

火災後の部材の継続的使用を前提とした大規模木造建築の防耐火計画法

～柱の火害診断方法及び改修方法の提案～

	正会員	○ 加來千紘*1	正会員	長谷見雄二*2	正会員	安井昇*3
	〃	保川みずほ*1	〃	鈴木あさ美*4	〃	上川大輔*5
ケヤキ スギ ヤング係数	〃	亀山直央*6	〃	小野徹郎*7	〃	腰原幹雄*8
柱 火害診断 改修	〃	長尾博文*9	〃	萩原一郎*10	〃	遊佐秀逸*11

1.はじめに

近年、木造建築は森林資源の管理や低炭素化等、様々な方面から注目されており、2010年には、公共建築物木材利用促進法が施行され、学校建築をはじめとする大規模建築への新たな木材利用の事例が増えてきている。これまで大規模木造建築の多くは寺社建築であったが、このような流れを受け、大規模木造建築の火災被害への対処法は重要な検討項目のひとつとなっている。

大規模木造建築で火災が発生した場合、建物の規模が大きいことから火災被害が部分的となる場合も多く、部屋単位や部材単位での改修が必要となることが考えられる。また木材は加熱を受けると炭化層が形成され、燃焼が比較的ゆっくりと進む特性があるため、木現しの大断面部材の場合は、加熱後も炭化せずに残る断面の割合が大きく力学的性能を確保できる可能性がある。既往研究では、実際に火災被害を受けた大規模木造体育館の集成材の部材に対し、曲げ試験や載荷耐火試験等を行なった結果、健全材と同程度の接着性能、曲げ性能、耐火性能を確認したという事例も報告されている¹⁾。これらの理由により大規模木造建築の場合、部材断面が大きいことから、木現しであっても火災被害の程度に応じた改修を行うことで、火災後も柱やはりを継続的に使用することが可能であると考えられる。しかし現状では、木材における高温時の力学的性能は明らかにされているが、再び常温まで冷やされた場合の力学的性能は把握されていない。

そこで本研究では、まずケヤキ(広葉樹)及びスギ(針葉樹)の無欠点小試験体を用いた加熱冷却後の曲げ試験を行い、木材の加熱冷却後の力学的性能を把握する。その後、はりの損傷よりも柱の損傷の方が建物崩壊への影響が大きいことを考慮し、火災被害を受けた柱への火害診断方法及び改修方法の提案を行う。

2.無欠点小試験体を用いた加熱冷却後の曲げ試験

2-1 実験目的

木材の柱やはり等の内部温度が上昇した場合、ヤング係数が低下し部材の構造耐力に影響が出ることが知られている。しかし、加熱後再び常温まで冷やされた場合の木材のヤング係数の変化については把握されていない。

そこで本実験では、曲げ試験によりケヤキ(広葉樹製材)とスギ(針葉樹製材)の常温時、高温時及び加熱冷却後のヤ

ング係数と曲げ強度を算出し、加熱後の冷却が木材に与える影響を把握する。

2-2 実験概要

2-2-1 試験体概要及び試験方法

試験体には含水率が平衡状態の1本の丸太から切り出した、寸法20mm×20mm×320mm、2方征、無欠点の木片を使用する(図1)。加熱時の含水率低下による影響を排除するため、60℃程度の乾燥機の中で含水率を2%程度まで下げ、重量を測定してから試験を行う。

試験方法はJISZ2101「木材の曲げ試験方法」に準拠する、280mmスパンの3点曲げ方法で加力し、試験装置は、温度調整炉付きの圧縮試験機を使用する(写真1)。

2-2-2 実験の手順

本実験の手順を図2に示す。まず、試験体の強度が低下しない範囲(ケヤキ0.5kN、スギ0.2kN)で加力を行う曲げ試験(以下、非破壊曲げ試験)で、全試験体の常温時ヤング係数を把握し、全試験体をa-eの5グループに分ける。aグループの試験体数は16本、b-eの試験体数は各グループ32本とする。

aグループは試験体が破断に至るまで加力する曲げ試験(以下、破壊曲げ試験)を常温のままで行い、ヤング係数及び曲げ強度を算出する。b-eグループは、それぞれ100℃、150℃、200℃、250℃(スギは230℃)まで加熱し、各グループの半数の試験体は高温のまま破壊曲げ試験を行い、高温時ヤング係数及び曲げ強度を算出する(b1、c1、d1、e1)。また残りの半数の試験体は、加熱炉から取り出し、含水率が上昇しないようデシケータの中で、常温まで自然冷却してから破壊曲げ試験を行い、冷却後ヤング係数及び曲げ強度を算出する(b2、c2、d2、e2)。なお非破壊曲げ試験、破壊曲げ試験共に載荷位置はスパンの中央部、載荷速度は10mm/分とする。

