

## 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24年 5月17日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21580207

研究課題名（和文） 木材と木質材料の破壊力学特性値の試験法による差異の原因の究明と新しい評価法の確立

研究課題名（英文） Examination of the source of differences among the fracture mechanics properties of wood and wood-based materials obtained by different methods and establishment of the novel characterization methods

研究代表者

吉原 浩 (YOSHIHARA HIROSHI)

島根大学・総合理工学部・准教授

研究者番号：30210751

研究成果の概要（和文）：木材および木質材料の破壊力学特性値は、弾性定数や強度値と同様に材料特性値であるにも関わらず、実施する試験法や試験体形状によって大きな差が生じることが指摘されていた。このような差異の原因としてき裂先端の非線形挙動を無視することが考えられる。本研究では、こうした非線形挙動を仮想的なき裂長さの導入で補正することにより試験条件による影響を少なくして材料特性値として十分に評価可能な評価法を提案することができた。また、き裂のない材料の強度特性に関しても、仮想的なき裂長さの導入により線形破壊力学の評価法が適用できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：Although the fracture mechanics properties of wood and wood-based materials are essentially the material parameters as well as the elastic properties and strengths, it has been suggested that they are often dependent on the measurement methods and specimen configurations. This dependence is thought to be because of the ignorance of nonlinear behaviors ahead of the crack tip. In this study, several methods for characterizing the fracture mechanics properties of wood and wood-based materials were proposed while considering the nonlinear behaviors induced at the crack tip. In addition, the methods proposed in this study were also effective for predicting the strength properties of a crack-free specimen as well as those of the specimen with a crack.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：破壊力学特性値, 評価法

## 1. 研究開始当初の背景

近年、大型の構造物に木材や木質材料を利

用する機会が非常に増えてきたが、このことは同時に構造物の破壊を誘発する潜在的な

欠陥が存在する可能性が増大することを意味している。たとえば、大断面集成材などの接着層を有する木質材料では、接着不良部分が鋭いき裂として振る舞う可能性がある。また、ボルトや釘接合においては、接合部の応力集中が鋭いき裂となる可能性も指摘されている。したがって、構造物の安全性を保証するためにも、木材や木質材料の破壊力学特性を適切に評価することがきわめて重要である。にもかかわらず、現在木材や木質材料の破壊力学特性の評価法は十分に確立していなかった。

このような試験方法による違いは、評価式に異方性の影響を考慮していないことに起因している。しかし、研究開始当初ではこのような不適切な解析によって木材や木質材料の破壊力学特性を的確に評価できないことが、国内外を問わずきわめて多かった。また、木材には異方性のみならず組織不均一や繊維の乱れが他の材料に較べて顕著であり、考慮することが不可欠であるが、このことについても十分に検討されていなかった。したがって、現在木材および木質材料本来の「材料特性値」である破壊力学特性値はまったく適切な評価ができない状況にあり、木材および木質材料で製造された構造物の安全性の保証の観点からも早急に解決すべき問題となっていた。したがって、木材や木質材料本来の「材料特性値」である破壊力学特性値を適切に評価するために、従来の方法ではなぜ破壊力学特性値に差違が生じるのか原因を究明し、木材および木質材料「独自」の評価法を確立することが必須であると考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究では、さまざまな試験法で木材および木質材料の破壊力学特性値を比較し、まず、従来の破壊力学特性評価法ではなぜ破壊力学特性値に差違を生じるのか究明し、その結果に基づいて木材および木質材料独自の破壊力学特性評価法の確立を目指した。また、短いき裂を持つ木材の破壊力学特性について検討し、線形破壊力学の理論によってき裂を持たない材料の強度特性が評価できるかについて検討した。

## 3. 研究の方法

(1) 木材および木質材料の破壊力学特性評価における試験方法および試験体形状の影響の検討

純粋なモードが作用した場合の破壊じん性試験を行い、木材素材（ベイツガとスプルース）および代表的な木質材料である中密度繊維板（MDF）の破壊力学特性値の評価法の確立を目指した。試験体として異方性の程度が異なるスプルース、ベイツガ、バルサおよび

