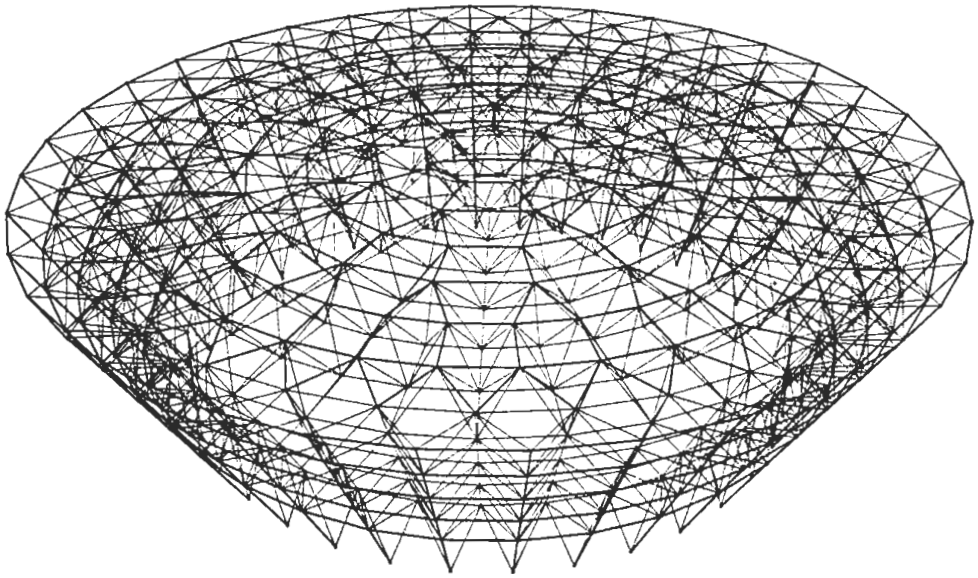
木質構造研究の現状と今後の課題



1987年 2 月

木材強度・木質構造研究会

日本木材学会

「木質構造研究の現状と今後の課題」
をまとめるにあたって

昭和３０年１０月名古屋で開催された第１回日本木材学会大会に於て数件の研究発表が行われて以来、木材の構造的利用に関する研究は木材学会における重要な研究分野の一つとして今日に引き継がれて来ているが、その間、関連する基礎技術や理論の進展、社会的情勢の変化に応じて、様々な変遷を経ながら現在に至っている。

試みに過去２０年間の木材学会大会時における、木材強度・木質構造関係の研究発表状況を、本文中の分類に従い５年毎にまとめてみると下表の様になる。これを見ると、以前は材料性能に関する研究がその大半を占めていたのに対し、最近ではその範囲に留まらず、接合、構造体構成要素と言った、よりエンドユースに近い研究内容もかなり扱われる様になって来ている。この事は、建築材料としての木材、木質材料の基礎材質評価に始まり、その変形破壊機構についての材料力学的解析と言った問題に発展して来た木材強度研究者の興味の対象が、それらを用いた構造物の性能評価の問題にも広がって来ている事を示している様に思われるが、同時にまた、我が国の木質構造研究分野において、林産部門の研究者の存在が少しずつ戦力として認められ期待される様になって来た事も見逃せないであろう。当研究会がこの様な内的、外的状況を考慮して、数年前に木材強度研究会から現在の木材強度・木質構造研究会に名称を変更したのは、まだ記憶に新しいところである。

木材学会大会における木材強度
木質構造関係の研究発表件数

( )内%

年　度	1967～1971	1972～1976	1977～1981	1982～1986
材　料	106 (78)	65 (58)	75 (41)	74 (38)
接　合	10 (7)	20 (18)	40 (22)	42 (21)
構造体構成要素	12 (9)	23 (21)	52 (28)	61 (31)
家　具 その他	8 (6)	4 (4)	17 (9)	20 (10)
計	136	112	184	197

幸いな事に、ここ数年来、我が国では長く沈滞状態にあった木質構造が見直される風潮にあり、これに関係する調査、研究開発に対しても様々なバックアップ体制が整えられつつある様である。我々研究者の立場から自戒をこめて言えば、残念ながらこの様な状況は、必ずしも木材や木質構造に関する十分な研究実績を基盤として導かれたものとは言い難く、むしろ技術以外の社会的状況に依るところが大きい様に思われる。しかし、この与えられたチャンスを生かし木質構造の地位を定着させて行くためには、これに携わる研究者、技術者の総力をあげた技術蓄積が不可欠となる事は言うまでもないであろう。

これとは別に現在はまた、我が国における木材関連産業の全般的な状況から、既存の林産関係研究機関や教育機関の存在価値が問い直されている時期でもある。この事は単にそれら組織の必要性の有無やあり方の問題にとどまらず、そこに属する個々の研究者がそれぞれに与えられた条件の中で自らの研究上の立場をどの様に位置づけ、どの様な役割を担って行こうとするのかと言う問題としてとらえる必要がある様に思われる。

この様な現状の中で、今後我々がどの様な問題に取り組み、どの様な方向を目指すべきかを考えて行くために、建築構造学の立場で木質構造に取り組んでおられる諸先生方や建築設計実務家の方々にも御参加いただき、昭和６１年１０月、東京に於て表記のテーマによる研究会を持った。当日は農林水産省林業試験場構造性能研究室の小松幸平、神谷文夫両氏に国内外の研究状況の概略と問題点をまとめていただくとともに、東京大学工学部の坂本功氏および伊藤邦明都市・建築研究所の伊藤邦明氏にそれぞれの視点から今後の研究課題についての御提言をいただいた。

この小冊子は小松、神谷両氏の当日の資料を一部手直し、補足していただいたものと、坂本、伊藤両氏の御講演及び総合討論の概要を取りまとめたものである。これまで、この種の議論はともすればその場限りの総論的な問題整理に終わりがちで、なかなか日常的な研究活動とは結び付いて行かないきらいがあった様に思う。今回の議論がそれにとどまる事なく、少しでも具体的な研究成果につながって行く事を期待したい。

昭和６２年２月　　日本木材学会
木材強度・木質構造研究会幹事

目　　次

研究の現状と課題

〔１〕材料・接合 ---------- 小松幸平（林業試験場） 1

〔２〕構造体構成要素 ---------- 神谷文夫（　〃　） 26

問題提起と総合討論

〔１〕建築構造学の立場から ---------- 坂本　功（東大工学部） 66

〔２〕設計者の立場から -------- 伊藤邦明（伊藤邦明都市・建築研究所） 71

〔３〕総合討論概要 ---------- 85

〔４〕総合討論を終えて ---------- 司会　平嶋義彦（林業試験場） 90

参加者名簿 ---------- 91

表紙イラスト　：　コンピュータグラフィックスによる立体トラス
小国町交通センター　　葉　祥栄　設計
（日経アーキテクチュア　１９８６年１１月１７日号、
ＳＤ　１９８７年１月号　にそれぞれ掲載）

研究の現状と課題

〔１〕材料・接合に関する研究の現状と今後の課題

農林水産省林業試験場木材利用部
構造性能研究室
小松幸平

１．はじめに

表題のように大きなテーマが木材強度・木質構造研究会のテーマとして選ばれたことは異例のことであり、その背景について思い当たるところを初めに少し触れてみたい。

木材学会が林学会から独立して３０年以上経つ今日、木材強度の研究が目指すべき目標は何であるのか？、我々木材強度研究者は木質構造の研究に対してどのような役割を演じられるのか？、といった自問が少なからぬ研究者の心の内にあるように思える。

幸いにも、現在、木構造は一種のブームであり、雑誌等で、木材・木構造が取り上げられる機会も多くなってきた。このような時世にあって、木材強度・木質構造の研究がどのような現状にあり、今後、どのような面で木質構造と関わっていけるのかを、建築の専門家を交え、志を共ににする研究者の集りにおいて、議論し、確認し合うことは大切なことであると考える。

１９８４年５月、ニュージーランド（ＮＺ）オークランド市で、'８４Pacific Timber Engineering Conference という木材強度と木構造に関する国際会議が開催された。この大会は、NZ Timber Design Society という小さなグループが企画・主催したのであるが、NZ中の木構造関係者２００名以上、国外から９０名以上の研究者が参加し、会議は大成功であった。我が国からは今回、話題提供および司会を担当することになった林業試験場の３人、ならびに坂本先生が出席し、杉山先生がゲストスピーカーとして招待された。我が国と材料事情が違うとはいえ、木構造がごく平然と、確かな技術的裏付けの下に、しかも他を圧倒する迫力で建てられている現状を目のあたりにしたあのカルチャーショックが、今回の研究会の企画に少なからぬ影響を及ぼしていることは確かである。

また、８４'ＰＴＥＣに先立つて、１９８３年１０月、アメリカのミルウォーキーにおいて、Structural Wood Research と名打った研究会が開かれた。この研究会では北米を中心とする木材強度、木質構造の研究の現状と今後の課題について広範囲な検討がなされた。今回の研究会は、その会議を雛形として企画されたものである。

２．材料

２．１構造設計に関連したトピックス

２．１．１ストレスグレーディング（応力等級区分）

天然材料である木材は材質の変動が大きいため、その材質特性に応じて何種類かの等級に区分し、目的に合わせて使用していくことが合理的である。特に、構造用に使用される製材については、最終要求性能である「強さ」と、「剛性」に応じて応力等級区分されるべきである。しかしこれまで、構造設計を要求されるような木構造の発展が見られなかったこともあって、、我が国の実情は必ずしもそうはなっていない。

現在、我が国の代表的グレーディングルールである「製材の日本農林規格（最新版：昭和５６年農林水産省告示第４０６号）」いわいるＪＡＳでは、おもに材面の欠点等に基づいて構造用製材を２等、１等、特等の３つの等級に区分している。許容応力度については、一応想定はしているものの、公的には規定はされていない。これに対して、建築基準法施行令（第８９条）では、木材の許容応力度を樹種ごとに規定しているが、等級について言及はしていない。表１－ａ），ｂ）にこの両者の関係を示す。

製材の日本農林規格解説

各等級における想定許容応力度　(kg／cm²)

材種＼等級		特等	1等	2等	備考
板類		1等の値の倍程度（建築学会のいう主級構造材）	NⅠ－90 NⅡ－70	切りづかいをすることを考えて特に想定しない	主に曲げ材料として考える。
びき割類			NⅠ－90 NⅡ－70		曲げ，圧縮材料として考える
びき角類	正角		NⅠ－80 NⅡ－60		圧縮材料として考えるか曲げ材としても含む
	平角		NⅠ－90 NⅡ－70		曲げ材料として考える

NⅠ－針葉樹Ⅰ類
NⅡ－針葉樹Ⅱ類

製材の日本農林規格解説

構造材としての許容応力度
（建築基準法施行令第89条）

樹種		長期応力に対する値 kg/cm² 圧縮	引張り曲げ	剪断	短期応力に対する値 kg/cm²
針葉樹	アカマツ，クロマツ，カラマツ，ヒバ，ヒノキ，ツガ，ベイマツ，ベイヒ	80 (100)＊	90 (120)＊	7 (9)＊	長期応力に対する値の2倍
	スギ，モミ，エゾマツ，トドマツ，ベイスギ，ベイツガ	60 (80)＊	70 (90)＊	5 (7)＊	
広葉樹	カシ	90	130	14	
	クリ，ナラ，ブナ，ケヤキ（アピトン）	70	100	10	

（注）広葉樹については建築用の構造材として使用されることが少ないことから，この規格では考えていない。
（　）建築学会の数値
（　）＊主級構造材の数値

表１ａ），ｂ）製材の日本農林規格における等級と想定されている許容応力度並びに建築規準法施行令第８９条における製材の許容応力度（文献［２１］）

諸外国の規格では、等級ごとに許容応力度が決められているのが当たり前であり、設計者は要求性能に応じて合理的な材料選択が可能となる。我が国でもこのような応力等級と許容応力度の連動した統一規格の制定が望まれる。

応力等級に関する最近の我が国での研究例を、筆者の知る範囲で、「文献」に示す。現在のＪＡＳ等級区分がどの程度応力等級区分法として利用可能かという例を図－１ａ），ｂ）に示す。

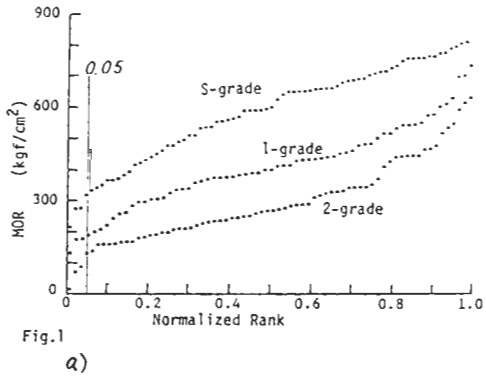
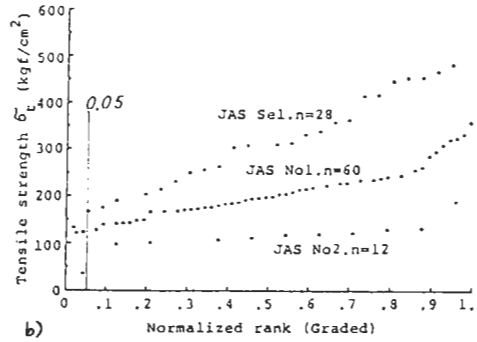


Fig.1
a)



b)

図１－ａ）ベイツガ正角の曲げ試験［１］　ｂ）エゾマツ板材の引張試験［２］

図から明らかなように、ＪＡＳによる等級と強度の大小は妥当な対応関係を示しており、ＪＡＳによる応力等級区分が一定のレベルで行なわれていることを示唆している。ただし、許容応力度の決定において重要となるのはランクの５％ｉｌｅ付近の値であり、許容応力度の決定のためには、後述するイングレードテストのように、低品質側に着目した材質試験が今後必要であろう。

一方、ＪＡＳのような視覚的等級区分では、ある程度の等級区分は行なえるが、等級間でオーバーラップする部分がでる等の不十分な面もあり、これを補う、もしくは、これに代わる手法として１９５０年代の後半から機械的等級区分の研究が北米、イギリス、オーストラリアを中心に盛んとなった。　その方法には幾つかあるが、主に強度とヤング係数との高い相関性を利用して、ヤング係数から強度、ひいては、許容応力度を推定するものが一般的である［２０］。我が国でも機械的等級区分に関する研究が集成材ラミナの分野で進められており、視覚的等級区分に比べ、バラツキの少ない等級区分ができることが示されている［１１，１２，１３］。なお、製材品については、主として曲げ強度とヤング係数の関係が実大材について求められており　［４］，　ＭｏＥで等級区分した場合、標準偏差が小さくなって、等級の統計的下限値は目視による場合よりも高くなることが明らかにされている［９］。

２．１．２　許容応力度・材料強度・強度の統計的下限値

建築構造設計の実務においては、建築基準法施行令第８９条に規定されている許容応力度が使われるが、「許容応力度」の意味する所を理解するためには、建築学会編木構造設計規準・同解説における許容応力度の定義が参考となる。それによると、例えば普通構造材の繊維方向許容応力度は次式で算定される。

$$ {}_{s}f = {}_{0}F \times 2/3 \times \alpha \quad \text{（短期）} \ldots\ldots\ldots\ldots 1) $$

$$ {}_{L}f = \beta \times {}_{s}f \quad \text{（長期）} \ldots\ldots\ldots\ldots 2) $$

ここで、

${}_{0}F$：無欠点小試験体の強度分布における下限品質。かっては平均値の3/4を採っていたが、最近は4/5を採るようである。また、諸外国の例に習って、強度を弱い順にランク付けした場合の５％ile値を統計的下限値として代用する場合もある。

２／３：曲げ、圧縮の場合は比例限度を、引張、せん断の場合は単に2/3を意味する。

α：欠点による低減係数。応力の種類によって異なる。

β：長期と短期の比（=1/2）

欠点を含む実大材の場合、${}_{0}F \times \alpha$　すなわち、グループとしての下限品質を、まとめて、F0.05と表わせば、欠点を含む実大材の許容応力度は；

$$ {}_{s}f = F_{0.05} \times (2/3) \quad \text{（短期）} \ldots\ldots\ldots\ldots 3) $$

$$ {}_{L}f = F_{0.05} \times (1/3) \quad \text{（長期）} \ldots\ldots\ldots\ldots 4) $$

となる。

一方、建築基準法施行令第９５条では、「材料強度」なる指標を定めているが、その値は建築基準法施行令第８９条で定められた木材の長期許容応力度の３倍である。仮に、この比率が建築学会が定めた許容応力度にも適用できるものと仮定すれば、次ぎの関係が得られる。

$$ F = [\text{材料強度}] \fallingdotseq 3 \times {}_{L}f = F_{0.05} \ldots\ldots\ldots\ldots 5) $$

つまり、最近学会発表等でよく使われる「材料強度」という指標は、大ざっぱな目安として、諸外国で使われている統計的下限値　５％ｉｌｅ値　$F_{0.05}$　に相当するものと考えることができる。図２にこれら 材料強度（$F_{0.05}$）、許容応力度（${}_{s}f$：短期、${}_{L}f$：長期）、強度の中央値（$F_{0.5}$）等の相互関係を示す。

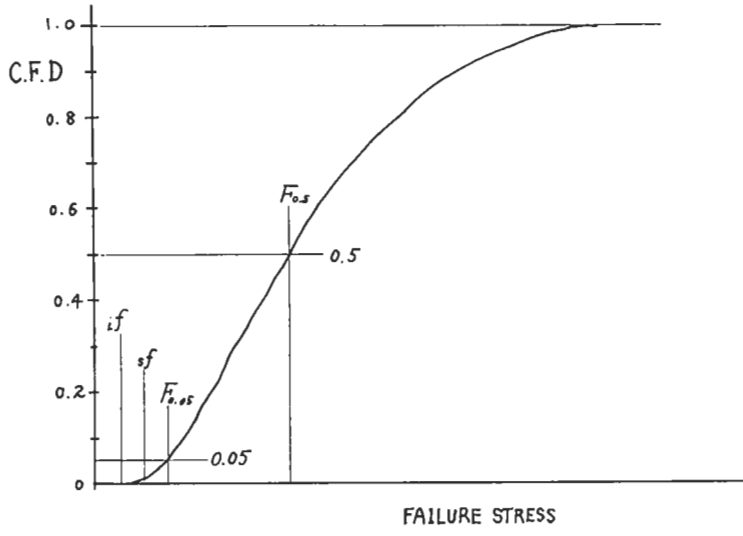


図２　木材の強度分布の模式図（縦軸：累加頻度　横軸：強度）

ところで、「材料強度」なる指標の使い途であるが、鋼材等での例［１４］から類推すれば、大地震を想定した材料の終局耐力のチェックに使われるのが本筋であろうと考えられる。しかし、木構造の場合、そのような２次設計は今の所要求されていないので、現状では、ある樹種グループが最低限有すべき強度の参考値といった意味合いが強いようである。

２．１．３　保証荷重（プルーフロード）試験

最近注目されている概念に保証荷重（プルーフロード）試験というものがある。諸外国での実施例からみて、この試験は、以下の２つに分けて考えたほうが誤解が少ないように思われる。

（１）視覚的もしくは機械的に等級区分された材料が、適切な許容応力度を有しているかどうかをチェックするため、統計的下限値付近の応力を与えて低品質側の強度分布を調べる試験。
（２）ある材料が特定の用途に使用できるかどうかをチェックするため、あるいは基本的材質のよく分かっていない未利用樹種を構造用に使う際、実際の使用条件に近い荷重（応力）を与え、破損しなかった材料については負荷した荷重（応力）に耐えることを保証する試験。

（１）は、Madsen 教授が提唱した "In-Grade Test"［１５，１６，１７］において、視覚的に等級区分されたディメンションランバーの低品質側強度分布を調べるため用いられて有名になったもので、北米では機械的に等級区分された製材（ＭＳＲ）の品質管理（ＱＣ）用にこの保証荷重試験が組込まれている［１８］。

一方、（２）は、フィンガージョイント材のように、破壊的手段以外に品質を評価することが困難な材料について、少なくとも保証荷重レベルまでの耐力を保証するために行なわれる試験［２２］である。保証荷重試験というのは、構造安全性の面からは有益であるが、「商品」の数パーセントが確実に破壊するため、材料供給側にとってはメリットを積極的に評価しにくいという反面がある。したがって、経済的側面に留意しつつ、保証荷重試験において与えるべき荷重レベルをどう考えるかが、保証荷重によるダメージの問題［１５，１９］と絡んで、大変重要な問題となってくる。

２．１．４　今後の課題

１．等級区分と許容応力度の一体となった統一規格の制定

２．マイクロプロセッサーを活用した廉価で、軽量で、我が国の実情にあったストレスグレーディングマシンの開発

３．低品質側に着目した全国規模的なイン・グレードテストの実施（１．に関連して）

４．保証荷重試験の必要性とそのメリット、デメリットに関する総合的検討

２．１．５　文献＜材料：構造設計に関連したトッピクス＞

［　１］中井　孝、海老原　徹、田中　俊成：”在来構法構造用製材の応力等級区分（１）ベイツガ正角の等級と曲げ強度”，第３４回木材学会発表要旨集、ｐ．２８５、１９８４

［　２］中井　孝：”構造用製材の実大縦引張強度（１）市販エゾマツ板材（１ｂｙ６）の実大引張試験”、日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２６７５－２６７６、１９８４

［　３］中井　孝：”構造用製材の実大縦引張強度（３）欧州アカマツ平割材の縦引張り試験”、日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．１２６１－１２６２、１９８６

［　４］中井　孝：”国産造林木の材質－スギ正角材の実大曲げ強度－”、木材工業、Ｖｏｌ．３９－１１、ｐｐ．４２－４６、１９８４

［　５］中井　孝、海老原　徹：”在来構法構造用製材の応力等級区分（３）スギ平角の実大曲げ試験”，第３５回木材学会発表要旨集、ｐ．８８、１９８５

［　６］丸山　則義、有馬　孝礼：”国産造林木の応力等級に関する研究”、日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２０４７－２０４８、１９８２

［　７］丸山　則義、有馬　孝礼：”国産造林木の応力等級に関する研究（ＩＩ）”、日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２２２３－２２２４、１９８３

［　８］飯島　泰男：”シベリア産カラマツ材の強度性能に関する研究”：富山県木材試験場研究報告、Ｎｏ．１，１９８３

［　９］飯島　泰男，中谷　浩：”実大構造用材の強度（ＩＩＩ）”，第３５回木材学会発表要旨集、ｐ．８７、１９８５

［１０］飯島　泰男：”構造用製材の曲げ強さ予測法について”、日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．１２６５－１２６６、１９８６

［１１］倉田　久敬，山本　宏、工藤　修、長原　芳男：”エゾマツ２０８Ｄ材の強度性能（２）－機械的強度等級区分のこころみ－”，第２６回木材学会発表要旨集、ｐ．１１４、１９７６

［１２］藤井　毅：”集成材のストレスグレーディングシステム（１），（２）”、木材工業、Ｖｏｌ．３５－１　＆　３５－２、ｐｐ．８－１４　＆ｐｐ．１５－２０，１９８０

［１３］倉田　久敬，山本　宏、長原　芳男，高橋　政治、川口　信隆：”道産針葉樹による枠組壁工法構造用製材の強度性能”，林産試研報、第６７号、ｐｐ．４－３３、１９７８

［１４］日本建築学会編：”地震荷重と建築構造の耐震性”，１９７６

［１５］Madsen,B. :"In-Grade Testing Degree of Damage Due To Proof Loading of Lumber in Bending "、Structural Research Series, Report No.17,U.B.C, 1976

［１６］Madsen, B. Nielsen, P.C. : "In-Grade Testing. Accuracy and Confidence Computer Simulation"、Structural Research Series, Report No.21,U.B.C, 1978

［１７］Madsen,B. :"In-Grade Testing- Problem Analysis ",F.P.J.、Vol.28, No.4,pp.42-50, 1978

［１８］Western Wood Products Association: "Machine Stress - Rated Western Lumber. Products Specification and Procedure Certification Quality Control , C/QC Procedures 102.86,

［１９］（財）日本住宅・木材技術センター：”性能標準・木質材料のグレーディング”技術開発推進事業報告書、１９８６

［２０］（財）日本住宅・木材技術センター：”性能標準・縦接合（内容はグレーディング”技術開発推進事業報告書、１９８５

［２１］（社）全国木材組合連合会編：”製材等の日本農林規格並びに解説”，ｐｐ．９４－９５、１９８５
［２２］たとえば、小松幸平、堀江和美、北村維朗：”量産工場におけるフィンガージョイントラミナ（ＦＪラミナ）の保証荷重試験”，木材工業、Ｖｏｌ．４１－１１，ｐｐ．２５－２８、１９８６

２．２材料科学に関連したトピックス

２．２．１強度に及ぼす節の影響

木材の強度に及ぼす節の影響は、古くから研究されている［１］。畑山の最近の研究［２］によれば、節を単なる断面欠損として扱うこれまでの考え方［１，３］は、時として危険側の推定を与え，むしろ、節の周辺の繊維傾斜の分布に着目した強度推定法がより正確に実大材の強度を推定し得ることが示されている［２］。畑山の方法は、まず節周辺の繊維傾斜分布を実験式で表現する。次に、節周辺の木材を仮想の薄層に分割し、各層のヤング率をハンキンソン式で求め、仮定したひずみ分布より各層の応力を求めた後、その総和から実大有節材の耐力を求めるものである。

平嶋［４］は畑山の方法を有節ベニヤの強度推定に応用し、荷重－ひづみの非線形関係も含めて、理論と実験がよく合うことを示している。

Goodman 、Cramer, Bodigらは［５、１５、１６］は節周辺の繊維傾斜分布を流体力学的相似で近似し、最終的には最大応力仮説、破壊力学的条件等を織り混ぜた複雑なコンピュータープログラム（有限要素法採用）によって、有節材の引張強度を解析する手法を提唱している。Bier［６］は、基本的には節周辺の繊維傾斜分布に着目しているが、繊維走行が節を中心とする同心円の接線方向に分布していると仮定して、５プライ構造用合板の剛性と強度を推定する数学モデルを提案している。

一方、飯島［７］は、節を等価なクラックとおいて線形弾性破壊力学（Linear Elastic Fracture Mechanics ：LEFM ）を適用する Pearson［８］，Boatright & Grareet ［９］らの考え方を採用して、エッジノット材の曲げ強度に及ぼす節の影響を計算している。それによると、等価クラック理論は現行のＡＳＴＭによる断面欠損評価式［１０］に比べ、より実験値に近い強度推定を行なえるようである。

２．２．２強度に及ぼす切り欠きの影響

木構造設計規準では、切り欠きを有する木材の曲げ強度の算定に対しては、切り欠き部の正味断面係数Ｚｏの４５％を取るように規定している［１１］。これに対して、切り欠きを応力集中源と考え，切り欠き底の応力特異性［１９］に着目した平井の研究［１２］によれば、引張側に深さｄの切り欠きを有する木材梁の最大モーメントMc は次式で計算される

$$Mc = \tau A / (d^{0.45} + 0.17 d^{0.10}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 6)$$

ここで、　τ：ブロックせん断試験で得られるせん断強度
　　Ａ：試験体寸法等に関係する係数
　　ｄ：切り欠き深さ

このように、モーメントを受ける切り欠き底の破壊の基準値として、ブロックせん断試験で得られるせん断強度を用いることに関しては、ブロックせん断試験に関する大草［１３］の応力解析の結果からも十分合理的であると考えられる。また、最近発表された Murphy ［１７］の報告によれば、式６）は比較的大型のノッチ付き集成梁の最大耐力を、実用的な精度内で推定し得ることが実験的に証明されている。

なお、オーストラリアの木構造設計規準である SAA Timber Structures Code［１４］では、図３のような切り欠きを有する木材梁の設計式として、切り欠き底の応力特異性を考慮し、ブロックせん断試験で得られるせん断強度を基準値とする式６）に類似した設計式を採用している。

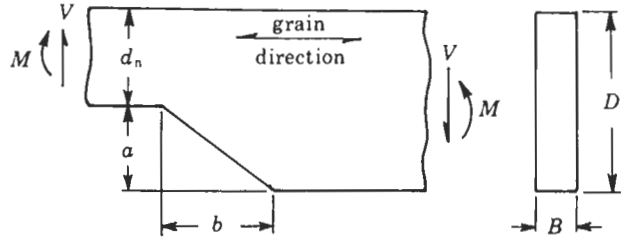


図３　切り欠き梁の形状
（AS 1720 [14]）

なお、切り欠き底の応力集中の問題等は、いわいる線形破壊力学によってかなり厳密に解析することができる。木材強度・木構造の分野でこの手法が適用可能な例として 、Leicester ［１８］は図４に示すような場合を挙げている。

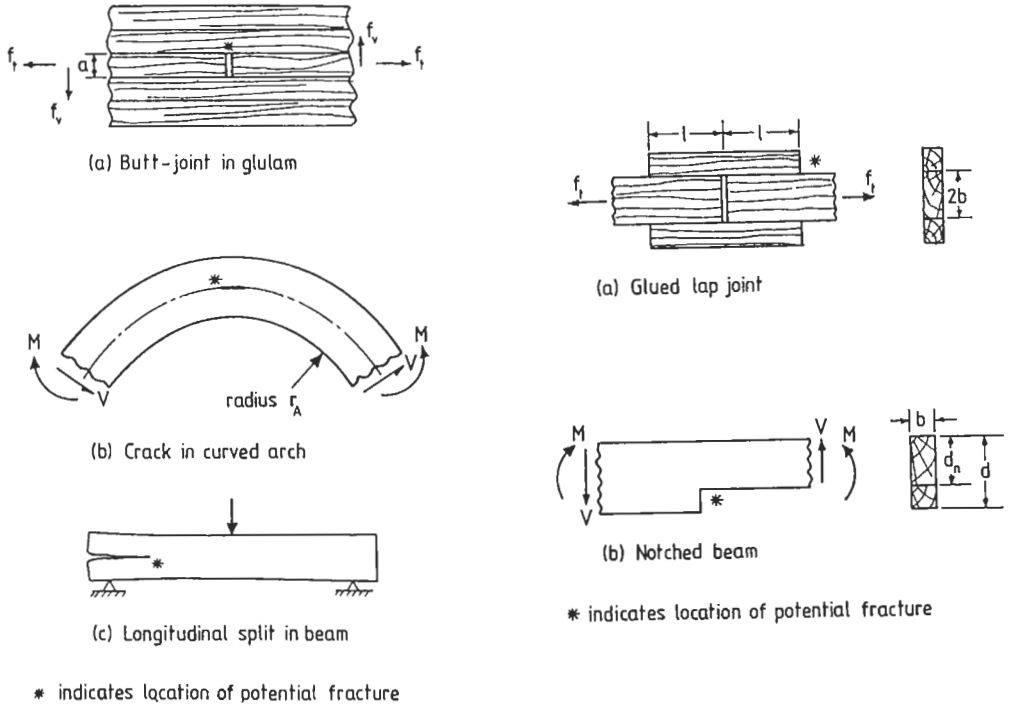


図４　線形破壊力学の適用できる事例（Leicester［１８］より）

２．２．３　今後の課題

１．欠点（節、繊維傾斜、割れ）を有する木材の強度性状を表現し得る数学モデルの設定

２．材料常数等のパラメーターの分布を考慮に入れた数学モデルによるコンピューターシュミレーションと実験的検証

３．線形弾性破壊力学の実際的応用（例：オーストラリア規格等）

２．２．４　文献　＜材料科学的研究＞

[　１] 森　徹：”木材の曲げ破壊係数に及ぼす節の影響に関する研究”，日本建築学会論文報告集、Ｎｏ．１３，ｐｐ．８－１６，１９３９

[　２] 畑山譲男：”有節材の強度推定に関する研究”，林業試験場研究報告、Ｎｏ．３２６、ｐｐ．６９－１６７，１９８４

[　３] たとえば、Forset Products Laboratory, U.S.Dep.of Agr.:Wood handbook,p.6-4,1974

[　４] 平嶋義彦、Parker, J.R.; Bier,H.：”合板強度推定モデルと実験による検証”，第３５回日本木材学会大会研究発表要旨集、ｐ．１００、１９８５

[　５] Goodman,J.R.; Bodig,J. :"Mathematical Model of the Tension Behavior of Wood with Knots and Cross Grain", 1st International Conference on Wood Fracture,pp.53-61,1978

[　６] Bier, H. :"Radiata pine plywood: A theoretical prediction of the bending properties of structural plywood",FRI Bulletin No.54, FRI, NZ , 1983

[　７] 飯島　泰男：”シベリア産カラマツ材の強度性能に関する研究”，富山県木材試験場研究報告、Ｎｏ．１，１９８３

[　８] Pearson, R.G. :"Application of Fracture Mechanics to the Study of the Tensile Strength of Structural Lumber", Holzforschung, Bd.28, pp.11-19,1974

[　９] Boatright, S.W.J.; Garrett, G.G. : "The Effect of Knots on the Fracture Strength of Wood (I and II)" , Holzforschung, Bd.33, pp.68-77,1979

[１０] ASTM D-245 :"Standard Methods for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber", 1974

[１１] 日本建築学会：”５　部材の設計”，木構造設計規準・同解説、丸善，１９７３

[１２] 平井卓郎：”切り欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力”，北海道大学農学部演習林研究報告、第３７巻、ｐｐ．７５９－７８８，１９８０

[１３] 大草克巳：”木材のせん断に関する弾塑性論および破壊力学的研究（第３報）椅子型（ＪＩＳ）せん断試験体の応力特異性とエネルギー解放率”，鹿児島大学農学部学術報告、第３０号、ｐｐ．２０１－２１５，１９８０

[１４] Standards Association of Australia: AS 1720,"Draft Australian Standard for Rules for Use of Timber in Structures known as SAA Timber Structures Code, 1983

[１５] Cramer,S.M. & Goodman,J.R. :"Model for Stress Analysis and Strength Prediction of Lumber", Wood and Fiber Science, Vol.15, pp.338-349, 1983

[１６] Cramer,S.M. & Goodman,J.R. :"Failure Modeling: A Basis for Strength Prediction of Lumber", Wood and Fiber Science, Vol.18, pp.446-459, 1986

[１７] Murphy,J.F. :"Strength and Stiffness Prediction of Large Notched Beams", Journal of Structural Engineering, Vol.112,pp.1989-2000,1986

[１８] Leicester,R.H. :"Paper 11, The Fracture Strength of Wood" in Australia-UNIDO Workshop on Timber Engineering, pp.11.1-11.23,Melbourne, May, 1983

[１９] Leicester,R.H. :"Some Aspects of Stress Fields at Sharp Notches in Orthotropic Materials",Div.Forest Products Tech. Paper, No.57, CSIRO, Australia, 1971

２．３構造用集成材

２．３．１大断面集成材の規格

我が国の集成材工業は１９５０年代に誕生し、現在企業数約２００社、生産量約３０万m^3といわれているが、その大半は断面が１０．５ｃｍ角程度の造作・構造用柱の生産が中心である［１］。したがって、集成材に関するＪＡＳ，製造基準等も、これら我が国固有の需要にあった内容となっている。しかし、最近我が国でも僅かながら大断面構造用集成材の需要が高まりつつあり、民間、学会を通じて大断面集成材を対象とした、ＪＡＳ，製造基準の制定、ならびに学会規準の改定作業が進められている。今回制定されようとしている大断面集成材のＪＡＳで目新しい点は、ロッジポ- ルパイン、ポンデロ- サパインといった、米国産樹種が針葉樹Ｂ－２グループに入ること、集成材の曲げ試験結果の算定に「寸法調整係数」が導入されること、そして、外層用ラミナに対して曲げ強度試験を課すこと等であろう。現時点で詳しいことは分からないが、その他については集成材の日本農林規格（農林水産省告示第５６６号、１９８２年）における構造用集成材の規格をほぼ踏襲するようである［２］。

２．３．２大断面集成材の曲げ性能に及ぼす寸法効果

集成材の曲げ性能は、一般的には、ラミナの力学的性質、節の位置と大きさ、そしてラミナの断面内配置が分かれば、力学的に等価な曲げ剛性並びに断面係数を計算することによって、ほぼ推定可能であると言われている［３］。しかし、実際には、断面が大きくなると、見掛けの強度が低下する、いわゆる「寸法効果」と言われる現象が見られる。この原因については、現時点では２つの理由が考えられる。１つは、 Bohannan ［４］が最初に提唱したように、断面が大きくなると欠点が含まれる確率も大きくなり、集成材としての破壊確率も高くなるというもので、今回制定されるＪＡＳでもこの説に基づいて誘導される式７）が「寸法調整係数　Ｃ」の算定の基礎となっている。

$$C = (30/H)^{1/9} \quad \cdots\cdots 7)$$

Ｈ：梁せい（ｃｍ）

しかしながら、集成材はラミナの性能と要求性能に応じた人為的なラミナ配置が可能である。また、積層数が増えると逆に欠点の分散効果もあるので、上述した理由だけで「寸法効果」の全てを説明するのは難しい。いま１つ考えられる理由は、梁せいが増すと最外層ラミナの応力分布が純粋引っ張りに近くなって、引張破壊の可能性が大きくなるのではないかと考えるものである［１，５，６］。この仮説の根底には、欠点を有する実大材の場合、その引張強度は曲げ強度の０．５から０．７程度しかないという最近の実験データーがある。特に、フィンガージョイント（ＦＪ）で縦接合したラミナを引張側最外層に配置した大断面集成材の曲げ性能はＦＪラミナの引っ張り性能に支配されることは実験的にも明白である［５，６，２２］。式（８）は以上の考えに基づいて大断面集成材の曲げ強度（ＭｏＲ）を推定した式である［１，５，６］。

$$MoR = F_t\,[n/(r-1+n)]$$

$$\text{or} \quad = F_b\,[nr/(1-r+nr)] \quad \cdots\cdots 8)$$

ただし、F_b：ラミナの曲げ強度　F_t：ラミナの引張強度　$r = F_t/F_b$　ｎ：積層数

図５は式８）の適合性を実験結果との対比で示したもので、梁せいが大きくなると、大断面集成材のＭｏＲはラミナ単独の引張強度に収束していく傾向が分かる。なお、この仮説は考え方が単純で実用的ではあるが、内層ラミナの材質が極端に悪い場合は危険側の推定を与える可能性もあり、その場合はヤング係数の断面内分布を考慮する必要がある。

