

多次元情報に基づいた木材変動の包括的評価  
(Comprehensive assessments of wood variation based on  
the multi-dimensional data)

堤 晴彩

2022

## 目次

第1章 本論文の背景と目的 .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 木材性質を評価する既往の手法 .....	5
1.2.1 木材性質の評価方法 1—目視での区分 .....	5
1.2.2 木材性質の評価方法 2—全数検査 .....	6
1.2.3 木材性質の評価方法 3—樹種による区分 .....	6
1.2.4 木材性質の評価方法 4—機械等級区分 .....	6
1.2.5 木材性質の評価方法 5—近赤外分光法による木材性質評価 .....	8
1.3 木材性質を評価するための新たな視点 .....	10
1.3.1 物理学的考察から木材を評価する .....	10
1.3.2 物理学的考察から地域資源を使う意義を考える—木材という地域資源を通して— .....	14
1.4 本論文の目的と構成 .....	15
第2章 振動スペクトルに基づいた立木材質の非破壊推定 .....	18
2.1 緒言 .....	18
2.2 供試材料および実験方法 .....	20
2.2.1 供試材料 .....	20
2.2.2 振動試験 .....	21
2.2.3 実測データの収集 .....	21
2.3 データ分析 .....	23
2.4 結果と考察 .....	24
2.4.1 各木材性質の実測データと振動スペクトルの変動 .....	24
2.4.2 Lasso 回帰 .....	28
2.4.3 PLS 回帰 .....	28
2.5 結論 .....	31
第3章 近赤外スペクトル行列の固有値分布に基づいた木材収縮変動の評価 .....	33
3.1 緒言 .....	33
3.2 供試材料及び実験方法 .....	37
3.2.1 サンプルの前処理 .....	37
3.2.2 収縮試験 .....	37
3.2.3 NIR 測定 .....	38
3.3 データ分析 .....	38
3.4 結果と考察 .....	39
3.4.1 スペクトル変動 .....	39

3.4.2	固有値分布と収縮率変動におけるエネルギー学的視点 .....	42
3.4.3	収縮に関連する木材状態におけるランダム性.....	44
3.5	結論.....	48
第4章	固有値分析に基づいた木材の細胞壁分布パターンにおけるエネルギー学的考察 .....	49
4.1	緒言.....	49
4.2	供試材料及び実験方法.....	51
4.2.1	供試材料と収縮試験 .....	51
4.2.2	画像分析 .....	53
4.3	データ分析.....	53
4.4	結果と考察.....	55
4.4.1	スペクトル変動 .....	55
4.4.2	固有値分布.....	57
4.4.3	細胞壁の分布におけるエネルギー学的考察 .....	57
4.5	結論.....	63
第5章	地域資源活用における多角的意義の創出のための物理学的考察 .....	64
5.1	緒言.....	64
5.2	地域資源を使う意義における既往の知見の整理 .....	64
5.3	物理学的考察に至った着想点.....	66
5.4	供試材料及び実験方法.....	72
5.4.1	サンプル作成 .....	72
5.4.2	NIR 測定.....	73
5.5	データ分析.....	73
5.6	結果と考察.....	74
5.7	結論.....	76
第6章	総括と展望 .....	78
6.1	本論文の総括 .....	78
6.2	今後の展望.....	81
6.2.1	研究手法としての展望.....	81
6.2.2	研究成果を社会へ発信・還元するための活動の展望.....	82
謝辞	.....	84
引用文献	.....	85
摘要	.....	96
学位論文の基礎となる学会誌公表論文リスト	.....	101

## 第 1 章 本論文の背景と目的

### 1.1 はじめに

石材と並び最古の資材である木材は、現代においてもなお、住居や生活用品、燃料等、生活になくてはならない資材として存在している。2019 年に実施された森林と生活に関する世論調査 [1]によると、様々な建物や製品に木材を利用すべきと思うかという質問に対し、「利用すべきである」と回答した者の割合が 88.9%（うち「利用すべきである」53.8%、「どちらかといえば利用すべきである」35.2%）を占め、消費者側の意識も木材を使うことに肯定的であることが読み取れる。木材を利用すべき理由としては、「触れた時にぬくもりが感じられるため」、「気持ちが落ち着くため」といった回答が 50 %を上回り、性能等の実用面だけでなく感情等の内面的側面への働きかけにおいても木材は重要視されていることがわかる。今後、世の中に様々な新素材が誕生したとしても、豊かな生活をするために木材は使われ続けると想定できる。さらにグローバルトレンドとして、持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, 以下、SDGs）への対応が求められ、環境や社会への貢献度が企業価値として認識されるようになってきている。環境と経済が密接につながる機運が高まる傾向にあることを踏まえると、環境負荷が小さく持続可能な資源である木材の利用は、これまでより一層、不可欠な資源として重要視され、促進されていくことが期待される。特に、日本は国土の 67 %を森林が占めており、木材という地域資源の利用を活性化していくことは、持続可能な地域社会や環境を構築するためにも意義は大きい。