ブナを使用する。破壊力学特性値に与える試験法の影響を検討するために、破壊力学における3つの独立したモードのうち開口モードおよび面内せん断モードについて複数の試験法で試験を実施した。具体的に示すと

a. 開口モード（モード I）の試験として、コンパクト引張（CT）試験、片側クラック引張（SENT）試験、片側クラック曲げ（SENB）試験および双片持ちばり（DCB）試験を行った。

b. 面内せん断モード（モード II）の試験として、片側クラック非対称4点曲げ（ASENB）および端面切欠ばりの3点曲げ（3ENF）試験を行った。

以上に挙げた2つの独立したモードについて、破壊力学特性値である破壊じん性値（ $G_c$  値）および応力拡大係数の臨界値（ $K_{Ic}$  値）を求めた。なお、 $K_{Ic}$  値を求める際、試験体形状によって決定される形状係数の決定が必須である。前述したように、この形状係数には等方性材料の解析結果が汎用され、異方性は無視されることがほとんどであったが、そのような解析方法が有効ではないことが示されている。したがって、本研究では木材の異方性を考慮した有限要素法解析によって形状係数を決定した。

それぞれの試験および数値解析の結果から、試験方法および試験体形状が破壊力学特性値の評価にいかなる影響を与えるかについて検討した。

(2) 破壊力学に基づく短いき裂を有する木材の強度特性の評価およびき裂を持たない木材の強度特性の評価

破壊力学特性値は試験体に十分に長いき裂を導入して評価するのが一般的である。しかし、十分な長さを持たないき裂が急速に伝播することによって材料を損傷することは頻繁に発生する。金属等では、初期き裂長さが短いとき裂の影響が小さくなり、き裂の存在を無視して材料強度を記述することが一般化しており、木材でもそのような考え方が一般的であった。しかし、このような考え方が木材に当てはまるか否かについては、あまり検討された例が存在しなかった。したがって、本研究ではきわめて短いき裂を木材に導入し、その強度特性を破壊力学および材料力学の側面から検討した。

短いき裂を持つ試験体の開口モードおよび面内せん断モードについて以下の試験法で試験を実施した。

a. 開口モード（モード I）の試験として、片側クラック引張（SENT）試験、片側クラック曲げ（SENB）試験を行った。

b. 面内せん断モード（モード II）の試験として、側面テーパ付き試験体の非対称4点曲げ（STAFPB）試験を行った。

以上の試験はき裂を持たない試験体でも実施可能であるため、き裂を持たない試験体

も別途作製して同じ試験を実施した。また、それぞれのモードについてエネルギー的に適切に破壊力学特性値が得られると考えられる双片持ちばり (DCB) 試験および端部切り欠きばりの3点曲げ (3ENF) 試験を実施し、得られた応力拡大係数の臨界値 ( $K_{Ic}$  値) を上述した各試験法で得られた  $K_{Ic}$  値と比較した。

#### 4. 研究成果

以下に本研究課題で得られた成果の一部について記す。

##### (1) 片側切り欠き試験体の3点曲げ試験 (SENB 試験) による木材の開口モードの破壊力学特性評価

本研究ではベイツガを用いて図1のような SENB 試験を行い、開口モードにおけるき裂進展開始時の応力拡大係数  $K_{Ic}$  値を求め、有限要素法解析やエネルギー的に適切に破壊力学特性値の評価が可能な双片持ちばり試験 (DCB 試験) の結果と比較することによって異方性の影響やき裂長さの影響について検討した。

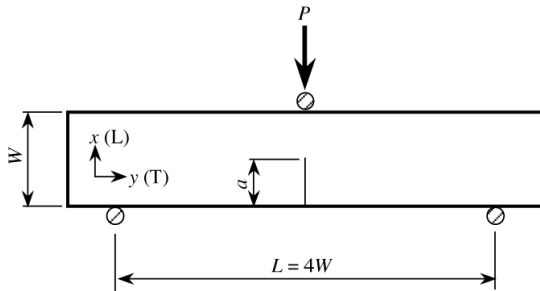


図1 SENB 試験の概要

その結果、 $K_{Ic}$  値を求める際に必要な形状係数に試験体の異方性の影響はあまりなく、従来等方性材料の  $K_{Ic}$  値の評価に使用されている形状係数がそのまま適用可能であることがわかった。

