺魔尼殿	1052年	北宋	河北省正定県	扇2軒:平角+半丸	
	仏宮寺釈迦塔	1056年	遼	山西省応県	扇2軒:角+丸	
	上華嚴寺大殿	1140年	金	山西省大同	扇2軒:角+丸	
	仏光寺文殊殿	1137年	金	山西省五台山	平行:1軒丸	切妻
C-3	鹿港龍山寺山門	1786年	台湾	彰化県鹿港	扇1軒:平角	

	平行垂木
	扇垂木

表 3-2-2 垂木・尾垂木・組物・屋根形状の一覧表（右）

平行	尾垂木	隅組物	貫	屋根形状	階	備考	図版
切妻	○	×	土壁	切妻	3層	ペンシルベニア大学博物館蔵	3-6
	×	隅1	頭貫+飛貫	寄棟	3層	獸頭型肘木	3-26
	×	隅1, 隅2	頭貫+飛貫	寄棟	3層	1層:隅1, 2~3層隅2	3-27-1
	×	隅1	?	寄棟	5層	河北省文物研究所蔵	3.7-1
	×	?	飛貫+腰貫	寄棟	3層	組物の直下に水平材はない	3.8-35
	×	隅2	頭貫	寄棟・鍬葺	2層	地中墳墓の石造門:柱・貫は線刻	3.8-8, 9, 10
○	×	三斗半割	×	?	2層	北魏首都大同:386~494年	3-56, 3.7-4
	×	三斗半割	×	?	2層	同上	3.7-5
	×	隅1	×	寄棟	3層	同上	3.7-2
○	×	隅3(?)	×	寄棟	木部1層	北魏遷都洛陽:494~534年	3.7-3
	×	変則	×	入母屋	木部1層	同上	3-63
○	×	×	頭貫	寄棟	木部1層	胴張り柱	3-52, 53
	×	隅1	地覆	入母屋	1層	河南博物院蔵	3-58
	○	隅1	?	?	多層	百濟:346~475~538~660年	3-59
	—	—	—	—	—	飛鳥寺の原型であったかもしれない?	注7
	—	—	—	—	—		—
	○	隅1	—	?	?	扇垂木落下跡発掘	3-31
	—	—	—	—	—	<b>グリッドに乗らない柱配置</b>	3-44
○	○	隅1	頭貫ダブル	入母屋(鍬葺)	上部1層	雲形肘木(扇配列)	3-30, 62
○	○	隅1	△頭貫	入母屋	2層	雲形肘木(法起寺・法輪寺)	3-64, 66
○	○	隅3	頭貫+飛貫	寄棟	3層	盛唐の影響を受けたといわれる	3-67
○	○	隅3	頭貫+飛貫	寄棟	1層	同上	3-68, 3.7-22
○	×	隅2	頭貫	入母屋	1層	大斗肘木	3.7-23
○	×	隅3	—	寄棟	2層	校倉造	3.7-24
	×	隅2	腰貫	入母屋	1層	大斗肘木:陝西歴史博物館蔵	3.7-14
	×	隅2	×	?	?	組物上に水平ラチス梁風表現	3.7-6
	×	隅2	×	?	?	同上	3.7-7
	×	隅2	頭貫	?	?	組物下に水平材(頭貫)	3.7-8
○	×	隅2	頭貫ダブル	寄棟	1, 3層	大殿1層+左右二殿3層	3.7-10
○	×	隅2	頭貫ダブル	寄棟	1, 2層	205窟2層, 338窟1層	3-12, 3.7-11
○	×	隅3	頭貫ダブル	寄棟	1層	初唐:618~704年	3-13
○	×	隅4	頭貫ダブル	寄棟	1層	闕楼:木部は1層	3.8-36
○	×	隅2	頭貫+飛貫	寄棟	1or2層	盛唐:705~780年	3.8-37
	×	隅3	頭貫+土壁	入母屋	1層	中唐:781~847年	3-15, 61
○	2本	隅3	頭貫ダブル	寄棟・入母屋	2層	盛唐:705~780年	3-14, 3.7-12
○	2本	隅3	頭貫ダブル	寄棟・入母屋	2層	晩唐:848~906年	3.7-13
	△2本	隅3	頭貫+土壁	寄棟	1層	晩唐:848~906年	3-16, 3.7-15
	△2本	隅3+隅斜栱	頭貫+土壁	入母屋	3層	遼:947~1125年	3.7-16
	×先端切	隅4+隅斜栱	頭貫+土壁	入母屋	1層	同上	3.7-17
	△1本	隅3+隅平斜栱	頭貫+土壁	二重入母屋	1層	十字型平面	3-17, 3.7-19
	△2本	隅3斜栱+平斜栱	頭貫	寄棟	5層	八角塔	3.7-21
	×先端切	隅4+平斜栱	頭貫+土壁	寄棟	1層	金:1115~1234年 減柱法	3.7-18
切妻	×先端切	平ノミ+平斜栱	頭貫+土壁	切妻	1層	同上	3.7-20
	×	隅3	—	入母屋	2層	<b>グリッドに乗らない柱配置</b>	3-46

	合理的
	非合理

### 3.7.3 構造部材とその合理性

[推測 1] 3.7.1 の「屋根形状」で指摘したように、ここで重要な事実は[北魏→高句麗経由]の遺構には入母屋形式が絶無なことである。「入母屋」形式と「扇垂木」架構は相性が良く、下層の柱配置に関係なく扇の要を自由に設定できる。この想定からいくと[北魏→高句麗経由]の様式伝搬には扇垂木は本流ではなかったと推定できる。つまり雲崗石窟に見られるように北魏(386~494~534年)前期ころまでは平行垂木と扇垂木は併存して使用されていた。その平行垂木が北周り陸路で高句麗に伝搬した可能性も考えられる。さらに高句麗で留まっていた「平行垂木」が、渡来人と共に飛鳥の地に持ち込まれた可能性は否定できない(表 3-3, B-1)。

表 3-3 要素別 伝来想定表

	紀元1世紀	3世紀	5世紀	6世紀	660年代	7世紀~8世紀
B-1	扇張柱	後漢→	→北魏の雲崗石窟→	北齊の石柱→	高句麗?	→法隆寺◎
	平行垂木	?→	魏の景福殿	→北魏の雲崗石窟→	北齊の石柱→	?→玉虫厨子 →法隆寺◎
	扇垂木A	後漢→	→北魏の雲崗石窟→?			
	隅一組物	後漢→	→北魏の雲崗石窟→?			
A	尾垂木A	後漢→	→?→		初唐?→	初唐?→盛唐 →晚唐
	入母屋	?	x	北魏末:龍門石窟→北周敦煌壁画	初唐敦煌壁画	
C-1	隅一組物	後漢→	→?→	洛陽:家形陶器(入母屋)	→百濟→四天王寺 →法隆寺◎→x	
	扇垂木B	後漢→	→?→		→百濟→四天王寺 →玉虫厨子△→ x	
	尾垂木B	後漢→	→?→		→百濟→四天王寺 →法隆寺◎→薬師寺△→x	

[推測 2] いっぽう北魏の首都が平城(現在の大同)から洛陽に遷都された494年以降、北方民族鮮卑出身である北魏の考文帝は「南朝の制度や文化を積極的に採用することによって漢民族との同化を急いだ」とされる<sup>23)</sup>。そのために北魏様式と呼ばれる仏教美術は一気に漢化・南朝化し一代発展を遂げるのである。その勢いは山東省・四川省にまで及んでいる<sup>24)</sup>。そこで建築様式もその流れに乗ったと仮定すれば、洛陽近郊の龍門石窟(494年~)や北周(557~580年)敦煌壁画で確認される<sup>19-2)</sup>「入母屋」は長安近辺の「扇垂木」架構と共に東へ流れてきた可能性がある。それが百濟(青銅小塔片)を経由して、日本の飛鳥(山田寺)・難波(四天王寺)へと伝わったと考えることもできる(表 3-3, C-1)。(洛陽の家形陶器(図 3-58)は隅一・入母屋、鴟尾や三段の力肘木の表現から玉虫厨子との関係が指摘されている<sup>25)</sup>。)

[推測 3] [3.2 中国古代建築の組物から法隆寺の雲形肘木へ]で示したように漢代明器で確認された尾垂木はその後姿を消し、青銅小塔片となって百濟の扶余(538~660年)に出現する。現存建物では法隆寺(7世紀後半)、薬師寺東塔(730年頃)、唐招提寺金堂(770~781年頃)、中国では仏光寺大殿(857年)、独楽寺観音閣(984年)と続くが、中国のものは尾垂木が内陣柱筋まで延びずに繫梁によって押さえつけられた梃子式である。また四天王寺講堂は奈良時代(710~794年)前期に建てられ、発掘された扇垂木落下跡は同時に発掘された瓦の年代から平安前期まで存続したものと見られている<sup>26)</sup>。

以上の推測から中国後漢(1~3世紀)に登場した尾垂木は、長安・洛陽近辺で盛唐(8世紀)まで長期間埋もれていたのではないだろうか。扇垂木は軒先荷重を均等に分担する合理的な構法であったので、おそらく尾垂木と併用する効果が薄かったと考えられる。朝鮮半島も含めて唐代以降の尾垂木が退化していく状況(3.2 参照)がそれを示している。(この尾垂木が復活するのは宋代になり尾垂木が上昂とよばれ外陣から内陣に向かう扇垂木を支持するようになってからである。日本では禅宗様として扇垂木+尾垂木のセットとして全国的に普及していくことになる。)

\* 次頁に中国大陸・朝鮮半島・日本の「古代仏教建築伝来 想定図」(図 3-65)と、表 3-3 をまとめた「軒先構造の特徴 抜粋表」(表 3-4) を提示する。

