

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06514

研究課題名(和文) CLT(直交集成板)を用いた既設橋梁の床版補修技術の開発

研究課題名(英文) Development of repairing system of short span bridge using cross laminated timber slabs

研究代表者

佐々木 貴信(Sasaki, Takanobu)

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：00279514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：新しい木質材料であるCLT(直交集成板)は、ひき板(ラミナを)直交させて積層接着した大型のパネルである。最大で幅3m、長さ12m、厚さ270mmの製品が製造可能であり、単位体積重量はコンクリートの1/6～1/4程度と軽量であることから、橋梁補修の際の床版用途へのCLTの適用可能性を検討することとした。

CLTを床版材料として利用する上で課題となる防護柵の設置方法や、防腐対策の検討を行った。前者については一般の橋梁に用いられる防護柵を適用できる可能性を示し、後者については、CLT全体をFRPシート等でラッピングする物理的な処理で、防水・防腐効果を得る方法を検討し、実用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内には約70万橋の道路橋があり、点検や補修など維持管理が課題となっている。これらの橋梁の中には、市町村等が管理する小規模なものも数多く存在している。このような小規模な橋梁のうち、コンクリート床版を交換するような場合にCLT床版の「軽さ」を活かすことができる。こうした土木分野でのCLTの用途開発は前例がない。また、木材の防腐処理として、製品全体をシートで包むようなラッピング処理はこれまでにない新しい発想である。

わが国では、戦後に全国に植林された森林が十分に成長し、利用時期に達している。地域の森林資源と生産技術が地域の交通インフラの維持に活かされることは、地域の活性化にも繋がるものである。

研究成果の概要(英文)：Cross laminated timber (CLT) is a new type of engineered wood panel consist of several layers of structural lumber boards stacked crosswise at 90° angles and glued together on their faces. It is possible to produce CLT panels of 3 m wide, 12 m long, and 270 mm thick. CLT is light-weight material which the unit weight of CLT made of Japanese cedar is about 1/6 of reinforced concrete, therefore it's has advantage in terms of the transport and construction works. The authors consider using CLT elements for bridge deck replacement instead of a concrete deck slab. In this study, we developed the structure of the gird rail to use for CLT deck and the new physical preservative treatment system. For the latter, rather than using conventional chemical treatments to prevent decay, we developed methods such as covering the entire CLT with an FPR sheet or embedding it in polymer cement to physically gain waterproofing and preservative effects.

研究分野：木材工学

キーワード：CLT(直交集成板) 橋梁補修 床版 防腐対策 防護柵

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

CLT（直交集成板）は、木材のひき板（ラミナ）を繊維方向が直交するように積層接着した木質パネル（図1）であり、これまでにない大きなサイズの面材料（写真1）の製造が可能となることから欧米ではCLTを壁や床などに用いた中高層建築物等の建設が急増している。我が国においても、中高層建築物等へのCLTの活用により新たな木材需要の創出が期待され、国をあげて国産CLTの普及に向けた取り組みが盛んに行われている。林野庁と国土交通省は、CLTの普及に関する施策を積極的に進めるとともに、「CLTの普及に向けたロードマップ」も示している。こうした政策に対応してCLTに関する研究も盛んに行われているが、その殆どが建築構造を対象にしているのが現状であり、土木分野でのCLTの活用の可能性については誰も着眼していなかった。

また、土木分野ではインフラの長寿命化が課題となっており、架橋後50年以上を経過する橋梁が増加する中で、経済性に優れた補修工法の開発が求められていた。こうした老朽化した橋梁の機能低下は、床版の劣化に起因するものが最も多く、コンクリート（RC）床版の交換補修が多いのが実態であった。

