

論文

人工乾燥されたモウソウチクの長期暴露試験後の圧縮強度と色彩の変化 Compressive Strength and Color of Kiln Dried Moso Bamboo after Long Term Exposure

定成 政憲, 吉田 競人
Masanori Sadanari and Keito Yoshida

The main purposes of this paper are to assess the basic properties of kiln dried moso bamboo (*Phyllostachys heterocycle*) under external exposure for a long time and the changing of the surface color. Following conclusions are obtained through some experiments.

- (1) Cracks have less occurred on the kiln dried moso bamboo compared to the natural dried bamboo.
- (2) The compressive strength of the kiln dried moso bamboo is 30% higher than that of natural dried bamboo at that time even after 182 days exposure and can be maintained the strength for long periods.
- (3) The compressive strength(σ) of bamboo with node and without node become as follows;
Kiln dried: $\sigma_{\text{with node}} \leq \sigma_{\text{without node}}$, on the other hand
Natural dried: $\sigma_{\text{with node}} = \sigma_{\text{without node}}$
- (4) The surface of the kiln dried bamboo become clearly coated. The colors of them have changed from green to ochre and have been stable for a long time.

Keywords: Kiln drying, Moso bamboo, Compressive strength, Exposure, Surface colors

1. はじめに

自然素材である竹は短期間で持続的再生が可能であることから建材としての利用が期待されており、竹 PSL 等の開発が行われている^[1-4]。竹 PSL のように、現在の竹活用法は、構成要素を均一化するためにできるだけ小さくしたものを構造用接着剤で一体化するという方法が取られている。しかし、竹は同じ植物材料の木材と異なり中空構造をしており、表層と内層からの適切な乾燥性や設備機器配線等の中空利用が期待できることなどから、円筒状の素材の形状を活かした竹活用の研究を進めていく必要がある。

そこで本研究では、まず乾燥による損傷が少ない乾燥スケジュールとして開発した手法^[5]を用い、円筒状のモウソウチク (*Phyllostachys heterocycle* f. *pubescens* Muroi) の人工乾燥を行った。この人工乾燥を施すことによる長期間の物性的特性の変化を調べるために、対照実験として、天然乾燥のモウソウチクを屋外暴露して圧縮強度と色彩の変化を測定した。また、モウソウチクの節の存在による圧縮強度の影響についても考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験体

供試材には、東京都東大和市の豊鹿島神社所有の竹林から 2014 年 11 月 10 日に伐採したモウソウチク 3 本(供試材 X)と 11 月 25 日に伐採したモウソウチク 3 本(供試材 Y)をそれぞれ使用した。

供試材 X の 3 本のモウソウチクは 2 個の節を含むように元口から長さ 550mm で切断して 1 本当たり 3 本の試験体を作成した。試験体名称を MA-1~MA-3、MB-1~MB-3、MC-1~MC-3 とし、それぞれのグループで人工乾燥を行うもの 2 体 (MA-2, MA-3, MB-1, MB-3, MC-1, MC-2)、天然乾燥だけのもの 1 体 (MA-1, MB-2, MC-3) として、これら全ての試験体は長期暴露 477 日後の圧縮試験に供した。

一方、供試材 Y の 3 本のモウソウチクについては、図 1 に示したように元口から 2 個の節を含むように長さ 550mm で切断して 1 本当たり 5 本の試験体を作成した。試験体名称は同図に示したように A-1~A-5、B-1~B-5、C-1~C-5 というように元口から末口に向かって付けた。なお、A~C が竹稈個体、1~5 が元口からの順番を示す。供試材 Y の試験体数は全数で 15 本となるが、A、B、C のそれぞれのグループで人工乾燥を行うもの 3 体 (A-1, A-3, A-4, B-1, B-3, B-4, C-1, C-3, C-5)、天然乾燥だけのもの 2 体 (A-2, A-5, B-2, B-5, C-2, C-4) となるように試験体を

分類した。供試材 Y は暴露期間が 20 日、49 日及び 182 日後の圧縮試験用に供した。なお、それぞれの長さ 550mm のモウソウチク試験体について、元口と末口の肉厚及び円周を測定して体積を求め、生材密度を求めた。その値は $1.18 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ の範囲であった。

