腐朽した木材の穿孔抵抗に影響を及ぼす 物性値のパラメータ解析

藤原 尚輝^{*1}, 築瀬 佳之^{*1}, 藤原 裕子^{*1},
澤田 豊^{*1}, 吉村 剛^{*2}, 藤井 義久^{*1}

Parameter Analysis of Physical Properties Influencing Drilling Resistance of Decayed Wood

Naoki FUJIHARA^{*1}, Yoshiyuki YANASE^{*1}, Yuko FUJIWARA^{*1},
Yutaka SAWADA^{*1}, Tsuyoshi YOSHIMURA^{*2}, Yoshihisa FUJII^{*1}

A generalized linear model (GLM) was established for the relationship between drilling resistance of decayed wood and four physical properties of the wood. Wood specimen of Sugi (*Cryptomeria japonica*), Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and Western hemlock (*Tsuga heterophylla*), of 10(L) × 20(R) × 25(T) mm in dimension, decayed for 0 to 12 weeks by brown rot fungi (*Fomitopsis palustris*) were used for the experiment. The apparatus, Resistograph[®] was employed for boring, and the drilling resistance value during the boring by a three-pointed drill bit of 3 mm in rotation diameter was measured. For the model configuration, average of drilling resistance was set as the criterion variable and the parameters, oven dry density, mass loss, moisture content and average annual ring width, respectively, were set as explanatory variables. After the investigation of the significance of the explanatory variables, GLM's standard partial regression coefficients were calculated so that they match Akaike's Information Criterion (AIC). It was revealed, the parameters, oven dry density, mass loss and moisture content were significant, and the coefficient values for them were, 0.57, 0.44 and 0.06, respectively. The feasibility of the model for the estimation of mass loss was suggested.

Keywords ; drilling resistance, brown rot fungi, Generalized linear model

腐朽した木材の穿孔抵抗を測定し、これに影響を与える木材の4つの物性値を説明変数と

* 1 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

* 2 京大大学生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Corresponding author: N. Fujihara (fnaoki@h3news1.kais.kyoto-u.ac.jp)

する穿孔抵抗の数式モデルを構築した。試験体には大きさ10(L)×20(R)×25(T)mmのスギ、ヒノキ、ベイマツ、ベイツガをオオウズラタケによって0～12週間強制腐朽させたものを用いた。穿孔抵抗の測定にはレジストグラフ[®]を用い、回転直径約3mmのネズミ歯錐で半径方向に穿孔し、その際の穿孔抵抗を連続的に測定した。モデル化では、穿孔抵抗の平均値を目的変数とし、腐朽前の全乾密度、質量減少率、含水率、平均年輪幅を説明変数として一般化線形モデルを構築した。モデル構築では、各変数の有意性を吟味し、赤池情報量基準が最小となるように各変数を選択した。その結果、4種の説明変数のうち腐朽前の全乾密度、質量減少率、平均年輪幅が有意となり、それらの標準偏回帰係数の絶対値は腐朽前の全乾密度が0.57、質量減少率が0.44、平均年輪幅が0.06であった。また構築したモデル式を用いた腐朽程度の推定方法を検討した。

1. 緒言

木材の腐朽程度を示す指標として質量減少率が多いが、その測定には腐朽前の質量が既知であることが求められ、住宅などの部材の劣化程度の評価には向かない。そのため劣化診断などの現場では、腐朽に関連する物性値として密度や空洞の状態を非破壊的に評価するために超音波伝搬速度測定や^{1, 2)}、微破壊を伴うが強度をより直接的に評価するピンの貫入深さ^{3, 4)}、や穿孔抵抗値を用いた手法が実用化されている。穿孔抵抗測定を用いた装置であるレジストグラフ[®]では、先端の回転直径が3mmのネズミ歯錐で木材を穿孔する際の抵抗（トルク）のデータが木材表面から内部に至るまで詳細に得られる⁵⁾ため、現場で行える微破壊的評価方法としては優れていると考えられる。

レジストグラフ[®]では穿孔抵抗値の穿孔距離に対する平均値が木材密度と高い相関を持つことが知られており^{5, 6)}、含水率の影響を受けるという報告もある⁷⁾。また腐朽木材では質量減少率と穿孔抵抗の平均値は高い相関を持つ^{3, 8)}。穿孔抵抗はこれら多数の物性値の影響を受けることが明らかになっているが、それらの寄与度には不明な点が多く、定量的な解析例はほとんどない。

