

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18405029

研究課題名（和文）早生樹人工林バイオマスの利用効率を向上させる基礎技術の探索

研究課題名（英文）Fundamental technique to improve the material performance of biomass from the fast-growing plantation forest

研究代表者

山本 浩之（YAMAMOTO HIROYUKI）

名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授

研究者番号：50210555

研究成果の概要：

早生樹植林木の成長（成長速度，生育環境）と材質との関連性を調べた。その結果，以下のことが知られた。（1）商業伐期に達した人工林では，どの樹種についても，肥大成長速度は木部表面材質には本質的には影響を及ぼさない。（2）熱帯原産種や赤道熱帯地域に成育する樹種では，木部材質の成熟（成熟材の形成）は一定の直径に達してから始まるが，一方，亜熱帯・温帯に成育する樹種では，木部成熟は形成層齢に依存する傾向が強い。（2）南米に植栽されたユーカリグランディスの材質に及ぼす緯度区分の影響を調べたところ，赤道に近い植林地ほど好ましい材質（低い成長応力，高い密度，低いあて材率）の木材を産出する，などがわかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,000,000 円	1,500,000 円	6,500,000 円
2007年度	4,000,000 円	1,200,000 円	5,200,000 円
2008年度	2,000,000 円	600,000 円	2,600,000 円
年度			
年度			
総計	11,000,000 円	3,300,000 円	14,300,000 円

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：熱帯林業，早生樹，人工林，木質バイオマス，森林再生，低炭素社会，ブラジル，ユーカリ

1. 研究開始当初の背景

(1) 早生樹植林の意義

化石資源枯渇と地球温暖化という，現代文明が直面する二つの艱難を，森林の持つ環境保全機能と資源供給能力によって解決しようとする動きが広がっている。我々は，従来の商業樹種の数倍～数十倍もの炭素固定速度を示す“早生広葉樹”の植林とその資源利用に着目する。その意義は，耕作・放牧跡地

の初期緑化と天然林再生の準備，水資源の涵養，カーボンポジティブな資源・エネルギーの迅速供給，さらには企業規模焼畑農業を植林業に振り向けることによる天然林の焼失圧低減である。

(2) 産業植林を進める上での問題点

植林活動を大規模に推進するにあたっては，植林に対する経済的インセンティブの確立が不可欠である。それは，収穫物の一部を

経済価値の高い用材製品（住宅や家具などの部材）として市場供給することで可能となる。しかしながら早生樹資源の用途は、パルプや薪炭材など安価な原料に限られており、これを材利用する動きはほとんどない。用材特性（強度や加工性などの材料物性）についての体系的な研究成果が、事実上皆無であること、それゆえ工業利用の契機が与えられないことがその理由である。

2. 研究の目的

早生樹産業植林を進める上では、得られる林産資源を、建築物や家具部材などの付加価値の高い“用材”として市場供給しなければならない。そうすることによって、植林事業に経済的インセンティブを付与できるからであり、結果として大規模焼畑農業による天然林の消失圧を低減し、また化石代替資源・エネルギーの供給源確保にもつながることになる。しかしながら、早生樹資源の用材特性に関するデータは皆無に等しく、それゆえ工業利用の実績は実質的に皆無であった。そこで本研究課題では、成長特性と材質との関連性に関する現地調査を行い、これをデータベース化し、木材産業界に広く公表することによって、早生樹資源の工業利用圧の向上をはかり、もって産業植林の推進に貢献することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 調査・分析対象樹種（図1参照）

・第1グループ（熱帯東南アジア、亜熱帯・温帯オーストラリアの植林地）

11年生 *Acacia mangium*, 11年生 *A. auriculiformis*（マレーシア、ともにサバ州、Kota Kinabalu 近郊）、3.5 および 7 年生 *Gmelina arborea*（インドネシア、それぞれ中部スラウェシ州 Palopo 近郊、東カリマンタン州 Batu Putih 地区）、14 年生 *Eucalyptus grandis*（豪、Brisbane 近郊）、11 年生 *E. globulus*（豪、Augasta 近郊）、8 年生 *Paraserianthes falcataria* - Java seed および 7 年生 *P. falcataria* - Solomon seed（インドネシア、ともに東ジャワ州 Kediri 近郊）の産業植林地を調査した。

