民家の調査と倒壊実験の概要

---ただいま、調査対象とする木造建築物を募集しています。
---建て替えや建物の処分の予定がある方は、是非ご連絡下さい。
調査内容やスケジュールをご相談させていただきます。

【連絡先】

（独）森林総合研究所　構造利用研究領域

木質構造評価担当チーム長

杉本健一

〒305-8687　茨城県つくば市松の里１

Tel　029-873-3211　内線　586

e-mail　sugimoto@ffpri.affrc.go.jp

目　次

・ ごあいさつ　1

・ 建物の紹介　2
・ 調査・実験のスケジュール　4
・ 架構の特徴　6
・ 含水率および温湿度　9
・ 使われていた樹種　12
・ 構造部材の強度特性　16
・ 常時微動測定および強制振動実験　18
・ 劣化状況　21
・ 水平加力および倒壊実験　24
・ 静的加力実験時の柱の傾斜について　27

・ コラム・つくば市周辺の民家　29
・ 写真で見る実験の様子　32

ごあいさつ

（独）森林総合研究所　構造利用研究領域　領域長　神谷文夫

森林総合研究所では、地震に強い木造建築を建てるために、木材や木質材料の強度をはじめ、その接合方法、壁、床、屋根、さらには木造建築そのものの強度などの研究を行っております。また強さだけでなく、木造建築を快適で長持ちするものにするために、木材や木造建築の耐久性、耐火性、断熱性、遮音性などについても幅広い研究を行っております。

研究の方法は、研究所にある実験設備を使っての実験や、地震による木造建物の被害調査（最近では、阪神淡路大震災、鳥取西部地震、中越地震など）等がありますが、その他に、解体される予定の建物を使っての研究があります。

研究のために新しい建物を建てると大きな費用がかかりますが、解体予定の建物を上手く利用することにより、多くの貴重な研究データを得ることができるのです。例えば、まずあるがままの状態で建物の振動性状を調べた上で、耐震補強を加えたり、逆に耐力壁などの耐力要素を外して解体しながら、その都度振動性状や耐力を調べます。この方法により、補強の効果や外したそれぞれの部材が耐力上どのように貢献しているかが解るわけです。

また、解体しながら、床下や外壁の中の木材の腐れの状態や含水率を調べることによって、建物を長持ちさせるための貴重な情報を得ることができます。

つきましては、研究に用いる建物の提供を求めております。建て替えなどで解体予定の住宅等がありましたら、お知らせ下さい。建物の新しい古いは問いません。古い住宅は伝統的な構法の知恵を知る手がかりにもなります。データの公表やプライバシー等については十分にご相談し、決してご迷惑をおかけするようなことはありません。詳しくは本冊子の表紙にある連絡先までお問い合わせ下さい。

建物の紹介

調査・実験を実施した建物は、茨城県つくば市の北部に位置します。ちょうど筑波山の南西側のふもとにあたります。固定資産登記記録によると明治 20 年（1887 年）に建築されたことが分かりました。実験を行った平成 15 年（2003 年）の時点で、建てられてから 116 年が経過したことになります。

この建物の外観は重厚な和風です（写真 1、2）。建てられて以来、建物外装の補修や改築を数回行ったと聞きましたが、具体的な時期や内容については不明でした。

この建物の室内側はリフォームされて、建築当初とは違った装いになっています。例えば、建築当初には土間だったと思われる場所は、その地面の上にコンクリートを打ち、束、大引き、根太、フローリング等で床組を構成して、洋間、廊下、台所として使われていました（写真 3、4）。そこでは断面の大きい柱や梁があわらしとなっており、現在の住宅とは少し違った雰囲気を醸し出していました。また、和室は建築された当初は土塗り壁だったと思われますが、その後、漆喰（しっくい）や聚楽土（じゅらくつち）が塗られてありま

写真 1　建物の外観（南側から撮影）

写真 2　建物の外観（東側から撮影）

写真 3　洋間

写真 4　廊下

した（写真 5）。

写真 5　聚楽壁の和室

写真 6　納屋

写真 7　味噌蔵

この建物の周囲には、南東側に納屋（なや）、北側に味噌蔵（みそぐら）と思われる建物が位置しています（写真 6、7）。それらの建築年代は不明ですが、恐らくは同時期に建てられたものと考えられます。

実際の調査・実験を行うにあたっては、建物の骨組みのみ残して、他は撤去することとしました。もちろん理由は壁や床の内部を調べるためもありますが、最も大きな理由は、建物の構造性能を調べる実験を行って、得られた結果を比較するときに変動要因となりうる因子を除外するためです。そこでこの実験では、建物を建てられた当初の状態に出来る限り近づけてから行うこととしました（8 頁の写真をご参照ください）。

（青井秀樹）

調査・実験のスケジュール

この調査・実験は以下のスケジュールで行われました

年	月日	曜日	建物所有者日程	調査・実験の内容				
				室内外温湿度測定	構造の特徴の調査	部材の調査	劣化調査	構造性能実験
平成15年	5月25日	日	当所の調査責任者からご挨拶 調査内容のご説明					
	12月27日	土	調査内容のご説明	温湿度測定				
平成16年	2月2日	月	調査・実験スケジュール打ち合わせ					
	13日	金	仮住まいへ引越					
	14日	土			建物の傾斜測定			
	15日	日	近隣へのご挨拶					
	16日	月					常時微動測定	人力加振
	17日	火						起振機加振
	18日	水						
	19日	木						
	20日	金				部材の寸法測定	部材の強度の非破壊検査	
	21日	土					主屋内部劣化調査	
	22日	日						
	23日	月						
	24日	火					建物外周劣化調査	
	25日	水		床組・壁の仕様調査				
	26日	木						
	27日	金						
	28日	土						
	29日	日						水平加力・倒壊実験準備
	3月1日	月						
	2日	火						
	3日	水						
	4日	木						水平加力実験
	5日	金						
	6日	土						
	7日	日				部材回収 部材の劣化調査		倒壊実験
	8日	月	実験お立ち会い					
	9日	火						解体・撤去
	10日	水						
	11日	木						
	12日	金						
	13日	土						
	14日	日						
	15日	月	ご新居地鎮祭					

平成15年5月25日（日）に、この調査・実験の責任者が建物所有者にご挨拶に伺ったのが始まりとなります。このときに建物所有者に調査・実験の趣旨を説明させて戴きました。この日から調査・実験の開始までの間、数回に渡って調査・実験内容とスケジュールについて打ち合わせさせて戴きました。

具体的なスケジュールのお話をさせていただいたのは、年が改まって、平成16年2月2日（月）でした。この日の少し前に、建物所有者と住宅メーカーとの間で建て替えのお話がまとまり、調査・実験に充てられる日数が明らかになりました。それによって、調査・実験のスケジュールが確定しました。

調査･実験の内容は､実働可能な日数によって決まりますが､最低でも10日ほどあれば、水平加力実験、倒壊実験を実施することができます。今回の調査・実験では、建物所有者の最大限のご配慮を戴き、約１ヶ月の長期に渡って多くの調査・実験を行うことが出来ました。

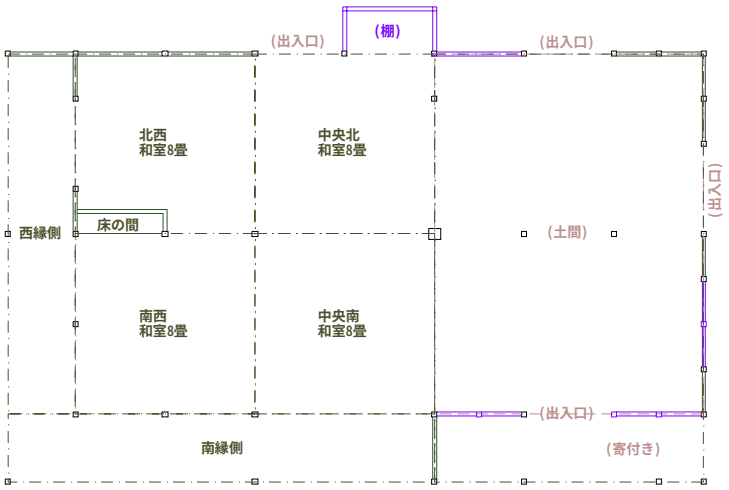
（青井秀樹）

架構の特徴

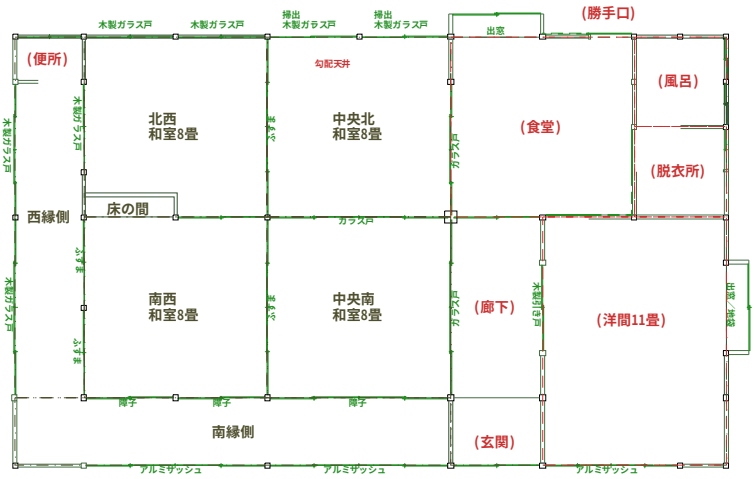
この建物は固定資産登記記録によると明治 20 年に建築されました。100 年を超えて利用されてきたこの建物は、建築当初の形のまま現在に至ったのではなく、その時々の住まい手の意思によって、幾度かの増改築を重ねて来たようです。