我が国の政策として国産材を利用する動きが活発になってきている。林野庁は 2025 年までに木材自給率 50 %の達成を掲げている。日本の木材自給率は、2002 年の 18.8 %（用材部門では 18.2 %）を底として上昇傾向にあるものの、2019 年時点においても 37.8 %（用材部門では 33.4 %）と 6 割強は輸入材に頼っている現状であり [2]、木材自給率 50 %の達成のためには更なる手立てと機会が必要となっている。その中、2021 年 3 月頃から住宅業界を中心に震撼させているウッドショックは、輸入材から国産材に転換する好機になり得るのではないかと捉える動きが増している。ウッドショックとは、木材の供給不足に陥り、木材価格が上昇する現象のことを指し、

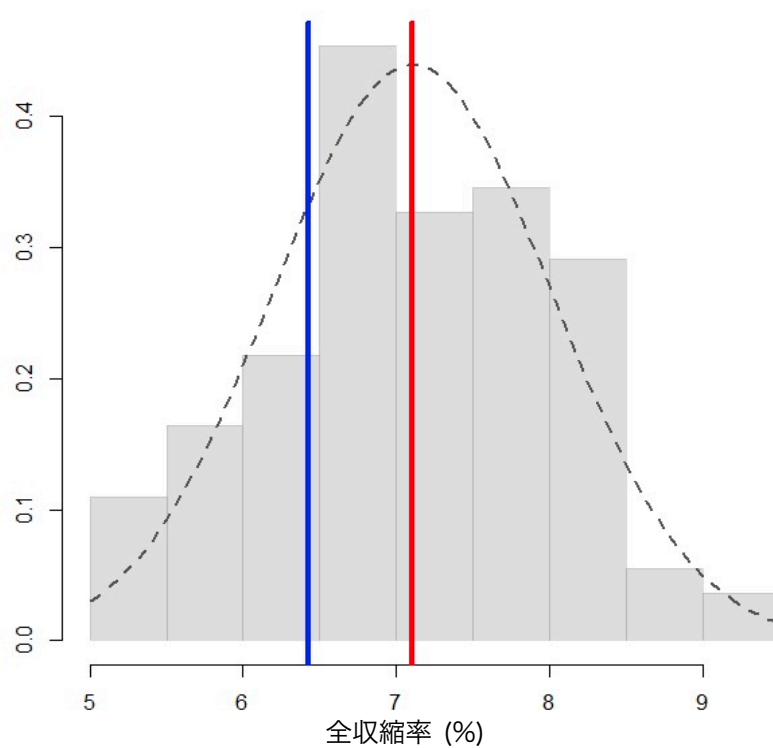
オイルショックになぞらえてその名がつけられている [3]。1993 年および 2008 年に続き、2021 年のウッドショックは 3 度目になるが、1993 年と 2008 年のウッドショックにおいては供給側が発端であったのに対し、2021 年のウッドショックは需要側が発端となりその影響が顕在化している。3 度目のウッドショックを引き起こした主な要因は、二大大国のアメリカと中国における新築住宅需要及び増改築需要の拡大や、世界的なコンテナ不足であり [4]、これらのことが日本向け外材の供給不足を起している。ウッドショックは輸入材だけでなく、国産材の価格の高騰を引き起こしており、日刊木材新聞社の調査によると、国産のスギ乾燥材正角は 2021 年 4 月では、2020 年 10 月の木材価格に基づくと 46%上昇し、ベイマツ乾燥材正角は、2021 年 4 月の販売店価格が 78000 円/m<sup>3</sup>で、半年間で 44%上昇した [5]。林業および木材関連事業者は、輸入材からの代替需要として国産材の需要が急激に増加しているこの機をきっかけとして、過去と比較し低水準で推移していた国産材が適正な価格に修正され、国産材利用促進への手立てとなると期待している。一方で、国産材需要が高まることへ対応するのに限界があるという声も上がっている。ウッドショック禍の急上昇した国産材需要に対応するためには、木材加工を増産するための設備投資が必要となるためである。事業者は設備投資に踏み切るかどうか決断できずにいるが、それは木材の急激な価格上昇の後、価格は急降下するといった状況に陥ることが多く、持続しない不安定さがこれまで何度も繰り返されてきているためである。ウッドショックを機に、国産材にスポットが照らされ始めているのは確かだが、山元に還元できるような健全かつ持続可能な木材生産・林業経営のためには、国産材の価格上昇を一時的な流行にしてはならない。つまり持続的な国産材利用促進を構築するためには、いかに国産材の需要を高い水準で安定させるかが鍵となるといえる。

持続可能で健全な国産材の利用を実現させるためには、供給側である林業経営の持続可能なシステムの構築や消費者側の国産材に対する意識改革といった様々な立場や視点からの対策が必要となるが、木材生産の立場においては、需要者のニーズに応じた製品を安定的に供給することが重要項目の一つといえる。需要者のニーズを知る切り口として森林と生活に関する世論調査によると、住宅を選ぶ時に、価格以外で重視することは何かという質問に対して「品質や性能が良く、耐久性に優れていること」を挙げた者の割合が 75.7%と最も高いことがわかった（同調査で木造住宅を選びたいと答えた割合が 73.6 %であった） [1]。令和 2 年度 森林・林業白書 [2]において

