様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　５ 年　５ 月 ２９ 日現在

機関番号：１５２０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：２０Ｋ０６１６５

研究課題名（和文）様々な欠陥を持つ木材・木質材料の変形と強度特性を包括的に予測可能な評価法の確立

研究課題名（英文）Establishment of the methods for evaluating the deformation and strength properties of solid wood and wood-based materials with various defects

研究代表者
吉原　浩（Hiroshi, Yoshihara）

島根大学・学術研究院環境システム科学系・教授

研究者番号：３０２１０７５１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：木材や木質材料を構造物に使用する際，その変形および強度特性は材料に含まれる欠陥の大きさ，形状および欠陥の位置などの性状に大きく支配される。しかし，こうした欠陥の影響についてはいまだに十分に解明されているとは言えず，欠陥を有する材料の変形および強度特性の統一的な評価法は確立していない。そこで本研究では，無欠点材料から様々な性状の欠陥が含まれる材料の変形および強度特性を包括的に予測できる木材および木質材料独自の評価方法の確立を目指し，試験体の様々な位置に様々な大きさの欠陥（円孔）を導入して数種の力学的特性の評価試験を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
近年，大型の建築物に木材や木質材料を使用することが増えてきている。構造物の性能規定化によって木材や木質材料への要求性能が明確になり，より厳しい目を向けられるようになってきた。特に，木材や木質材料の強度特性には材料に含まれる欠陥の大きさ，形状および欠陥の位置などの多様な性状が影響する。したがって，木材や木質材料に含まれる欠陥がその変形や強度特性に影響を及ぼすメカニズムを包括的に説明し得る理論を解明することで，上述した建築構造物の安全性の評価が可能になるというきわめて重要な課題である。

研究成果の概要（英文）：When solid wood and wood-based materials are used as structural members with defects, the deformation and strength properties of the structure are often dominated by the characteristics of the defects. However, the effects of defects have not been sufficiently revealed; therefore, methods for evaluating their effects have not been well established. In this study, using samples with defects to characterize the mechanical properties of solid wood and wood-based materials with defects (open holes), several examinations, including flexural vibration, torsional vibration, asymmetric four-point bending tests, were performed to establish the aforementioned methods.

研究分野：木材物理学

キーワード：木材　木質材料　変形特性　強度特性　欠陥

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

近年，大型の建築物に木材や木質材料を使用することが増えてきている。構造物の性能規定化によって木材や木質材料への要求される強度性能が明確になり，より厳しい目を向けられるようになってきた。木材や木質材料の強度特性には，材料に含まれる欠陥の大きさ，形状および欠陥の位置などの多様な性状が影響する。これまで，木材や木質材料の強度特性に関して多くの研究が行われ知見が蓄積されており，今日の木材や木質材料の強度特性評価は，それらの知見にもとづいて行われている。しかし，先行研究は異なる理論や方法論を駆使したものであるため，今日行われている木材や木質材料の強度特性評価は，基盤となる理論や方法論を異にする知見を継ぎ接ぎした上に成立しており，統一的な理論の構築には至っていなかった。

２．研究の目的

本研究では，無欠点材料から様々な性状の欠陥が含まれる木材素材および木質材料の変形および強度特性を包括的に予測できる新しい評価法の確立を目指すことを目的とした。

３．研究の方法

以下に本研究課題で実施した代表的な研究について，その方法を記す。

(1) 木材の木口面のせん断強さの測定

上下に円孔およびスリットを導入した試験体（スギ）の非対称４点曲げ試験を実施し，従来より評価が難しいとされていた木材の木口面のせん断強さの測定について検討した。

(2) 円孔を開けた試験体のねじり振動試験によるスプルースのせん断弾性係数の評価

様々な位置に様々な径の円孔を開けたスプルースの試験体のねじり振動試験を実施し，見かけのせん断弾性係数に及ぼす円孔の位置や円孔の大きさの影響について検討した。

(3) 側面に溝を切った試験体および溝のない試験体の非対称４点曲げ試験による木材のモード II き裂進展開始時の応力拡大係数の測定

中央上下に円孔およびスリットを切った試験体の一方にき裂を導入した試験体の非対称４点曲げ試験からモード II き裂進展開始時の応力拡大係数を測定した。さらによりき裂長さの範囲を大きく設定するために試験体中央側面に溝を切り，同様の試験を実施することでモード II き裂進展開始時の応力拡大係数を測定した。

