

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05709

研究課題名(和文) 樹木の加齢にともなう木材性質変動の物理学的考察

研究課題名(英文) Evaluation of the variation of wood properties with age based on physics

研究代表者

藤本 高明 (Fujimoto, Takaaki)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号：40446331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：様々な樹種を対象に、その各形成層齢の木部から近赤外スペクトルを計測し、得られたデータ行列の固有値分布に基づいて、加齢にともなう木材性質変動を調査した。固有値分布に着目することにより、個体差および性質の違いに依らない包括的な評価が可能となるとともに、物理学的視点からもいくつかの重要な知見が得られた。すなわち、加齢にともない固有値分布は拡散することを確認し、それから得られる自由エネルギーとエントロピーの結果から、樹木は年齢とともにより秩序だった木部を形成することを明らかにした。固有値分布から計算したリウヴィル方程式の結果から、樹木の成長は明らかな不可逆過程であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材性質の樹齢依存性、すなわち、樹幹内変動に関する知見は、木材を利用する際はもちろん、適切な森林管理を進める上でも重要である。森林施業の長伐期化、大径材の有効利用など、近年顕在化している林業・木材産業の諸問題と密接に関係している。樹木は加齢にともないより秩序だった木部を形成すること、そしてその過程は非可逆的であるという事実は、持続可能な森林経営と木材資源の有効利用に重要な示唆を与える。本研究の結果で提案した手法は特定の座標系に依存しないため、樹木の加齢現象における木材状態変化の普遍的な振る舞いを見出すことができる。

研究成果の概要(英文)：A correct understanding of the variation in wood properties with tree age is of great importance for both the forestry and timber industries. In this study, we evaluated the variation of multiple traits inclusively based on the distribution of eigenvalues calculated from the near-infrared spectral matrix at each cambial age. The eigenvalues diffused with age in any species, such as in Dyson's Brownian motion. The gradual increase in the first eigenvalue indicates that trees form a more ordered wood with age. The age dependency of Shannon entropy and density matrix provided us with knowledge from the perspective of randomness; namely, tree aging from the perspective of the variation of wood properties was clearly an irreversible process. This result offers an important clue for sustainable forest management and the use of wood resources. The proposed method does not depend on a specific coordinate; thus, it will work well using data other than the near infrared spectrum.

研究分野：森林圏科学

キーワード：wood variation Dyson's Brownian motion Fokker-Planck equation Statistical mechanics Helmholtz free energy Entropy Irreversible process

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) Sanio(1875)による仮道管長の観察^[1]以来、木材の諸性質、例えば、密度、力学的性質、解剖学的特徴などが、それぞれの樹種で特徴的な樹齢依存性を示すことが知られている。いわゆる未成熟材、成熟材は、樹齢(形成層齢)に対応した樹幹内における木材性質の変動パターンにしたがって区分される。木材性質の樹幹内変動に関する知見は、木材を利用する際はもちろん、適切な森林管理を進める上でも重要である。森林施業の長伐期化、大径材の有効利用など、近年顕在化している林業・木材産業の諸問題とも無関係ではない。

(2) 一方で、木材性質の樹幹内変動は樹種間だけでなく個体間でも多様なため、簡潔に論じることが容易ではない。加えて、同じ個体であっても変動パターンが木材性質ごとで異なるため、例えば、未成熟材と成熟材の区分は明らかに着目する性質に依存して変わるといったことが生じる(図1)。木材性質変動に対する混乱した理解は、場合によっては誤った森林施業や木材利用につながりかねない。

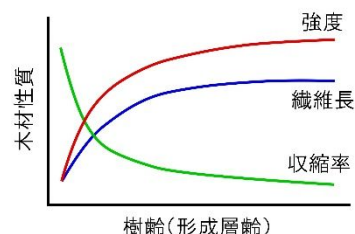


図1 木材性質の樹齢依存性

(3) ところで、樹木を伐採し、製材加工した木材を放置すると、時間の経過とともに含水率が低下する。含水率の減少とともに、木材は寸法変化をおこし強度はしだいに増加する。寸法や強度の変化は、細胞形態の変化、さらには細胞壁を構成する分子の変化などと連動しておこる。すなわち、ある対象となる性質の変化の背後には、それ以外の多くの性質の協調的な変化も付随しているのである。このような時間発展とともに木材性質が刻々と変化する現象の例は枚挙にいとまがなく、図1の樹幹内変動はまさにこの現象の好例である。したがって、時間発展にともなう木材の状態変化、すなわち加齢にともなう木材性質変動を正確にとらえるためには、木材を特徴づける多数の性質の変化を「個別」に評価するのではなく「包括的」に評価することが不可欠である。