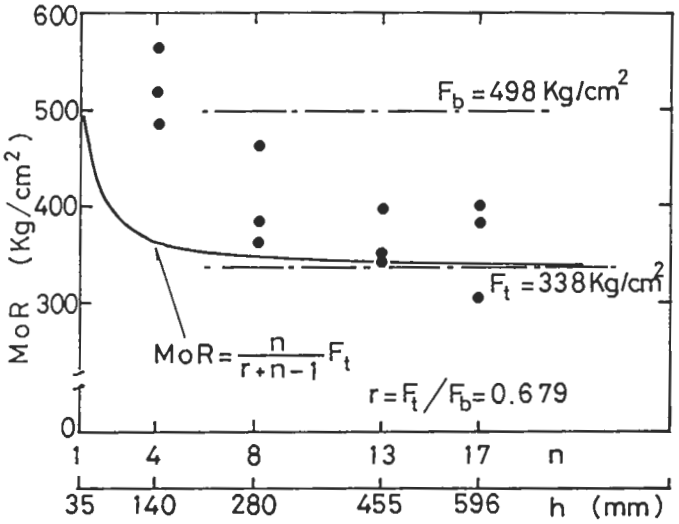


図５　ＦＪラミナを引張側最外層に有する集成梁の曲げ強度と積層数（梁せい）の関係（前田ほか［５］より）

２．３．３集成材の断面設計への確立論の応用

上述したように、集成材の曲げ性能は、ラミナの力学的性質、欠点の位置と大きさ、そしてラミナの断面内配置等からほぼ推定可能である。しかし、いずれのパラメーターもある種のバラツキを有するもので、それらを確率変数と見なして集成材の曲げ性能を推定しようとする試みが見られる。倉田［７］は、ストレスグレーディングママシンで測定されたラミナのヤング係数を正規分布に従う確率変数と見なし、澤田の提案する集成材のＭｏＲ推定法［３，７］を介して、集成材のＭｏＲとＭｏＥの下限信頼限界を算定する方法を提案した。この研究は幾つか考えられる集成材の断面設計法の中の１つとして発表されたもので、基本的思想は、目下我が国で大いに注目されているＰＢＤＭ（Probabilistic Beam Design Method）と同じであると考えられる。ＰＢＤＭに関して筆者の知るところは、他に、中村［８］Foschi & Barrett［９］，Bender et al［１０］の研究のみで、肝心の Weyerhaeuser 社の研究は現時点では公表されていない。

２．３．４集成材の耐火性能

大断面集成材の耐火性能に関するこれまでの研究を文献［１１～２１］に示す。それらによると、大断面集成材は、火災時にあっても表面に形成される炭化層の遮熱力によって内部が保護されるため、燃焼あるいは、耐力低下の進行（炭化速度の平均は０．６ｍｍ／分）は比較的穏やかであると言われている［２０］。そのため、大断面集成材による架構が火災にあった場合、集成材は可燃物量としては大きいが、最後まで焼け残り、火事の激しさに寄与する度合いは非常に少ない［１２］。

火災が生じた際、集成材はどのくらいの時間許容荷重を保持できるかという問題は、実際的に重要な問題である。この時間、すなわち、安全燃焼時間は Imaizumi ［１１］によって初めて解析されたもので、式９）で算定される。

$$t = (1 - d/D)(D/2\beta) \quad \text{.....9)}$$

ただし、βは炭化速度、Ｄは火災前の梁せい、ｄは火災後の梁せいである。

ここで、ｄ／Ｄは梁の幅Ｂとせい Ｄの比Ｂ／Ｄおよび、火災後と火災前の集成材の強度の比$\alpha = f/F$

からなる３次方程式を満たす実根である［１４］。実際上の問題としては、αの値が不確定で、その仮定次第でかなり危険側の時間（安全燃焼時間としては、長時間側）を推定する場合がある。　この問題に対して、モンテカルロシュミレーションによって安全燃焼時間を推定しようという試みが Bender ら［１０］によって最近発表された。彼らの手法は、上述したＰＢＤＭの考え方を集成材の耐火性能の解析に導入したもので、注目される。

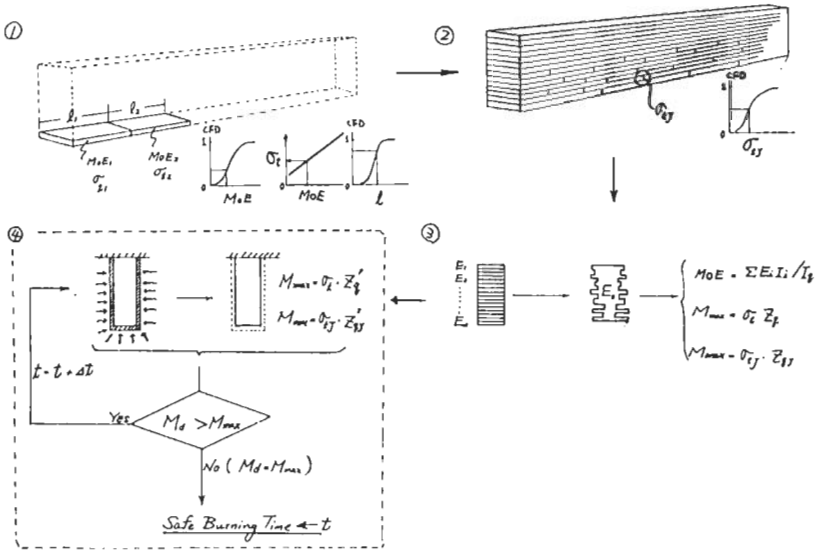


図６　安全燃焼時間の推定も含めたＰＢＤＭの考え方を示す模式図

図６は安全燃焼時間の推定も含めたＰＢＤＭの考え方を模式的に表したもので、①～③迄は単なる強度・剛性推定モデルである。要は、実際に工場で集成材を作る変わりに、ＭｏＥ分布、ラミナの長さ分布等を確率変数とし、変数間の相関関係（例：：ＭｏＥとＭｏＲ）を介して、コンピューターのメモリー内で仮想の集成材を多数作り、最終製品の性能の分布を推定する手法である。

一方、集成材の耐火性能に関する研究は、最近では接合部の耐火性能の方にも力点が置かれている。図７は中村らによる、集成材継ぎ手の載荷加熱実験［１８，１９，２１］の結果の一例を示す。試験体は、湾曲集成材による３ヒンジアーチの継ぎ手として最も一般的に用いられている通しボルトによる鋼板添え板継ぎで、厚さ２０ｍｍの埋め木の存在によって、３０分加熱後のたわみは埋め木のない場合のそれの１／３に収まっていることが分かる。

他に、各種接合具による被覆されていない木造継手の載荷燃焼実験も行われている［２３］。図８はその結果の一部を示したもので、被覆されていないメタルプレートコネクターの場合、火炎に対して５分間も持たないのに対して、木材を添板とする釘打ち継手の場合は被覆なしで３０分以上持ちこたえることが分かる。

２．３．５　今後の課題

１．ラミナのヤング率、フィンガージョイント、節、繊維傾斜等の存在と、それらのバラツキを考慮に入れた集成材力学モデルの設定と、強度性能のシュミレーション
２．ラミナの保証荷重試験の必要性とそのメリット、デメリットに関する総合的検討
３．高温下での材料特性の把握と集成材の燃焼モデル（有限要素法等）の設定
４．集成材の燃焼モデルによる耐火性能のシュミレーション

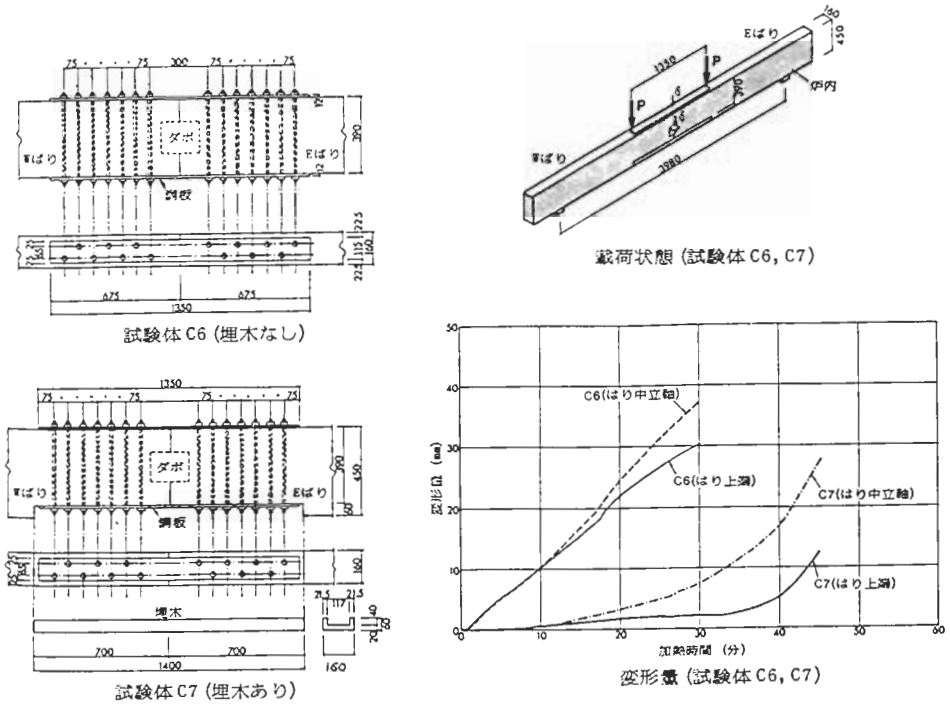


図７　集成材継手の載荷加熱試験（中村［２１］より）

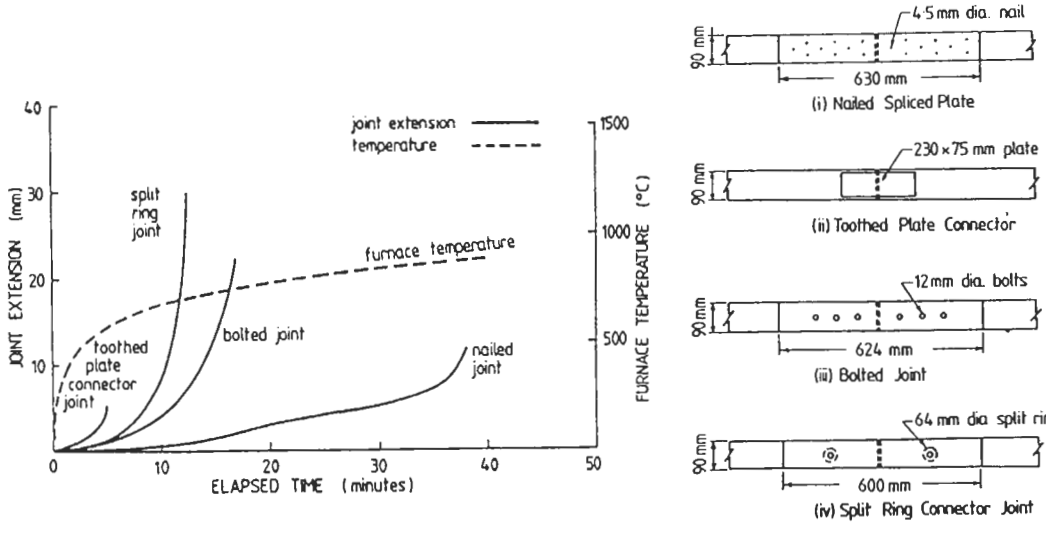


図８　各種木造継手の被覆しない状態での載荷加熱試験の結果（Leicester［２３］より）

２．３．６　文献　＜構造用集成材＞

[　１]（財）日本住宅・木材技術センター：”集成材構造”，技術開発推進事業報告書、１９８５

[　２]大断面集成材の日本農林規格設定等に関する調査報告書、１９８５（草案）

[　３]杉山英男：”８　集成材”，建築構造学大系２２「木構造」（彰国社），１９７１

[　４]Bohannan,B :"Effect of Size on Bending Strength of Wood Members", U.S.Forest Servise Research Paper,FPL 56, 1966

[　５]（財）日本住宅・木材技術センター：”集成材構造”，技術開発推進事業報告書、１９８４

[　６]前田典昭、小松幸平、石井　誠、堀江秀夫、長原芳男：”大断面集成材の曲げにおける寸法効果”，第３５回日本木材学会大会研究発表要旨集、ｐ．９１，１９８５

[　７]倉田久敬：”構造用集成梁の断面設計法に関する研究”，林産試験場研究報告、第７０号、１９８１

[　８]中村　昇、大熊幹章：”確立論に基づいた集成材の信頼性”，第３６回日本木材学会大会研究発表要旨集、ｐ．８４，１９８６

[　９]Foschi,R.O. ; Barrett,J.D. :"Glued-Laminated Beam Strength: A Model",Journal of the Structural Division,Proceedings ASCE, Vol.106,No.ST8, pp.1735-1754,1980

[１０]Bender,D.A.; Woeste,F.E.; Schaffer,E.L.; Marx,C.M. :"Reliability Formulation for the Strength and Fire Endurance of Glued-Laminated Beams";Research Paper,FPL 460,1985

[１１]Imaizumi,K. :"Stability in Fire of Protected and Unprotected Glued Laminated Beams", Norsk Treteknisk Institute report, No.18,1962

[１２]川越邦雄、今泉勝吉、斉藤　光：”集成材の耐火性能”，建築材料、Ｖｏｌ．８，Ｎｏ．１，ｐｐ．１０－２０，１９６８

[１３]後藤一雄：”実大集成材の耐熱試験”，農林水産業特別試験研究、ｐｐ．２１１－２４７，１９６９

[１４]布村昭夫、伊東英武、葛西　章、駒沢克巳、山岸宏一：”集成梁の載荷加熱試験（１）－燃焼におよぼす防火塗料の効果－”、林産試月報、ｐｐ．５－１０，４月、１９７５

[１５]工藤　修、倉田久敬、長原芳男、今野浩安：”集成梁の載荷加熱試験（２）－強度性能について－”、林産試月報、ｐｐ．１１－１６，４月、１９７５

[１６]最上浣二、中村賢一、山田　誠、上杉三朗、宮林正幸：”構造用集成材（はり）の耐火試験”、日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２７８９－２７９０，１９８３

[１７]山田　誠、菅原進一、石川孝政、田中英夫：”集成材構造の部位の防・耐火性”，日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２７８７－２７８８，１９８３

[１８]中村賢一、最上浣二、宮林正幸，竹生敏俗：”構造用集成材の耐火性能接合部、その１：試験方法）”，日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２８７５－２８７６，１９８４

[１９]中村賢一、最上浣二、上杉三朗、宮林正幸，竹生敏俗：”構造用集成材の耐火性能（接合部、その２：試験結果）”，日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２８７７－２８７８，１９８４

[２０]中村賢一、最上浣二、宮林正幸，竹生敏俗：”構造用集成材の耐火性能（第４報）”，日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．６３１－６３２，１９８５

[２１]中村賢一、最上浣二：”構造用集成材の耐火性能実験”，建築研究資料，Ｎｏ．５６、１９８５

[２２]丸山則義、有馬孝礼：”フィンガージョイントにより縦接合された構造用集成材の曲げ性能”日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２６８３－２６８４，１９８４

[２３]Leicester, R.H.: "Paper 21, Fire Resistance of Timber", Australia-UNIDO Workshop on Timber Engineering, pp.21.1-21.41,Melborune,May,1983.

３．接合

３．１接合の種類

杉山教授の著書によれば、接合部は被接合部材の相互角度により「継手」と「仕口」に分類される。「継手」は部材の材軸方向に接合して一材にする効果をねらったもので、「仕口」は互いに斜交または直交する部材を接合して節点を構成することをねらったものである［１］。ここでは、文章展開の便宜上、接合の種類を（ａ）接着剤を用いた接合、（ｂ）接合具による接合の２種に大別する。

３．２接着剤を用いた接合

接着剤をもちいた接合は、初期剛性の高いことが最大の特徴で、多くの場合、終局耐力も大きい。しかし、被接合材同士を接合している媒体が極めて薄い面であって、破壊性状が脆性的で粘りに乏しい点が大きな欠点である。したがって、接着層を多数含むことのできる、合板、ＬＶＬ，集成材といった構造部材の製造には使われるが、一部の例外を除き、構造部材同士の接合には殆ど使われない。

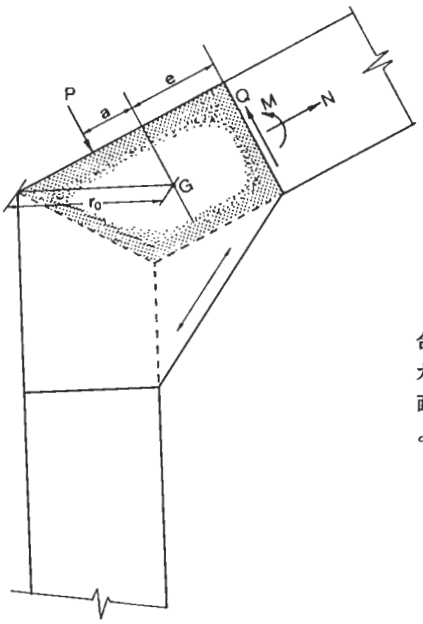
３．２．１合板ガセット接着接合

合板ガセット接着接合は、おもにトラス節点［２，３、４、５］もしくは、木質系山型・門型ラーメン［６，７，８，９］において、剛節点を構成するのに利用される。接合部の強度をチェックする場合は、部材やガセット板の強度チェックのほかに、接着層の強度チェックも必要である。図９に示す合板ガセット接着接合による山形ラーメンの場合、接着層に作用する合せん断応力　τ_R は合板ガセットのローリングシアー許容応力度　f_r に対して実用的には次式でチェックする［２］。

$$\tau_R \leqq f_r \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad 10)$$

ただし、

$$\tau_R = \{\tau_N\} + \{\tau_r\} + \{\tau_{QP}\}$$



τ_N ＝ Ｎ／（ｎA_g）　：軸力からの寄与
τ_r ＝ $M_r r_0$／（ｎI_p）　：モーメントからの寄与
τ_{QP} ＝ （Ｑ＋Ｐ）／（ｎA_g）：せん断力からの寄与
M_r ＝ Ｍ＋ Ｑｅ ＋ａＰ
I_p ＝ 接着層剛心に関する断面２次極モーメント
ｎ ＝ 接着層の数
A_g ＝ 接着層の面積
r_0 ＝ 剛心から最も遠い位置までの距離
｛ ｝ ＝ 応力成分をベクトル的に加算することを意味する

合板ガセット接着接合に関する最近の研究［１０］によればガセットをトラス部材の間に挟み込んだ形式が材料効率の面で優れていると言われている。また、３次元有限要素法によるガセット板の応力解析例も見られる［１１］。

図９　合板ガセット接着接合によるラーメン軒肩接合部

３．２．２交差重ね合わせ接着接合

交差重ね合わせ接着接合は、図１０に示すように部材と部材を交差するように重ね合わせて接着し、一種の「仕口」を構成するものである。また、やり方によっては「仕口」と同時に部材の方も積層接着できる興味ある接合法である。この接合法は、我が国では、ＬＶＬ用単板を利用した住宅構造部材［１２］や、窓枠［１３］など一部で実用化が検討されている分野もある。しかし、大断面集成材の梁と柱の接合への利用は、我が国では未だ研究段階である［１４，１５，１６，１７］。

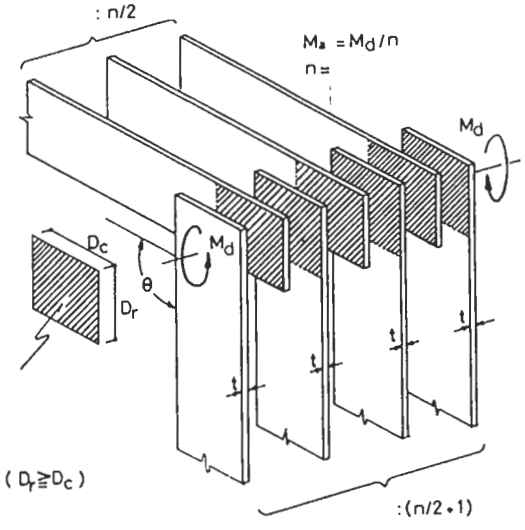


図１０　交差重ね合わせ接着による梁－柱の接合

交差重ね合わせ接着接合の１つのバリエーションとして、弦材と腹材をすべて交差重ね合わせ接着したラチス梁が開発された「１８，１９，２０］。この梁を実際の建物に使用するにあたっては、製造現場で設計荷重に相当する保証荷重試験を行なって、製品の品質を保証した。

この種の接着接合部の強度は、実用的には最大応力説に従う式（１０）でチェックするのが妥当であろう［１７］。その場合は　f_r として、素材もしくは、集成材の許容せん断応力度の１／３をとる。

一方、接合部の破壊形が破壊力学におけるＭｏｄｅ－ＩＩＩに類似していることより、破壊力学を応用した接合部の強度推定法も可能性がある［１４，１５］。我が国でこの接合法を大断面集成材の梁と柱の接合へ利用していくには、地震荷重や長期荷重に対する安全性と湿度変化に対する接着層の耐久性に関する裏付けデーターが必要であろう。

３．２．３フィンガージョイント（ＦＪ）を利用した仕口

ＦＪは普通材軸方向と平行に接合するものであるが、角度をつけて接合することで、仕口を構成することもできる。この仕口は実用的には、椅子の仕口として応用されている［２１］が、一部にトラス［２２、２３］，や骨組仕口への応用研究も見られる［２４，２５，２６，２７、２８］。これは、筆者の個人的な感想であるが、ＦＪ仕口の大断面材への応用に関しては、寸法効果を十分考慮する必要があろう。

なお、報告［２９］によれば、屋根を覆うトラスのすべての節点をＦＪで構成した非常に大型のショッピングモールが、アメリカのオレゴン州に建てられたそうである。

３．２．４　今後の課題

１．接着耐力にまつわる不安感を解消する方策の検討
２．接着接合の耐震性能に関する研究
３．接着接合の強度解析への各種力学的手法の効果的応用
４．接着接合部に対する保証荷重試験の必要性とそのメリット、デメリットに関する総合的検討

３．２．５文献　＜接合：接著＞

[　１] 杉山英男：”１０　接合部”，建築構造学大系２２「木構造」、（彰国社），１９７１

[　２] Suddarth, S.K.:"The Design of Glued Joints for Wood Trusses and Frames",Research Bulletin No.727, Purdue University, 1961

[　３] 藤井　毅：”合板ガセット接著接合に関する研究”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．２９、ｐｐ．２２３－２９７，１９７１

[　４] 宮島　寛、藤井　毅、安岡徳三：”合板ガセット接著法による実大木造フィンクトラスの剛性および強度”，日本木材学会道支部講演集、Ｖｏｌ．１，ｐｐ．４３－４６，１９６８

[　５] Kufner, M :"Stabwerktrager mit geleimten Knotenpunkten(Structural Frameworks with Glued Nodes", Holz als Roh-und Werkstoff, Vol.39, pp.51-62,1981

[　６] 宮島　寛，松本弘毅：”テーパー部材をもつ木造ラーメンの剛性と強度、第２報　三こう節山形ラーメン”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．２９，ｐｐ．９９－１１９，１９７２

[　７] 宮島　寛：”テーパー部材をもつ木造ラーメンの剛性と強度、第３報 二こう節山形ラーメン”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．２９，ｐｐ．２９９－３２６，１９７２

[　８] 伊東勝彦、丸山　武、宮野　博：”合板ガセット接著法による木造山形ラーメンの剛性と強度”，林産試験場研究報告、Ｎｏ．６５，１９７６

[　９] 高宮庄一、皆川保生、神谷文夫：”単板積層材の木構造への適用に関する研究　第３報（合板ガセットによる門形架構の実大実験）”，日本建築学会大会学術講演梗概集、ｐｐ．２００１－２００２，１９７７

[１０] 佐々木康寿、三浦　誠、竹村冨男：”合板ガセットを用いた軸材接合部の強度”，木材学会誌、Ｖｏｌ．３２，ｐｐ．２３４－２４１，１９８６

[１１] Epple,A　:"UNTERSUCHNGEN UBER EINFLUSSE AUF DIE SPANNUNGSVERTEILUNG IN AUFGELEIMTEN HOLZLASCHEN UND HOLZERNEN KNOTENPLATTEN",DISSERTATION zur Erlangung des Doktorgrades des Fachbereichs Biologie der Universitat Hamburg,1983

[１２] 都築一雄：”単板構成による構造用積層材”，WOODMIC,Ｖｏｌ．４，Ｎｏ．３，ｐ．４０，１９８６

[１３] 飯田信男、久保武司：”林産試開発木製サッシの実用化”，ウッディエイジ、第３３８通巻、ｐｐ．１－７，１９８５

[１４] Komatsu,K :"Application of Fracture Mechanics to the Strength of Cross-Lapped Glued Timber Joints",FRI Bulletin,No.61,1984

[１５] Komatsu,K :"Effect of Member Thickness and Number of Gluelines on the Strength and Design of Cross-Lapped Glued Timber Joints ", FRI Bulletin,No.62,1984

[１６] 小松幸平：”集成材剛節骨組構造のための交差重ね合わせ接著接合の強度設計（第１報），－接著層の応力分布を純ねじりモーメントを受ける平行四辺形断面棒の応力分布と同等と見なした場合の接合部の強度設計方法－”，林産試月報、Ｎｏ．４０１，ｐｐ．１－９，１９８５

[１７] 小松幸平：”集成材剛節骨組構造のための交差重ね合わせ接著接合の強度設計（第２報），－接著層のねじり応力がねじりの中心からの距離に比例すると仮定した場合の接合部の強度設計方法－”，林産試月報、Ｎｏ．４０２，ｐｐ．１１－１９，１９８５

[１８] 小松幸平、前田典昭、長原芳男、北村維朗、小久保貞夫、高道正和：”カラマツ接著ラチス梁の小樽博サブテーマ館への利用”，日本木材学会道支部講演集、Ｖｏｌ．１６，ｐｐ．２５－２９．１９８４

[１９] 小松幸平、前田典昭、長原芳男、北村維朗：”カラマツ接著ラチス梁を使った小樽博展示館の構造設計”，林産試月報、Ｎｏ．４０３，ｐｐ．１０－２１，１９８５

[２０] 前田典昭、小松幸平、長原芳男、北村維朗：”カラマツ接著ラチス梁の曲げ性能”，林産試月報、Ｎｏ．４１３，ｐｐ．７－１３，１９８６

［２１］渡辺　昇、関谷　武：”ミニフィンガー接合工法の家具への応用”，日本木材学会道支部講演集、Ｖｏｌ．９，ｐｐ．７１－７５，１９７７
［２２］Pincus, G.; Cottrell, E.F.; Richards,D.B. :"Rigid Roof Trusses With Glued-Finger Corners", FPJ , Vol.16, No.2, PP.37-42, 1966
［２３］Hoyle, R.J.Jr.; Strickler,M.D.; Adams,R.D. :"A Finger Joint Connected(FJC) Wood Truss System", FPJ, Vol.23, No.8, pp.17-26, 1973
［２４］生田晴家、宮島　寛：”木造骨組仕口へのフィンガージョイント工法の適用”，日本木材学会道支部講演集、Ｖｏｌ．９，ｐｐ．７６－７９，１９７７
［２５］宮島　寛，佐藤武司：コーナージョイントとしてのだぼ、ほぞおよびフィンガージョイント工法の接合性能の比較”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３４，ｐｐ．２７５－２８６，１９７７
［２６］石井　誠、宮島　寛：”各種仕口に関する基礎的研究　第１報　引張性能について　”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３９，ｐｐ．２２３－２３６，１９８２
［２７］石井　誠、宮島　寛：”各種仕口に関する基礎的研究　第２報　曲げ性能について”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．４０，ｐｐ．５８１－５９６，１９８３
［２８］生田晴家：”木造骨組仕口への１２０度にフィンガージョイントされた木造骨組仕口の性能”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．４１，ｐｐ．３０１－３１２，１９８４
［２９］平嶋義彦：”フィンガジョイントを用いた建築構造”，木工機械、Ｎｏ．１２０，ｐｐ．９－１１，１９８３

３．３接合具による接合

３．３．１　釘

＜釘の許容耐力＞

釘の荷重ーすべり関係は図１１に示すように、力のかかりはじめから非線形であり、いわいる比例限度に相当する部分が見い出し難たく、許容耐力を決定するのは容易ではない。北米では、釘のすべりが０．３８ｍｍの時の荷重を許容耐力としているが、我が国の木構造設計規準・同解説では釘のすべりが１０ｍｍ時の荷重を基に許容耐力を定めている［１］。一方、建設省総合プロジェクト［２］によって提案された方式では、最大荷重の３／８，または、１ｍｍ変位時の荷重の３／４のどちらか小さい方を許容耐力としている。

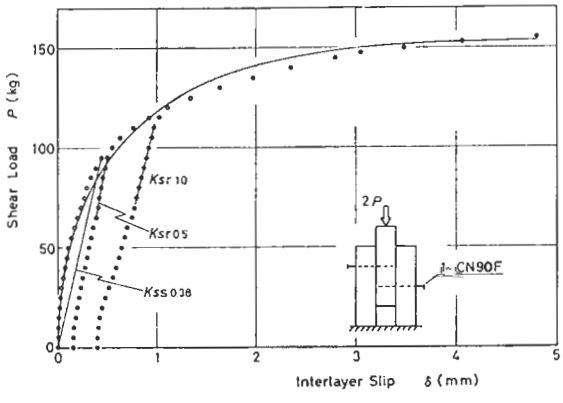


図１１　釘打ち接合部の荷重ーすべり関係の典型例（小泉、上田［２３］より）

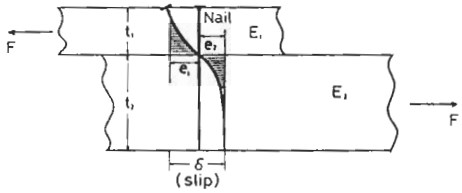
<釘の一面せん断理論：線形解析>

釘に関する理論的研究は、１９５１年原田［３］によって始められた。彼は材中での釘のめり込み量 e は釘の面圧応力 σ に比例し、木材のヤング係数 E に反比例すると仮定し、木材を弾性床、釘を弾性梁に見立て、「弾性床上の梁の理論」を適用して、木材中の釘の変形と反力を解析した。つづいて、１９５５年同じ仮定の下で、Kuenzi［４］が原田と同じ解析を発表した。原田の理論は、２５年後に澤田によって再検討され［５，６，７］、現在の我々が知るところとなった。一方、Kuenziの理論も１６年後に Wilkinson［８，９］によって近似化され、釘の初期すべり係数 Ks を求める理論として、世界的な評価を得た。原田の仮定は次式で表わされる：

$$e = \alpha\sigma / E = \sigma / k \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 11)$$

$$k = E / \alpha \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 12)$$

式１１）の比例係数αは、「面圧凹み係数」と呼ばれ［３］、釘の変形の大小を左右するもので、釘の線形解析において重要な係数である。また、式１２）のｋは床係数（bearing constant）と呼ばれ［８，９］、場合によってはαとＥを使うより合理的である。釘の面圧実験を行ない、αもしくはｋを求めることによって、任意境界条件の釘接合部の初期すべり係数Ks を算出することができる［１０，１１，１２］。図１２にその一例を示す。



弾性床理論による釘の変形曲線

$$K_s = \frac{4E_sI_s\mu_1^3}{(1+\omega^2)(\coth\mu_1t_1 + \omega\coth\mu_2t_2)}$$

ここに　E_sI_s＝使用釘の曲げ剛性；$\mu_1=(E_1d/4\alpha_1E_sI_s)^{1/4}$；$\mu_2=(E_2d/4\alpha_2E_sI_s)^{1/4}$；$E_1$＝側材のヤング係数；$E_2$＝主材のヤング係数；$\alpha_1$＝側材の面圧定数；$\alpha_2$＝主材の面圧定数；$d$＝釘径；$t_1$＝側材厚；$t_2$＝主材への打ち込み深さ；$\omega=\mu_1/\mu_2$

図１２　木材一面せん断接合における釘の初期すべり係数　Ks の算定（松尾［１１］より）

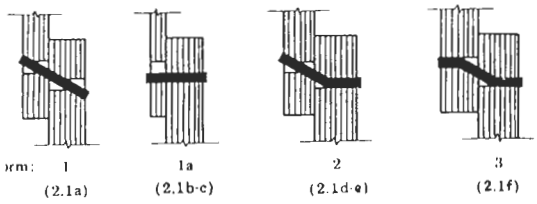
<釘の理論的短期許容耐力>

上述した弾性床理論によって、釘の最大面圧応力を計算できる。澤田はこの最大面圧応力が木材の圧縮強度に達した時点をもって、釘の理論的短期許容耐力と定義した［７］。木構造設計規準による釘の短期許容耐力は釘径の１．８乗に比例するのに対し、澤田の定義した理論的短期許容耐力は釘径の１．７５乗に比例し、両者はほぼ一致する。

<釘の理論的最大耐力>

釘の理論的最大耐力に関する研究では、木材ならびに釘を完全「剛－塑性」物体と見なし、降伏するまでは完全剛、降伏後は完全塑性状態を仮定して、力のつりあい条件のみから釘の最大耐力を求める。Larsen［１３］によると、この種の理論は１９４１年 Johansen によって先鞭がつけられたという。木構造設計規準・同解説［１］によれば、その後、Moller(1951),Meyer(1957)、我が国では、坪井、矢代［１４］らが同種の説を独自に展開した。また、最近では、Larsen［１５］が Johansen の理論をさらに発展させている。この種の理論によって理論的最大耐力を計算するためには、木材の側圧縮強度を実験によって求める必要がある。なお、木構造設計規準・同解説［１］では、便宜的に木材の縦圧縮強度を用いて釘の理論的最大耐力を計算している。

図１３は釘の一面剪断耐力発現パターンのモデル化と力の釣合から導かれる理論的最大耐力算定式を示す［１３，１５］。



$$\frac{P_y}{s_H d\ell} = \min \begin{cases} \dfrac{\sqrt{\beta+2\beta^2(1+\alpha+\alpha^2)+\beta^2\alpha^2}-\beta(1+\alpha)}{1+\beta} & (2.1a) \\ 1 & (2.1b) \\ \alpha\beta & (2.1c) \\ \dfrac{\sqrt{2\beta(1+\beta)+4\beta(2+\beta)M_y/(s_H d\ell^2)}-\beta}{2+\beta} & (2.1d) \\ \alpha\dfrac{\sqrt{2\beta^2(1+\beta)+4\beta(1+2\beta)M_y/(s_H d\alpha^2\ell^2)}-\beta}{2\beta+1} & (2.1e) \\ \sqrt{\dfrac{4\beta}{1+\beta}\dfrac{M_y}{s_H d\ell^2}} & (2.1f) \end{cases}$$

ここで、α：主材と側材の材厚比　β：主材と側材の側圧縮強度の比（主材／側材）　S_H：側材の側圧縮強度　M_y：釘の塑性曲げモーメント　d：釘径　l：側材材厚

図１３　釘の一面剪断における最大耐力発現パターンのモデル（Larsen[13]より）

＜釘の非線形解析＞

釘の荷重－すべりの非線形関係を表現するため、これまでさまざまな経験式が提案され、実際に利用されてきた。表２はそれらをまとめたものである。

表２　釘の荷重－すべりの非線形関係を表現するための経験式

式の型	提案者（使用者）と文献番号
$P = A s^B$	平嶋［１６］，林ら［１７］
$P = (P_0 + K_r s)\,[1 - \exp(-K_s s / P_0)]$	Foschi［１８］
$P = A \log(1 + B s)$	McLain [20], 松尾［１１］＊
$P = \dfrac{a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + a_4 s^4}{1 + a_5 s + a_6 s^2 + a_7 s^3}$	辻野［２１］
$P = A s^{1/4} + B s^{1/2} + C \dfrac{s}{1+s}$	Thurston & Flack[22]
$P = B\,[1 - \exp(-A s / B)]^C$	小泉　&　上田［２３］

ただし、P：荷重、s：すべり　、A，B，C，等は実験常数。（＊：P = A LnS + B ）

これらの、非線形荷重－すべり関係式を用いることによって、釘打ち部材や構造物の挙動を比較的正確に解析することができる。それらの多くは、壁、床等の解析として本研究会の第２部「構造構成要素」の分野で紹介されるので、ここでは、釘の一面せん断挙動に関する非線形解析例について述べる。

Foschiは釘の面圧試験で得られる荷重－めり込み関係を表２に示す３パラメーターｅｘｐ関数で表現し、釘を弾塑性梁とした有限要素モデルを開発し、鋼板－グルーラムリベット－木材［１８］，および合板－普通釘－木材［１９］の系において、非線形解析を行なった。Smith ［２４］は釘の面圧試験で得られる荷重－めり込み関係を多数の折れ線で近似し、釘を弾塑性梁とし、大変形時の引き抜きの影響、摩擦の影響、木材のせん断変形の影響も含めた有限要素モデルを開発し、木材同士を釘打ち接合した場合についてシュミレーション計算を行なっている。