４．研究成果

以下に上記の「研究の方法」に記載した研究から得られた成果について記す。

(1) 木材の木口面のせん断強さの測定

図１のような形状の試験体を非対称４点曲げ試験することで円孔状の切り欠き底間にせん断破壊を発生させ，せん断強さの測定を試みた。この際，切り欠き底間の距離を H' とし，H' を 5 から 25 mm まで変化させ，H' の影響について検討した。また，得られた結果を JIS Z2101-2009 に標準化されているブロックせん断試験および通直な試験体の３点曲げ試験から得られた結果と比較した。

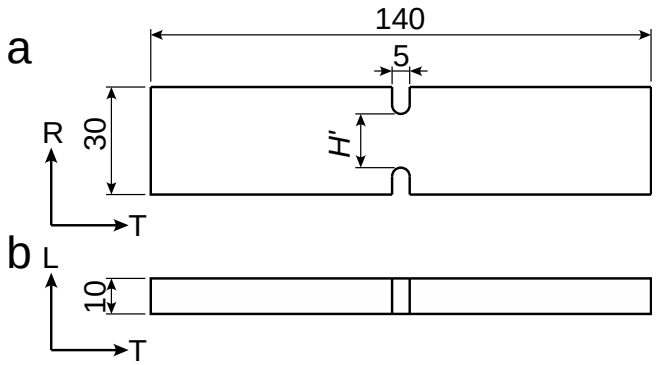

図１　非対称４点曲げ試験に使用した試験体
a: 側面，b: 上面

図２に非対称４点曲げ試験で破壊が発生した際の切り欠き底間の中央におけるせん断応力 τ_c および内スパンにおける曲げ応力 σ_c と H' の関係およびブロックせん断試験と通直な試験体の３点曲げ試験の結果との比較を示す。τ_c の値はブロックせん断試験から得られたせん断強さ τ_{BS} の値よりも大きく，円孔縁における応力集中の影響が抑制されていることを示している。また，H' が 5 mm および 10 mm の際の τ_c の平均値に有意差がないことから，切り欠き底間の距離を十分に小さくすることによって適切にせん断強さが評価できる可能性を示唆している。

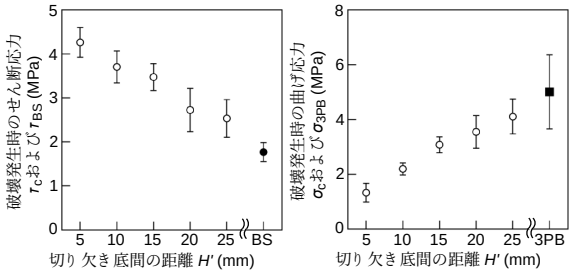

図２　非対称４点曲げ試験から得られた結果とブロックせん断試験から得られた結果の比較（左）および３点曲げ試験から得られた結果の比較（右）

(2) **円孔を開けた試験体のねじり振動試験によるスプルースのせん断弾性係数の評価**

図３のように試験体のまさ目面の幅中央に様々な大きさおよび試験体端部からの位置を変化させて円孔を開け，ねじり振動試験から見かけのせん断弾性係数に及ぼす円孔の影響について検討した。試験体の長さおよび幅をそれぞれ L **および** B **とした。また，試験体の一端から円孔の中心まで距離を** cL**，円孔直径を** $2R$ **と定義し，**c **の値および** $2R/B$ **の値をそれぞれ** 0-0.5 **および** 0-0.9 **の範囲で変化させて見かけのせん断弾性係数を測定した。**

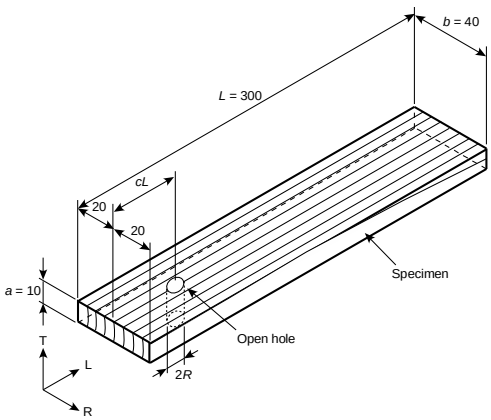

図３　ねじり振動試験に使用した試験体の概要（単位：mm）

図４に円孔を開けていない試験体のせん断弾性係数 G_{LR}^{HF}**，円孔を持つ試験体のせん断弾性係数** G_{LR}^{OH}**，**G_{LR}^{OH}/G_{LR}^{HF} **の値およびこれらの変動係数と円孔直径** $2R$ **および円孔の位置** c **の関係を示す。**G_{LR}^{OH} **および** G_{LR}^{OH}/G_{LR}^{HF} **値も** $2R$ **や** $2R/B$ **値がそれぞれ** 1 mm **および** 0.2 **よりも大きくなると減少している。また，**$2R/B$ **値が** 0.4 **よりも大きくなると円孔の位置の影響が現れ，円孔が試験体の中央に近くなる程（**c **の値が** 0.5 **に近くなる程）**G_{LR}^{OH} **および** G_{LR}^{OH}/G_{LR}^{HF} **値が小さくなっている。**