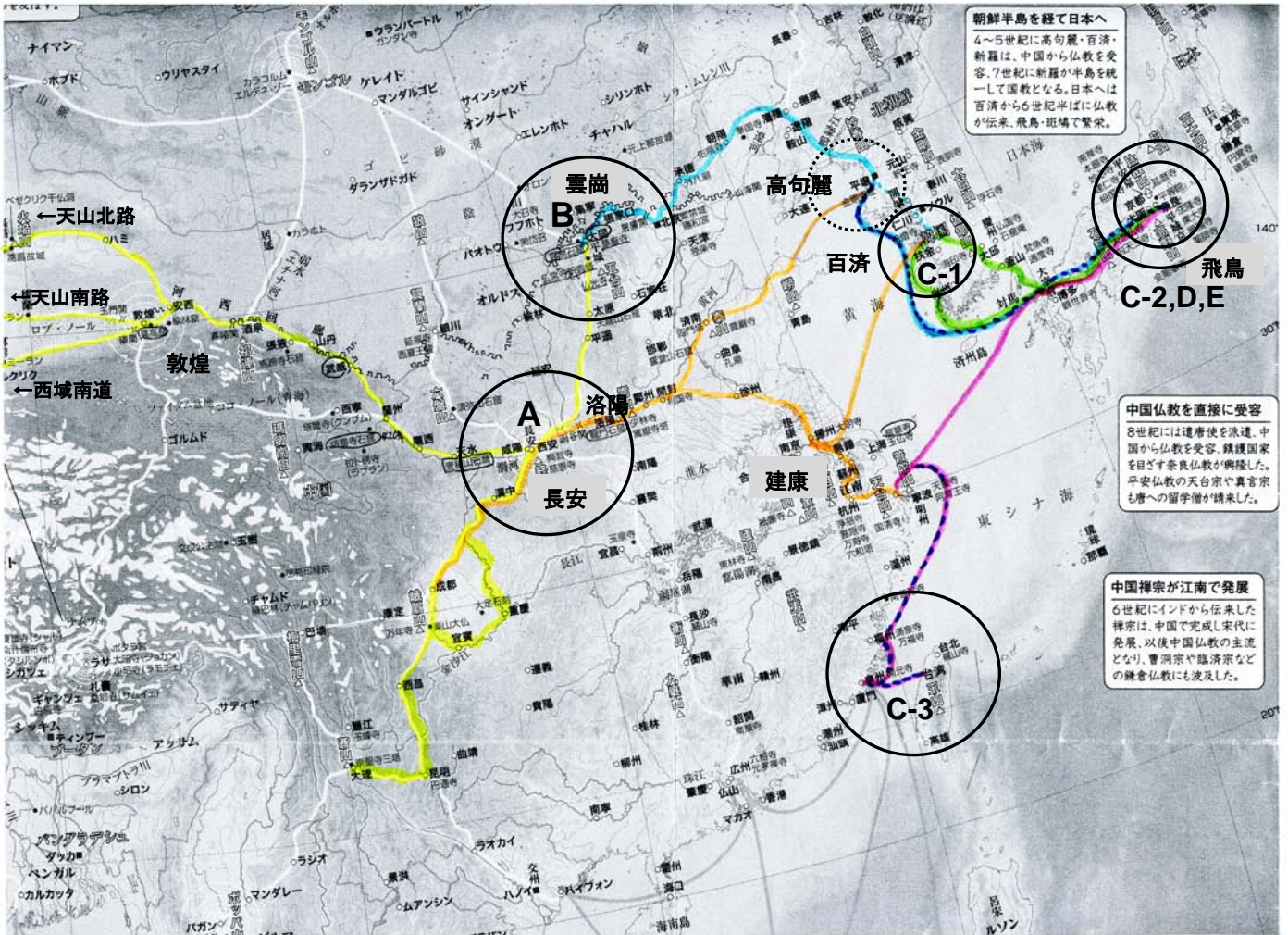


図 3-65 古代仏教建築伝来 想定図

### 3.7.4 歴史編のまとめ

以上の推測に基づいて法隆寺金堂の歴史的位置づけを試みる。

\* 百濟聖明王による仏教伝来(552年)以降、日本最初の仏教寺院である飛鳥寺(法興寺 588~596年)、四天王寺(593年)、創建法隆寺(若草伽藍 586~607年)の建設に百濟の職人が関係していたのは間違いないとされる。この初期仏教寺院は垂木先瓦の存在とその直径から扇垂木であったと推測される。例えば飛鳥寺の中門は柱スパンが隅部で異なっている。発掘調査報告書<sup>27-1)</sup>では隅木が45度で出ない「振れ隅」について検討し「どちらにしる後の構造手法と著しく相違している」と考察している。もしこれが扇垂木架構であったとすれば、[3.5 扇垂木から考察する山田寺]で述べたように「扇の要位置は柱配置に左右されない」ので飛鳥寺の中門の柱配置も決して不自然ではない。

また飛鳥寺の一塔三金堂配置から高句麗の影響を間接的に受けている可能性注 8)を発掘調査報告書は指摘している<sup>27-2)</sup>が、瓦の形式は明らかに百濟様式であり日本書紀の記述からも百濟からの影響を圧倒的に受けていたと考えるのが妥当と思われる。

表 3-4 軒先構造の特徴 抜粋表

分類	凡例	軒先構造の特徴
A	漢代明器(焼物)・石闕(AD1~3C)	尾垂木なし(例外1)+隅三組物なし
B-1	北朝時代の石窟・明器(6C)	扇垂木と平行垂木が併存+尾垂木なし
C-1	百濟最後の首都扶余(6C半~7C半)	扇垂木+尾垂木+隅一組物
C-2	仏教伝来初期寺院(6C後~7C半)	扇垂木+尾垂木の可能性が高い
D-1	法隆寺(7C後半)	平行垂木+尾垂木+隅一組物+雲形肘木
D-2	奈良初期仏教寺院(8C)	平行垂木+尾垂木+隅三組物
E	正倉院(8C半)	校倉造
B-2	隋・唐代初期(6C末~7C末)	扇垂木+尾垂木なし
B-3	盛唐~晩唐・五代(8C初~10C)	扇垂木+尾垂木
C-3	台湾のグリッドに乗らない柱配置(18C)	扇垂木+尾垂木なし+隅三

\*その後、天智9年(670年日本書紀)創建法隆寺が焼失したとされているが、この直前の663年に百濟、668年には高句麗が相次いで新羅と唐の連合軍に滅ぼされた。現存法隆寺の着工・竣工時期はまだまだに確定できないが、法隆寺再建にあたって朝鮮半島から渡来して来た人々が関係した可能性は考えられる。その時に高句麗から平行垂木の技法が数十年遅れてやってきたと仮定し、百濟からは扇垂木と共に尾垂木の技法が渡来したとすれば、その二つの建築技法が法隆寺金堂で合体した可能性も考えられる。限られた長大な部材で最大のボリュームを実現する為には、トラス架構に組んだ平行垂木を使用するのは良く考えられた方法であった。本論文の実験編からもその事は裏付けられ、法隆寺を創出した技術者たちは力の流れを正確に理解していたことが見て取れる(図3-66)。

\*唐代以降の中国に残る古建築は平行垂木を捨ててしまったがそこには法隆寺のルーツを発見できる。例えば壘木・積み重ね方式は法隆寺金堂につながると考えられる。しかし日本国内において薬師寺東塔(730年)になると尾垂木をトラスとして使おうとする意識が薄くなったように見える。尾垂木先端に木栓(ダボ)を使用しているが、三角トラスの先端は外陣柱に近すぎトラス効果は少ないと思われる(図3-67)。更に唐招提寺金堂(770~781年)にいたっては尾垂木尻に屋根荷重が乗らず梃子として機能していない。三角形の先端は斗拱の中に組み込まれトラスとしての機能を失っていくのである(図3-68)。

\*法隆寺金堂は日本における扇垂木から平行垂木への構造的転換点に位置づけられ、「トラス原理を応用した立体架構」は7世紀後半の飛鳥地方で開発された可能性が考えられる。しかし五重塔では隅雲形肘木と力肘木の一体化や「渡り腮」の欠き込みを避ける等の改善が見られるのに、その構造原理は後世に伝達される事はなかったのである。この構法は秘伝のようなものであったかも知れず、外へ出ていく機会もなく斑鳩地方に沈潜し忘れ去られてしまう運命にあったといえる。



図3-66-1 法隆寺 五重塔(隅一組物)



図3-67-1 薬師寺 西塔(隅三組物)

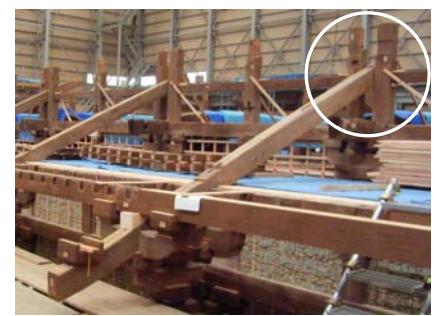


図3-68-1 唐招提寺金堂 平行き尾垂木

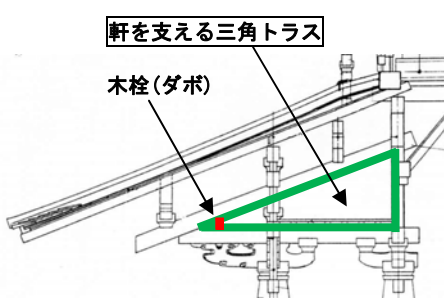


図3-66-2 法隆寺 金堂

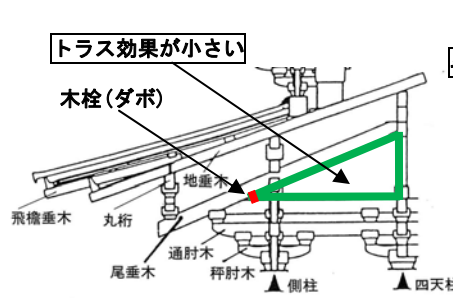


図3-67-2 薬師寺 東塔

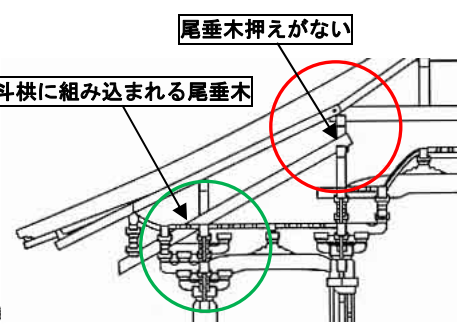


図3-68-2 唐招提寺金堂 復原断面図

## 今後の研究課題

### 3.8 今後の研究課題

#### \* 3.8.1 中国の木構造の起源

浙江省余姚県河姆渡遺跡(寧波近郊)の6000~7000年前の地層から、大量の木造建築遺構と残存部材が出土した(図3.8-1, 2)。田中淡は自著<sup>28)</sup>の中で、河姆渡遺跡で発掘された「柄や柄穴を加工した木材は掘立柱による純然たる木造建築であった」としている。また河北省藁城県台西村で発掘された殷代(3600~4000年前)中期の住居跡から、上部まで残った切妻壁(図3.8-3)が検出された事に関連して、「これより先秦時代の建築が壁構造を主体としていたことは文献の記載にもうかがえる」とし、後漢以降発達した組物(斗拱)を使った建築は「こうした異なる二つの伝統の混交の所産である可能性すらある」と指摘している。(下線は筆者)



図 3.8-1 河姆渡遺跡 全体写真

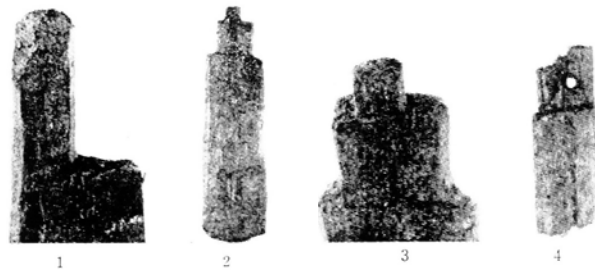


図 3.8-2 河姆渡遺跡 出土部材

ところで中国古代の都城遺跡において「中国の城」と「日本の城」との概念の違いは大きく、日本の場合は堀・石垣・土塀で隔離されたもので一般市民の居住するところではない。中国の都城は高さ数mから10mに及ぶ城壁に囲まれた空間が生活の場となっている。商代(BC1600~BC1027年)初期の都「亳」に比定されている二里頭遺跡では、建物は総て「掘立柱」で掘り方の底には小礎石があり、瓦はいまだ使用されていなかった<sup>29)</sup>。(瓦葺は西周(BC1027~BC770年)晩期に始まったとされる。)その後商の都で最も繁栄した殷代(BC1300~BC1027年)になり礎石が発見される。殷墟では石製のほか銅製のものも発見されている(図3.8-4, 5)。(ちなみに中国語では「基礎」を表す漢字として「質」の偏として「石・金・木」の3種類があてられている。)