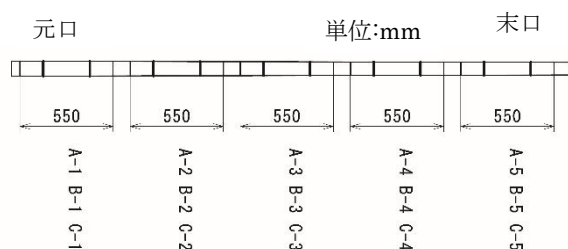


図1 供試材 Y のモウソウチク試験体の形状

2.2 乾燥スケジュールと屋外暴露条件

モウソウチク試験体を人工乾燥させたときに割れや円筒状の形状変化などの損傷が発生しない乾燥スケジュール⁹⁾を図2の左端部に示した。同図のマークが○と■の点線が示す乾燥時間100hまでが人工乾燥処理である。乾燥スケジュールは、①乾球温度80℃、関係湿度40%で乾燥時間が22h（平衡含水率5%）、②乾球温度85℃、関係湿度30%で乾燥時間5h（平衡含水率4%）、③乾球温度90℃、関係湿度20%で乾燥時間73h（平衡含水率2.5%）である。

一方、マークが○と■の実線が屋外暴露中の天然乾燥処理を示す。

人工乾燥されたモウソウチク試験体は、図2に示したように天然乾燥だけのものより100hだけ遅れて屋外暴露した。

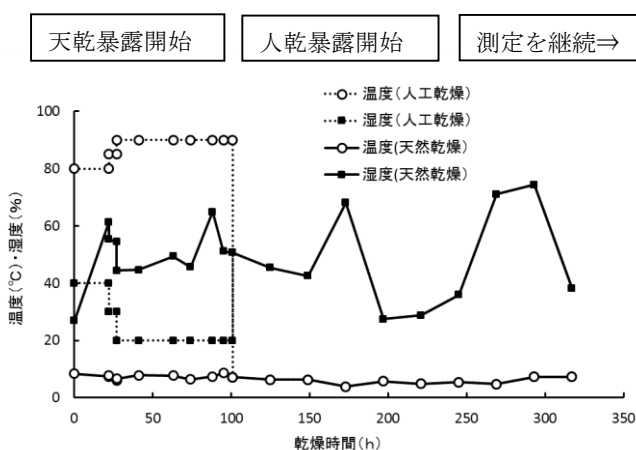


図2 人工乾燥スケジュールと暴露条件

モウソウチク試験体の屋外暴露状況を図3に示した。同図はRC造建築物の屋外壁側に仮設足場を組み立てて、モウソウチク試験体の元口側を壁面側に統一して暴露を行っている状況を示している。モウソウチク試験体は斜め方向から雨と直射日光を直接受ける。

暴露期間中の屋外気温の最高と最小の月平均値及び各月の雨天率を図4に示した。同図は暴露試験を行った小

平市に近い環境として、東京のデータをお天気データベース (<http://weather-eye.com>) から整理してまとめたものである。なお、雨天率については一日の午前9時と午後3時のどちらかが雨の場合に雨として計数し、各月の日数で割って求めた。



図3 屋外暴露11日後のモウソウチク試験体

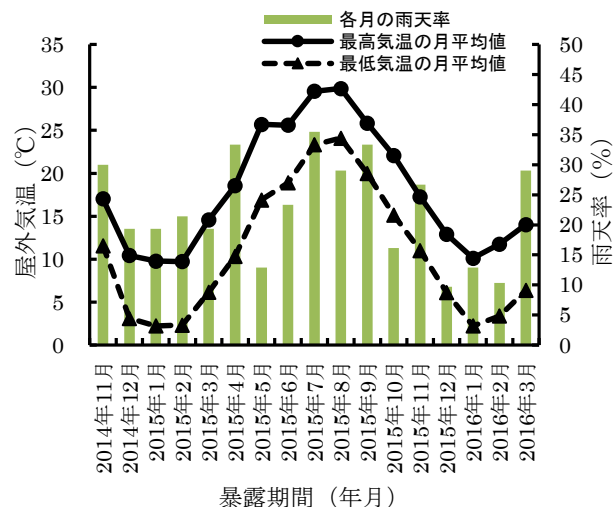


図4 暴露期間中の屋外気温と雨天率

2.3 圧縮試験方法

供試材 Y の屋外暴露されたモウソウチク試験体の圧縮試験は、人工乾燥処理後①20日間経過時点、②49日間経過時点、③182日経過時点に行った。モウソウチクの圧縮試験体は、JIS Z 2101:2009 の木材の試験方法の縦圧縮試験¹⁰⁾を参考にして、試験体直径と高さの比率が1:2となるように屋外暴露されたモウソウチク試験体から節の有無があるように作成した。その結果、モウソウチク試験体のA-1, A-2, A-3, A-4は節の有無で各2体、A-5(有、有、無)の3体、B-1は節の有無の2体、B-2とB-3は(有、有、無)の各3体、B-4, B-5は節の有無の各2体、C-1とC-2は(有、有、無)の各3体、C-3, C-4, C-5は節の有無の各2体となった。

