

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22380095
 研究課題名（和文）CO₂の削減に貢献する各種木造ラーメン架構の提案とその耐力発現機構の解明
 研究課題名（英文）Proposal of Various Wooden Portal Frames Contribute to CO₂ Reduction and Analyses on Enhancement Mechanism of Their Structural Performance.

研究代表者
 小松 幸平 (KOMATSU KOHEI)
 京都大学・生存圏研究所・教授
 研究者番号：20283674

研究成果の概要（和文）：

CO₂を長期間固定する方法として、戸建て住宅や大規模な公共建築物を全て木造建築とすることは有効な方法であり、既に2006年に「木造低層公共建築物を促進させる法律」が施行されている。本研究はこの法律に沿って、高強度・高剛性、そして大地震にたいしても崩壊せず地震後に現状復帰可能な木造ラーメンフレーム構造を戸建て木造軸組構造住宅から3階建て大規模集成材構造建築物に至るまで安心・安全に適用できる技術を開発したものである。

研究成果の概要（英文）：

As a method of fixing CO₂ for long period, it is effective to make not only residential house but also large-scale public buildings to wooden structures. In fact, a "Law to promote the wooden low-rise public buildings" was enacted in 2006 in Japan. In cooperative with this law, this study intended to develop an innovative joint system which has high strength, high stiffness and high ductile performance that can survive even devastating earthquake without collapse and after then can reusable easily. We could make sure that this joint system could be applied safely and securely not only to residential wooden house but also large-scale three storey laminated timber frame structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2012年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：集成材ラーメン構造、ラグスクリューボルト、高張力ボルト、長孔摩擦接合、高靱性、高剛性、耐力壁併用木質ラーメン

1. 研究開始当初の背景

欧米では直交積層集成材パネルを多用した箱型高層木造建築を志向する傾向が強い。

しかし、日本では、5層以上の木造建築は建築基準法内の火災に関する法規上実現が難しいと考えられる。そこで、延べ床面積の大

大きな木造建築を志向することで、より多くのCO₂を固定することを意図して、壁だけではなく、柱・梁材でも外力の多くを負担し、自由空間を容易に確保できる各種木造ラーメン架構の幅広い活用を提案するに至った。

2. 研究の目的

日本政府が世界に公約したCO₂の大幅削減(25%)を実現させるためには、建築物を可能な限り長寿命な木造建築とすることが肝要である。戸建て木造住宅、中・大規模学校校舎、5層以下の集合住宅・行政機関の庁舎棟、大面積の各種工場棟、レストラン・娯楽施設等、木造で建築可能な構造は様々である。本課題では、これらの建築の一部、あるいは、全体をラーメン架構とすることを想定して、その規模と構造形態に応じて、最適と考えられるモーメント抵抗接合法の構造システムと設計法を提案し、その妥当性を実大実験や実大部分モデル実験を通じて検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 戸建て住宅用引きボルトラーメンの改良

戸建て住宅においても、木質ラーメンをスケルトンとした高寿命住宅はCO₂の長期貯蔵に有効である。しかし、戸建て住宅で多用される引きボルト式木質ラーメンの致命的な欠点は、図1に示すように梁木口面の柱側面へのめり込み変形による初期剛性の低さにある。この欠点を克服する方法として、全ネジスクリーを柱側面に埋め込む方法(図1)と、柱側面に高密度の木材を取り付ける2つの方法の効果を実験的に検討した。

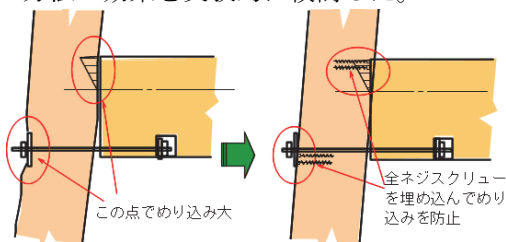


図1 引きボルトラーメンの欠点とその改善策

(2) 耐力壁との併用を前提とした戸建て木造住宅用ラーメン架構の開発

耐力壁とラーメン架構では挙動が大きく異なるため、戸建て木造住宅の中で両者を併用する場合の構造設計法をどのように考えるかが問題となっている。そこで、図2のような両者を直列配置した場合と並列配置した場合の挙動を実験的に検証した。