・第2グループ（ブラジルとアルゼンチンの植林地）

赤道域から亜熱帯・温帯境界域までの広範囲の緯度・気候区分に植栽されている *E. grandis* 産業植林地（ブラジルでは 16~18 年生、アルゼンチンでは 9 年生）を調査対象とした。調査地は、低緯度熱帯（Acailandia）、中緯度熱帯（Posto da Mata）、亜熱帯・温帯境界域（Porto Alegre および Paranacito）である。

3.5 年生 *G. arborea*（スラウェシ島）および 9 年生 *E. grandis*（アルゼンチン）の植林地を

除けば、どの植林地もすべて商業伐期齢に達していた。各植林地において、大小の直径を取り混ぜて 15~50 個体を選木した

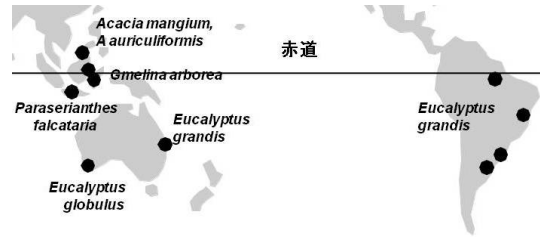


図 1. 研究フィールド. 第 1 グループとして東南アジア・オーストラリアを、第 2 グループとしてブラジル・アルゼンチンを設定。

(2) 調査・分析手順

① フィールド調査と研究室における材質解析

植林地においては、植林地ごとの成長状況調査のほか、供試樹木の胸高位置において、木部表面成長応力解放ひずみを測定し、続いて木部試料のサンプリングを行った。さらに試料を持ち帰り、各種材質特性（繊維長、気乾密度、マイクロフィブリル傾斜角など、それぞれ、木部表面での円周分布と髓から木部表面までの放射方向分布）を実験室において解析した。

② 材質特性と肥大成長速度との比較

表面成長応力解放ひずみを含む各種材質指標の木部表面における測定結果を個体ごとに平均し、植林地ごとに肥大成長速度（＝胸高直径/年生/2）と比較した。同じく、繊維長、気乾密度、マイクロフィブリル傾斜角の放射方向変動パターン（南北方向）を、肥大成長速度と比較した。

③ 木部成熟挙動

繊維長の放射方向分布パターンからは、木部の材成熟様式（成熟材形成が直径成長量あるいは形成層齢のどちらに依存的なのか）を植林地ごとに特徴づける統計的方法を考案した。詳細を以下に述べる。

繊維長 y と髓からの距離 x との関係を、指数関数

$$y = -(m_{\alpha} - m_{\beta}) \cdot \exp(-bx) + m_{\alpha} \quad (1)$$

で最小二乗近似する（図 2）。ただし m_{α} は成熟材での値、 m_{β} は髓付近（未成熟材）での値であり、いずれも実測によって植林地ごとに定まる。この方法によって b の値を決定する。

ついで、供試個体ごとに算出された b 値と胸高直径（ D ）との関係を、無相関検定する（図 2、3 参照）。各植林地において、繊維長の放射方向分布パターンが、肥大成長の遅い個体ほど急激に変動する場合には、 b 値と D との場合に有意な負の相関関係が認められることになる（図 3 a）。その場合、 b 値と D

との相関関係における有意性が高いほど、材成熟は形成層齢に依存する傾向が強い、と判断される。この場合は、初期段階における肥大成長をある程度抑制することによって、未成熟材の割合を少なくすることが出来るだろう。一方、個体直径（樹齢が同じなので、肥大成長速度に等価）に拘わらず、繊維長の放射方向分布が同一曲線を描く場合では、 b 値と D との間に有意な相関関係が存在しない（すなわち D によらず b が一定値をとる）ことになる（図 3b）。この場合、成熟材繊維の形成は、個体の樹齢に関係なく、ある程度の直径に達しなければ始まらない（すなわち材成熟は直径成長量に依存する）ということになる。そのような樹種では、初期段階において肥大成長を促進するような施行が、得られる資源の経済価値を高める上で有効になる。

本研究で提案した方法によって、その植林地における材成熟様式の樹種依存性のほか、緯度および気候区分の影響を考察した。

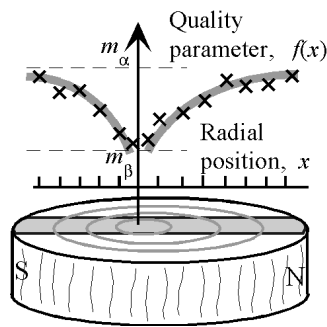


図 2. 繊維長の放射方向変動パターン $f(x)$. x は髄からの距離.