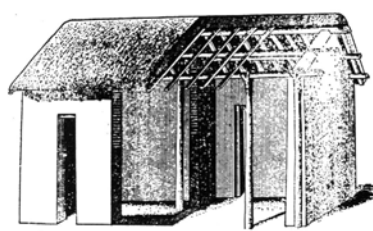


図 3.8-3 藁城台西遺址第7号房子 復原図と発掘切妻壁

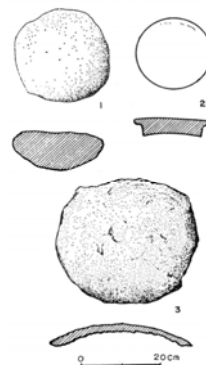


図 3.8-4 殷墟の銅礎と石礎

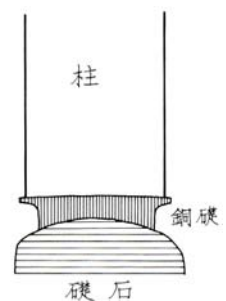


図 3.8-5 想定図



ここで注目すべきは城壁の基礎技術で「夯土：版築」と呼ばれるものである。一種の地盤改良技術で、これ以降の礎石式の技術的裏付けになったと考えられる。万里の長城だけでなく多層塔の基礎として活用された。例えば北魏最大の仏教寺院であった永寧寺(519年)の九層塔の掘込事業は103.1m×97.8mで深さは5~5.9mであったとされる。この塔は基壇の一辺が38.2mもある巨大なもの(9間×9間)であり、高さも100mに達したとされる(図3.8-6)。塔の中心部分には日干しレンガが充填されていたとされる<sup>30)</sup>。

いっぽう秦(BC221~BC206年)の始皇帝は統一後、渭水(黄河の支流)の北に咸陽宮、渭水の南に阿房宮を建てそれらを橋で繋いだという。この時の構法は戦国時代(BC475~BC221年)以来の台榭(図3.8-7)式建築であったという。これは重層の突き固めた土(夯土：版築)の台の周囲に片流れの屋根をめぐる構造である。外観はピラミッド状の木造多層建築に見える。咸陽宮での発掘調査の結果、秦代の柱に関しては礎石式技法と掘立柱が併存していたことになる。この台榭式は後漢時代に衰退し組物(斗拱)を使った建築へ移行したと考えられている。

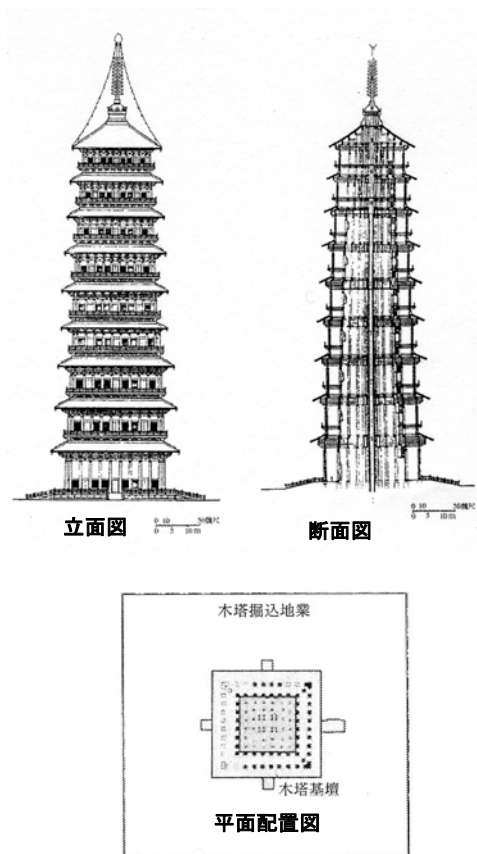


図 3.8-6 永寧寺塔 復原図

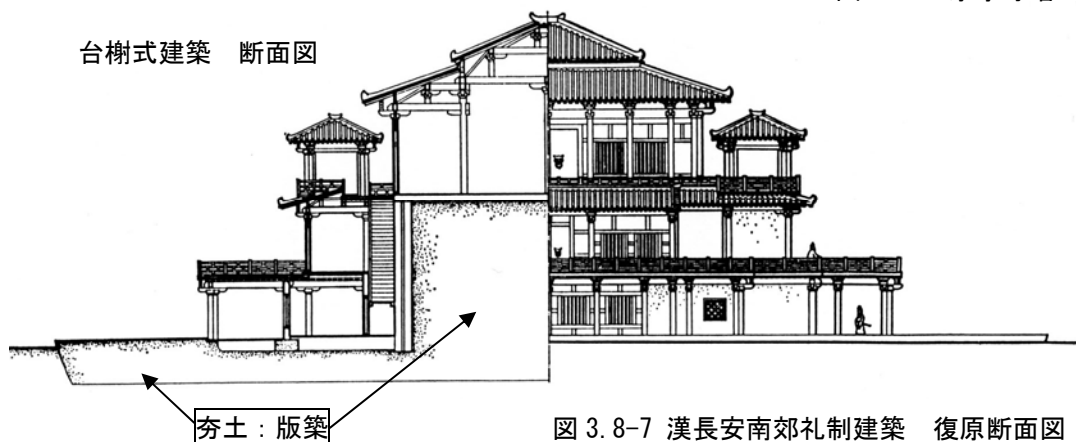


図 3.8-7 漢長安南郊礼制建築 復原断面図

そこで漢代の組物(斗拱)を具体的に表現しているものとして陶製明器注<sup>3)</sup>と石闕があげられる。石闕は墓城の入口に左右一対に造られた石造の門で屋根・軒・斗拱など建築を模して造られており、後漢時代(後1~3世紀)に作成されたものが河南・山東・四川・北京各地に29基現存している。そのうち四川省に20基集中している(図3.8-8,9)。高さが6m近くになるものもあり、高頤闕・馮煥闕ともに屋根は「扇垂木」で「寄棟」鋸葺きである。

濱田耕作<sup>31)</sup>は石闕の大きく湾曲した肘木(図3.8-10)を見て「一度木造建築の様式が石材(若しくは煉瓦)を以て写されるに至って、その材料の性質上自由なる彫刻的手法を施す事が出来るので益々多様な曲線的奇想的の形式を生ずるに至ったらしい」と述べ「それが再び木造建築に反射して、木造に於いても出来得る丈の複雑なる形式が試みられるに至ったものに他ならない」としている。濱田は法隆寺の

雲形デザインを「空想的形式」とし漢代に盛行したものが、「唐代以後の幾何学的形式に至る過渡期であった六朝時代(265~581)」の伝統を守ってきた「建築師の集団」により再現された可能性を指摘している。



図 3.8-8-1 四川省雅安東漢 高頤闕(後漢 209 年)

今日まで中国の石闕や磚塔は木造のディテールを写したものとされてきた。この石闕の組物も木造斗拱の写しであり、下層部の石積み部分に彫られた線刻は柱を表現されているとされている。しかし四川省成都出土の画像磚(図 3.8-11)に描かれた門前に張り出した「双闕」の下層部は明らかに土壘や石積みの擁壁である。二層の木造楼閣も石闕と同じ構成である。しかも楼閣部分の下部は井桁状に組まれている。

この井桁に組まれた床部分が木部の基礎であったとして、その井桁架構を発展させたものが組物(斗拱)であったとすれば…つまり初期の組物は柱上に乗っていたのではなく、土壘または組積壁の上に組まれていた。大斗の起源は木造基礎としての角材であり、それが軒先を支える装置と合体して完成したのが斗拱システムである。床組であった大斗が、ある時を境に柱の上に乗るのである。

もしそのような仮説に立つとすれば「掘立柱」から「礎石式」への転換も説明できる。夯土・版築地業の徹底化などは礎石式への技術的裏付けとして理解される。さらに中国五代(907~960年)以前の木構造城門の復原にあたり(図 3.8-12)、その基礎部分に营造法式に記述されている木製杭柱を表す「永定柱」の存在を予測する復原案があるにもかかわらず、その遺構からは木製柱が土壘に埋まっていた痕跡(穴)が発見されていないという<sup>32)</sup>。この事実も上記仮説を裏付けているのではないだろうか。

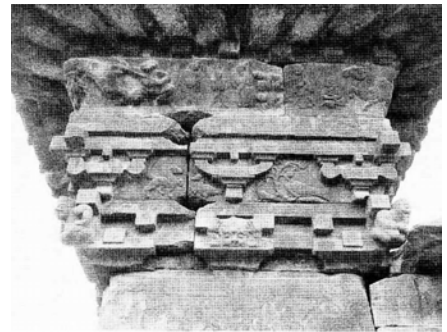


図 3.8-8-2 高頤闕 西闕北面楼観部

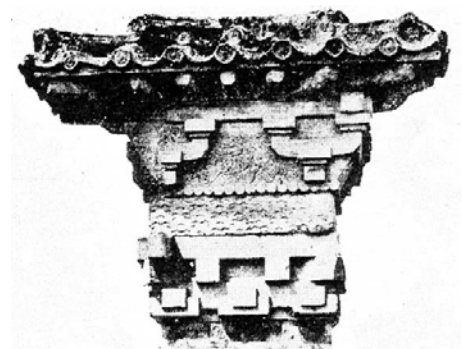


図 3.8-9 四川省 馮煥闕(後漢 121 年頃)



図 3.8-10 沈府君石闕



図 3.8-11 鳳闕図 後漢 2 世紀

營造法式の柱<sup>33)</sup>の項では「質」の偏に「木」を当てたものを「質」の偏に「石」と同じ意味に使い「柱の下に用いる一種の礎盤」として基準を定めている。營造法式では柱の下にくる円盤状の部材を説明しているが、その言葉の起源を考えると図3.8-12の円で囲んだ部分の大斗を指しているとも考えられる。

さらに營造法式は別の項で「平坐」<sup>32)</sup>について基準を定めている。竹島は「建築的性格がはっきりしないが…腰組という斗拱と見てよく、建築の周囲にめぐらされる廻り縁の類を支えるもの」としており、まさに上記の円で囲んだ組物部分であるとしている。しかし原文には「平坐」の別名として閣道・壇道・飛階・鼓坐と記述されている。竹島は「そこに共通して考えられる事は、高く床を構成した建築であろう…そこには床を支える構造体としての平坐が生きてくる」とのべている。つまり重層の石闕や城門、始皇帝の阿房宮を繋いだといわれる橋道までを指していた可能性を示唆している。

さらに続けて營造法式は重層建築の柱の繋ぎ方に関して、「叉柱造」と「纏柱造」の区別を説いている。「叉柱造」は上層の柱の線に鋪作(組物)を設けるものをいい、「纏柱造」は鋪作を柱の外を回って儲けるものを指している(図3.8-13)。竹島は叉柱造の解説にあたり「…又すとある柱根と櫨料(大斗)との具体的な接合法は明らかでないが、櫨料を礎石のように扱い…噛むようにして柱をたてることをいったもの」としている。この事からも大斗を木造基礎として扱った可能性を指摘できる。