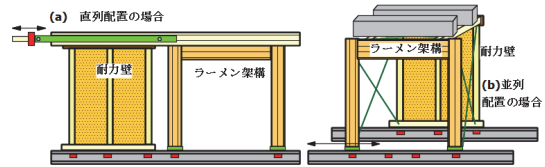


図2 ラーメン架構と耐力壁を(a)直列配置したと(b)並列配置した場合のモデル試験体

(3) 多層木造を想定した高強度・高剛性・高靱性なモーメント抵抗接合法の開発

長期間にわたって木質ラーメンを使い続けてCO₂の固定を継続するためには、極めて大きな地震動に対しても架構が崩壊することなく、また地震終了後は軽微な補修費用で現状に復帰できる機能を備えている必要がある。

そこで、本課題ではラーメン接合部を図3に示すような「鋼板添え板高力ボルト摩擦接合」とすることで、高力ボルト摩擦接合部が先行降伏し、集成材やラグスクリーボルトの破壊を防ぎ、かつ摩擦接合部のエネルギー消費による安定した接合部の塑性変形を確保し、更に地震終了後は、側面から高力ボルトを緩めて架構を建て起こして原状に復帰できる機構を有する高剛性・高靱性接合部を開発し、柱-梁接合、柱脚接合部、そして門型ラーメン試験体に対する静的正負繰り返し加力実験ならびに二層柱-梁接合部試験体に対する振動台実験を実施した。

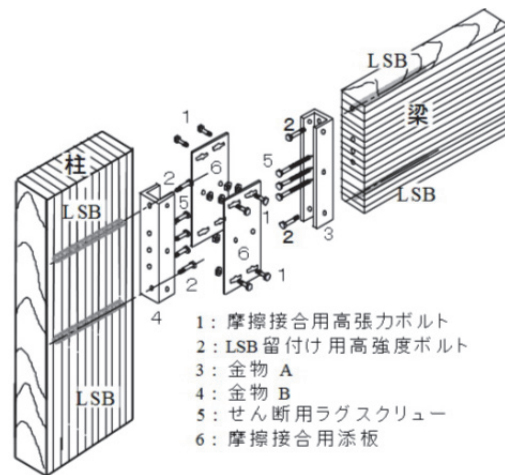


図3 鋼板添え板高張力ボルト締め接合部

4. 研究成果

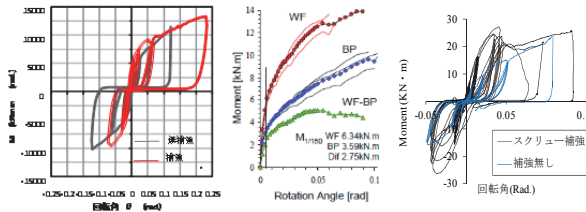
(1) 戸建て住宅用引きボルトラーメンの改良

柱側面のめり込み補強の方法として、図4に示すように、①密度の高い広葉樹(アカシアマンギユウム)の板を柱側面にビス留めする方法、②圧縮スギ楔を引きボルトの座金の下に

挿入する方法、③全ネジスクリューを引きボルトの座金の下に埋め込む方法、の3種類の方法を開発した。



①広葉樹板 ②圧縮スギ楔 ③全ネジスクリュー
図4 開発した3種類のめり込み補強法を用いた引きボルト式柱-梁接合部試験体



①広葉樹板 ②圧縮木材楔 ③全ネジスクリュー
図5 補強と無補強による挙動の違い

図5-①、②、③に各補強法を施した場合と無補強の場合のモーメント抵抗性能の違いを示す。いずれの方法でも、補強することで初期剛性、降伏耐力は50%~100%程度向上するが、施工の容易さとコストを考えると、全ネジスクリュー補強法は有効である。

(2) 耐力壁との併用を前提とした戸建て木造住宅用ラーメン架構の開発

図6に示す静的加力実験では、ラーメンフレームのみの試験体 (test1)、フレーム内部に雑壁 (Wall@200) を併設した試験体 (test2)、および耐力壁 (Wall@50) を併設した試験体 (test3) の3体を供試した。図7に荷重-変形角関係を示す。雑壁や耐力壁を併設すると初期剛性、降伏耐力、最大耐力ともにフレーム単体の結果を上回る事は確認できたが、個々の挙動尾の単純な重ね合わせにはならないことも確認できた。