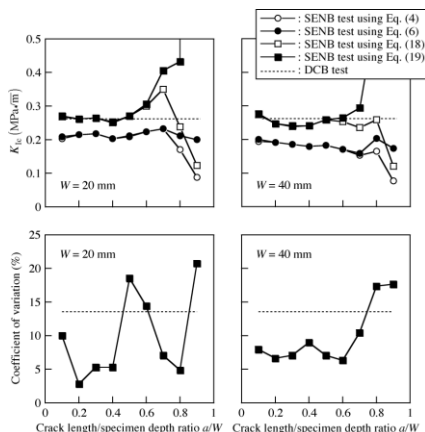


図2  $K_{Ic}$  値と初期き裂長さ／はりせい比の関係  
○および●は初期き裂長さをそのまま使用した場合、□および■はき裂長さを補正した場合

また、初期き裂長さをそのまま SENB 試験の結果に適用して得られた  $K_{Ic}$  値は DCB 試験で得られた  $K_{Ic}$  値よりも小さく評価されたが、き裂先端における非線形挙動を考慮してき裂長さを補正することによって DCB 試験とよく一致した  $K_{Ic}$  値を得ることができた。ただし、初期き裂長さが長いとき裂先端が荷重点に近くなり、荷重点の影響によって DCB 試験の結果と乖離した。したがって、SENB 試験でき裂長さを補正した場合、初期き裂長さ／はりせい比 ( $a/W$ ) を 0.1 から 0.6 に限定することによって適切に  $K_{Ic}$  値を評価できる可能性が示唆された。

##### (2) 片側切り欠き試験体の非対称4点曲げ試験 (AFSENB 試験) による木材の面内せん断モードの破壊力学特性評価

本研究ではベイツガを用いて図3のような AFSENB 試験を行い、面内せん断モードにおけるき裂進展開始時の応力拡大係数  $K_{IIc}$  値を求め、有限要素法解析やエネルギー的に適切に破壊力学特性値の評価が可能な端部切り欠きばりの3点曲げ試験 (3ENF 試験) の結果と比較することによってき裂長さの影響について検討した。また、既報 (Yoshihara H. Mode II fracture mechanics properties of wood measured by the asymmetric four-point bending test using a single-edge-notched specimen. Eng. Fract. Mech. 75, 2008, 4727-4739) では形状係数を初期き裂長さ／はりせい比 ( $a/W$ ) の1次式で近似したが、ここではさらに3次式および4次式で近似し、形状係数の影響について検討した。

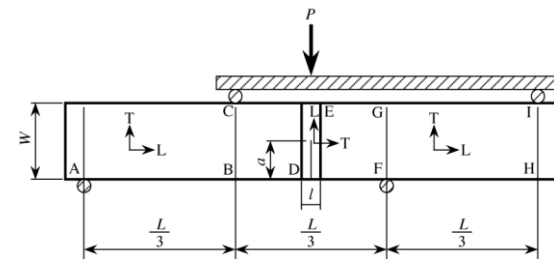


図3 AFSENB 試験の概要

その結果、図4のように一連の開口モードの破壊力学試験同様、初期き裂長さをそのまま AFSENB 試験の結果に適用して得られた  $K_{IIc}$  値は 3ENF 試験で得られた  $K_{IIc}$  値よりも小さく評価された。しかし、ここでもき裂先端における非線形挙動を考慮してき裂長さを補正することによって 3ENF 試験とよく一致した  $K_{IIc}$  値を得ることができた。ただし、形状係数  $f(a/W)$  を1次式や4次式で近似した場合、AFSENB 試験で得られた  $K_{IIc}$  値は  $a/W$  の値が 0.9 になると明らかに 3ENF 試験で得られた値よりも小さかった。一方、 $f(a/W)$  を3次式で