３．３．２　ボルト

＜ボルトの許容耐力＞

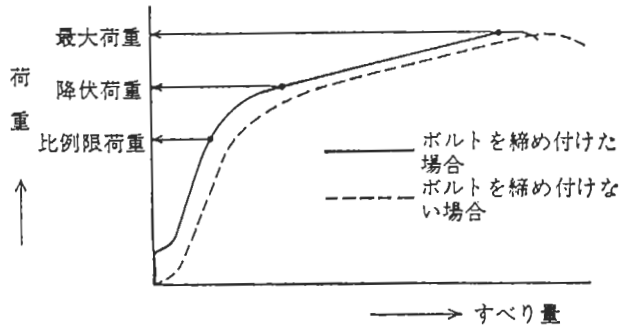
釘打ち接合と異なり、ボルト接合の荷重－すべり曲線には見掛け上の比例限度が見られる［２５，２６］。木構造設計規準［１］では比例限度荷重をもってボルト接合の短期許容耐力とし、変形に対する規定はない。これは、ボルト接合自体、施工に伴う初期ガタが避けられず、変形が重要視される箇所には使われないと考えられているためである。ボルト接合の大きな特徴は、荷重の作用方向によって、荷重－変形関係が変化し、許容耐力もそれにともなって変化することにある。現行規準では、直角仕口の耐力は平行継手の７５％となっている。

＜ボルトの変形性状に関する理論的研究＞

ボルトの木材中での変形挙動は、基本的には釘と同じと考えられる。そこで、原田の「弾性床理論」がボルトの変形解析にも適用されている。平井，澤田［２７，２８］は、木材ならびに鋼板を側材とするボルトの２面せん断挙動を弾性床理論で解析し、比例限度に及ぼすボルト形状や、面圧凹み係数の影響を調べた。また、平井は［２９，３０］弾性床理論を段階的線形理論に拡張し、鋼板添え板を有する集成材の非線形挙動を解析し実験結果との良い対応を得ている。辻野、平井［３１］は、木材中で変形するボルトの剛性マトリックスを弾性床理論から導き、段階的線形理論を適用して、［２９］と同じ試験体の挙動を有限要素法で解析し、実験結果との良い対応を得ている。

＜ボルト接合部の理論的降伏耐力＞

安村［３２，３３］によれば、ボルト接合の荷重－変形曲線には、図１４に示す様な、幾つかの特性を示す点が存在する。この内、最大耐力は、試験体の大きさ、ボルトの端あきや、へりあきといった別の因子が大きく影響するため、その理論的推定は閉じた形では困難であろう。一方、降伏点耐力については、木材の側圧縮強度とボルトの塑性曲げ強度を既知とすれば、釘の理論的最大耐力計算式がそのまま適用できる。安村［３２］は、Larsen［１５］の式を鋼板添え板接合、ならびに鋼板挿入接合の場合にも適用し、集成材ボルト接合部の降伏耐力が理論的に正しく推定できることを示した。



ボルト接合部の２面せん断試験における荷重-すべり曲線

図１４　ボルト接合の荷重－変形曲線（安村［５２］より）

＜ボルト接合部の耐力に影響を及ぼす諸因子＞

ボルト接合部の耐力に影響を及ぼす因子は数多い［３３，３４，３５，３６，３７，３８］。なかでも木材の繊維方向と荷重作用方向のなす角度、および、ボルトと木材自由端との距離（端あき、へりあき）が、実際の設計において考慮されるべき重要な因子である。これらの影響については、繊維直交方向の試験で割れを伴うか伴なわないかで結論がやや違ってくる。まず繊維直交方向の耐力試験の方法を十分検討する必要があろう。割れを伴なわない場合は、現行の規定でほぼ十分のようであるが、割れを伴う場合は、繊維直交方向の耐力をより厳しく査定する必要があろう［３６］。なお、アメリカの設計マニュアル［３９，４０］では、このような場合は、ボルトの耐力という概念を用いず、図１５に示すように、実際の剪断面積に荷重負担深さｄ$_e$と材せいｄの比ｄ$_e$／ｄをかけて、有効剪断面積を安全側に見積ったうえで、木材側の剪断許容応力度で接合部を設計する。

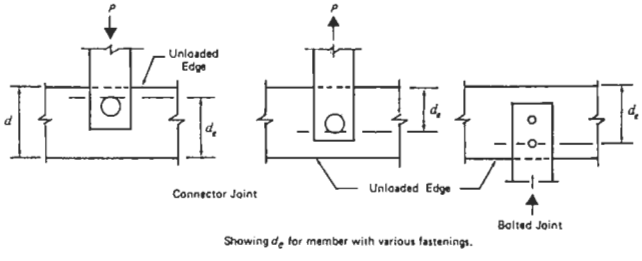


図１５　荷重負担深さｄ$_e$の定義（ＮＤＳ［３９］より）

３．３．３コネクター

最近、我が国ではコネクター（ジベル）が再び注目されつつある。現在、その耐力が実験で確認され、一部で使われているコネクターは図１６に示すシアープレートとスプリットリングの２種類である。コネクターの利点はボルト単体にくらべて耐力が大きいことであるが、反面、木材側の加工に手間が掛かることと、コネクター間隔、端あき、へりあき、断面欠損等の制限条件で接合部の設計が厳しくなる面もある。コネクターの許容耐力については、現在改定作業中の木構造設計規準で新しく規定されるはずである。コネクターの耐力については、神谷ら［４１，４２］が発表している。なお、シアープレートを用いた剛節骨組構造に関する研究［４３］，集成材実大接合部の非線形解析［４４］，集成材実大継手の実験［４５，４６］等も報告されている。

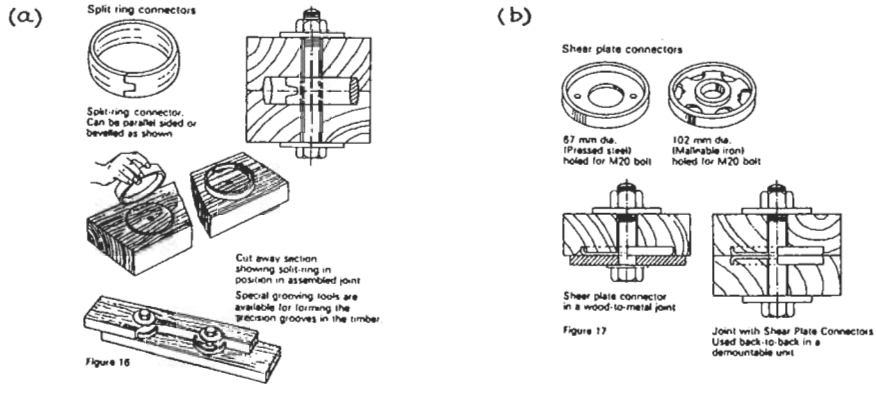


図１６　スプリットリング（ａ）と　シアープレートコネクター（ｂ）（TRADA[5]より）

３．３．４　ラグボルト、打ち込みボルト

ラグボルトは、現場での施工能率が非常に高いため、集成材の添え板継ぎ手、接合金物の留め付けに多用されるようになってきた。ラグボルトの耐力については、佐藤らの実験があり［４７，４８］、その結果を柱－梁接合試験体に適用した報告［４９，５０］もある。また、許容耐力については、現在改定作業中の木構造設計規準で新しく規定されるはずである。

打ち込みボルトはボルトの胴の部分だけを使うもので、鉄のダボと考えてよい。その利点は、ボルトのような初期ガタがなく、剛性が高いこと。材表面に金属部分が露出しないので耐火性能の面で有利であること等であろう。しかし、その、力学的特性に関する我が国での実験結果が少ない［５１］ため、今後は、実験データーの集積に努めるべきであろう。

３．３．５　今後の課題

１．接合具の非線形荷重－変形関係を適切に表現し得る経験式の設定。たとえば、McLainの式（表１参照）は、アメリカの設計基準の一部で推奨されている［２０］。

２．接合具の基本的性能を試験するための統一規格の制定。たとえば、オーストラリア規格では、接合具ならびに金物を、図１７に示す４つのカテゴリーに分類して、それぞれ標準的な試験方法と結果のとりまとめ方法を規定している。

３．ボルト、コネクター接合に関する北米式設計方法の検討

４．ボルト、コネクター使用に伴う断面欠損の影響に関する研究

５．多数の接合具を使った場合の応力分布に関する研究

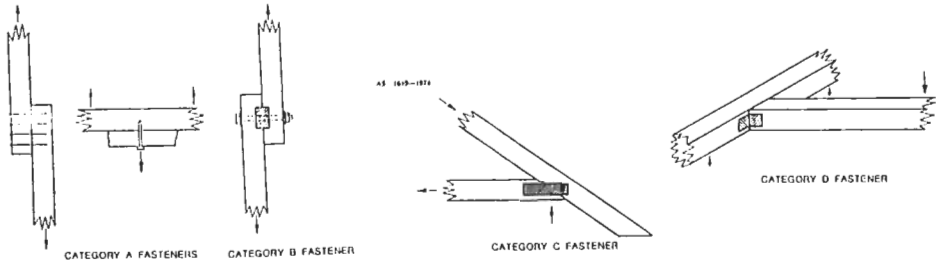


図１７　オーストラリア規格［５４］による接合具および接合金物試験法の分類

３．３．６　文献　＜接合：接合具＞

［　１］日本建築学会：”６．接合部の設計”，木構造設計規準・同解説、丸善、１９７３

［　２］（財）国土開発技術研究センター：”第５章　くぎ接合部の構造耐力と試験方法”，昭和５０年度総合技術開発プロジェクト、小規模住宅の新施工法の開発，ｐｐ．９７－１０８，１９７６

［　３］原田正道：”木船の縦強度”，東大生産技術研究所報告、Ｖｏｌ．２，Ｎｏ．３，１９５１

［　４］Kuenzi, E.W.:"Theoretical design of a nailed or bolted joint under lateral load", U.S.Forest Products Laboratory, Report No.1951, Madison, FPL, 1955

［　５］澤田　稔：”２層釘着梁の曲げ剛性と強度”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３３－１，ｐｐ．１３９－１６６，１９７６

[6] 澤田　稔：”釘著材の許容せん断耐力について”，日本木材学会北海道支部講演集、第８号、ｐｐ．３３－３５，１９７６
[7] 澤田　稔，山田順治：”木造釘著組立梁の腹材有効剛比”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３５－１，ｐｐ．１２３－１３８，１９７８
[8] Wilkinson, T.L. :"Theoretical Lateral Resistance of Nailed Joints", J. of Structural Division, Proceedings ASCE,ST5,pp.1381-1398,1971
[9] Wilkinson, T.L. :"Analysis of Nailed Joints with Dissimilar Members ", J. of the Structural Division, Proceedings ASCE,ST9,pp.2005-2013,1972
[１０] 中谷　浩、澤田　稔：”釘著材のせん断性能”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３７－３　　ｐｐ．６８７－７２０，１９８０
[１１] 松尾　博、澤田　稔：”木材と木質平面材料の釘接合におけるせん断耐力　第１報　”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３７－３，ｐｐ．７２１－７４６，１９８０
[１２] 澤田　稔：”釘著重ね柱の座屈強さ”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．３７－３，ｐｐ．７４７－７５８，１９８０
[１３] Larsen, H.J. :"K.W.Johansen's Nail Tests",BYGNINGSSTATISKE MEDDELELSER(Institute of Building Technology and Structural Engineering,Aalborg University Centre,Denmark), Vol.48,No.1,1977
[１４] 坪井善勝、矢代秀雄：”くぎ接合の耐力に関する実験報告”，日本建築学会関東支部第２４回研究発表会、１９５８
[１５] Larsen, H.J. :"The Yield Load of Bolted and Nailed Joints", Proccedings of the IUFRO-5 Conference : Pretoria, pp.646-654, 1973
[１６] 平嶋義彦：”釘打ち面材張り耐力壁のせん断変形式の誘導”，日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２７，ｐｐ．１４１－１４３，１９８１
[１７] 林　龍一、松尾勝央、高柳寛司、剣持　潔：”建築用構造材および構造部分の性能の研究（第１報）木材釘打ち接合部の耐力”，製品科学研究所研究報告、Ｎｏ．８７，ｐｐ．１－１８，１９７９
[１８] Foschi, R.O. :"Load-Slip Characteristics of Nails", Wood Science, Vol.7, pp.69-76, 1974
[１９] Foschi, R.O.; Bonac,T. :"Load-Slip Characteristics for Connections with Common Nails", Wood Science, Vol.9, pp.118-123, 1976
[２０] McLain, T.E. :"Mechanical Fastening of Structural Wood Members - Design and Research Status " ; in Structural Wood Research, edited by Itani,R.Y. and Faherty,K.F.,p.40 ,1983
[２１] 辻野哲司：”有限要素法による釘著片面パネルの曲げ解析”，日本木材学会誌、Ｖｏｌ．３１，ｐｐ．８９６－９０２，１９８５
[２２] Thurston,S.J.; Flack,P.F. :"Monotonic and Cyclic Testing of Timber Connections Using Nailed Steel Side Plates",Ministry of Works and Development, ReportNo.5-79/4 , Central Laboratories ,NZ , 1979
[２３] 小泉章夫、上田恒司：”２層釘著梁の曲げ変形と耐力”，北海道大学農学部演習林研究報告、Ｖｏｌ．４１－１，ｐｐ．２６１－３００，１９８４
[２４] Smith, I. :"Analysis of Mechanical Timber Joints with Dowel Type Connectors Subjected to Short Term Lateral Loading - By Finite Element Approximation", Timber Research and Development Association, Research Report 2/82, GB, 1982
[２５] 久田俊彦、杉山英男、松野外史：”ボルト接合の耐力に関する実験的研究”，日本建築学会論文報告集 第６０号、ｐｐ．４６９－４７２，１９５８
[２６] 安村　基、中村　昇、杉山英男：”集成材ボルト接合部の強度性状に関する実験と理論”，日

本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２２１３－２２１４，１９８３
［２７］平井卓郎、澤田　稔：”Nominal Bearing Stresses of Bolted Wood-Joints at Apparent Proportional-Limits”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２８，ｐｐ．５４３－５４７，１９８２
［２８］平井卓郎、澤田　稔：”Linear Load-Slip Relationship of Bolted Joints of Glued-Laminated Lumber”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２８，ｐｐ．６０９－６１３，１９８２
［２９］平井卓郎：”Nonlinear Load-Slip Relationship of Bolted Wood-Joints with Steel Side-Members II”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２９，ｐｐ．８３９－８４４，１９８３
［３０］平井卓郎：”Nonlinear Load-Slip Relationship of Bolted Wood-Joints with Steel Side-Members III ”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．３１，ｐｐ．１６５－１７０，１９８５
［３１］辻野哲司、平井卓郎：”鋼板側材を用いたボルト接合部の非線形荷重－すべり関係（第１報）”日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２９，ｐｐ．８３９－８４４，１９８３
［３２］安村　基、フッリブ・クリュビレ：”重木構造における接合部の耐力（第１報）－集成材ボルト接合部の２面せん断試験－”，木材工業、Ｖｏｌ．３８－６，ｐｐ．１０－１６，１９８３
［３３］平井卓郎、澤田　稔：”木材のボルト接合せん断耐力に及ぼす端部寸法影響－荷重が材軸方向に作用する場合－”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２８，ｐｐ．１３７－１４２，１９８２
［３４］平井卓郎、澤田　稔：”側材に鋼板を用いたボルト接合部のせん断耐力－荷重が材軸方向に作用する場合－”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２８，ｐｐ．６８５－６９４，１９８２
［３５］平井卓郎、澤田　稔：”側材に木材を用いたボルト接合部のせん断耐力－荷重が材軸方向に作用する場合－”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２８，ｐｐ．６９５－６９８，１９８２
［３６］平井卓郎：”木材のボルト接合せん断耐力に及ぼす端部寸法影響－荷重が材軸に対して垂直方向に作用する場合－”,日本木材学会誌、Ｖｏｌ．２９，ｐｐ．１１８－１２２，１９８３
［３７］杉山英男、安村　基、奥富真一：”せん断を受ける集成材ボルト接合部の耐力”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２６８５－２６８６，１９８４
［３８］安村　基、坂井英明：”集成材ボルト接合部における終局性状”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．１２４９－１２５０，１９８６
［３９］National Forest Products Association:"National Design Specification for Wood Construction"、p.11-12,1982
［４０］American Institute of Timber Construction:"Timber Construction Manual", Third Edition, pp.6-413 -- 6-437,1985
［４１］神谷文夫、大平　章：”スプリットリング、シアープレートを用いた集成材接合部の耐力”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２６８９－２６９０，１９８４
［４２］（財）日本住宅・木材技術センター：”集成材構造”，技術開発推進事業報告書、１９８４
［４３］小松幸平、長原芳男、前田典昭、北村維朗、堀江和美：”挿入型鋼板ガセットとシアープレートコネクターを用いた集成材軒周接合部の許容応力度設計と接合部の実大実験”，林産試月報、Ｎｏ．４０９，ｐｐ．１－２２，１９８６
［４４］小松幸平：”挿入型鋼板ガセットとシアープレートボルト締め構法による集成材軒周接合部実大試験体の非線形半剛節解析”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．１２９９－１３００，１９８５
［４５］太田道彦　ほか７名：”構造用集成材の継手に関する実験的研究　（その１．　せん断継手について）”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２２１５－２２１６，１９８３
［４６］太田道彦　ほか７名：”構造用集成材の継手に関する実験的研究　（その２．　曲げ継手について）”、日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２２１７－２２１８，１９８３
［４７］佐藤雅俊、宮村雅史、葉多修司、森　和雄：”ラグボルトの強度特性（Ｉ）　曲げボルトとしての耐力の評価”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２６９１－２６９２，１９８４
［４８］佐藤雅俊、宮村雅史、葉多修司、森　和雄：”ラグボルトの強度特性（ＩＩ）　引き抜き耐力の評価”、日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．２６９３－２６９４，１９８４

［４９］佐藤雅俊、宮村雅史、葉多修司、森　和雄：”集成材構造柱梁接合部の耐力に関する研究”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．１３０１－１３０２，１９８５
［５０］佐藤雅俊、宮村雅史、森　和雄、葉多修司：”集成材構造柱梁接合部の耐力に関する研究（ＩＩ）”日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．１２５１－１２５２，１９８６
［５１］葉多修司、森　和雄、佐藤雅俊：”集成材打ち込み鋼棒接合部の強度性状に関する実験的研究”，日本建築学大会学術講演梗概集、ｐｐ．１２５３－１２５４，１９８６
［５２］木質構造研究会編：”ティンバーエンジニアリング読本”，ｐ．１５９，１９８５
［５３］TRADA:"Mechanical fasteners for structural timberwork",TRADA Wood Information, Section 2/3, Sheet 9, 1985
［５４］Standards Association of Australia : "Method for the Determination of Basic Working Loads for Metal Fasteners for Timber", AS 1649-1974

〔２〕構造体構成要素

林業試験場　神谷文夫

はじめに

戦後、他構造に押されっぱなしであった木構造も、多くの研究を背景にその構造安全性についての市民権を得て、かって公認されなかった材料や構造システムの認可が得られるようになってきた。

しかしながら、木構造をとりまく事情は大きく変遷を続けており、特に低質化する木材資源と高度化する建築に対する要求性能には技術で応えるしか術がなく、木材強度や木構造の研究にたいする期待は大きいと思われる。

これまでの日本の木構造の研究は、住宅を中心として行われてきたが、これからの研究は木構造の限界に挑戦するところにあり、住宅以外の構造に対して、これまでの設計法がそのまま使えるとは限らない。その意味で、戦前の中・大規模構造の建築が間断なく続いている諸外国での研究等をおおいに参考にしていく必要があるように思われる。

そうしたことから、これから紹介する研究には、積極的に外国のものを含めた。

（１）複合梁

（１）－１　トラス

トラスは短材を接合して長いスパンを架け渡すことができ、諸外国では住宅および住宅以外の中・大規模構造の梁として多く用いられている。我国に於ても戦前から使用され、枠組壁工法住宅ではその導入当初から、合板ガセットやネイルプレートによる屋根トラスが利用されてきた。ネイルプレートを用いた床トラスは今年初めて建設大臣の認定を受けたが、良質な梁材の不足とともに今後その需要はますます増大するものと思われる。

トラスの構造上の特徴は、軸力で抵抗するところから木材断面の利用に無駄がないことが挙げられる。これを換言すれば強度的に遊んでいる断面がなく、また、構造形式としては部材の１微小部分の破壊が系全体の破壊につながるシリース゛システムに近いので、安全性の面から高い精度の解析が要求される。

一般にトラスの安全率は、構成材料（部材および接合部）の安全率より低くなる。このため、北米などでは強度の信頼性の高いＭＳＲランバーが用いられており、また、下弦材はフィンガーシ゛ョイント材でない場合も含めてプルフローディンク゛を行うことが検討されている。

解析レベル

戦前の方法から高度な解析までいくつかのレベルに分けられる。

レベル

１．全てピンジョイントとする解析...静定構造なので机上の計算が可能。

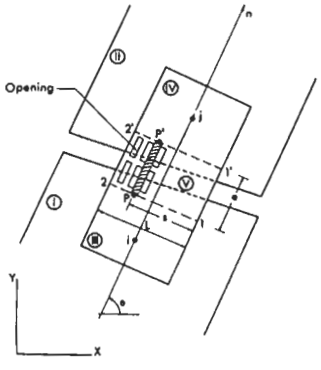
２．通し部材を考慮したＦＥＭの線形解析... Suddarth が開発したＰＰＳＡプログラム(1)が有名。日本での設計レベル。

３．さらに接合部をスプリング（回転モーメント、軸力、剪断力）とした線形解析...

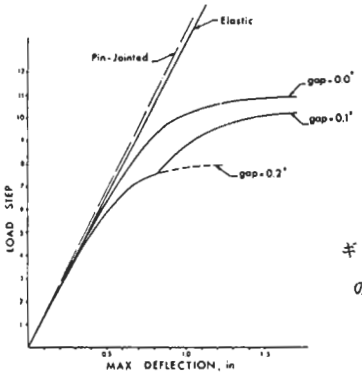
４．接合部のスプリングや材料の非線形性を考慮した解析。

５．さらに、接合部のギャップ、木材のめり込み、力の偏心による接合部の

回転、プレートの座屈などを考慮した解析... Foschi (2)。



ギャップと座屈



ギャップの影響

図－1 Foschi の解析。

トラスの解析については次の事が云われている。

1．解析のレベルがインプットデータ（材料や接合部の情報）のレベルを追い越した。

2．住宅構造では、トピックスがトラス単体からそれを用いた床や屋根の解析に移りつつある。（前述５の解析は屋根の解析プログラムのサブルーチンである）

実験

大きいトラスでは McMartin(3)、 Keenan (4)の実験がある。スパン２１ｍのトラス４５体、スパン１２ｍのトラス３０体が破壊され、スパンが長くなると材料のVolume効果で強度が低下することが指摘された。

日本の実験では後藤（5）、宮島（6）、藤井（7）、金谷(8)、佐野(9)、伊藤(10)、小松(11)、堀江(12)、神谷(13)など多数があり、計算値と実験値とが良く一致することなどが示された。

また、長期的な性能では、Suddarth らによるクリープ゛試験、含水率のCyclic試験が７年にわたって行われており、その結果が近々発表される予定になっている。

これからのトピックス

１．構造信頼性解析

強度変動の大きい木材を用いるトラスでは、スパンに比例して安全率が大きく低下する。特に、住宅以外の構造への利用を考えるとき信頼性解析が必要になろう。そのためには、インプットデーターである材料と接合部の情報が不可欠であり、グレーテ゛ィンク゛メンバーとの連携プレーが望まれる（Appendix-1を参照）。

２．長期性能試験

我国の気候は外国のそれと異なるため、独自の実験を計画する必要がある。

３．設計マニュアルの整備

高度な解析のレベルと設計レベルとのギャップを埋める必要がある。近似計算法の開発、形状による強度低下や接合部の変形による剛性低下を簡単に求める方法の開発などが望まれる。また、複雑な接合部設計が自動的に行

えるソフトの開発も必要であろう(釘打ち合板ガセットトラスの例として前田ら(14)のものがある)。

（１）－２　ボックスビーム、Ｉビーム

解析

ボックスビーム、Ｉビームの研究は剪断たわみを考慮した Newlin(15)の解析などでほぼ確立したと考えられる。アメリカではＡＰＡの設計規準や製造規定(16)があり、日本の木構造設計規準にもそれが載せられている。

日本の研究では、宮島(17)、後藤(18)、高見(19)、平嶋(20)、海老原(21)、徳田(22)，定方(23)のものがあり、実験値と理論値が良く一致することなどが報告されている。

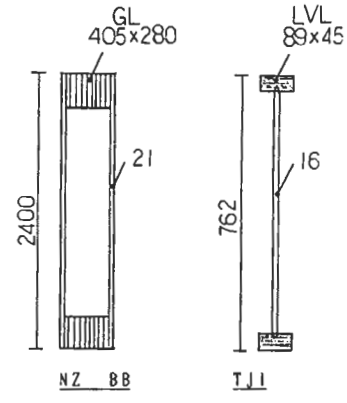
解析上の一つのポイントとしてはウェブの座屈があり、平嶋の研究(20)はＡＰＡの設計式を一歩掘り進めたものとして注目される。

ＮＺのボックスビーム

ＮＺでは、最近長さ44ｍの合板ボックスビームを用いた展示場が設計された。フランジには集成材が用いられ、4'X 8'の合板がウェブとして縦使いされている。ボックスビームの開発当初の目的は材料の節約にあったが、ＮＺのボックスビームは集成材の能力を越えるもので、ボックスビームの今後の一つの方向を示唆するものと思われる（図－２）。

トラスジョイスト社のＩビーム

アメリカのトラスジョイスト社ではフランジにＬＶＬ、ウェブに合板またはＯＳＢを用いたＩビームなどが大量生産されており、住宅および中・大規模木構造の梁材として供給されている。強度上の問題点は、バラツキの大きい木質材料を用いて如何にバラツキの小さな梁材を製造するかという点にあり、超音波を用いたＬＶＬラミナのソーティング、最終製品の抜き取り破壊試験などが行われている。製品強度のバラツキは主としてウェブ部材の強度のバラツキに依存するとのことで、ウェブ部材の品質管理と強度保証などが今後の課題となろう。



図－２　ＮＺの Box Beam と　ＴＪＩ

今後の問題点

今後の問題点を探ると、一つにはＮＺのような大きな梁の場合の寸法効果がある。特に、縦継ぎラミナを用いる集成材のフランジは引張応力を受けるが、大断面集成材の引張強度については研究が乏しいので材料メンバーとの連携プレーが必要であろう。また、ウェブの座屈については平嶋(20)の指摘にあるように十分な研究がなされていないので、特に大型のボックスビームを対象とした研究が望まれる。

さらに、釘を用いた現場接着や釘打ちだけによる製造方法も可能性を含めて再検討する必要があろう。この場合、特に長期的な性能がポイントになると考えられる。

（１）－３　現場で組み立てる複合梁

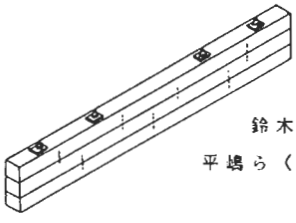
短・小径化する木材の資源事情によって、今後梁材の供給力はますます減少して行くものと考えられる。木造住宅の大部分を占める在来工法は原則的に現場工法であり、現場で製作できる組み立て梁の開発が望まれている。

組み立て梁の形式はすでに多くのアイデアがだされ、特に新しい形式を考えることは難しいと思われるが、新しい接着剤の利用や製造管理の方法を検討する事によって、可能性が生じてくるものと思われる。

現在の事情からして、接着剤に強度を期待する設計が公認されることは難しく，当面は強度を金物などでもたせ剛性を接着剤でもたせる方式をとっていかざるをえないであろう。

したがって、精密な解析がポイントとなる研究テーマではないが、将来の木構造にかかわる非常に重要な技術開発課題の一つとしてとりあげたい。

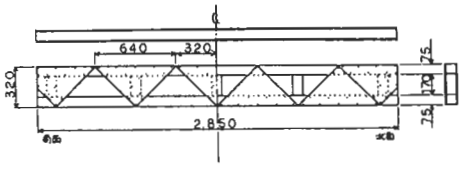
つぎに，最近実験された組み立て梁を示す。



鈴木（釘，24）

平嶋ら（ボルト，25）

野口（26）



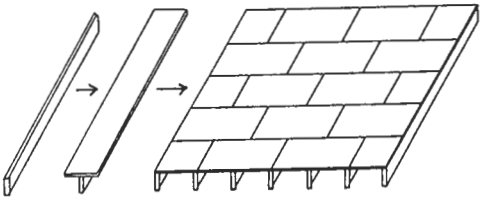
図－３　重ね梁と透かし梁

（２）床、屋根（鉛直荷重に対する性能）

鉛直荷重は構造体が日常的に受ける荷重であり、それに対する性能は居住者が確実に感じうる構造性能である。これまでの研究は主として床を対象に行われてきたが、そこで行われた解析は屋根にも応用できるものである。

構造的効果

面材を張った枠組壁工法の床の解析は、図－４に示すように梁（根太）単体→梁要素→床全体の順で発展してきた。



図－４　解析の歴史的順序

床全体の強度的性質をみると次の２つの構造的効果が存在する。

１．面材がフランジとして働く（Composite action）

２．両側の根太は全面が支持されているので、面材が連続梁として働く（Lateral load distribution）

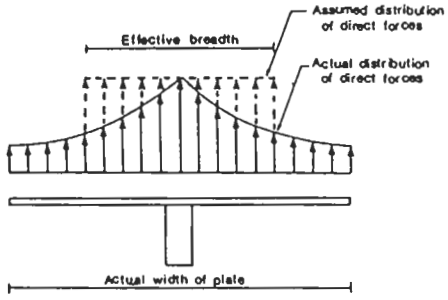
これらの効果は、すでに次のように構造設計にも部分的にとり入れられている。

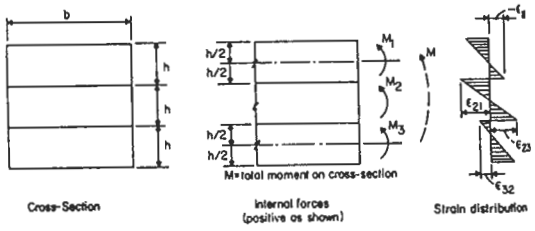
１．の効果－根太剛性をアップ（日・米）。
　日本は２５％（枠組壁工法、接着剤併用）

２．の効果－根太強度を１５％アップ（米）

１）Composite action

床の場合、面材の shear lag と partial composite action（層間すべりをともなう場。





図－5　Shear lag と Partial Composite action

合）にわけられる。

Shear lag は Newmark(27) が微分方程式の解を誘導し、Amana と Booth(28)がこれを partial composite action と組み合わせて、その後の研究のベースとなった。日本でも平嶋(29)、菊池(30)などの研究がある。

リブ上のフランジ応力を同じとしエネルギー的に等価な等分布応力の幅（有効幅）を考えると釘著梁として解析する事ができる。

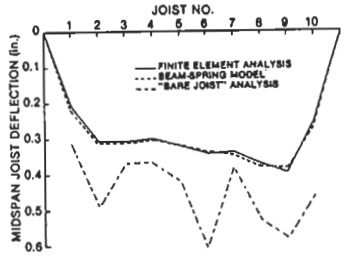
釘著梁の partial composite action については Goodman(31)、菱田ら(32)が微分方程式の解を与えた。なお、解析に必要な釘接合部の荷重－変形関係をインプットデーターとせず解析の中に含めた沢田ら(33)の研究は、将来の構造設計の一つの方向を示すものと考えられる。

Goodman(31) は梁の長さ方向に分布する釘応力の平均値に対してスリップ係数を変化させ、非線形の解を出した。これは、微分方程式をベースにしているので理論的に難点があるが、最初の非線形解として注目される。

梁上の釘１本毎の非線形性を扱った解は、差分法を用いた Tremblayら(34)のもの、釘点毎の釣り合い式を求めて連立に解いた神谷（35)のものがあるが、現在ではＦＥＭを用いる方法（辻野(36)その他）が主流になっている。

２）Lateral load distribution

床の剛性と強度は、床要素のそれよりはるかに高い。これは加わった荷重が根太の支点だけでなく、面材を介して全面を支持された側根太にも流れるからである。



図－6　床根太のたわみ分布（McCutcheon）

床の解析

これまで発表された床の解析プログラムとモデルを表－１、図－７、８に挙げる。

面材の力伝達効果は面材の継目（gap of sheathing)の影響を受けるので、大部分のプログラムではこれが考慮されている。

考慮した因子の多いことではＦＡＰが最右翼にある。すなわち、根太の回転、根太の横方向のたわみ、応力に応じた有効幅の扱い（他のプログラムは仮定した有効幅をインプッ。

トする方式）などである。

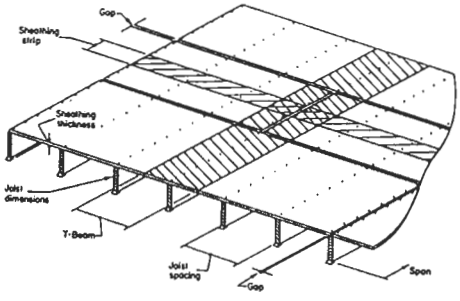
解析の応用

1．解析プログラムをベースとして歩行や衝撃に対する性能が研究されている。（Polensek(37),Foschi(41),安藤(43)など）

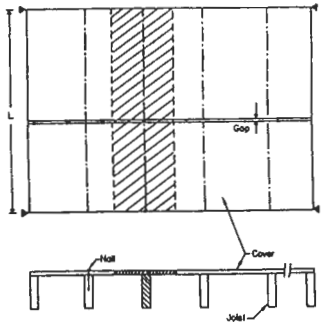
表－1　床の解析プログラムと特徴

ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ名	文献	Shear lag	Partial composite action	Nonlinear	Gap of sheathing
－	Polensek (37)	×	△	×	×
－	Venderbilt(38)	△	○	×	×
FEAFLO	Thompsonら(39)	△	○	×	○
NONFLO	Wheatら (40)	△	○	○	○
FAP	Foschi (41)	○	○	○	○
－	McCucheon (42)	△	△	×	○

○：考慮
△：別計算でファクターを求めてインプットする
×：考慮せず



図－7　ＦＥＡＦＬＯのモデル



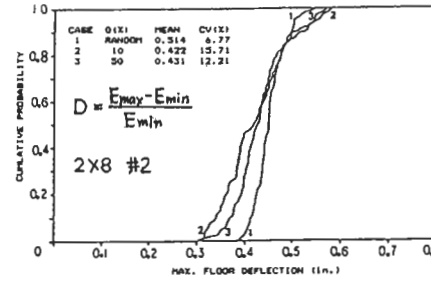
図－8　ＦＡＰのモデル

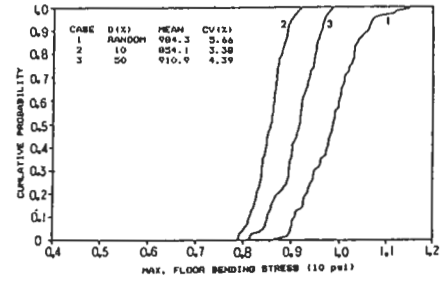
この場合、釘応力は比較的低レベルにあるので線形解析でも十分有効である。振動障害と設計剛性との関連を捉えることがこれからの研究テーマとなろう。

2．床を構成する材料はバラツキがあり、それが応力分布や全体の剛性に影響を与える。しかしながら、床は構造的にパラレルシステムであり、全体の剛性強度のバラツキは材料のバラツキより小さくなる。図－9に Foschi がモンテカルロシミュレーションによって求めた床剛性・強度の累積頻度カーブを示した。

その他の問題点

1．非線形解析においては釘の変形方向が不定であるため多くの仮定を設定している。仮定による誤差を少なくしたより精度の高い解析が望まれる。





図－9　床のたわみ・最大曲げ応力度の出現頻度(Foschi)

2．高度な解析プログラムと設計式のギャップを埋めること。McCutcheon のプログラムはシンプルでありながらＦＥＡＦＬＯと同程度の解析精度をもっている。このような簡便な計算方法を検討することが望まれる。

3．歩行や衝撃によるたわみや振動に対する要求性能を明確にすること。生理学的なアプローチが必要と思われる。

屋根の解析

床の場合と違って強度の予測が重要なテーマとなる。トラス単体はシリーズ゛システムであるが、屋根が構成されたときシリーズ゛／パラレルの混合システムとなる。この問題について、現在ＦＰＬとＦＯＲＩＮＴＥＣの共同研究プロジェクトが走っている。

（３）耐力壁、床（水平荷重に対する性能）

実験的研究

面材の剪断強度をもって水平力に抵抗する耐力壁や床の構造システムは、木構造の中で大きな地位を占めつつあるが、その原動力になったのは多くの実験的研究である。

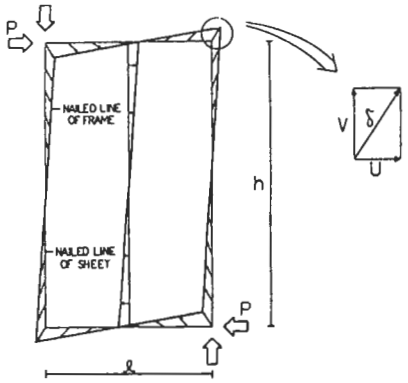
アメリカではＡＰＡの実験など（44）をベースにして許容耐力が与えられ、中・大規模木構造の設計の一つのよりどころとなっており、日本ではプレハブ住宅の開発→枠組壁工法の導入→在来工法の改良の流れの中で常に最も重要なテーマとして研究が行われてきた。この間の日本での 実験の量は相当なもので、耐力壁の静的な加力による試験法・評価法などが確立されてきた。

日本での床の静加力実験は、建研（45）、林業試験場（46）、武蔵工大（佐野47）などで行われてた。 床の工法は、在来、枠組み壁、プレハブなどで、試験体の最大寸法は 10.92m x 3.64m である。実験で得られた強度は設計値に対して安全か否かで評価することができるが、剛性については評価基準がなく、これまでに公認された床の剛性が一つの判断基準になっている。なお、在来工法の床（製材板張り）については、他工法の床よりはるかに剛性・強度が劣るので、問題が残されている。