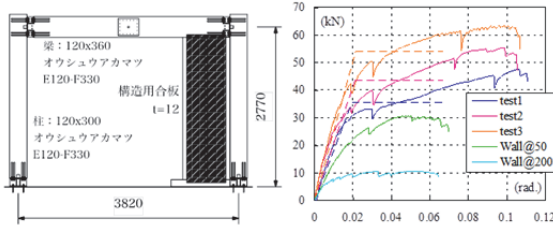


図6 試験体セットアップ 図7 荷重-変形角関係

一方、図8-(a)、(b)に示す震動台を用いた実験では、ラーメンフレームと耐力壁を並列に配した箱型の試験体を2種類用意した。(a)は「低剛性高靱性タイプ」、(b)は「高剛性低靱性タイプ」で、部材断面と接合ボルト

断面を変化させることにより、剛性と靱性の発現程度を調整した。



(a)低剛性高靱性タイプ (b)高剛性低靱性タイプ
図8 震動台を用いた実験の状況

両試験体ともBCJ-レベル1波ではフレームに損傷は確認されなかったが、BCJ-レベル2波では、両タイプとも最大1/30rad.を超える応答変位となったが、主として大きな変位を示したのは合板耐力壁の側であった (図9)。

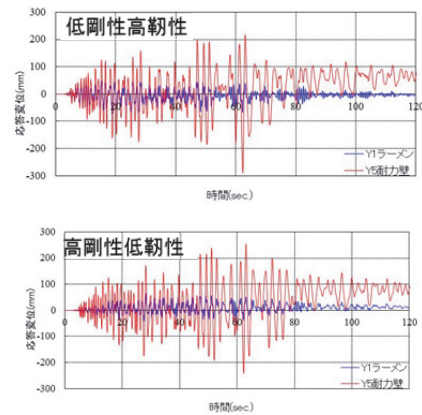


図9 BCJ-レベル2波時の応答変位

低剛性高靱性タイプでは接合ボルトに塑性変形が生じたが部材に破壊は確認されなかった。一方高剛性低靱性タイプでは、引きボルト接合部のボルト定着部の木部せん断破壊が生じる結果となった。

更に、フレームの剛性、耐力、変形性能をパラメータとして木質ラーメンと耐力壁を併用したシステムについて地震応答解析を行った結果、併用する木質フレームには、負担重量に相当する要求スペクトルを超える荷重変形性能が必要となることが明らかとなった。

(3) 多層木造を想定した高強度・高剛性・高靱性なモーメント抵抗接合法の開発

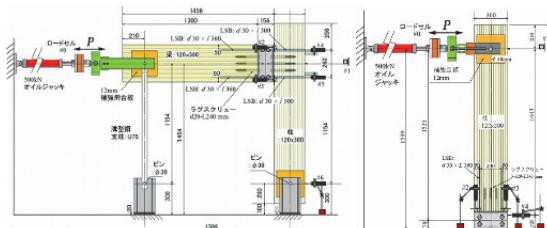
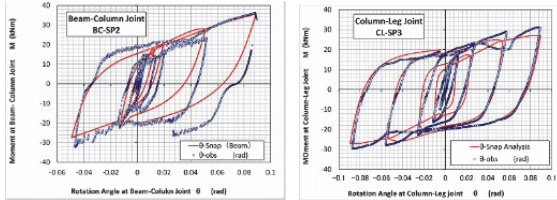


図10 柱-梁試験体

図11 柱脚試験体

静的実験としては、図 10 に示す柱-梁試験体と、図 11 に示す柱脚試験体を用いて「高力ボルト摩擦接合部」の先行降伏の状況を確認し、図 12-(a)、(b)に示すように、接合部の繰り返し変形性能が理論的にも精度よく推定可能であることを確認した。



(a) 柱-梁試験体 (b) 柱脚試験体
青プロットが実験値、赤線が理論的計算値
図 12 接合部のモーメント-回転角の関係

これらの結果を踏まえて図 13 に示す門型ラーメンの実験を行い、確実に「高力ボルト摩擦接合部」で先行迂りが発生し、大変形状態に至っても集成材やラグスクリューボルトには破壊が発生せず、容易に現状に復元できるラーメン架構が実現できることを確認した。