(4) 任意に手渡された木材は、密度や組織構造、ヤング係数などの力学的性質、含有成分量など、きわめて多くの性質によって特徴づけることができる。つまり、所与の木材は、 n 個の変数の組、すなわち、 n 次元ベクトルデータ (x_1, x_2, \dots, x_n) として表される。これを踏まえ申請者は、ある単一の性質に着目するのではなく多様な性質が相互に関連しあいながら変動する様子を包括的に評価する方法を提案した。具体的には、水分や応力など、状態の異なる木材から多次元ベクトルデータ(例えば、分光スペクトルなど)を計測し、同ベクトルデータで構成された行列の固有値分布に基づいて評価するのである。得られた固有値集合は、すべての変数の包括的な変動を内包しているとともに、物理学の文脈では、対象となる系のエネルギー状態に対応するとみなせることから^[2]、同方法によって木材の状態を熱力学あるいは統計力学的に考察することができる。実際、一例としてヤング係数の高い木材と低い木材を比較すると、前者の方が自由エネルギーが高くエントロピーが低い、といった結果が得られ、既往の物理的描像と矛盾しないことが明らかとなった^[3]。

(5) 本研究では、この固有値分布に基づく評価方法を、木材性質の樹幹内変動解析に適用することを考えた。すなわち、各樹齢(形成層齢)で計測した n 次元ベクトルデータからなる行列の固有値を算出することによって、その分布の樹齢依存性を得ることができる。得られた固有値の分布は、木材を特徴づける多変数の変動を総括した情報であるとともに物理学的な意味を包摂している。このとき本研究の核心となる学問的問いは、「固有値分布の時間発展は、樹齢に対応した木部の状態を記述しているのか?」と言い表せる。もし、加齢とともに固有値分布が広がる様子が認められれば、樹木はより自由エネルギーが高い、すなわち、より秩序だった木部組織を形成しようとする傾向にあると解釈できる(後述準備状況)。また、もし成長の早い個体が遅い個体よりも狭い固有値分布で推移したとすると、前者はエネルギーロスが高いと理解できる。よって、これらの結果を総括すれば、「物理学的視点に立てば、樹木はできる限り長くゆっくりと育てる方がいい」、といった簡明な結論を得ることができる。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、「加齢にともなう木材性質変動を、単一の性質で直接的におうのではなく、多数の性質(情報)を用いて包括的に評価し、得られた結果を物理学的に考察すること」である。これにより、樹木の加齢現象における普遍的な木材性質変動を見出す。

(2) 本研究の特徴は、所与の木材から得られた多次元ベクトルデータが、その木材を特徴づける密度や力学的性質といった実際の性質と必ずしも1対1に対応する必要はない、という考えに基づいていることである。このことは、密度などの木材性質が近赤外スペクトルや音響スペクトルといった間接的な情報で推定評価できるという多くの既往研究からも支持される。また、これら既往研究で得られた統計的な推定モデルは、1次形式(コベクトル)、すなわち、 n 次元ベク

トル空間 V から実数空間 \mathbb{R} への写像 $\omega: V \rightarrow \mathbb{R}$ に他ならない. V 上の 1 次形式全体の集合は双対ベクトル空間 V^* をなし, それらは基底以外本質的な違いはない. このように考えれば, 実際の木材性質とスペクトル変数のような間接的な情報が 1 対 1 に対応しなくとも, 両者が双対的な関係にあるならば, 間接的な情報によって木材の変化を包括的に評価できる解釈できる.

(3) 本研究の学術的独自性は, 「木材といういわば多自由度の物理系の状態変化を, 抽象的な描像にうつして数学的・物理学的に考察する」ところにある. この描像によれば, 木材状態の加齢変化は, n 次元の配位空間あるいは位相空間における曲線と同一視できる. この視点にたてば, 木材の状態変化をラグランジュ形式あるいはハミルトン形式などの解析的な力学により考察するという新たな学問領域の創造に発展する. 木材性質変動の研究には多種多様な事例が存在するが, 抽象性の高い理論に立脚することによって, 枝葉の各論ではないより本質的な総論を導くことができる.