近似することにより、得られた  $K_{Ic}$  値はより広い範囲で 3ENF 試験の結果とよく一致した。

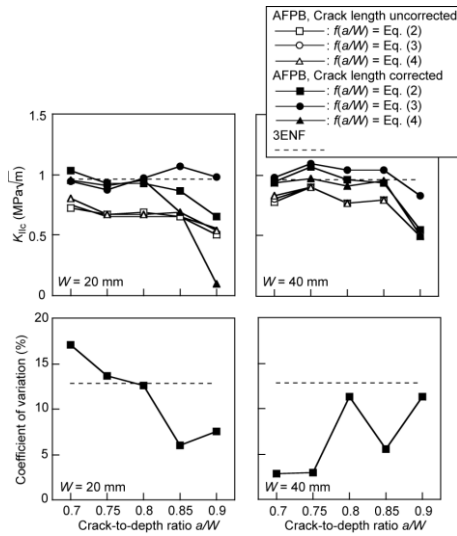


図4  $K_{Ic}$  値と初期き裂長さ／はりせい比の関係  
□および■は形状係数に1次式を使用，○および●は3次式を使用，△および▲は4次式を使用した。

(3) 短いき裂を持つ試験体の SENB 試験による破壊挙動の検討

本研究では短いき裂を持つ試験体およびき裂を持たない試験体の破壊挙動についても線形破壊力学に基づいて検討した。

まず、年輪構造を持たない南洋材であるアガチスの木口面およびまさ目面に短いき裂を導入し、図1のような SENB 試験を実施して破壊挙動を検討した（ただしシステムは木口面で半径方向にき裂を導入した TR システムおよびまさ目面で繊維方向にき裂を導入した RL システムである）。き裂を導入した金属の引張試験に関する既往の研究では、き裂がある程度短くなるとその強度はき裂のない試験体の強度と差がなくなることが報告されているため、研究当初は木材についても同様な傾向があることが予想された。しかし、SENB 試験の結果、初等はり理論から得られた公称曲げ強さは図5に示すようにわずかなき裂の存在で明らかに低下することがわかった。

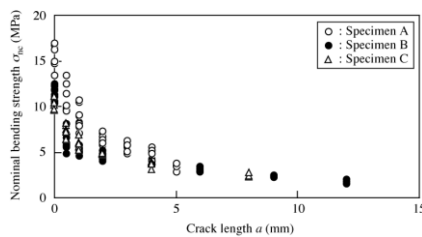


図5 SENB 試験から得られた公称曲げ強さと初期き裂長さの関係（木口面にき裂を導入した場合）

また、得られた公称曲げ強さから  $K_{Ic}$  値を求めると、初期き裂長さに依存せず本来一定値になるべき  $K_{Ic}$  値が、図6のようにき裂の短い領域で明らかにき裂長さに依存することがわかった。しかし、これまで述べたような付加き裂長さを導入することにより、 $K_{Ic}$  値のき裂長さ依存性が少なくなることが示された（図7）。

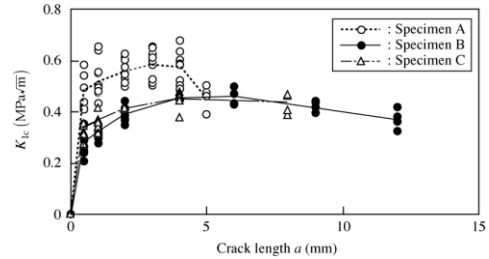


図6 SENB 試験から得られた  $K_{Ic}$  値と初期き裂長さの関係（木口面にき裂を導入した場合）

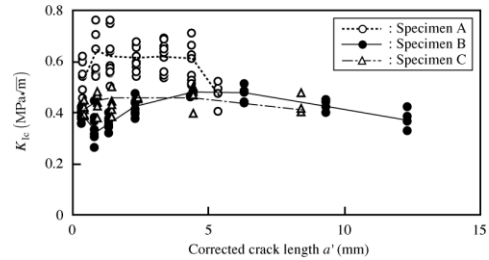


図7 SENB 試験から得られた  $K_{Ic}$  値と補正したき裂長さの関係（木口面にき裂を導入した場合）

以上、補正したき裂長さを用いて  $K_{Ic}$  値を求め、さらに公称曲げ強さを計算したところ、図8のようにき裂のないときの曲げ強さも線形破壊力学の理論から予測することが可能であることがわかった。