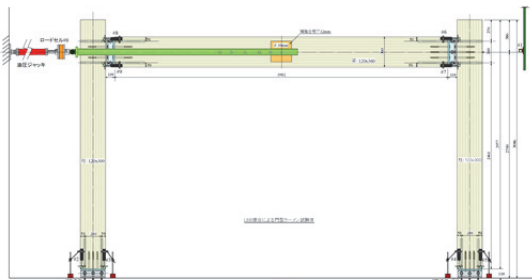


図 13 スパン 4.5m の門型ラーメン試験体

また、図 14 に示すように、門型ラーメンの非線形挙動も正確に計算によって推定することができた。

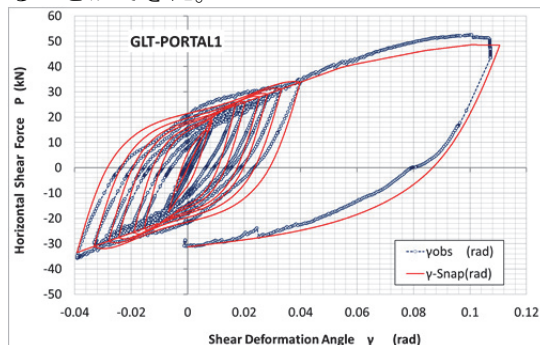


図 14 門型ラーメンの荷重-変形角関係の実測値（青丸）と計算値（赤線）の比較

次に、同じ「高力ボルト摩擦接合部」で柱-梁ならびに柱脚接合部を構成した図 15 に示す 2 層十文字型試験体を用いて、3 階建ての

集成材骨組み架構の地震時挙動を再現するための震動台実験を実施した。

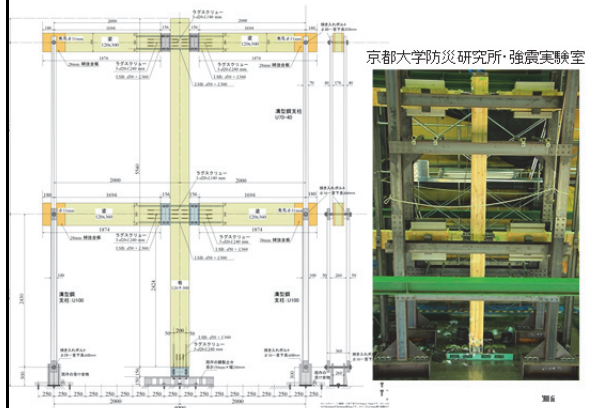


図 15 2 層十文字型試験体を用いた震動台実験

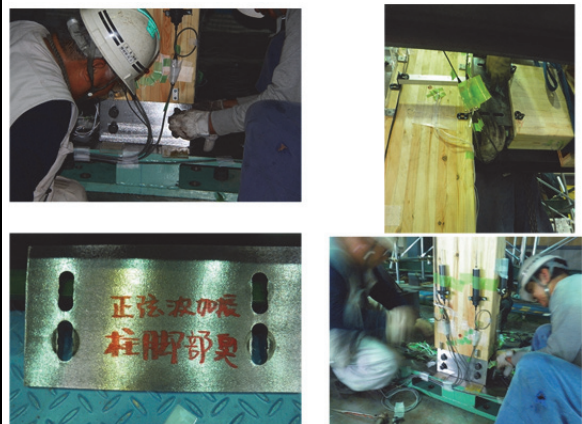


図 16 接合部を交換している状況

最初に最大加速度 800gal、周期 0.5 秒、最大振幅 50mm の正弦波を、加速度レベルを段階的に 20% ずつ増加させて、各 60 秒間ずつ、80% レベルまで入力した後、鋼板添え板と高力ボルトを新品と交換して初期状態に復元させ、1 日養生後、兵庫県南部地震の際に観測された JMA 神戸波 NS 成分（最大加速度 818gal）を 20% ずつ段階的に増加させて入力し、最後に 120% レベルを入力して、集成材接合部パネルでのせん断破壊を確認した。