同様に供試材 X のモウソウチク試験体の圧縮試験は、④477日間の暴露経過時点で行った。圧縮試験体は、MA-1, MA-2, MA-3, MB-1は(有、無、有)の各3体、MB-2とMB-3は(有、無、無)の各3体、MC-1とMC-2は(無、有、有)の各3体、MC-3(有、無、無)の各3体となった。圧縮試験は万能試験機(株式会社エー・アンド・ディ RTF-2430-PL)を用いて、試験速度を2mm/分として移動速度一定制御方法で行い、縮み量はクロスヘッドの移動量とした。なお、圧縮応力度は圧縮試験体の元

口と末口の断面積の平均値で荷重を除して求めた。

2.4 色彩の測定方法

色彩測定は屋外暴露されているモウソウチク試験体(550mm 長)の末口端から 60mm、末口側の最初の節位置から 80mm 及び元口端から 50mm の表面位置について、色彩色差計(コニカミノルタ株式会社 CR-400)を用いて、屋外暴露期間中に 2~3 日間隔で測定し、 $L^*a^*b^*$ 表色系でデータ処理を行った。

3. 結果と考察

3.1 圧縮応力度の変化

供試材 Y の屋外暴露されたモウソウチク試験体の圧縮試験結果として、圧縮応力度—縦ひずみ度曲線図を図 5~図 7 に示した。なお、縦ひずみ度はクロスヘッドの移

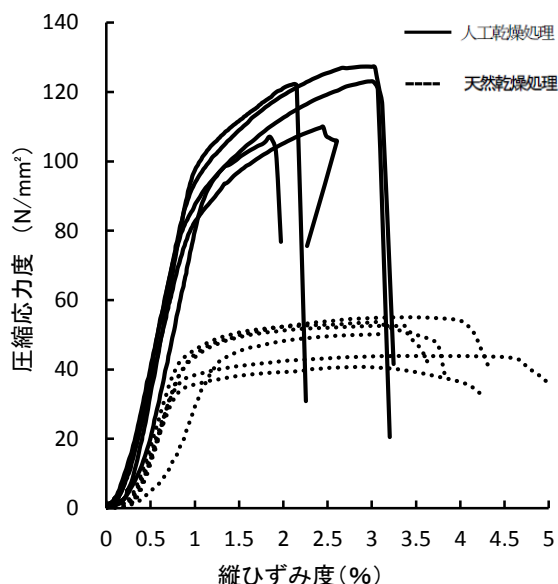


図 5 圧縮応力度—ひずみ度曲線 (暴露 20 日)

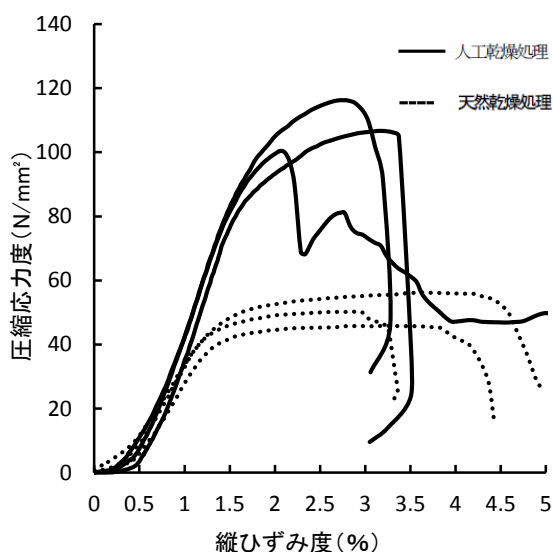


図 6 圧縮応力度—ひずみ度曲線 (暴露 49 日)