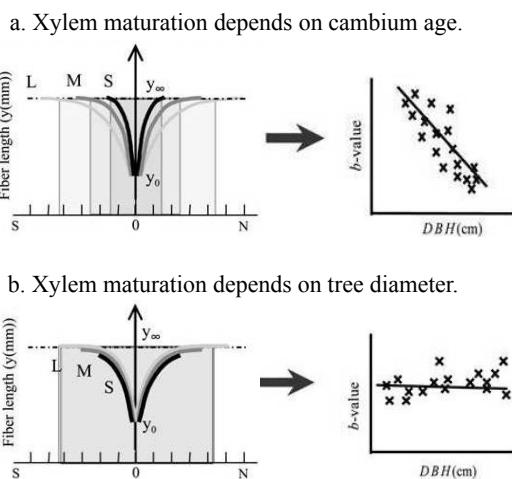


図 3. b 値と胸高直径との関係から、植林地における成熟材形成挙動を探索.

- 材成熟が形成層齢に依存する場合.
- 材成熟が直径成長量に依存する場合.

4. 研究成果

(1) 表面材質に及ぼす肥大成長速度の影響

①第 1 グループについての調査結果の総論

本研究において調査した植林地については、一部（3.5 年生 *G. arborea* と 9 年生 *E. grandis*）を除いて商業伐期に達していた。材質指標は、一部の植林地を除いて、個体直径（樹齢が同じなので、肥大成長速度に等価）の大小に関わらずほぼ一定となった。このことは、肥大成長を促進するような造林・育林施業を実施しても、丸太表面の材質は低下しない、ということの意味する。

②第 1 グループについての調査結果の各論

・表面成長応力解放ひずみ

大きさには、明確な樹種（あるいは植林地）依存性が認められた。絶対値が大きい順に平均値を示すと、*A. auriculiformis* (-0.116 %), *E. globulus* (-0.094 %), *A. mangium* (-0.080 %), *E. grandis* (-0.073 %), *P. falcataria* (Solomong seed, -0.075 %, Java seed, -0.067 %) であった。これらの値は、温帯産広葉樹に比べ明らかに大きい（縮みの解放ひずみが大きい）といえる。どの植林地についても、表面成長応力は、肥大成長速度の影響は受けないことも分かった。

・木部の気乾密度

大きさには、明確な樹種依存性が認められた。大きさの順に平均値を示すと、*E. globulus* (0.80 g/cm³), *A. auriculiformis* (0.70 g/cm³), *A. mangium* (0.68 g/cm³), *E. grandis* (0.66 g/cm³), *G. arborea* (3.5 年生 0.56 g/cm³, 7 年生 0.58 g/cm³), *P. falcataria* (Java seed - 0.39 g/cm³, Solomong - seed 0.36 g/cm³) であった。基本的には、木部表面の気乾密度は、基本的には肥大成長速度の影響を受けないものと考えられるが、*P. falcataria* (Java seed) と *E. globulus* では、負の相関関係が認められた。*P. falcataria* (Java seed) については、大径個体において過熟効果が始まっている可能性を指摘した。なお、同樹種であるにも関わらず、なぜか Solomon seed では負の相関関係が見られなかった。*E. globulus* に関しては、小径個体ほどゼラチン層を持つ厚壁繊維（引張あて材繊維）が形成されやすいため、気乾密度と肥大成長速度との間に負の相関関係が生じたと推察された。

・マイクロフィブリル傾斜角 (MFA)

MFA の大きさ（平均値）については、*E. globulus* (6.9°) が際立って低く、ついで *P. falcataria* (10.0°) が低く、*G. arborea* では大きかった (3.5 および 7 年生ともに 17.3°)。その他の植林地では 12~13° の範囲に収まっていた。また、*E. globulus* についてのみ、MFA と肥大成長速度との間に有意な負の相関関係が認められた。*E. globulus* の小径個体では、MFA は際立って小さかったが、これは小径個体では引張あて材繊維 (0°に近い MFA) を有

するゼラチン層を伴う)が形成されやすいことと関係しているものと推察された。なお、*E.globulus* におけるゼラチン繊維の形成は、光学顕微鏡観察でも認められた。