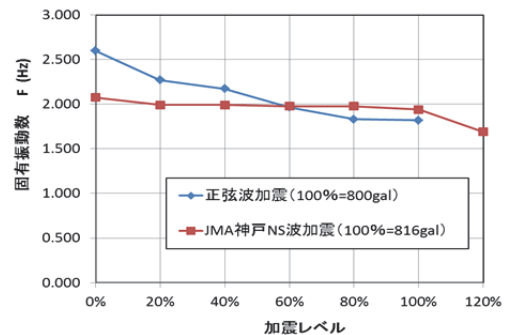


図 17 加震による固有振動数の変動

図 16 に正弦波 80% 入力後に接合部を交換している状況を示す。この作業は、大地震後の補修と現状復帰の可能性を示す意図的な

作業である。図 17 に、各入力加速度レベルで観測された固有振動数の変動を示す。図 18 に「高力ボルト摩擦接合部 (HTB)」での確実な迂り変形の状況と柱側面で観察された連結金物のめり込み跡を示す。



柱側面でのめり込み跡 HTB 接合部での迂り変形
図 18 実験終了後の接合部の状況

図 17 に示すように、初期固有振動数 2.6Hz でスタートし、正弦波 80%加震で 1.8Hz 程度まで剛性が低下した後接合部を新品と交換しても元の 2.6Hz まで剛性が完全に戻らなかった原因の一つは、図 18 に示すめり込み変位が残留したためと推定される。

以上の結果、①汎用性が高く、②低コストで、③明確な降伏耐力を確保でき、④高靱性で高いエネルギー吸収能力を有し、かつ⑤大地震後の容易かつ低コストでの修復・復元可能性のある集成材骨組み構造用のモーメント抵抗接合部を完成することができた。これにより、最終目標である CO2 の長期間固定を可能とする集成材骨組み接合法が誕生した。

なお、この接合法は上記①～⑤の特徴と有用性・実用性が一部の構造設計者や建設関連企業に認められ、大規模な 2 層集成材公共建築物の骨組み架構を支える柱-梁接合部に採用され、建物の設計が現在進行中である。

また、出願した特許に対して、複数の企業が実施許諾を申請しており、今後本研究で開発された技術は、戸建て木造住宅から大規模集成材骨組み構造建築物に至るまで、幅広く活用される可能性が大きい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 荒木康弘、小松幸平、森 拓郎、北守顕久：CO2 の削減に貢献する各種木造ラーメン架構の提案とその耐力発現機構の解明、平成 24 年度建築研究所年報、査読無し、第 47 号、2013
- ② Satoru Murakami, Akihisa Kitamori, Kiho Jung, Hassel B. Ivon and Kohei Komatsu: Evaluation of Screw Reinforcement on Bearing Performance of Wood Depending

on Screw Position, Open Journal of Civil Engineering, 査読有り、Vol.2, 2012, pp.160-166

DOI: 10.4236/ojce.2012.23021

- ③ Satoru Murakami, Akihisa Kitamori, Kiho Jung, Wen-Shao Chang, Kohei Komatsu: Prediction of Reinforcement Effect by Screw on Triangular Embedment Perpendicular to the Grain with Variation of Screw Locations, Open Journal of Civil Engineering, 査読有り、Vol.2, 2012, pp.167-173

DOI: 10.4236/ojce.2012.23022

[学会発表] (計 17 件)

- ① 村上 了、北守顕久、鄭 基浩、榎本敬大、小松幸平: 等変位めり込みにおけるスクリーンの補強効果の評価、第 63 回日本木材学会大会、2013 年 3 月 27 日、岩手
- ② 荒木康弘他 3 名：集成材フレームと耐力壁を平面的に併用した木質構造の地震時挙動に関する実験的研究、日本地震工学会・年次大会-2012 梗概集、2012.11.10、東京
- ③ Akihisa Kitamori, Zeli Que, Makiko Miki, Kohei Komatsu: Reinforcement Method for Japanese Traditional Buildings by Installing of Frame Structure with High Performance Shear Wall, The 4th International Symposium of Indonesian Wood Research Society, 2012/11/07, Makassar, Indonesia
- ④ 小松幸平、中島昌一：大地震後の容易な修復・原状復帰を可能とする高靱性・高靱性型集成材ラーメン架構の開発 (1)接合法の開発と静的加力実験の結果、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅲ、2012 年 7 月 20 日、名古屋
- ⑤ Kohei Komatsu, Shouichi Nakashima, Akihisa Kitamori : Development of Ductile Moment-Resisting Joint Based on a New Idea for Glulam Portal Frame Structures, Proceedings of WCTE2012, 2012.15-19 July, pp.156-161, Auckland, NZ
- ⑥ Takuro Mori, Atsuo Takino, Wataru Kambe, Kohei Komatsu : Lateral Performance of Wooden Portal Frame Combined with Shear Wall Using Plywood, Proceedings of WCTE2012, 2012.15-19 July, pp.156-161, Auckland, NZ.
- ⑦ 大築誠也、瀧野敦夫、森 拓郎、神戸 渡、宮本裕司：木質ラーメンフレームと構造用合板を用いた耐力壁を併用した門型フレームの水平加力実験、日本建築学会学術講演梗概集、構造Ⅲ、2011 年 8 月 23 日、東京
- ⑧ 大築誠也、瀧野敦夫、森 拓郎、神戸 渡、宮本裕司：木質ラーメンフレームと構造