も品質・性能の確かな製品の供給に取り組む必要があると述べられており、需要者は木材という材料に対して“質”を求めていることがわかる。

しかし、不均質材料である木材の質を評価することは難しい。樹木の成長の結果として得られる木材は生物材料であるゆえに、人間に個性があるのと同様、木材も材それぞれによって性質にばらつきが生じる。性質のばらつきは、生育立地の違いや樹種間、個体間の違いによって露わとなり、さらに言えば同一個体内であっても部位によって性質はばらつく。このような木材性質のばらつきに影響を与える主な要因は、遺伝による先天的要因と生育環境による後天的要因の大きく2つに分けることができる [6] [7] [8]。前者の先天的要因は、染色体上の遺伝子として制御される遺伝情報によるもので林木育種や保全等における観点からこれまで多くの研究がされてきた [9] [10] [11] [12]。遺伝率のパラメータ推定やゲノムワイド関連解析 (genome-wide association study : GWAS) による木材性質に関連する遺伝子の同定といった様々な手法による定量的な研究が進んでいる [13]。一方で、生育環境による後天的要因において、材質は環境の影響を受けにくく遺伝的な影響を受けやすいという傾向が考えられるといった報告 [14]もあるが、気温、降水量、日照量等の生育環境の諸条件のなかでも、土壌水分環境が最も木材性質変動に強く影響を及ぼすという報告事例もみられる [6]。いずれにせよ、木材性質のばらつきは多数の複合的な要因から生じていることから、木材の質の評価は一筋縄ではいかない。

Fig.1 は実際の木材性質のばらつきがよく示された一例である。この図は、乾燥に伴うねじれ、狂い、割れや乾燥後の寸法安定性などに影響を及ぼす重要な木材性質の一つである全収縮率を、JIS に準拠し作成した 105 本のヒノキの試験体に対して計測した実測値分布である。サンプルの中で最も値が小さいサンプルは 5.16%であったことに対し、最大値を示したサンプルは 9.24%であった。すなわち、4.08%の変動幅が本サンプル群において認められた。Fig.1 は立木 5 本のヒノキから 105 体の試験体を作成し、測定した結果を示しているが、実際の現場では、膨大な個体数から用途ごとの製品へと製材されていくため、さらに変動幅が大きくなり、ばらつくことが予想される。一般的に現場では、文献値という一つの値が各木材の性質の値として代入されることが多くみられるが、各サンプルの性質のばらつきを無視した文献値の適応は、予期せぬ問題発生を引き起こす原因となる。例えば、Fig.1 において 9.0%の全収縮率を持つサンプルを利用したとする。ヒノキにおける接線方向の全収縮率の文献値は



**Fig.1.** ヒノキの試験体 105 本を対象とした，接線方向における全収縮率での実測値のヒストグラム

青色の実線がヒノキにおける接線方向の全収縮の文献値（6.43%），赤色の実線がサンプル群の実測値における平均値（7.16%），黒色の点線がサンプル群の実測値分布に基づいた正規分布を示している。

6.43% [15]であるため、上記のサンプルにこの文献値を予測値として適応させると、実測値との誤差は 2.57%になる。また、サンプル群での実測値の平均値は 7.16%であり、文献値の 6.43%と 0.73%のずれが生じている。寸法変化は数ミリ単位の小さな変化を示すことが多く、収縮率は重要な指標であるという認識はあるものの、これまでは問題意識として軽視されがちであった。しかし、収縮率は百分率で示されるため、利用する木材の寸法が大きくなればそのばらつきによる影響はより顕著に現れると想定できる。2010年に交付及び施行された公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律が後押し、公共建築物の内装材及び構造材としての大型の木材利用が進められてきている。施行されてからの10年間で、公共建築物の木造率は低層の建築物を中心に増加しており、全国で建てられる低層の公共建築物の木造率は、2010年の17.9%から2019年の28.5%まで上昇したと報告されている[2]。木材自給率50%の達成に向け、今後一層、公共建築物のような大型の構造物への木材利用が促進されることが予想されるが、大型木造建築物等の対象物の大型化が進行すれば、寸法変化による木材の狂い等の影響は増大すると考えられ、今後、木材が有する性質のばらつきという特性は、現場における実際問題として今まで以上に浮き彫りになることが想定される。

上述してきたように、ばらつきを有する木材に対して質を保証するためには一筋縄ではいかず、一つ一つの材に対してあらゆる木材諸性質を正確に評価していく手段が必要となる。

## 1.2 木材性質を評価する既往の手法

木材を信頼ある材料として利用していくためには、木材が有する諸性質を個々の材に対して明確にしていく必要があると述べてきたが、これまでも個々の材に対して木材性質を明らかにする試みは研究および現場でされてきた。

### 1.2.1 木材性質の評価方法 1—目視での区分

現場で多くみられる木材評価法として肉眼による木材材質の測定がある。木材の節や割れ、腐れ、年輪幅等に基づいて材質を予測する手法である。本手法は、目視測定



者によるばらつき，測定者の成熟度や疲労度の影響といった主観的要素が含まれる [16]。品質を保障するためには客観性や再現性を担保する必要があり，定量的な評価方法が求められる。