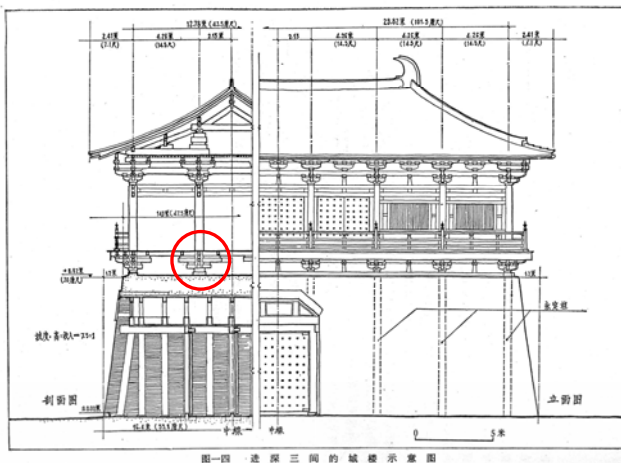


図3.8-12 唐長安大明宮城門復原案

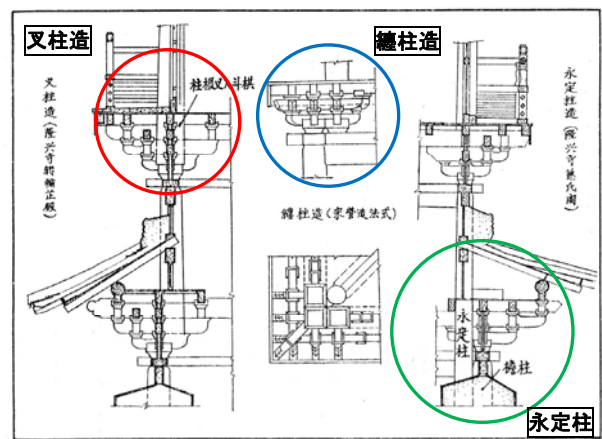


図3.8-13 河北省隆興寺 叉柱造, 纏柱造, 永定柱

問題は平坐の項にある原文「凡平坐. 先自地立柱. 謂之永定柱. 柱上安搭頭木. 木上安普拍方. 方上坐料拱」(下線は筆者)で、竹島は「凡て平坐は地盤上に永定柱と呼ぶ柱をたてる」と訳し「永定柱の名は土作の第三節『城』の条にもでていた。その場合の永定柱には『栽』とあつて掘立柱と考えられた。この場合の『地より柱をたてる』が明確に掘立柱と解釈するのは困難であるとしても、単なる重層建築の初重の柱とは考えにくい」と判断を保留している。中国では既述のように永定柱を掘立柱と解釈しているようであるが、城門での発掘結果とは矛盾している。

中国に現存している多くの古代建築の初層柱が、厚い壁の中に塗りこまれている事実をみれば「永定柱=掘立柱」は自然な解釈であると考えられる(図3.8-13)。しかしいったん上記の仮説[大斗は木造基礎であり柱の上に乗っていなかった]とすれば「平坐」の意味するところや「永定柱」の解釈が大きく変わってくると考えられる。

### \*3.8.2 井楼組と法隆寺

[3.7.1 軒先の構造部材]で紹介した「河北省定興県義慈恵石柱」では平行垂木を採用している。一般的に平行垂木の場合一定間隔で垂木を割付けないと目につく。この場合正面の垂木間隔は均等であるが、柱の間隔は中央間を広げている。柱と垂木の割付数を意識的にずらす事により、柱間隔が均等でなくてもあまり気にならないように意図されている(図 3.8-14, 15)。また垂木が柱筋を跨ぐ事により小屋組みの構造から柱位置が自由になる。この垂木の位置は図 3.8-15 のように井桁状に架け渡した横架材を暗示している。梁の交差部には束が立ち隅木を支える架構が予測できる。

法隆寺金堂の初層天井部分にはこの井桁架構が使われている(図 3.8-16)。梁さえ存在しなかった金堂内陣の天井に組み込まれた井桁梁は上層の床位置を示している。更にこの井桁末端に上層の柱が配置されているのである。法隆寺は初層に28本、上層に14本の柱を持つが、上下柱位置が一致しているものは上層隅柱の4本だけである(図 3.8-17)。残りの10本は初層の柱間に浮いているのである。

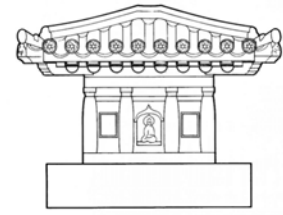


図 3.8-14 義慈恵石柱

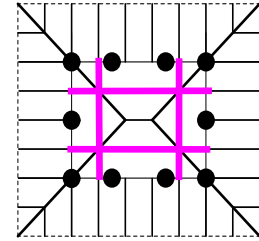


図 3.8-15 推定小屋伏図

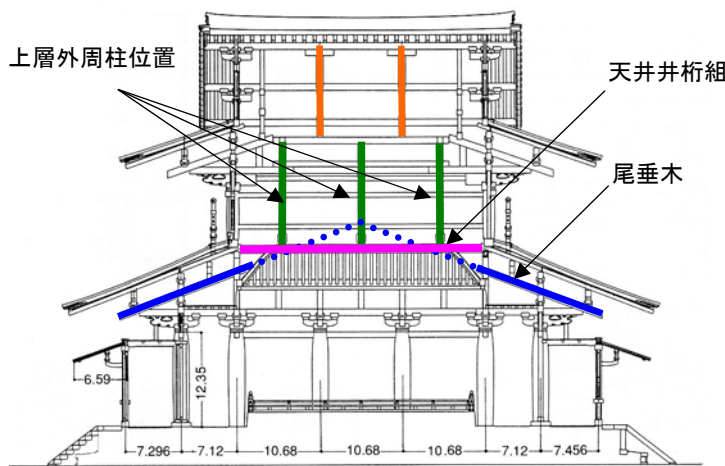


図 3.8-16 法隆寺金堂 断面図

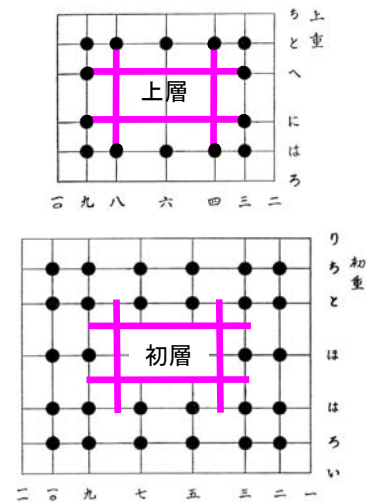


図 3.8-17 金堂 柱配置図

ここで漢代の石闕と比較すると、腰組部分の井桁の小口や巻斗は見事に上下互い違いに配置されている。しかも扇垂木の直下にも明らかに井桁の小口が表現されている(図 3.8-8, 18)。

さらに北魏の雲崗石窟の組物の配置は柱割を気にしていないように見える(図 3.8-19)。また北齊の韓裔墓の三斗と人字型割束は柱上に乗らずに組積壁の上に並んでいる(図 3.8-20)。漢代に遼の墓壁や画像磚に描かれた家屋の柱や束は下層柱の直上にはない(図 3.8-21, 22)。

井桁架構は、おそらく初原的架構方法としての壘木・校倉式組積造の名残を色濃く残していたのでないかと推測される。

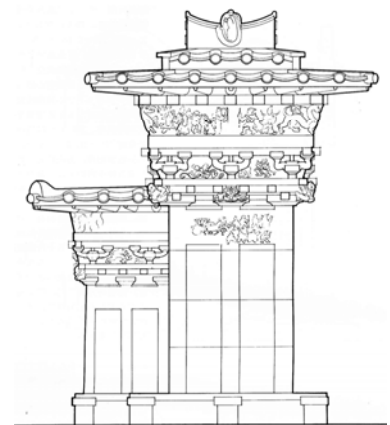


図 3.8-18 高頤闕 立面図



図 3.8-19 雲崗第 10 窟

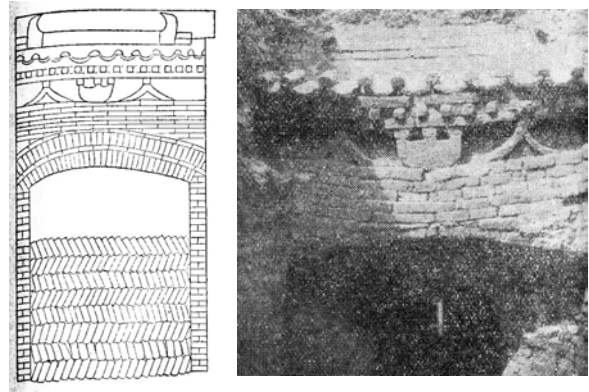


図 3.8-20 山西省 北齊韓裔墓

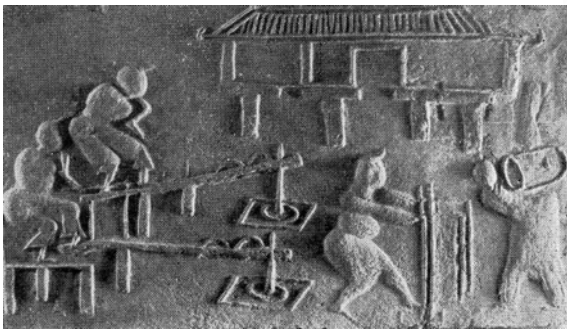


図 3.8-21 彭県漢墓 春米図

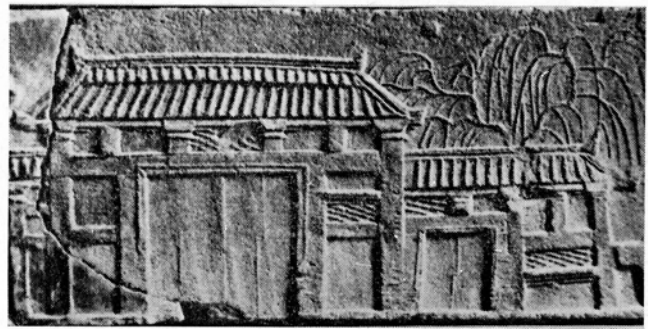


図 3.8-22 四川省徳陽黄許鎮出土 画像磚

法隆寺金堂の高欄の三斗と人字形高欄はまさに雲崗と韓裔墓と同じものであり、それは単に意匠の問題だけではなく、構造的納まりを正確に写しているのである。さらに濱田耕作は馮煥闕(図 3.8-9)の双斗下の円形木材の切口に気が付いているが<sup>34)</sup>、これこそ垂木の上に斗拱が乗っている事を表現していると思われる。この納まりは [3.2 中国古代の組物から法隆寺の雲形肘木へ] で示したように漢代明器(図 3-6)につながる双斗の原型がここまで流れついたと考えてもよいと思われる。

また法隆寺には上下層の柱配置以外にもこの井楼組の痕跡が残っている。高欄の隅部や内陣内側の肘木の切落しは井楼組の名残と考えられる。今までこの切り落としに関しては余りに否定的な解釈ばかりであったが、法隆寺全体が井楼組から発想された構造様式を根源に持つとしたならば、この隅部の納まりはごく自然なものなのである(図 3.8-23, 24)。