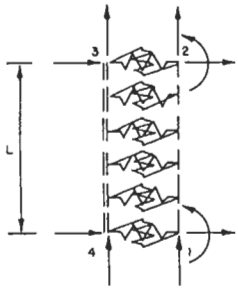
解析

解析は実績を後追いする形で発展してきた。TuomiとMcCutcheon(48)の面材張耐力壁の解析は、釘の変形方向を仮定した線形理論であるが、その後の研究の引き金となった。平嶋(49)はTuomiらの式を近似的に非線形に拡張し、McCutcheon(50),Easleyら(51),坂本(52),安村(53),神谷(54)は釘の変形方向の仮定によらない非線形解析を行った。

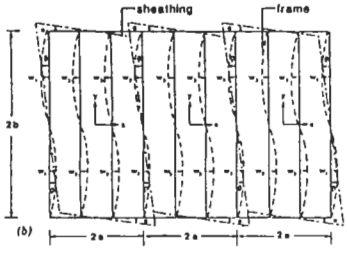
以上の解析では、純粋な剪断力を受ける幾何学的に対称な耐力壁であることが要求され、また、枠材の曲げ変形などは無視されているが、より一般的な解析としてＦＥＭによるものが発表されている（野口(55)、Itaniら(56)、Easleyら(51)、Gupta(57)、秦(58)など）。



図－１０　ＦＥＭによらない解析の変形仮定



釘接合部モデル



変形

図－１１　ＦＥＭ解析モデル

ＦＥＭによる解析では、支持条件や荷重条件を自由に設定できるほか、枠材のseparation、面材のinteractionなどもモデル的に解析することが可能である。

在来工法の筋かい耐力壁の解析では、平嶋ら(59)がトラスの理論の適用が可能であることを報告している。この場合、圧縮筋かいは端部のめり込みで抵抗するので、実状にあった接合部の荷重－変形関係がインプットデーターとして必要である。

ダイヤフラム単体と構造体との関係

単体の解析は一応のレベルに達していると考えられるが、単体と構造体との関係は依然”古くて新しい問題”である。　杉山ら(60)が耐力壁と建物について行った実験では、タイロッド方式による耐力壁の性能から建物の耐力を推定した場合、変形が小さいときは過小評価、大変形になると過大評価となることが報告されている。

また、床については、先ほど述べたように剛性に対する要求性能が明確でなく、耐力壁を含めてこれからのダイヤフラムの研究は、構造体の研究と連動させて行う必要があろう。

仕上げ材の効果

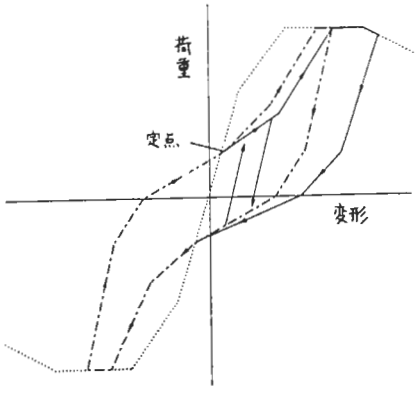
モルタルなどの仕上げが施された場合、その剪断剛性・強度はかなり増加することが知られている(61)。現在、仕上げ材の効果は余力として扱われているが、振動問題などを検討するとき正確な剛性などを知る必要があるので、その効果を仕上げの種類毎に定量的に把握することが望まれる。

振動問題（水平方向）

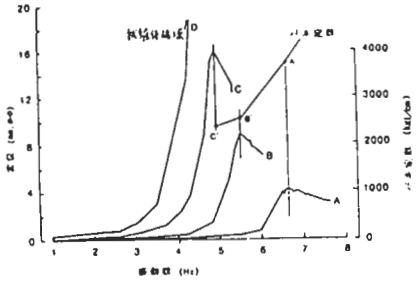
耐力壁の地震波による振動実験は、支持条件と荷重条件をrealisticにすることが難しいので、一部の例外（ワシントン州立大学の実験）を除いてあまり行われていない。建材試験センターや林試では正弦波を用いた振動実験が行われ、繰り返し回数と振幅による固有周期や減衰性の変化が調べられた(62,63)。

コンピューターを用いた解析は、東大の坂本研やワシントン州立大学などでおこなわれている。木造耐力壁は荷重を受けると剛性、danping factor が変化し、また、荷重速度の影響が大きい。こうした影響を実験的に調べること、その結果を振動解析のなかでどのように扱うかなどがこれからの研究の話題となろう。剛性の低下を考慮した大橋のモデル(64)を図－１２に示した。

床の振動については、最近林業試験場で実験が行われ(65,66),平嶋らは静的な床剛性から固有周期の予測が可能であること、非線形



図－１２　復元力モデル（大橋）



図－１３　床の変位と共振周波数

の剛性のために振幅に応じて固有周期が変わることなどを報告している。

実用設計へのアプローチ

多くの解析結果を利用して、より合理的な設計法の開発を行うことが望まれる。

特に、現在ダイヤフラムの利用が認められていない集成材構造では、住宅などのように仕様を固定化することが難しいので、応力に応じたダイヤフラムの設計法や接合部の計算法を開発する事が必要であろう。

開口部については、耐力壁では小壁の効果を余力としても安全性に問題はないが、床や屋根の場合は局部的な剛性と強度の低下となるので、その補強法を検討する事が必要であろう。

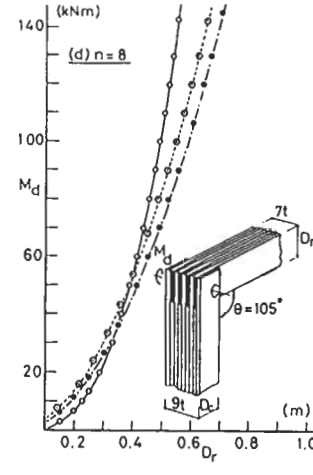
（４）単位骨組み

集成材アーチ

２こう節、３こう節の集成材アーチの実大実験はこれ迄に数多く行われ(67)、実験値と計算値とが良く一致することが報告されている。しかしながら、実験されたアーチには梁の部分に通常施される継ぎ手がなく、こうした継ぎ手は完全な剛にはならないことが指摘されているので(68)、継ぎ手を持つアーチの実験を行う必要があろう。

ラップジョイントによる剛節構造

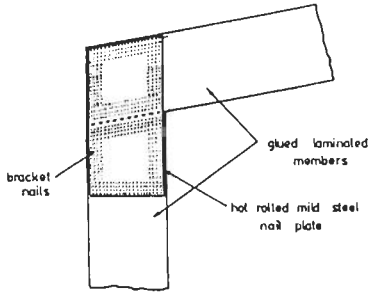
ラップジョイントは湾曲材のように半径方向応力で破壊することがなく、接合強度も高い。　破壊力学にもとづく小松の研究(69)があり、幅はぎの技術が確立すれば大断面の集成材構造も可能であると思われる。



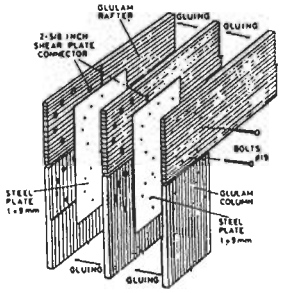
図－１３　ラップジョイントの強度

金物による剛節構造

湾曲部を剛節点とするラーメン構造は用途が限定される。地震のないヨーロッパでは通直材を金物で接合したラーメン構造が設計されてきたが、地震国であるＮＺや日本でもこうした構造が相ついで設計された。金物を用いた節点は半剛節となるが、接合部内の応力と変形を正しく捉えられればラーメンの解析は可能であり、集成材構造の可能性を拡げるものとして注目される。



ＮＺの Nail on Plate (70)



美深林務署のシアプレートによる剛節点 小松（71）

図－１５　金物による剛節点の設計例

金物による剛節構造の解析上のポイントは接合部の応力解析につきるが、接合部応力としてＭ，Ｎ，Ｑの３つが作用するので、非線形で解く場合、高度のテクニックが必要である(72)。

ラーメン以外の構造

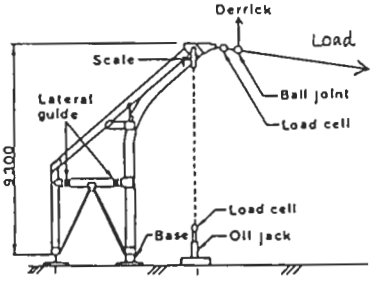
木造ラーメン構造では高い水平剛性を確保するために大きな断面が必要になる。三井木材工業（株）は新しい構造形式の試みとしてトラス形式の骨組を開発し、その実験(73)が林業試験場で行なわれた（図－１６）。

この骨組の設計荷重時の変形は1/256ラジアンで従来のアーチ構造には見られない高い剛性を示した。しかしながら、接合部の数が多くそのスリップの影響が剛性にあらわれるので、設計に際してはこの点を考慮することが必要である。接合部のスリップを無視して求めた接合部応力と別途に行った接合部の試験結果とから推定した接合部のスリップは、実験値と必ずしも一致しなかった。これは、部材端部の接触、構造体の変形による接合部の強制変形、ボルト穴の初期ガタなどによるものと思われる。

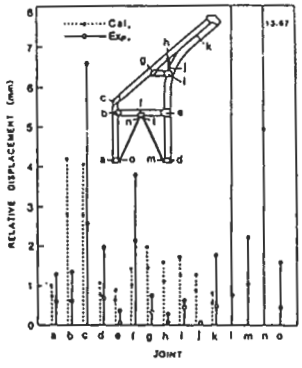
しかしながら、推定した接合部のスリップをもとにして、そこで吸収されたエネルギーをもとめ仮想仕事法でスリップによる付加たわみを計算した結果、実験値と良く一致した。

住・木センターの開発プロジェクトでは、製材と釘打ち合板ガセットによる、また、集成材とボルトによるトラス型ラーメンの畜舎が設計され実験が行われた(74)。いずれも計算どうりの剛性と強度があり、畜舎以外への応用が期待される。

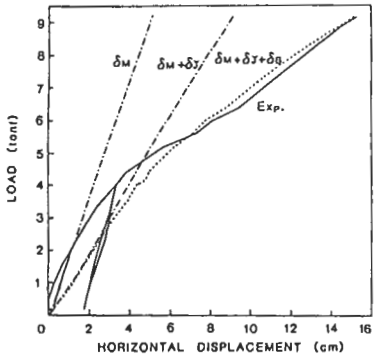
また、北林産試で開発されたポールコンストラクション(75)の構造システムは、ＮＺなどでは住宅に用いられているもので、日本でも検討する余地があろう。



加力方法

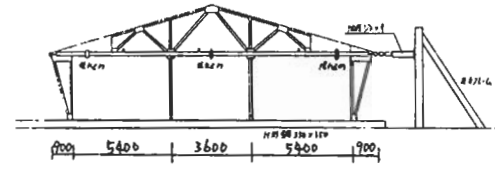


接合部の変形

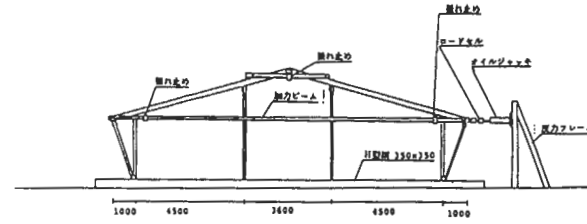


頂部の変形　δ_M＝ピンジョイント仮定の変位；δ_J＝joint slip の付加変位；δ_B＝joint座屈の付加変位

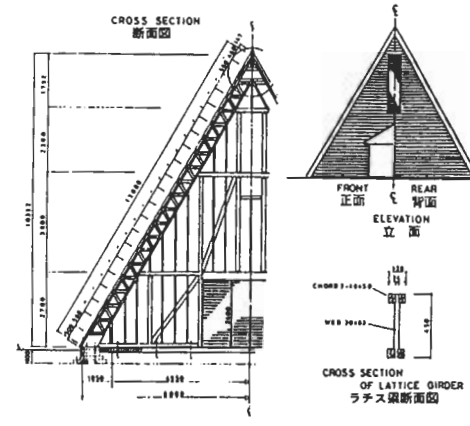
図－１６　トラス型骨組の加力試験



図－１７　心持製材を用いた釘打ち合板ガセットによるトラストラーメン骨組



図－１８　集成材を用いたトラストラーメン骨組



図－１９　接着トラスを用いた骨組み(76)

（５）構造部材、構造要素の座屈

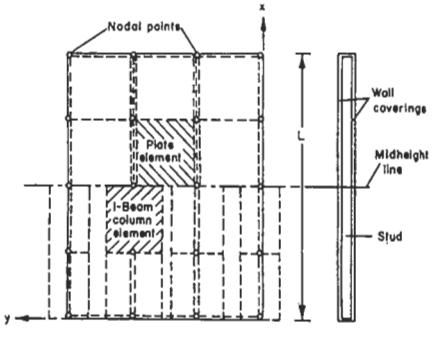
構成部材、構造要素の座屈

座屈は古くからの問題であるが、実用設計の面では余り進歩していないといわれている(77)。

柱の圧縮力に対する設計では、昔ながらの"両端が単純支持された柱－梁"理論が用いられている。複合部材であっても柱の部分だけを取り出し、複合効果を無視して設計されているのが現状である。その理由は、座屈現象そのものが複雑であるのにくわえて、実際の荷重条件、支持条件が明確でなく、また、材料の不均質性がおおきな影響を及ぼすことなどによるものである。

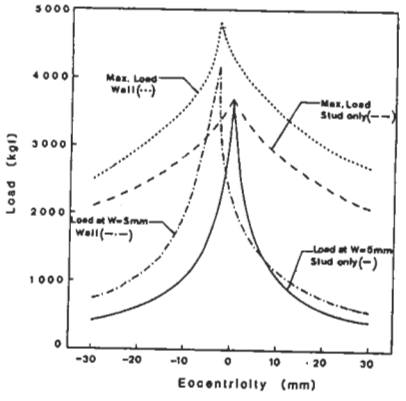
しかしながら、こうした不確定性の問題を扱う理論も発展しており、座屈にたいする合理的な設計をめざした研究が必要かと思われる。

曲げと圧縮力を同時に受ける面材張耐力壁やパネルの性状が Polensek(78),菊池(79),安藤ら(80)によって研究された。Polensekの研究は、ＦＥＭモデルを使って解析したもので、プログラムを少し変えれば座屈問題にも適用できると思われる。なお、この研究は信頼性解析を念頭においたもので、縦枠強度にバラツキがある場合の性状が検討されている。



図－２０　Polensek の壁の圧縮曲げモデル

神谷(81)は，Composite action を考慮した面材張耐力壁モデルの解析（線形、非線形）を行った。支持方法はピンとし、荷重の偏心量をかえた数値実験を行った結果、同じ偏心量の条件では縦枠だけの場合と比べて壁の耐力の方が高いとの知見を得ている。



図－２１　Composite action による耐力壁座屈強度の上界

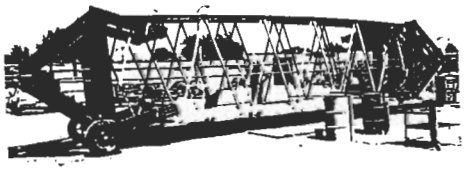
釘打ち重ね柱の解析が、RassamとGoodman(82),Malhotra(83),沢田（84）、工藤（85）、辻野(86)らによって行われている。釘のようなすべりをともなう接合法でも、座屈に対してはかなり効果的であることが示めされた。

鈴木(87)は,実条件で支持した枠組壁工法のコーナー部分の圧縮試験を行った。それによると、直交する２面に合板を張った場合座屈は生じず、合板が無い場合でも個々の柱のＥＩの合計から計算した座屈荷重よりはるかに高い強度を示す事がわかった。

住宅構造における座屈の問題については、現在の設計法はかなり安全側にあると考えられるが、これからの大型構造物では、複合応

力を受けるラーメンやトラスなど慎重な対処が必要になる場面がでてこよう。ボックスビームのフランジの座屈については既に述べた。

なお、大規模建築の一つの様式であるドームは、曲面を構成することによって主として軸力で荷重に抵抗する構造形式である。ドームの構成要素は、軸材料だけによるシンプルなものから面材の協力効果を期待するパネル、キービードームのようなトラス／パネルが複合した複雑なものまである。こうした構造では実大実験を行うことは難しいので、模型実験や、構成要素の解析、実験が中心となろう。

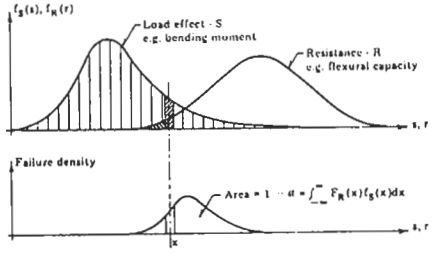


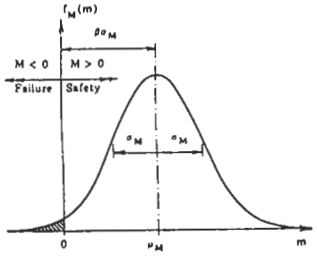
図－２２　LVL flange と steel pipe latticeからなる Kibbie Dome element の座屈試験(88)

ＡＰＰＥＮＤＩＸ－１

構造システムの違いによる強度の変化

構造安全性を従来の確定的な方法ではなく、統計と確率の知識を用いて評価する構造信頼性理論は、最近急速な発展をみせ、建築設計にも取り入れられるようになってきた。この理論は、構造強度と荷重を不確定性のものとしてとらえ、破壊（あるいは定められた損傷）確率を求めることで安全性を評価するもので、既に北米やヨーロッパなどでは、プリミチブな形で Building Code などにもとりいれられている。





図－Ａ１　構造信頼性の概念図

いま、Ｍ＝Ｒ－Ｓ　の値を考えると、Ｍ≦０で構造物は破壊する。Ｍは偏差，

$$\sigma_M = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$$

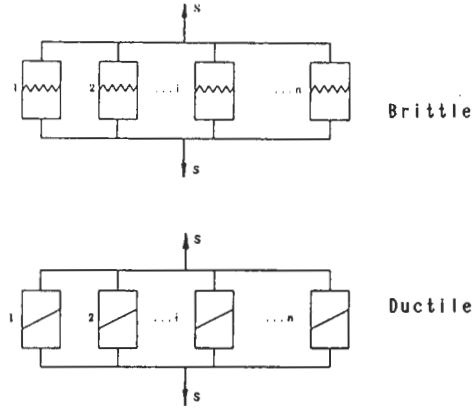
をもつ分布関数である。上図のようなβを定義すると、βは安全性を示す指標となり、安全性指標（Reliability Index）と称せられる。

木構造においても集成材の梁をはじめ、トラスや床の剛性・強度について解析が行われようとしており（Appendix-3を参照）今後の大きな研究テーマになると思われる。

構造安全性に影響を及ぼす因子は、荷重の確率分布とその組み合わせ、構成材料の強度的性質の確率分布、構造システムの３つであるが、われわれに最も関係する材料強度と構造システムが安全性に与える影響について概説する。

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

構造システムをモデル化すると、トラスなどのように１つの部材の破壊が構造全体の破壊にいたるシリーズシステムと、床やラーメンなどの不静定構造のように１つの部材の破壊が全体の破壊に必ずしも結びつかないパラレルシステムとに分けられる。



図－Ａ２　Parallel Structural System

図－Ａ２（続き）
Series Structural System
Brittle or Ductile

いま、使用部材の強度が平均 379 kg/cm²，変動係数 23.43 %（USA Hem-Fir 2X4 1.5 E-1650f の実験データー）の正規分布に従うとする。この製材の 5%ile 値は 233 kg/cm²、安全率 2.1 で除した値は 111 kg/cm² となり許容応力度 116 kg/cm²（1650 psi）をほぼ満足している。

荷重継続時間 1 day に対する許容応力度は 154 kg/cm² で、許容応力度に相当する荷重がかかったときのこの材料の破壊確率、Pf は、正規分布の確率密度から、0.56 % となる。

同じグレードの２本の部材から構成されている次の３つのシステムについて、破壊確率 ,Pf を求める。ただし荷重は 154 kg/cm²、確定値（$\sigma_S = 0$）とし、強度に対する volume 効果などは考えない。また、２本の部材の強度に相互の関連はないものとする。

１．シリーズシステム

$Pf = 1 - Ps = 1 - P(R_1 > S) \times P(R_2 > S)$

$= 0.0112 \quad ... \quad 1.12\ \%$

$\beta = \Phi^{-1}(Pf) = 2.28$

２．パラレルシステム（ductile）

$S = 2 \times 154 = 308, \quad R = R_1 + R_2 = 758$

$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 = 2 \times (379 \times 0.2343)^2$

$= 15770$

$$\frac{R - S}{\sigma_M} \qquad \frac{758 - 308}{\sqrt{15770}}$$

$Pf = \Phi(\beta) = 0.00017 \quad ... \quad 0.017\ \%$

３．パラレルシステム（brittle）

$S = 2 \times 154 = 308$

$Pf = 1 - Ps = 1 - P(R_1 > S/2 \text{ and } R_2 > S/2)$

$- P(R_1 < S/2 \text{ and } R_2 > S)$

$- P(R_1 > S \text{ and } R_2 < S/2)$

$= 1 - A - B - C$

ここで

$A = (1 - P(R_1 < S/2))$

$\times (1 - P(R_2 < S/2)) = 0.9888$

B,C ： まず、$P(R_1 > S)$（$= P(R_2 > S)$）を求める。

$$\frac{R_1 - S}{\sigma_{R_1}} \qquad \frac{379 - 308}{0.2343 \times 379}$$

$P(R_2 > S) = \Phi(\beta) = 0.212$

$B,C = P(R_1 < S/2) \times P(R_2 > S)$

$= 0.0056 \times 0.212 = 0.00119$

よって、

$Pf = 1 - 0.9888 - 2 \times 0.001187$

$= 0.0088 \quad ... \quad 0.88\ \%$

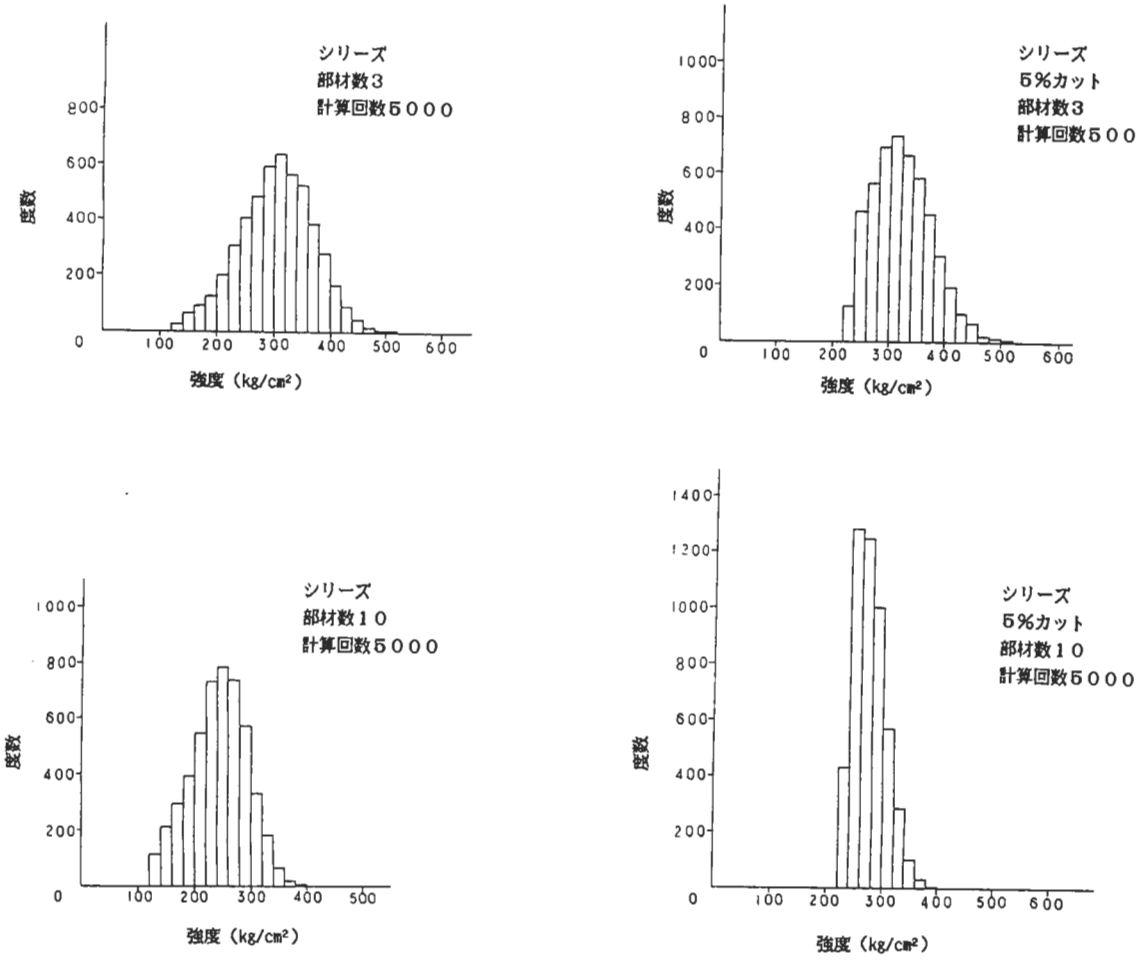
$\beta = \Phi^{-1}(Pf) = 2.37$

以上は構成部材の数が少なく、システムも簡単であったために、机上の計算ができたが、実際の構造物は多数の部材や接合部からなり、システムもパラレルとシリーズの混合体となるので、簡単には計算できない。

しかしながら、モンテカルロシミュレーションの手法（乱数をもとに構成材料の個々の強度などを定め、解析理論を用いて構造体強度を計算し、これを多数回くりかえす）を用いれば、構造体の強度や剛性の確率分布を求めることができる。

この方法で求めた　部材数＝３，１０のと

きの強度分布を図－Ａ３にしめす。

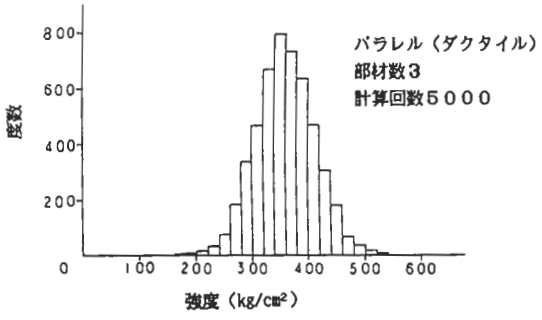


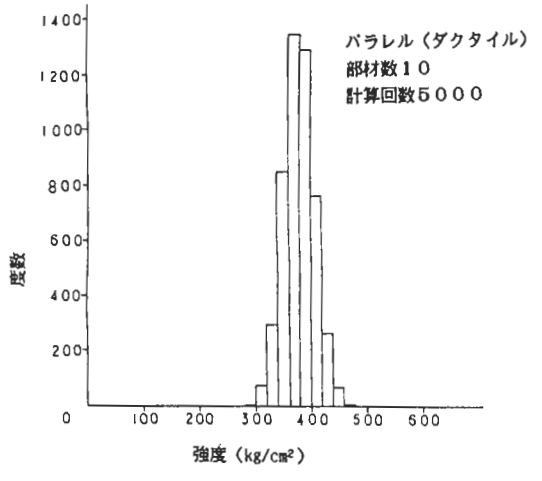
図－Ａ３　モンテカルロシミュレーションで求めたシステムの強度分布

このように、シリーズシステムでは部材数が増えるにつれて強度が下がり、パラレルシステムでは逆に強度が上昇する。　いま、システムの破壊確率が部材の破壊確率 0.56% と同じになるときの荷重（部材１本あたり）をもとめると表－Ａ１のようになる。

同表には、proof loading の方法で５%ile 以下の強度をもつ材料が除かれた場合の値を併記した。この場合、システムの破壊確率 0.56% とすると、ｎ＝１０のシリーズシステムであっても許容応力度の1.44 倍までかけることができる。

以上は信頼性の高いＭＳＲランバーの場合であるが、つぎに視覚等級区分製材で日本の





図－Ａ３　（続き）

許容応力度を用いた場合について計算する。

中井の実験によれば、オウシュウアカマツ2X4 材の引張強度は、平均 238 kg/cm², 標準偏差 56.4 kg/cm² である。正規分布を仮定した場合の 5%ile 値は 145 kg/cm² で、順位法による値 147 kg/cm² とほぼ同じである。

システム	材料	n＝1	n＝2	n＝3	n＝10
シリーズ	1	154 （ 1 ）	149 (0.97)	141 (0.92)	125 (0.81)
シリーズ	2	233 (1.51)	227 (1.47)	224 (1.45)	221 (1.44)
パラレル	1	154 （ 1 ）	221 (1.44)	226 (1.47)	286 (1.86)

材料１：　平均 379kg/cm², 変動係数 23.43%,正規分布
材料２：　材料１より強度 5%ile 値以下の材料を除いたもの

この材料の樹種グループを SI（D Fir-L)とすると、短期許容応力度は 240 kg/cm² で、許容応力度に対する破壊確率は 54% となる。この材料からなるシリーズシステムの破壊確率は、表－Ａ２に示すように非常に高い。

この原因の一つは、曲げと引張の許容応力度を等しくしているためである。そこでいま、引張許容応力度を曲げの 0.55 倍、132 kg/cm² とすると、材料の破壊確率は 3.0% となる。この場合のシリーズシステムの破壊確率を表－Ａ２に併記したが、5.9%(n=2) - 26.3%(n=10)と、なお高い値を示している。

北米における同樹種グループの引張許容応力度(1 day)は 98 kg/cm² で、材料の破壊確率は 0.66% ,シリーズシステムの破壊確率は表－Ａ２のように 1.32%(n=2) - 6.41%(n=10) となるが, n=10 の値はまだ高い。

表－Ａ２　オウシュウアカマツを用いたシリーズシステムの破壊確率（%）

引っ張り許容応力度	n＝1	n＝2	n＝3	n＝5	n＝10
$=f_b$=240kg/cm²	54.0	78.8	90.3	97.9	99.96
=0.55x f_b=132kg/cm²	3.0	5.9	8.7	14.1	26.3
=98kg/cm² (USA, 1day)	0.7	1.3	2.0	3.3	6.4

APPENDIX－2

引用文献

1. Suddarth,S,K., FPL Research Paper, FPL168, 1672
2. Foschi,R.O., FPRS Proceedings, P-79-28, 88-97, 1979
3. McMartin, K.C., et al., Canadian Journal of Civil Eng (in review)
4. Keenan,J., et al., Priceedings, Structural Research, Canadian Society for Civil Engineering, Otta wa, Canada, 1983
5. 後藤一雄、建築学会論文集、31, 1944
6. 宮島寛、材料、20(218),1971
7. 藤井毅、北大演習林研報、26(1), 1968
8. 金谷紀行、未発表資料
9. 佐野弘、建大58年、2253-2254
10. 伊藤勝彦ほか、林産試月報、347, 1980
11. 小松幸平ほか、林産試月報、7月、8月、1979
12. 堀江秀夫ほか、建大60年、1275-1276
13. 神谷文夫ほか　建大61年、1201-1202
14. 前田典昭、北林産試、講習会テキスト、木質構造部材の製造と性能保証技術の開発、1986
15. Newlin, J.A., FPL Report, No.R, 1220. p7, 1970
16. APA, Plywood Fabrication Spec. 1974, Plywood Design Spec., Suppliment #2, 1974
17. 宮島寛、木材学会北海道支部講演集、10-13, 1971
18. 後藤一雄、建築学会論文集、11-21, 1973
19. 高見勇、木材誌、7, 101-106, 1961
20. 平嶋義彦、林試研報、1294, 195-219, 1977 その他
21. 海老原徹、木材誌、28(4), 1982
22. 徳田迪夫ほか、建大60年、1269-1270
23. 定方啓ほか、建大57年，2063-2064，建大58年，2249-2250
24. 鈴木秀三、建大60年，1273-1274
25. 平嶋義彦、木材学会大会、1986
26. 野口弘行、低コスト肉用牛畜舎設計基準策定事業構造試験報告書（続）、住木センター、1979
27. Newmark, N.M., et al., Proceedings, Society for Experimental Stress Analysis, 19(1), 1951
28. Amana, E.J., et al., Journal of the Institute of Wood Science, 4(2), 1967

29. 平嶋義彦、林試研報、225, 1973
30. 菊池重昭、建大57年，2065-2066, 建大58年，2247-2248
31. Goodman, J.R., Wood Science, 1(3), 1969
32. 菱田一郎ほか、造船協会論文集、104, 1959
33. 沢田稔ほか、北大演習林研究報告、35(1), 1978
34. Tremblay, G.A., et al., Wood Science, 9(1), 1976
35. 神谷文夫、林試研報、329, 1984
36. 辻野哲司、木材誌、31(11), 1985
37. Polensek, A., FPJ, 21(12), 1971
38. Venderbilt, M.D., et al., ASCE, 100(ST1), 1974
39. Thompson, E.G., et al., ASCE, 101(ST12), 1975
40. Wheat, D.L., et al., Structural Research Report, No.26,CSU, 1980
41. Foschi, R.O., ASCE, 108(ST7), 1982
42. McCucheon, W.J., FPL Research Paper, 449, 1984
43. 安藤直人、木材工業、41(7), 1986
44. APA, Laboratory Report 106,138
45. 建設省、小規模住宅の新施工法の開発、1976
46. 平嶋義彦、鷲海四郎、木材工業、32(396-398), 32(552-554),36(67-70), 1977, 1981
47. 佐野弘、建大55年，1995-1996
48. Tuomi, L.R., et al., ASCE, 104(ST7), 1978
49. 平嶋義彦、木材誌、27, 1981
50. McCutcheon, W.J., ASCE, Journal of the Structural Division, 111(2), 1985
51. Easley, J.Y., et al., ASCE, 108(ST11), 1982
52. 坂本功、建大54年，1797-1798
53. 安村基ほか、建大56年，2253-2254
54. 神谷文夫、建築学会論文報告集、309, 1981
55. 野口弘行、建大54年 (1793-1794), 建大55年 (　　)
56. Itani, R.Y., et al., ASCE, Journal of the Structural Division, 110(9), 1984
57. Guputa, A., ASCE, Journal of the Structural Division, 111(8), 1986
58. 秦正徳、木材学会大会、1986
59. 平嶋義彦ほか、木材誌、27(12), 1981
60. 杉山英男ほか、建築学会論文報告集、 247(1976), 248(1976), 261(1977), 269(1978), 271(1978)
61. 平嶋義彦ほか、建大 年

62. 林業試験場、未発表
63. 大橋好光ほか、建大60年、1237-1238
64. 川島謙一ほか、建大56年（2245-2246），建大57年（2091-2092）
65. 神谷文夫ほか、建大59年，2669-2670
66. 平嶋義彦ほか、木材学会大会、1986
67. Appendix-3 を参照
68. 太田道彦ほか、建大58年，2215-2218
69. 小松幸平、Proceedings, PTEC, 1984
70. Lowe, P.G., The Newzealand Journal of Timber Construction, December 1985, 11-18
71. 小松幸平ほか、林産試月報、409, 1986
72. 小松幸平、建大60年（1299-1230），建大61年（1255-1256）
73. 神谷文夫ほか、建大61年，2255-2256
74. 住木センター、低コスト肉用牛畜舎設計基準策定事業　構造試験報告書、1984
75. 森泉周ほか、木材学会北海道支部講演集、13, 1981
76. 小松幸平ほか、林産試月報、40, 1985
77. Johnston, B.G., ASCE, Journal of the Structural Division, 109(9), 1982
78. Polensek, A., ASCE, 102(ST7), 1976
79. 菊池重昭、建大59年（2671-2672），建大60年（1255-1256），建大61年（1191-1192）
80. 安藤直人ほか、木材誌、27(10), 1981
81. 神谷文夫、建大61年，1193-1194
82. Rassam, H.Y., et al., Wood Science 2(4), 1970
83. Malhotra, S.K., et al., Wood Science, 9(4), 1977
84. 沢田稔、北大演習林研究報告、37(3), 1980
85. 工藤修、林産試月報、400(5), 1985
86. 辻野哲司、木材学会北海道支部講演集、17, 1985
87. 鈴木周三ほか、建大60年，1265-1266
88. Nelson, S.A., ASCE, Preprint 2800, Annual Convention and Exposition, 1976

註：建大は建築学会大会学術講演梗概集（構造系）を、木材学会大会は同大会研究発表要旨集を示す。

APPENDIX－3　関連文献

構造体要素の強度に関する文献は非常に多く、これを集め分類することはこれから共同して行っていくべき作業です。　ここでは、Milwaukee で1983年に行われた Workshop の Proceedings と平島、神谷がそれぞれ過去にまとめたものをキリバリしてみました。　したがって、整理がされておらず、抜けているもの、重複しているものが多数ありますが、ご容赦下さい。

1．平行弦トラス、屋根トラス

Brynildsen, O.A. and L.G. Booth. 1967. Structural analysis of timber trusses with semi-rigid joints. Paper presented at IUFRO Conference, Munich.

Foschi, R.O. 1977. Analysis of wood diaphragms and trusses. Can. J. Civ. Eng. 4(3):345-362.

Keenan, F.J., P. Dubelsten, T. Klajnerman and B. Kyokong. 1983. Strength interactions of finger joints and truss plate joints in light wood trusses. Canadian Journal of Civil Engineering 10:466-480.

Keenan, F.J., M.M. Lepper, A.T. Quaile, and E.N. Aplin. Behavior of truss plate and metal web joints in MSR lumber trusses. Canadian Journal of Civil Engineering. (In review.)

McMartin, K.C., A.T. Quaile and F.J. Keenan. Strength and structural safety of long span light wood trusses. Canadian Journal of Civil Engineering. (In review.)

Suddarth, S.K. 1969. The engineering design of mechanically fastened trusses - a review. Wood Science 1(4):193-199.

Suddarth, S.K. and D.H. Percival. 1972. Increasing the application efficiency of performance tests with analytic procedures. Nat. Bureau of Standards Spec. Pub. 361 Vol. 1. Washington, D.C.

Suddarth, S.K. 1983. The changing scene. In Wall and Floor Systems: Design and Performance of Light-Frame Structures. Proceedings 7317 of conference held September 22-24, 1981 at Denver, CO.