平屋建てのこの建物は、東西 7 間半、南北 4 間半の東西に長い長方形で、床面積が約 120 平方メートル、基本的な平面は日本の農家でよく見られる四つ間取りの典型的な田の字型でした。寄棟の屋根はトタンで菱葺（ひしぶき）されていましたが、その内部には、建築当初の型式と思われる藁葺きの屋根が隠されていました。この藁葺き屋根の構造は、上屋（じょうや）梁の上に組立てられた小径丸太の叉首（さす）と屋根下地になる小舞（こまい）・垂木（たるき）・屋中（やなか）の各骨組が竹で作られていました。軸組のうち、鴨居と柱は角材に製材されていましたが、多くの梁や桁は曲がった丸太を縦横に渡して構成していました。建物の構造は、四周が差鴨居（さしがもい）で出来ている中央南和室を中心として、そこから室内上部に露出した力強い丸太が伸びていました。この丸太には直径 20㎝ を超えたものが用いられ、隣の部屋同士を貫いて、交互に、二段に、そして縦横に組み合わせることで建物全体を一体化していました。北側外周など、あまり目立たない部分の柱には、一部丸みが残っていたものもありました。和室の床組には、一面しか製材していない大引や、二面製材の根太などが使われていましたが、柱下部との接合部の収まりが良くないことから、過去に幾度か行われた改修時に交換されていたと思われます。また中央北和室の床組みは、比較的新しい角材が用いられており、土間部分を食堂や居間として改装されるときに全て交換されていたようです。後年に追加された内装材を取り外して行くと、土間部分の改装に併せて母屋の出入り口の位置が改められ、以前の出入り口は窓に変更されていたことが判りました。また東側外壁では、窓開口を設けるために土壁が取り払われた形跡がありました。北側の柱に残された接合部の痕跡や梁端部の切断跡からは、中央北和室には直接外部に出る出入り口もしくは開口部と、収納もしくは神棚の

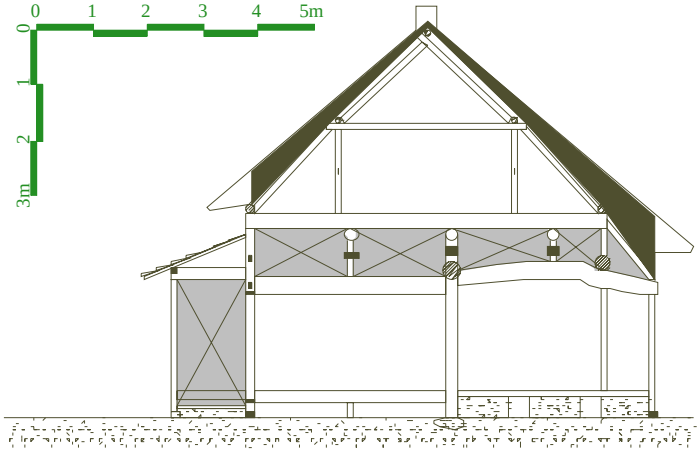
ような部分が存在した形跡がありました。（軽部正彦）



建築当時の平面図(推定)



実験着手時の平面図



建物中央付近(大黒柱を含む)の断面図

建物南側外観

北西和室から東を見る

建物東側外観

建物北側外観

土間北東より建物中央大黒柱方向を見る

含水率および温湿度

家(いえ)は、厳しい自然からそこに住む人々を守る箱(シェルター)であるといえます。今回調査対象とした民家は、柱と土壁とからなる軸組構造であり、現在の住宅と比較すると大変シンプルな構造ですが、長年の風雪に耐え、そこに暮らす人々の暮らしを守ってきました。ここでは、民家の箱(シェルター)としての機能を、温湿度に着目して評価しました。

図１は、民家の平面図です。図中の○の箇所に温湿度計を設置して、約１ヶ月の温湿度変化を測定しました。今回測定に用いた温湿度センサー（Onset 社製、HOBO32Pro）は、あらかじめ条件（測定開始時刻と測定間隔）を設定するだけで、置いてある場所の温度と湿度を自動的に測定し、記憶してくれるものです。なお、センサーの設置にあたっては、東西南北の各面で壁の内外を挟んでできる限り対応する位置に置くようにしました。これは、後述しますが、壁の断熱効果を検討するためです。測定期間は 2003 年 12 月 28 日 0:00 から 2004 年 2 月 23 日 10:00（27 日間）で、5 分間隔で測定しました。

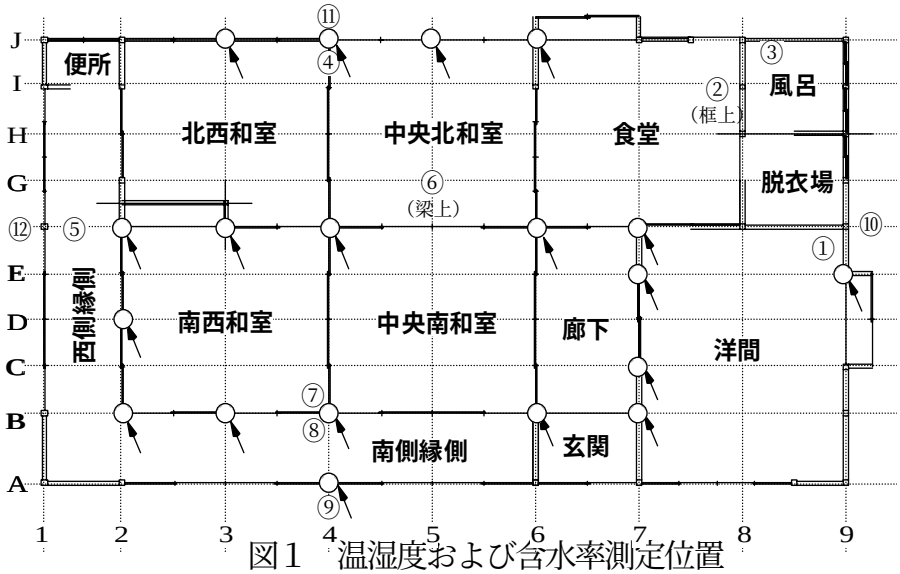


図１　温湿度および含水率測定位置

また、床上および胸高位置で柱の含水率を測定しました。測定には電気抵抗式含水率計（Protimeter 社製 Timber Master）を用いました。測定した場所を、図１に矢印で示します。

温湿度の測定結果の例を図２に示します。この図は、中央北和室室内（図１では④の位置）と屋外（同⑪の位置）の温度および相対湿度の時間変化を示したものです。

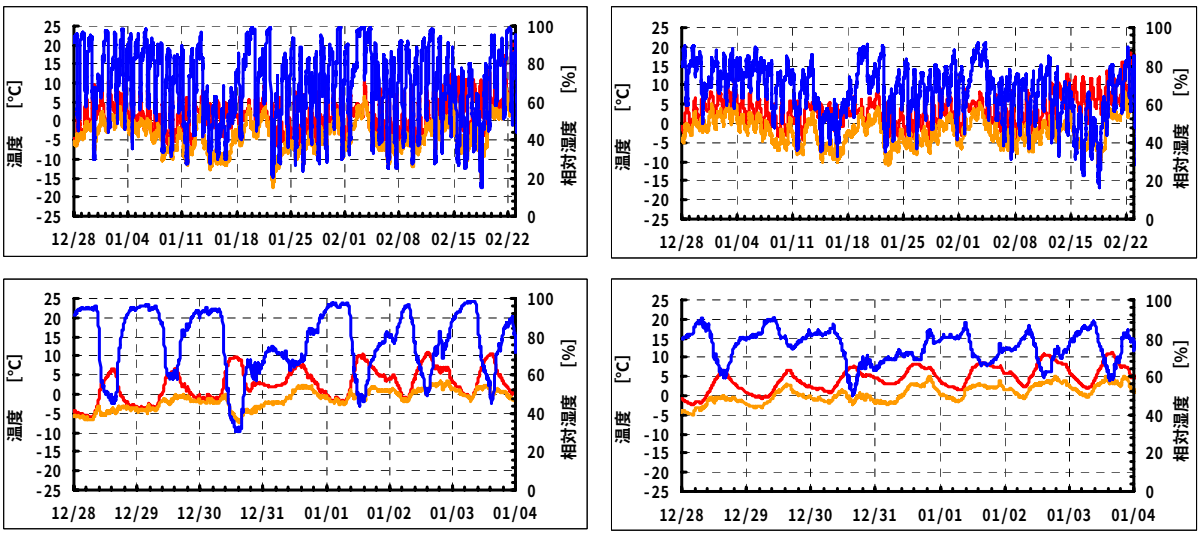


図２　温湿度の測定結果例
左：中央北和室・屋外、右：同・室内
上半分：全期間の結果、下半分：最初の１週間を拡大した図

図３は、各測定箇所の温度と相対湿度について、最大値、最小値、平均値、標準偏差を抜き出して示したものです。室外では温度が氷点下を示す場合がありましたが、その位置に近い室内では温度の上昇や相対湿度の減少が認められ、土壁および空調等による環境調整機能が有効に働いていたことがわかりました。

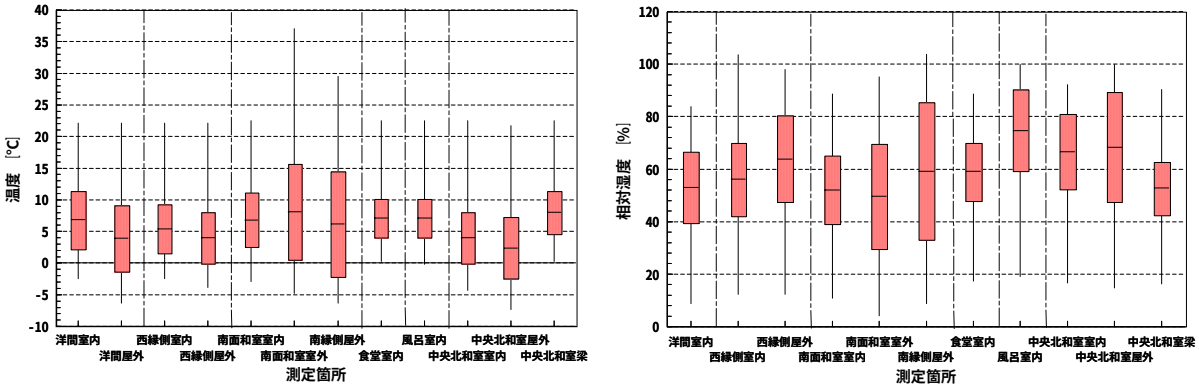


図３　温度および相対湿度の測定結果
グラフの見方）縦棒上端：最大値、縦棒下端：最小値、箱中央：平均値、箱上下端：平均値±標準偏差（温湿度の変動の大きさを示す指標値）