本研究では、腐朽木材の穿孔抵抗値と、木材の代表的な物性値である含水率、密度、質量減少率および年輪幅との関係を調べた。さらに物性値と穿孔抵抗の関係を一般化線形モデル（Generalized Linear Model, GLM）により数式によってモデル化し、各物性値の偏回帰係数を求め、穿孔抵抗値への寄与度を求め、赤池情報量基準（AIC）を評

価基準としてモデルの性能を評価した。最後に、作成した数式モデルを用いて穿孔抵抗値から木材の腐朽程度の推定を試みた。

2. 実験方法

2.1 腐朽試験体の調製

450mlのマヨネーズ瓶にポテトデキストロース寒天培地（PDA）の粉末（日水製薬株）3.9g、蒸留水200mlを入れ、オートクレーブ（株）トミー精工 LBS-325）にて120℃で20分間滅菌した。温度が低下しPDAが固化した後、オオウズラタケ（*Fomitopsis palustris*）を前培養した90mm径シャーレの菌糸が活発に伸長している部分から内径約8mmのコルクボーラーで同心円状に培地をくり抜き、マヨネーズ瓶のPDA培地の中央部分へ接種し、一週間恒温室内にて25℃で保管した。

辺材部から作成した10(L)×20(R)×25(T)のスギ（*Cryptomeria japonica*）、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）、ベイマツ（*Pseudotsuga menziesii*）、ベイツガ（*Tsuga heterophylla*）を各樹種45個、および培地に敷くプラスチック製の網（厚さ2.5mm）を滅菌パック（株）ホギメディカル、メッキンパック HM-412）に入れ、エチレンオキサイドガス滅菌器（株）湯山製作所 YS-A-C64EJ）にて40℃で7時間滅菌した。マヨネーズ瓶培地に網を敷き、その上へ試験体の木口面が培地上の網と接するように3個置いた。これらの試験体を3週間、6週間、9週間、12週間の四条件の期間恒温室内にて25℃で保管した。各条件で一つの樹種につき9個の試験体を強制腐朽させた。また、強制腐朽操作を行わないコントロールについても一つの樹種につき9個の試験体を用意した。

(a) 腐朽木材試験体
(a) Decayed wood sample

(b) レジストグラフ®と試験体の固定方法
(b) Set up of Resistograph® and decayed wood sample

(c) レジストグラフ付属の錐と試験体保持の様子
(c) Set up of drill bit and held sample

(d) 錐の形状
(d) Shape of drill bit

図1 レジストグラフ®と腐朽木材試験体
Fig. 1 Resistograph® and decayed wood sample

強制腐朽操作終了後、試験体の菌糸をピンセットで取り除いた後、60℃で重量が恒量となるまで乾燥させ腐朽後の全乾重量を測定し、質量減少率を得た。

2.2 穿孔抵抗の測定

試験体をあて板と共に万力で固定し、レジストグラフ® (IML-RESI 300SX) と万力を一枚の台に取り付け、レジストグラフ® と試験体それぞれの位置関係を固定し、条件を統一して穿孔抵抗を測定できるようにした。レジストグラフ® のモードを針葉樹用、穿孔速度を50mm/min とし、試験体の木表面中央から R 方向に穿孔方向を設定し、0.1mm ごとに穿孔抵抗を測定した (図1)。レジストグラフ® の出力値は0~100の相対値で出力される。この出力値を穿孔抵抗に換算するために校正実験を行った。その結果、穿孔抵抗と出

力値の関係を示す直線の、傾きは (0.0069Nm/出力値) となった。0~0.02Nm は検出不可能であることが分かった (一次直線の切片)。この切片は、微小な誤差の範囲にとどまる系統誤差だと考えられるので、本研究では出力値0は0Nmとして回帰し換算した。

また、穿孔抵抗測定時の含水率を測定するため、穿孔直前に試験体の重量を測定した。

2.3 一般化線形モデル (GLM)

試験体の複数の物性値が、一つの試験体についての穿孔抵抗の平均値 R_a (算術平均) に及ぼす影響の寄与度を比較するため、回帰分析を行った。目的変数は穿孔抵抗の平均値 R_a とし、説明変数は試験体の物性値である質量減少率 ML 、腐朽前の全乾密度 D_{bef} 、含水率 MC 、平均年輪幅 Ann とした。説明変数にこれら4つを選択した理由はそ