Suddarth, S.K., D.A. Percival and Q.B. Comus. 1981. The structural performance of parallel chord metal plate connected wood trusses. Final report for Dept. of Housing and Urban Development, Washington, D.C.

Suddarth, S.K., D.H. Percival and Q.B. Comus. 1981. Testing and analysis of 4x2 parallel chord metal plate connected trusses. Research report 81-1, Small Homes Council, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois.

Suddarth, S.K. 1972. A computerized wood engineering system - the Purdue Plane Structures Analyzer. U.S. Forest Products Lab. Res. Report FPL 168, Madison, WI.

Zahn, J.J. 1982. Strength of Lumber Under Bending and Compression. Research Paper FPL 391, U.S. Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.

後藤一雄：「撓みの効率を以って行う木造トラス梁の計算法、その他について」、建築学会論文集、第31号、1944

2．重ね梁

Goodman, J. R., and Popov, E. P., "Layered Bean Systems with Interlayer Slip," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, No. ST11, November 1968, pp. 2535-2547.

Granholm, H., "Om Sammansatta Balkar Och Pelare Med Sarkilo Hansyn Till Spikade Trakonstruktioner" ("On Composite Beams and Columns with Particular Regard to Nailed Timber Structures"), Chalmers Tekniska Hogskoas Handlingar, No. 88, Gottenburg, Sweden, 1949.

菱田一郎、真野創：「木船縦強度の理論的研究（第1報）」、造船協会論文集、第104号、1959

沢田稔：「2層釘着梁の曲げ剛性と強度」、北海道大学農学部演習林研究報告、第33巻、第1号、1976

沢田稔、山田順治：「木造釘着組立梁の腹材有効剛比」、北海道大学農学部演習林研究報告、第35巻、第1号、1978

辻野哲司、小泉章夫：「2層釘着梁の非線形曲げ解析」、木材学会誌、29（9）、1983

後藤一雄：「木造重ね梁計算法の一考察」、日本建築学会論文集、第21号、1941

後藤一雄：「撓みを一定限度に収めんとする場合の木造重ね梁設計法一案」、日本建築学会論文集、第29号、1943
後藤一雄：「木造重ね梁設計法」、日本建築学会論文集、第49号、1954
河野輝夫：「新発明合成ラーメン式重ね梁に就いて」、建築世界、第36巻、第3号、1942
鷲尾健三：「ラーメン式重ね梁の計算式に就いて」、日本建築学会論文集、第26号、1942
辻井静二：「木造飼木組立材の曲げ剛性」、日本建築学会研究報告、第20号、1952
辻井静二：「木造複合材の曲げ剛性及び強度に対する計算式」、日本建築学会論文報告集 第53号、1956
辻井静二：「木造複合材におけるつなぎの配置」、千葉大学工学部研究報告、8－14、1957

3．箱型梁、I型梁

McNatt, J.D. 1980. Hardboard-webbed beams: Research and Application. Forest Prod. J. 30(10):57-64.

McNatt, J.D. and Superfesky, M.L. 1983. Long-term load performance of hardboard I-beams. USDA For. Serv. Res. Paper FPL 441. For. Prod. Lab., Madison, WI.

Stoy, W. and Egner, K. : Versuche mit I-förmigen Holzbalken, V. D. I., (1938)

Lewis, W. C. : Design of Plywood Webs in Box Beams, USDA Forest Products Lab., No. 1318 (et seq.) 10 pp., (1943)

Design of Wood Aircraft Structures, ANC-18 Bulletin, 233 pp., (1942)

Newlin, J. A. : Deflection of Beams with Special Reference to Shear Deformations, USDA Forest Products Lab., No. 1309, 19 pp., (1941)

高見 勇：Box Beam に関する研究（第1報）曲げ剛性について，木材誌，7，101～106，(1961)

Biblis, E. J. : Shear Deflection of Beams, For. Prod. J., 15, 492～499, (1965)

Ehlbeck, J. : Durchbiegungen von Biegeträgern aus Holz unter Berücksichtigung der Schubverformung, Holz als Roh- u. Werkstoff, 27, 253～261, (1969)

Markwardt, L. J. : Form Factors and Method of Calculating the Strength of Wooden

Beams, USDA Forest Products Lab., R 1184, 13 pp., (1938)

USDA Forest Products Laboratory : Form Factors of Beams Subjected to Transverse Loading only, No. 1310, 19 pp., (1941)

Bohannan, B. : Effect of Size on Bending Strength of Wood Members, USDA Forest Products Lab., FPL 56 (1966)

Stieda, C. K. A. : Strength of Plywood Box Beams, Forest Products Lab., Vancouver, B. C., 4 pp., (1967)

宮島　寛：木造箱型梁のウェブ材としてのシナおよびラワン合板の性能比較，木材学会北海道支部講演集，10～13，(1971)

後藤一雄：合板ウェブ材に使用したI型およびBox型木造梁の研究（その1），日本建築学会論文報告集，11～21，(1973)

平嶋義彦：合板箱型梁の強度性能（第1報），林試研報，294，195～219，(1977)

平嶋義彦：ボックスビーム等横架材利用技術の研究，林業試験場木材部資料，1～32，(1977)

平嶋義彦：横架材利用技術の研究，林業試験場木材部資料，1～26，(1978)

平嶋義彦：合板ボックスビームの設計法とスパン表，林業試験場木材利用部資料，1～42，(1979)

The American Plywood Association : Plywood Design Specification, 30 pp., (1974)

The American Plywood Association : Fabrication of Plywood Beams, Plywood Fabrication Specification BB-8, 11 pp., (1974)

The American Plywood Association : Design of Plywood Beams. Plywood Design Specification, Supplement 2, 16 pp., (1974)

辻野哲司：木質箱型梁の曲げに関する研究，木材誌，24，39～45，(1978)

接着組立梁の製造基準（案），木質構造材料協会ボックスビーム部会資料 No. 42 (1977)

4．複合パネル、ダイヤフラムエレメントの曲げ

Amana, E. J., and Booth, L. G., "Theoretical and Experimental Studies on Nailed and Glued Plywood Stressed-Skin Components: Part I. Theoretical Study," Journal of the Institute of Wood Science, Vol. 4, No. 1, 1967a, pp. 43-69.

Amana, E. J., and Booth, L. G., "Theoretical and Experimental Studies on Nailed and Glued Plywood Stressed-Skin Components: Part 2. Experimental Study," Journal of the Institute of Wood Science, Vol. 4, No. 2, 1967b, pp. 19-34.

辻野哲司：接着木質パネルの曲げ剛性（第1報），木材誌，26，394～399，(1980)

Foschi, R. O. : Buckling of the Compressed Skin of a Plywood stressed-skin Panel with Longitudinal Stiffeners, F. P. L. of Canada, (1969)

杉山英男・杉沢正通・鈴木克臣：合板を接着したストレストスキンパネルの曲げ剛性とその影響因子に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，203，13～28，(1973)

安藤直人・杉山英男：合板を釘打ちしたストレスト・スキン・パネルの曲げ性状，木材誌，26，679～685 (1980)

前田典昭、沢田稔：「木質片面パネルの曲げ剛性と応力分布」、北海道大学農学部演習林研究報告、第38巻、第1号、1981

坪井善勝：「T梁に関する理論的研究」、建築学会大会論文集、第21号、1941

坪井善勝：「T梁に関する理論的研究（II）」、建築学会論文集、第26号、1942

坪井善勝：「同　（III）」、建築学会論文集、第26号、1942

Newlin, J. A. : The Design of Strength of Flat Panels with Stressed Coverings, F. P. L. Report No. R, 1220, p. 7, (1940)

Diets, A. G. : Engineering Laminates, John Wiley & Sons. Inc., 797., (1949)

Wardle, T. M. and Peek, J. D. : Plywood Stressed Skin Panels : Geometric Properties and Selected Design, TRADA, 37 pp., (1970)

Reissner, E. : Least Work Solutions of Shear Lag Problems, Journal of the Aeroneutical Sciences, 8, 7, 284～291, (1941)

Reissner, E. : Analysis of shear Lag in Box Beams by the Principle of Minimum Potential Energy, Quatery of Applied Mathematics, 4, 3, 268～278, (1946)

Timoshenko, S. and Doodier, J. N. : Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Co. Inc., 506 pp., (1951)

紐持　深・石渡喜久治・林　龍一・高柳寛司：サンドイッチパネルの強度設計，23 pp.，(1973)

Tottenham, H. : The Effective Width of Plywood Flanges in Stressed Skin Construction, The Timber Development Association Ltd., London, 20 pp., (1958)

Amana E. J. and Booth, L. G. : Theoretical and Experimental Studies on Nailed and Glued Plywood Stressed-Skin Components : PART 1. Theoretical Study (et seq.), J. Inst. Wood Science, 4, 2, 19～34, (1967)

Müller, H. : Mitwirkende Breite des Plattenbalkens. Definitionsgleichungen und Abhängigkeit von der Randquerträgerausbildung, Wiss. Zeitschr. der TH Dresden, 16, 1, 81～94, (1961)

Möhler, K., Abdel-Sayed, G. und Ehlbeck, J. : Zur Berechnung doppelschaliger, geleimter Tafelemente. Holz als Roh- u. Werkst., 21, 328～333, (1963)

Möhler, K. : Sperrholz beim Aufbau von geleimten Trägern und tragenden Tafelelementen, Holz als Roh- u. Werkst., 21. 228～234, (1963)

平嶋義彦：木質パネルの曲げに関する研究，林試研報，255，21 pp.，(1973)

5．床、屋根の鉛直力に対する性能

Foschi, Ricardo O., "Structural Analysis of Wood Floor Systems," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST7, 1982, pp. 1557-1574.

GangaRao, H., and Luttrell, L. D., "Analysis of Wood Diaphragms," In Design of Horizontal Wood Diaphragms, Proceedings of a workshop sponsored by the National Science Foundation, Applied Technology Council, Berkeley, CA, 1980.

McCutcheon, W. J., "Racking Deformations in Wood Shear Walls," Submitted for publication, Journal of the Structural Division, ASCE, 1983.

McCutcheon, W. J., "Method for Predicting the Stiffness of Wood-Joist Floor Systems with Partial Composite Action," USDA Forest Service Research Paper FPL 289, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1977, 16 p.

McCutcheon, W. J., "Deflections of Uniformly Loaded Floors: A Beam-Spring Analog," USDA Forest Service Research Paper, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1984 (in preparation).

National Association of Home Builders' Research Foundation, Inc., "Roof Truss Load Sharing," NAHB, Rockville, Md., 1975.

Nicol-Smith, C. A., "Two-Way Action in Pitched Roofs," Forest Products Journal, Vol. 27, No. 5, 1977, p. 55.

Corder, S. E., and Jordan, D. E., "Some Performance Characteristics of Wood Joist Floor Panels," Forest Products Journal, Vol. 25, No. 2, 1975, pp. 38-44.

Debonis, A. L., "Variability Simulations of Structural Wood Load-Sharing Systems," Ph.D. Dissertation, Department of Forest and Wood Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colo., 1978.

Debonis, A., "Stochastic Simulation of Wood Load-Sharing Systems," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST2, 1980, pp. 393-410.

Foschi, Ricardo O., "Analysis of Wood Diaphragms and Trusses. Part II: Truss-Plate Connection," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, No. 3, 1977, pp. 353-362.

Kloot, N. H., and Schuster, K. B., "Load Distribution on Wooden Floors Subjected to Concentrated Loads," Technical Paper No. 29, Division of Forest Products, CSIRO, Melbourne, Australia, 1963.

National Association of Home Builders' Research Institute Laboratory, "The Effect of Framing and Subfloor Attachment on the Stiffness of Residential Floors," Report LR-4, NAHB, Washington, D.C., 1961.

National Association of Home Builders' Research Foundation, Inc., "Static and Dynamic Performance of Minimum Wood Joist Floor Construction," prepared by National Association of Home Builders for National Forest Products Association, Rockville, Md., July 1970.

Norris, C. B., Erickson, W. S., and Kommers, W. J., "Flexural Rigidity of a Rectangular Strip of Sandwich Construction--Comparison Between Mathematical Analysis and Results of Tests," USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory Report 1505A, May 1952.

Pierce, C. B., "Load Sharing Between Rafters in a Traditional Timber Roof Structures," Inf. Paper 5/82, Building Research Institute, Princes Risborough, England, 1982.

Pietzker, F., Festigkeit der Schiffe, Berlin, 1914.

Pleshkov, P. F., "Teoriia Rascheta Depviannykh Sostavnnykh Sterzhnei," ("Theoretical Studies of Composite Wood Structures"), Moscow, 1952, 192 p.

Polensek, A., "Static and Dynamic Analysis of Wood-Joist Floors by the Finite Element Method," Ph.D. Dissertation, Oregon State University, Corvallis, Oreg., June 1973.

Polensek, A., "Static and Dynamic Properties of Glued Wood-Joist Floors," Forest Products Journal, Vol. 21, No. 12, December 1973, pp. 31-39.

Polensek, A., Atherton, G. H., Corder, S., and Jenkins, J. L., "Response of Nailed Wood-Joist Floors to Static Loads," Forest Products Journal, Vol. 22, No. 9, September 1972, pp. 52-61.

Russell, W. A., "Deflection Characteristics of Residential Wood-Joist Floor Systems," Housing Research Paper No. 30, Division of Housing Research, Housing and Home Finance Agency, Washington, D.C., 1954.

Schaefer, E. M., and Vanderbilt, M. D., "Comprehensive Analysis Methodology for Wood Floors," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 105, No. 5, 1983, pp. 1680-1694.

Suddarth, S. K., "A Computerized Wood Engineering System: Purdue Plane Structures Analyzer," USDA Forest Service Research Paper FPL 168, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1972, 50 p.

Suddarth, Stanley K., "The Changing Scene," In Proceedings, Wall and Floor Systems: Design and Performance of Light-Frame Structures," September 22-24, Denver, Colo., Forest Products Research Society, Madison, Wis., 1981, pp. 2-6.

Tarpy, T. S., and Thomas, D. J., "Effects of Continuity Conditions on Timber Diaphragms with Plywood Sheathing," School of Engineering, Vanderbilt University, Nashville, Tenn., 1982.

Thompson, E. G., Goodman, J. R., and Vanderbilt, M. D., "Finite Element Analysis of Layered Wood Systems," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST12, 1975, pp. 2659-2672.

Thompson, E. G., Vanderbilt, M. D., and Goodman, J. R., "FEAFLO: A Program for the Analysis of Layered Wood Systems," Computers and Structures VII, 1977, pp. 237-248.

Vanderbilt, M. D., Goodman, J. R., and Criswell, M. E., "Service and Overload Behavior of Wood Joist Floor Systems," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, No. ST1, January 1974, pp. 11-20.

Vanderbilt, M. D., Goodman, J. R., Criswell, M. E., and Bodig, J., "A Rational Analysis and Design Procedure for Wood Joist Floor Systems," final report to the National Science Foundation, Colorado State University, November 1974.

Wheat, D. L., Vanderbilt, M. D., and Goodman, J. R., "Wood Floors with Nonlinear Nail Stiffness," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 5, 1983, pp. 1290-1302.

Wheat, D. L., Vanderbilt, M. D., and Goodman, J. R., "Nonlinear Analyses of Wood-Joist Floors," Structural Research Report No. 26, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colo., 1980.

Wheat, D. L., and Moody, R. C., "Predicting the Strength of Wood-Joist Floors," USDA Forest Service Research Paper, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1984 (in preparation).

Zahn, J. J., "Strength of Multiple-Member Structures," USDA Forest Service Research Paper FPL 139, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1970, 44 p.

6．耐力壁、床、屋根の水平力に対する性能

Corda, D. N., "The In-Plane Shear Response of Timber Diaphragms," Report to the National Science Foundation, Earthquake Hazards Mitigation Program, Project No. CEE-7804769, Civil Engineering Department, West Virginia University, 1983.

American Society for Testing and Materials, "Standard Method of Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings," ASTM E 564-76, Part 18, Philadelphia, PA, 1976.

American Society for Testing and Materials, "Standard Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction," ASTM E 72-77, Philadelphia, PA, 1981.

Applied Technology Council, "Design of Horizontal Wood Diaphragms," In Proceedings of a workshop sponsored by National Science Foundation, November 19-20, 1979, Applied Technology Council, Berkeley, Calif., 1980, 301 p.

Burgess, J. H., "Derivation of the Wall Racking Formulae in TRADA's Design Guide for Timber Frame Housing," Timber Research and Development Association, England, 1976.

Carney, J. M., "Bibliography in Wood and Plywood Diaphragms," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST11, 1975, pp. 2423-2436.

Easley, J. T., Foomani, M., and Dodds, R. H., "Formulas for Wood Shear Walls," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST11, 1982, pp. 2460-2479.

Federal Housing Administration, "A Standard for Testing Sheathing Materials for Resistance to Racking," FHA Tech. Cir. No. 12, Washington, D.C., 1949.

Foschi, Ricardo O., "Analysis of Wood Diaphragms and Trusses, Part 1: Diaphragms," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, No. 3, 1977, pp. 345-352.

Hirashima, Y., Kanaya, N., Hatayama, Y., and Kamiya, F., "The Performance of Wooden Frames with Bracings for Horizontal Shearing Force and Their Structural Analysis," Journal of Japan Wood Research, Vol. 27, No. 12, 1981, pp. 845-854.

Itani, R. Y., and Cheung, C. K., "Nonlinear Analysis of Sheathed Wood Diaphragms," accepted for publication in Journal of Structural Engineering, ASCE (in press).

Itani, R. Y., Tuomi, R. L., and McCutcheon, W. J., "Methodology to Evaluate Racking Resistance of Nailed Walls," Forest Products Journal, Vol. 32, No. 1, 1982, pp. 30-36.

Itani, R. Y., "Influence of Sheathing Gaps on Wood Floor Systems," Wood and Fiber Science, Vol. 15, No. 3, July 1983, pp. 190-202.

Johnson, J. W., "Lateral Tests of a 20- by 60-foot Roof Section Sheathed with Plywood Overlaid on Decking," Report T-29, School of Forestry, Oregon State University, Corvallis, Oreg., 1971.

Kamiya, F., "Theoretical Studies on Racking Stiffness and Strength of Wooden Sheathed Walls," Transactions, Architectural Institute of Japan, No. 309, Vol. 56, No. 11, 1981, pp. 86-94.

Neisel, R. H., and Guerrera, J. F., "Racking Strength of Fiberboard Sheathing," TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Vol. 39, No. 9, September 1956, pp. 625-628.

Neisel, R. H., "Racking Strength and Lateral Nail Resistance of Fiberboard Sheathing," TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Vol. 41, No. 12, 1958, pp. 735-737.

Roberts, J. D., "Finite Elements Analysis of Horizontal Timber Diaphragms," Report to the National Science Foundation, Earthquake Hazards Mitigation Program, Project No. CEE-7804769, Civil Engineering Department, West Virginia University, 1983.

Takino, S. P., "Numerical Analysis of Stress Distribution in the Actual Size Wood Bearing Wall in Relation to the Framing Type," Wood Research (Japan), No. 64, 1978, pp. 33-48.

Timber Research and Development Association, "Calculations for the Racking Resistance of Timber Framed Walls," TRADA Wood Inf., Sec. 1, sheet 18, England, January 1980.

Tuomi, R. L., and McCutcheon, W., "Testing of a Full-Scale House Under Simulated Snowloads and Windloads," USDA Forest Service Research Paper FPL 234, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1974, 33 p.

Tuomi, R. L., and Gromala, D. S., "Racking Strength of Walls: Let-In Corner Bracing, Sheet Materials, and Effect of Loading Rate," USDA Forest Service Research Paper FPL 301, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1977, 20 p.

Tuomi, R. L., and McCutcheon, W. J., "Racking Strength of Light-Frame Nailed Walls," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST7, July 1978, pp. 1131-1140.

Walker, G. R., "Racking Strength of Sheet Clad Wall Panels," Proceedings, Diamond Jubilee Conference, Institute of Engineering, Perth, Australia, 1979, 9 p.

Welsch, G. J., "Racking Strength of Half-Inch Fiberboard Sheathing," TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Vol. 46, No. 8, August 1963, pp. 456-458.

Anderson, L. O. and Liska, J. A. : Wood Structure Performance in an Earthquake in Anchorage, Alaska. U. S. Forest Service Paper FPL 16. 12 pp., (1964)

Anderson, L. O. : Guide to Improved Framed walls for Houses. U. S. F. P. L. Report No. 31, 28 pp., (1965)

杉山英男・竹村喜次：国内産小径木を利用して構成した耐力壁が，直交する壁に接続するときの面内せん断耐力について（第1報），日本建築学会学術講演梗概集，p. 1523，(1974)

杉山英男，鈴木秀三：枠組壁工法を用いた耐力壁のせん断性状に及ぼす試験方法・シージング材・釘打ちの影響に関する実験的研究（第1報），（第2報），日本建築学会論文報告集，第232号，1～16，(1975)，第233号，39～50，(1975)

鈴木秀三・杉山英男：枠組壁工法を用いた耐力壁のせん断性状に及ぼす水平長さの影響に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1333，(1975)

杉山英男・竹村喜次：枠組壁工法を用いたシージング・インシュレーション・ファイバーボード張り耐力壁のせん断耐力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1335，(1975)

山井良三郎：木質壁パネルの強度性能，材料，20，1220～1225，(1971)

丸山　武・吉田弥明・田口　崇：枠組壁工法による合板張り耐力壁のせん断性能，林産試月報，333，17～18，(1979)

Iizuka, G. : Effect of the Sheathing Materials on the In-Plane Shear Strength of the Wood Frame. Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University, 24, (1975)

石山祐二：枠組壁工法による耐力壁の面内剪断試験の考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1331. (1975)

有馬孝禮：木質系壁パネルの鉛直加力下の水平交番加力に対する面内せん断性能の実験的研究（第1報），日本建築学会関東支部研究報告集（1976）

有馬孝禮・楡木　尭：枠組壁工法耐力壁の面内せん断耐力と釘接合の関係―耐力低減評価手法への試み―，日本建築学会関東支部研究報告集（1978）

金谷紀行・平嶋義彦・畑山嶺男：構造用合板張り耐力壁の面内せん断耐力に及ぼすくぎ打ちの影響（その1），木材工業 34，3，25～27，(1979)

神谷文夫・平嶋義彦・畑山嶺男，金谷紀行：構造用合板張り耐力壁の面内せん断耐力に及ぼすくぎ打ちの影響（その2），木材工業 34，4，20～22，(1979)

林　勝朗：木質系開口壁パネルのせん断耐力に関する研究，日本建築学会論文報告集，233，33～38，(1975)
平嶋義彦・金谷紀行・畑山嶺男・神谷文夫：既存木造住宅の耐震補強に関する研究（第2報），p. 1785，(1979)；(第4報)，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1989，(1980)
平嶋義彦：釘打面材張り耐力壁の剪断変形式の誘導，木材誌，27，141～143，(1981)
久田俊彦：木材壁体の耐力に関する研究，日本建築学会論文集，42，71～79，(1951)
Sillinger, J. R. and C. Duntryman, D.: Lateral Tests of Full-scale Plywood-sheathed Roof Diaphragms, Oregon FPL. Report No. T-5 (1953)
Tissell, J. R.: 1966 Horizontal Plywood Diaphragm Tests, APA Lab. Report 106, 48 pp., (1966)
International Conference of Building Officials: Uniform Building Code, 651 pp., (1976)
建築研究所：小規模住宅の新施工法の開発 (1976)
佐野　弘：木造床組の面内剛性と支持力配分に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1995，(1980)
飯塚五郎蔵・田中克章：木構造における水平構面のせん断耐力，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1997，(1980)
平嶋義彦・鷲海四郎：枠組壁工法住宅床組の構造耐力試験(Ⅰ)，(Ⅱ)，(Ⅲ)，木材工業，32，396～398，(1977)；32，552～554，(1977)；36，67～70，(1981)
Industrial Stapling and Nailing Technical Association: Manual No. 2-73-76, Pneumatic and Mechanically Driven Building Construction Fastners.
Western Wood Products Association: Western Woods Use Book, 316 pp., (1974)
石山祐二・大政良博・田村正男：在来軸組工法による木造住宅の耐力壁に関する実態調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1985，(1978)

7．実大建物の水平加力実験

Yokel, F. Y., Hsi, G. C. and Somes, N. F.: Full Scale Test on a Two-Story Houses Subjected to Lateral Load, Building Science Series-44 (1973)
Tuomi, R. L. and McCutchen, W. J.: Testing of a Full-Scale House under Simulated Snow-loads and Windloads, USDA Forest Service Research Paper FPL 234, 132 pp., (1974)
杉山英男・野口弘行・菊池重昭・鈴木秀三・久保田勤・竹村喜次：枠組壁工法による木造建物（TS型）の実大水平加力試験の結果について，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 477，(1973)
杉山英男・菊池重昭・野口弘行・鈴木秀三・久保田勤・竹村喜次・蜂巣　進：枠組壁工法による木造建物（HB型）の実大水平加力試験の結果について，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 473，(1973)
杉山英男・菊池重昭・野口弘行：実大建物加力試験を通して見た枠組壁工法による合板張り耐力壁のせん断耐力，日本建築学会論文報告集，第247号，11～23，(1976)
野口弘行・杉山英男：枠組壁工法建物内における層せん断力の流れについて（第1報），(第2報)，日本建築学会論文報告集，第248号，1～12，(1976)；第261号，13～24，(1977)
鈴木秀三・杉山英男・竹村喜次：枠組壁工法実大建物における耐力壁の挙動分析（第1報），(第2報)，日本建築学会論文報告集，第269号，49～60，(1978)；第271号，15～26，(1978)
佐野　弘：7×7試作住宅の構造試験，AWCOM，37，26～29，(1977)
佐野　弘・伊藤友一：間伐材を利用した試作住宅に関する実大実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1993，(1978)
平嶋義彦・神谷文夫・畑山嶺男・金谷紀行：間伐材利用実大建物の加力試験，日本建築学会関東支部研究報告集，p. 377，(1980)
平嶋義彦・神谷文夫・畑山嶺男・金谷紀行：木質パネル構造に関する研究（第2報），林試研報，315，39～65，(1981)
日本木質構造材料協会：間伐材等小径材利用住宅工法に関する調査研究報告書，263 pp.，(1977)

8．構造エレメントの圧縮・曲げ、座屈

Gromala, D. S., and Polensek, A., "Analysis and Design of Wall Systems Under Axial and Bending Loads," In Proceedings, Wall and Floor Systems: Design and Performance of Light-Frame Structures, September 22-24, Denver, Colo., Forest Products Research Society, Madison, Wis., 1981, pp. 87-100.

Polensek, A., "Strength and Stiffness of Walls with Wood and Steel Studs," Forest Products Journal, Vol. 27, No. 2, February 1977, pp. 45-53.

Polensek, A., and Atherton, G. H., "Compression-Bending Strength and Stiffness of Walls with Utility Grade Studs," Forest Products Journal, Vol. 26, No. 11, November 1976, pp. 17-25.

Polensek, A., "Finite Element Analysis of Wood-Stud Walls," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 102, No. ST7, July 1976a, pp. 1317-1335.

Polensek, A., "Rational Design Procedure for Wood-Stud Walls under Bending and Compression Loads," Wood Science, Vol. 9, No. 1, July 1976b

Polensek, A., "Properties of Components and Joints for Rational Design Procedure of Wood-Stud Walls," Wood Science, Vol. 10, No. 4, April 1978, pp. 167-175.

Southwell,R.V. 1932. Proc. Roy. Soc.,London, series A, Vol.135,p.601.

Zimmerman,H. Lehre von Knicken auf Neuer Grundlage, Berlin (1930).

Rassam,H.Y.,and J.R.Goodman. 1970. Buckling Behavior of Layered Wood Columns. Wood Sci.,2(4).

Rassam,H.Y.,and J.R. Goodman.1971. Design of Layered Wood Columns with Interlayer Slip. Wood Sci.,3(3).

Rassam,H.Y.,and J.R. Goodman.1972. Spaced Columns with Non-Rigid Connectors. Wood Sci.,4(3)

Malhotra,S.K.,and D.B.Van Dyer. 1977. Rational Approach to the Design of Built-up Timber Columns. Wood Sci.,9(4).

竹村富男、祖父江信夫、都築一雄：「わく組壁の最大圧縮荷重と壁幅との関係」、材料、28（310）、1979

林勝朗：「木質系壁式工法住宅の耐力評価法に関する研究」、北海道立寒地建築研究所調査研究報告、No. 41、1981

安藤直人、杉山英男：「曲げと圧縮を同時に受けるストレスト・スキン・パネルの強度性状」、木材学会誌、27（10）1981

9．アーチ、トラス、ラーメン構造

American Institute of Timber Construction, Design Procedure for Double-Tapered Pitched and Curved Beams, Technical Note No. 4, Englewood, CO, Sept., 1981.

American Institute of Timber Construction, Glulam Bridge Systems - Plans and Details, Englewood, CO, 1974.

American Institute of Timber Construction, Modern Timber Highway Bridges - A State-of-the-Art Report, American Institute of Timber Construction, Englewood, CO, 1973.

Blumer, H., Spannungsberechnungen An Anisotropen Kreisbogenscheiben und Satteltraegern Konstanter Dicke, Lehrstuhl fur Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universitat (TH) Karlsruhe, 1972-1979.

Bruesch, L.O., "Forest Service Timber Bridge Specification," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST12, Dec., 1982.

Committee on Wood of the Structural Division, "Bibliography on Timber Bridge Design," J. Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST1, Jan., 1975.

Csagoly, P.F. and R.J. Taylor, "A Development Program for Wood Highway Bridges," Ministry of Transportation and Communications, Report SRR-7, Canada, 1979.

Csagoly, P.F. and R.A. Dorton, "Truck Weights and Bridge Design Loads in Canada," Ontario Ministry of Transportation and Communications, presented at the AASHTO Annual Meeting, Louisville, KY, Nov., 1978.

Foschi, R.O., "Point-Matching Analysis of Curved Timber Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. ST1, 1970.

Foschi, R.O. and S.P. Fox, "Radial Stress in Curved Timber Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. ST10, 1970.

Fox, S.P., "Experimental Verification of a Stress Analysis Method for the Double-Tapered Pitched Glued-Laminated Beam," Canadian Forestry Service, Publication No. 1277, 1970.

Goodman, J.R., Z. Kovacs and J. Bodig, "Code Comparisons for Design of Wood Members Based on Factor Design Methodology," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST8, 1981.

Gopu, V.K.A. and J.R. Goodman, "Analysis of Double-Tapered Pitched and Curved Laminated Beam Section," Wood Science, Vol. 7, No. 1, July, 1974.

Gopu, V.K.A. and J.R. Goodman, "Full-Scale Tests of Tapered and Curved Glulam Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST12, December, 1975, pp. 2609-2626.

Gopu, V.K.A. and J.R. Goodman, "Design of Double-Tapered Pitched and Curved Glulam Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, No. ST10, Oct., 1977.

Gutkowski, R.M. and T.G. Williamson, "Timber Bridges: State-of-the-Art," J. Structural Division, ASCE, No. 9, Sept., 1983.

Gutkowski, R.M., J.R. Goodman and J.D. Pault, "Tests and Analysis for Composite Action in Glulam Bridges," Transportation Research Record 676 - Bridge Design, Evaluation and Repair, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 1978.

Gutkowski, R.M. and G.R. Dewey, "Research on Double-Tapered Glulam Beams," Final Report, 11th World Congress of the International Association of Bridge and Structural Engineers, Vienna, 1980.

Gutkowski, R.M., G.R. Dewey and J.R. Goodman, "Full Scale Tests on Double-Tapered Glulam Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST10, 1982.

Gutkowski, R.M., G.R. Dewey and J.R. Goodman, "Full Scale Tests on Single-Tapered Glulam Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 109, No. ST10, October 1982.

Gutkowski, R.M. and G.R. Dewey, "Design Stress Capacities of Tapered Glulam Members," approved for publication in the Journal of the Structural Division, ASCE, March 1984.

Gutkowski, R.M. and J.R. Goodman, "Analysis and Design of Laminated Timber Tudor Arches," Research Progress Report, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, June 1978.

Hale, C.Y., "Field Test of a 40 ft. Span, Two Lane Weyerhaeuser Panelized Wood Bridge," Weyerhaeuser Report No. RDR-045-1092, Tacoma, WA, May 1975.

Hale, C.Y., "Static Load Tests of Weyerhaeuser Bridge Rail Systems," Weyerhaeuser Report No. RDR 045-1609-1, April 1977.

Hurlbut, B.F., "Basic Evaluation of the Structural Adequacy of Existing Timber Bridges," Transportation Research Record 647, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 1977.

Hurlbut, B.F., "Timber Bridge Inspection Guidelines," Preprint 80-013, presented at the ASCE National Convention, Philadelphia, PA, May 1983.

Keresztesy, L.O., "Wood Shell Systems," Wood Structures, A Design Guide and Commentary, Section 10.5, ASCE, 1975.

Kechter, G. and R.M. Gutkowski, "Double-Tapered Glulam Beams - Finite Element Analysis," approved for publication in the Journal of the Structural Division, ASCE.

Knab, L.I. and R.C. Moody, "Glulam Design Criteria for Temporary Structures," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST9, Sept. 1978.

Maki, A.C. and E.W. Kuenzi, "Deflection and Stresses of Tapered Wood Beams," USDA Forest Service Research Paper FPL 34, Forest Products Laboratory, USDA, Madison, WI, Sept. 1965.

McCutcheon, W.J. and R.L. Tuomi, "Procedure for the Design of Glued-Laminated Orthotropic Bridge Decks," USDA Forest Service Research Paper FPL 210, Forest Products Laboratory, USDA, Madison, WI, 1973.

McCutcheon, W.J. and R.L. Tuomi, "Simplified Design Procedures for Glued Laminated Bridge Decks," USDA Forest Service Research Paper FPL 233, Forest Products Laboratory, USDA, Madison, WI, 1974.

Mohler, K., Karlsruher Forschungsarbeiten und Versuche im Ingenieurholzbau von 1972 bis 1977, zusammengestellt von den Mitarbeitern des Lehrstuhls fur Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universitat Karlsruhe.

Muchmore, F., "Inspection of Forest Service Timber Bridges," presented at the ASCE National Convention, Philadelphia, PA. (Submitted for publication the Journal of Structural Engineering, ASCE.)

Muchmore, F., Timber Bridge Maintenance, Rehabilitation and Replacement, U.S. Government Printing Office, No. 1983-693-015-41.

Norris, C.B., "Stresses Within Curved Laminated Beams of Douglas-fir," USDA Forest Service Paper FPL 202, Forest Products Laboratory, USDA, Madison, WI, 1963.

Nowak, A. and N.C. Lind, "Practical Bridge Code Calibration," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST12, 1979.

Nowak, A. and P.F. Csagoly, "Safety of Laminated Timer Decks," presented at the ASCE Specialty Conference, Boulder, CO, June 1981.

Personal Communication, Koppers, Co., August 1983.

Pault, J.D., "Composite Action in Glulam Timber Bridge Systems," M.S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1977.

Sanders, W.W., "Load Distribution in Glulam Timber Highway Bridges," Iowa State University Report ISU-ERI-AMES-80124, Feb. 1980.

Sanders, W.W., "Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges," NCHRP Report 83, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 1970.

Sexsmith, R.G. and S.P. Fox, "Limit States Design Concepts for Timber Engineering," Forest Products Journal, Vol. 28, No. 5, 1978.

Sprinkel, M.M., Final Report - Glulam Timber Bridge Decks, Virginia Highway and Transportation Research Council, VHTRC 79-R26, Charlottesville, VA, Nov. 1978.

Sprinkel, M.M., "Final Report - Evaluation of the Performance of a Press-Lam Timber Bridge Performance and Load Test After Five Years," Virginia Highway and Transportation Research Council, Report VHTRC 82-R56, June 1982.

Subcommittee on Wood Research - ASCE, "Important Research Needs in Wood - As a Structural Material," J. Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST10, Oct. 1979.

Taylor, R.J. and P.F. Csagoly, "Transverse Post-Tensioning of Longitudinal Laminated Timber Bridge Decks," Ministry of Transportation and Communication, Ontario, Canada.

Thompson, E.G., M.D. Vanderbilt and J.R. Goodman, "FEAFLO: A Program for the Analysis of Layered Wood Systems," Computers and Structures, Vol. 7, 1977.

Thut, W.K., "Stresses in Pitch-Cambered Glulam Beams," a thesis presented to the University of British Columbia at British Columbia, Canada, in 1970, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Verna, J.R., P.H. Sanders and J.M. Shannon, "Timber Bridge Replacement to Resist Deicing Agents," Final Report, 11th World Congress of the IABSE, Vienna, Austria, 1980.

Vincent, T.A. and V.K.A. Gopu, "Rational Design of Radial Reinforcement in Pitch-Cambered Glulam Beams," presented at the Annual Meeting of the Forest Products Research Society, New Orleans, LA, June 1982.

Weyerhaeuser Co., Weyerhaeuser Glulam Wood Bridge Systems, Tacoma, WA, 1980.

Wilson, T.R.C., "The Glued Laminated Wooden Arch," USDA Technical Bulletin, No. 691, Washington, DC, 1939.

Youngquist, J., D. Gromala, R. Jokerst, R. Moody and J. Tschernitz, "Press-Lam Timbers for Exposed Structures," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST7, July 1979.

Zahn, J., "Reliability-Based Design Procedures for Wood Structures," Forest Products Journal, Vol. 27, No. 3, March 1977.

Zahn, J.J., "Residual Stresses in Curved Laminated Wood Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST12, Dec. 1969.