次に、柱の含水率（1 本の柱について複数の面で測定した場合は、その最大値）を図４に示します。図は、プロットの位置が測定位置、円の大きさが含水率の程度を示しています。全体として分かったことは、北面に位置する柱の含水率が高かったと言うことです。

今回使用した測定器は、対象物に電極である針を刺して電極間の抵抗量を測定するもので、表面の含水率を測定するものです。一般に含水率は、部材のおかれた環境だけでなく、季節的な温度・湿度の変動によっても変化しますが、表面含水率が 20%以上を示すと劣化等の発生に注意する必要があるといわれています。しかし、今回測定した住宅については、この条件に当てはまる柱は存在しませんでした。

（原田真樹）

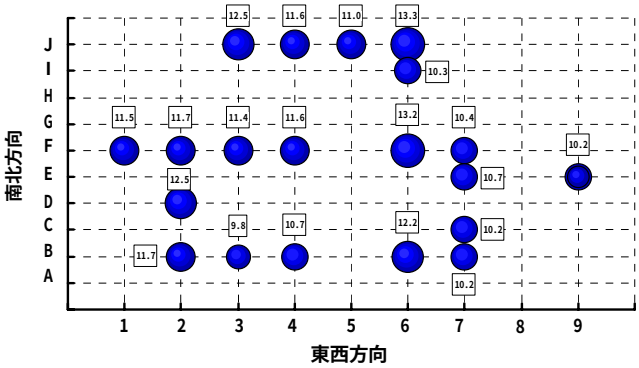


図４　柱含水率の測定結果
数字は、含水率を示す。

使われていた樹種

木材は、大径、長大なものであっても人力で加工することができることから、近代に至るまで、重要で主要な建築材料でした。では、建築部材としてどのような木が使われてきたのでしょうか？

1887 年（明治 20 年）に茨城県つくば市に建築された民家の、建築当初から使用されていた部材の構成樹種を調べました。引き倒し試験の終了後に、各部材から 2 個以上のサンプルを採取し、木口面、板目面、柾目面の 3 断面について約 15㎛ 厚さの薄切片を作製して、光学顕微鏡で観察しました。木材は、樹種によって構成要素の種類、配列、壁孔（細胞相互間の空隙）の形状などの特徴に違いがあるので、それを利用して樹種を同定することができます。

同定した結果、針葉樹 4 樹種（アカマツ、スギ、カヤ、ヒノキ）、広葉樹 4 樹種（クリ、ムクノキ、クヌギ、ケヤキ）を認めました。これらの樹種は、この地域に現生していますので、当時もつくば近郊で入手することができたと想像されます。例えば、スギ、ケヤキは屋敷林として植えられていますし、アカマツは松枯れが蔓延する以前には非常に多くありました。

部材の用途別にみると、構造部材のうち、柱にはスギ、梁・桁にはアカマツを多用し、大黒柱にはケヤキを使用していました。スギは通直性に、アカマツは強度に優れます。また、ケヤキは、大黒柱の他に、上がり框と床の間の板という人目につく場所で使っていました。ケヤキは強度・硬度に優れるだけでなく、木目が美しく、色が明るいことから化粧材としての意味もあったのでしょう。そして、土台にはカヤとクリを、大引きにはムクノキとクヌギを使用していました。カヤとクリは耐朽性に優れます。以上のように、この民家の材料には、近郊で入手可能な木材のなかで、建物の部位・用途に応じて、個々の木材の耐久性や強度、意匠性などの樹種毎の木材特性をふまえて、樹種を選択したと考えられます。

表　建築当初から使われていた部材の樹種と形状

	部材	樹種	形状
構造部材	土台	クリ、カヤ	平角
	大引	ムクノキ、クヌギ※	半割丸太、樹皮つき
	大黒柱	ケヤキ	心持ち正角、8 寸角
	柱	スギ	心持ち正角、背割りなし
	上がり框（かまち）	ケヤキ	製材
	差鴨居	アカマツ	心持ち平角
	梁・桁	アカマツ	丸太チョウナ仕上げ
	軒桁	アカマツ	3 面製材
	敷居、床板	アカマツ	板
	貫	スギ	板
接合具	くさび	クリ、スギ	
	こみせん	クリ	角材
床の間部材	床柱	スギ	磨き丸太
	床の間の板	ケヤキ	柾目板
	床の間の框（かまち）	ヒノキ	3 面製材