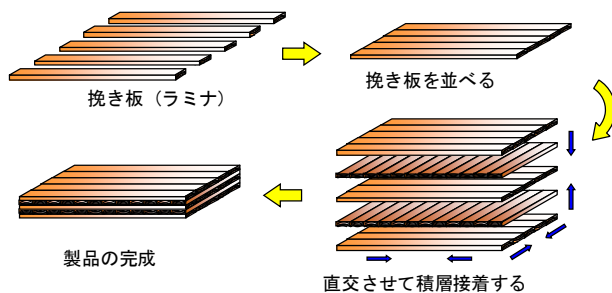


図1 CLTの製造方法



写真1 大板（2.4m×3.5m）のCLT

### 2. 研究の目的

申請者らはCLTの新たな用途の一つとして橋梁の床版材料としての可能性に着目し、RC床版の代替としてCLTを活用できないかという着想に至った。CLT床版のメリットは、第一に軽さであり、代表的な国産材のスギCLTは単位体積重量がRCの約1/4～1/6と軽量であることから、輸送や架設に有利であり、床版を支える橋桁の負担を軽減することもできる。第二に、繰り返し荷重に対する耐久性が高いことである。木材は、疲労による機能低下がないことが知られており、自動車の走行荷重を想定した輪荷重走行試験（写真2）でも十分な耐久性が示されている<sup>1)</sup>。これらの特徴から、RCと同等の基準強度を有するCLTは床版材料としての用途が期待される。しかし、実用化に向けては、木材の腐朽など劣化に対する耐久性向上策と防護柵の設置方法に関する課題が残されていた。本研究では、これらの課題を解決し、CLT床版を用いた橋梁補修技術の開発を行うことを目的とした。



写真2 CLT床版の輪荷重走行試験

### 3. 研究の方法

本研究では、まずCLTの防腐対策技術の開発を行った。木材の防腐処理は防腐薬剤を木材中に加圧注入する方法が一般的であるが、CLTのような大きな材料を処理することは困難である。したがって、CLT全体を耐水性のある材料で包埋（ラッピング）する方法を検討した。ここでは、FRPシート等でラッピングする方法（写真3）や、ウレタン塗料やポリマーセメントでコーティングする方法について、実大サイズの試験体を用いて繰り返し荷重に対する耐久性や、乾湿繰り返しおよび浸漬試験による耐水性の評価を行い、実用的なラッピング技術を検討することとした。



写真3 FRPシートによるラッピング

次に、主桁（鋼桁）とRC床版からなる一般的な橋梁を対象に、床版取替の補修工事の際にRC床版をCLTに代替する工法に関する検討を行った。CLT床版を主桁に固定し、床版上面のアスファルト舗装の敷設までは問題なく行えるが、防護柵の設置方法については課題が残されていた。橋梁用防護柵は床版上に設置したコンクリート製の地覆に高欄の支柱を据え付けるのが一般的であるが、本研究ではCLT床版の場合にも同様の構造が再現できるように設計、解析および性能試験を行うこととした。このとき、CLT床版と高欄支柱を支えるコンクリート地覆を強固に連結することは容易ではないと考えられたので、主

桁に反力を伝えるような構造も検討することとした。

#### 4. 研究成果

##### (1) ラッピング処理の耐水性

本研究では、FRP シートによるラッピング加工や塗膜系材料による被覆処理の耐水性能を評価することを目的として、恒温恒湿室内での乾湿繰り返し試験および浸漬試験を実施した。試験体には 150×150×525mm のスギ CLT を用いて、FRP ラッピング A、FRP ラッピング B (試験開始 90 日後に追加)、ウレタン樹脂コーティング、ポリマーセメント A、ポリマーセメント B、ポリマーセメント C の各種材料でラッピング処理した試験体を作成した。またコントロールとして無処理の CLT を 2 体用意した。乾湿繰り返し試験では、20°C-40% および 20°C-90% の温湿度条件で約 2 週間毎に繰り返した。その後、0°C-65% の条件下に設置した水槽に浸漬し定期的に重量を測定した。