### **1.2.2 木材性質の評価方法 2—全数検査**

定量的な評価方法として最も基本的且つ正確に評価できる手法は，対象となる材すべてに対して一つずつ直接的に性質を計測する全数検査である。それぞれの材に対して直接計測しているため，計測方法に問題がなければ，その材の確実かつ正確な性質の値を得ることができる。しかし全数検査は，計測に膨大な手間と時間がかかる。また，計測方法および計測する対象の木材性質によっては，材そのものに強い負荷をかける場合もある。例えば，木材に力を加えた時，破壊するまでに木材内部に生じる単位面積あたりの力の最大値を強度の定義とした場合，計測する材を破壊しなければ求めたい強度の値を得ることはできない。個々の材に対して質を保証するために計測したものの，破壊されてしまっただけではその材を製品としては利用できなくなってしまう。

### **1.2.3 木材性質の評価方法 3—樹種による区分**

破壊等の上述した問題を回避するためには，木材サンプルに対して直接計測しなくともその材の性質を予測できる手法が求められる。この手法で最も簡単な方法は，樹種での性質区分である。各樹種で多数の木材サンプルに対して複数の性質を計測し，それぞれの性質における計測データの平均値をその樹種の代表値（文献値）とし，計測していない材に対しても樹種ごとにその値を代入するといった方法である。確かに木材性質は樹種ごとに一定の傾向はあるものの，Fig.1 で説明したように，同じ樹種であっても個体間及び部位間でばらつきが生じるため，個々の材の質を保証する手法としては不十分であるといえる。

### **1.2.4 木材性質の評価方法 4—機械等級区分**

高まる品質保証のニーズを満たすためには，個々の材に対して正確な木材性質の値

を明示する必要があるが、それに加えて現場での利用しやすさを考慮すると、非破壊、且つ簡便に木材性質を計測および予測できる手法が求められる。その要求を満たすための一つとして、木材の強度を非破壊的に予測する方法が研究されてきた。例えば、強度との相関が高いとされるヤング係数を利用し、破壊に至らない荷重を加えることでヤング係数を計測し、そのデータを用いて強度を予測する方法がある [17]。この方法は JAS の機械等級区分に応用されている。JAS とは、**Japanese Agricultural Standard** の略称で日本農林規格のことであり、製材や集成材等の木質建材に品質を保証する規格である。JAS 規格における構造用製材には、目視等級区分と機械等級区分があるが、機械等級区分では曲げ試験等によって得られたヤング係数に基づいて E50 から E150 までに振り分けられ、それらを 6 段階の等級に区分している。その区分された等級に基づいて基準強度が設定される。機械等級区分はそれぞれの材に対して測定するため、個々の材の正確な性質の値が算出されていると考えられるが、実際は同じ等級間において強度が 1.2~1.5 倍、あるいは 2 倍以上の差が生じることがあると知られている [17] [18]。このようなばらつきが生じてしまうと、偶然に外力が強くなる部分に強度の低い部材を使ってしまう可能性があるため、木材の強度設計を行う際に計算される安全係数は、金属等の均質材料と比べ、木材は大きく設定されている。安全率を大きく設定することで木材性質のばらつきに対処しているわけだが、このことは、強度が高い材にとっては強度の低い材に合わせることとなり、すなわち過小評価されることになる。適材適所に材を使うことは、木材という資源の恩恵を無理なく極限にまで引き出すためにも重要な視点となる。また、このことは林業及び木材産業の経営においての採算性の向上にもつながる可能性は大きい。適材適所に木材を利用していくためには、それぞれの材の性質を正確に捉える必要があるわけだが、木材は密度や機械的特性、化学成分、解剖学的特徴など多次元的な性質により成り立っている。そのため、木材性質を評価するためには、多次元的な情報を個々の材から抽出し、解析を進めることが欠かせないといえる。加えて、上でも述べたように現場での利用を考えると、正確なだけでなく、非破壊的に迅速、簡便に計測できる手法であることが求められる。

## 1.2.5 木材性質の評価方法 5—近赤外分光法による木材性質評価

このような要求を満たす技術の一つとして近赤外 (Near InfraRed, 以下 NIR) 分光技術は、ここ数十年間で活発に研究が行われ、木材産業の技術革新として大きな期待が寄せられている。

そもそも分光学とは、「光と物質との相互作用によって生じる光の強度やエネルギー変化を調べる学問」と定義されている [19]。分光法は常にスペクトルをとるが、スペクトルとは、横軸に光の振動数 (波長, 波数等), 縦軸に光の強度 (吸光度, 散乱強度等) で表したものであり, 振動数 (エネルギー) に対する光の強度の分布を示している。NIR とは、通常、可視広域の長波長端 800 nm から赤外域の短波長端 2500 nm までの領域にあたる [20]。一般に、物質の電子遷移は可視から遠紫外領域、回転遷移はマイクロ波の領域であるのに対し、NIR 領域は振動遷移に位置する。そのため、NIR 領域では強い吸収はほとんど観測されないが、微弱ながらも分子の振動の倍音、結合音における振動遷移が観測できる。倍音及び結合音への遷移は振動の非調和性が比較的大きく、高振動モードが得られるため、そのスペクトルには大抵の場合、O-H, C-H, N-H などの水素を含む官能基の振動モードの倍音および結合音が観測される。NIR 分光法は、光子のエネルギーが化学結合に比べて小さく、試料を変形させないため非破壊的に計測できる。また、NIR は物質に対する高い透過性を示すため、前処理なしで計測でき、計測の簡便性に優れているといえる。NIR 分光法における特色及び利点をまとめると次のようになる [20] [21]。