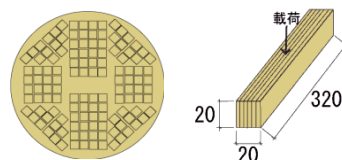


図1 試験体図

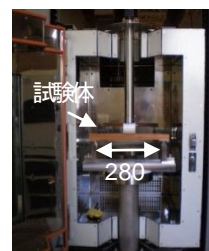


写真1 温度調整炉付き圧縮試験機

Study on the continuous use of members after a fire
for Large-scale Timber-based Buildings

~Suggestion to fire damage investigation and renovation of Post~

KAKU Chihiro, HASEMI Yuji, YASUI Noboru,
YASUKAWA Mizuho, SUZUKI Asami, KAMIKAWA Daisuke,
KAMEYAMA Naohisa, ONO Tetsuro, KOSHIHARA Mikio,
NAGAO Hirofumi, HAGIWARA Ichiro, YUSA Shuitsu

2-2-3 検討項目

- ①加熱温度の影響：加熱温度が木材のヤング係数及び曲げ強度に与える影響を検証する。
- ②加熱後の冷却の影響：高温時ヤング係数と冷却後ヤング係数、高温時曲げ強度と冷却後曲げ強度を比較し、加熱後の冷却がヤング係数に与える影響を検証する。
- ③樹種の影響：ケヤキ(広葉樹製材) とスギ(針葉樹製材) を用いて実験を行い、樹種による比較を行う。

2-3 実験結果及び考察

2-3-1 ヤング係数 (図 3)

常温時ヤング係数を 1 とした時の高温時ヤング係数の比を高温時ヤング係数残存率とする。また常温時ヤング係数を 1 とした時の冷却後ヤング係数の比を冷却後ヤング係数残存率とする。

①高温時ヤング係数残存率(表 1)

高温時ヤング係数残存率の算術平均は、100℃~200℃の加熱温度でケヤキに対しスギの方が少し高い値となったが、ケヤキ・スギ共に加熱温度の上昇に伴いヤング係数の低下が急速に進むことを確認した。

②冷却後ヤング係数残存率(表 2)

冷却後ヤング係数残存率の値にはばらつきがあるが、最も低い値でケヤキ 250℃加熱冷却後の 0.79 であったため、ケヤキ・スギ共に加熱を受けた後も常温まで冷却されることで、常温時の約 8 割のヤング係数を確保することがわかった。

2-3-2 曲げ強度(図 4, 表 3,4)

破壊曲げ試験時の最大荷重より試験体の曲げ強度を算出した。常温で破壊した試験体の曲げ強度を常温時曲げ強度、加熱温度のまま破壊した試験体の曲げ強度を高温時曲げ強度、加熱後常温まで自然冷却してから破壊した試験体の曲げ強度を冷却後曲げ強度とする。

①高温時曲げ強度

高温時曲げ強度は、ケヤキ・スギ共にばらつきはあるが、加熱温度の上昇に伴い低下する傾向にあることがわかった。

②冷却後曲げ強度

ケヤキ・スギ共に、100℃及び 150℃の加熱温度では、冷却後曲げ強度は常温時曲げ強度と同程度であった。しかし 200℃以上の加熱温度では、冷却後曲げ強度の低下が急速に進み、最高加熱温度では、複数の試験体の冷却後曲げ強度が常温時曲げ強度に対し 5 割程度まで低下し