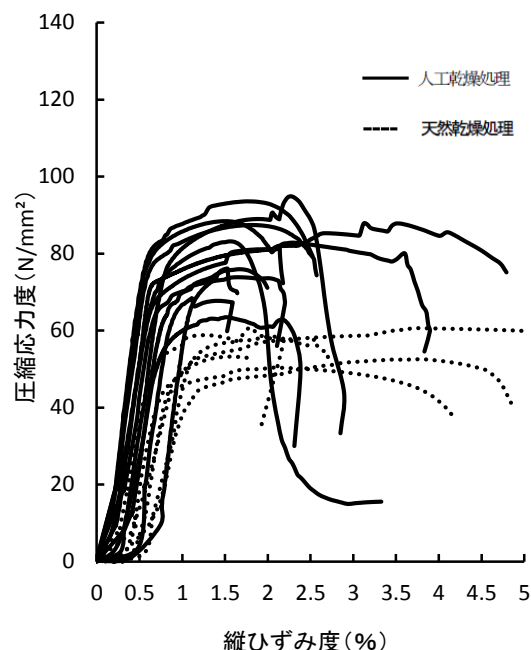


図 7 圧縮応力度—ひずみ度曲線 (暴露 182 日)

動量を圧縮試験体高さで除したものである。

図 5 の屋外暴露 20 日後には、人工乾燥したモウソウチク圧縮試験体の平均含水率が 3.1%で、天然乾燥だけのものが 65.7%であった。最大圧縮応力度の平均値は人工乾燥されたものが 117.9N/mm^2 、天然乾燥だけのものが 49.4N/mm^2 であった。モウソウチク圧縮試験体の含水率条件によって約 2 倍程度の違いが生じることが分かった。

図 6 の屋外暴露 49 日後には、人工乾燥したモウソウチク圧縮試験体の平均含水率が 6.0%で、天然乾燥だけのものが 14.5%であった。最大圧縮応力度の平均値は人工乾燥されたものが 111.5N/mm^2 、天然乾燥だけのものが 50.8N/mm^2 であった。屋外暴露日数の増加により、人工乾燥されたものは水分を吸収し、天然乾燥だけのものは乾燥が促進された。しかし、この含水率条件においても最大圧縮応力度に約 2 倍程度の違いが見られた。

図 7 の屋外暴露 182 日後には、人工乾燥したモウソウチク圧縮試験体の平均含水率が 7.9%で、天然乾燥だけのものが 11.9%であった。最大圧縮応力度の平均値は人工乾燥されたものが 81.3N/mm^2 、天然乾燥だけのものが 61.6N/mm^2 であった。約 6 ヶ月間の屋外暴露によって、 $81.3\text{N/mm}^2 \div 61.6\text{N/mm}^2 = 1.32$ となり、人工乾燥処理を施すと天然乾燥だけのものに比べて約 30%、最大圧縮応力度を高く維持できることが分かった。

屋外暴露期間による人工乾燥を行ったモウソウチク圧縮試験体と天然乾燥だけのものについて、有意水準 5%で t 分布を用いた検定を行った。その結果、全ての屋外暴露期間において、人工乾燥されたモウソウチク圧縮試験体の最大圧縮応力度が天然乾燥だけのものより大きいという有意差が見られた。

そこで、屋外暴露期間が長い供試材 X のモウソウチク

圧縮試験体を含めた屋外暴露日数と最大圧縮応力度の平均値と標準偏差をまとめた結果を図 8 に示した。屋外暴露 477 日後の供試材 X の人工乾燥したモウソウチク圧縮試験体の平均含水率は 10.0% で、天然乾燥だけのものが 11.6% であった。この条件で最大圧縮応力度について有意水準 5% で t 分布を用いた検定を行った。その結果、人工乾燥された最大圧縮応力度と天然乾燥だけのものには有意差があり、長期暴露試験後においても約 80N/mm² の最大圧縮応力度を維持できると推定できる。

供試材 X と Y を整理した図 8 において、屋外暴露 477 日後までは、人工乾燥された圧縮試験体の平均含水率が 3.1% から 10.0% へ増加し、天然乾燥だけの圧縮試験体の平均含水率は 65.7% から 11.6% へ減少した。圧縮試験体の含水率の増減に伴って最大圧縮応力度は変化した、モウソウチクが気乾含水率に達しても人工乾燥と天然乾燥の最大圧縮応力度に有意差が認められることから、人工乾燥されたモウソウチクは長期暴露に対して有効な処理方法であることが分かる。