3. 研究の方法

(1) 任意の立木の任意の部位から円板試料を採取し, 髓側から樹皮側に向かって所定の年輪ごとに木材の諸性質を測定すると, 図 1 のように性質ごとに様々な変動パターンが現れる. そこで本研究では, 樹種や個別の性質に依存しない普遍的な樹齢依存性を明らかにするため, 以下の実験を行った.

(2) 針葉樹 2 種 (ヒノキ, スギ), 広葉樹 2 種 (ケヤキ, トチノキ) を対象に調査した. これらの樹種設定は, それぞれの木部組織構造の特徴 (早材晩材の移行の緩急, 環孔材, 散孔材) を考慮したものである. 鳥取大学教育研究林「蒜山の森」(岡山県真庭市) に調査林分を設定した (図 2). 各林分の毎木調査を実施し, できるだけ成長の良否の違いが幅広くなるように試験木を選んだ (各樹種 10 個体).

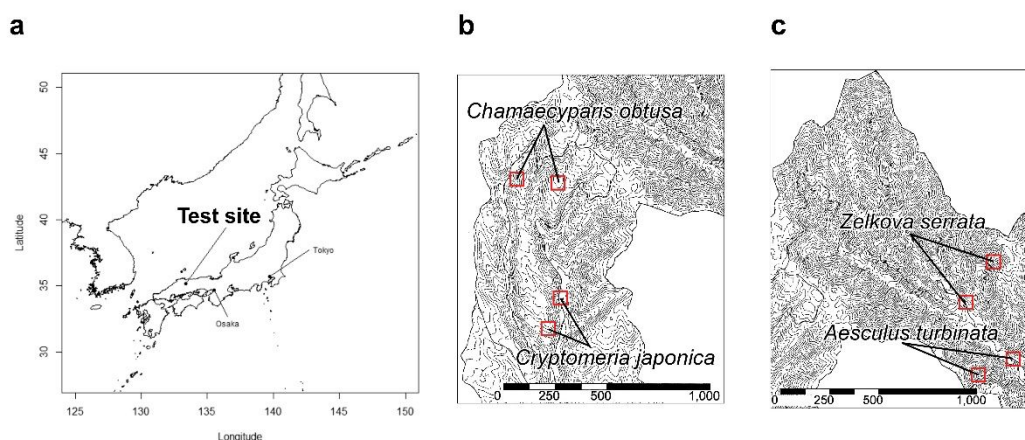


図2 (a)調査地(鳥取大学教育研究林)と(b, c)調査樹種の試験林分

(3) 選木した個体から採取した円板試料の各樹齢 (形成層齢) に対応する箇所より多次元ベクトルデータを収集した. 多次元ベクトルデータとして, 近赤外拡散反射スペクトルと X 線回折スペクトルを計測した. これは, 得られる結果が情報源に依存しない不変なものかどうかを明らかにするためである. 各林分を構成する供試木の集まりを統計集団 (アンサンブル) とみなすことによって, これを一つの物理系と考えた.

(4) 各系の各時点 (樹齢) からは多次元ベクトルデータからなる行列データが得られるので, これを固有値展開した. 算出された固有値の集合は, 個別の木材性質の変動を総括した情報とみなせるとともに, これをエネルギー関数とみなせばその総和から分配関数を計算した. この分配関数をもとに Helmholtz 自由エネルギーやエントロピーなどの熱力学関数を算出した. 行列要素を確率変数とみるランダム行列理論によれば, 得られた固有値の確率過程はダイソンブラウン運動と呼ばれ, 固有値分布の時間微分は Fokker-Plank 方程式で表される^[4]. 固有値分布の樹齢依存性を同式に基づいて評価することにより, 樹木の加齢現象を決定論的アプローチではなく確率過程として考察した.