※ クヌギ節については、アベマキが当地域にほとんど生育していないことからクヌギの可能性が高いと判断した。

（山下香菜）

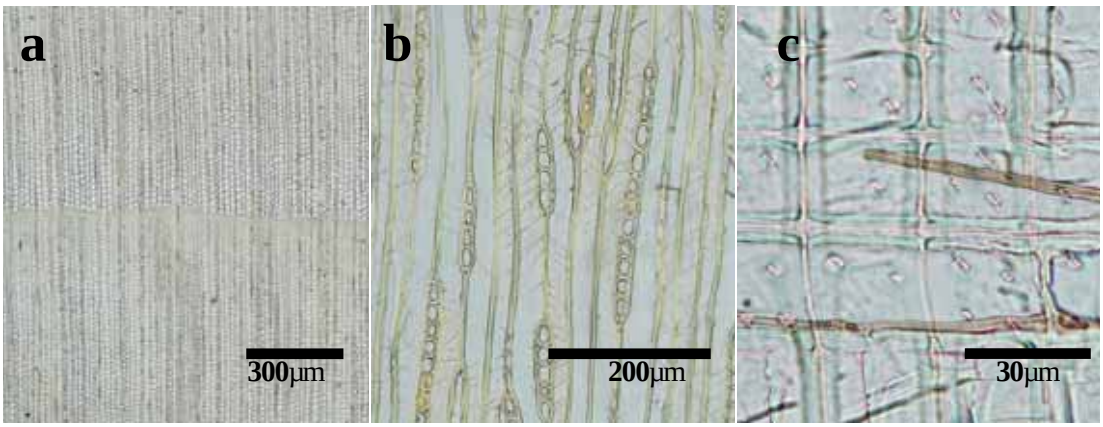


図1　カヤ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

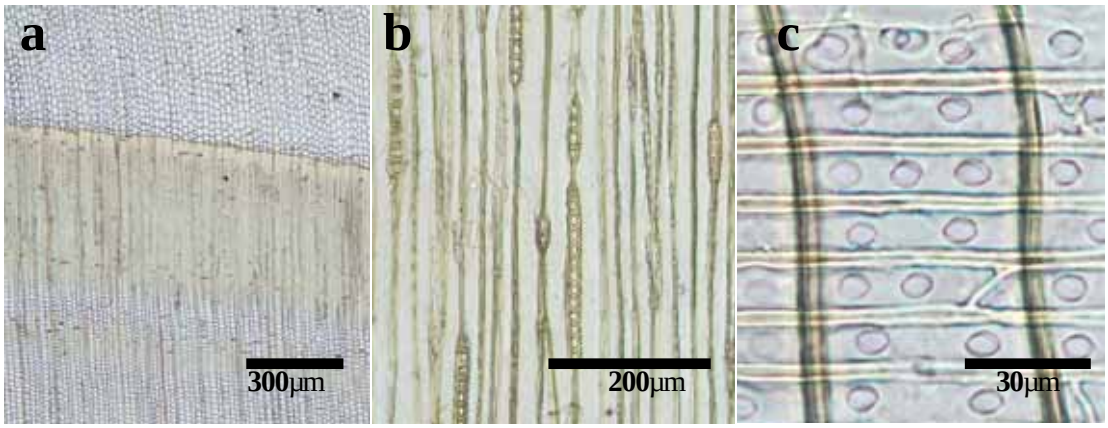


図2　スギ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

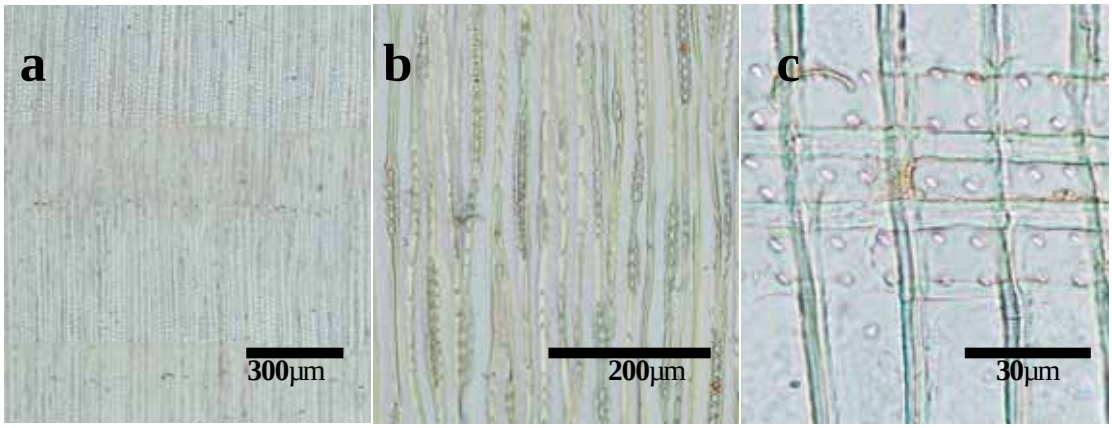


図3　ヒノキ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

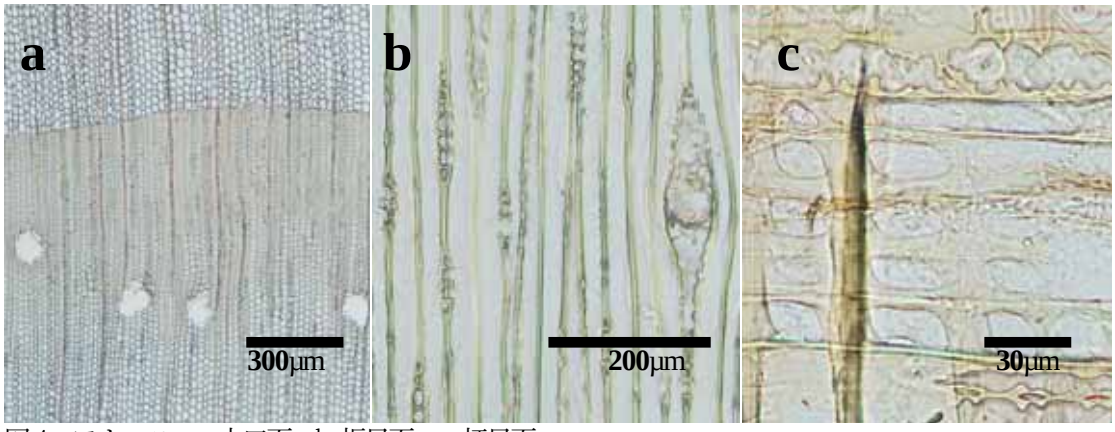


図4　アカマツ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

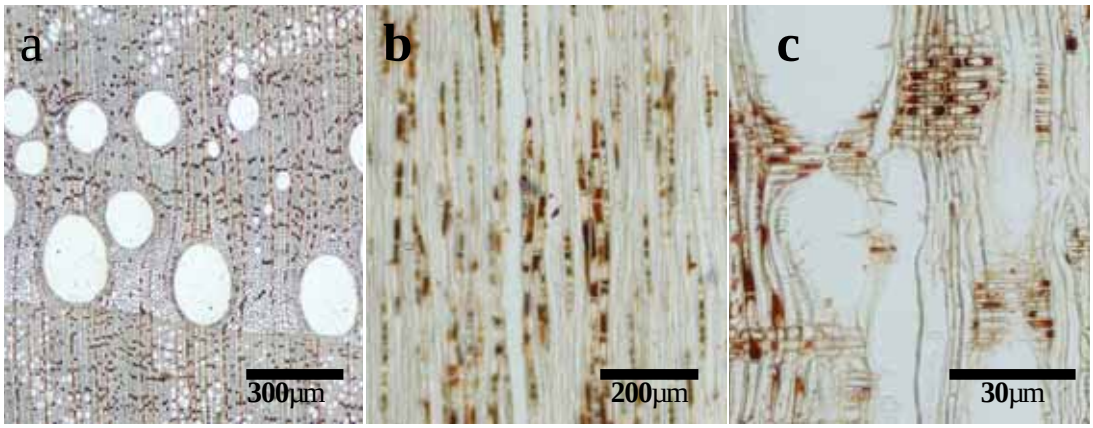


図5　クリ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

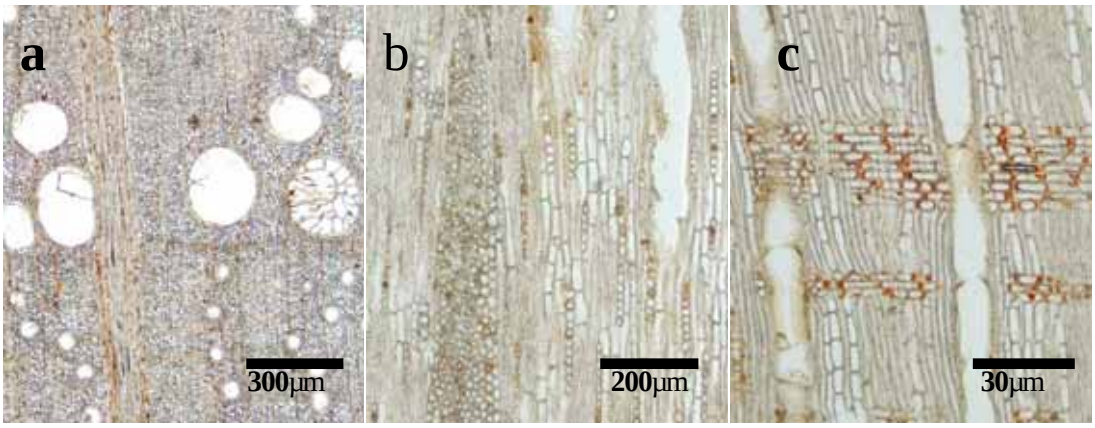


図6　クヌギ節，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

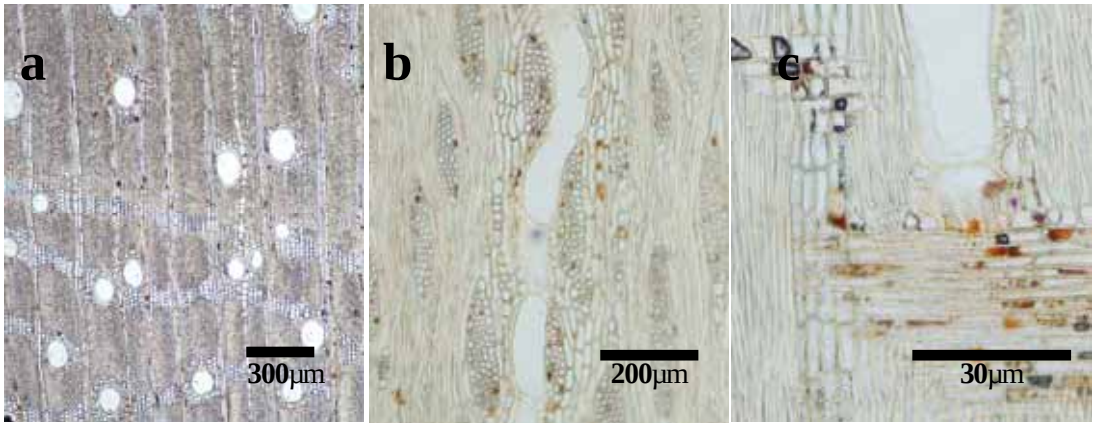


図7　ムクノキ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

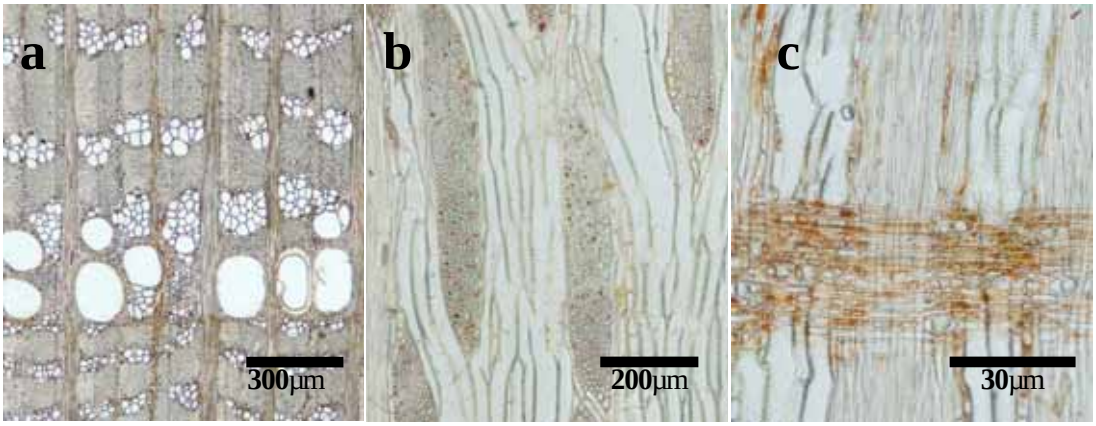


図8　ケヤキ，a:木口面，b:板目面，c:柾目面.