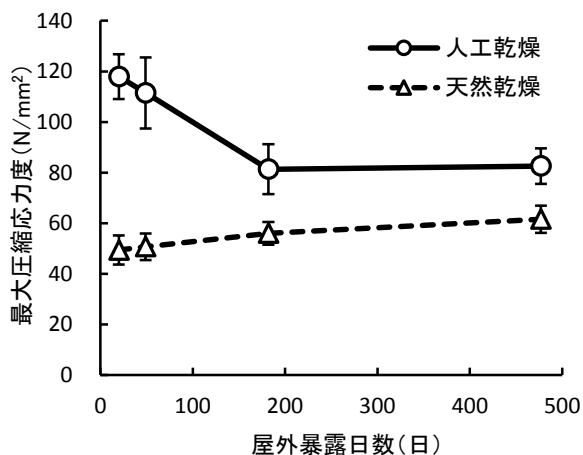


図 8 屋外暴露期間による最大圧縮応力度の変化

3.2 節と圧縮応力度

供試材 Y の①人工乾燥後に 20 日間屋外暴露、③人工乾燥後に 182 日間屋外暴露及び、供試材 X の④人工乾燥後に 477 日間屋外暴露したものと天然乾燥だけのものについて、モウソウチク圧縮試験体に節の有るものは無いものに対して最大圧縮応力度が低いかについて有意水準 5% で t 分布を用いた検定を行った。検定には統計ソフト R の t.test(節有, 節無, var.equal=TRUE, alternative="less") 関数^[7]を用いた。なお、②人工乾燥後に 49 日間屋外暴露したものは、節の有無についてのデータが不足したため検定対象から除外した。表 1 に検定結果を示した。同表の○は有意水準 5% で有意差あり、×は有意差なしである。この検定結果から、人工乾燥して屋外暴露した場合： $\sigma_{\text{節有}} \leq \sigma_{\text{節無}}$ となり、天然乾燥だけで屋外暴露した場合： $\sigma_{\text{節有}} = \sigma_{\text{節無}}$ となることが分かった。モウソウチク圧縮試験体の節は最大圧縮応力度に対して有利な要因ではないと推定できる。

表 1 節の有無による最大圧縮応力度の検定結果

暴露期間	① *	② *	③ *	④ *
人工乾燥処理	○		○	×
天然乾燥だけ	×		×	×

*：屋外暴露は①20 日、②49 日、③182 日、④477 日

3.3 圧縮試験における破壊性状

人工乾燥後に 182 日間屋外暴露したモウソウチク圧縮試験体と天然乾燥処理だけのものについて、圧縮試験を行ったときの破壊性状を図 9 に示した。同図のモウソウチク圧縮試験体は乾燥処理による破壊性状の違いを示しており、左図(a)の人工乾燥処理では縦方向に割裂で破壊し、右図(b)の天然乾燥処理では複数の割裂が生じて破壊する例が多かった。節の有無による典型的な破壊の違いは見られなかった。



(a)人工乾燥処理（節有） (b)天然乾燥処理（節無）

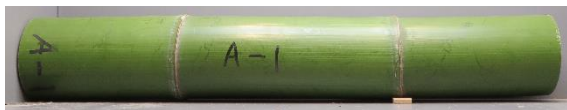
図 9 モウソウチク圧縮試験体の破壊性状

3.4 色彩の変化

人工乾燥と天然乾燥されたモウソウチク試験体の色彩変化を図 10 に示した。同図(a)は人工乾燥処理前の色彩であり、同図(b)は同一試験体を人工乾燥処理して 56 日間屋外暴露したものである。試験体に割れの損傷を発生することなく黄土色の色彩である。この色彩の傾向は屋外暴露期間に関わらず、全ての人工乾燥されたモウソウチク試験体に見られた。同図(c)は天然乾燥処理前の色彩であり、同図(d)は同一試験体を 56 日間屋外暴露したものである。試験体の元口と末口から緑色が退色している。

図 10 のモウソウチク試験体を L*a*b*表色系でデータ処理したものを A_1 の(a)と(b)を図 11、A_2 の(c)と(d)を図 12 にそれぞれ示した。両図において明度は L*a*b*表色系の L*、彩度は(a*² + b*²)^{1/2}である。約 2 ヶ月の屋外暴露によって、図 11 の A-1 の人工乾燥処理を施したモウソウチク試験体は、人工乾燥処理前の彩度 38 と明度 25 から元口で彩度 51 と明度 25、末口で彩度 53 と明度 27、中間部で彩度 42 と明度 20 である。図 10(b)の黄土色の色彩を数値で表している。一方、図 12 の A-2 の天然乾燥処理だけのものは、屋外暴露前の平均値で彩度 37 と明度 22 から元口で彩度 53 と明度 21、末口で彩度 55 と明度

23、中間部で彩度 36 と明度 23 である。図 10(d)の元口と末口からの緑色の退色の色彩を数値で表している。 $L^*a^*b^*$ 表色系は、図 10 で示したモウソウチク試験体の色彩変化を評価できることが分かった。