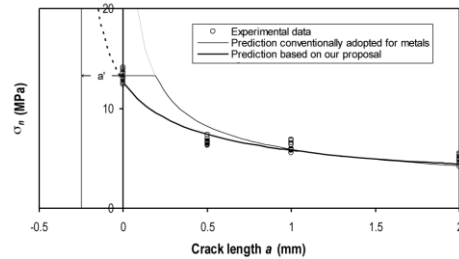


図8 SENB 試験から得られた公称曲げ強さとき裂長さの関係および本研究で提案した方法の比較（まさ目面にき裂を導入した場合）

$a'$  は初期き裂長さとして補正き裂長さの和

(4) 短いき裂を持つ側面テーパ付き試験体の AFSENB 試験による面内せん断モードの破壊力学特性の検討

(3)に示した付加き裂長さの考え方は面内せん断モードにおいても有効であると考えられた。そこでここでは図9のようにアガチスを用いて作製した側面テーパ付き試験体の中央に短いき裂を導入し、非対称4点曲げ試験 (AFSENB 試験) を実施することで面内せん断モードの破壊挙動を検討した。その結果、開口モードにおける SENB 試験の結果と同様に、初等はり理論から得られた公称せん断強さは図10に示すようにわずかなき裂の存在で明らかに低下することがわかった。

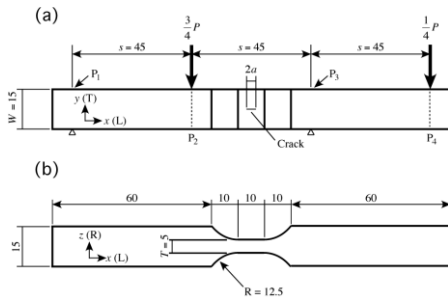


図9 側面テーパ付き試験体の AFSENB 試験の概要

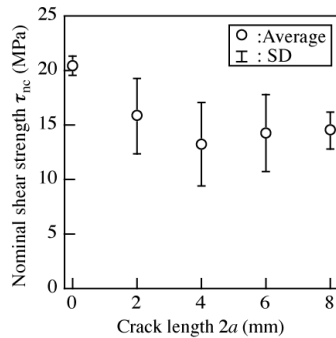


図10 AFSENB 試験から得られた公称せん断強さと初期き裂長さの関係

また、得られた公称せん断強さから  $K_{IIC}$  値を求めると、開口モードと同様に初期き裂長さに依存せず本来一定値になるべき  $K_{IIC}$  値が、図11のようにき裂の短い領域で明らかにき裂長さに依存することがわかった。さらにエネルギー的に適切な値が得られると考えられる3ENF試験から求めた  $K_{IIC}$  値よりも著しく小さいことが示された。しかし、(3)で述べた SENB 試験と同様に付加き裂長さを導入することにより、 $K_{IIC}$  値のき裂長さ依存性が少なくなることがわかった (図12)。また、開口モードの場合と同様に、補正したき裂長さを用いて  $K_{IIC}$  値を求め、さらに公称せん断強さを計算したところ、図13のようにき裂のないときの曲げ強さも線形破壊力学の理論から予測することが可能であることがわかった。