4. 研究成果

(1) 各形成層齢から得た近赤外スペクトル行列の固有値分布を図 3 に示す. 樹種の別なく, 加齢にともない, 固有値は互いに交差することなく拡散し, 広く分布する傾向を示した. この結果は, 樹木が成長するにつれて, 近赤外スペクトル行列がより規則的に変化することを示している. また, 系のヘルムホルツ自由エネルギーに相当する第 1 固有値は, 辺材領域である可能性のある

外側の位置を除いて、すべての樹種で年齢とともに徐々に増加した。自由エネルギーが徐々に増加することは、樹木が年齢とともにより秩序だった木部を形成することを示唆している。例えば、多くの樹種では、加齢とともに剛性や破壊強度が増加し、収縮率が減少することが知られている^[5]。これらの現象は、セルロースの結晶性や配向など、より組織化された分子構成への変化として理解できる^[6]。他の多くの特性も力学的特性や収縮の変化に追従して変化することから、固有値の拡散は、これらの複雑な変化が一言で言えば木部組織の組織化の進行であることを示している。

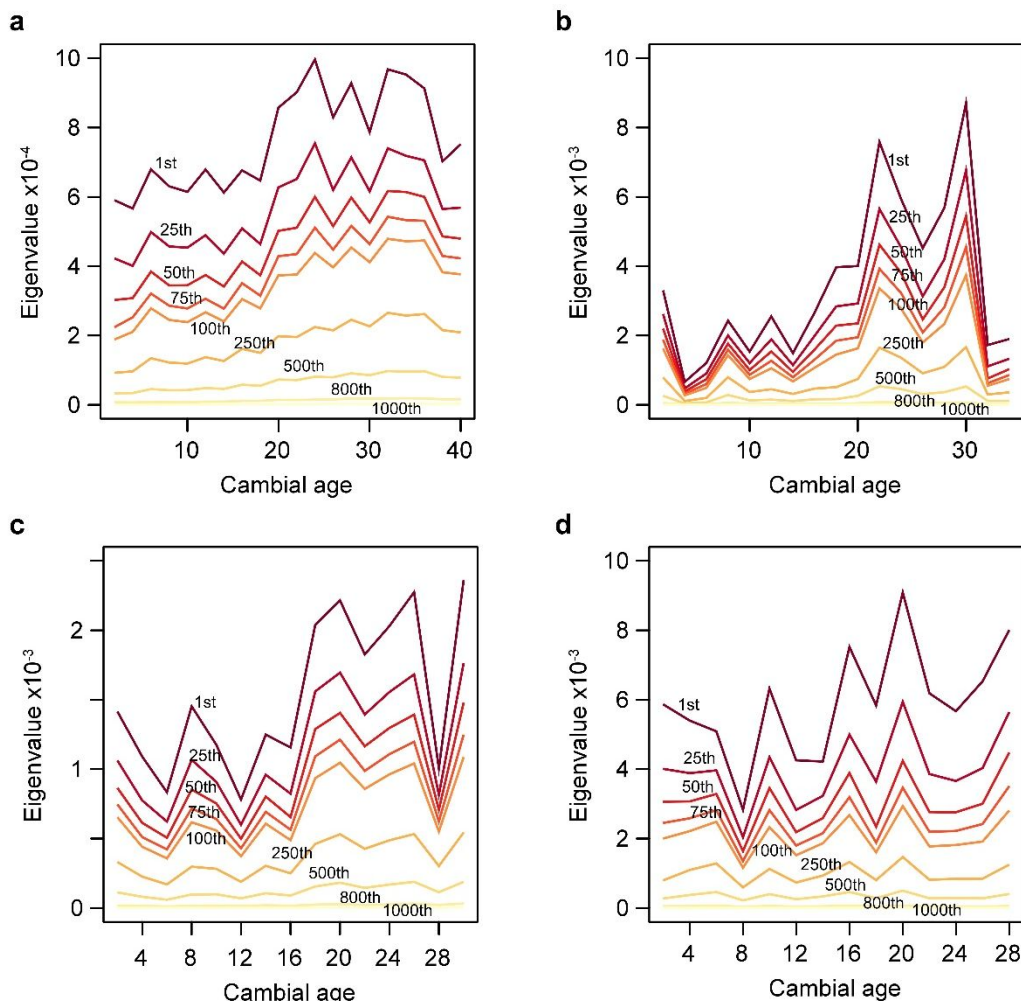


図3 加齢ともなう固有値の軌跡。(a)ヒノキ, (b)スギ, (c)ケヤキ, (d)トチノキ。

(2) 近赤外スペクトル行列、各成分が確率変数である時間依存のランダム行列とみなせる^[7]。その固有値の確率過程は Dyson ブラウン運動で記述され、その確率密度の時間発展は Fokker-Planck 方程式にしたがう。実験により得られた固有値を同方程式に代入することにより得られた固有値の確率密度の加齢ともなう変化を、ヒノキを一例に図4に示した。固有値の確率密度の時間微分には、樹種に依存しない一般的な傾向は認められなかった。