・繊維長

繊維長の平均値については、最大のものは7年生 *G. arborea* の1.35mm、ついで3.5年生 *G. arborea* および *P. falcata* (Java seed) の1.200 mm、最小のものは *A. mangium* の1.071 mm であった。成熟材形成段階に達した植林地では、繊維長は肥大成長速度の影響は受けないものと考えられるが、*P. falcata* 2品種と *E. globulus* および3.5年生 *G. arborea* では、正の相関関係が認められた。後述するように *P. falcata* と3.5年生 *G. arborea* では成熟材の形成開始が直径に依存すること、それゆえ商業伐期に達しているかどうかにかかわらず、極端な小径個体は未成熟であり、木部表面の繊維はいまだ短いままであるため、結果的に、木部表面の繊維長は肥大成長速度に対して正の相関関係を示すものと推察された。*E. globulus* において正の相関関係が認められることについては、うまい説明は見つかっていない。

③ *E. grandis* 材質の緯度依存性 (第2グループについての調査結果)

樹幹の肥大成長速度 (樹幹直径/年生) は、低緯度熱帯の Acailandia で最も高く、中緯度熱帯 (Post da Mata)、亜熱帯・温帯境界域 (Porto Alegre,) の順に低くなった。なお、亜熱帯・温帯境界域の Paracito の植林地については、9年生ゆえに肥大成長速度は大きかったが、他と比べて若齢であるため、今後の考察からは外すことにする。

木部表面における材質指標については、繊維長以外はすべて緯度との対応が見られた。縮みの表面成長応力解放ひずみは、低緯度熱帯の Acailandia で最も低く (平均-0.053 %), 中緯度熱帯の Posto da Mata (平均-0.060 %), 亜熱帯・温帯境界域の Porto Alegre (平均-0.090 %) の順に高くなっていった。一方、木部の気乾密度と MFA は、Acailandia で最も高く (平均値がそれぞれ 0.77 g/cm^3 , 14.3°), Posto da Mata (0.71 g/cm^3 , 12.3°), Porto Alegre (0.58 g/cm^3 , 9.3°) の順に低くなった。低緯度熱帯での MFA は 14° 程度であり、繊維の強度や寸法安定性を低下させるほどには大きくない。一方、亜熱帯・温帯境界域では約 10° であり、むしろこの値は、一部に低 MFA を特徴とする引張あて材が形成されていた可能性を示唆する。だとすれば、引張の表面応力が亜熱帯・温帯境界域で最も大きくなっていったこととも符合する。また、樹幹内残留応力分布が原因となって生じる、伐採丸太の横断面の心割れは、引張の成長応力が最も大きかった Porto Alegre で深刻であった (図4)。

以上の結果は、*E. grandis* は、赤道に近い植

林地ほど好ましい材質 (高い肥大成長速度、高比重、適度に低い成長応力と MFA,) を示すことを示唆する。



図4. 玉切りによって生じる *Eucalyptus grandis* 丸太横断面の心割れ。左は熱帯ブラジル (Acailandia)、右は亜熱帯ブラジル (Porto Alegre—南緯31度) の植林地でのもの。

(2) 材質の放射方向分布

① 第1グループについての調査結果

気乾密度、繊維長、MFA について、髓付近から木部最外層にいたるまでの放射方向変動パターンを調査した。植林地 (あるいは樹種) による違いはあるものの、概ね単調増加的あるいは単調減少的な変動パターンとなっていた。すなわち多くの例で、気乾密度及び繊維長は、髓付近で低く樹皮側に向かって増加する傾向を、一方 MFA は髓付近で高く樹皮側に向かって減少する傾向を示した。

MFA と密度の放射方向変動パターンは、どの樹種も激しい揺動 (ギザギザした振動) を伴い、*P. falcata* と *A. auriculiformis* の一部の個体では、単調変動であるかどうかさえ判別しがたい例もあった。繊維長分布については、どの樹種 (あるいは植林地) も、揺動の少ない滑らかな変動パターンとなっており、大径個体では、概ね木部最外層付近で一定値に収束する傾向を示した。

以上のように、髓からある一定半径までの部分では材質指標が一定しないので、これは未成熟材であり、材質指標が一定値に落ち着いた部分が成熟材である。成熟材の材質指標は、工業上に見て好ましい値になっていることが多い。早く成熟材形成段階に達するような、あるいはなるべく未成熟材部分の比率を抑えるような林業技術の実施が重要となる。