武藤清、長沼重：「新形式の構造計算法」、建築雑誌、11月号、1193～1120、1938

福田重義：「輪形ヂベルに依る木材接合部の耐力実験」、建築学会論文集、4月号、230～239、1939

原田有、倉林元一：「輪形ヂベルを用ひたる木材接手に関する実験報告（其の1）」、同上、246～255、1939

長沼重：「木材の輪形ヂベル接合に関する理論的研究」、同上、240～245、1939

木子清忠、竹山謙三郎、浅野六郎、森徹、長沼重、天野一正：「新興木構造の話」、建築雑誌、5月号、671～700、1939

竹山謙三郎、建部仁彦：「張間30m構造物載荷試験及施工報告」、建築雑誌、10月号、786～793、1940

竹山謙三郎：「我国に於ける新形式木構造の現状とその検討」、建築雑誌、5月号、382～391、1942
棚橋諒、鹽原正典：「木造架構の変形に関する研究」、建築雑誌、12月号、1942
木造規準調査委員会：「木造小学校々舎骨組試験　其1－廊下の水平骨組に関する試験」、建築雑誌、12月号、1936
林業試験場集成材研究班：「集成材に関する研究（第2報）彎曲集成材の製造およびその材質試験について」、林業試験場研究報告、第109号、1958
沢田稔、山井良三郎、高見勇、近藤孝一、杉山英男：「木造組立家屋に関する研究　第2報　林野作業員宿舎（A型）の実大剛性試験」、林業試験場報告、第152号、1963
沢田稔、山井良三郎、高見勇、近藤孝一、杉山英男：「木造組立家屋に関する研究　第3報　林野作業員宿舎（B型）の実大剛性試験」、林業試験場研究報告、第158号、1963
宮島寛：「合板ガセット接着法による構造接手効率に関する研究（第2報）合板ガセット接着法による門形ラーメンならびに方づえつきラーメンの剛性および強度」、北海道大学農学部演習林研究報告、26(1)、1968
宮島寛：「合板ガセット接着法による構造接手効率に関する研究（第4報）木造山形ラーメンの剛性と強度に対するガセット効果について」、北海道大学農学部演習林研究報告、26(1)、1968

伊藤勝彦、丸山武、宮野博：「合板ガセット接着法による木造山形ラーメンの剛性と強度」、北海道立林産試験場研究報告、65号、1976

皆川保生、西河則夫、中山寛、神山文夫、法田正弘、尾形孝光、山崎敏泰：「集成材の利用に関する研究　湾曲集成木材による2階建て住宅の実大試験について」、永大産業株式会社中央研究所報告、No. 1、1975

高宮庄一、皆川保生、西河則夫、神谷文夫：「単板積層材の木構造への適用に関する研究（第3報）合板ガセットによる門形架構の実大試験」、建築学会学術講演梗概集、1977

永大産業中央研究所強度グループ：「単板積層材の木構造への適用に関する研究（第9報）ラーメン架構の実大実験」、永大社内報告、1977

10．構造信頼性

Baxter, J.W. Timber as a replaceable resource, Proceedings of Third Joint Conference of the American Society of Civil Engineers and the Institution of Civil Engineering, Institute of Civil Engineers, London, England, 1976.

Hodges, R.D., Jr. America's houses grow on trees, National Journal, Oct. 1976.

Renewable resources for industrial materials, Committee on Renewable Resources for Industrial Materials, National Research Council (CORRIM), National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1976.

Cornell, C.A. A probability-based structural code, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 66, No. 12, Dec. 1969.

Goodman, J.R., Z. Kovacs, and J. Bodig. Code comparisons of factor design for wood, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST8, Aug. 1981.

Goodman, J.R., M.D. Vanderbilt, M.E. Criswell, and J. Bodig. Probability-based design of wood transmission structures, Research Institute of Colorado, Fort Collins, Colorado, Electric Power Research Institute Research Project RP-1352-1, Final Report (Three Volumes), 1981.

American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI A58.1-1982, American National Standards Institute, 1982.

Wall and floor systems - design and performance of light-frame structures, Forest Products Research Society, Proceedings 7317, Proceedings of a Conference held September 1981.

Goodman, J.R., chairman. Important research needs in wood as a structural material, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST10, Proc. Paper 14893, Oct. 1979, pp. 2069-2089.

Galambos, T.V. and M.K. Ravindra. Load and resistance factor design criteria for steel beams, Research Report No. 27, Civil Engineering Department, Washington University, St. Louis, MO, Feb. 1976.

Ravinda, M.K. and T.V. Galambos. Load and resistance factor design for steel, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST9, Proc. Paper 14008, Sept. 1978, pp. 1337-1353.

First order reliability concepts for design codes, Committee Europeen du Beton, Bulletin d'Information No. 112, Munich, West Germany, July 1976.

Johnson, A.I. Strength, safety and economical dimensions of structures, Royal Institute of Technology, Institute of Byggnadsstatik, Meddelanden, No. 12, Stockholm, Sweden, 1953.

Steel structures for buildings-limit states design, CSA Standard S16.1, 1974.

Lind, N.C. Consistent partial safety factors. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST6, Proc. Paper 8166, June 1971, pp. 1651-1699.

Sexsmith, R.G. and S.P. Fox. Limit states design concepts for timber engineering, Forest Products Journal, Vol. 28, No. 5, 1978.

Suddarth, S.K., E.F. Woeste and W.L. Galligan. Differential reliability: probabilistic engineering applied for wood members in bending/tension, U.S. Forest Products Lab Research Paper FPL302, 1978, 16 p.

問題提起と総合討論

〔1〕建築構造学の立場から

東大工学部　坂本 功

1．建築構造における木材・木質構造

1）構造材料としての木材 ― 鋼材との比較 ―

初めに構造材料としての木材と言うものを考えてみますと、私自身は、おそらく木材よりは鉄の方が構造材料として優れていると思っています。例えば重さの割の強さで言えば木の方が優れていますが、鋼材と言うのは現在の時点で見る限りでは、強さ、ねばり、品質の安定性、また木材では非常にやっかいなクリープと言う現象が建築で使っている限りでは考える必要が無いと言った事から考えて、やはり非常に優れた材料であると思いますし、しかも段々強度の高いものが出来る様になって来ています。作られた材料の品質コントロールがうまく行くと言う事は、優れた材料の重要な条件になりますので、やはり鋼材あるいは鉄骨構造と言うものと木材がまともに競合したのでは、少なくとも日本の中ではなかなかかなわないと思います。もちろん、これは単に構造材として競争したらと言う意味ですが。私の乏しい知識ですが、日本の様に鉄骨の建物があふれている国と言うのはおそらく世界的にはほとんど無いのではないか、日本の様にいろいろな建物、例えば3階とか4階とかの事務所ビル、住宅、アパート、そう言うものを鉄骨でどんどん作っている国は他には無いのではないかと思います。それは、今は溶鉱炉が次々と火を消していますが、鉄鋼業界がこれまで膨大な生産量を誇って安い鉄を供給して来たと言う事、最近は韓国から入ってくる鉄が更に安いと言う事で、要するに木で作った構造物と比較すれば鉄で作る方が安いと言う事実が、現時点では否めないと言う事だと思います。この点は作り方その他、ケースバイケースで違うと思いますが、一般論としてはやはり鉄の方が安くて使い良いと私は思っています。そう言う意味で、この鉄と競合して木材でものを作って行くと言うためには、相当説得力のある事をやらないと駄目ではないかと思います。

それからもう一つは、極端に言えば鉄の方はある意味ではもう研究出来る様な力学的挙動は研究し尽くされている感があります。もちろん新しい骨組みで新しい接合部が開発されれば、それはそれなりにあると思いますが、常識的な範囲では大体し尽くされていると思います。それに比べれば木材あるいは木質構造の方は、例えばウェブの座屈と言う様なごく基本的な事も、少なくとも研究し尽くされているとは言えません。そう言う意味で、鉄と木それぞれで作られた構造物が仮に全く同等の構造的性能を持ち、安全性を持っているとしても、やはり木が鉄並に安全であると言う事の証明が何等かの形でなされないと、一般の人に受け入れられるわけがありませんから、単に木は優れているとか、木はかくかくしかじかで強いとか言うだけでは無理で、それを裏付けるような研究、データがちゃんとしていなくてはいけないと思います。その点、鉄骨のレベルまではなかなか行き着かないとは思いますが、もう少し基礎的な範囲でも、木で作った構造物あるいはその部位に関してはまだまだ鋼材で作ったものに対して性能の裏付けと言うのが遠く及んでいないと言えるかと思います。ですから木で作っても安全かも知れないが、何故安全性の確かめられている鉄ではなくて木を使って危険を犯すのか、強いかもしれないがまだ良く分かっていない木を使わなければいけないかと言う事で説得するためには、やはりそう言った裏付けと言うのが相当に必要ではないかと思います。

2）構造設計体系と木質構造

― 木質構造の特性と日本の自然的条件 ―

それから二番目は、構造設計体系と木質構造と言う事ですが、木造建築に対し一番拘束力があるものとしては建築基準法の施行令に書いてある様な内容の構造設計体系があります。その中にはどう言う荷重に対してどう言う設計をしなさいと言う事が基本的に書いてあって、本来それと無縁なはずですが実質的には補いあう形で、建築学会の各種の構造設計規準、構造計算規準あるいはいろいろな指針と言うものが出ています。その中に長期、短期と言う考え方がありますが、木材にとってこの長期、短期と言う二本立ての考え方がふさわしいかどうかと言う事に関しては、私も仲間に入れていただいている会合でも年中議論していると言って良いかと思います。この長期、短期の許容応力度は今は木材の場合1：2、鉄の場合は1：1．5、コンクリートの場合は1：2となっていて、木材の長期許容応力度は一応クリープで決っていると言う事になっています。それから積雪荷重を考える時の低減と言うのがあって、雪を長期として考える時には、短期と言いますか、集中的に積もった時の70％で良いと言う事になっていますが、その70％に低減して良いと言うのは、

久田先生等の研究で木材のクリープを想定して決めた様です。この７０％の積雪荷重の低減が鉄骨の方にも応用されていて、これはどうなんだと言う議論がされる事もあります。長期、短期と言うのは基本的には全体の設計体系と勿論関係がありますが、木材固有に考え得る事と言う意味ではあまり固定的に考えないで、木材は木材なりの、木構造は木構造なりの論拠があれば、この値の決め方にはフレキシビリティがあって良いと思います。ただこれが建築基準法の施行令に明記されてしまいますので、それと違う値を決めたとしても使われようがないと言う行政上の大きな問題は残ります。

それからこの構造設計体系として日本で一番大きな問題と言うのは、やはり地震の問題だと思います。これは構造設計体系と自然的条件がからみあって出て来る話ですが、ともかく日本は非常に強い水平耐力を要求されています。ご存じの様に、昭和５６年に建築基準法の施行令が改正されてそれに関連する告示が出され、それを新耐震設計法と呼んでいます。その中には幾つかの改革点がありますが、画期的な内容は一次設計、二次設計と言う二段階に分けた検討が義務づけられたと言う事があります。一次設計と言うのは従来通りの許容応力度設計、いわば弾性設計であり、二次設計の方は保有耐力、つまり弾性域をはずれて塑性域に入っても良いがそこで粘ってもたなければいけないと言う、そう言う保有耐力を検討する設計です。ただこれは対象とする構造物に依りますので、今木構造に関してはこの保有耐力の検討を要求されておりませんし、それから私が関係しております建築センターの評定委員会、普通建設大臣の３８条認定の前段になるわけですが、それに出て来る様な案件に関しましても、保有耐力の検討と言うのは他の構造物だと要求されるものが、木構造であると言う為になされないままになっています。そう言う意味では、確かに木構造は火災の方では建築基準法関係と消防法関係でがんじがらめに縛られていますが、こと構造に関しては、木構造に特に厳しいと言う事はないと私は思っています。おそらく鉄骨とか鉄筋コンクリートの方が、構造的には厳しい制約を受けていて、木構造は、今のところはデータの蓄積が無いと言う事もあって、甘やかされているとは言わないまでも黙認されている、黙認せざるを得ない状態だと言えるかと思います。それはひとえに日本のこの強い地震力に対する木構造の挙動をどうとらえるかと言うところにかかっていまして、先ほどの小松さん、神谷さんの御説明のなかにも非線形と言う話が出てまいりましたが、地震に関しては非線形であって、しかもそれを繰り返すと言う事ですので繰り返しに対する構造各部の挙動、あるいは構造全体の挙動は大変複雑です。この点に関しては、鉄骨やＲＣも単純ではなく、特にＲＣは非常に複雑ですが、それでも相当の研究がなされているのに対し、木構造に関してはほとんど皆無と言っても良いのではないかと思います。先ほどの神谷さんのＯＨＰ図の中に、私のところでやっていると言う事で、耐力壁の復元力特性の図がありましたが、その中でも最初の１回目のループに対し２回目以降は剛性が当然劣化するわけです。それから同じループで繰り返していても、だんだんループが痩せ細って来てエネルギの消費量が減って来ます。そう言った点に関する情報が無くては地震の時にどうなるかと言う事はわからないわけですが、その研究に関しては根本的にデータが欠けていると言うふうに思います。これが他のＲＣとか鉄骨の関係ですと、諸外国の実験結果も研究もたくさんありますので、そう言うところからも多くのデータが入って来ますが、木構造に関して諸外国でどの程度荷重と変形を繰り返し与えると言う事に関するデータあるいは研究があるかと言う事になりますと、どうもほとんど無い様に思いますし、先ほどの神谷さんのお話しでもその様です。そう言う意味ではこれを外国に頼る事が出来ませんので、日本の国内で、地震時の挙動、つまりは塑性域で考えた正負繰り返し加力に対する構造物あるいはそのジョイントの性能と言うものの研究が必須だと思います。と言うのも、おそらく諸外国の場合は構造設計を支配するファクターが長期の鉛直荷重と言う事になると思いますが、日本の場合は９割方短期の水平荷重、つまり地震時の水平力で構造設計が決ってしまうと言う事になりますので、この点をはっきりさせておかない事には、少なくとも鉄骨、ＲＣ並に大丈夫ですと言う説得力は出て来ないと思います。

２．日本における木質構造

１）歴史的条件

―― 木造建築の伝統と工学的扱いとの整合性 ――

今日ここにお集まりの方々はほとんど全部、木材を工学的もしくは理学的に、あるいは少なくとも近代科学技術的な意味で木材を扱うトレーニングを受けている方々だと思いますが、一方で日本には木で作られた伝統的な建物があり、それは非常に貴重な歴史的な遺産だとは思いますが、これが工学的な研究にとってはある意味で足を引っ張るきらいがある

のではないかと少し案じる事があります。例えば一つの心情的な話ですが、集成材や組み立て梁の様なものが、日本人の心情としてどの程度一般に受け入れられるかと言う事になると、そう言うふうに接着したりゴチャゴチャ組み合わせたりする位なら、鉄骨ですっきり溶接したりボルトで締めたりした方がはるかに頼りがいもあるし、良くわかっていると言うふうな事になるわけです。そう言う事を考えると、日本には幸いにして木造建築の古い伝統がありますが、それらはもともと工学にのらない形でノンエンジニアドストラクチャアとして建っているわけで、残念ながら近代的な建築構造学と言うものとは全く結び付いていないと言えるかと思います。それで木材関係の方々の研究を知らない建築の方々、それから建築の中でも建築構造の事をあまり良く知らない方々の間では、なぜ東大寺の大仏殿や法隆寺の五重の塔が昔から建っているのに、そう言うものが現在行政的に、あるいは構造屋が許さないのかと言う議論がしばしばありますが、そう言った歴史的建造物をあまりまともにそれだけ研究すると言う人はいないわけで、相変わらずクエスチョンはクエスチョンのままで残ってしまっていると言う事です。そう言うふうになまじ歴史的に優れた木造建築があるために現在も、平たく言えばアメリカ流に割り切った、構造計算をして作れば良いと言う態度に対しては反発と言うか抵抗感があると言うのが現実ではないかと思います。この点については研究してどうなると言う事ではないかと思いますが、とにかくそう言うファクターがあると言う事をお話ししておきたいと思います。

２）木質構造のおかれた立場

— 大規模木造の実績・研究の乏しさ —

日本における木質構造のおかれた立場として触れておかなければならない点に大規模木造の実績・研究の乏しさと言う事があります。戦前は新興木構造と言うので格納庫の様なかなり大きなスパンのものが設計され実際に作られておりますし、戦後になっても学校の体育館の様なものが木造で作られておりましたが、昭和３０年を過ぎた頃からは学校の体育館と言うのが全部鉄骨に代わってしまい、もちろんそれより大きいものは全部鉄骨と言う事になってしまいました。そう言う意味ではほとんどもう実績が無くなってしまって、実績が無いから新たに作る人もいない、新たに作る事が無いと研究のニーズも無いと言う悪循環を繰り返して、もう数年前迄ほとんど日本における大規模木構造と言うのは無かったと言って良いかと思います。まあかろうじて残っていたのはスリーヒンジアーチの集成材の体育館ですが、これは棟数としてはかなりストックがある様ですが、それも決して新しい研究を要すると言う様なものではなくて、それすらもほとんど鉄骨のシェアに押されてしまっていました。ところが数年前から、何の関係か木造が脚光を浴びて来て、最初に平嶋さんの話にありました様にこれは一種のブームだと私は思いますが、それにしてもそのブームにのって木造の大きな建物が幾つか建つ様になって来ています。そう言った大きな建物になりますと、これが建築基準法にひっかかるかどうかは別として、実績が全然無いものですから、いわゆる確認申請を受ける特定行政庁の窓口の方々が判断が出来ないと言う事で建設省におうかがいを立てると、然るべきところで判断を仰ぎなさいと言う事になりまして、私もメンバーになっております日本建築センターの評定委員会と言うのにかかってまいります。そこで私が担当したものの一つに、盈進学園東野高等学校と言う東京の近くの入間と言うところにある学校があります。それから今年になりまして和歌山県の竜神村と言うところに小屋組みが木造の体育館が建ちまして、これにも関係いたしました。そう言う実際の建物の申請案件、あるいは構造計算等を色々見せていただいておりますと、やはりそれ位の大きさの建物で、しかも木構造と言う今や新しいものであれば様々な検討がなされていて然るべきだと思うのですが、木構造設計規準にのっとった計算だけですませているものもある様に思います。それはひるがえって考えてみますと、それ以上細かい検討をやろうと思っても、手がかりと言うか設計方法が出来ていないと言う事だと思います。そんなわけで、先ほどの繰り返しになりますが、日本の強烈な地震力に対して弾塑性を考えた様な、直接弾塑性の計算をすると言うのではなくとも、弾塑性のファクターを考えた様な設計がなされているかと言う事になると、非常に疑問だと言いますか、その点に関しては良くわからないと言うのが現状だと思います。例えば、一次設計における設計震度、今は表現が変わって剪断力係数と言いますが、それが０．２、つまり建物の自重の２０％の力で水平に押されて大丈夫な様になっていればよろしいと言う事になっていますが、盈進学園の場合も竜神村の体育館の場合も、これを２０％の代わりに３０％の力で弾性設計をすると言う事で、一応それは委員会でオーソライズされたわけですが、それは一つの便法に過ぎないと思います。

ちょっと余談になりますが、この盈進学園の建物はアレクサンダーと言うアメリカの建築家が設計したもので、ここの理事さんが新しい学校を作るには建物の方も新しくしようと言うので建築家を色々捜したあげくにアレクサンダーと遇り会って設計を依頼したそうです。で、ちょうど２年余り前になりますが確認申請の段階で、この建物は規模が大きいと言う事もあって、法律で禁止されているわけではないが、安全上心配があるなら建築センターで技術評価と言いますか、安全であると言う事の確認をしてもらいなさいと言う事になりました。それで当時林業試験場にいらっしゃった山井先生といっしょに私が担当いたしましたが、ちょうど１回目か２回目の説明を聞いた後でこのアレクサンダーに直接会う機会があって、この盈進学園の３つの建物について模型を前にしてたどたどしい英語で議論した事があります。その時に日本の地震力が非常に強力で設計震度を０．２でやると言うのは向こうも知っていました。それで向こうの構造担当の人が日本の設計基準をひっくり返して計算しているわけですが、新耐震と言うのがあって以降、保有耐力をチェックしなければいけないが、例えばこの建物を水平に押して行った時に０．３とか０．４とか言う設計震度に相当する保有耐力がありますかと言う質問をこのアレクサンダーにしました。たぶん日本の建築屋だと、それは構造の誰々に確かめさせるので後で報告しますとなって終わってしまうはずですが、アレクサンダーはしばらく考えていて、この小さい建物については０．４でも大丈夫だがこの一番大きな体育館に関しては最終的に０．４までは持たないのではないかと言う話をしました。その判断がどう言う根拠に基づいたものかわかりませんが、少なくともいい加減な返事をしなかったと言う事で、私としてはアレクサンダーと言う建築家と非常に意気投合いたしました。

以上は全く余談ですが、この盈進学園東野高校と呼ばれる建物が日本で話題を呼びましたのも、それまでこう言う木造の建物が日本にはほとんどすたれて無かったと言う事が最大の理由だと思います。それを幸か不幸か日本の建築家が設計したのではなくて、アメリカの建築家に依頼して初めて実現したと言う意味ではある種の残念さがあると思います。もちろん日本でもその前後にある程度大きな規模の木造の建物が無いわけではありませんが、多くの人の、あるいは建築関係の人の注目を集めたものとしては、この盈進学園は非常に話題性に富んでいました。これが建物として良いかどうかと言うのは非常に評価が分かれていると聞いていますが、ともかく話題になったと言う事では一種の記念すべき建物だと思います。

３．構造性能

さて、構造性能の各論になるわけですが、結局ここのところも日本の建築構造を支配しているのが非常に強い地震力であると言う事で、最も肝心な点はこの一点に収束して来るわけです。特に木材の場合接合部が肝心なものですから、そこの挙動をいかに良くするかと言う事と、いかにそれを証明するかと言う事、その二つの点が非常に大きな問題だと思います。今、構造の種別を極端に言えばラーメン的な柱と梁がある様な架構と屋根だけ覆う様な架構とに仮に二つに分けたとしますと、屋根を覆うだけの場合は地震力よりも積雪荷重とか屋根の吹き上げとかどちらかと言えば強度だけ、あるいは弾性設計の範囲で考えるべき事が支配的だと思いますが、ラーメン的な、柱・梁的な構造を考えますと、接合部には明らかに塑性域に入る繰り返しの荷重がかかるわけです。やはりその点の研究と言うのは、おそらくこれは外国に頼っていては出来ないと思いますので、色々な接合方法に従って日本でやっていかなければいけない問題だと思います。この点に関しては、例えば鉄骨ですとこの接合部のパターンにかなりバリエーションがあると言ってもある程度限られているのに対し、木材の場合にはそれなりに限られてはいるものの、まだどれが本命かと言う事が分からない状態で、どれを一所懸命やれば良いかわからないと言う事はありますが、それは様々な接合部についてそれぞれにデータを積み重ねる事によって、どれが一番優れているかとか、どれはどう言うふうに改良すべきかと言う事が出て来ると思います。そう言う意味で、私は接合部が木構造のポイントで、接合部の正負繰り返し載荷に対する挙動と言うのが一つの重要課題だと思います。ちょっと自分の話で恐縮ですが、先ほど神谷さんがＯＨＰで示した木造の壁の復元力特性モデルを使って応答計算をするわけですが、私はもともとは振動屋だったものですから、卒業論文を書く頃から１０年ばかりは、実験や観測とともに、計算機も随分いじりました。そう言うわけで、木構造を始めた時には、極端に言えば復元力特性の仮定を適当に与えてしまえば、いくらでも計算は出来ると言う事はわかっていましたが、データ無しでやっても説得力のある応答計算は出来ないと言う事で、私はここ５年位の間は、先ほどの復元力曲

練をモデル化した大橋君と一緒に木造の壁の押し引きの実験データをせっせと蓄える事に専念して来ました。しかしそうは言っても色々な条件を変えればデータが変わってくるわけで、同じ事が接合部に関しても言えるわけです。ですから、今後木構造の様々な接合部に関して、鉄筋コンクリートとか鉄骨並の事をやろうとすると、多分ここに集まっていらっしゃる方々全員が１０年間位これだけをやっても追い付かない位だろうと思います。もちろんそれに完全に追い付くと言うか同等になる必要は無いと思いますが、まあ８割か９割位のところまでは行かないと鉄やコンクリートと同列になると言う事はなかなか難しいと思います。

こう言う雑談的な話ばかりで長くなると恐縮ですので、最後に話を結ぶにあたって二つだけお願いがあります。一つは、これは皆さんにお願いすると言うよりはむしろ建築の人にお願いしなくてはいけない事ですが、木造の建物を作るにしてもやはり建築で受け入れられる為にはデザインが良いと言う事が必須の条件ですので、単にものを作ると言う事ではなくてデザインの良いものを作ると言う努力が必要だと思います。例えば盈進学園の様なものは、アレクサンダーがやったと言う事とか、あるいはしばらく無かった大規模な建物であったと言うために話題になりましたが、きっとあれと同じ規模のものを今誰かが設計したとしても、デザインの嫌いな人は最初から無視するでしょうし、もはやそんなに話題にならないと思います。そう言う意味では木造が建築界にあるいは一般に受け入れられる為には、建築で言うデザインとして優れ、人にアピールする力を持ったものでないと、木造でもこんなんだったら鉄骨でもっとすっきりやった方が良いと言う話にきっとなってくると思います。私を含めてここにいらっしゃる大部分の方は構造屋で力学屋なものですからデザインの方にうといかも知れませんが、それでもやはり木造で建物を作る時には、例えば接合金物一つとってもそれがちょっとしたディテールできれいになったり、非常に見苦しくなったりすると言う事を頭に置いておく必要があると思います。そう言う点はやはり木の建物を流行らせる大きな条件ではないかと思います。それからもう一つですが、不幸にして日本の建築屋で木構造だけをやっていて食べていける、あるいは一つのポストを占めていられると言うような状況には現在ないと言う事があります。例えば、ごく少数の例外を除いて、設計事務所が実際問題として木構造だけでやって行くと言う事は大変難しいと思います。と言う事は、結果的にやはり建築出身の人に木構造の研究を期待すると言う事は今後ともそうは出来ないと私自身は思っています。先ほどの神谷さんの話の表題が構造体構成要素と言うふうになっていまして、建物全体の話は坂本さんやりなさいと言う事でしたが、その構造体全体としての挙動がどうなるかと言う様な話も建築屋に頼っていたのでは、単に鉄骨やＲＣと同じ様なつもりで解析をするに過ぎなくなって、木構造そのものの特性を考慮した様な研究と言うのはなかなか進まないと思います。そう言う意味で、地道な研究をなさっている方には多少無理かと言う気はしないでもありませんが、どのみちこれは木材と言う材料と建築の構造との境界領域の話ですので、そう言う境界を乗り越えて、出来れば構造体そのものまで、組み上げた建物そのものの挙動がどうかと言うところまで研究の手を広げていただくとよろしいかと思います。ともかく建築屋に期待してもそう言う事はあまりやってもらえないと思ってよろしいかと思いますので、遠慮せずに建築屋の方に乗り込んで来ていただければ、もう少し将来の展望が開けるのではないかと思います。

〔２〕設計者の立場から

伊藤邦明都市・建築研究所　伊藤邦明

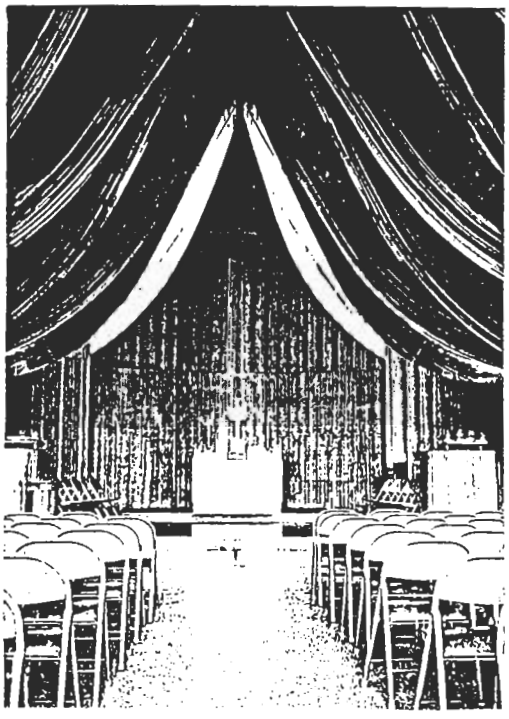
私は昭和３９年、ちょうどオリンピックの年に東大の内田研と言うところに大学院生として入りましたが、その当時から工業化とかプレハブ化とか建築界も非常に騒然とした時代になりまして、我々の様な何も知らない若造でも世の中に参加して何か出来ると言うムードのあった時代だったと思います。ですから我々も、若造でも世の中に参加出来ると言うのは大変嬉しいものですから、自分の実力も棚に上げて何か出来る様な気持ちで、色々な事をやった記憶があります。私自身はその当時、力学と言いますか構造が非常に好きでした。もちろん、ものを作る設計者として将来生きたいと言う事で建築を選んだわけですが、ものを作る以前に勉強すると言う段階になりますと、力学だの構造だの計画だの色々な学科がある中で、力学は扱う相手が力と言う一つの因子だけですから非常にわかりやすく、答えも一つしか無いと言う様な事で、それなりに一生懸命勉強した記憶があります。そのまま、おもしろいものですから段々それに踏み込んで行きますと、純粋な構造学者になってしまう可能性が出て来まして、そもそも自分が思っていた建築家として将来立つと言う事とちょっと目標が違うのではないかと言う様に感じ始めました。大学院中頃から、段々そう言う感じを持ちますと、やる事なす事いい加減になって来まして、要は自分のバランス感覚にあったものを作るのが一番良いのだと勝手な結論を持つ様になりまして、以後その勝手な結論を軸にして動いています。当時の私と坂本先生の共通の先生で松下清夫と言う先生がおられまして、その先生は非常にたくさんの設計をおやりになった構造学者でした。その当時の噂では、多分、丹下健三氏よりもはるかに大きい建物をいっぱい作っただろうと言われていた先生で、デザイン的にはとても丹下先生には及ばないかと思いますが、ともかくそう言うものを実際に作り、かつ構造学者としては第一人者だったわけです。その先生がよく大学院の連中を車に乗せまして、あちこちの自分のやっていた、あるいはその頃評判になっていた建物を見学に連れて行きました。そう言う時によく雑談で色々なおもしろい事をおっしゃっていたのですが、その中に今でも思い浮かべるのは、建築と言うのはただ立っているだけでつまらんと言う様な事を言われた事があります。車だったら走るし、飛行機だったら飛ぶのに、ただ立っているだけの建築のどこに男一匹が生涯をかける様なものがあるのか、そう言う問いを我々になさるわけです。まあその時我々は誰もうまく答えられなかったわけですが、そう言う建築に携わって、どこがおもしろいのかわかりませんが、多くの皆さんが一生懸命やっていらっしゃるわけです。しかし、なんでこんなに皆さん一生懸命やって、町中ろくでもない建物で埋められているのかと言う気が今でもしております。何でもう少し美しい町並みとか、見ていられないようなものではない建物とかが出来ないのか、これだけ皆有能な知識水準の高い方々がよってたかってやっているのに、ろくでもない感覚でこれまで来てしまっているのかと言う気がします。高い建物とか、スパンがとんだ建物とか、そう言うわかりやすいのは言ってみれば力学の一つの先端でありましょうけれども、我々人間が住んで一生幸福であったと言う様な、そう言う一生を送るためには、やはり見ていやでない、この部屋だけは良い空間だと思える様な建物が欲しいと思います。私自身は、たいして住環境の良い場所ではありませんが、自分の家だけは少ないながらもありったけの金で気に入ったものを作ったと言う経験がありますし、そう言う形で考えると一生の間に私が、１００や２００出来れば本当に良いと思いますが、一つでも良いものを作って終わりたいと思っております。

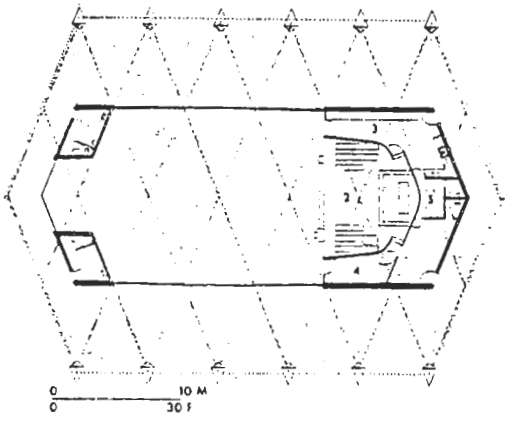
最近、木造のブームと言う事であちらこちらからこう言う話を聞くのですが、私自身は設計事務所と言う形でちょうど１２、３年前にスタートしてからは、実際問題仕事を取ると言う事が大変でして、来た仕事は断われないと言う事になりますとどうしても都内の仕事になりがちです。で、都内の仕事と言う事は、どうしても防火と言う事を考えますとコンクリートと言う事にならざるを得ないわけです。マンションは言うに及ばず、個人住宅も軒を接しているような狭い敷地で、敷地いっぱいに有効利用を考えますとどうしてもコンクリートにならざるを得ません。そう言う事で、私自身は何も問題なく、まあこれでひっそりと建築家として一生を終わればいいなと思っていたわけですが、たまたま今年の正月ちょっと過ぎ頃に住木センターと言うところから内田先生の方に、アメリカに集成材を中心とする建築視察に行ってくれないかと言う話がありまして、おまえ代わりに行かないかと言う事で、ちょっと時間をやりくりして行ったわけです。アメリカと言うのは非常に広い国で、デリカシーの無い部分が非常に多

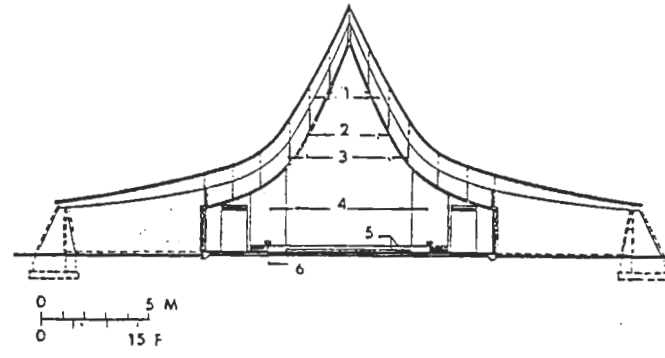
いわけですが、また一方で工業化された先端と言うのはどうしてもアメリカと言う事があるわけで、それは建築の分野におきましても現代の文明の集約された部分と言うのははっきりあるわけです。私自身はそう言う形でひょんな事からこんな高いところでお話せざるを得ない様ははめにおちいったところがあるのですが、まずそのアメリカでこんなのがあったぞと言うスライドを使ってお話したいと思います。

（中略）

以上、たまたま仕入れたスライドの中から良いものを選び出して写してみましたが、これだけの建物と言うのは一つ位日本にあっても良い様な気もするのに、一つも無いと言うのはこれはどう言う事かと非常に残念に思います。例えば、たまたま私はペェペェなものですから今までろくな仕事もやりませんでして、象徴性の高い仕事と言うのはなかなか巡って来ないわけですが、そう言う貴重な体験を与えられた人であっても、どうしてもコンクリートの箱にちょこちょこっと手を加えた様なものしか出来ないでいます。これはどうしても今の日本人の問題に帰さざるを得ないわけで、良い建築と言うのは良い社会にしか出来ないと言う説がありまして、これはかなり真理だと思うのですが、良い建築の出来ないところに良い構造技能も生まれないと言う気もいたします。まあ日本そのものがこれからどう成って行くのかと言う様な非常に大げさな話にもなりかねないのですが、いずれにせよ、先ほどのスライドの様な格好の良い様なものをやろうとするチャンスが現れた時に、さあやろうと思っても例えば構造的にデータが無いとか設計が出来ないとかそう言う事があると困るわけです。最近は消防と言うのがかなりやりだまに上がっていて、ひょっとすると木の耐火性と言うのが認められて、炭化層が断熱層になると言う様な、例えばそう言う説が法規的に整理される可能性が出て来るかも知れません。さあ、それでは大きな集成材を使って大きい空間を作ろうと言うふうになった時に、デザイン的なイメージがないとものと言うのは出来ませんでして、俺はこう言うのをやろうと言うイメージがあった時に初めてものが出来ます。それと、構造的、防火的その他の法的なものをクリアしませんとどうしても建てる事が出来ません。そう言う時代が来た時のために、データの整理とか、私が建築家の立場に立てばイメージのストックと言いますか、実際に建物が出来なくても、プロジェクトだけでも構わないから、目標を作って自分の脳みそを鍛えると言う事が非常に重要な事だと思います。今までの我々の先輩の建築家たちは皆そうやって若い頃イメージのストックを蓄えて来たわけです。少なくとも外国にあって日本に無いものが現にあるわけですから、私自身としては非常に興味を持って、この先勉強したいと思っているわけです。







番号　　：003
建築名称：サラソタのルーテル派教会
所在地　：サラソタ、U.S.A.
用途　　：教会
設計　　：Victor Lundy
出典　　：L'architecture D'aujourd'hui
　　Architectural Forum 1959 12

004　ローウェイトンのユナイティッド教会

この教会の彫刻的な屋根は螺旋状に天に昇るその採光窓によって海の貝に擬せられる。コネチカット州ロワイトンの統一教会の新しい聖域にふさわしい形態を生み出すために建築家のチームはその構造を練った。ストレススキン構造をともなった構造用集成材骨組がそのコンセプトと予算に合わせるべく構想された。その結果１９個の複雑な形状の集成材アーチ、うち１３個は１階床から立ち上がり６個は地面から立ち上がる集成材が、前半分では棟木部分で接合され後ろではスポークを持った輪の部分で接合された。この輪を包み込むような形で屋根が採光用の開口を作り出している。主たる技術的問題は建物の前の方へ自重と風荷重による変形に対するデザインであった。前に方のアーチは水平面に対して、いろいろな角度で傾いており、これによる水平変位があったし、後ろから吹く風はこれに加える形で水平変位を引き起こす。この力は膜面と棟木によって解決されなければならなかった。