ヒノキとケヤキでは加齢とともに固有値密度の微分の絶対値が減少するが、スギとトチノキではその逆の傾向であった。種間のこれらの違いが何を示唆しているのかはまだ不明であるが、樹木の成長過程における様々な木材性質の変動が、固有値集合に集約されることが重要な点と言える。すなわち、木材形成の複雑なプロセスを、固有値の運動を表す確率微分方程式を介して簡明に理解することができる。

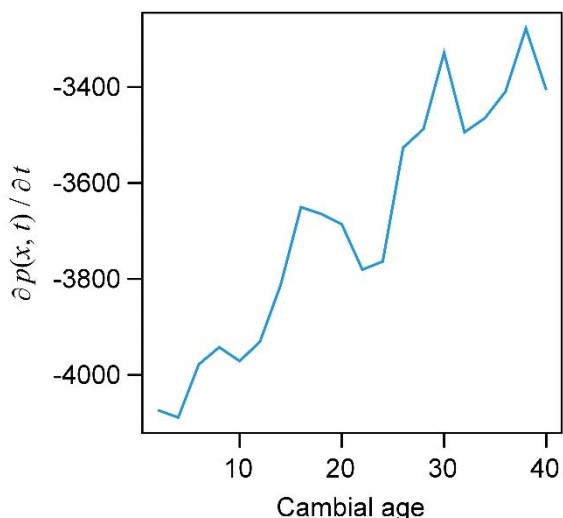


図4 固有値の確率密度の樹齢依存性

(3) 一般に、未成熟材と成熟材の境界は考慮される木材性質に依存して変化してしまうことが問題である。しかし、Fokker-Planck 方程式は様々な木材性質の変化を一括して考慮できることから、樹木の成熟化に対してより普遍性の高い結論を導ける可能性がある。さらに、図4の結果は、個々の樹木個体ではなく統計的集団としての振る舞いを表している^[8]。個々のサンプルからの結果は、遺伝的および環境的要因により一貫性がないことがしばしばある^[5]。多数の個体からなる統計集団から得られた結果は、大数の法則に基づいた非常に普遍的な挙動を示すと期待できる^[9]。

(4) 加齢にともなう木材性質の変動をエントロピーからも考察した。すべてのエネルギー固有値の総和を規格化定数として、対象の系がとりうるエネルギー固有状態の確率分布を計算した。どの樹種についても、エネルギー固有状態は加齢にともないより偏った分布を示す傾向が認められた(ヒノキを一例に図5に示す)。エントロピーは、ほぼすべての逆温度条件で樹齢とともに徐々に減少した(図6)。この結果は、自由エネルギーの傾向と一致していた。すなわち、若齢で形成される木部は物理システムとしてランダムな状態にあり、加齢にともない形成される木部はより規則的に状態に変化すると理解できる。