- (1) エネルギーの低い電磁波を用いるため、試料が損傷することはほとんどない。
- (2) 個体, 粉末, 繊維, フィルム, ペースト, 液体, 溶液, 気体などいろいろな状態にある試料に適用することができる。
- (3) 赤外に比べ、近赤外では水の吸収強度がかなり弱くであるので、水溶液での研究や分析がはるかに容易になる。
- (4) 近赤外吸収だけでなく、拡散反射, 発光, 発音響分光法なども利用できる。
- (5) 非破壊分析, in situ (あるがままの状態) の分析ができる。
- (6) 非接触分析, あるいは光ファイバーによる分析も可能である。オンライン分析に向いている。
- (7) 絶対定量分析法よりも相対定量分析法に用いられることが多い。いわゆるケモメトリックスを用いた分析が主である。

(8) 多成分の同時分析が可能である.

(9) 化学量のみならず物理量も測定できる.

このように多くの利点を有した NIR 分光法は、食品分野や農業分野、医療、化学工業、製薬、土木など分野の垣根をこえてあらゆる領域で利用されている [22]. 木材の性質評価においても NIR 分光技術を適用した研究は進んでおり、例えば、NIR スペクトルから得られた多次元データは強度等の木材の機械的特性の非破壊的な評価方法へ適用可能性があることを多くの研究者が報告している [23] [24]. Hoffmeyer (1995) らは、NIR の技術が 30%未満の含水率、密度、圧縮強度、および化学的劣化に対して優れた非破壊評価方法になると報告している [25].

さらに NIR 分光技術を用いて含水率、ヤング係数及び密度といった複数の木材性質を同時に評価できるシステムを開発するための研究もされている [26] [27]. 複数の木材性質を同時に評価できる利点は大きい. これまで個々の材に対して非破壊的に且つ簡便迅速に木材性質を計測するための機器が開発されてきたが、多くは 1 種類の木材性質を計測するためには 1 つの計測機器が必要となるため、複数の木材性質を計測する場合、莫大な設備投資の費用がかかる. また、計器を利用した木材性質の評価方法は、その精度に不安がある場合がある. 例えば、含水率を測定する携帯式高周波水分計を用いた場合、含水率の値を算出するには全乾比重（以下、密度）を設定しなければならない. 樹種に応じて計測器に密度を設定することで対応しているが、1.1 及び 1.2.3 で述べたように同じ樹種内でも個体や部位によって木材性質は大きくばらつく. そのため、材それぞれの密度のばらつきに対応できず、結果として測定値と実際の値に差が生じてしまう可能性が高い. 複数の木材性質を同時に評価できる NIR 分光技術は、上記のような問題を避けることができるため、木材の質を保証するために有用な手法といえる.

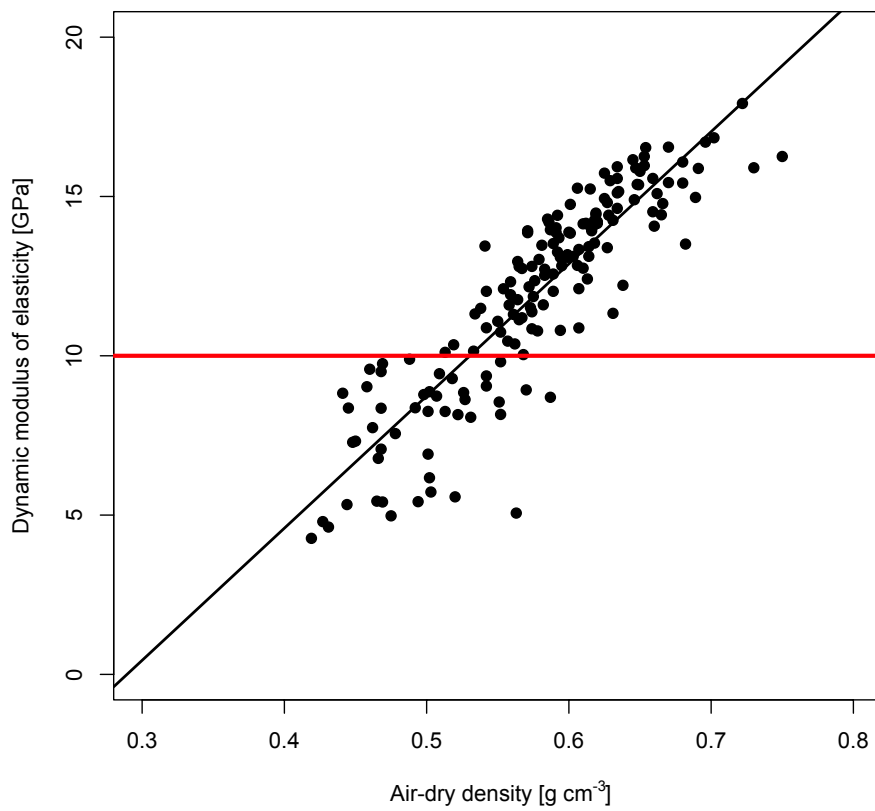
このように NIR 分光法は有用性が高い技術であるが、決して NIR スペクトルデータといった特定の座標系に依らずとも、所与の木材の質（実態）というのを表現できるはずである. 後でも述べるが、座標系の表現に依らない力学をつくることを目標の一つとした学問体系として解析力学があるが、そのとき極めて重要な概念として、基底に依らない不変量である固有値がある. 野崎（2004）は固有値の概念を、「どこかにベクトル空間と線形写像という真の存在があり、行列やベクトルの見た目（成分表示）は、世を忍ぶ仮の姿であって、基底のとり方によってさまざまに変わる.（途中