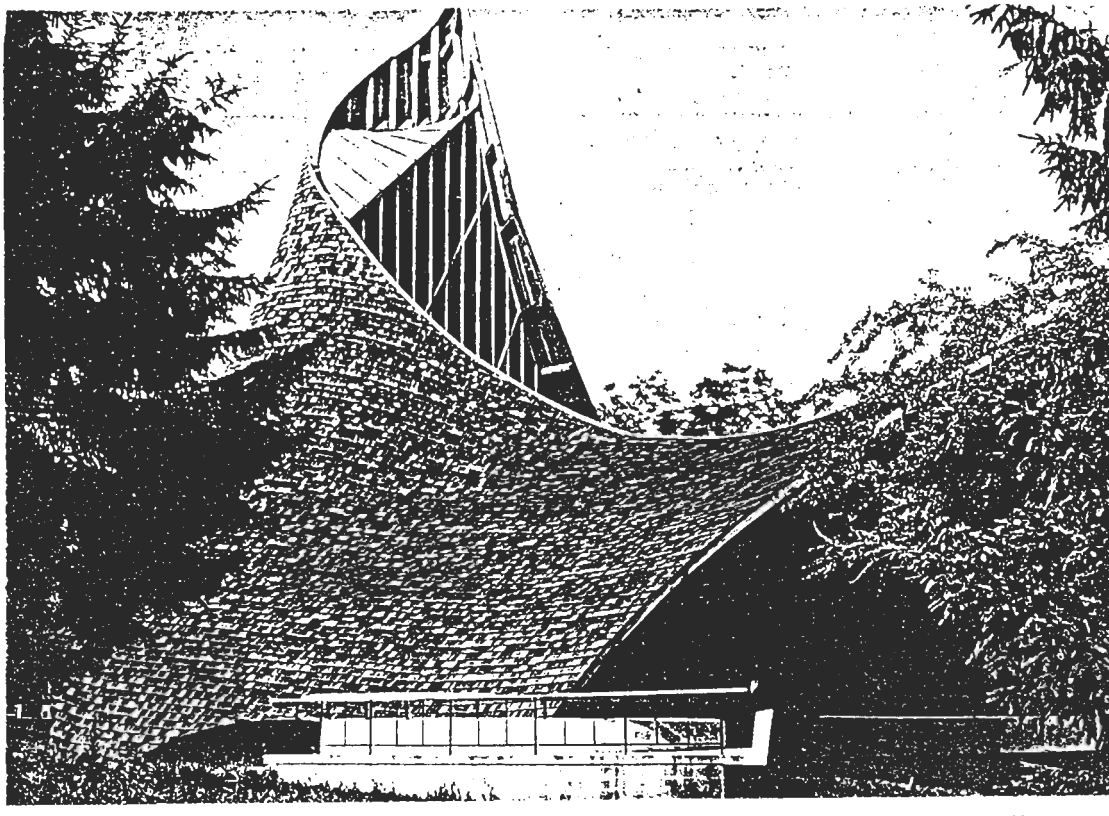
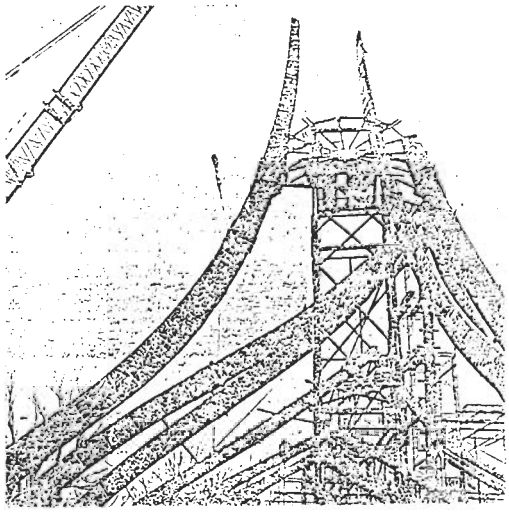
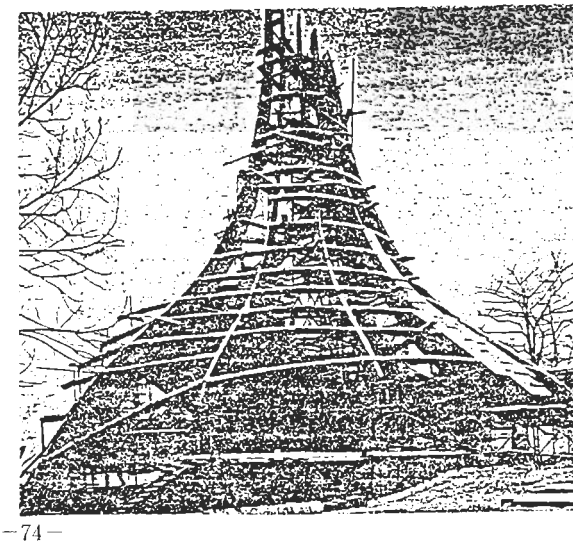
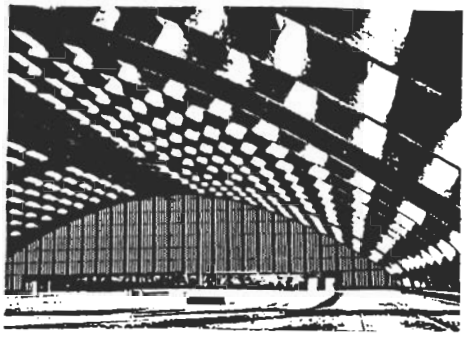
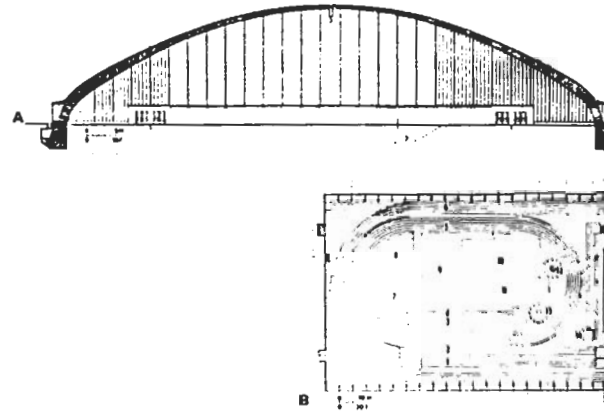


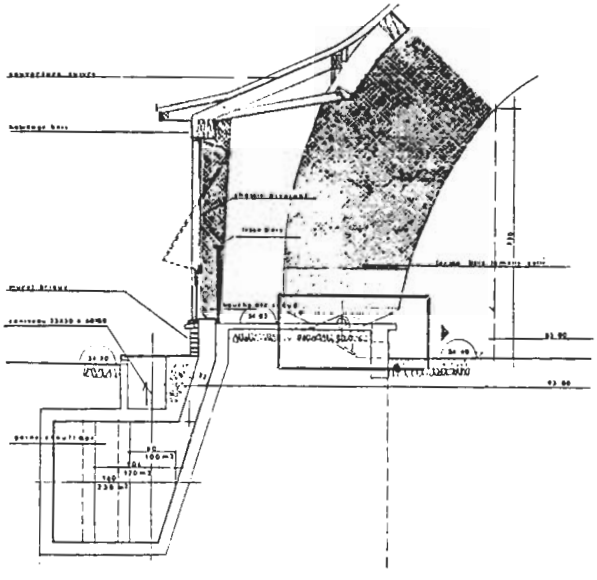
photo :　Hiroshi Misawa

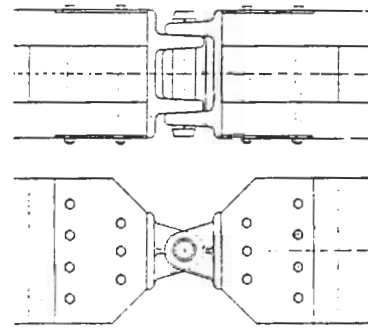


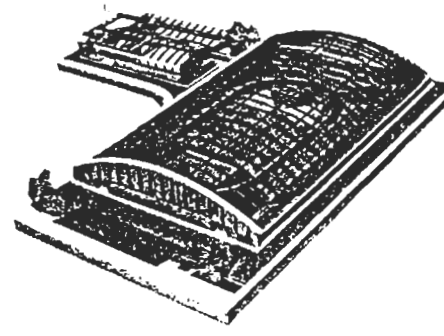








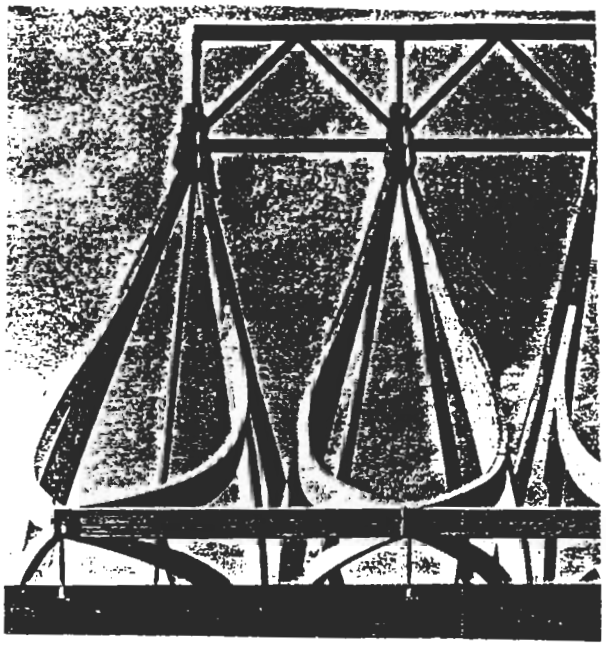


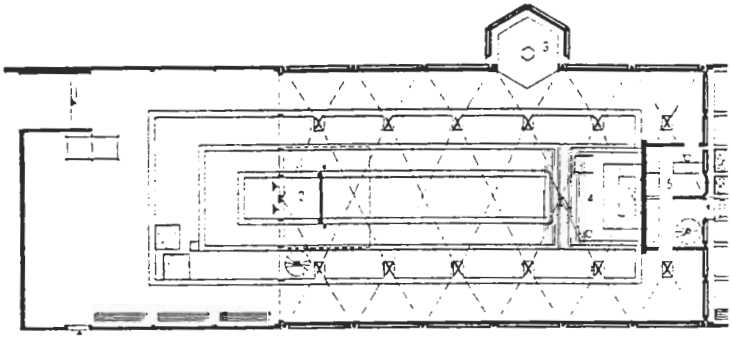


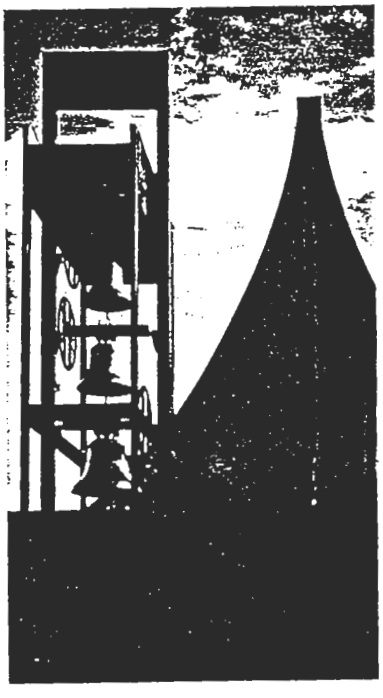
番号　　：010
建築名称：ヴァンセヌ　Ｉ．Ｎ．Ｓ体育館
年号　　：1964
所在地　：フランス
用途　　：屋内競技場
設計　　：Georges Bovet
構造設計：Serge Ketoff
集成材　：Weisrock
出典　　：Holzbau Atlas
　　L'achitecture d'aujourd'hui 1964 No.116
　　La charpente

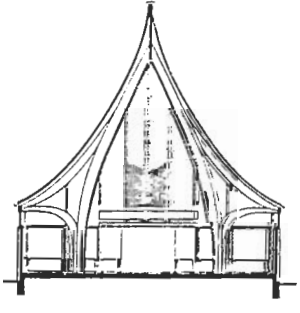
011　アルテネルディンクの教会

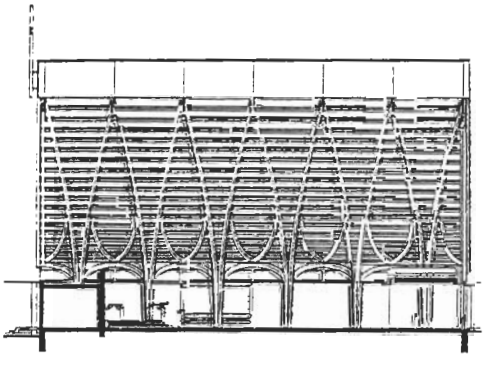
交差する６本のアーチが屋根をささえている。石綿セメント板で覆われた屋根は換気のために二重屋根となっている。空気取り出し口は棟につけられている。内装は木の表面を持つ100×430cmのプレファブパネルである。プレファブ化された部品を組み立てるだけなので、この教会では仮設足場は必要とされなっかた。アーチを組み上げるために遺所に３×３ｍの移動足場を用いるだけであった。アーチの半分はどれも４つの独立した集成材からなっている。その脚部は鉄骨に緊結されている。

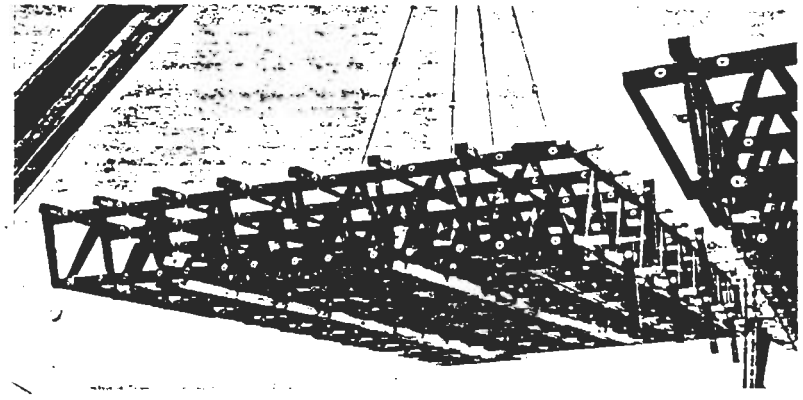


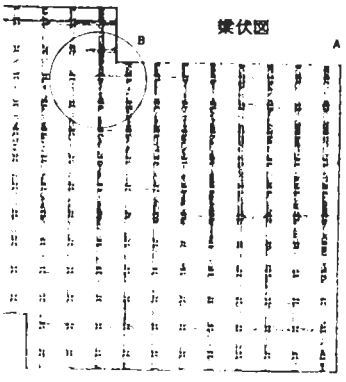


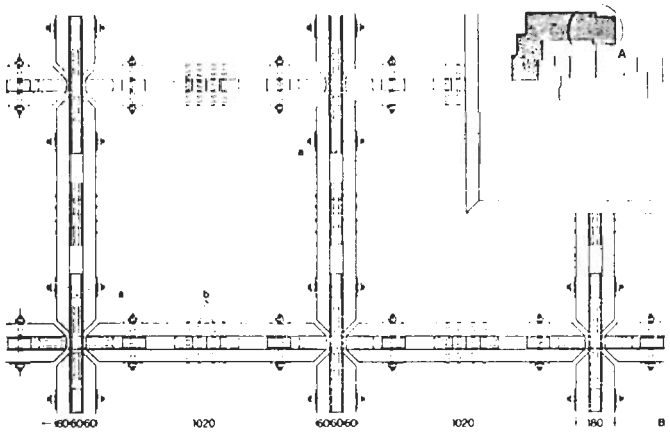


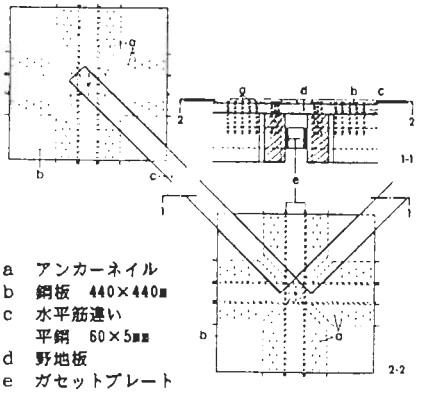


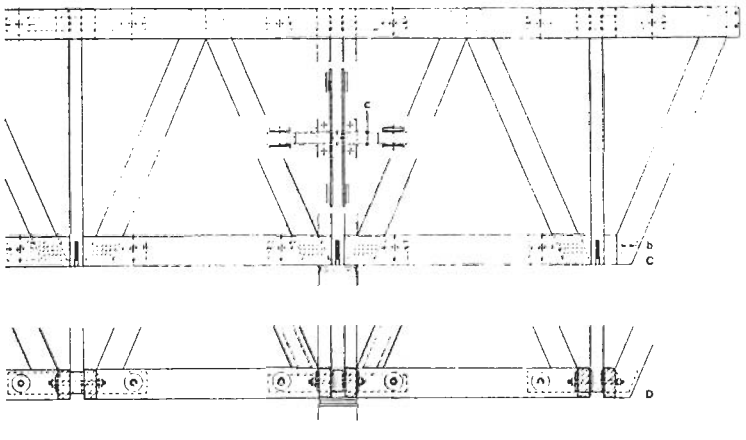


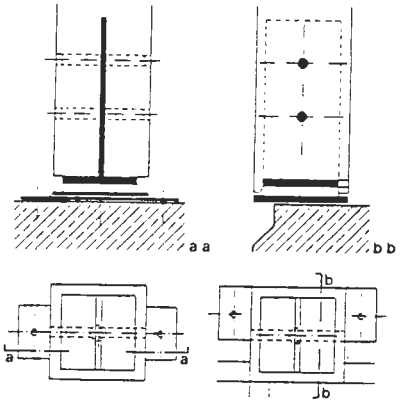








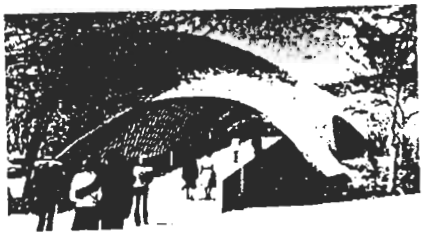


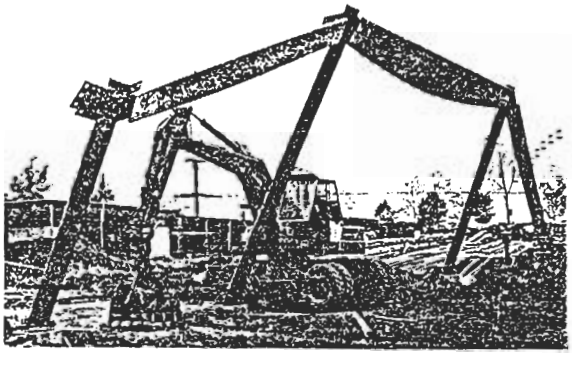


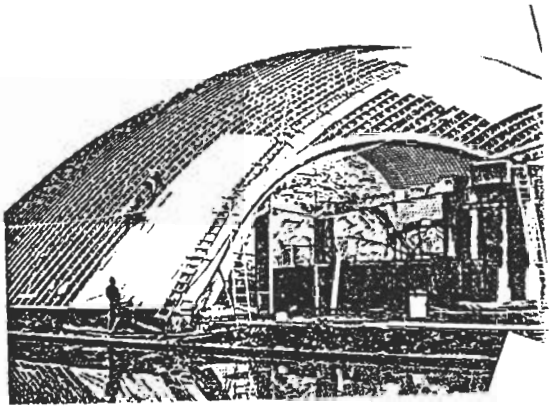
番号　　：021
建築名称：バイヘンステファンの大学講義棟
年号　　：1973
所在地　：Weihenstephan
用途　　：建築学科講義棟
設計　　：Universitaets bauamt（大学施設部）
構造設計：J. Natterer und K. Maerz
出典　　：Informationsdienst Holz ドイツ C.M.A.
Detail 4/1974
Horzbau Atlas

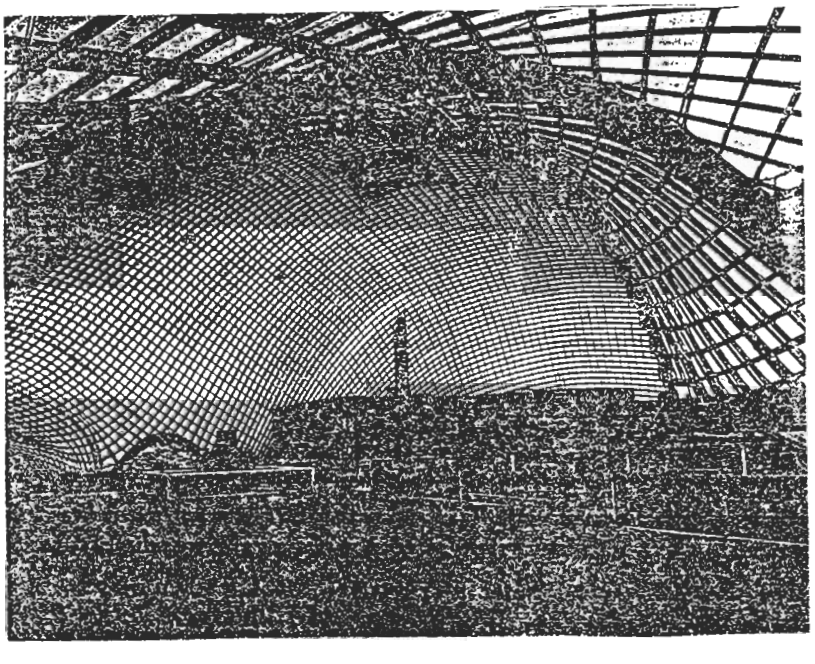
022　マンハイムの多目的ホール

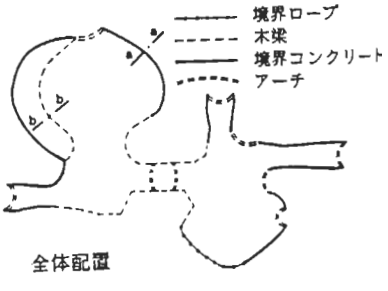
機能：透光性のある、様々な行動領域に対し空間的に適応性のある気候制御（装置）
構造：直角の状態で規則的な目の間隔を持つカナダのヘルモックパインの湾曲ビーム。スパンにより格子は一重か二重に造られている。屋根膜はＰＶＣ層のあるポリエステル膜。
規模：７４００平方メートルの面積をおおう。最大スパン８５メートル、最大長さ２０メートル。



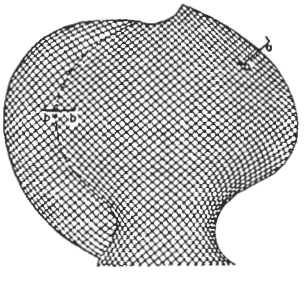


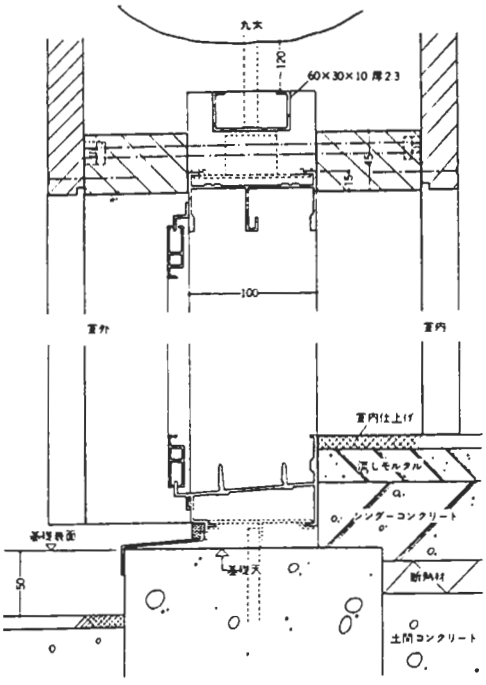




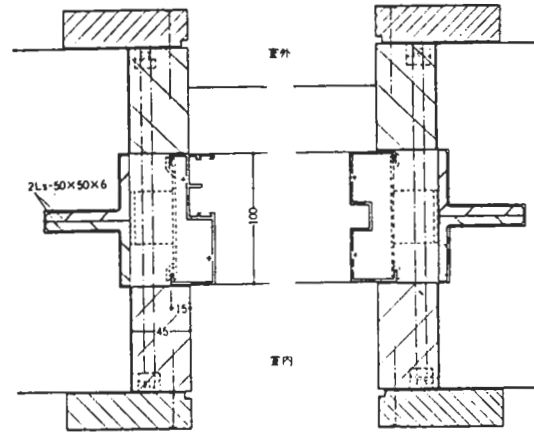


全体配置

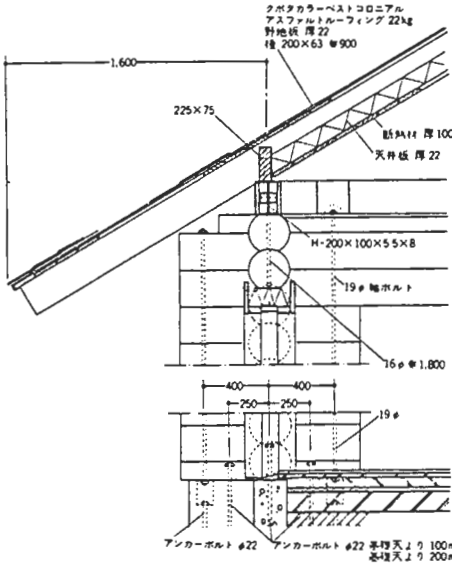


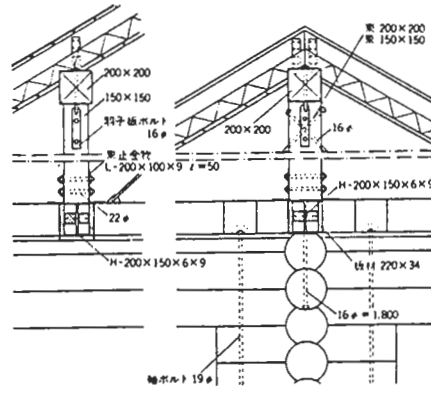


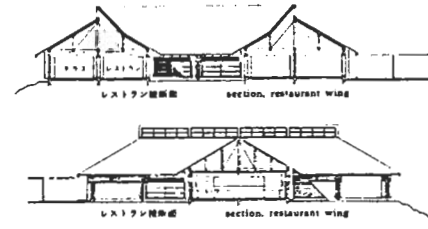
窓まわり部分水平断面詳細

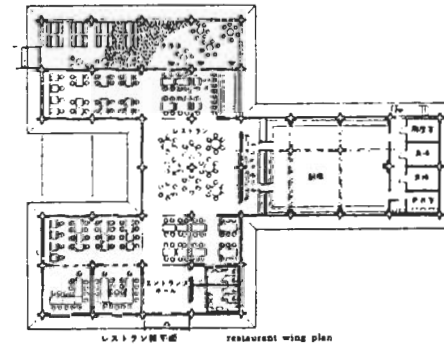


窓まわり部分垂直断面詳細





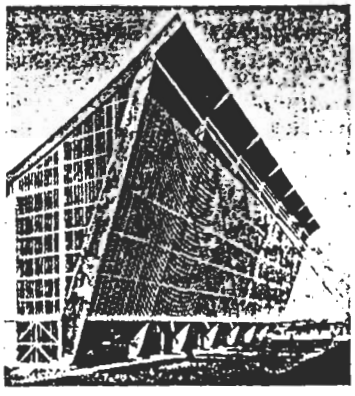


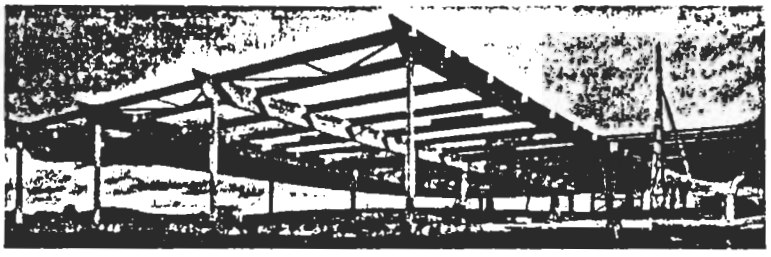


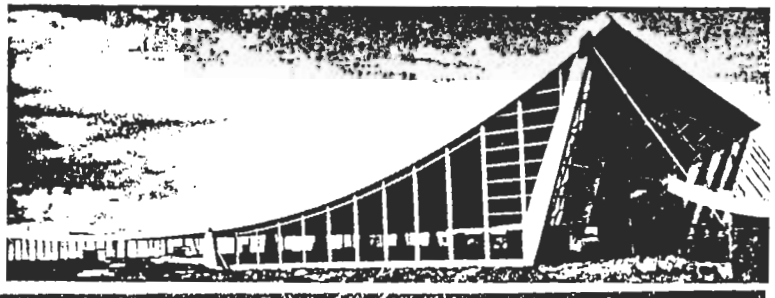
番号　　：027
年号　　：1976.6
建築名称：北海道カントリークラブクラブハウス
所在地　：北海道亀田郡七飯町西大沼
用途　　：クラブハウス
設計　　：ヘイッキ・シレン
構造設計：エリック・ユバ、飯塚五郎蔵
出典　　：建築文化 1/1977

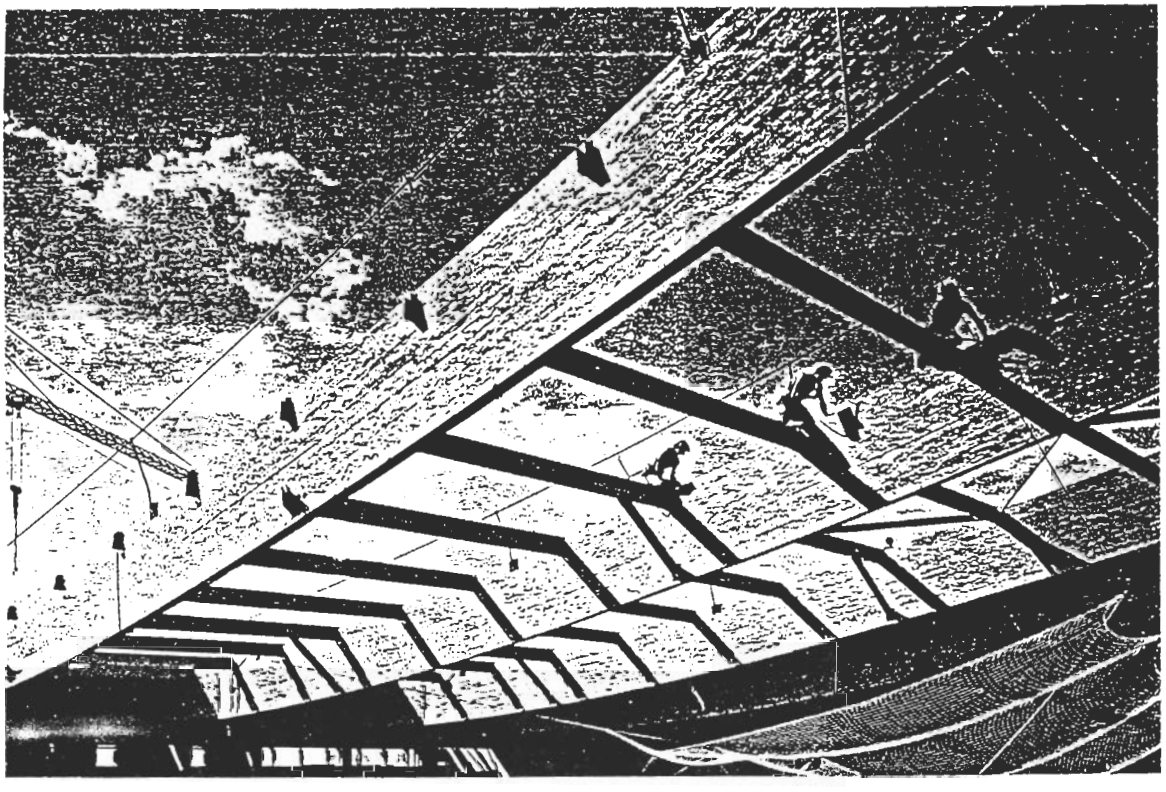
028　アレンコンの博覧会会場

投影面積は７０ｍ×１０７ｍ。懸垂屋根は最も低い所で高さ５ｍ、高い所で１８、８５ｍである。妻壁は、殆ど窓になており、自然光が取り入れられる。８本の懸垂梁は１０ｍの間隔で配置され、その断面は１６×８０ｃｍから１６×１０６ｃｍの間で変化している。屋根は最下点で二つのフィールドを通過している。梁の懸垂部分、約５０ｍのスパンで垂直荷重は引張力に変換されている。片側の水平荷重により曲げモーメントが生じている。水平引張力はコンクリートプレートとアンカーケーブルに分配されている。１１、３×４０、５ｃｍの母屋はアングルで梁に接合されている。屋根の懸垂部分で母屋は曲げモーメントを低減するために丸鋼φ１４～２２ｃｍよってＹ字状に大梁と接合されている。屋根の水平面にはＫブレースが入れられている。風力はコンクリートの柱と支柱間のＫブレースによって基礎に伝えられる。



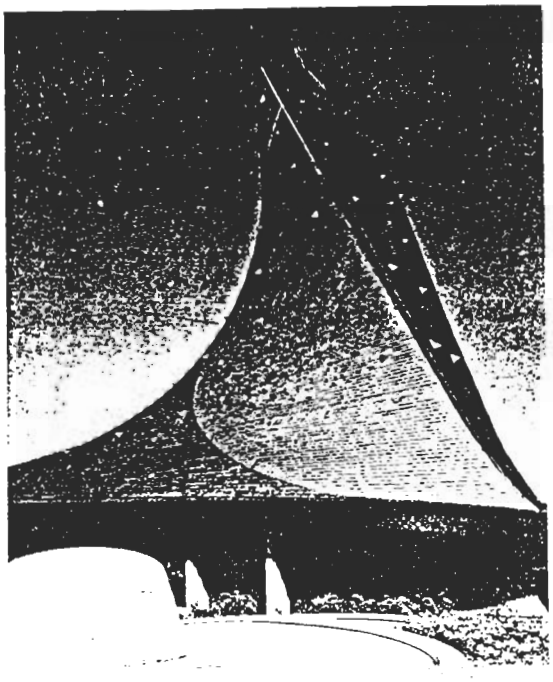


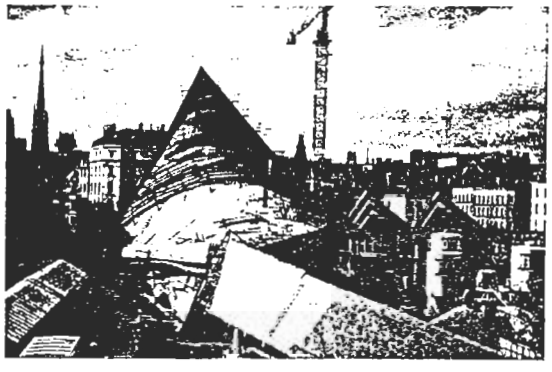


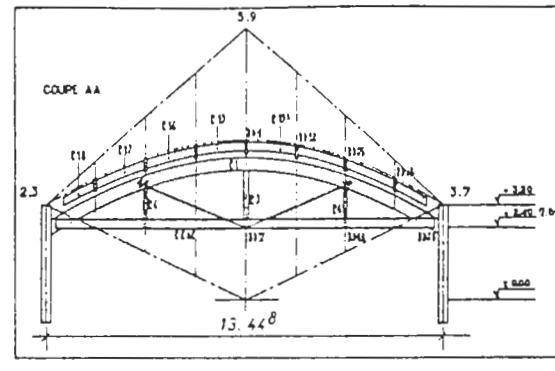


034　ルーアンの教会

ルーアン市の中心部に旧市街地に接して、古い市場を壊して新鮮な構造物が姿を現した。この市場と教会はジャンヌダルク記念館に接しており、これら３つを通して調和のあるボリュムこうせいを実現する構造原理がプランニングの初期のころから考えられた。一方で各建物はそれ自身の機能を表現しており、その屋根構造が新しい建物のシルエットをつくりだしている。市場と教会は集成材によって造られたＨＰシェル屋根によって被われている。市場の屋根は相互に接合された数枚のシェルによってかたちつくられており、屋根に設けられた可動窓により採光と換気が可能となっており、カーヴした構造用集成材がこれに固定されている。教会の床面積は６２０㎡、平均スパンは２７ｍ市場の床面積は１１００㎡、屋根面のスパンは１１から１４ｍ。

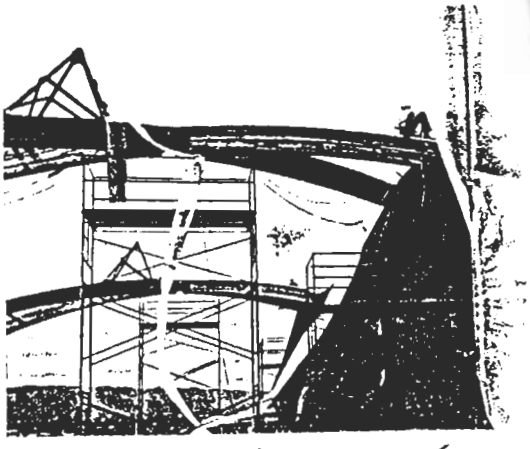






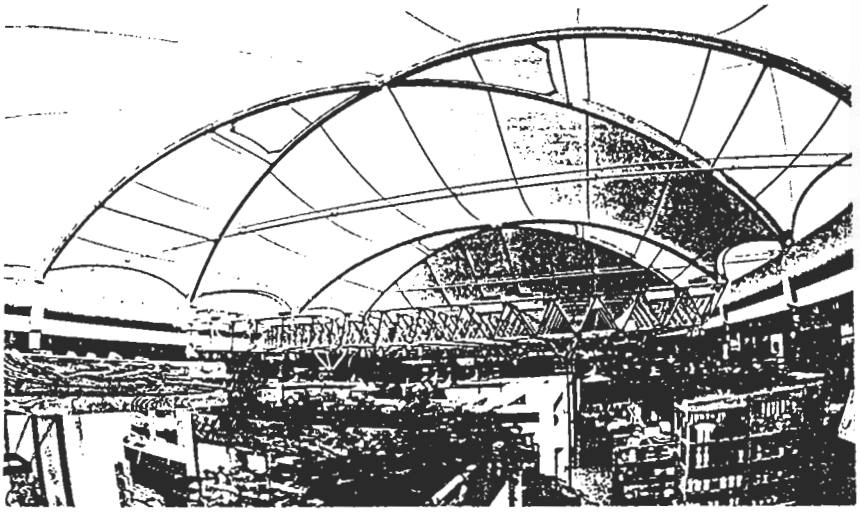
番号　　：034
建築名称：ルーアンの教会
年号　　：1979
所在地　：ルーアン Rouen 、フランス　France
用途　　：教会
設計　　：Atelier Arretche
構造設計：Uhalde Bernier
出典　　：FUNKTION + FORM