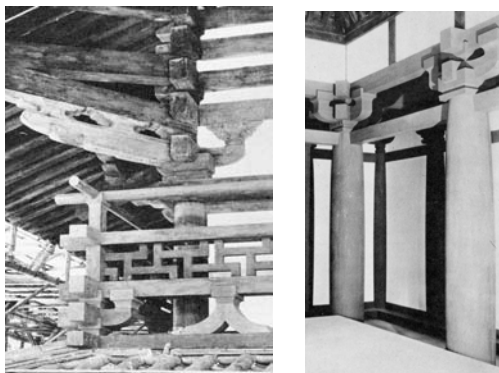


図 3.8-23 法隆寺金堂 肘木端部切り落とし

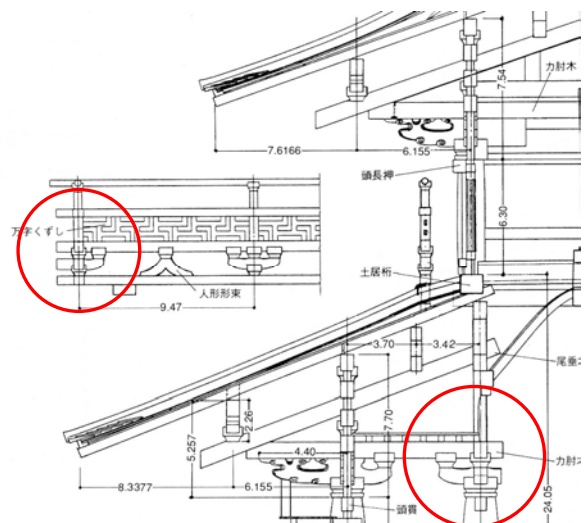


図 3.8-24 法隆寺金堂 断面詳細図

\*3.8.3 掘立柱から礎石式へ

竹島卓一は法隆寺金堂の柱に関して「金堂にこのような太い柱を用いたということが、多くの構造的欠陥を持ちながら、よく千数百年の間、台風や地震に耐えて世界最古の木造建築という誇りを獲得できた大きな理由の一つと考えられる」と述べている<sup>18-4)</sup>。また「従来の日本の建築は総て掘立柱の手法によっていたため…中国風に礎石の上に直接立てることに非常に不安を感じた」はずなので、どこか他国の影響を受けたのではないかと指摘し、太い柱の伐採が可能で「森林資源が豊富であった高句麗」から学んだ可能性を示唆している。

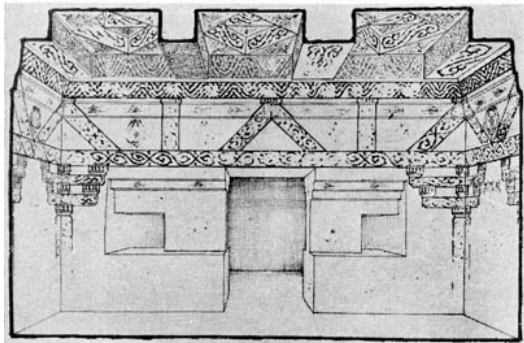


図 3.8-25 高句麗 安城洞大塚

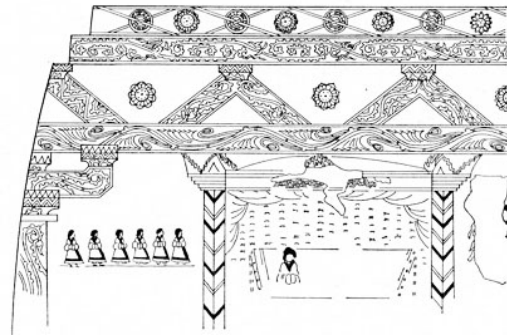


図 3.8-26 高句麗 安岳 2 号墳



図 3.8-27 高句麗 八清里古墳

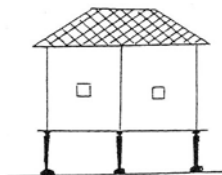


図 3.8-28 高句麗 徳興里古墳

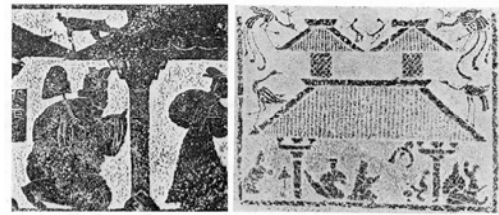


図 3.8-29 四川省後漢墓 画像石

ここで高句麗古墳壁画に残された建築様式を見ると(図 3.8-25, 26)本論文[3.1 法隆寺の構造的的特異性]で紹介した鈴木嘉吉が指摘しているように柱を繋ぐ水平材は「頭貫」の位置にはなく、秤肘木の巻斗上に乗っている。この壁画の表現を現実の木構造の忠実な写しだと仮定すると、それぞれの柱が繋がっていないのは構造的に不安定である。この架構を成立させるには各柱が自立する「掘立柱」であった可能性が考えられるのである。同じく高句麗古墳に描かれた高床式倉庫も明らかに「掘立柱」でないと成立しないと思われる(図 3.8-27, 28)。さらに後漢時代の画像石の柱脚部分は一般的には「礎石」のように解釈されるかもしれないが、掘立柱の足元を固めるための「盛り土」と考えられない事はない(図 3.8-29)。隋代と言われる化粧用「礎石」や(図 3.8-30)、韓国慶州国立博物館にある新羅時代の半割リングの「礎石」(図 3.8-31)の存在から格の高い建築物にも「掘立柱」が採用されていた事がわかる。さらに鈴木が指摘するように法隆寺金堂の上層には「頭貫」がなく、初層の頭貫も柱に緊結されていない。これは高句麗建築や中国古代建築の中に含まれていた「掘立柱」的なものの痕跡を示しているのかもしれない。



図 3.8-30 隋 出土石礎



図 3.8-31 新羅時代の礎石

いっぽう中国本土では高句麗と関係の深かった北魏時代の雲崗石窟(図 3.8-32)、北魏から隋までの麦石山石窟(図 3.8-33)、北齊から隋・唐にかけて開鑿された天龍山石窟(図 3.8-34)ともに「頭貫」は存在せず大斗の上を水平繫材が連結している。ただし麦石山の例では柱長に比較して柱直径がかなり太く、雲崗・天龍山石窟も柱は決して細くない。柱が太ければ頭貫がなくても安定するからではないだろうか。



図 3.8-32 雲崗第 12 窟



図 3.8-33 麦石山第 30 窟

田中淡は中国建築について「明瞭に頭貫と確認できる」のは義慈恵石柱(567~570年 図 3.8-14)からと指摘し、初唐以降の壁画(図 3.7-9~13)に描かれた頭貫と直下の水平材の組合わせを「ラチス梁またはハニカムビームの古典」と見做しているが<sup>35)</sup>、日本では平安以前まで「貫を建築構造の本格的技法として用いた形跡がなく…構造的に軸部を固定緊結するという発想を持ち得なかった」としている。

いっぽう内蒙古の漢墓壁画(図 3.8-35)では既に腰貫が描かれている。盛唐時代の懿徳太子墓壁画(図 3.8-36)ではダブルの頭貫と腰組(平坐)で柱の上下はしっかり固定され、韋洞墓門上壁画中の楼閣(図 3.8-37)では細柱は飛貫で緊結されるようになり、中国では礎石式工法へと着実に技術的發展を遂げていくのである。



図 3.8-34 山西省 天龍山第 16 窟



図 3.8-35 内蒙古 漢墓壁画



図 3.8-36 懿徳太子墓壁画の複製(盛唐 706 年)

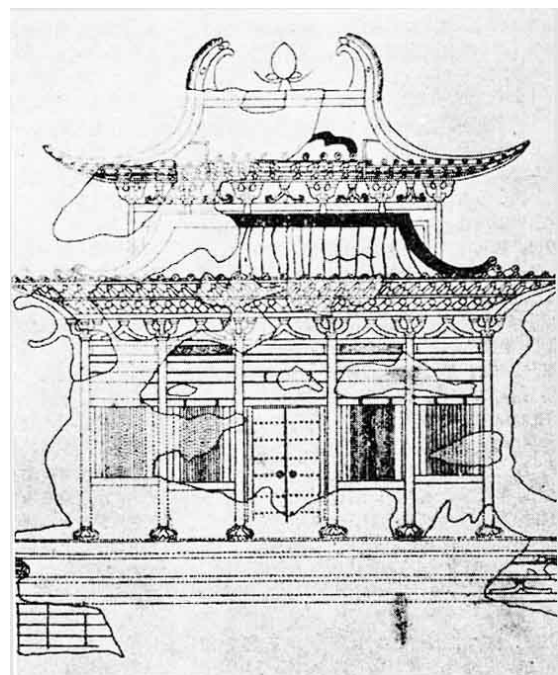


図 3.8-37 韋洞墓門上壁画中の楼閣(盛唐 708 年)





## 第 4 章 結論

## 第4章 結論

世界最古の木造建築といわれる法隆寺金堂はその梁なし構造により専門家の間では構造上の不備を指摘されてきた。本研究では、中国大陸・朝鮮半島に残る扇垂木と日本の平行垂木との比較から【法隆寺金堂のトラス原理を応用した立体架構】が意図して創られていたのではないかとという仮説に立ち、修理工事報告書を精読したうえで1/2縮尺モデルによる垂直加力実験を行った。

その結果、四隅の軒先にかかった屋根荷重は尾垂木(斜材)を通して尾垂木掛け(水平材)に伝達され建物四周で立体的に釣り合っている事が確認された。そのとき垂直荷重の約50%をトラス架構による軸力で負担し、残りを片持ち梁の曲げで負担している事が推定された。尾垂木先端には木栓(ダボ)が挿入されており、その効果は先端部分の摩擦力と共にトラス抵抗要素を増大させ、架構全体の鉛直方向の剛性を増大させた。さらにこの実験で確認された重要なことは、力肘木上端の「渡り臈」仕口が初期状態でせん断亀裂を起こした事である。これにより力肘木の断面2次モーメントは半減したと推測され、これが法隆寺金堂の軒先垂下の大きな要因になったと考えられた。

昭和9年に始まった法隆寺伽藍全体の修理工事は、昭和24年金堂解体作業中の失火が原因となり初層部分の構造部材を殆ど総て新材にて復原するという不幸な事態に陥った。このあと修理工事所長を引き継いだ竹島卓一は法隆寺の不可解な架構方法に悩み続けるが、最終的には金堂初層内陣の繫梁補強材を取り払い内陣の金属補強も最低限のものとした。修理工事報告書の記述によると殆ど「神がかり」に近い心境で1300年間続いた法隆寺の構造に賭けたのである。本研究ではこの竹島の判断を合理的に説明するものであると考えている。残念ながら現実として法隆寺の軒先は大きく垂下しサポート柱が付加されることになったが、ここでは1300年前に「梁なし構造」に挑戦した技術者の設計意図と、力の流れを意識した仕口架構の巧みさを評価すべきであると考ええる。

本論文では実験と平行して歴史的考察も行なった。今まで法隆寺の意匠的特異性は多くの研究者を迷路に引込んでいる。ここでは軒先の構造的合理性に絞って論を進めた。まず法隆寺を特徴づけている雲形肘木について、中国大陸に残された唐代の木造建築に同じ発想が見られる。外部へ大きく挺出する納まりは現存物としては法隆寺関連の建造物だけといわれてきたが、中国唐代の柱上組物は方斗を持たずに外部へ飛び出している。構造的には法隆寺の雲形肘木と同類であり、おそらくその起源は漢代明器に見られる獸頭組物であろうと考えられる。それが中国朝鮮半島をめぐって進化したものが法隆寺であり、晩唐にいたり山西省・河北省に残ったのが中国の古代建築であろうと推測される。