図2 穿孔抵抗と木表面からの距離の関係, 穿孔抵抗のヒストグラムの一例

Fig.2 Example of relationship between the drilling resistance and distance from the surface, and the histogram of drilling resistance

れぞれが互いに独立な変数であると考えられ、また緒言で述べた既往の研究より試験体の物性値のうち穿孔抵抗に影響を与えるものであると考えたためである。

図2は穿孔抵抗と木表面からの距離の関係、穿孔抵抗のヒストグラムの一例を示す。測定された穿孔抵抗は常に非負の連続した値を取り、目的変数である穿孔抵抗の平均値 Ra も常に非負の連続した値を取る。また、平均値 Ra の分散について等分散ではないとみなせる。以上の二つの理由から目的変数の誤差を正規分布かつ等分散であることを前提とした最小二乗法を用いる回帰分析は適用できない。そこで本研究では、目的変数である穿孔抵抗の平均値 Ra の誤差に正規分布以外も適用できる次式(1)で示す一般化線形モデルを適用した。また穿孔抵抗の平均値の誤差分布は非負の連続的な値を取ることからガンマ分布と仮定した^{9, 10)}。

$$g(E[Ra_i]) = \beta_0 + \beta_1 ML_i + \beta_2 D_{befi} + \beta_3 MC_i + \beta_4 Ann_i \cdots (1)$$

(1)式は回帰分析と同様に、目的変数と説明変数の関係を示す関数である。 $E[\]$ は期待値を表し、 i は試験体固有の番号を示す。係数 β_k ($k \in \{0, 1, \dots, 4\}$) は各説明変数の係数である。左辺が目的変数である穿孔抵抗の平均値 Ra に関する項、右辺は説明変数である質量減少率 ML 、腐朽前の全乾

重量 D_{bef} 、含水率 MC 、平均年輪幅 Ann が線形結合した形で表される。正規分布仮定と異なる点として、左辺の $g(\)$ はリンク関数と呼ばれ、目的変数の誤差の確率密度分布によって異なる関数を用いられる。平均値 Ra の誤差の確率密度分布と仮定したガンマ分布では、リンク関数 $g(\)$ は逆数関数 $1/(\)$ や対数関数 $\log(\)$ となる¹¹⁾。

また(1)式における係数 β_k の推定では、目的変数の誤差が正規分布と仮定できず最小二乗法は適用できない。したがって、一般化線形モデルでは目的変数の誤差が正規分布以外の確率分布でも適用できる方法を用い、最尤推定法とよばれる方法で β_k を推定する。最尤推定法は、ある β_k の値を定めたモデルから目的変数のデータが生起する確率（尤度）が、最も高くなる β_k を求める方法である。まとめると、本研究で用いた一般化線形モデルは目的変数の関数を説明変数の線形結合で表すモデルであり、最小二乗法を用いる回帰分析の拡張といえる。

3. 結果と考察

3.1 穿孔抵抗測定結果

図3は穿孔抵抗と木表面からの距離の関係の一例を示す。左の列から順にコントロール、質量減少率 ML が5～10%、10%以上のものを抽出した。すべての試験体で穿孔抵抗の周期的な変動が見られるがこれは山部が晩材、谷部が早材と一致している。このことは既往の研究結果と一致してい

図3 穿孔抵抗と木表面からの距離の関係

Fig.3 Relationship between the drilling resistance and distance from the surface

図4 樹種ごとの平均質量減少率
(エラーバーは標準偏差を示す)

Fig.4 Mass loss of wood species
(Error bars denote standard deviation)

る^{5, 12)}。

すべての樹種に共通して、質量減少率 ML が 5～10%程度で早材部において穿孔抵抗が 0 Nm の部分が見られる。しかし、スギではコントロールの早材部においても穿孔抵抗が 0 Nm の部分があり、穿孔抵抗 0 Nm の部分ならば必ずしも腐朽しているとは言えない。0 Nm の部分でも木材は存在するため、穿孔抵抗は本来得られるはずである。そのような部位で 0 Nm であった原因は、2.2 で述べたように、レジストグラフ[®]は 0～0.02 Nm が検出不可能であることから系統誤差が存在し、腐朽の進んだ木部や、低密度の早材部分のように強度が極めて低い部分の穿孔抵抗は検出できず、出力値 0 になったためと考えられる。