構造部材の強度特性

民家に使用されていた構造部材（製材品）の強度特性を明らかにする目的で、倒壊実験前には非破壊調査を行い、また倒壊実験後には採取した柱材を対象に縦圧縮試験を行いました。

■非破壊調査

対象とした部材はスギの柱 25 本、アカマツの差鴨居７本、およびケヤキの大黒柱１本です。それらの部材について、図１および写真１に示したような方法で部材の側面から応力波伝播時間とピン打ち込み深さを測定し、部材の変形しにくさの指標であるヤング係数を計算式に代入して求めました。その結果、表２に示したように、百年以上前の民家に使用されていた製材品のヤング係数は最近使用されている製材品のそれよりやや高いものの、それほど違いがないことが明らかになりました。

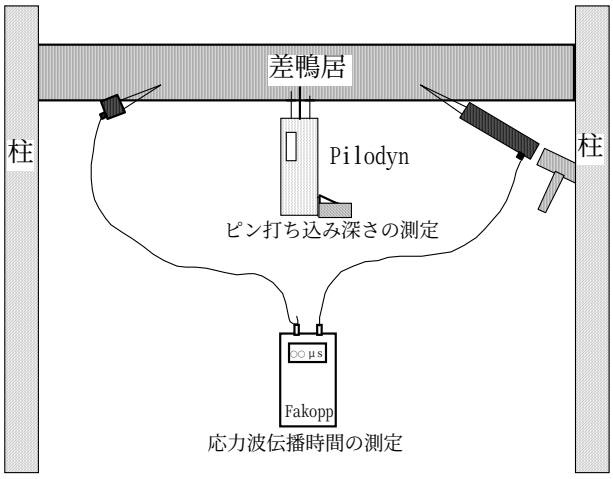


図1　非破壊試験の概略図

写真１　差鴨居の非破壊調査の様子

表2　非破壊試験によって得られたヤング係数と最近のデータとの比較

	ヤング係数（kN/mm　^{2}）				
	柱（スギ）	スギ製材品	差鴨居（マツ）	アカマツ製材品	大黒柱（ケヤキ）
試験体数	25	6462	7	460	1
平均値	7.92	7.30	11.76	9.71	14.54
最小値	5.05	2.81	9.10	4.79	
最大値	11.57	14.52	14.93	16.20	

※スギ製材品及びアカマツ製材品のヤング係数は以下のデータ集から縦振動法によるヤング係数を抜粋したものである。
「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集〈7〉、強度性能研究会、2005.3

■縦圧縮試験

倒壊実験後に、非破壊調査を行った部材を可能な限り回収しました。そのうち、スギの柱及びケヤキの大黒柱について、ほぞ穴を含まないように縦圧縮試験体を作製し、写真２のように縦圧縮試験を行いました。

写真２　ケヤキ大黒柱の縦圧縮試験の様子

その結果、表３に示したように、ヤング係数と同様、民家に使用されていた製材品の縦圧縮強度は最近使用されている製材品のそれとほぼ同等であることが明らかになりました。

（長尾博文）

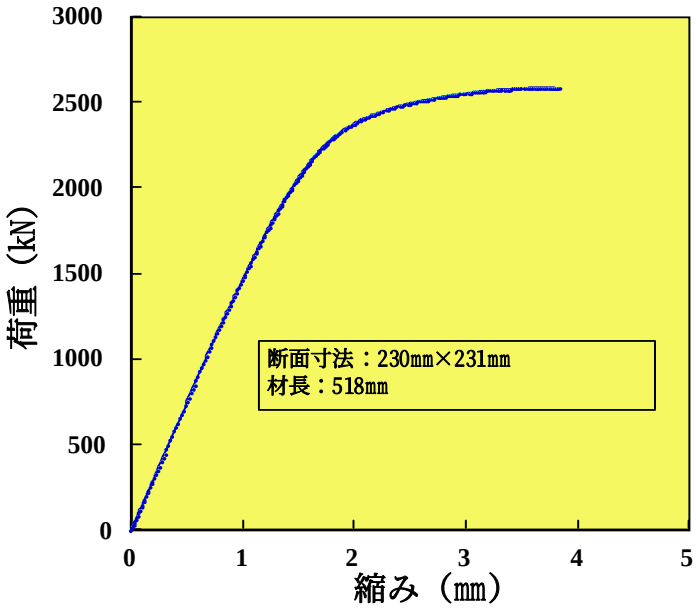


図2　ケヤキ大黒柱の縦圧縮荷重-縮み曲線

表3　スギ管柱の縦圧縮強度と最近のデータとの比較

	縦圧縮強度（N/mm^2）		
	柱（スギ）	スギ製材品	大黒柱（ケヤキ）
試験体数	25	701	1
平均値	27.9	28.9	48.7
最小値	20.6	15.4	
最大値	35.7	53.5	

※スギ製材品及びアカマツ製材品の縦圧縮強度は以下のデータ集から抜粋したものである。
「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集〈7〉、強度性能研究会、2005.3

常時微動測定および強制振動実験

建物には、風、車両の通行、工場などで発生している振動などの影響により、人が感じないほどの微小な揺れが絶えず生じています。このような微小の揺れを常時微動と呼び、地盤と建物の常時微動を測定して、これらがもっとも揺れやすい周波数（1 秒当たりの揺れの数）を求める実験が常時微動測定です。地盤が揺れやすい周波数（これを地盤の卓越周波数といいます）と建物が揺れやすい周波数（これを建物の固有振動数といいます）とが一致すると、共振と呼ばれる現象を起こし、この周波数での建物の揺れが著しく大きくなります。常時微動測定には、写真１に示す計測器本体と、写真２に示すセンサー（サーボ型速度計）を用います。測定は極めて簡単で、センサーをコンクリートたたきの上、フローリング等の固い材料の上、梁の上等に置き、周囲の状況に応じて 2～5 分程度、静寂にしてデータ収録が終わるのを待ちます。

図１　常時微動測定装置本体

図２　センサー（サーボ型速度計）
（写真中央の黒光りしたもの）

常時微動測定は人が感じないような非常に小さな揺れを測定する実験ですが、建物をこれよりもう少し大きく揺らして、その揺れを測定する実験が強制振動実験です。強制振動実験の加力方法には人力加振と起振機加振とがあります。人力加振では建物を１回強く押すか、あるいは常時微動測定により求めた固有振動数に合わせて建物を何回も揺すると、共振が起きて建物の揺れが次第に大きくなるので、その時点で加振を中止し、建物の揺れが治まるまでの揺れ方を測定します。測定装置は常時微動測定と同じものを使用します。

写真３　起振機（写真中央の水色及び緑色のもの。）とセンサー（サーボ型加速度計。起振機の左隣、梁上に固定されているもの。）

起振機加振では起振機を、建物全体を揺らすことができる位置に取り付け、建物の各部に取り付けたセンサー（サーボ型加速度計）により、その部分の揺れを測定します（写真3）。森林総研では起振機に、２つの振り子を逆向きに回転させることによって、建物を揺らす力を発生させるタイプのものを使用しています。起振機加振では振り子の回転数を１秒当たり１回転から26回転まで徐々に変化させて、建物の揺れがもっとも大きくなる振り子の回転数を調べます。このときの回転数が建物の固有振動数になります。この実験をスウィープ実験といいます。建物の固有振動数が求まったら、今度はその固有振動数で建物を振動させ、起振機を停止させます。その時点から振動は徐々に小さくなっていきますが、この時の振動の測定によって、建物の揺れの収まり度合い（減衰定数といいます）がわかります。

常時微動測定及び強制振動実験では、どちらでも固有振動数や減衰定数を求めることができますが、両者で異なるのは揺れの大きさです。建物の剛（かた）さ（変形のしにくさ。剛性ともいいます。）は揺れの大きさによって変化するので、地震時の建物の揺れ方を調べるには、建物を大きく揺らすことができる起振機加振の方が望ましいといえますが、起振機加振は起振機が載せられない、居住中で建物を大きく揺らすことができないなど、実験環境が整わずに実施できないことも多く、常時微動測定と人力加振しか行わない場合もあります。

今回調査した民家の固有振動数は、改装部分がほとんど撤去された状態で2.15Hz（常時微動測定による）、2.15Hz（人力加振による）、2.2Hz（スウィープ実験による）でしたので、今回の結果は測定方法によって大きな違いは見られませんでした。また減衰定数は5%（人

力加振による）でした。

一般の木造住宅の固有振動数が 4～8Hz 程度、減衰定数が 4～5%前後であると言われていますので、今回の民家はゆっくりと揺れやすい傾向にあると言えます。

（杉本健一）

劣化状況

日本の住宅の耐用年数が欧米と較べ短い理由の一つに、日本の住宅が生物劣化を受けやすい環境にあることがあげられます。ご存じのように、じめじめした場所に置いた木材は腐ってしまいます。また、シロアリがいる環境に置けばシロアリに食い荒らされます。このように木材に腐れを引き起こす木材腐朽菌や木材を食い荒らすシロアリは、寒いところよりも暖かいところを、また乾いたところよりも湿ったところを、好む性質があります。このため、欧米と較べ暖かく雨の多い日本では、腐朽菌やシロアリの活動がより活発になるのです。その結果、日本の木造住宅は欧米の住宅よりも木材加害生物（腐朽菌やシロアリ）からのより厳しい攻撃に晒されることになります。

では、一般の住宅ではどのようなところがそのような攻撃を受けやすいのでしょうか。今回調査したつくば市の民家を例に見てみましょう。

■加害されやすい部位その１-土台

土台は、床下の湿った環境に置かれているため、住宅の中でも特に劣化しやすい部材の一つです。現在のきまりでは、土台の下に基礎（土台の下にあるコンクリート）を立ち上げそこに換気口あるいは基礎パッキンを設けることで床下の通気性を良くするよう定めているため、土台が簡単に腐ってしまうことはなくなりましたが、この民家の場合、まだその様なきまりができる前の建物だったこともあり、土台の大部分が地面と直に接していました。木材が地面と接すると、地中に棲む腐朽菌やシロアリが木材に直接侵入できることになります。また、水分が地面から木材に供給されるため、常にその木材は菌やシロアリが好む湿った状態となります。長い年月にわたって土台がこの様な状態に保たれた結果、土台はかなりの部分がシロアリや腐朽菌に侵されていました（写真１）。

写真1

■加害されやすい部位その２-水回り

繰り返しになりますが、木材腐朽菌やシロアリは暖かく湿った場所を好みます。住宅の中で暖かく湿った場所といえばどこでしょうか。そう、お風呂場です。現在多くの住宅ではバスタブ等風呂の設備を一体化し風呂場の外に水が漏れるのを防ぐ工夫を施したユニットバスを採用しているためそれほど心配することはないのですが、昔の住宅の風呂場にはせいぜいタイルが貼ってある程度であり、風呂場の壁に水や水蒸気が染み込むのを防げませんでした。その結果、そのような住宅では風呂場周りの柱や壁に使われていた木材が軒並み腐朽菌やシロアリにやられる被害が多々見られました。写真２はこの民家の風呂場周りの被害の様子です。木材がボロボロに破壊されているのがわかると思います。