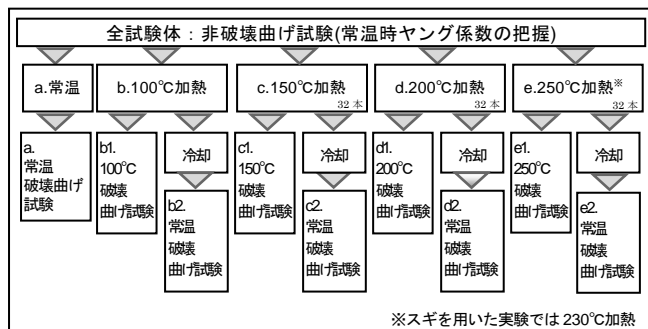


図 2 実験の手順

た。これにより、ケヤキ・スギ共に 200℃以上で加熱された後は、常温まで冷却されても曲げ強度は確保できないと考えられる。

2-3-3 ヤング係数と曲げ強度の関係

実験結果よりヤング係数と曲げ強度の関係を考察した結果、高温時にはケヤキ・スギ共に加熱温度の上昇に伴いどちらも低下することを確認した。

一方、加熱冷却後のヤング係数及び曲げ強度の低下には異なる傾向が見られ、ケヤキ・スギ共に 100℃と 150℃の加熱温度では、常温時とほぼ同じ範囲に値が分布しているのに対し、200℃以上の加熱温度では、曲げ強度の方がヤング係数よりも大きく低下している(図 5,6)。これにより加熱冷却後ヤング係数と曲げ強度の関係は、常温時とは異なる傾向を示すことがわかった。

2-4 火害診断方法の提案に向けて

火害診断方法の提案では、本実験結果を用いて火災被害を受けた柱の構造耐力を確認する。部材温度が 150℃以下である場合は、冷却後のヤング係数及び曲げ強度が

表 1 高温時ヤング係数残存率

樹種	ケヤキ					スギ				
	常温	100℃	150℃	200℃	250℃	常温	100℃	150℃	200℃	230℃
最大値	1.02	0.92	0.85	0.62	0.41	1.04	0.96	0.88	0.71	0.58
最小値	0.98	0.82	0.76	0.45	0.19	0.86	0.86	0.79	0.60	0.37
算術平均	1.00	0.87	0.81	0.53	0.31	0.99	0.91	0.84	0.66	0.49

表 2 冷却後ヤング係数残存率

樹種	ケヤキ					スギ				
	常温	100℃	150℃	200℃	250℃	常温	100℃	150℃	200℃	230℃
最大値	1.02	1.02	1.01	1.01	1.12	1.04	1.06	1.07	1.10	1.04
最小値	0.98	0.92	0.93	0.93	0.79	0.86	0.95	0.99	0.95	0.90
算術平均	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.99	1.01	1.02	1.01	0.97

表 3 高温時曲げ強度(単位 N/mm²)

樹種	ケヤキ					スギ				
	常温	100℃	150℃	200℃	250℃	常温	100℃	150℃	200℃	230℃
最大値	155.5	111.4	88.7	53.8	26.4	86.9	61.6	52.9	37.0	23.8
最小値	56.4	63.1	55.0	27.4	13.2	55.1	43.4	35.6	22.7	16.8
算術平均	119.2	83.2	72.7	39.0	18.6	73.9	51.1	44.3	30.4	19.9

表 4 冷却後曲げ強度(単位 N/mm²)

樹種	ケヤキ					スギ				
	常温	100℃	150℃	200℃	250℃	常温	100℃	150℃	200℃	230℃
最大値	155.5	155.5	154.6	134.5	79.6	86.9	90.5	101.9	84.4	74.6
最小値	56.4	83.9	72.4	68.9	42.0	55.1	58.1	66.9	39.8	36.1
算術平均	119.2	120.5	113.2	99.7	55.3	73.9	76.9	77.2	67.4	58.9

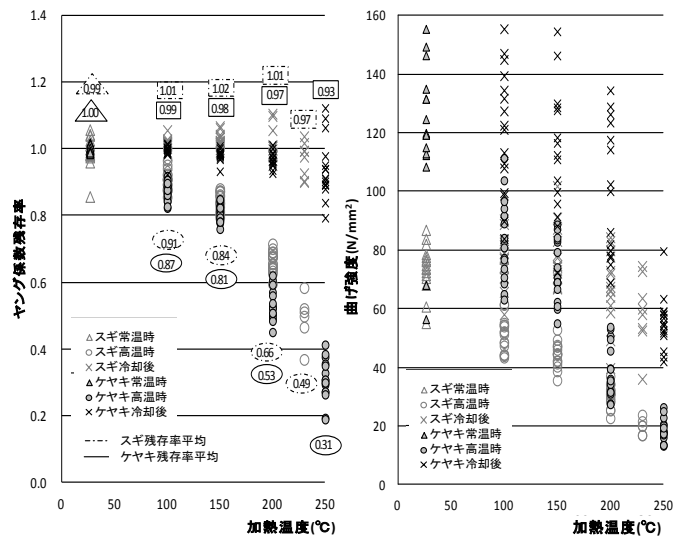


図 3 加熱温度とヤング係数残存率

図 4 加熱温度と曲げ強度

常温時の値と同程度であるため、構造耐力が確保できるものと仮定する。また部材温度が200℃以上の場合には、冷却後のヤング係数のばらつきが大きく、曲げ強度の低下も急速に進むため、構造耐力が確保できないものとする。