乾湿繰り返し試験の結果を図 2 に、浸漬試験の結果を図 3 にそれぞれ示す<sup>2)</sup>。無処理の試験体は吸湿と放湿を繰り返し、約 2% の重量変化を生じているのに対して、FRP シートでラッピングした試験体は重量変化が無く高い防湿効果を示した。また、ウレタン樹脂やポリマーセメントで被覆した試験体は吸湿過程で重量が増加し、0.25%～1% 程度の重量変化を生じた。浸漬試験結果では、無処理材の 2 体は浸漬期間 140 日で約 45% 重量が増加したのに対し、ウレタン樹脂コーティングは 6.6%、ポリマーセメント A～C は、それぞれ 6.8%、5.4%、8.8% の重量増加であった。FRP ラッピングの A タイプは 60 日経過辺りから徐々に重量が増加し、180 日後では 2.7% まで増加した。A タイプでは FRP シートの継ぎ目から水が進入したのに対し、継ぎ目のない B タイプでは、0.2% 程度の重量増加しか生じなかった。

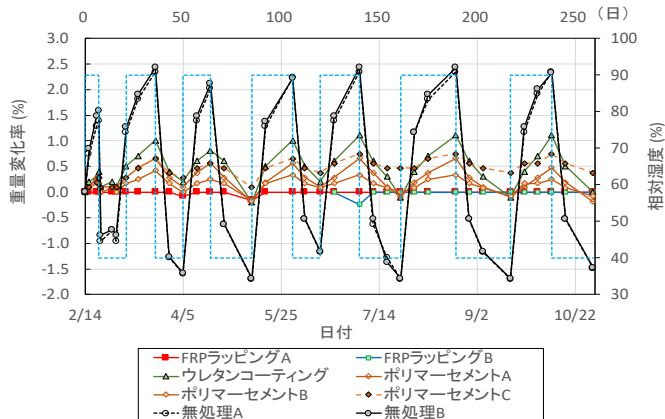


図 2 乾湿繰り返し試験結果

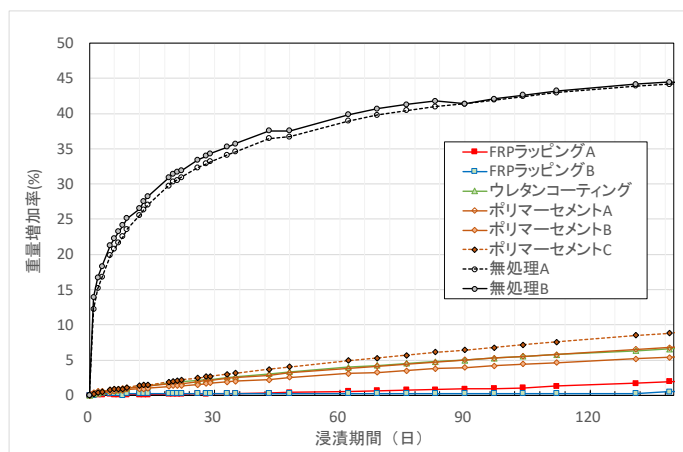


図 3 浸漬試験結果

##### (2) ラッピング処理の寸法安定性

CLT を屋外環境で利用する上での課題の一つは、含水率変動に伴う寸法変化であり、本試験では、各種の被覆処理を施したトドマツ CLT の小試験体を用いて乾湿繰り返し試験を行い、試験体の重量や寸法変化の関係を調査した。

乾湿繰り返し試験には、幅 300mm、長さ 300mm、厚さ 60mm で製作した 3 層 3 プライのトドマツ CLT (ラミナ寸法、20(t)×75(b)×300(l)mm) を用いた。ここから 145×145×60mm の試験体を切り出して試験に供した。ラミナの積層接着、幅はぎ接着には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いた。被覆処理には、ポリウレタン、ポリウレタン塗料、FRP シートを用い、CLT の幅はぎ接着の有無についてそれぞれ 2 体ずつ、各処理計 4 体の試験体を製作した (写真 4)。また、コントロールとして無処理の CLT を幅はぎ接着の有無で 1 体ずつ用意した。これらの試験体を、恒温恒湿器内において 40°C・95% および 50°C・40% の温湿度条件で 2 週間毎に繰り返し、試験体の寸法及び重量を定期的に測定した。

図 4 に乾湿繰り返し試験における無処理および各処理の試験体の重量変化率の変動を示す。なお、重量変化率は  $\{(W - W_0)/W_0\} \times 100$  (%) より求めた。ここで、 $W$ : 試験体重量、 $W_0$ : 試験開始前重量。また、無処理の試験体に