また、すべての樹種で早晚材変動とは異なる細かい変動が見られるが、これはレジストグラフ[®]の錐先端部が試験体を削る際に細かく先割れが起こるためと考えられる。腐朽が進行したベイマツでは、試験体表層部 (0～5 mm, 15～20 mm あたり)の方が内部 (5～15 mm あたり)より穿孔抵抗が低くなる傾向が見られた。これは、表層部と内部の腐朽程度の違いが影響していると考えられる。ベイツガはスギと同様の傾向がある。また実験結果から穿孔抵抗の平均値 Ra の分散は等しいとはみなせない。

以上のような特徴を含む穿孔抵抗の平均値 Ra が、説明変数である試験体の物性値からどのように影響を受けるのかを一般化線形モデルを構築し考察を行った。

3.2 説明変数 (試験体の物性値)

穿孔抵抗の平均値が、健全あるいは腐朽した針葉樹木材の一般的物性値 (説明変数) による影響を明らかにするため、得られた物性値を全樹種で合算させてパラメータ解析を行った。説明変数の物性値以外の樹種による差は、穿孔抵抗の平均値に与える影響はないとみなした。

説明変数は、質量減少率 ML 、腐朽前の全乾密度 D_{bef} 、含水率 MC 、平均年輪幅 Ann である。図 4 は強制腐朽操作開始から 3, 6, 9, 12 週間後の質量減少率 ML の平均値を示す。図 5 は説明変数である各物性値の全樹種を合算させたヒストグラムを示す。なおこれ以降、 $ML < 0$ の試験体については全く腐朽しなかったとみなし質量減少率は 0%とする。

図 4 より、ヒノキが腐朽開始 9 週間後まではほとんど腐朽しなかったことがわかる。そのため、図 5 の質量減少率 ML のヒストグラムにおいて、0～1.7%の階級の頻度が大きくなっている。ヒノキがあまり腐朽しなかった原因は抽出成分による影響のほか、後の確認により木口面の半分程度

図5 4つの物性値の全樹種を合算させたヒストグラム

Fig.5 Histogram of 4 physical properties

図6 穿孔抵抗平均値 Ra および4つの物性値の散布図

Fig.6 Scatter plot of Ra and 4 physical properties

に心材を含んでいたためと考えられる。

試験体の腐朽前の全乾密度 D_{bef} のヒストグラムでは、分布が4つのグループに分かれているため、全乾密度 D_{bef} によって樹種の差もモデルに反映されと考えられる。

穿孔抵抗測定時の含水率 MC のヒストグラムでは、2～14%の範囲に分布が収まっている。既往の報告⁷⁾では含水率が数%違う程度では穿孔抵抗に影響をあまり与えていない。したがって、推定された含水率 MC の係数の正負が既往の研究

表 1 R で推定された係数
Table 1 Estimated coefficients of GLM by R

	推定値 Estimate	標準誤差 Std.Error	t 統計量 t value	確率 Pr (> t)
<i>Intercept</i>	-4.70	0.46	-25.88	<2e-16***
<i>ML</i>	-0.088	0.0044	-20.19	<2e-16***
<i>D_{bef}</i>	7.4	0.40	18.95	<2e-16***
<i>MC</i>	0.00086	0.019	0.04	0.96
<i>Ann</i>	-0.32	0.17	2.07	0.06

Signif. codes : '***'0.001 '**'0.01 '*'0.05

の考察と逆の意味を示す場合などは、現実に即してモデルを検討する必要がある。

試験体の平均年輪幅 *Ann* のヒストグラムについて、平均年輪幅が狭いとレジストグラフ®のデータ間隔が0.1mm であることにより、早晚材における穿孔抵抗の変動が小さくなる。

図 6 に穿孔抵抗の平均値 *Ra*、質量減少率 *ML*、腐朽前の全乾密度 *D_{bef}*、含水率 *MC*、平均年輪幅 *Ann* の関係を示す。ここから、平均値 *Ra* と説明変数の関係は線形では表せないこと、説明変数同士には特定の関係は見られず独立であることが確認された。