略す) 実は固有値というのは、真の存在の持っている不変な情報なので、基底をさまざまに取り替えて、行列表示の見た目が変わっても、固有値自体は変わらない」と述べている [28]. つまり、野崎がいうように、所与の木材の実態といった真の存在を評価するうえでは、NIR スペクトルデータといった特定の座標系に依存しないといえる。また、NIR 分光技術の消極的な一面として、計器が比較的高価になる場合が多い。このような背景を踏まえ、木材科学の基盤的知見を充実させるためにも、NIR 分光法といった光学的手法以外で複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することも重要といえる。

### 1.3 木材性質を評価するための新たな視点

#### 1.3.1 物理学的考察から木材を評価する

木材性質を評価するためにこれまで、個々の材に対し、強度や密度等のいくつかの特定の性質を正確に、かつ非破壊、迅速、簡便に計測及び予測するための手法を構築する研究が進められてきた。その結果、測定対象とされた強度等の性質の値は、正確に定量化できるようになってきており、現場での応用も進んでいる。ただ、測定した性質の値が同じ木材サンプルは、互いに全く等しい状態にあると言い切って良いのであろうか。例えば、測定精度の範囲で全く同じヤング係数の値を示す木材サンプルが 100 本あったとする。これら 100 本のサンプルは、明らかに年輪の幅や走行の仕方に違いがあることがわかる上に、実際に手にとってみれば重さ（密度）に違いがあることも認識できる。着目した性質の値は同じであるにも関わらず、様相として異なる振る舞いをしているのである。なぜこのような事象が生じるのであろうか。Fig.2 は、ヤング係数と密度の関係性を示した図である。ヤング係数が 10GPa を示す位置に赤色の直線を引いてみると、その線に沿って複数の点がプロットしていることが読み取れる。つまり、上述した 100 本の同じヤング係数の値を示すサンプル群の例のように、Fig.2 はヤング係数が同じ値であっても、密度値は大きくばらつくことを示している。このことは、密度値のみならず、化学成分や解剖学的特徴など木材を構成する多次元的な性質が、その背後で大きくばらついていることを示唆している。つまり、



**Fig.2.** 同じヤング係数をもつ木材の密度のばらつき

木材の多次元的な性質は、単一の性質が独立に変動しているのではなく、互いに連動し合いながら協調的に変動していると考えられる。1.2 で述べたように既往の研究により、木材から得られる多次元データを解析することで複数の性質の値を一度に予測できるようになってきている。しかし、木材は多次元的な性質が協調的に変動するシステムであると考え、直接的に知り得る限られた性質だけでなく、その背後に隠れた性質の変動を含めた包括的な評価ができるアプローチ方法も必要なのではないだろうか。個別に各性質の“値”を追いかけるのみならず、互いの性質が連動し“変化”することに目を向けた包括的な視点が、木材という多自由度の物理系を深く理解するために必要となるのではないだろうか。本論文では、このような包括的な視点でみたときの木材の描像を、“木材性質”といった個別の特徴やその値を意味する言葉とは区分して、“木材(の)状態”ということとする。本論文のタイトルには、“木材変動”という文言を用いているが、これは木材性質の変動および木材状態の変動の両方の視点からの考察が含まれた論文であることを意味している。

所与の木材の状態を包括的に評価するという事は、言い換えると、個々の性質の運動を個別に取り扱うことなく、その集まりからなる“系”全体としての振舞いを評価することといえる。この考え方は、現代の物理学の理論体系の一つである統計力学に通ずる部分がある。統計力学はミクロな世界の力学的法則に基づいてマクロな世界を記述する学問体系である [29]。木材のようにマクロな系は、これまで上述してきたように極めて複雑な多次元的要素（ミクロ構造）を有しているため、そのマクロ系の運動を表すための力学の問題を解くことは難しい。なぜなら、粒子の数が3つ以上になると力学に基づいて運動方程式を記述することはできても、閉じた数式としてその運動を表現することはできないためである。このことを踏まえた上でマクロな物理系の振る舞いを正確に導くために統計力学は、マクロな系が平衡状態にあるとき、系のミクロな詳細に依存しない普遍的な振る舞いを探しだし、それらを的確に記述することを目指している。