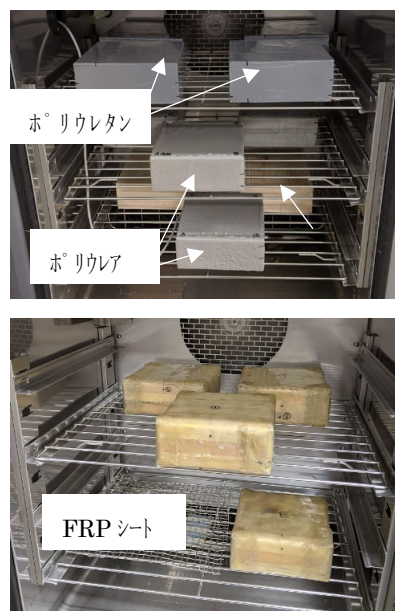


写真 4 乾湿繰り返し試験



関しては、試験開始時の初期含水率 11.5%より推定含水率も求めた。湿度の変化に対応するように推定含水率は変動し、湿潤時は約 24%、乾燥時は約 9%であった。これらは、湿潤時及び乾燥時の温湿度設定における平衡含水率にほぼ等しい。無処理では重量変化率が-1.9%~10.9%であったのに対し、ポリウレア及びウレタン塗料で被覆した試験体は何れも湿潤過程で2%程度の重量変化であった。乾燥過程では重量が減少したが、初期重量よりも減少することはなかった。FRPシートでラッピングした試験体は重量変化が認められなかった。ポリウレアやウレタン塗料は水と馴染みやすい性質があり、本研究では塗膜の厚み(約2mm)で防水効果を高めているが、塗膜中で水蒸気が入りし重量が変動していることが示唆された。

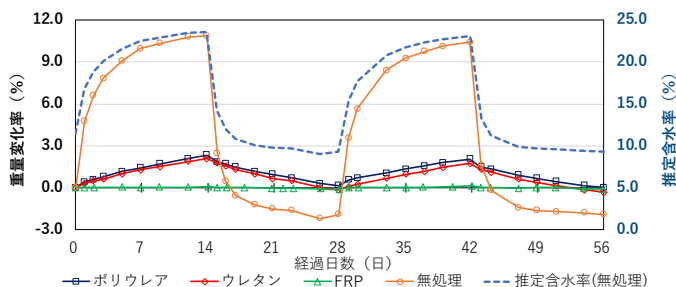


図4 重量変化率および推定含水率



写真5 湿潤時の無処理試験体

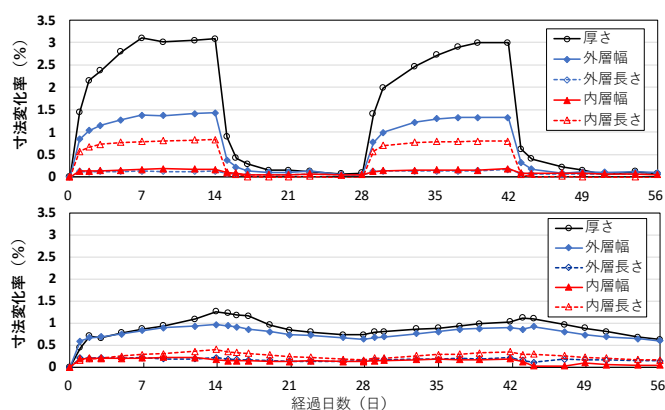


図5 寸法変化率(上:無処理、下:ポリウレア)

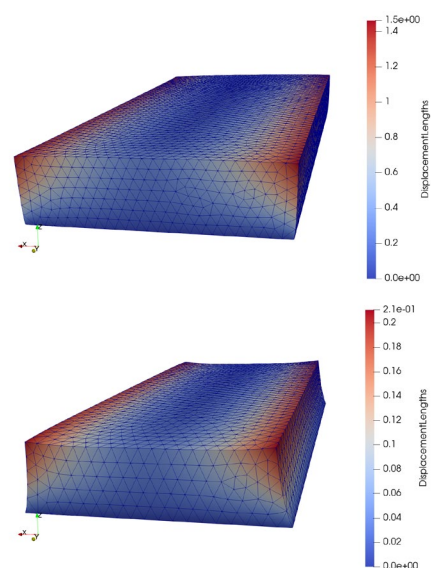


図6 FEM解析結果(変形図, mm)