3.3 一般化線形モデルを用いた穿孔抵抗と腐朽木材の物性値のパラメータ解析

目的変数を *Ra*、説明変数を *ML*、*D_{bef}*、*MC*、*Ann* とし(1)式における係数 β_k の推定をフリーソフトウェア R (R Development Core Team)¹³⁾ により行った。また(1)式のリンク関数 $g(\cdot)$ には対数関数 $\log(\cdot)$ を適用してモデリングを行う。R に各変数のデータを読み込ませ、一般化線形モデルの計算を行う関数 `glm()` を用いた。`glm.model <- glm (d$Ra ~ d$ML + d$Dbef + d$MC + d$Ann, family = Gamma(link = log), data = d)` と実装し、誤差分布にガンマ分布を指定、リンク関数に對数関数を指定した。表 1 に係数 β_k の推定結果を示す。

表 1 の Estimate には各説明変数の推定された β_k 、Std.error には β_k の標準誤差、t value には β_k の t 統計量、Pr (> |t|) には t 分布においてその t 統計量を取る確率が示されている。この t 検定において $\beta_k = 0$ が帰無仮説、 $\beta_k \neq 0$ が対立仮説である。今回の GLM では危険率 5 % で帰

無仮説が棄却され、係数として有意であるのは切片 *Intercept* および *ML*、*D_{bef}* であった。

どの説明変数をモデルに採用するかを評価する指標として赤池情報量基準 (AIC) を用いて、作成したモデルの変数選択を行う際の基準を設けた。AIC は説明変数の個数を最適化するために、モデルから使用した目的変数データが生起する確率 (尤度) を評価した基準であり、値が小さい方が統計的に良いモデルとされる¹⁴⁾。

R ではパッケージ MASS の `stepAIC()` という関数により、説明変数の組み合わせを変えた複数のモデルのうち、AIC が最も小さいモデルを調べることができる。本研究のモデルにおける `stepAIC()` の結果は、*MC* を除く、*ML*、*D_{bef}*、*Ann* の 3 つの説明変数を用いた次の(2)式で表されるモデルが最も AIC が小さくなった。したがって以降は(2)式が *Ra* と説明変数の関係を表すモデルであると考ええる。

$$\log(Ra) = -4.7 - 0.088ML + 7.4D_{bef} - 0.32Ann \quad \dots (2)$$

(2)式の両辺を指数関数で表すと(3)式となる。

$$Ra = e^{-4.7} e^{-0.088ML} e^{7.4D_{bef}} e^{-0.32Ann} \quad \dots (3)$$

(3)式では、それぞれの説明変数が積の形で表されており、*ML* および *Ann* が大きくなると *Ra* は小さくなり、*D_{bef}* が大きいほど *Ra* は大きくなる。*MC* が(3)式に採用されなかった理由は、含水率 2 ~ 14% 程度のばらつきでは *Ra* に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

説明変数 *ML*、*D_{bef}*、*Ann* はそれぞれ単位が異なるため、(3)式における推定された係数 β_k の比較では *ML*、*D_{bef}*、*Ann* が *Ra* に及ぼす影響の大きさを比較できない。そこで目的変数および説明

変数のデータを平均が0、分散が1となるように標準化し、それぞれの変動の単位を統一して作成したモデルの係数 β_k として得られる標準偏回帰係数を比較した。ここでは標準偏回帰係数は $\beta_k \times (\text{説明変数の標準偏差}) / (\text{目的変数の標準偏差})$ で求めた。

図7は各説明変数の標準偏回帰係数を示す。標準偏回帰係数は絶対値が大きいほどその説明変数が Ra に及ぼす影響も大きい。絶対値は D_{bef} が0.57, ML が0.44, Ann が0.06となり, Ann の標準偏回帰係数は他の2つの10分の1程度であった。したがって3.2で述べたように, Ann が小さいとレジストグラフ®の錐の回転に影響を及ぼし, 早晚材での穿孔抵抗の変動が小さくなることから, Ra に及ぼす影響は小さいと考えられる。また, D_{bef} が健全時の密度, ML が腐朽による質量減少であり, どちらも質量に関係する説明変数であるため, D_{bef} と ML の標準偏回帰係数の絶対値は同程度であったが, 完全に一致せず, ML の方が D_{bef} より絶対値が小さかった。これは, 質量減少率が一定値以上の試験体（特に早材部）では穿孔抵抗を測定したとき, レジストグラフ®の出力値が常に0 Nmとなり, その質量減少率以上の値の違いは Ra に反映されなかったためと考えられる。

(3)式および標準偏回帰係数より, Ra に大きな影響を及ぼす腐朽前の全乾密度 D_{bef} が定数として固定できる場合は, 穿孔抵抗の平均値 Ra は質量減少率 ML に応じて変化する。したがって D_{bef} が