またこの伝搬過程において注目されるのが扇垂木と平行垂木である。かつて中国大陸ではそれらが併存していたことが雲崗石窟でも確認できる。四天王寺で発掘された扇垂木落下跡は重要で、これが発見されなければ今でも「日本は最初から平行垂木であった」ことになっていたかもしれない。そこで山田寺のグリッドに乗らない柱配置は扇垂木の発展形であると予測した。法隆寺の平行垂木と比較して推論したが、その中に歴史的事実に近い扇垂木架構が存在したのではないかと期待している。

法隆寺以前の飛鳥寺・四天王寺・山田寺は扇垂木であったと考えられているが、この三寺院と平行垂木である法隆寺には似通った点が多い。逆に言うと法隆寺には扇垂木の雰囲気が残っている。これらを具体的に解明するのは容易ではないが、実験編で立てた【仮説：1300年前に法隆寺は「トラス原理を応用した立体架構」を意図して創られた】は、扇垂木の欠点を補うために当時の技術者(大工棟梁)が発想したとの予測から出発している。今回その材料選択(木取り)や仕口の形状から、力の流れを正確に認識しかつ全体を総合的に監理していたことが明らかになった。

さらに構造的視点から法隆寺の歴史的な位置づけを試みた。法隆寺の細部様式と中国建築様式の比較は村田治郎により既に研究されたものがあり、関口欣也は高句麗建築、田中淡は中国建築との細部比較から日本の古代建築を論じている。そこで本論文では軒先の構造的合理性に絞って分類を行なった。特に尾垂木を使った隅部組物に注目した。隅一組物は法隆寺の特徴に挙げられている。尾垂木を使用した場合隅一ならば合理的であるが、隅三組物だと直角に出た尾垂木が45度方向の尾垂木にぶら下がる状態(配付)になり合理性は薄れる。逆に尾垂木を使用しなければ隅二・隅三組物でも合理的である。この基準で中国・百済に残された遺物を検証した。(残念ながら高句麗では墳墓内に描かれた室内を表現したものしか発見されていない。)

その結果、尾垂木は漢代明器に一例だけ確認できるが百済の青銅小塔片までその姿を隠してしまう。日本に渡った尾垂木は四天王寺・法隆寺まで隅一組物なので軒先は合理的であった。一方中国では隋・初唐時代の敦煌壁画では尾垂木が確認できず、8世紀初頭の盛唐時代となって初めて二重尾垂木の壁画が現れる。そこで隅三組物は尾垂木がなければ軒先は合理的な納まりと判断した。その後日本に現存するものでは薬師寺東塔、中国では仏光寺大殿とほぼ同時代に「尾垂木+隅三組物」のセットが出現した。概観すると漢代以来合理的な納まりであった軒先構造が、盛唐時代に至って合理性ではなく意匠性を重視する傾向が窺えるようになったと考えられる。

また[北魏→高句麗経由]の遺構には入母屋形式が殆ど見られない事実と、本論文で述べたように入母屋形式と扇垂木架構は相性が良いとの考察から、[北魏→高句麗経由]の様式伝搬には扇垂木は本流ではなかったと推測した。高句麗では北魏まで併存していた扇垂木よりも平行垂木が生き残った可能性が高いのではないかと考えた。一方後漢時代に確認された「尾垂木」と「隅一組物」は合体して7世紀の百済に出現することになる。おそらく洛陽近辺で南朝時代まで過ごしたのち伝搬したのではないかと思われる。この百済の小塔片は扇垂木である。扇垂木は軒先荷重を均等に分担する合理的な構法であり、尾垂木と併用する効果が薄いので長く隠れていたと推測した。以上から[北魏→高句麗経由]の平行垂木と[南朝→百済経由]の尾垂木が、其々の滅亡する660年代前後に日本に渡来して法隆寺で合流した可能性を指摘した。

当時の限られた部材で最大のボリュームを実現する為には、トラス架構に組んだ平行垂木を用いるのは良く考えられた合理的な方法であったと考えられる。本論文の実験編からもその事は裏付けられ、法隆寺を創り出した技術者は力の流れを正確に理解していたことが見て取れる。法隆寺金堂は扇垂木から平行垂木への構造的転換点に位置づけられ、「トラス原理を応用した立体架構」が7世紀後半の飛鳥で開発された可能性に言及した。

最後に今後の研究課題として組物(斗拱)の起源について言及した。以前から大斗と柱が別材であるのが疑問であった。なぜ不安定な斗拱を高い柱上で組もうと思いついたのか判らないまま、石闕の写真を見て発想したものである。斗拱の起源が床組工法であれば施工作业は簡単で、実験的工夫も容易である。それがある時点で庇を支える技術と一体化したと考えた。木口斗は井桁の断面の名残である。そのほか井楼組の断片は法隆寺の中に繰り返し出てくる。平坐・永定柱の問題も含め文献的調査とともに、東アジアを伝搬していった古代木造建築の進化論的発展過程の探求が期待される。



歷史編 參考資料

### 第3章:歴史編 参考資料

#### 引用文献

- 1) 澤村仁：日本建築史基礎資料集成四 仏堂Ⅰ：太田博太郎編 中央公論美術出版，pp15～25，1975
- 2) 鈴木嘉吉：原色日本の美術 第2巻 法隆寺，小学館，pp167，1966
- 3) 棚橋諒：法隆寺五重塔及び金堂の構造補強，建築雑誌，pp10～12，Vol. 70，No. 821，1955
- 4) 竹島卓一：法隆寺國寶保存工事報告書 第14冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告附圖，法隆寺國寶保存委員會 昭和31年 pp133～137，1956
- 5) 関口欣也：仏教建築の東漸，日本美術全集第2巻 法隆寺から薬師寺へ，講談社，pp183～184，1990
- 6) 竹島卓一：營造法式の研究1：中央公論美術出版 1970 pp322～327 第6節 平坐  
同上 pp243～274 第4章 鋪作闇架
- 7) 伊東忠太：法隆寺 創元社，1940  
7-1) pp107～108，7-2) pp84，7-3) pp104～106
- 8) 濱田耕作：法隆寺の建築様式と支那漢六朝の建築様式について，1926  
(東洋美術史研究，座右寶刊行會，pp158-173，1942)
- 9) 白鳥芳郎：石寨山文化に見られるスキタイ文化の影響，華南文化史研究 六興出版 pp558-577，1985
- 10) 村田治郎著作集一：法隆寺建築様式論攷，三陽社，1986  
10-1) 同上，pp245～271 玉虫厨子の諸考察，10-2) 同上，pp345～358 エンタシスの源流
- 11) 藤井恵介：日本古寺美術2 法隆寺Ⅱ 保育社，pp84～86，1987
- 12) 埋蔵文化財発掘調査報告 第六 四天王寺：文化財保護委員会 昭和42年，1967
- 13) 同上 pp193-195，1967
- 14) 竹島卓一：法隆寺國寶保存工事報告書 第13冊 國寶法隆寺五重塔修理工事報告附圖，法隆寺國寶保存委員會 昭和30年 pp105，1955
- 15) 関野貞：考古学講座 瓦，国史講習会編 雄山閣 pp95，1928
- 16) 山田寺調査発掘報告：奈良文化財研究所編，2002  
16-1) pp534-537，16-2) pp29
- 17) 法隆寺國寶保存工事報告書 第14冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告附圖，法隆寺國寶保存委員會  
17-1) 同上 pp382～383，17-2) 同上 pp249，17-3) 同上 pp237，1956
- 18) 竹島卓一：建築技法から見た法隆寺金堂の諸問題，中央公論美術出版 1975  
18-1) 同上 pp198，18-2) 同上 pp322，18-3) 同上 pp321～326，18-4) pp196
- 19) 関口欣也：朝鮮三国時代建築と法隆寺金堂の様式的系統，日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集 中央公論美術出版，1976 19-1) pp23～25，19-2) pp70～71
- 20) 澤村仁：日本建築史基礎資料集成四 仏堂Ⅰ：太田博太郎編 中央公論美術出版，pp19，1975
- 21) 田中淡：中国壁画墓の建築図と唐代初期の建築様式，中国建築史の研究 弘文堂 pp338，1989  
21-1) 同上 pp338，21-2) 同上 pp334～335
- 22) 村田治郎著作集一：法隆寺建築様式論攷，玉虫厨子の続考，三陽社 pp299～302，1986
- 23) 吉村怜：南北朝仏像様式試論，中国仏教図像の研究，東方書店 pp181～182，1983
- 24) 小泉恵英：南北朝時代の仏教美術，中国国宝展，東京国立博物館 朝日新聞社 pp278～284，2000
- 25) 法隆寺—日本仏教美術の黎明—：奈良国立博物館 第36図解説 pp168，2004
- 26) 四天王寺埋蔵文化財発掘調査報告 第六 四天王寺：文化財保護委員会 pp184～186，1967
- 27) 飛鳥寺発掘調査報告 奈良国立文化財研究所 27-1) pp42，27-2) pp39，1958
- 28) 田中淡：先秦時代宮室建築序説，中国建築史の研究 弘文堂 pp27～69，1989
- 29) 中国の都城遺跡—出土文物と派遣研究員の踏査記録—奈良県立橿原考古学研究所付属博物館編

pp1~12, 1983

- 30) 銭国祥：北魏洛陽永寧寺と塔基壇の発掘と研究 pp9~39, 2006  
東北学院大学論集 歴史と文化(旧歴史学・地理学)第40号：東北学院大学学術研究会
- 31) 濱田耕作：法隆寺の建築様式と支那漢六朝の建築様式について，東洋美術史研究 座右寶刊會刊  
pp145~173, 1942
- 32) 傳熹年：唐長安大明宮玄武門及重玄門復原研究，考古学報 1977年第2期 pp137, 1977
- 33) 竹島卓一：营造法式の研究2：中央公論美術出版 1970 pp39~51 第3節 柱  
同上1 pp322~327 第4章 鋪作 第6節 平坐
- 34) 濱田耕作：法隆寺の建築様式と支那漢六朝の建築様式について，東洋美術史研究 座右寶刊會刊  
pp161, 1942
- 35) 田中淡：中世新様式における構造の改革に関する史的考察 pp298~302  
前掲 太田博太郎博士還暦記念論文集 日本建築の特質 中央公論美術出版, 1976

注1) 营造法式：北宋の建築技官であった李明仲により編纂された建築技術書(1100年)全36巻で，当時行われていた建築の広い分野の生産を伝える貴重な資料。(建築事典 彰国社より抜粋)

竹島卓一が解説付き全巻翻訳本を出している。营造法式の研究一~三：中央公論美術出版 1970年

注2) 頭貫：柱頂部に渡してある貫。他の貫が鎌倉時代以後であるのに対し，これだけは飛鳥時代から使用されていた。(建築事典 彰国社より抜粋)

注3) 明器：中国で墳墓に納める副葬品で被葬者が死後の世界で用いるために生活用具を木・銅・瓦・石・陶器などで形どって作ったもの。人物・動物から家屋・楼閣建築もあり，秦・漢以降盛んになった。

注4) 上野邦一：「隅一組物の建物について」建築史学第8号 pp36~62, 1987

上野は上記論文の中で「隅一組物・隅三組物」の考え方について次のように説明している。「入母屋造り・寄棟作りの屋根の建物の場合，すなわち隅木を必要とする建物の場合とする。隅三組物とは，桁行き・梁行きとその両者の中間隅行き方向の外三方に組むことを言う。現存する建物では雲斗雲肘木を用いる組物以外の通常の組物のことである。隅一組物とは，側柱隅において隅行き方向の外一方のみに組物を組むことを言う。既知の隅一組物としては雲斗雲肘木による組物が知られるのみであるが，雲斗雲肘木以外の未知の隅一組物があったと考えて，用語を作成した。」