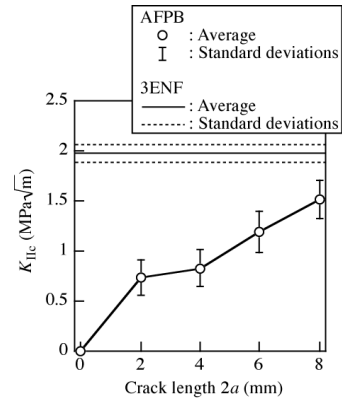


図11 AFSENB 試験から得られた  $K_{IIC}$  値と初期き裂長さの関係および3ENF試験で得られた  $K_{IIC}$  値との比較

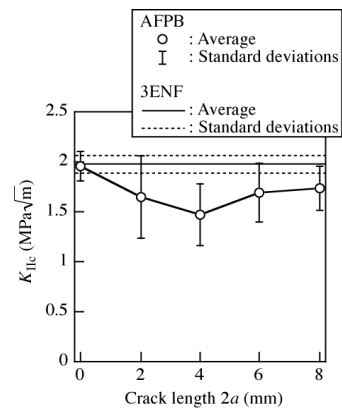


図12 き裂長さの補正により得られた  $K_{IIC}$  値と初期き裂長さの関係および3ENF試験で得られた  $K_{IIC}$  値との比較

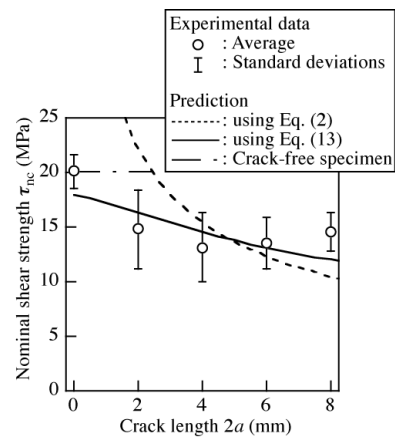


図13 AFSENB 試験から得られた公称せん断強さとき裂長さの関係および本研究で提案した方法の比較

以上が本研究課題で得られた成果の概要である。

上述したように、研究開始当初において破壊力学特性はその評価方法で明らかな差異が生じており、力学特性値として評価可能であるとはとても言い難い状況であった。しかし、き裂先端の非線形挙動を考慮することによって各方法で得られた破壊力学特性値を一義的に評価することが可能であることが示された。こうした複数の試験方法による差異および統一的な力学特性値を求めようとする試みはこれまであまり存在しなかったため、この点において評価できると考えられる。

また、短いき裂を導入した材料の強度特性の検討から、線形破壊力学がき裂を持たない材料の強度特性の記述に有効であることが示されたことは、き裂の有無に応じて理論を使い分けていた既往の方法に一石を投じたとして評価している。

今後は木材および木質材料の破壊力学特性をより適切に評価できる方法についてさらに検討を加え、炭素繊維強化プラスチックのように主要な規格に標準化できるまで洗練していくことが必要であると思われる。

#### 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8件)

① Nakao, T., Susanti, C. M. E., Yoshihara, H. Examination of the failure behavior of wood with a short crack in the radial-longitudinal system by single-edge-notched bending test. J. Wood Sci., 査読有, in press.

DOI 10.1007/s10086-012-1266-6

② Susanti, C. M. E., Nakao, T., Yoshihara, H. Examination of the mode II fracture behaviour of wood with a short crack by asymmetric four-point bending test. Eng. Fract. Mech., 査読有, 78, 2011, 2775-2788  
DOI 10.1016/j.engfracmech.2011.07.014

③ Yoshihara, H., Usuki, A. Mode I critical stress intensity factor of wood and medium-density fibreboard measured by compact tension test. Holzforschung, 査読有, 65, 2011, 729-735  
DOI 10.1515/HF.2011.063

④ Yoshihara H. Mode I and mode II initiation fracture toughness and resistance curve of medium density fiberboard measured by double cantilever beam and three-point bend end-notched flexure tests, Eng. Fract. Mech., 査読有, 77, 2010, 2537-2549  
DOI 10.1016/j.engfracmech.2010.06.015

⑤ Susanti C. M. E., Nakao T., Yoshihara

H. Tensile strength of spruce with a short crack in the radial-tangential system. J. Forest Biomass Res. Soc., 査読有, 5, 2010, 17-20

<http://www.moribiomass.net/magazine.html#cont05>

⑥ Yoshihara, H. Influence of loading condition on the measurement of mode I critical stress intensity factor of wood and medium density fiberboard by the single-edge-notched tension test. Holzforschung, 査読有, 64, 2010, 735-745  
DOI 10.1515/HF.2010.119

⑦ Susanti C. M. E., Nakao T., Yoshihara H. Examination of the failure behaviour of wood with a short crack in the tangential-radial system by single-edge-notched bending test. Eng. Fract. Mech., 査読有, 77, 2010, 2527-2536  
DOI 10.1016/j.engfracmech.2010.05.019

⑧ Yoshihara H. Examination of the mode I critical stress intensity factor of wood measured by single-edge-notched bending test, Holzforschung, 査読有, 64, 2010, 501-509

DOI 10.1515/HF.2010.083

[学会発表] (計1件)

① Susanti C. M. E., Nakao T., Yoshihara H. The fracture properties in short crack of agathis wood measured by mode I single edge-notched bending test, 第60回日本木材学会大会, 2010年3月17日, 宮崎市(宮崎市民プラザ大会議室)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉原 浩 (YOSHIHARA HIROSHI)  
島根大学・総合理工学部・准教授  
研究者番号: 30210751

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

太田 正光 (OHTA MASAMITSU)  
東京大学大学院・農学生命科学研究科・教授  
研究者番号: 20126006