写真2

■加害されやすい部位その３-雨がかりの部材

これまで、腐朽やシロアリの被害が土台等床下や風呂場周りといった適度に湿った暖かい環境に置かれた部材で生じることを説明してきました。直接雨がかかるところにある部材もこの条件に当てはまります。もちろん通常の住宅では雨が木材に当たらないよう工夫されているわけですが、それでもどうしても雨がかかってしまうところがあります。今回のこの例では、縁側部分に腐朽と蟻害とが見つかっています(写真３)。

写真3

■その他の加害されやすい部位

上述した１から３の部位が代表的な腐朽やシロアリの被害を受けやすい箇所になるのですが、場合によってはそれ以外のところでも腐朽やシロアリの被害が発生することがあります。この民家では、マツ材を使用した巨大な梁がシロアリによって加害されていることが認められました（写真４）。シロアリの習性から考えると、この部材は過去に雨などによって湿った状態に置かれていたと推察されます。

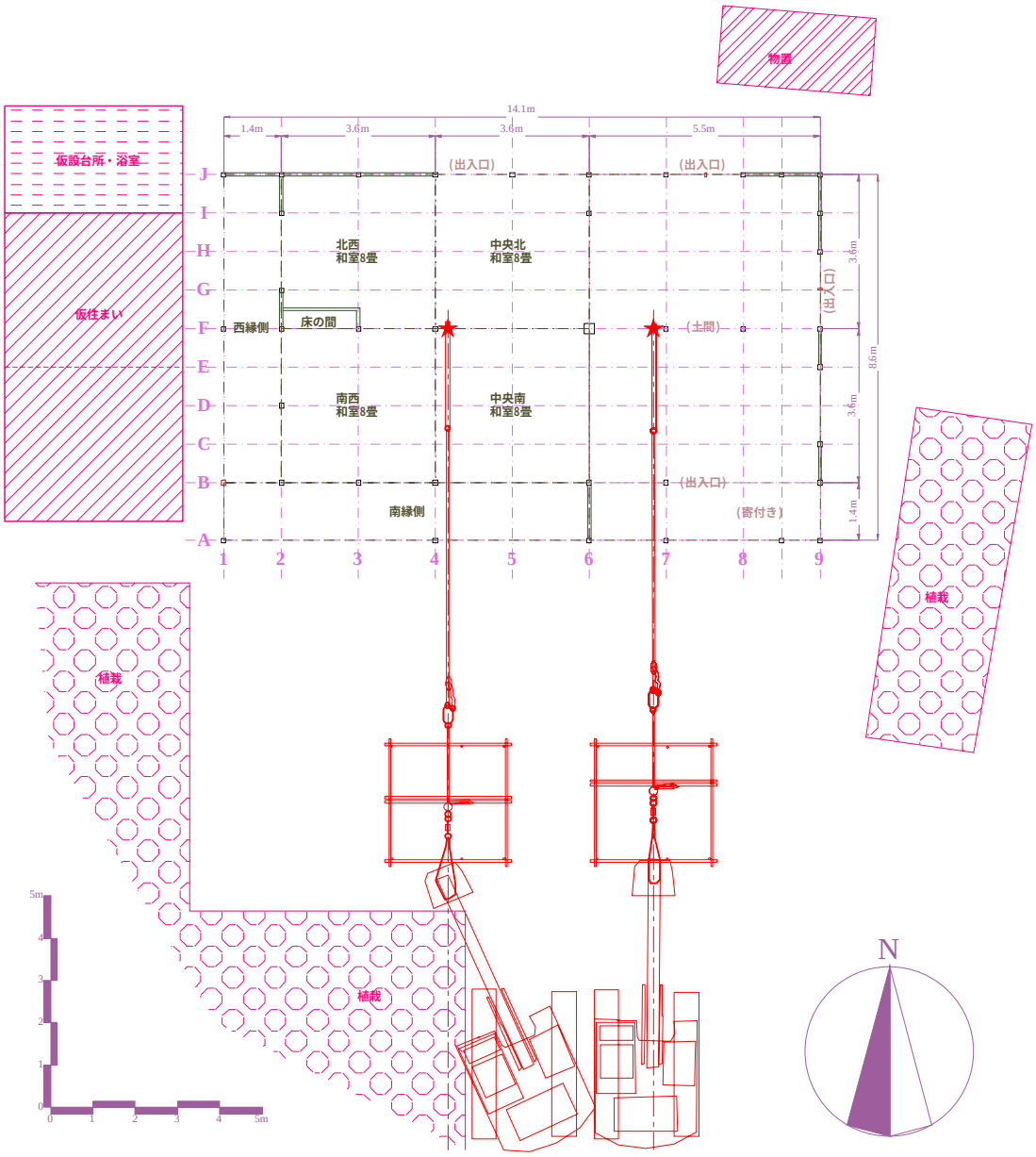
　また、敷居には多数の小さな孔が認められました（写真５）。この孔はマツザイシバンムシというマツ類の樹皮・樹皮下・用材を食害していく虫によって作られたものだと考えられます。

（桃原郁夫）

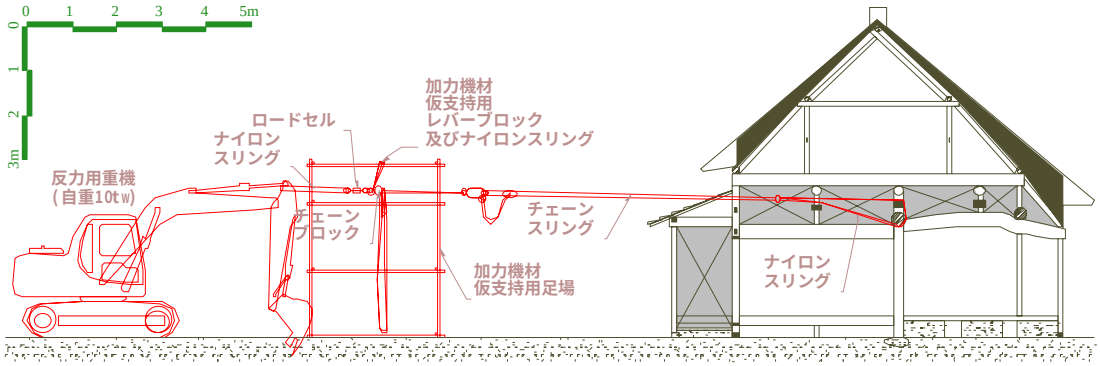
水平加力および倒壊実験

現地調査の最終段階として、改修や造作変更に伴う追加部分を取除いて出来るだけ建物を建築当初の姿に戻し、水平加力を行いました。建物周囲には庭に当たる南側以外に空地がありませんでしたが、建物所有者のご好意と関係者のご協力によって、建物の終局耐力を調査できる倒壊実験を実施することにしました。加力方法は、建物の変形および倒壊方向を確実に制御するために変形制御の 2 点加力としました。また建物北側に反力を取れないことから南側への一方向加力とし、反力としてクローラ式油圧ショベル(自重 約 10tw)を 2 台配置しました。加力装置には、倒壊まで大きな変形を伴う加力を行う必要があるために、チェーンブロック(容量 5tf)とチェーンスリングを組み合わせ、荷重検出ロードセルを直列接続して各加力点と重機を結びました。これらは水平加力方向の接続位置と形状を保持するために仮設資材で仮支持させました。最終倒壊時には急激な荷重変化や急変形も考えられましたので、安全のために周囲の保護養生と安全区画を徹底し、また加力装置からはワイヤーロープを排除しました。

建物南西隅の A1 柱と南東隅の A9 柱の東西傾斜量を管理しながら、各加力点に近い F4 柱と F6 柱の南北傾斜角を目標変形角に揃えるようにして加力した結果、1/10 rad 時に最大荷重 53.2kN を記録し、変形急進前の 1/5.5 rad 時に約 40kN、倒壊直前の 1/4.1 rad 時でも約 20kN と、大きな変形でも復元力が持続しました。最大荷重までは、9 通りの土壁によって建物西側に比べて東側の剛性が高く、ほぼ 2 倍の復元力を発揮していました。西側加力点では 1/20 rad、東側では 1/7.5 rad 時にそれぞれ最大荷重を記録していましたが、1/6 rad 以降で 9 通りの柱が開口部垂壁下端付近から順次折損したため、建物全体として変形急進が起こり、それらが倒壊のきっかけになりました。（軽部正彦）



建物及び加力装置の配置図



加力装置系統図

水平加力の状況（全景）

倒壊時の状況（全景）

倒壊時の状況（加力装置付近）

倒壊時の状況

（西側養生）

倒壊時の状況

（東側養生）

倒壊時の状況

（建物北側）

水平加力実験時の柱の傾斜について

建物を長い期間使用するうちに、柱の不均一な沈み込みや傾斜が生じることがあります。また、地震などの地盤の動きによって、建物全体が傾斜することもあります。そのような状態では、居住性(住み心地)に影響を与えるだけでなく、地震や台風に対する抵抗力も低下してしまうおそれがあります。

今回の調査対象は、建築後 116 年を経過する民家でしたので、建物の傾斜については分からないことが多くありました。そこで、水平加力実験の間にそれぞれの柱がどのように傾くか、また実験後にどのくらい傾きが回復するかを測定しました。

このような実験では、通常、変位計と呼ばれる電気的センサーを使います。変位計は 1/1000㎜ という高い精度で測定できますが、はじめの状態からどれだけ変位したかが測定できるだけで、地面に対する柱の傾きを測定することはできません。そこで、下げ振りと呼ばれる道具を使って、柱の傾きを測定することにしました(写真 1)。おもりを付けた糸の上端を持つと、糸は重力の方向(まっすぐ下)を向きます。糸と柱の側面がどれだけ角度を持つかを測定すれば、柱の傾きが簡単に測定できます。

初期(力を加える前の状態)と、加力点(力を加えているところ)の傾きが 1/100 rad (柱の長さ1㎜あたり1㎝の傾き)、1/60 rad、1/30 rad、1/15 rad それぞれとなったときと除荷後(力をゆるめたとき)の各段階で柱の傾きを測定しました。