図5には、一例として、乾湿繰り返し試験における無処理(幅はぎなし)及びポリウレア処理の厚さ及び外層と内層の幅、長さの寸法変化率の変動をそれぞれ示す。寸法変化率は $\{(l - l_0)/l_0\} \times 100$  (%)より求めた。ここで、 $l$ :試験体寸法、 $l_0$ :試験開始前寸法。また、図中の凡例の外層幅及び内層長さはラミナの繊維直交方向を、外層長さ及び内層幅は繊維方向をそれぞれ示している(写真5)。無処理の試験体では、厚さの寸法変化が3%と最も大きく、次いで外層幅で1.5%、内層長さで1%程度(何れも繊維直交方向)の寸法変化が確認された。被覆処理を施した試験体でも同様の寸法変化の傾向が認められたが、無処理に比べてその量は小さかった(図5)。

CLTは寸法安定性が高いことが知られているが、本試験の結果より含水率の変化によるラミナ幅の膨潤・収縮が生じることが分かる(写真5)。本試験ではまた、この寸法変化の挙動をシミュレーションすることを目的としてFEM(有限要素法)解析を試みた。無処理の試験体のラミナ(20×75×150mm)をモデル化し、乾湿繰り返し試験で得られた推定含水率の最大変動幅(湿潤時12.1%、乾燥時9%)とトドマツの接線方向の平均収縮率(0.35%)からひずみ量を求め、これに接線方向のヤング係数(0.4GPa)を乗じた値を引張応力及び圧縮応力と仮定して線形解析を行った結果、幅方向の最大変形量は湿潤時1.3mm、乾燥時-0.19mmであった(図6)。

### (3) 防護柵設置方法の検討

CLTは、疲労耐久性が高く軽量であることから橋梁の床版用途としての活用が期待されるが、床版としての普及を促すには、防護柵を取り付けられることが必須である。コンクリート地覆を介して防護柵を取り付ける方法も検討しているが<sup>3)</sup>、本研究では鋼製防護柵を鋼製部材でCLTに接合する構造を提案し、この接合部の応力挙動を弾塑性有限要素解析により考察した。

図7に示す解析モデルは、防護柵の支柱1本分とそれが固定された周囲のCLTの部分を取り出したものである。CLTの橋軸方向は防護柵支柱間隔の中央で切り取り、幅員方向は外桁と次の主桁中央で切り取った。モデル化したCLTの寸法は2000mm×150mm×2000mmである。防護柵支柱は、主プレート、補助プレート、補助金具によりCLTに接合され一体化しており、支柱は主プレートとのみ一体化させている。鋼部材はすべてヤング率206GPa、降伏点を235MPaと

する。CLT は等方性材料とし、ヤング率は強軸方向の測定値 3.5GPa を採用する。CLT への鋼部材のめり込みを考慮するため、A1 類の許容めり込み応力度 2) を参考に、2.352MPa の降伏点を与える。床版から 600mm の高さの支柱部分にブラケットを設けて 45kN を載荷する。

解析の結果、ここでは示していないが、荷重水平変位の関係図から、荷重 25kN 付近から水平変位との関係が非線形になることを確認した。図 8 は、水平荷重 25kN 時と 40kN 時の変形図を示している。荷重 25kN 辺りから、支柱の引張側に降伏が入り始め、剛性が落ちていくのが伺える。40kN 時のときには、支柱引張側に主応力 235MPa 以上の降伏した領域が広がっているのを確認した。

一般的な鋼製の防護柵を適用する場合には、支柱が水平荷重を受けたときに、ベースプレートが CLT へめり込む挙動である。本解析では、鋼製支柱の厚さを変えて降伏しにくくした場合の CLT への影響や、ベースプレートの幅や長さを変化させて解析を行うことで、CLT へのめり込み挙動を評価した。