用合板を用いた耐力壁を併用した門型フレームの水平加力実験、日本建築学会近畿支部研究報告集構造系、2011年6月18日、大阪

- ⑨ 中島昌一、北守顕久、小松幸平：広葉樹耐力板による引きボルト式モーメント抵抗接合部の補強、第61回日本木材学会大会、2011年3月19日、京都
- ⑩ 村上 了、北守顕久、鄭 基浩、小松幸平：スクリー型接合具による面圧性能補強法の検討 その2-三角めり込みの生じる木材の補強-、第61回日本木材学会大会、2011年3月19日、京都
- ⑪ 中谷 誠、森 拓郎、小松幸平：ラグスクリーボルトの集成材への埋め込み角度と引き抜き性能の関係、第61回日本木材学会大会、2011年3月19日、京都
- ⑫ Kohei Komatsu, Shoichi Nakashima, Akihisa Kitamori: Development of Semi-Rigid Moment-Resisting Joint for Timber Portal Frame Structures. -Innovation for giving ductility to beam-column joint-, The 2nd International Symposium of IWoRS, 2010, 11.12-13, Bali, Indonesia
- ⑬ Shoichi Nakashima, Akihisa Kitamori, Kohei Komatsu: Reinforcement of tensile bolted moment resisting joint by hardwood bearing plate, The 2nd International Symposium of IWoRS, 2010, 11.12-13, Bali, Indonesia
- ⑭ Akihisa Kitamori, Kiho Jung, Kohei Komatsu: Development of Friction Joint System by Compressed Wooden Fasteners, The 2nd International Symposium of IWoRS, 2010, 11.12-13, Bali, Indonesia
- ⑮ Satoru Murakami, Akihisa Kitamori, Jung Kiho, Makoto Nakatani, Kohei Komatsu: Pull-out Performance of Screw in Terms of Diameter and Types of Thread, The 2nd International Symposium of IWoRS, 2010, 11.12-13, Bali, Indonesia
- ⑯ 北守顕久、鄭 基浩、小松幸平：圧縮楔を挿入した摩擦型引きボルト式モーメント抵抗接合部の開発、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、構造Ⅲ、2010年7月20日、金沢
- ⑰ Kohei Komatsu, Akihisa Kitamori, Kiho Jung, and Takuro Mori: Prediction of Non-Linear Load-Deformation Curves of Various Types of Mud Shear Walls Subjected to Lateral Shear Force, World Conference on Timber Engineering 2010, 2010.6.20-24, Riva del Garda, Italy

[図書] (計1件)

- ① 小松幸平 (分担執筆)：新・木質構造建

築読本—ティンバーエンジニアリングの実践と展開—、「1.7.1 木質ラーメン構法」、pp.83-87、木質構造研究会編集、井上書院、6月、2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

- ① 名称：木質部材の接合構造
発明者：小松幸平
権利者：京都大学
種類：特許
番号：特願 2011-148503
出願年月日：平成 23 年 7 月 4 日
国内外の別：国内
- ② 名称：ラグスクリーボルトを用いた接合構造
発明者：小松幸平
権利者：京都大学
種類：特許
番号：特願 2010-246922
出願年月日：平成 22 年 11 月 3 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 幸平 (KOMATSU KOHEI)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号：20283674

(2) 研究分担者

森 拓郎 (MORI TAKURO)
京都大学・生存圏研究所・助教
研究者番号：00335225

北守 顕久 (KITAMORI AKIHISA)
京都大学・生存圏研究所・助教
研究者番号：10551400

荒木 康弘 (ARAKI YASUHIRO)
独立行政法人建築研究所・研究員
研究者番号：40435582