写真 1．柱の傾きの測定

初期の柱の傾きを見ると、建物は反時計回りに回転するような変形をしていました(図 1)。建物全体としては傾いていませんでしたが、長い年月の間に建物がねじれてしまっていたようです。建物に力を加えると、柱は力の方向(まっすぐ南向き)に傾きますが、力を緩めると傾きは小さくなっ

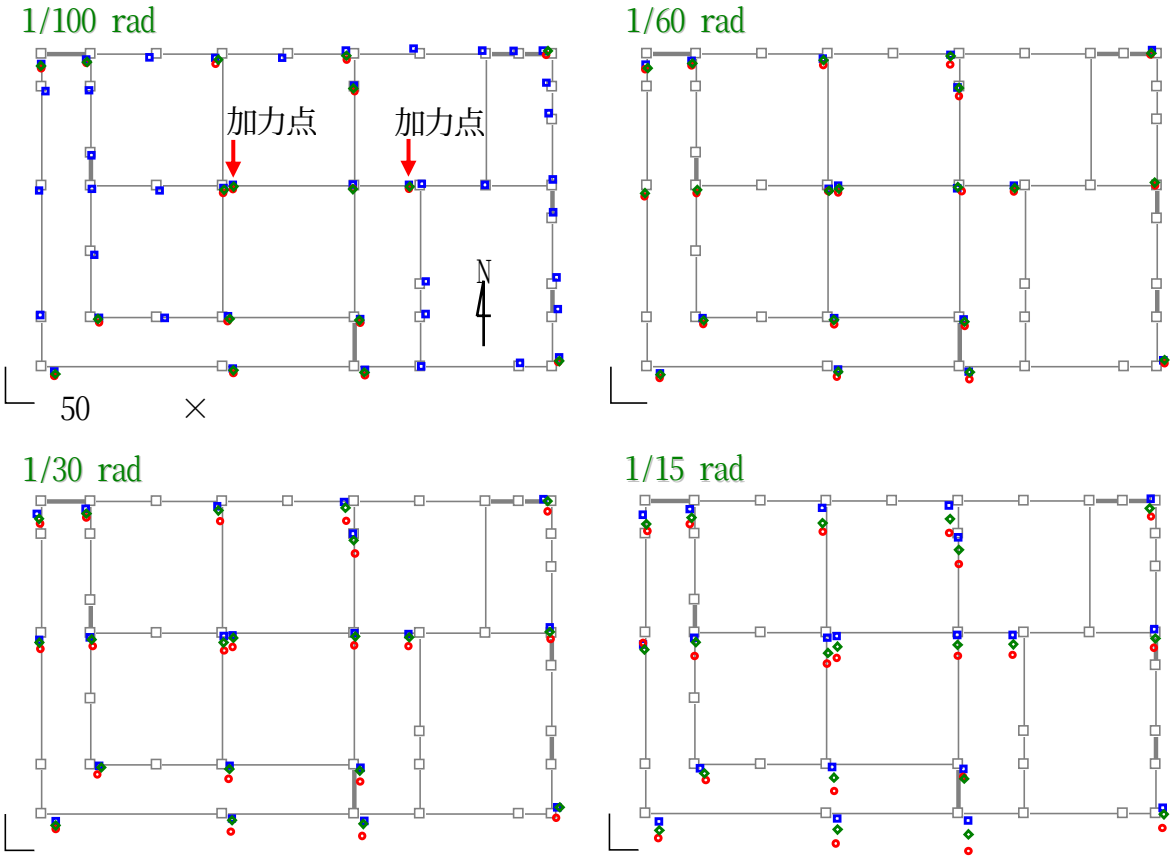


図1．加力中の各柱の傾き
初期(加力前):□，加力時:○，除荷後:◇

て、元の方向に戻ろうとします。大きな力を加えて建物の変形が大きくなるようにすると、柱の傾きは大きくなり、元に戻る割合は小さくなります。しかし、各段階の柱の傾きを加力点の傾きと比べると、ほぼ一致していました(図2)。このことは、建物に加えられた力が建物の隅々まで伝えられ、建物全体で負担されていたことを示します。建物内で力が分散されれば、一か所で負担する力は小さくなります。実験の結果から、古い建物には加えられた力を分散させることで効率よく力に耐える性能があることがわかりました。(渋沢龍也)

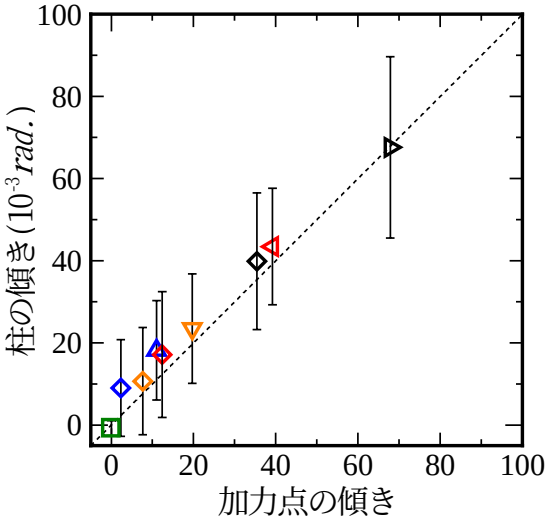


図2．加力点と柱の傾きの比較
初期:□,1/100 加力時:△，1/100 除荷後:◇，
1/60 加力時:▽，1/60 除荷後:◇，

1/30 加力時:◁，1/30 除荷後:◇，
1/15 加力時:▷，1/15 除荷後:◇.

コラム・つくば市周辺の民家

一口に「民家」といっても、なかなか定義が難しいのですが、戦前までに建てられた古い住宅が民家であると考えると、まだまだわが国にはたくさんの民家が残っています。つくば研究学園都市がある茨城県南部にも、今回の研究の対象となったような民家が、あちこちに見受けられます。またそのような民家が古い町並みを形成しているところもあります。

本研究のように、木質構造学の研究対象として民家を見るのではなくて、社会見学として民家を見て歩くのも、色々と新しい発見があってなかなか楽しいものです。もちろん、民家の多くには実際に人が住んでいますから、内部を見学したいと思ってもそう簡単には見せてもらえません。ただ、予め連絡しておけば比較的簡単に見せてもらえるところもありますし、いわゆる民家園のような形式で市町村が一般に公開しているところもあります。ここではつくば市の周辺で手軽に見学できるいくつかの民家をご紹介しましょう。

1. 農家

つくばセンター北側の中央公園にある「つくば市立さくら民家園」では、つくば地方の伝統的な茅葺き農家が一般に公開されています。この農家は昭和 50 年代まで実際に使われていたものを、解体した後に現在地に移転したものです。建築されたのが 18 世紀末ですから、この農家は今回調査を行った民家より 1 世紀前の建物ということになります。ただ、勾配が急な寄せ棟の直屋（すごや）であること、東側に土間があり、座敷、奥座敷、部屋、茶の間の四つ間構成であるところなど、構造や平面計画は今回調査を行った民家とよく似ています。間口 8 間、奥行き 5 間と建築面積もそれほど変わりません。

写真 1　さくら民家園の農家

このような茅葺き屋根の農家が数多く残っているのが、つくば市の北に位置する八郷町です。ここには50棟をこえる「萱葺き民家」が点在しており、全国的にも貴重な地域として有名です。ただ、その多くは個人所有であり、日常的な生活の場になっているものも多く、公開されてはいません。ただし、見学を希望する方のために、八郷町観光協会には「萱葺き民家めぐりマップ」が用意されています。

写真2　坂野家住宅主屋

もう少し大型の農家で一般に公開されているのが、つくば市の西に位置する水海道市にある坂野家住宅です。ここの主屋（しゅや）は18世紀初期の建築ですが、豪壮な小屋組などに、当時の豪農ぶりがよくあらわれています。また隣接して明治期に建てられた書院もあり、ここでは当時の在来構法住宅の構造も見学することが出来ます。

写真3　坂野家書院

坂野家住宅と同じような江戸時代の豪農の農家が、伊奈町郷土資料館（別名：結城三百石記念館）として一般公開されています。ここでは主屋の他に、長屋門や蔵なども見学することが出来ます。

写真4　伊奈町郷土資料館の長屋門

2. 町屋

つくば市の東に位置する土浦市は、古くから水陸交通の要所として商業が栄えた町です。その中心地であった中城通りに、江戸時代の商家が数軒残されています。その一部が商家歴史展示館として一般に公開されており、いわゆる蔵づくりの構造が内部から見学できます。また、当時の商家の生活がわかる様々な民具等も展示されています。なお、この近所にある亀城公園の東櫓も復元されて一般に公開されています。もちろん、これは民家ではありませんが、太いマツ材を組んだ城郭建築の構造が見学できます。

つくば市の北にある真壁町も、江戸時代から明治・大正時代にかけて商業で栄えた町です。中心地区のいたる所に木造の店舗、土蔵、長屋門などが残されています。その多く（62 棟）はいわゆる国の登録文化財となっています。なお、歴史民俗資料館や旧真壁郵便局には見学者用のマップが用意されています。

（林　知行）

写真 5　亀城公園の東櫓

写真 6　土浦の店蔵

写真 7　真壁町の商家

写真でみる実験の様子

■実験前の様子

建物の外観：和風の重厚なたたずまいです。数回の改修を経て、現在に至ります。調査開始時の外装は金属サイディング張り、またはモルタル下地漆喰塗りで、建築当時の土壁や板壁の上に施工してありました。窓にはアルミサッシが取り付けてありました。