本論文ではこの呼称に倣い，さらに隅45度方向に組物がなく直角二方向だけのものを「隅二組物」と呼ぶこととする。

注5) 報告書<sup>10-9)</sup>の部材寸法表では，初層平行き尾垂木の先端勾配平均値は0.364となるが，ここでは解説文の記述と金堂復原図面での平行き尾垂木勾配0.384をとった。このとき隅行き尾垂木の先端勾配平均値は0.244となる。

注6) \*1 薬師寺東塔および南門修理工事報告書：奈良文化財研究所編 1956

\*2 日本建築史基礎資料集成四仏堂Ⅰ：太田博太郎編中央公論美術出版 1975

\*3 新薬師寺本堂・地藏堂・南門・鐘楼修理工事報告書：奈良県教育委員会編 1996

\*4 鳳停寺極楽殿 修理工事報告書：韓国文化財管理局文化財研究所 1992

\*5 華溪寺 実測調査報告書：韓国京畿道高陽市編 1998

\*6 景福宮勤政殿 修理工事報告書：2005

注7) 村田健一は7世紀以前では調達可能部材の限界を約10mとしている。実際に法隆寺金堂の最大の一丁材は初層南面「一の通肘木」で12.3m，東西方向の通肘木で11.7m，隅木で10.2m，上層南面の通肘木で10.8mとなっている。(村田健一：伝統木造建築を読み解く，学芸出版社 pp48-51, 2006)

注8) 昭和33年(1958年)に発行された飛鳥寺発掘調査報告書<sup>26)</sup>では、一塔三金堂配置について「この飛鳥寺と同じような配置を持つ寺院は日本と最も密接な関係のあった百済では未だ発見されていないのであるが、高句麗の旧都平城付近で発見されておることは注意を要する。百済でもその内発見されないと限らないので、これから日本が高句麗の影響を直接受けたとは断定しがたいが…」と述べ清岩里廢寺の想定配置図を挙げている。この報告書以降、飛鳥寺に関する「高句麗の影響」は大きく引用されることになる。しかしここに再録したように報告書の記述は慎重な判断をしている。事実2005～2008年百済の扶余で実施された王興寺の発掘現場から金堂の東西に長い建物があったという記事(2008年12月4日朝日新聞)がでた。「東西の建物が飛鳥寺で金堂に変わったのでは」という見解も出ているが、正式な報告書を待つて判断を下す必要があると思われる。



#### 図版出典

\* 特記なき写真は筆者撮影

\*\* 特記なき図表は筆者作成

- 3-1) 原色日本の美術 第2巻 法隆寺, 小学館, 第28図 pp166, 1966
- 3-2) 同上 第29図 pp166, 1966
- 3-3) 同上 第30図 pp168, 1966
- 3-4) 参考文献3) pp10
- 3-5) \*
- 3-6) 営造法式の研究1: 竹島卓一, 中央公論美術出版, 挿図53, pp278, 1970
- 3-7) 奈良の寺1 法隆寺西院伽藍: 岩波書店 図版6, 1974
- 3-8) 濱田耕作: 法隆寺の建築様式と支那漢六朝の建築様式について, 東洋美術史研究 座右寶刊會刊 第72図, pp152, 1942
- 3-9) 法隆寺國寶保存工事報告書 第14冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告附圖, 法隆寺國寶保存委員會 第56図, pp55, 1956
- 3-10) 図説 木造建築事典 实例編: 木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 法隆寺金堂 上重初重矩計図抜粋 pp13, 1995
- 3-11) 雲岡石窟: 山西雲岡石窟文研究所・李治国 編, 第73図 pp87, 1995
- 3-12) 敦煌建築研究: 蕭默著, 机機工業出版社, 図7-20, pp227, 2002
- 3-13) 中国古代建築史第二版: 建築科学研究院建築史編委員会組織編写, 中国建築工業出版社, 図84-1, pp130, 1984
- 3-14) 敦煌建築研究: 蕭默著, 机機工業出版社, 図7-25, pp231, 2002
- 3-15) 中国古代建築史第二版: 建築科学研究院建築史編委員会組織編写, 中国建築工業出版社, 図85-4, pp134
- 3-16) 同上 図86-5, pp138
- 3-17) 同上 図117-4, pp205
- 3-18) 中国古代建築史第二卷: 傅熹年 主編, 中国建築工業出版社 図3-12-1-②, pp630, 2001
- 3-19) 日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集 中央公論美術出版 田中淡: 中世新様式における構造の改革に関する史的考察 挿図17, pp311, 1976
- 3-20) \* 筆者加筆



- 3-21) \* 筆者加筆
- 3-22) 營造法式の研究一:竹島卓一, 中央公論美術出版 挿図 52, pp270, 1970
- 3-23) 寶雲第 36 刷:支那建築より見たる法隆寺系建築様式の年代, 村田治郎 寶雲刊行會 pp31, 1946
- 3-24) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告(附圖)  
法隆寺國寶保存委員會 第 160~161 図, pp203, 1956
- 3-25) 世界文化遺産 法隆寺:毎日新聞社 pp42, 1995
- 3-26) 中国古代建築:美國耶魯大學出版社共同策劃出版 pp57, 2003 から図 2-20a(甘肅省武威出土的漢代陶樓明器)を轉載・拡大したが, 前掲:田中淡著「中国建築の歴史, 弘文堂 pp342, 1989」には図 130 河南靈宝張湾 2 号後漢墓出土綠釉陶器と記してある。また文物 1976 年第 11 期 pp39 図 14 では同クレジットで反転図のスケッチが掲載されている
- 3-27) 中国古代建築:美國耶魯大學出版社共同策劃出版 2-12a(出土情報なし) pp48, 2003
- 3-28) 国立扶余博物館所蔵
- 3-29) 韓国の建築:伊張燮著, 西垣安比古訳, 中央公論美術出版, pp459, 2003
- 3-30) 玉虫厨子:法隆寺 大宝蔵院 蔵  
3-30-1)伊東忠太著作集:日本建築の研究上 図版集, 原書房 第 65 図 pp42, 1982(原本龍吟社刊 1937)  
3-30-2) 日本古寺美術 2 法隆寺Ⅱ:藤井恵介 保育社, pp12, 1987
- 3-31) 四天王寺埋蔵文化財発掘調査報告 第六 四天王寺:文化財保護委員会, 1967  
3-31-1) 第 87 図 pp194, 3-31-2) 第 92 図 pp203, 3-31-3) 同上:図版 pl. 113, 3-31-4) 同上:図版 pl. 115
- 3-32) \*
- 3-33) \*
- 3-34) \*\*
- 3-35) 景福宮勤政殿:無形文化財大木匠鷹秀勤政殿修復宮修復記 第 22 図, pp108, 2005
- 3-36) \*
- 3-37) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告(附圖):  
法隆寺國寶保存委員會 第 542 図, pp191, 1956
- 3-38) \*
- 3-39) 垂木先瓦  
3-39-1) \* 奈良文化財研究所 飛鳥資料館蔵  
3-39-2) 山田寺式軒瓦の成立と展開 古代瓦研究会編:奈良国立文化財研究所 第 50 図, pp161, 2005  
3-39-3) かわら日本史:駒井幸之助 雄山閣出版 第 25 図, pp69, 1981  
3-39-4) 国立扶余博物館(日語版): pp81, 2006(韓国)  
3-39-5) 同上 pp85, 2006(韓国)  
3-39-6) \* 国立中央博物館(韓国): pp300, 2008  
3-39-7) 国立扶余博物館(日語版): pp115, 2006(韓国)  
3-39-8) かわら日本史:駒井幸之助 雄山閣出版 第 25 図, pp69, 1981
- 3-40) 3-40-1) 山田寺発掘調査報告:奈良文化財研究所学報第 63 冊 図版編 P. 11, 2002 遺構実測図 10 に柱を筆者加筆 \*\*  
3-40-2) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp12, 1995 法隆寺金堂 初重平面図に柱を筆者加筆 \*\*
- 3-41) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告, 法隆寺國寶保存委員會 第 41 図, pp212, 1956 に筆者加筆
- 3-42) \*
- 3-43) \*\*

- 3-44) \*\*
- 3-45) \*\*
- 3-46) 台湾 鹿港 龍山寺 山門  
 3-46-1) \*, 3-46-2) インターネット検索による台湾の学生(楊曉青)のレポート抜粋  
 3-46-3) 鹿港龍山寺・天后宮木雕藝術概覧/施鎮洋, 李榮聰合著:施鎮洋華泰文史工作室平面図 1999  
 3-46-4) \*
- 3-47) \*\*
- 3-48) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13, 1995  
 法隆寺金堂 上重初重矩計図反転に筆者加筆
- 3-49) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告, 法隆寺國寶保存委員會  
 第 82 図, pp382, 1956
- 3-50) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13, 1995 法隆寺金堂 桁行き断面図に柱を筆者加筆
- 3-51) \*\*
- 3-52) 中国古代建築史第二版:建築科学研究院建築史編委員会組織編写,  
 中国建築工業出版社, 図 70, pp106, 1984
- 3-53) 中国古代建築史第二卷:傅熹年 主編, 中国建築工業出版社 挿図 2-4-19, pp137, 2001
- 3-54) 日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集中央公論美術出版 1976  
 朝鮮三国時代建築と法隆寺金堂の様式的系統: 関口欣也 挿図 14, pp25
- 3-55) 同上 挿図 16, pp25
- 3-56) \*
- 3-57) 前掲: 図 3-26 参照
- 3-58) 法隆寺—日本仏教美術の黎明—: 奈良国立博物館 第 36 図 pp86, 2004
- 3-59) 前掲: 図 3-28 参照
- 3-60) 前掲: 図 3-25 参照
- 3-61) \*
- 3-62) 前掲: 図 3-30-2 参照
- 3-63) 龍門仏教造像: 仏教美術全集 6 張乃(者の下に羽)著 芸術家出版社台北 pp49, 1998
- 3-64) \*
- 3-65) 仏教歴史地図: 東光書店 2008 より抜粋 筆者加筆
- 3-66-1) \* 3-66-2) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13, 1995  
 法隆寺金堂 上重初重矩計図に筆者加筆
- 3-67-1) \* 3-67-2) 五重塔は何故倒れないか: 上田篤編 新潮選書, 1996  
 第 7 章 木造古塔の心意気 川口衛 図 4 pp215
- 3-68-1) \* 3-68-2) 唐招提寺匠が挑む: 玉城妙子 小学館 創建時(推定)断面図 pp133, 2005

3.7.2 垂木・尾垂木・組物・屋根形状の一覧表に補足する図版

- 3.7-1) 世界美術大全集 東洋編 第2巻 秦・漢:小学館 図版 48, 1998
- 3.7-2) 雲岡石窟:山西雲岡石窟文研究所・李治国 編, 第89 図 pp103, 1995
- 3.7-3) 龍門仏教造像:仏教美術全集6 張乃(者の下に羽)著 芸術家出版社台北 pp23, 1998
- 3.7-4) \* 3.7-5) \*