どの材質指標も、樹幹の各成長段階に応じて値が決まるように、プログラム化されているだろう。おそらく MFA や密度は、短期間での気候変動などの外部環境因子の影響を受けやすく、そのために激しい揺動パターンを示し、一方、繊維長は外部環境因子に影響されにくいので、なめらかに単調変化するパターンを示すのではないだろうか。後に、繊維長の放射方向変動パターンをもとに、木部の材成熟様式 (成熟繊維の形成が木部直径と形成層齢のどちらに依存するか) を検討するが、繊維長に着目するのはそのような理由からで

ある。

②第2グループについての調査結果

第2グループ（南米の *E.grandis* 植林地）については、繊維長分布のみ測定と解析が終了している。Acailandia, Post da Mata, Porto Alegre の植林地ごとに、それぞれを代表する、大径・中径・小径各一個体についての繊維長分布を図5に示す。なお、各グラフ内には3つの曲線が描かれているが、これは、その植林地での調査樹木を、大径・中径・小径の3グループに分類し、それぞれのグループについての平均を、さらに式(1)で近似したものを表している。繊維長の変動パターンについては、第1グループでの結果に全く矛盾しないものであった。

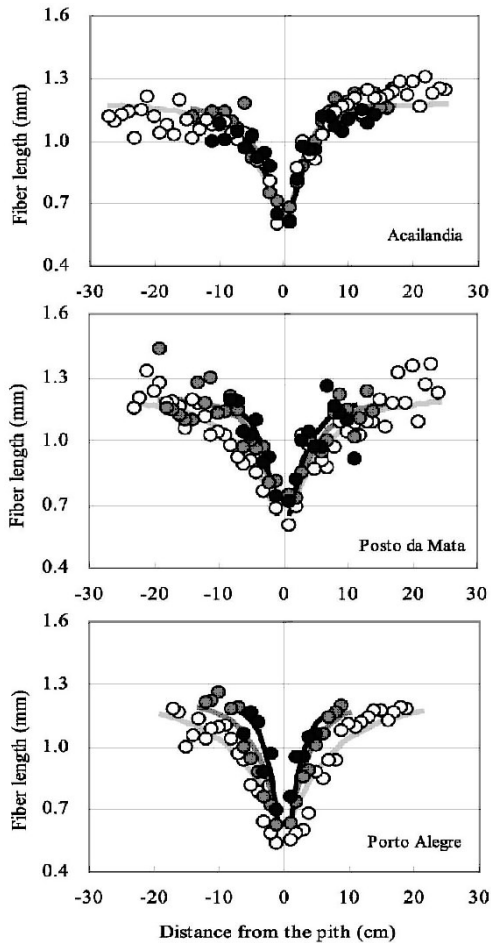


図5. *E. grandis* 繊維長の放射方向変動パターン。ブラジルの3つの緯度区分における例。上から順に、低緯度熱帯域(Acailandia), 中緯度熱帯域(Posto da Mata), 亜熱帯・温帯境界域 (Porto Alegre). ○; 大径, ●; 中径 ●; 小径個体。

(3) 繊維長分布から判断した木部成熟様式

①第1グループについての調査結果

繊維長の放射方向分布をもとに、3.(2)の③に述べた方法によって、その植林地における木部の成熟が、木部直径と形成層齢のど

ちらに依存的かを検討した。その結果、以下のことが分かった。

熱帯原産あるいは熱帯に成育する早生樹である *Acacia* 属2樹種, *Paraserianthes falcataria* (2品種), *Gmelina arborea* (2か所) では、b値と胸高直径との間には、有意な相関関係は認められない(図6)。したがって、木部の成熟は直径成長量によって決まる(すなわち、形成層齢に関わらず、一定の直径に達してから成熟材の形成が始まる)ものと判断される。一方、温帯あるいは亜熱帯に成育する樹種である *Eucalyptus globulus* および *E. grandis* では、b値と胸高直径の間には、有意な負の相関関係が認められる。すなわち、木部の成熟は形成層齢により依存的である(すなわち、直径に関わらず、一定の形成層齢に達してから成熟材の形成が始まる)ものと判断される。