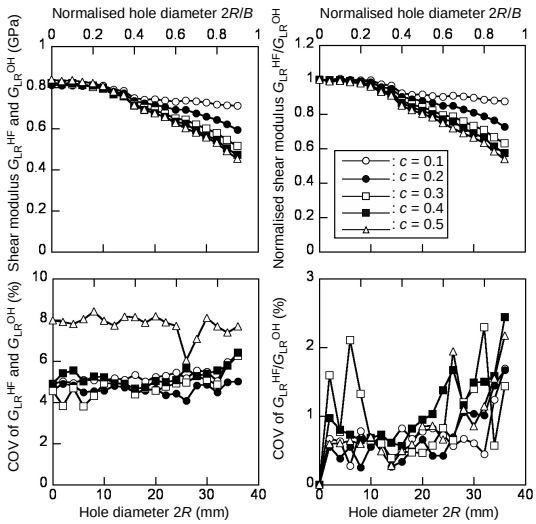

図４　せん断弾性係数の平均値および変動係数と円孔直径および円孔の位置の関係

以上のような見かけのせん断弾性係数に及ぼす円孔の大きさおよび位置の影響を予測するために以下のような式を提案した。

$$\frac{G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{OH}}}{G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{HF}}} = 1 - p\left(\frac{2R}{B}\right) - (1-p)\left(\frac{2R}{B}\right)^{n} \qquad (1)$$

$$\begin{cases} p = B_1 c + B_2 \\ n = B_3 c^{-B_4} \end{cases}$$

ここで B_1- B_4 は実験から得られたパラメータである。図５にこの式を当てはめた結果を示す。円孔の位置 c に関わらず $G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{OH}}/G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{HF}}$-$2R/B$ 関係は式(1)で適切に表現できることが示唆されている。

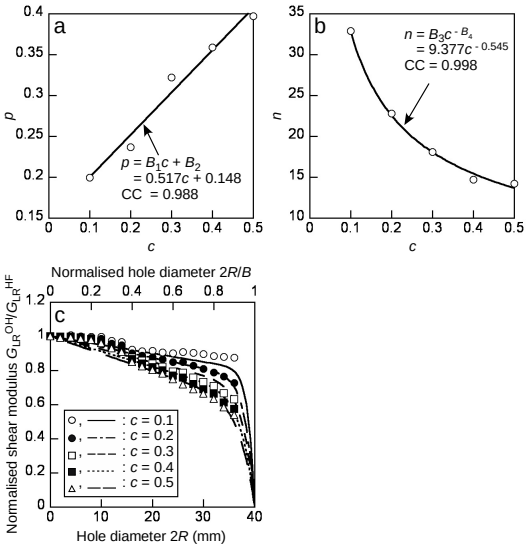

図５　ねじり振動試験から得られた $G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{OH}}/G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{HF}}$-$2R$ および $G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{OH}}/G_{\mathrm{LR}}^{\mathrm{HF}}$-$2R/B$ 関係と式(1)で予測された関係の比較

(3) 側面に溝を切った試験体および溝のない試験体の非対称４点曲げ試験による木材のモード II き裂進展開始時の応力拡大係数の測定

試験体としてベイツガを使用した。図６に試験体の概要を示す。まず図６a のように長手方向の中央部の上下対称に円孔およびスリットを導入し，下部の円孔縁から様々な長さの初期き裂を導入した試験体を作成し，非対称４点曲げ試験を実施して面内せん断モード（モード II）におけるき裂進展開始時の応力拡大係数の臨界値（K_{IIc} 値）を測定した。ただし，この形状の試験体を使用した場合，初期き裂長さが短いと荷重点の裏側で引張応力による破壊がき裂進展に先行することが危惧された。そこで，より長い初期き裂の範囲を実現するために，図６b のように側面中央に溝を切り，図６a と同様に円孔とスリットを導入して非対称４点曲げ試験を実施して K_{IIc} 値を測定した。また，得られた結果を端部切り欠きはりの３点曲げ試験（3ENF 試験）から得られた結果と比較し，K_{IIc} 値の測定における非対称４点曲げ試験の適用性について検討した。