3. 火災被害を受けた柱の火災診断方法及び改修方法提案

研究背景で述べたように、大規模木造建築においては小規模な火災被害であれば、被害の程度に応じた改修を行うことで、部材の継続的使用が可能であると考えられる。そこで本提案では木の躯体を現しとした大規模木造建築を想定し、柱への火災診断方法及び改修方法の提案を行う(図7)。火災診断では、加熱冷却後の構造耐力や防耐火性能を検証し、継続的使用の可否や再度火災が起きた場合の防耐火性能の有無を判断する。その後、防耐火性能が不足と判断した柱に対し、必要な防耐火性能を満たすための改修方法を提案する。

3-1 火災診断方法

3-1-1 構造耐力の検証

火災被害を受けた柱の加熱冷却後の構造耐力を確認し、柱の継続的使用の可能性を検証する。まず火災後の柱から炭化層を削り、柱の残存断面の寸法を測定する。次に非損傷性予測手法²⁾の加熱時部材内温度分布を応用し、火災後の柱の内部温度上昇及びヤング係数の低下を仮定する。非損傷性予測手法の加熱時部材内部温度分布の設定は、炭化端から10mmごとに300℃、200℃、80℃、50℃以下である。この設定と2-4で示した設定により加熱冷却後の柱のヤング係数は、炭化端~20mmでは0(N/mm²)、20mmより内部では低下しないものとする。仮定したヤング係数の低下を柱の断面積の減少に置き換え、推定断面を算出する。算出した推定断面を断面形状とし、許容応力度計算等を行い、加熱冷却後の柱が構造規定を満たすことを確認する。

3-1-2 防耐火性能の検証

火災被害を受けた柱を、その後も継続的に使用するた

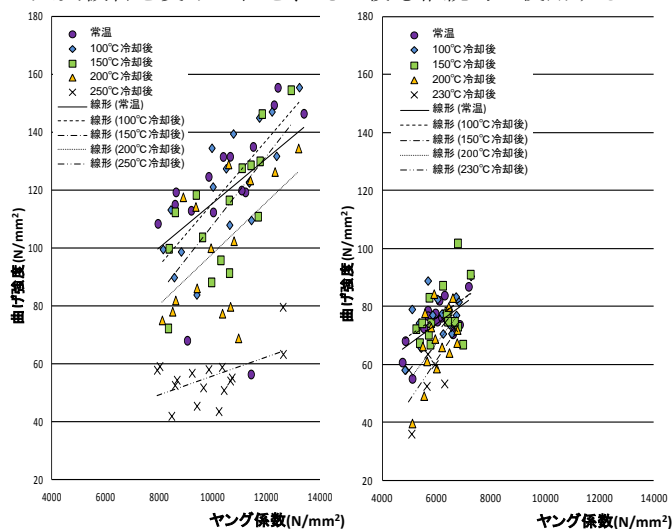


図5 ヤング係数と曲げ強度 (ケヤキ冷却後)

図6 ヤング係数と曲げ強度 (スギ冷却後)

めには、改修後に再度火災が発生する場合を想定し、柱の防耐火性能を確保する必要がある。現行の建築基準法においては、木の躯体を現しとした大規模木造建築を建てるにあたって、柱に対して燃えしろ設計を行い、防耐火性能を確認する必要がある。燃えしろ設計を行う際に使用できる材料は、JAS(日本農林規格)に規定されている構造用集成材、構造用単板積層材及び含水率15%または20%以下の構造用製材のみである。しかし既存の寺社建築においては、JASに防耐火性能の規定がない木材が柱に用いられる等、火災後の防耐火性能が不明確な場合も多い。

そこで本研究では、検証する柱に、荷重に対する断面積に余裕がない柱(図7のType-1)と荷重に対する断面積に余裕がある柱(図7のType-2)の2通りの柱があることを考慮し、火災後の柱にどの程度の改修が必要なのかを明確にする方法として、以下の3つの検証方法を提案する。なお、検証を行う火災後の柱の断面形状は構造耐力検証の際に算出した推定断面とする。