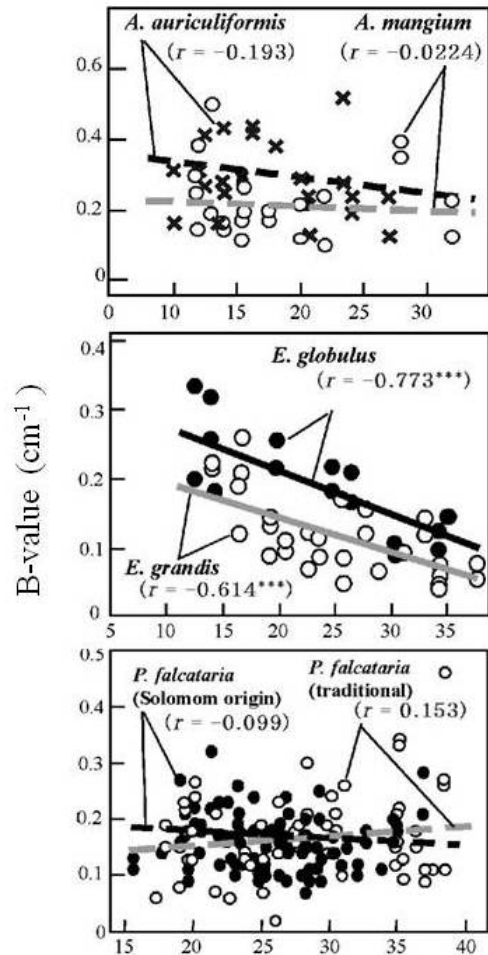


図6. b値(縦軸)の胸高直径依存性。第1グループの植林地の例。

②第2グループについての調査結果

①と同様な考察を行ったところ、すべて同一樹種 (*E. grandis*) であるにも拘わらず、Acailandia と Post da Mata, Porto Alegre の植林

地と異なる結果が得られた。すなわち、低緯度熱帯である *Acailandia* では、木部の成熟は直径成長量によって決まる傾向を示し、赤道から少し離れた熱帯である *Post da Mata* と、亜熱帯・温帯境界域である *Porto Alegre* では、木部の成熟は形成層齢により依存的であることがわかった。

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) Kojima, M.; Yamamoto, H. 以下 10 名: (2009). Effects of the lateral growth rate on wood quality parameters of *Gmelina arborea* sampled from plantations of differing cambium age. **Annals of Forest Science**, Vol.69 に掲載決定 (DOI:10.1051/forest/2009031) (査読あり).
- (2) Kojima, M.; Yamaji, F. M.; Yamamoto, H.; Yoshida, M.; Nakai, T.: (2009). Effects of the lateral growth rate on wood quality parameters of *Eucalyptus grandis* from different latitudes in Brazil and Argentina. **Forest Ecology and Management**, Vol.257, 2175-2181. (査読あり)
- (3) Kojima, M.; Yamamoto, H.; Yoshida, M.; Ojio, Y.; Okumura, K.: (2009). Maturation property of fast-growing hardwood plantation species: A view of fiber length. **Forest Ecology and Management**, Vol.257, 15-22. (査読あり)

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 児嶋美穂; 山本浩之; 吉田正人; F. M. ヤマジ. 異なる緯度区分での材質比較－*Eucalyptus grandis*－. 第 59 回日本木材学会大会. 2009 年 3 月 18 日, 松本大学.
- (2) 児嶋美穂; 山本浩之; 吉田正人; F. M. ヤマジ. 植林早生樹の成熟材形成メカニズム. 第 59 回日本木材学会大会. 2009 年 3 月 18 日, 松本大学.
- (3) 三枝晃一郎; 児嶋美穂; 鈴木絢子; 山本浩之; 吉田正人; F. M. ヤマジ. 植林 *Eucalyptus grandis* 樹幹内における材質不均一性. 第 59 回日本木材学会大会. 2009 年 3 月 18 日, 松本大学.
- (4) 山本浩之; 児嶋美穂; 吉田正人; 山下彩織. 早生樹の材質調査－植林フィールドからのレポート. 第 58 回日本木材学会大会 (組織と材質研究会). 2008 年 3 月 19 日, つくば国際会議場.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 浩之 (YAMAMOTO HIROYUKI)
名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授

研究者番号 52354420

(2) 研究分担者

吉田 正人 (YOSHIDA MASATO)
名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教授
研究者番号 30242845
福島 和彦 (FUKUSHIMA KAZUHIKO)
名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授
研究者番号 80222256
中井 毅尚 (NAKAI TAKAHISA)
島根大学・総合理工学部・准教授
研究者番号 90314616