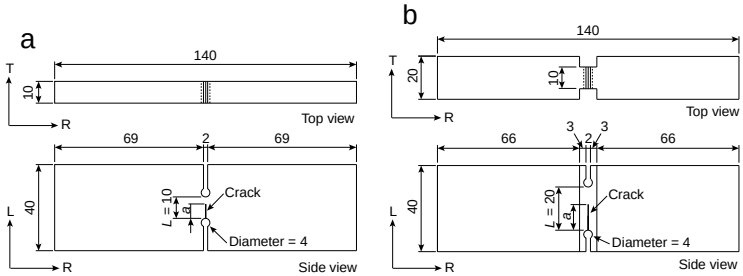

図６　K_{IIc} 値測定に使用した試験体の概要　a：側面に溝のない試験体，b：側面に溝を切った試験体　単位：mm

図７に非対称４点曲げ試験から得られた K_{IIc} 値と初期き裂長さの関係および 3ENF 試験との比較を示す。いずれの試験体も非対称４点曲げ試験から得られた K_{IIc} 値は 3ENF 試験から得られた値よりも有意に小さい。これは非対称４点曲げ試験でき裂前方に発生する強変形領域による剛性低下を無視していることに起因する。

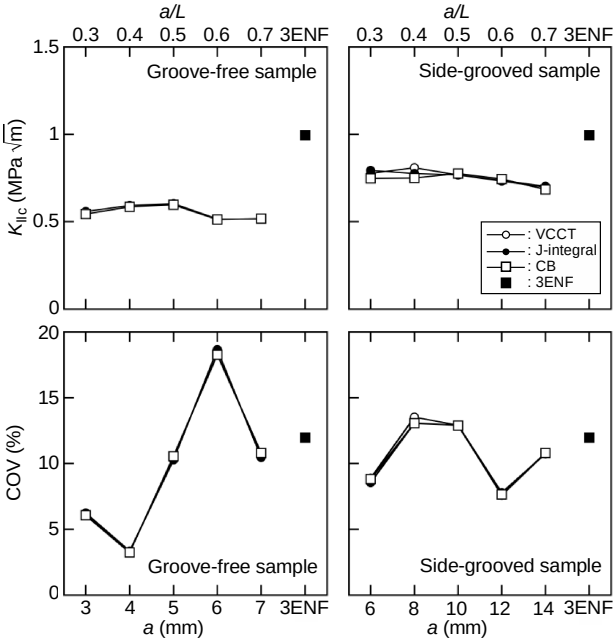

図７　非対称４点曲げ試験から得られた K_{IIc} 値と初期き裂長さ a および円孔縁間の距離で正規化した a/L の関係および 3ENF 試験で得られた結果との比較

強変形領域の影響については図７の結果を付加き裂長さで補正することで導入することが可能である。図８に付加き裂長さを導入した結果を示す。得られた結果は 3ENF 試験の結果とよく一致していることを示している。

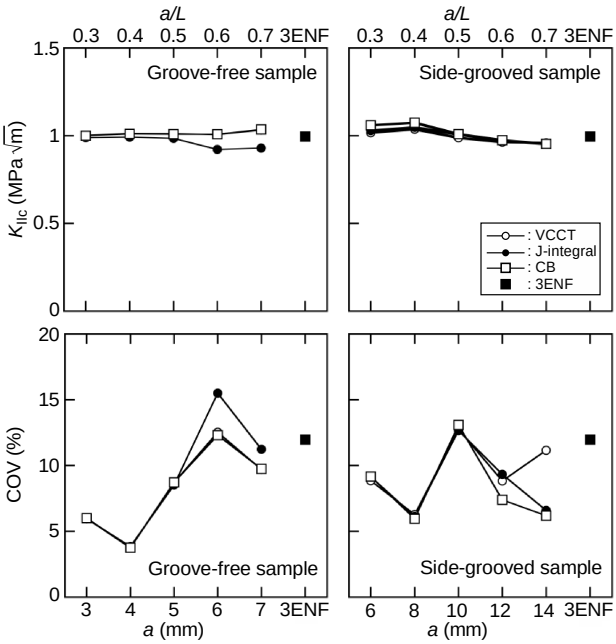

図８　初期き裂長さを補正することで得られた K_{IIc} 値と初期き裂長さ a および円孔縁間の距離で正規化した a/L の関係および 3ENF 試験で得られた結果との比較