■検証方法 A 燃えしろ寸法に基づく検証: 火災前に燃えしろ設計が行われ、荷重に対する断面積に余裕がない

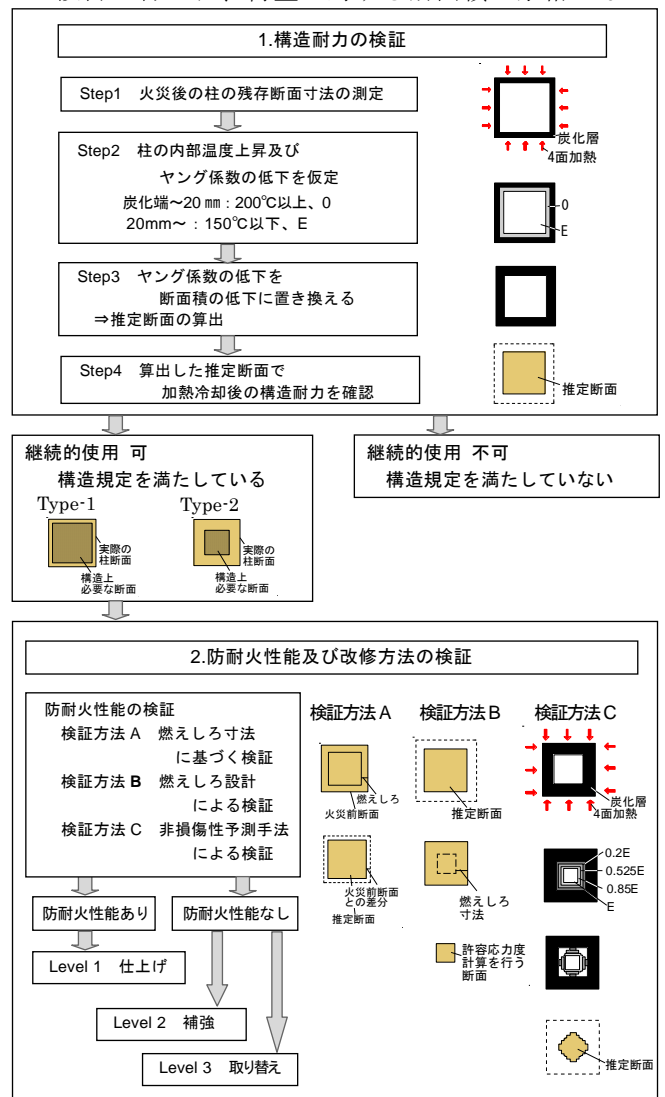


図7 柱の火災診断及び改修フローチャート

Type-1の柱を対象とする。推定断面と火災前の柱の断面との寸法の差分により、不足する燃えしろを明確にすることで火災後の防耐火性能を検証する。

■**検証方法 B 燃えしろ設計による検証**：荷重に対する断面積に余裕がある Type-2 の柱で、柱の木材に JAS 材が用いられている場合を対象とする。火災後の柱の断面形状を推定断面とし、燃えしろ設計を行うことで防耐火性能を検証する。

■**検証方法 C 非損傷性予測手法による検証**：荷重に対する断面積に余裕がある type-2 の柱で、柱の木材が JAS の規格外である材の場合を対象とする。火災後の柱の断面形状を推定断面とし、既往研究で開発した非損傷性予測手法を用いて柱の防耐火性能を検証する。

3-2 改修方法の提案

火災診断で検証した加熱冷却後の柱の防耐火性能の有無を考慮し、改修レベルを「Level1 仕上げ」、「Level2 補強」、「Level3 取り替え」の3段階に分類する。

■**Level1 仕上げ**：火災被害を受けた後も防耐火性能ありと判断した柱を対象に、柱表面の仕上げを行う。炭化層を削り、パテによる柱表面の均一化を行い、目標とする柱の太さに合わせ仕上材を足す。

■**Level2 補強**：火災被害を受けた後に、再度火災が発生した場合は防耐火性能なしと判断した柱を対象とし補強を行う。炭化層及び炭化端から 20mm の部位を削り、パテによる柱表面の均一化を行った後、再度火災が発生する状況を想定し、1 時間準耐火性能を確保するよう材を足して補強する。改修後の柱表面が木材であることを前提とし、以下の3つの補強方法を提案する。