具体的に統計力学考察を進めるために必要な手立ては以下の2つである [29]。

- 1, エネルギー固有状態のすべての名前をつけて列挙する。
- 2, 各々のエネルギー固有状態のエネルギーを求める。

この2つを求めると原理的には、その系が平衡状態にあるときの自由エネルギーやエントロピーといった物理量を得ることができる。これらは、その系の“変化”の行方を知る上でも重要な物理量である。たとえ、木材において各性質の値を列挙できたとしても、その木材がどのような状態であるのかを一言で言い表すのは難しいが、これらの物理量は、その状態を簡明に表現してくれる。個別に各性質の“値”を追いかけるのみならず、互いの性質が連動し“変化”することに目を向けた包括的な視点を求める際に、重要な情報となるといえる。

また、統計力学の基礎となる学問体系として解析力学である。解析力学は、ある特定の座標に依存することなく、系全体の振る舞いを評価する。つまり一般化座標系で運動方程式を書き下すことが容易となる。式(1)はニュートンの運動方程式でありデカルト座標 $(x, y, z)$ で記述した場合である。

$$\left\{ \begin{array}{l} x \text{ 方向} \quad m \frac{dx^2}{dt} = F_x \\ y \text{ 方向} \quad m \frac{dy^2}{dt} = F_y \\ z \text{ 方向} \quad m \frac{dz^2}{dt} = F_z \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで、 $m$ は質点の質量、 $F$ はその質点に働く力を指す。デカルト座標系を基準座標にせずとも、例えば3次元極座標系 $(r, \phi, \theta)$ でも下記のように運動を記述することができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} r \text{ 方向} \quad m(\ddot{r} - r\dot{\phi}^2 \sin^2 \theta - r\dot{\theta}^2) = F_r \\ \phi \text{ 方向} \quad m(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta) = F_\phi \\ \theta \text{ 方向} \quad m(\ddot{\phi} \sin \theta + 2\dot{r}\dot{\phi} \sin \theta + 2r\dot{\theta}\dot{\phi} \cos \theta) = F_\theta \end{array} \right. \quad (2)$$

式(1)と式(2)をみるとわかるように、両式は同じ運動を記述しているのにも関わらず、座標系を変えることで全く別の形式で表現されてしまう。統一的に記述できる一般的な座標系を探索した学問が解析力学である。統計力学において大きな自由度系を、圧力や体積といった巨視的な変数で表現する上で、どのような座標系を選べば系が記述しやすくなるかを探る手法は解析力学の延長上にあるといえる [30]。



強度や密度、化学成分といった多次元な性質を有した木材の包括的な評価に向けて、その評価を物理学的なアプローチ（本論文では統計力学等の物理学の理論体系に基づいた考察やアプローチのことを物理学的考察および物理学的アプローチと表記する）に落とし込むために、木材の状態を幾何学的な描像として捉えてみる。一つの木材サンプルから2つの観測データ $(x_1, x_2)$ を得たとすると、それは2次元空間の1点として表せる。同様に、3つの観測データ $(x_1, x_2, x_3)$ が得られれば、それは3次元空間の1点であり、 $n$ 個の観測データ $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ が得られれば、 $n$ 次元空間の1点として表すことができる。つまり、所与の木材の状態を $n$ 次元空間の“点”として捉えるという幾何学的な描像が得られる。こうして木材の状態あるいはその変化を $n$ 次元空間における質点の運動と捉えれば、観測データを物理学の視点から考察することができると考えられる。さらに物理学的アプローチを進めていくために鍵となるのは「固有値と固有ベクトル」という概念である。木材は多くの性質 $X_1, X_2, \dots, X_n$ によって特徴付けられるため、例えば任意の木材サンプル $i$ に対してそのような多数の性質を評価できたとすると、それは $\mathbf{a}^i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ のようなベクトルデータとして表現することができる。その観測をいくつもの木材サンプルに対して繰り返せば、行列データとなる。数値が羅列した行列データは、一見何を表しているかわからないが、これを簡明な姿に変換する役割を担うのが、固有値と固有ベクトルの理論であり、変換された簡明な姿とは対角行列のことである。1.2.5で述べたが、野崎 [28]がいうように座標系に依存しない真の存在の持っている不変な情報である固有値は、極めて重要な概念として一翼を担う。固有値分解によって得られた新たな行列  $\mathbf{H}$  を、その物理系の取り得るエネルギー状態を表す対角行列、すなわちハミルトニアンと定義することで、所与の木材の状態やその変動の評価において物理学的な考察を加えることができると考えられる。

### 1.3.2 物理学的考察から地域資源を使う意義を考える—木材という地域資源を通して—

物理学的な考察は、極めて複雑で且つ壮大であり、一見すると無秩序に変化するような自然の仕組みを理解するのに役立つ。つまり物理学的な考察は、自然の仕組みを数式や物理量といった簡明な表現方法によって理解を促してくれる。また、自然の仕