もともと屋根は茅葺きですが、現在ではその上に金属板を葺いてありました。また南側下野部分は瓦葺きとなっていました。

建物の内部：数回の改修によって、フローリング床や白い壁紙を張った壁など現代的な内装となっています。

柱や梁があらわしとなっていました。中央の矢印の柱が大黒柱です。

小屋裏の様子：100 年余の塵が積もり、表面は煤けていました。垂木には竹が使われており、茅を藁（わら）で結わえてありました。

表面が真っ黒く煤けていましたが、これは棟上げしたときに使われた祭具と思われます。屋根裏から出てきました。

このほかにも、お札や古い新聞紙（昭和初期）なども発見されました。

■劣化調査

まず、床板、外装の金属サイディングやモルタル、アルミサッシを撤去し、部材が直接目にふれる様にしました。次に、部材の樹種や、部材に生じた劣化の種類やその度合いを調査しました。

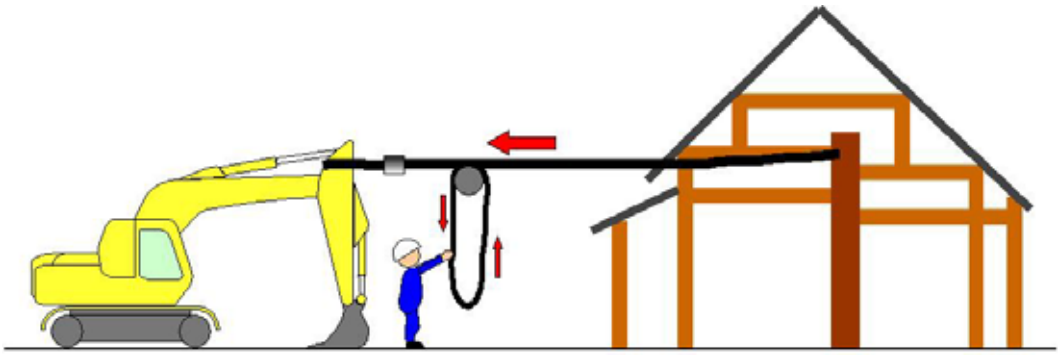
床下を開けると、同じ用途の部材でも、曲がったもの、さまざまな太さのものが使われていました。最近の木造では、このような材は使われることはまず無いため、大変興味深いところです。

外装やモルタルを撤去すると、建てられた当初の土壁が表れてきました。土壁は、土と藁（わら）を練ったものを、竹を編んだ骨組みに塗り込んで作られます。地震で壁が痛んだ際、その補修が簡単なことが利点として挙げられます。

これは脱衣場に隣接する台所の床組の部材です。著しく腐朽していることが分かります（矢印）。一般に、風呂場、洗面所、台所などの水回りは水分が滞留しやすく、部材が腐朽しやすいと言われています。

これは大黒柱の根元です。樹種はケヤキを使用してありますが、若干の虫食いの痕が散見されました（矢印）。しかし、材自体は乾燥しており、部分的な劣化にとどまっているようです。建物の床下が、空気を通しやすいつくりになっていることから、水分が留まりにくいと考えられます。

■構造実験



この実験では、建物を矢印の方向に引っ張ることで、倒壊に至るまでの耐力と、建物の傾斜の関係を調査します。

建物に力を加えるとき、バランス良く荷重が伝わらなければ、建物全体で抵抗しません。この場合では、バランス良く引っ張るために、大黒柱に掛かる梁と、長者柱に掛かる梁の２ヶ所を同時に引っ張ることとしました。

建物のあちこちに、柱の引き抜けや、土台のずれなどを測るセンサーを設置しました。これにより、建物に荷重が加わって変形していく様子を数値的に捉えることができます。

建物に与えた荷重を除いたとき、変形も回復します。しかし、荷重を与えた後、建物に変形が残留することがあります。そこで、ある一定レベルの荷重を与えるたびに柱の傾きを測定し、その特徴を調べています。

（青井秀樹）

左の写真は、建物が倒壊する瞬間を連続的に撮影したものです。

建物が傾くにつれて、土壁の土が剥落したり、柱が折れたりして、目に見える形で損傷が出てきました。建物は、ミシミシと音を立ててつつも変形に耐えていましたが、あるとき一気に倒壊に至りました。

実験時のビデオカメラでの映像を見る限りでは、きっかけとなったのは建物の内部の部材が外れたためと考えられますが、詳細は分かっていません。

民家で一般的に用いられる接合方法には、まだ解明されていないことも多く、今後の研究が待たれています。

執筆者：（敬称略）

■構造利用研究領域

　領域長　神谷文夫

　材料接合研究室　室長　林 知行

　強度性能評価担当チーム長　長尾博文

　構造性能評価担当チーム長　杉本健一

　材料接合研究室　軽部正彦、原田真樹

　木質構造居住環境研究室　青井秀樹

■木材改質研究領域

　木材保存研究室　桃原郁夫（当時）

■木材特性研究領域

　組織材質研究室　山下香菜

■複合材料研究領域

　複合化研究室　渋沢龍也

実験協力：（敬称略）

■（株）一条工務店

■（株）ポラス暮し科学研究所

以下、森林総合研究所　所内

■研究管理官（循環利用研究担当）　山本幸一

■企画調整部

　研究協力科　科長　田中俊成

■総務部　総務課

　第三領域庶務係　係長　佐藤 温（当時）

第三領域庶務係　日比谷雄樹

■複合材料研究領域

領域長　鈴木憲太郎

複合化研究室　室長　秦野恭典

積層接着研究室　宮武 敦（当時）、平松 靖

■木材特性研究領域

識別データベース化担当チーム長　能城修一

■加工技術研究領域

木材乾燥研究室　石川（本田）敦子、吉田貴紘

木工担当　板倉保好、鈴木茂年、野本千文、山崎正敏、小島孝夫、圷 二郎、下澤茂樹、川田智也

■樹木化学研究領域

樹木抽出成分研究室　菱山正二郎

■木材改質研究領域

木材保存研究室　大村和香子、松永浩史

■構造利用研究領域

材料接合研究室　加藤英雄、井道裕史、Yin Yafang（当時 JICA 研修生）、大西裕二（当時研修生）

木質構造居住環境研究室　三井信宏、恒次祐子、吉川久寿恵

他　所内各位

編集：木質構造居住環境研究室　青井秀樹

謝　辞

今回の一連の調査・実験では、当研究所に所属する木材や木質構造に関わる研究者が智恵を出し合い、様々な調査と大がかりな実験を行うことができました。そして、その成果を多くの学術雑誌や学会等で発表することで、たくさんの人に新しい知見を広めることができました。

この一連の調査・実験でこうした多くの成果を発表することができたのは、実に多くの人のご協力があったからこそできたと言えます。とりわけ（株）一条工務店様にはスケジュールの調整の上で全面的なご協力を賜り、また実験時には重機や足場の確保、解体職人さんの手配をはじめ、様々なサポートを戴きました。この場をお借りして心より深く御礼申し上げます。

そしてなによりも、このような大変貴重な機会に恵まれたのは、つくば市郊外にお住まいのとある方のご厚意によるものでありました。約１ヶ月の長きに渡っての調査・実験に快く承諾してくださったばかりか、実験の休憩時間にはお茶とお菓子を用意して我々をお気遣いくださり、我々としては最後までご厚意に甘えるばかりでした。この場をお借りして、衷心より深く御礼申し上げると共に、末永いご健康とご発展を心よりお祈り申し上げます。

■この調査・実験の結果を元に、以下の発表を行いました

1) 杉本健一、三井信宏、青井秀樹、平松靖：築後 116 年経過した古民家の調査 ー常時微動測定および強制振動実験ー、日本木材学会大会研究発表要旨集、vol54、pp.193、2004

2) 神谷文夫、三井信宏、桃原郁夫、大村和香子、松永浩史、杉本健一、青井秀樹、軽部正彦：築後 116 年経過した古民家の調査　ー劣化と柱脚部の挙動についてー、日本木材学会大会研究発表要旨集、vol54、pp.194、2004

3) 軽部正彦、杉本健一、渋沢龍也、青井秀樹、三井信宏、林知行：築後 116 年経過した古民家の調査 ー静的加力による倒壊実験ー、日本木材学会大会研究発表要旨集、vol54、pp.195、2004

4) 渋沢龍也、軽部正彦、平松靖、宮武敦、杉本健一、林知行（森林総研）、Ying Yafang（中国林科院・木工研）：築後 116 年経過した古民家の調査 ー静的加力時の柱の傾斜についてー、日本木材学会大会研究発表要旨集、vol54、pp.559、2004

5) 杉本健一、軽部正彦、渋沢龍也、長尾博文、桃原郁夫、原田真樹、青井秀樹、林知行、神谷文夫、鈴木憲太郎：築後 116 年経過した古民家の調査 ー調査概要ー、日本木材学会大会研究発表要旨集、vol54、pp.574、2004

6) 軽部正彦、杉本健一、渋沢龍也、青井秀樹、三井信宏、林知行：明治 20 年に建築された伝統的木造住宅の調査 その 2 静的加力および倒壊実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1：83-84、2004

7) 原田真樹、渋沢龍也、杉本健一、軽部正彦、林知行、桃原郁夫、松永浩史、大村和香子：明治 20 年に建築された伝統的木造住宅の調査　その 3　温湿度環境が部材の含水率および劣化におよぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1：153-154、2004

8) 杉本健一：築 116 年の伝統的木造住宅の倒壊実験、木材工業、59(9)：418-421、2004

9) 杉本健一、青井秀樹、軽部正彦、原田真樹、長尾博文、三井信宏、林知行、神谷文夫、渋沢龍也、鈴木憲太郎、桃原郁夫：民家は地震でどれくらい傾いたら倒れるか？ 研究の“森”から（森林総合研究所企画調整部研究情報科広報係 編集発行）第 137 号、2005

㈱ 森林総合研究所

本冊子に掲載された記事を許可なく転載することを禁じます。

(C) Copyright 2005 FFPRI All Rights Reserved.