18. 緑釉陶樓 後漢末期(3世紀初) 高216.0cm 河北省阜城縣桑莊漢墓出土 石家莊市, 河北省文物研究所  
Green glazed pottery model tower. Eastern Han dynasty. From Sangzhuang Han Tomb, Fucheng, Hebei. Institute of Cultural Relics of Hebei Province, Shijiazhuang

3.7-1 緑釉陶樓(後漢末期3世紀初)



3.7-2 雲崗石窟 第11窟



3.7-3 龍門石窟 古陽洞西壁

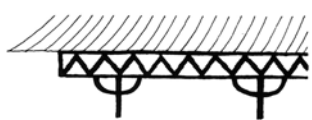


3.7-4 雲崗石窟 第1窟(平行垂木)



3.7-5 雲崗石窟 第2窟(扇垂木)

3. 7-6), 3. 7-7), 3. 7-8), 3. 7-9) 敦煌建築研究：蕭默著，机械工業出版社，图 7 - 17, pp224, 2002  
 3. 7-10) 敦煌建築研究：蕭默著，机械工業出版社，图 1 - 2, pp38, 2002  
 3. 7-11) 同上 图 7-21, pp227, 2002  
 3. 7-12) 同上 图 1-19, pp53, 2002  
 3. 7-13) 同上 图 1-29, pp62, 2002



3. 7-6 敦煌石窟 北周第 428 窟



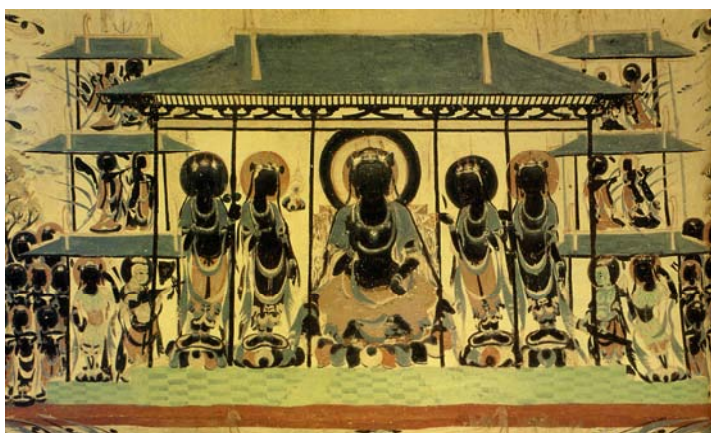
3. 7-7 隋代第 433 窟



3. 7-8 隋代第 277 窟



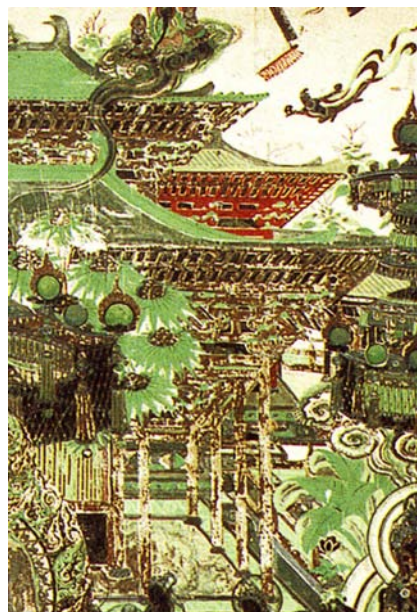
3. 7-9 隋代第 423 窟



3. 7-10 敦煌石窟 隋代第 423 窟



3. 7-11 初唐 第 431 窟南壁



3. 7-12 盛唐 第 172 窟北壁



3. 7-13 晚唐 第 12 窟北壁

北周：557~580 年  
 隋：581~618 年  
 初唐：618~704 年  
 盛唐：705~780 年  
 中唐：781~847 年  
 晚唐：848~906 年

3. 7-14) 世界美術大全集 東洋編 第 4 卷 隋・唐:小学館 図版 77, 1997

3. 7-15) \* ~ 3. 7-21) \*

3. 7-22) 唐招提寺 匠が挑む: 玉城妙子 小学 pp22, 2005

3. 7-23) \*

3. 7-24) 正倉院案内: 和田軍一 吉川弘文館, 図 18 pp40, 1996



3. 7-14 石棺(隋 608 年)



3. 7-15 仏光寺大殿(唐 857 年)



3. 7-16 独楽寺観音閣(遼 984 年)



3. 7-17 下華嚴寺(遼 1038 年)



3. 7-18 上華嚴寺(金 1140 年)



3. 7-19 隆興寺魔尼殿(北宋 1052 年)



3. 7-20 仏光寺文殊殿(金 1137 年)



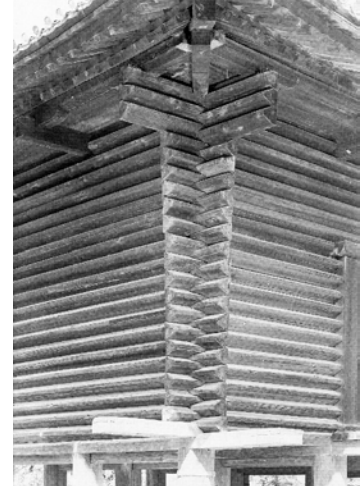
3. 7-21 仏宮寺釈迦塔(遼 1056 年)



3. 7-22 唐招提寺(奈良 770~781 年)



3. 7-2 新薬師寺(奈良 747~780 年)



3. 7-24 正倉院(奈良 756 年)

### 3.8 今後の研究課題

- 3. 8-1) 中国建築の歴史：田中淡 弘文堂 第一編 先秦時代宮室建築序説 図 41, pp66, 1989
- 3. 8-2) 同上図 40, pp66
- 3. 8-3) 同上図 29, pp43, 図 30, pp45
- 3. 8-4) 同上図 27, pp40
- 3. 8-5) 中国の都城遺跡—出土文物と派遣研究員の踏査記録—奈良県立橿原考古学研究所附属博物館 殷墟の礎石 pp7, 1983
- 3. 8-6) 東北学院大学論集 歴史と文化 第 40 号：東北学院大学学術研究会, 図 3, pp10, 図 9, pp15, 2006
- 3. 8-7) 中国建築の歴史：田中淡 弘文堂 第一編 先秦時代宮室建築序説 図 25, pp38, 1989
- 3. 8-8) 高頤闕： 3. 8-8-1) 中国古代建築：美國耶魯大學出版社共同策劃出版 2-18, pp56 2003  
3. 8-8-2) 仏教美術から見た四川流域：奈良美術研究所編 図 19-1, pp39, 2007
- 3. 8-9) 東洋美術史研究 座右寶刊會刊：濱田耕作 法隆寺の建築様式と支那漢六朝の建築様式について 図版 70-1, 1942
- 3. 8-10) 同上 図版 70-2
- 3. 8-11) 世界美術大全集 東洋編 第 2 卷 秦・漢：小学館 秦漢時代の建築(田中淡) 第 78 図 pp101, 1998
- 3. 8-12) 考古学報 1977 年第 2 期：唐長安大明宮城門復原案 図 14, pp148, 1977
- 3. 8-13) 考古学報 1965 年第 4 期：中国古代建築年代的鑑定 祁英涛 図 8, pp26, 1965
- 3. 8-14) 前掲 3-52)
- 3. 8-15) \* \*
- 3. 8-16) 図説 木造建築事典 实例編：木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13, 1995  
法隆寺金堂 桁行断面図に筆者加筆
- 3. 8-17) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告, 法隆寺國寶保存委員會 第 41 図, pp212, 1956 に筆者加筆
- 3. 8-18) 中国古代建築史第二版：建築科学研究院建築史編委員会組織編写,  
中国建築工業出版社 図 37-2, pp57, 1984
- 3. 8-19) 雲岡石窟：山西雲岡石窟文研究所・李治国 編, 第 73 図 pp87, 1995

3. 8-20) 文物 1975 年第 4 期: 文物編輯委員會 文物出版社 図版 2, 3, pp64, 1975
3. 8-21) 同上 図版 1-3, pp46, 1975
3. 8-22) 日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集中央公論美術出版 1976  
朝鮮三国時代建築と法隆寺金堂の様式的系統: 関口欣也 挿図 23, pp32
3. 8-23) 法隆寺國寶保存工事報告書 第 14 冊 国寶法隆寺金堂修理工事報告(附圖)  
法隆寺國寶保存委員會 第 74 図 pp63, 第 90 図 pp68
3. 8-24) 図説 木造建築事典 実例編:木造建築研究フォーラム編 学芸出版社 pp13, 1995  
法隆寺金堂 上重初重矩計図に筆者加筆
3. 8-25) 日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集中央公論美術出版 1976  
朝鮮三国時代建築と法隆寺金堂の様式的系統: 関口欣也 挿図 31, pp37
3. 8-26) 同上 挿図 33, pp37
3. 8-27) 先史日本の住居とその周辺: 浅川滋男編 同成社 図 41, pp410, 1998
3. 8-28) 同上
3. 8-29) 日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集中央公論美術出版 1976  
朝鮮三国時代建築と法隆寺金堂の様式的系統: 関口欣也 挿図 21, 22, pp32
3. 8-30) 考古学報 1984 年第 3 期: 青龍寺復原計画案 図 11, pp396, 1986
3. 8-31) \*
3. 8-32) \*
3. 8-33) 中国石窟 麦石山石窟:天水麦石山石窟芸術研究所編 平凡社 図版 145, 1987
3. 8-34) 東洋美術史研究 座右寶刊會刊:濱田耕作  
法隆寺の建築様式と支那漢六朝の建築様式について, 図版 69-1, 1942
3. 8-35) 中国古代建築 美國耶魯大學出版社共同策劃出版 図 2-24, pp61, 2003
3. 8-36) 中国の都城遺跡—出土文物と派遣研究員の踏査記録—:奈良県立橿原考古学研究所付属博物館表紙 1983
3. 8-37) 中世新様式における構造の改革に関する史的考察: 田中淡 挿図 7, pp300  
日本建築の特質 太田博太郎博士還暦記念論文集中央公論美術出版 1976





## 謝辞

本研究は修士論文「庇から考察する日本の古建築」から継続するもので、きっかけとなる木造建築コースに誘ってくださった太田正光先生、1/2縮尺実験にゴーサインを出してくださった安藤直人先生、研究の進行具合を気にかけてくださった佐藤雅俊先生、修士論文の時から歴史的考察に助言をお願いした藤井恵介先生、みなさまには副査をつとめていただき大変感謝しております。

また本研究は(財)トステム建材産業振興財団・平成20年度研究助成により、実験を最後まで継続することができました。更に「扇垂木落下跡の石膏型」の実測を快く許可して下さった「総本山 四天王寺」歓学部文化財係のみなさま、中国建築に関する貴重な講義をされた田中淡先生、研究内容に関心を持ってくださった内田祥哉先生、内田先生のご紹介で生駒まで押しかけて、お話を聞かせて頂いた鈴木嘉吉先生、また研究の場を与えてくださった東京大学大学院農学生命科学研究科・生物材料科学専攻の先生方、みなさま有り難うございました。

とくに木造建築コース、木質材料学研究室の学生諸君と相馬智明先生には試験体搬入・組立・実験にわたり多大な人力と、ゼミにおける貴重なコメントを提供してくれたことに感謝しています。

そして法隆寺の立体架構に関するアイデアを示し、実験に関する具体的なアドバイスをくださった稲山正弘先生がおられなかったら本研究は成立しなかったと思います。

みなさま本当に有り難うございました。

木本次憲

2009年12月