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計12件（うち査読付論文　10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 Yoshihara Hiroshi、Maruta Makoto	４．巻 258
２．論文標題 Mode II critical stress intensity factor of solid wood obtained from the asymmetric four-point bend fracture test using groove-free and side-grooved samples	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	６．最初と最後の頁 108043～108043
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engfracmech.2021.108043	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 吉原　浩，吉延匡弘，丸田　誠	４．巻 75
２．論文標題 逆対称４点曲げ試験による木材の木口面のせん断強さの評価	５．発行年 2021年
３．雑誌名 木材工業	６．最初と最後の頁 296～300
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 Yoshihara Hiroshi、Maruta Makoto	４．巻 55
２．論文標題 Determining the Young’s modulus of solid wood by considering the fundamental frequency under the free-free flexural vibration mode	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Wood Science and Technology	６．最初と最後の頁 919～936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00226-021-01306-5	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 Yoshihara Hiroshi、Maruta Makoto	４．巻 76
２．論文標題 Critical load for buckling of solid wood elements with a high slenderness ratio determined based on elastica theory	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Holzforschung	６．最初と最後の頁 179～187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/hf-2021-0108	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 Yoshihara Hiroshi、Wakahara Momoka、Yoshinobu Masahiro、Maruta Makoto	4．巻 14
2．論文標題 Torsional Vibration Tests of Extruded Polystyrene with Improved Accuracy in Determining the Shear Modulus	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Polymers	6．最初と最後の頁 1148～1148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/polym14061148	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 吉原　浩，丸田　誠	4．巻 71
2．論文標題 円孔を有する試験体のねじり振動試験によるシトカスプルースのせん断弾性係数の評価	5．発行年 2022年
3．雑誌名 材料	6．最初と最後の頁 掲載決定
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 吉原　浩，吉延匡弘，丸田　誠	4．巻 71
2．論文標題 ねじり振動試験から得られた板紙のせん断弾性係数の評価	5．発行年 2022年
3．雑誌名 材料	6．最初と最後の頁 掲載決定
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 吉原　浩，吉延匡弘，丸田　誠	4．巻 68
2．論文標題 板紙の座屈試験と座屈荷重の評価方法の検討	5．発行年 2022年
3．雑誌名 木材学会誌	6．最初と最後の頁 掲載決定
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 吉原　浩，吉延匡弘，丸田　誠	4．巻 67
2．論文標題 4種の試験方法から得られた板紙のヤング率の比較	5．発行年 2021年
3．雑誌名 木材学会誌	6．最初と最後の頁 掲載決定
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 Yoshihara Hiroshi、Maruta Makoto	4．巻 276
2．論文標題 Determination of the resistance curve of solid wood by measuring two load?deflection compliances in the double cantilever beam and three-point end-notched flexure tests	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6．最初と最後の頁 108876～108876
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engfracmech.2022.108876	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 Yoshihara Hiroshi、Yoshinobu Masahiro、Maruta Makoto	4．巻 38
2．論文標題 Bending stiffness and moment capacity of cardboard obtained from three-point and elastica bending tests	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Nordic Pulp & Paper Research Journal	6．最初と最後の頁 73～85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/npprj-2022-0087	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 Yoshihara Hiroshi、Yoshinobu Masahiro、Maruta Makoto	4．巻 0
2．論文標題 Interlaminar shear modulus of cardboard obtained by torsional and flexural vibration tests	5．発行年 2023年
3．雑誌名 Nordic Pulp & Paper Research Journal	6．最初と最後の頁 0～0
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/npprj-2023-0022	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5件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

1．発表者名 吉原　浩，吉延匡弘，丸田　誠
2．発表標題 両端自由ねじり振動試験による板紙のせん断弾性係数の測定
3．学会等名 2021年度日本木材学会中国・四国支部研究発表会
4．発表年 2021年

1．発表者名 吉延匡弘，楠田翔大，吉原　浩
2．発表標題 ラッカセイ外殻の繊維化
3．学会等名 2021年度日本木材学会中国・四国支部研究発表会
4．発表年 2021年

1．発表者名 吉原　浩，吉延匡弘
2．発表標題 非対称４点曲げ試験による木材の木口面のせん断強さの評価
3．学会等名 2020年中国・四国地域木材関連学協会支部合同セミナー
4．発表年 2020年

1．発表者名 持田一成，吉延匡弘，吉原　浩
2．発表標題 高純度パルプのグラフト共重合反応性におよぼす繊維サイズの影響
3．学会等名 2020年中国・四国地域木材関連学協会支部合同セミナー
4．発表年 2020年

１．発表者名 吉延匡弘，平岡凜太郎，吉原　浩
２．発表標題 プラズマ放電処理による表面改質和紙の水分収着特性
３．学会等名 2022年度日本木材学会中国・四国支部研究発表会
４．発表年 2022年

〔図書〕　計0件

〔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
研究協力者	丸田　誠 (MARUTA Makoto)	静岡理工科大学	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関