- ・補強方法①：下地材(木材)+補強材(木材)+ビス (図 8)
- ・補強方法②：接着剤+補強材(木材)+ビス (図 9)
- ・補強方法③：強化せっこうボード+仕上材(木材)+ビス (図 10)

①,②は木材のみによる復元方法であるため、告示で定められている 1 時間準耐火構造の燃えしろ寸法を満たす木材(構造用集成材 45mm、構造用製材 60mm)で補強を行う。①は木材の板を格子状にした棧を下地材に使用し、その上から補強材(木材)をビスで留める。②は、耐熱性能があり現場施工が可能な水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤とビスを用いて、補強材(木材)を貼り付ける。

一方③は、強化せっこうボード 12.5mm と木材 15mm を貼り付ける(1 時間準耐火構造の大臣認定を取得した壁の仕様)。この方法では木材のみで補強する場合よりも薄い材での改修が可能となる。また①～③のビス留めの際には、たる埋めを行うことで意匠的に支障が少ないよう

にする。

■**Level3 取り替え**：火災被害を受けた後に、再度火災が発生した場合は防耐火性能なしと判断した柱で、施工条件やコスト等により補強が困難な場合には、根継ぎ等の施工方法により改修を行う。

4.まとめ

無欠点小試験体を用いた曲げ試験と火災被害を受けた柱の火災診断方法及び改修方法について、以下の知見を得た。

- ・ケヤキは 250℃、スギは 230℃まで加熱を受けた場合でも、常温まで自然冷却されることで健全材と同程度のヤング係数を確保することがわかった。
- ・ケヤキ・スギ共に 150℃以下で加熱された場合は、常温まで自然冷却されることで健全材と同程度の曲げ強度を確保することがわかった。
- ・加熱冷却後のヤング係数及び曲げ強度の低下の傾向には、ケヤキ・スギ間で、樹種による大きな差異は見られなかった。
- ・今後は、本研究で提案した補強の仕様や接着方法等における防耐火性能を把握し、より明確な改修方法を検証していく必要がある。
- ・また、はりや接合部等の他の部材における火災診断方法及び改修方法の検討も課題である。

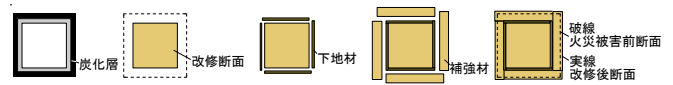


図 8 補強方法①:下地材+補強材(木材)+ビス

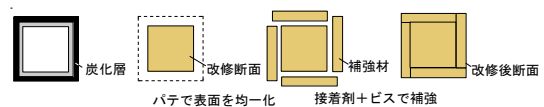


図 9 補強方法②:接着剤+補強材(木材)+ビス



図 10 補強方法③:強化せっこうボード+仕上材(木材)+ビス

【参考文献】

- 1) 長谷見雄二・鍵屋浩司・北後明彦・宮武敦：大規模集成木造体育館の火災調査：日本建築学会技術報告集第 17 号 2003.6
- 2) 澤野恵直・長谷見雄二・安井昇・小川敦史・平井宏幸・木村忠紀・山本幸一：伝統土壁構法間仕切壁の両面加熱時の防耐火性能：日本建築学会環境系論文集第 635 号 2009.1

【謝辞】

本研究を行うにあたり、日本建築学会伝統木造準耐火構造 WG の皆様にも多大なるご協力とご支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

*1 早稲田大学大学院
 *2 早稲田大学理工学術院教授・工博
 *3 早稲田大学理工学研究所客員研究員・博士(工学)
 *4 株式会社 大林組 (当時早稲田大学大学院)
 *5(独)森林総合研究所・博士(工学)
 *6 亀山建設(株)
 *7 椋山女学園大学教授・工博
 *8 東京大学生産技術研究所教授・博士(工学)
 *9(独)森林総合研究所
 *10(独)建築研究所・工博
 *11(財)ベターリビング・工博

*1 Graduate School of Waseda Univ.
 *2 Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Dr.Eng.
 *3 Visiting Researcher, RISE Waseda Univ, Ph.D.
 *4Obayashi Corporation (formerly Graduate Student, Waseda Univ.)
 *5 Forestry and Forest Products Research Institute,Dr.Eng.
 *6 Kameyama Construction
 *7 Prof., Sugiyama Jogakuen Univ., Dr.Eng.
 *8 Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr.Eng.
 *9 Forestry and Forest Products Research Institute
 *10 Building Research Institute
 *11 The Centre for Better Living, Dr.Eng.