(a) 人工乾燥処理前のモウソウチク試験体 (A-1)



(b) 人工乾燥処理後に 56 日間屋外暴露されたモウソウチク試験体 (A-1)



(c) 天然乾燥処理前のモウソウチク試験体 (A-2)



(d) 天然乾燥処理だけで 56 日間屋外暴露されたモウソウチク試験体 (A-2)

図 10 モウソウチク試験体の色彩変化

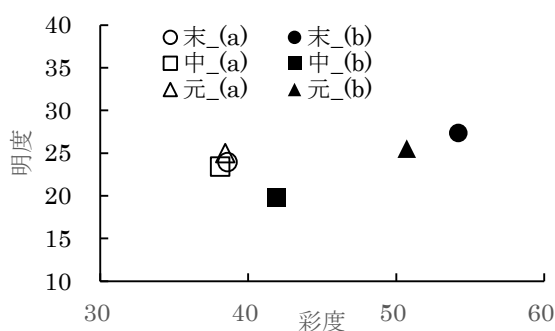


図 11 A_1 の $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた色彩変化

4. まとめ

人工乾燥処理を施したモウソウチク試験体と天然乾燥だけのものを屋外暴露して、それらのモウソウチク試験体から一定間隔で圧縮試験体を作成して圧縮試験を行った。その結果、人工乾燥処理したものは天然乾燥処理だけのものより 30%高い最大圧縮応力度を保持できることが分かった。また、節の有無に対する最大圧縮応力度に

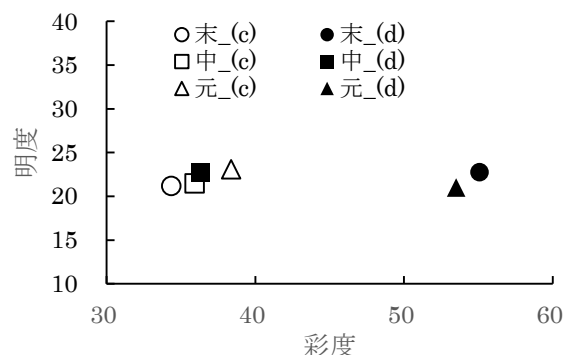


図 12 A_2 の $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた色彩変化

ついて有意水準 5%で t 分布を用いた検定を行った結果、人工乾燥処理された場合: $\sigma_{\text{節有}} \leq \sigma_{\text{節無}}$ 、天然乾燥処理だけされた場合: $\sigma_{\text{節有}} = \sigma_{\text{節無}}$ となることが分かった。

モウソウチク試験体の色彩測定において、人工乾燥処理後に屋外暴露されたモウソウチク試験体は、長期間に渡って割れなどの損傷を発生することなく黄土色の色彩を保持した。

参考文献

- [1] チュン・タン・ツォイ、大林宏也、桃井尊央、栃木紀郎、小林純：「竹 Parallel Strand Lumber(PSL)の製造と構造特性」、木材工業、67, 290-295 (2012).
- [2] チュン・タン・ツォイ、大林宏也、桃井尊央、栃木紀郎、小林純：「竹 Parallel Strand Lumber(PSL)の製造と強度特性 (第 2 報) — 接合部の影響 —」、木材工業、68, 241-246 (2013).
- [3] 定成政憲、吉田競人、船木裕之：「ストランド形状が竹 PSL の強度に及ぼす影響」、木材工業、70, 62-66 (2015).
- [4] 定成政憲、吉田競人、入倉則夫：「竹パラレルストランドランバーによる接合部の回転剛性」、職業能力開発研究誌、32, 85-89 (2016).
- [5] Keito Yoshida, Masanori Sadanari : "Utilization of Bamboo as a Structural Material", Trans. Mat. Res. Soc. Japan, 38[4], 603-608 (2013).
- [6] 木材の試験方法：JIS Z 2101 木材の試験方法、190-11 - 190-13 (2009).
- [7] 山田剛史、杉浦武俊、村井潤一郎：「R によるやさしい統計学」、オーム社、145-147(2008).

(原稿受付 2018/11/29, 受理 2019/4/1)

*定成政憲, 農学博士

職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:sadanari@uitech.ac.jp
Masanori Sadanari, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

*吉田競人, 博士 (工学)

第一工業大学, 〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2
Keito Yoshida, Daiichi Institute of Technology, 1-10-2 Kokubu Tyuo, Kirishima-shi, Kagoshima 899-439.