本解析の結果、鋼製防護柵を取り付けられた CLT 床版が、支柱に加えられる外力により示すめり込みなどの挙動をモデル化し解析することができた。支柱の水平方向に加えられた荷重は、CLT 床版下部の補助プレート付近にめり込みを発生させるメカニズムをある程度再現できた。支柱の剛性を大きくすれば、めり込みはむしろ大きくなるが、補助プレートの幅を広げることで一定のめり込み軽減効果が期待できることもわかった。現在のモデルではボルトを入れておらず、床版と金具、プレートは一体化している状態なのでボルトを入れてさらに実際のモデルに近づけた解析の検討も必要である。

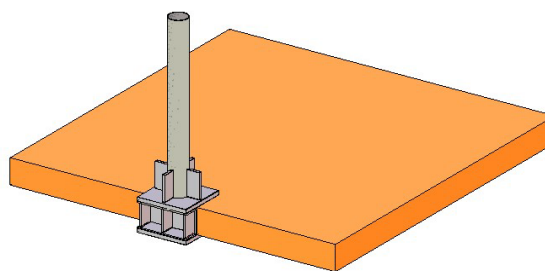


図 7 CLT 床版と防護柵の解析モデル

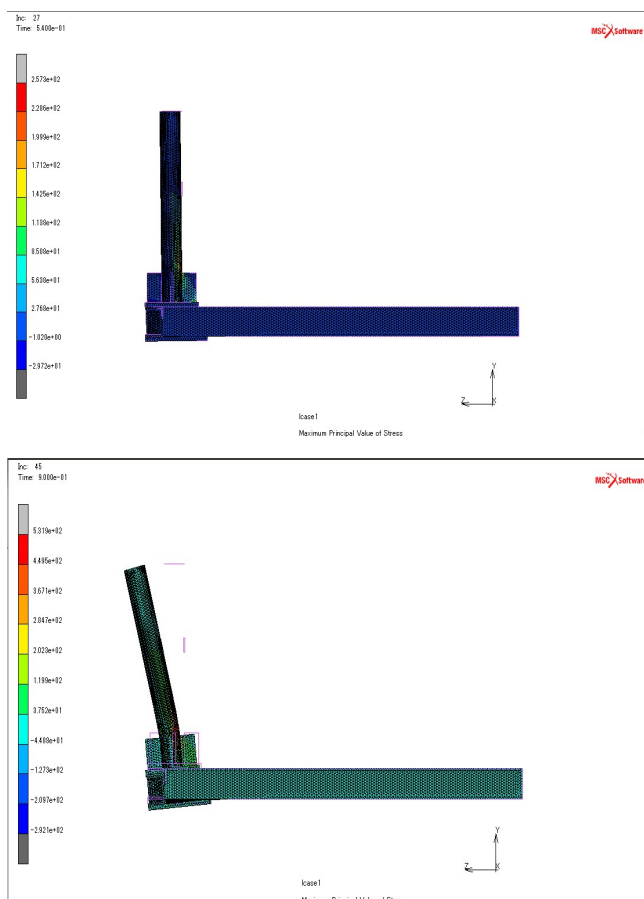


図 8 支柱の変形図（上：25kN 時、下：40kN 時）

<引用文献>

- 1)CLT を利用した床版の輪荷重載荷試験：有山裕亮，豊田淳，佐々木貴信，荒木昇吾，高海克彦，木材利用研究論文報告集 15，p.17-22，2016。
- 2)ラッピング等で処理した CLT の耐水性評価：佐々木貴信，山内秀文，足立幸司，林知行，日本木材保存協会第 34 回年次大会研究発表論文集，p.136-137，2018。
- 3)有山裕亮，海老拓紀，橋佑輔，後藤文彦，佐々木貴信，豊田淳：コンクリート地覆を取り付けた CLT 床版接合部の数値モデル化，木材利用研究論文報告集 18，pp.55-61，2019。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 豊田 淳, 佐々木貴信, 荒木昇吾, 林 知行, 有山裕亮, 後藤文彦	4. 巻 65A
2. 論文標題 CLT床版を用いた小規模橋梁の補修設計と施工	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 799-806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 豊田淳, 佐々木貴信, 荒木昇吾, 林知行, 有山裕亮, 後藤文彦	4. 巻 17
2. 論文標題 CLT 床版を用いた既設橋梁の補修設計と施工	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 木材利用研究発表会講演概要集	6. 最初と最後の頁 55-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木貴信, 有山裕亮, 荒木昇吾, 豊田淳, 山内秀文, 林知行	4. 巻 16
2. 論文標題 CLT床版の耐久性付与技術の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 木材利用研究論文報告集	6. 最初と最後の頁 39-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々木貴信, 林知行, 山内秀文, 足立幸司	4. 巻 33
2. 論文標題 ラッピングによるCLTの耐久性付与技術の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第33回年次大会研究発表論文集	6. 最初と最後の頁 64-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. ARIYAMA, T. SASAKI, T. HAYASHI, A. TOYODA, H. GOTOU, K. TAKAMI, S. ARAKI	4. 巻 3
2. 論文標題 Performance evaluation of the cross laminated timber for the bridge decks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 3rd International Conference on Timber Bridges	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木貴信	4. 巻 312