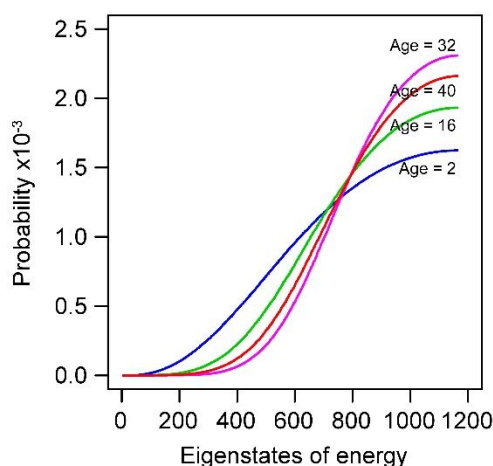


図5 ヒノキ材の樹齢2, 16, 32, 40年における各エネルギー固有状態に対応する確率分布。

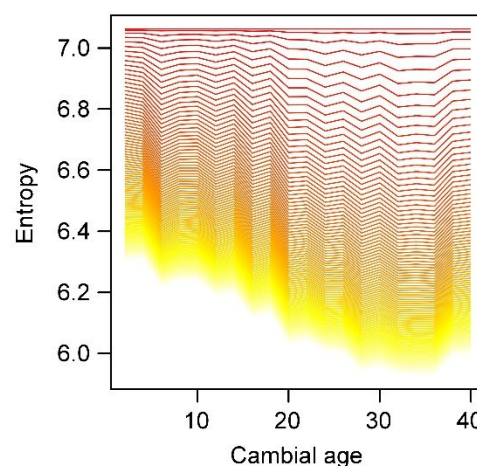


図6 逆温度変化に対応したエントロピーの年齢依存性。線の色が赤から黄色に変化するにしたがい逆温度が上昇する。

(5) 上述のように、木材サンプルの集合は n 次元空間内の点群とみなせる。木材サンプル集合からなる系の運動がハミルトン方程式で表されると仮定すると、点群は相空間において密度 $\rho = \rho(q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n, t)$ を有する連続流体として記述できる。密度を表す行列は上記で得た固有ベクトルとエネルギー固有状態の確率分布から計算でき、その時間発展は Liouville 方程式で表される。実験により得られた固有値分布から計算した Liouville 方程式の結果から、樹木の成長は明らかな不可逆過程であることがわかった。

(6) 本研究で得られた結果は、(i) 高樹齢化による材質的な向上、(ii) 同質の木材は再生不可能であることなどを意味しており、持続可能な森林経営と木材資源の有効利用に重要な示唆を与える。また、本研究の結果で提案した手法は特定の座標系に依存しないため、樹木の加齢現象における木材状態変化の普遍的な振る舞いを示していると言える。

参考文献

- [1] K. Sanio, Ueber die Grösse, der Holzzellen bei der gemeinen Kiefer (*Pinus silvestris*). Jahrb. Wiss. Bot. 8 (1872) 401–420.
- [2] M.L. Mehta, Random matrices, 3rd ed., Elsevier Ltd, London, 2004.
- [3] T. Fujimoto, Evaluation of wood variation based on the eigenvalue distribution of near infrared spectral matrix. J. Near Infrared Spectrosc. 27 (2019) 175–180.
- [4] T. Sasamoto, A note on a few processes related to Dyson's Brownian motion, RIMS Kôkyûroku Bessatsu B27 (2011) 123–139.
- [5] B.J. Zobel, J.P. van Buijtenen, Wood Variation – its Causes and Control, Springer, Berlin Heidelberg New York, 1989.
- [6] A. Zink-Sharp, The mechanical properties of wood, in: J.R. Barnett, G. Jeronimidis (Eds.), Wood Quality and its Biological Basis, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2003, pp. 187–210.
- [7] F.J. Dyson, Statistical theory of the energy levels of complex systems I, J. Math. Phys. 3 (1962) 140–156.
- [8] M. Toda, R. Kubo, N. Saito, Statistical Physics I. Equilibrium Statistical Mechanics, second ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.
- [9] K. Sekimoto, Stochastic Energetics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Takaaki Fujimoto	4. 巻 225
2. 論文標題 Evaluation of the age dependent variation of wood properties based on the eigenvalue distribution of near infrared spectral matrices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems	6. 最初と最後の頁 104576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.chemolab.2022.104576	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 Takaaki Fujimoto	4. 巻 30
2. 論文標題 Monitoring the physical state of wood during multiple tensile load-unload cycles by the eigenvalue distribution of near infrared spectra	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Near Infrared Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 345
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/09670335221130469	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 Takaaki Fujimoto	4. 巻 69
2. 論文標題 Detecting the changes of wood properties with respect to elapsed years since wood formation by the eigenvalue distribution of near infrared spectral matrices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s10086-023-02078-1	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takaaki Fujimoto
2. 発表標題 Geometric evaluation of the stress relaxation process of wood based on the differential form
3. 学会等名 The 8th Asian NIR Symposium（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本高明
2. 発表標題 固有値分布に基づく木材の ばらつき評価
3. 学会等名 第73回日本木材学会大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本高明
2. 発表標題 樹木の加齢にともなうNIRスペクトル行列固有値分布の変化
3. 学会等名 第37回近赤外フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本高明
2. 発表標題 応力緩和過程における木材状態変化の微分幾何学的評価
3. 学会等名 日本木材加工技術協会第41 回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本高明
2. 発表標題 樹木の加齢にともなう木材性質変動の微分幾何学的評価
3. 学会等名 日本木材学会中国・四国支部第34回研究発表会
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------