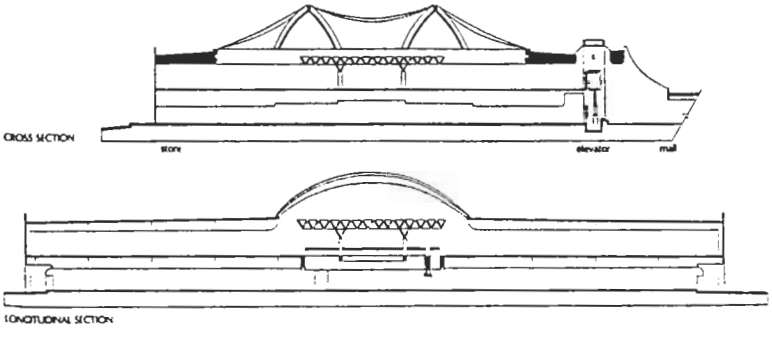
035　オークリッジのデパート売り場

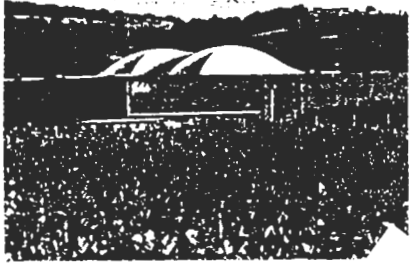


この建築は次のような３つのガイドラインに基づいて設計された。先ず、屋内商業施設としての機能を持つこと。次ぎに、省エネルギーの新しい方法を見いだすこと。そして最後に大規模な施設に合った全く新しいショッピング環境のプロトタイプとなること。設計初期の段階では天幕を支える方法として幾つかの案が考えられたが、イニシャルコストの点などから交差アーチの上に天幕をかぶせる方法が採用された。この方式の利点は交差アーチ自身が安定した構造であること、天幕をかぶせるだけで特に固定する必要がないこと、ワイヤーケーブルがほとんど必要がないことである。

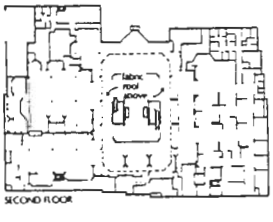
天幕は省エネルギー、防音、耐火を考えて二重構造。集成材アーチは高さ２２フィート、スパン９６フィートで３２フィート間隔。天幕は１８０００sq.ft.の１枚もの。手動ウィンチで引き上げた。アーチの上端にはこすれによる摩耗を防ぐため天幕と同材料のストリップをはってある。





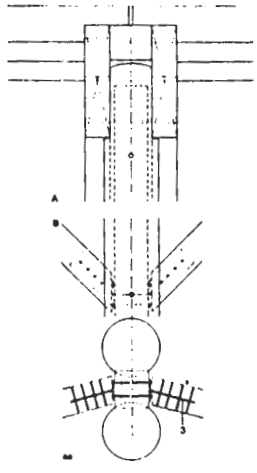


番号　　：035
建築名称：Bullock's Oakridge
年号　　：1979
所在地　：San Jose, Carifornia
用途　　：デパートの売り場
設計　　：Environmental Planning & Reserch,Inc.,
構造設計：Geiger Berger Associates,P.C.
出典　　：Architectural Record 1979-Mid Augast



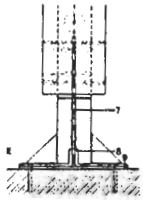
A　たるきの配置
B　合わせ梁
C　換気用ボンネット

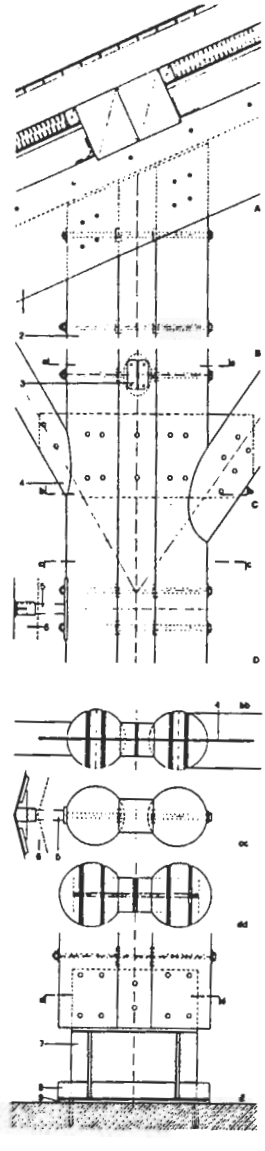
1　丸鋼　φ100mm
2　IPE500
3　鋼管　角220/120/10mm
4　鋼管　φ82.5/10mm
5　鋼管　φ139.7/28mm
6　平鋼　370/60/8mm
7　たるき
8　添えたるき
9　屋根換気のためのたるき
10　合わせ梁

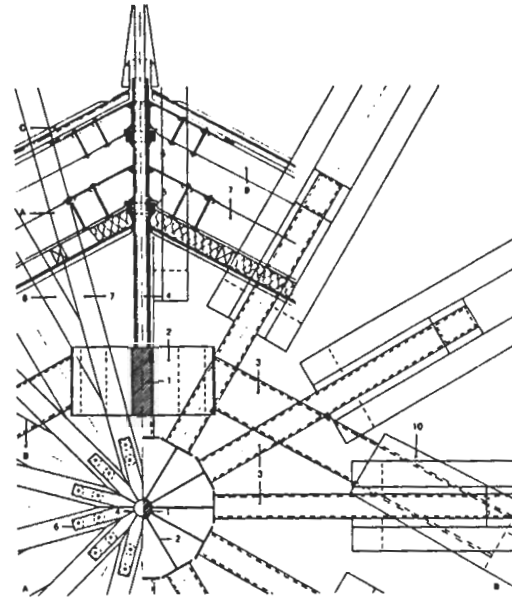


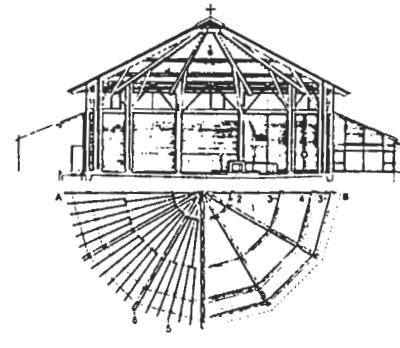
柱のディテール

A　柱と梁の接合
B　方杖の接合
C　内側の方杖
　と外側の方杖
D　柱と壁の接合
E　柱脚
1　小屋組み：
2　柱、ペアコラム
　2×φ26-30cm
3　平鋼　310/100/8mm
4　鋼板　1020/405/10mm
5　パイプ　φ48.3/5mm
6　組積造
7　鋼板　650//600/15mm
8　アングル
　250/90/10mm
9　プレート
　515/720/10mm









断面

屋根伏図
A　たるき
B　母屋

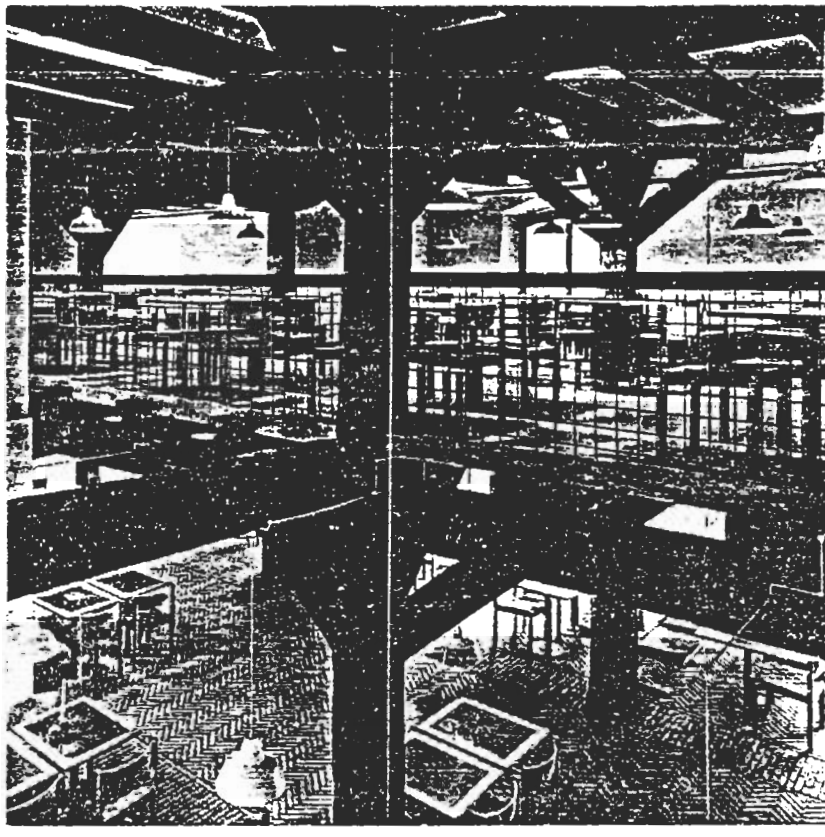
1　合わせ梁
　2×12/30-55cm
　@20cm
2　母屋　18/28cm
3　母屋　22/28cm
4　母屋　2×22/28cm
5　たるき　10/16cm
6　添えたるき　10/16cm

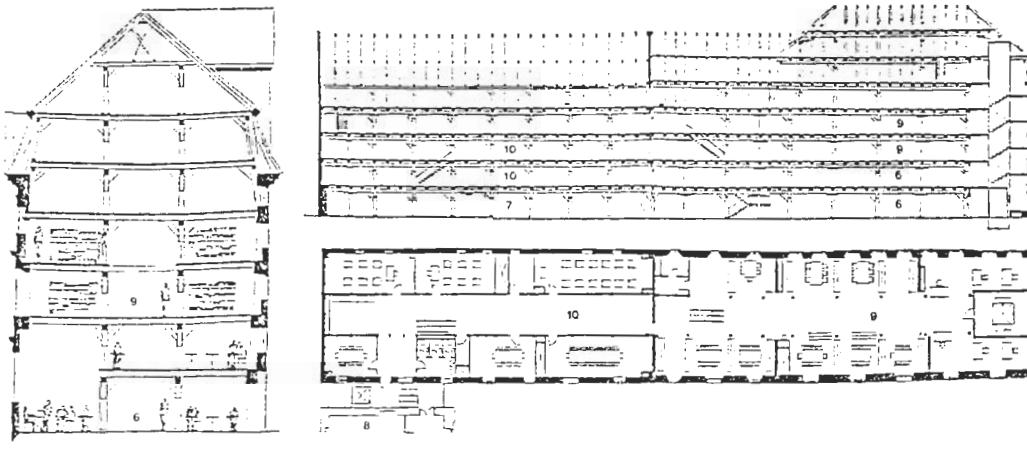
西立面図

番号　：069
建築名称：ミュンヘンの聖イグナチウス教会
所在地　：Muenchen
用途　：教会
設計　：Josef Wiedemann
構造設計：Christos Michael
出典　：DETAIL 1/1983

070　デンマーク外務省図書館

１７８１年建設のこの建物をデンマーク外務省が買い取ったとき、損傷は殆どなっかた。天井高を十分取る為に梁を取り去ったり、新しい床を作ったりといった改造が現代的なデザインで行われた。





番号　：070
建築名称：デンマーク外務省図書館
用途　：図書館
設計　：Erik Mollers Tegnestuo
備考　：改修
出典　：Arkitectur DK 1983/02

〔３〕総合討論概要

１．材料

（司会）　建築基準法施行令で材料強度は規定されているが、それを保証するための材料のグレーディングルールには触れられていない。これに対する現実的な対応法を考えて行く必要があると思うが。

（林試　中井）　施行令８９条の強度値を保証するオーソライズされた規格はＪＡＳであり、それを決めるについてはその時点その時点で集め得るデータを用いて検討が成されてきたと理解している。しかし、現在の施行令８９条の許容応力度誘導体系の基本的な考え方は無欠点小試験体の強度を基準とすると言う古い考え方に依存している。現在は実大材の強度を統計的処理によって、特に５％下限値に注目しながら整理蓄積しつつあるが、その場合現行の各等級の強度分布にはかなりのオーバーラップがあるので、この点をどう考えて行くかも今後の検討課題の一つだと思う。いずれにせよ、強度評価基準値として５％下限値を用いるのが世界的な趨勢でもある様なのでこの数値を保証するためのデータ蓄積を進めて行くのが材料強度関係に携わる者の責務だと考えている。それから、材料強度が長期許容応力度の３倍となっているが、この数値が妥当であるかどうかを判断し、適正な対応をするために、是非学会レベルで学問的な検討を加えて欲しい。また、現在曲げの許容応力度と引張の許容応力度がイコールで結ばれているが、これは無欠点小試験体の結果を見ると安全側だと言う説明もされ理解も出来るが、フルサイズの引張試験では決してそうならず、海外各国、例えばアメリカの様に（引張が曲げの）０．５５とか０．６程度と考える方が妥当な様である。このあたりは是非今度の木構造設計規準等で新しいデータに基づいて直して行きたいと考えている。それと、グレーディングマシンについてだが、わが国でエンジニアードティンバーコンストラクションが大規模に発展するためには、目視よりも機械を通した信頼度の高い製材品を林業、林産業サイドが供給して行く事が必要だと思う。そのためには中小の製材業者が現実に導入し得る様な安価なグレーディングマシンの開発が望まれる。これについては、細かいグレーディング手法を要求しなければこれまでに蓄積して来た曲げヤング係数と曲げ強さの関係その他を用いて十分対応が可能だと考える。また、等級と許容応力度との関係については、すでに目視によって振り分けられた各等級に対する強度下限値を求めるだけではなく、グレーディングルールが変わっても使えるような普遍的な強度データの蓄積が重要である。

（司会）　ビジュアルグレーディング、メカニカルグレーディングどちらに焦点を合わせるべきか、またどの様に組み合わせ関係づけて行くのか、いずれにせよ、材料強度評価の問題は最も基本であろう。また、この様な評価法の問題とは別に、造林木が増加するにつれ市場に出回る木材の材質そのものも時代とともに変化しつつある。このような材質そのものの振れにどの様な手法で対応して行くべきか。

（富山木試　飯島）　構造設計する立場から見ると、木材をどの位のグレードに分けておくのが便利か。

（遠山一級建築士事務所　鈴木）　最終的な部材断面設計は状況に応じて変わるが、信頼出来るグレーディングが成されているならどの様なものであれ使い得ると思う。グレードの数については、実際上４とか５とか言った程度であろうか。また樹種区分だけではなく産地別の指標なども整理されると好都合である。この点も含め、重要なのは数よりもグレーディングの信頼度であると思う。それと、市場に供給されて来る木材の材質に時代的、地域的な変動があるとするなら、現行のように許容応力度が法的に定められていると言った様な固定的な制度ではなく、状況の変化に応じてもっと柔軟に対応出来る様な体制になっている方が望ましいのではないだろうか。

（林試　中井）　グレードの数は諸外国の現状、我が国の木材利用状況から見て３段階程度あれば良いのではないか。むしろ問題は、現在各樹種群の強度評価の基準が無欠点材の強度である事で、林産サイドとしては、出来るだけ早く実大材試験データを集積して行く事が肝要であると思う。それから、人工造林木等の材質に関しては、供給者サイドで積極的にチェックし、場合によってはブルーフローディングシステムを導入する事を考えても良いかも知れない。もちろんそれだけの需要があるかどうかが問題だが、研究者サイドとしてはいつでもその様な要求に応じられるだけのデータ蓄積が必要であろう。

（富山木試　飯島）　実際に建物を設計してみると、弱い材料でもそれなりの使い方が出来ると言う部分がある。我々の所でも地元産の低質材を使って構造物試作試験等を行っているが、基礎材質さえきちんとおさえておけば、設計は可能であるし、出来上がった構造物の破壊試験あるいは剛性試験を行ってみると、それなりに予測した値を満たしている。この点から言うと、もっと悪い材料、グレードの低い材料に対しても許容応力度が与えられて良いのではな

いか。それから、材料性能評価に関して見逃せないのは材せい効果の問題と水分の問題だと思う。特に含水率の問題は、許容応力度に関する議論にはなかなか明確な形では現れて来ないが、例えば木材がまだ生乾きの状態の建築物に積雪荷重が加わる時のクリープと言った様な実際的な問題がかなりあるので、検討しておく必要があると思う。

（司会）　材料強度評価にあたって５％下限値に着目する事の意味は何か。この点は構造信頼性解析とも密接に関係して来ると思うが。

（林試　神谷）　構造信頼性解析の概要は構造体構成要素のＡｐｐｅｎｄｉｘ－１を参照いただきたいが、５％下限値については、それだけではなく、強度分布のバラツキがどの位あるかを同時に考えておく必要がある。５％下限値が同じでも分布形状がシャープな程破壊確率は低くなる。

（司会）　我が国の許容応力度誘導体系では、長期と短期が１：２の比率になっているが、諸外国では一般にマジソンカーブと言われる連続的な曲線を使っている。こう言った問題を含めて、許容応力度体系をもう一度全般的に見直す必要があろう。

２．集成材

（司会）　現在、集成材に関する規格の改正について農林水産省の方で検討している様だがどう言う情勢にあるか。

（林試　藤井）　集成材も製材と同じ様にドラスティックな規格の改正は行いにくい事情があり、一足飛びに満足のいく様な形にはなかなかならないと思うが、主な改正点としては以下の点があげられる。今まで針葉樹の樹種区分が４種あってそれぞれ１級と２級に分かれていた。現実的には建設省告示にある１級相当が使用可で、一部枠組壁工法用に限って２級が使えると言った状態にあり、この２級に対しては製材と同じ許容応力度が与えられていた。今回の改正では１級の許容応力度は従来どうり製材の１．５倍だが、２級に対しては１．１２５倍とした。更に特に材料、ジョイントを選んで製造した高品質のものについては１級に上乗せして特級と言うグレードを作った。もちろん許容応力度自体は建設省の所管なので、農林水産省サイドとしては建設省がそれを検討出来る様な材料供給側の規格を作ったと言う事である。ただし、集成材の場合には断面がかなり大きく、一般的には製品段階で実大試験その他による強度評価を行うこ事が難しいので、ラミナの段階で強度を保証すると言う骨組みになっている。そこでラミナのストレスグレーディングなりプルーフローディングなりが望まれるわけだが、現状では確立された方法がなく、強度保証の方法を規定する事が出来ないので、ラミナのヤング係数や継手の効率について具体的な基準値を示して規制する様な方式になっている。

（司会）　集成材を使って大規模な構造物を作る場合に、その構造物全体の安全性を評価する上で、ラミナの品質管理だけではなく、出来上がった集成材の強度分布を知る事も重要である。しかし製材と違い大断面集成材の強度分布を実験的に求める事は、経費の面からも労力の面からも確かに難しいであろう。そうなると、例えばモンテカルロシミュレーションの様な統計的な手法によってラミナの強度分布から集成材の強度分布を推定する方法を確立するなどと言った事も必要になって来るものと思うが。

（東大農　中村）　その種の統計的なアプローチは方法としては有効だと思うが、我が国の現状ではラミナのヤング係数からの各種強度値の推定方法や、ラミナ自体の強度分布の的確な把握法に関して多くの課題がある。

３．接合

（司会）　構造物の規模や設計荷重その他の条件に応じてどの様な接合法を選択して行けば良いか、また将来の可能性としてどの様な接合法に期待がかけられるか。

（清水建設　杉崎）　現在は金物を使った接合法ばかりに目が向いている様なので、日本の伝統工法である金物を使わない接合工法を是非研究してみたいと思っている。これからの木造建築を考えると、木材を使った構造物でありながら、例えば金物が錆びるといった様な木材自身の欠点ではない要素が構造物全体の性能を下げてしまうのではないかと言う危惧を持つ。この点から言うと木だけを使った接合法の研究がもっと進められても良いのではないかと思う。幸い日本には古い時代から木造の大きな建築物が作られてきた伝統がある。これらの木造建築物は確かに芸術的には評価されているが、これを構造的な視点からもう一度とらえ直す事によって今の時代に生かし、更に今の進んだ技術によってより良いものとして実現させて行く事が出来るのではないか。

（司会）　金物を使わない接合法を取り入れて行く事の現実的な可能性はどうか。また実際に木材だけを使って構造物を作った場合、その構造安全性を現在の技術レベルでうまく評価できるものなのかどう

か。
（東大工　坂本）　金物を使わないで木だけで接合して行くと言う考え方は十分有り得ると思う。ただ、現状ではその様な接合部の強度評価基準がなく力学的に根拠のある構造計算が出来ないために、例え実際には要求される強度性能を満たしていても、構造設計としては認められないと言う場合がある。是非このあたりの筋道だった研究を期待したい。これに関連してだが、外国の大規模な（構造計算を要する）木構造で、木材だけによる接合法を使っている事例はあるだろうか。それともう一つ、外国の大部分の大規模な集成材建築物は金物を使って接合されているが、金物が錆びると言う事についてはどの様な考え方をしているのだろうか。
（伊藤邦明）　金物を使うか使わないかは結論から言うとケースバイケースと言わざるを得ないだろう。これは単にその性能の優劣の問題だけではなく、建築の世界の通例として、往々にしてエンジニアリングとは無関係なところで善し悪しが決まる事が多い様に思う。
（理科大　河合）　接合部に金物を使うかそれとも伝統的な継手、仕口の方法を用いるかは、構造全体の力の流れをどうとらえどう設定するか、それによって接合部にどの様な強度性能が求められるかによって判断しなければならないと思う。いずれにせよ、その建物がどの様な考え方によって構造設計されるのか、またどの程度の耐久性が期待されるのかと言った様なトータルな考え方が、結局は継手、仕口の設計にも反映されケースバイケースで答えが出て来るのではないだろうか。ただ、研究の現状を見ると、金物を使わない場合のデータがまだまだ不十分で、そのためにどうしても金物に走りがちだと言う傾向は否めないのではないかと思う。この点から言うと、もしも金物を使わない方向に動いた場合に、それで大丈夫なのかと言う答えを出しておく義務は我々にあるのではないかと考えている。

４．構造体構成要素および全体構造
（司会）　鉛直荷重に関連する構造解析は世界的に進んでいるが、水平荷重についてはまだまだ不十分である。この点に関しては外国の研究成果に期待する事は難しく、やはり地震国である日本の研究者が中心になって研究を進めて行かないといけない様に思うが、具体的な研究テーマとしてはどの様なものがあるか。
（神谷）　現在の木造住宅の地震に対する安全性については、昔から見ればかなり評価があがって来たと思う。その根拠となっているのは、出来るだけ剛な構造にすると言う事で、筋かいや合板を必要量使用する様にかなりきびしくチェックして来た事によって、トータルに見てほぼ安全だと考えられると言う事である。しかし、個々の点について理論的に十分確認されたものが積み重ねられて導かれた結論ではないので、これから検討して行かなければならない事がたくさんあると思う。構造体構成要素の性能評価に関しては、やはり全体構造の振動解析があって、その上で各構成要素に要求される性能が決って来るのではないかと思う。だから、まずそちらの方の研究を重点的に進めながら、その結果に基づいて順次各構成要素の検討課題を整理して行く事が必要ではないか。
（司会）　日本にはほれぼれするような木造の建物がないと言う辛らつな指摘があったが、より良い木構造を作って行くためには、建築家の目で見てどの様な可能性が考えられ、どの様な問題点があるだろうか。
（遠山一級建築士事務所　鈴木）　大スパン、３階建て等いろいろあると思うが、今は全部木と言う事ばかりではなくて、他の材料と組み合わせて使うと言うところに興味を持っている。その場合、振動あるいはその他の性能をどの様にとらえて行けば良いだろうか。
（司会）　複合構造については、例えばＲＣと木造の組み合わせ等アメリカではポピュラーに作られているものもある。このような複合構造を日本でも設計可能にしようと言う事で、建設省の総プロでもこのテーマを取り上げているようだが。
（建研　佐藤）　混合構造についても検討する予定になっているが、具体的な方法、例えばＳ造、ＲＣ造との取り合いをどうするかと言った問題についてはこれから煮詰めて行く事になると思う。
（司会）　現在の木造建築物を構造設計の方法から見ると、施行令３章３節で規定する在来工法、告示で規定する枠組壁工法及び丸太組構法の様な、いわゆる特別な構造計算をしなくてもよいもの、大断面集成材を使った３８条の認定書に基づくもの、それ以外で３階以上又は延べ床面積が５００ｍ^{2}以上で施行令３章８節の構造計算を必要とするものの３つに大別される（図「木造建築物の構造設計の流れ」参照）。しかし、一般的な構造計算においては、いずれの場合も応力度の計算いわゆる一次設計だけで、建物の変形計算、建物の不整形のチェックや保有耐

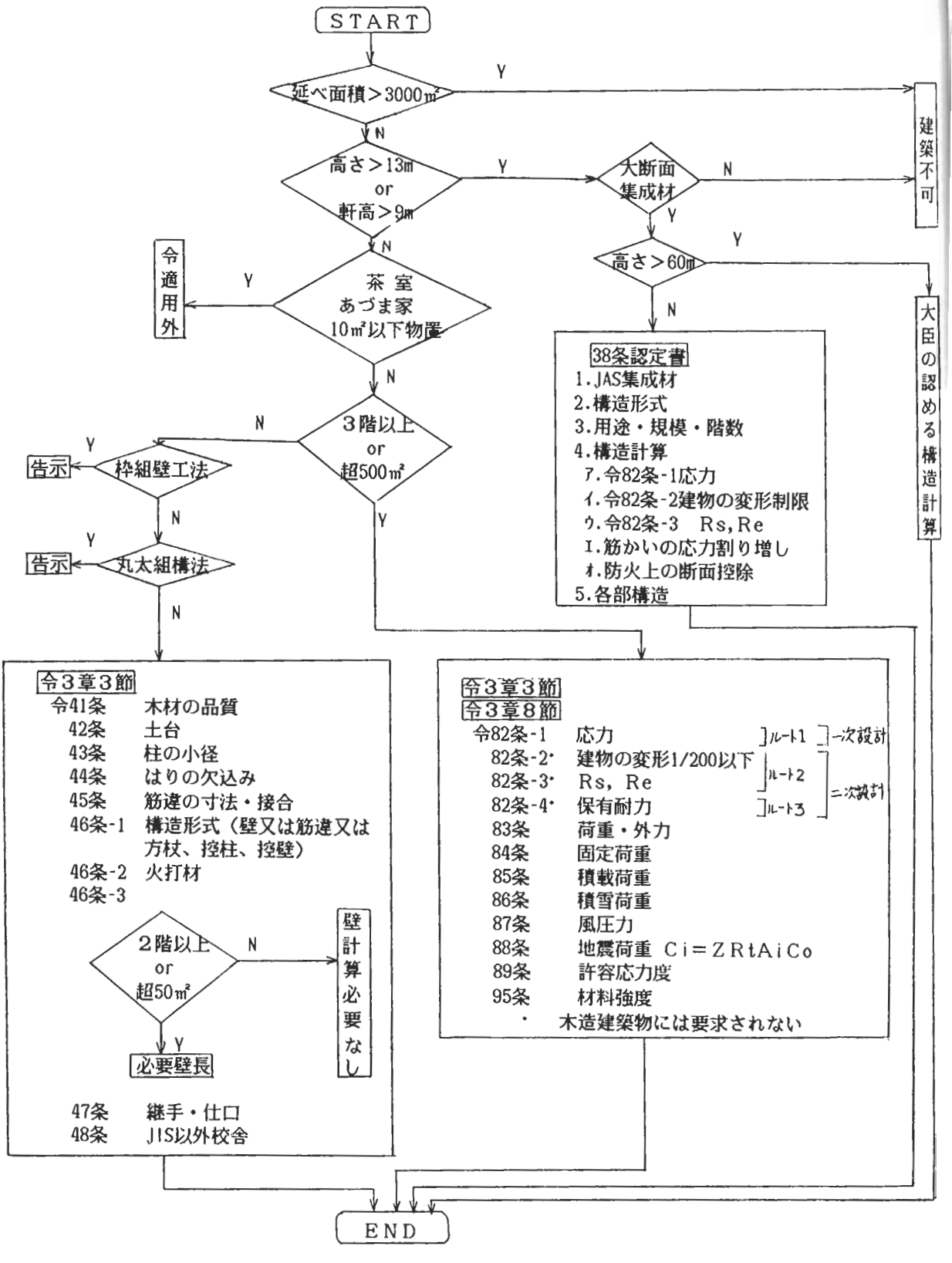


図　　木造建築物の構造設計の流れ

力の計算と言った二次設計は要求されていない。この辺のところを考えると、普段他の構造物を扱っている設計者から見て、木構造に対する信頼性と言う点ではどうであろうか。

（清水建設　杉崎）　保有耐力については建物の用途、規模、種類によってだいぶイメージが違うと思う。私は現在大空間に是非木造を適用してみたいと思っているが、大空間の場合には建物自体のプロポーションからして地震力で決まる事は少なく、どちらかと言うと鉛直荷重の方が大きい。そのような場合には、保有耐力に関してそれほど神経質になる必要はなく、一次設計で十分余裕があれば問題ないと思う。変形については接合部の剛性がＲＣや鉄骨に比べて格段に低い事を考えると１／２００と言うオーダーに抑えるのは非常にきついのではないか。これを満足するために接合部の剛性をあげようとしても建物の重量（水平力）との関係も有り、ブレースを入れなければならないと言う様ないろいろな問題が出て来る。また現在は桁行方向はブレース、もう一方はラーメンと言う構造が一般的であるが、これからの展開を考えるとその形に制限されてしまっては良いものが出来ないだろうと思うので、もっと立体的に挙動する様な木造骨組みを考えて行きたい。そのときには、勿論接合部の耐力や変形性能が非常に大切になって来るわけだが、保有耐力だけではなく鉛直荷重に対する対応も含め、部材設計をするときにある程度めどがつけられるような、つまり正確ではないにしても計算上ある低減率をかける事によって構造としての安全性に見込みをつけられる様な方法をさぐる事が有効だろうと思う。その様な方法が確立されれば、企画段階で実際上詳細な設計をしなくても大丈夫かどうかの見込みがつけられる様になるだろう。詳細設計段階での保有耐力の計算に関しては、条件によっては可能であろうと思うので、それについては他構造と同等の扱いとし、今の段階で保有耐力計算の出来ないものについてはある程度の制限を設けると言うやり方をすれば良いと思う。それから、実際の設計に於ては初期的な強度だけではなくヤング係数その他の性質、さらに経年的な耐久性の問題が重要である。この耐久性は各樹種で違うと思うので、樹種グループ分けやグレーディング、許容応力度の設定に際しては、この点も考慮した指針を作って欲しい。またデザイン上からは表面仕上げなしで木材を使いたいと言う要求もあるので、材質感も大事になって来るし、この点からも耐久性の問題はより重要になって来るであろう。その他の性質も含め、実際に設計をするに当たっての、様々な点を考慮出来るような材料選択の判断基準を示してもらいたい。集成材については、例えば鉄骨の場合に溶接の信頼性に関して工場のグレードがあるのと同じ様に、製品精度、性能に関する認定制度の様なものが作られると安心して発注出来る様になる。設計者が材料の管理までやるのは大変な負担で、ＲＣやＳが使われる理由の一つには設計者がいちいちチェックしなくても品質が保証されていると言う点もある。集成材の場合にも、是非材料供給から含めて、ファブリケーターから供給される製品の品質を守って行くためにそう言う認定制度を確立して欲しい。

（文責　平井）

〔４〕　総合討論を終えて

司会　　平嶋　義彦
（農林水産省　林業試験場）

木質構造にいささかなりとも関係する又は興味をもっている人々、学者、研究者、設計実務家、木質材料製造者等々が一堂に会して木質構造について論じあうということは、司会者の知る限りでは絶えて久しく無かったことである。

木質構造という大きなテーマについてたった一日で論じあうということはいかにも乱暴なことかも知れない。事実、四氏によるレヴューと問題提起の後の総合討論は、四氏の精力的でユニークな講演とは打って変わって活発さに欠けていたように思う。理由の一つはテーマが大きすぎるということであり、一つはこの分野の研究者が少ないということであると思う。総合討論によって木質構造研究をとりまく問題点を論議し、そこからリサーチニーズを浮き彫りにしていこうという本研究会の意図はどれだけ満足されたか、司会者としていささか心許ないと同時に責任の一端を感じている所である。

しかし、少なくとも、木質構造の現状、特に木質構造設計という側面から眺めた木質構造研究の現状といったものはレヴュアーの講演や討論のなかである程度浮かび上がったのではないだろうか。

現在の木質構造設計のレベルはどのあたりにあるか、何が可能で何が不可能か、何が問題でどのように解決していかねばならないか、こういったことが今回新たに論じられ問題提起されたように思う。

幾つかのいわば国家的プロジェクトが計画され木質構造に熱い視線が注がれているいま、この気運を単なる一過性のフィーバーに終わらせないためには、このような地に足をつけた技術論議が必要なのではなかろうか。

こういった意味で、今回の研究会はそれなりの意義をもったものであったと総括できよう。

個々の具体的な問題点は、レヴュアーの資料を参考にしていただくとして、ここでは司会者の感じた問題点を２，３挙げておきたいと思う。

１．材料強度

材料強度や許容応力度は施工令等に規定されているが、グレーディングと関連づけられていない。

グレーディングなしの許容応力度は一体何を意味するのか。グレーディングルールの確立と許容応力度設定のための参考資料はいままでどの程度蓄積されているか。

材料強度に関しても確率論手法による評価が導入されつつあるのは世界の流れである。木材のような変動幅の大きい材料にはこの手法は非常に有効なものかも知れない。今後の研究の方向を示していよう。

２．接合

現在、木構造設計規準にボルトと釘しか許容耐力が与えられていない。これで大規模構造が建つのだろうか。接合具は世界に数万種類あるという。多様な接合具のデータを整備する必要があろう。

大規模構造では建物の変形計算は不可欠である。接合部変形をも考慮した計算を可能にするために、接合部の応力－変形に関するデータを整備する必要があろう。

３．構造体要素

構造体内での役割り、働きを明らかにする必要があろう。壁率計算ではなく構造計算による設計ができるようにしておく必要があろう。

４．耐震設計

他構造に適用されている現行設計規準は木構造にも適用できるであろうか。木構造特有の変形の非線形性の問題、二次設計の可能性は？

応答計算手法の確立が必要であろう。

昭和６２年度木材強度・木質構造研究会
「木質構造研究の現状と今後の課題」
参加者名簿

森　和雄	三井木材（株）
葉多修司	三井木材（株）
古岡憲夫	大建工業（株）
川合広樹	日建設計（株）
杉崎健一	清水建設（株）
後藤和司	清水建設（株）
小野寺善弘	清水建設（株）
澤田誠二	清水建設（株）
可児長英	大成建設（株）
寺島　薫	市浦都市開発建築コンサルタンツ（株）
鈴木雄司	遠山一級建築士設計事務所
高坂清一	高坂構造設計事務所
平野　茂	（株）一条工務店
小倉高規	（財）日本住宅・木材技術センター
滝野真二郎	京都大学木材研究所
丸山則義	静岡大学・農学部
増田　稔	京都大学・農学部
佐藤敬一	東京農工大学・農学部
安藤直人	東京大学・農学部
佐々木康寿	名古屋大学・農学部
宮島　寛	北海道大学・農学部
小泉章夫	北海道大学・農学部
鈴木直之	三重大学・農学部
三井　篤	徳島大学・教育学部
滝　欽二	静岡大学・農学部
辻野哲司	岩手大学・教育学部
＊平井卓郎	北海道大学・農学部
石原茂久	京都大学木材研究所
古田弥明	静岡大学・農学部
中村　昇	東京大学・農学部
高橋　徹	島根大学・農学部
都築一雄	名古屋大学・農学部
赤松　明	職業訓練大学校
古澤嵩志雄	職業訓練大学校
西森　進	東京職業訓練短期大学校
末松充彦	職業訓練大学校
坂本　功	東京大学・工学部
高橋茂男	横浜国立大学・工学部
立花正敏	横浜国立大学・工学部
河合直人	東京理科大学
稲名　輝	工学院大学
上西秀夫	東京工芸大学・工学部
安藤幸喜	小山工業高等専門学校
飯島泰男	富山県木材試験場
古村武志	徳島県林業総合センター
堀江秀夫	北海道林産試験場
山中忠夫	和歌山県
岡田　恒	建設省建築研究所
佐藤雅俊	建設省建築研究所
畑山よし男	農林水産省林業試験場
中井　孝	農林水産省林業試験場
黒田紀雄	農林水産省林業試験場
宮武　敦	農林水産省林業試験場
林　知行	農林水産省林業試験場
田中俊成	農林水産省林業試験場
平嶋義彦	農林水産省林業試験場
小松幸平	農林水産省林業試験場
神谷文夫	農林水産省林業試験場
＊海老原　徹	農林水産省林業試験場
藤井　毅	農林水産省林業試験場
金谷紀行	農林水産省林業試験場
井上明生	農林水産省林業試験場

＊印　幹事

（１９８６年１０月２日　東京　木材会館）