2. 論文標題 CLTの土木分野での用途開発-橋梁用床版用との開発-	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 木材情報	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 佐々木貴信, 林 知行, 荒木昇吾, 後藤文彦, 有山裕亮, 豊田 淳, 田中 道, 河村明子
2. 発表標題 CLT (直交集成板) を用いた農道橋の床版取替工事
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木貴信, 山内秀文, 足立幸司, 林 知行
2. 発表標題 ラッピング等で処理したCLT の耐水性評価
3. 学会等名 日本木材保存協会第35回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Toyoda, Takanobu Sasaki, Tomoyuki Hayashi, Humihiko Gotou, Shogo Araki, Shingo Kato
2. 発表標題 Performance evaluation and analysis of the cross laminated timber for the bridge decks
3. 学会等名 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 康介, 海老 拓紀, 後藤 文彦, 豊田 淳, 佐々木 貴信
2. 発表標題 コンクリート地覆が取り付けられた CLT 床版接合部の挙動
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.ARIYAMA, T.SASAKI, T.HAYASHI, A.TOYODA, H.GOTOU, K.TAKAMI
2. 発表標題 Performance evaluation of the cross laminated timber for the bridge decks
3. 学会等名 3rd International Conference on Timber Bridges (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木貴信, 林知行, 山内秀文, 足立幸司
2. 発表標題 ラッピングによるCLTの耐久性付与技術の開発
3. 学会等名 日本木材保存協会第33回年次大会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 佐々木貴信, 林知行, 平松靖, 宮武敦, 井道裕史, 長尾博文, 原田真樹, 加藤英雄
2. 発表標題 CLT の面内方向の曲げ性能と寸法効果
3. 学会等名 2017年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木貴信, 林知行, 荒木昇吾, 有山裕亮, 豊田淳, 高橋恵輔
2. 発表標題 CLT を床版に用いた林道橋の施工
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林知行, 佐々木貴信, 有山裕亮, 荒木昇吾, 豊田淳, 高海克彦
2. 発表標題 CLT を用いた床版の輪荷重載荷試験
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木貴信, 林知行, 山内秀文, 足立幸司
2. 発表標題 CLT同士の二次接合による大板化と接合部強度
3. 学会等名 第68回日本木材学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 青木健二, 佐々木貴信ほか	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本木材加工技術協会	5. 総ページ数 170
3. 書名 最新木材工業事典 [ 新版 ]	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野田 龍 (Noda Ryu)  (00626955)	秋田大学・理工学研究科・講師  (11401)	
研究分担者	後藤 文彦 (Gotou Humihiko)  (10261596)	秋田大学・理工学研究科・教授  (11401)	
研究分担者	林 知行 (Hayashi Tomoyuki)  (60370285)	秋田県立大学・木材高度加工研究所・教授  (21401)	