同程度とみなせる同一樹種内では, 穿孔抵抗を使用して木材腐朽程度を評価できることが示唆された。

4. 結言

腐朽木材の穿孔抵抗と物性値との関係を一般化線形モデル化手法（GLM）によって数式で表し, 各物性値の寄与度をその係数で評価した。ここでは目的変数をレジストグラフ®による穿孔抵抗値の平均値, 説明変数を試験体の腐朽前の全乾密度 D_{bef} , 質量減少率 ML , 含水率 MC および平均年輪幅 Ann とし, GLMの係数を推定した。その際, AIC（赤池情報量規準）を指標として各パラメータの有意性を検証した結果, 説明変数としては D_{bef} , ML , Ann が採択された。さらに各説明変数の標準偏回帰係数を算出し絶対値を比較した結果, 全乾密度が最も大きく, その次に質量減少率, 平均年輪幅となった。平均年輪幅は他の2つと比較して10分の1程度であるため穿孔抵抗への寄与はそれほど大きくないと考えられる。全乾密度と質量減少率とでは, 本研究では後者の寄与度が低くなったが, その原因としては質量減少率が一定値以上になると穿孔抵抗値が0 Nmとなり ML の変動が穿孔抵抗に反映されなかったためと考えられる。最後に密度が同程度とみなせる同一樹種内では, 穿孔抵抗を用いて木材腐朽程度を評価できることが示唆された。

図7 標準偏回帰係数
Fig.7 Standard partial regression coefficient

引用文献

- 1) 角谷和男：木材の内部欠陥と超音波音速との関係，木材研究：京都大学木材研究所報告，**34**：22-36（1967）。
- 2) 後藤崇志，富川康之，中山茂生，古野毅：腐朽処理した木材の超音波伝播速度および部分圧縮強度の変化 超音波伝播速度の低下と残存強度との関係，木材学会誌 **57**（6），359-369（2011）。
- 3) Henriques, F., D., Nunes, L., Machado, S., J., Brito, de, J.: Timber in buildings: Estimation of some properties using Pilodyn® and Resistograph®, *International Conference on Durability of Building Materials and Components PORTO-PORTGAL*, April 12th-15th 1-8（2011）。
- 4) 森拓郎，築瀬佳之，田中圭，河野孝太郎，野田康信，森満範，栗崎宏，小松幸平：生物劣化を受けた木材の曲げおよび圧縮強度の特性とその劣化評価，材料**62**（4），280-285（2013）。
- 5) Rinn, F., Schweingruber, -H., F., Schär, E.: RESISTOGRAPH and X-Ray Density Charts of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species, *Holzforschung*, **50**, 303-311（1996）。
- 6) 山下香菜，長尾博文，加藤英雄，井道裕史：穿孔抵抗による材内密度分布の推定の試み，森林総合研究所研究報告**5**（1），61-68（2006）。
- 7) Cheng-Jung L., Song-Yung W., Far-Ching L., Chih-Ming C.: Effect of moisture content on the drill resistance value in Taiwanian plantation wood, *Wood and Fiber Science*, **35**（2），234-238（2003）。
- 8) Sharapov, E., Brischke, C., Militz, H., Smirnova, E.: Effects of white rot and brown rot decay on the drilling resistance measurements in wood, *Holzforschung*, **72**（10），905-913（2018）。
- 9) 久保拓弥：データ解析のための統計モデリング入門 一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC，岩波書店，2012，pp. 24-28, 138-140。
- 10) 大東健太郎：線形モデルから一般化線形モデル（GLM）へ，雑草研究，**55**（4），268-274（2010）。
- 11) 松井秀俊，小泉和之，竹村彰通：統計モデルと推測，講談社，2019，pp. 142-144。
- 12) 藤井義久，藤原裕子，原田正彦，木川りか，小峰幸夫，川野邊渉：穿孔抵抗測定法を用いた文化財建造物の構造部材の虫害評価に関する一考察—日光輪王寺における虫害を事例として—，保存科学，**48**，215-222（2009）。
- 13) R Core Team（2019）. R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.（参照2020. 10. 18）。
- 14) 堀裕亮：ゼロからはじめる統計モデリング，ナカニシヤ出版，2017，pp. 107-108。
(2020.10.20受付)
(2020.12.13受理)