組みや環境の変化を考えるうえで、木は他に類をみないユニークで奥深い生き物である。木は約 3.8 億年という我々の人類の歴史よりはるかに長い期間にわたりこの地球上に存在している。加えて、木は「動けない」のにこれまでの目まぐるしい気候変動を乗り越え、存在し続けてきた。当たり前のように存在している木だが、気が遠くなるような長い時間、地球上に存在できているという事実は、環境の変動に柔軟に適応してきたからとも考えられる。特に木は動けないゆえに、その与えられた環境に適応するしか生き残る術はなく、言い換えれば、その地域の特色や情報を多く有しているとも考えられる。近年、地産地消のように地域振興のために、地域の資源を地域で使うといった活動が盛んに行われているが、地域資源を使う意義の多くは、経済学などからの視点がほとんどで、物理学の視点からその意義を考えた研究は少ない。1.1 で述べたように持続可能な環境の在り方が強く問われるようになった今、これまでにはない視点から地域資源を使う意義を問う必要が求められている。木材という地域資源に対して物理学的な考察により地域資源を使う意義を考えることは、新たな視点を探索する糸口の一つとして有用な手段になり得ると期待できる。

#### 1.4 本論文の目的と構成

第 1 章では本論文の背景となる部分を述べてきた。その背景を踏まえると、本論文の目的は大きく 3 つ導くことができる。

1 つ目の目的は、NIR 分光法と行った光学的手法以外で、複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することである。このことは 1.2.5 で述べたが、NIR 分光法は、木材の質を保証するために有用な手法といえるが、決して NIR スペクトルデータといった特定の座標系に依らずとも、所与の木材の質（実態）というのを表現できるはずである。また、NIR 分光器は比較的高価なものが多い。木材科学の基盤的知見に貢献するためにも、NIR 分光法といった光学的手法以外で複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することも重要といえる。この目的をもって実施した研究は、第 2 章に構成されている。具体的には、立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いて含水率、密度およびヤング係数といった複数の木材性質を同時に非破壊的に推定できるかを試みる。

本論文の 2 つ目の目的は、物理学的な考察を用いて木材の状態やその変動を評価す

ることである。既往の研究により木材から得られる多次元データを解析することで、複数の木材性質の値を同時に予測できるようになってきている。一方で、木材は多次元的な性質が協調的に変動するシステムであると考えれば、直接的に知り得る限られた性質だけでなく、その背後に隠れた性質の変動を含めた包括的な評価が必要であると考えられる。所与の木材状態を包括的に評価するということは、言い換えると、個々の性質の運動を個別に取り扱うことなく、その集まりからなる“系”全体としての振舞いを評価することといえる。この考え方は、現代の物理学の理論体系の一つである統計力学に通ずるところがあることを踏まえ、本論文では統計力学等の物理学的な考察から木材の状態やその変化を評価する。本目的をもって実施した研究は、本論文の第3章と第4章にて構成されている。物理学的考察を用いて木材の状態やその変動を評価する研究は、木材分野ではこれまでされてこなかったことを踏まえ、これらの研究はその足がかりとすべく、ケーススタディとして既往の研究で高い正の相関があるとされている木材の密度と収縮率を対象とすることで、本研究の物理学的なアプローチ手法の妥当性を評価しつつ研究を進めた。既往の研究に基づくと、木材の収縮は細胞壁内の水の挙動により生じるため、同じ密度値を示すサンプル群は同じ収縮率の値を示すと考えることができる。しかし実際は、同じ密度値である材でも収縮率は大きくばらつく。つまり、密度と収縮率のみでは説明できない要因があると考えられる。木材の収縮の変動に影響を及ぼす要因として、1. 細胞壁の分子構造の分布の状態、2. 木材の細胞壁分布の状態が考えられる。第3章は前者の1. 細胞壁の分子構造の分布の状態に着眼し、NIR スペクトル行列の固有値を用いた物理学的考察を展開している。一方で、第4章は、後者の2. 木材の細胞壁分布の状態について、木材の断面における光学顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルを用いて物理学的アプローチに基づき考察している。

本論文の3つ目の目的は、木材という地域資源を通して物理学的考察から地域資源をその地域で使う意義に対して新たな視点を探索することである。これは上記の2つ目の目的の延長にあるともいえるが、1.3.2 で述べたように自立的な移動が不可能である木という生物は、その地域の情報を多く蓄積していると考えられる。木材という地域資源を物理学的考察からアプローチすることによって、地域資源を使う意義についてこれまでになく視点から検討できると期待される。そのために端緒として、地域資源を地域で使う意義について、これまでどのような視点から意義があると述べられ

ていたのかについて既往の研究や見解を整理し，その上で木材という地域資源を通して物理的アプローチから地域資源を使う意義についての考察を試みる．この研究は第 5 章に執筆した．非常にチャレンジングな研究であり，確証を持った明確な答えを導くためにはさらなる研究が必要となるが，ここでは，地域資源をその地域で使う意義を問うために，物理学的視点を取り込むといった新たな提案や，その提案に至るまでの着想点について強い論点を持つ研究と位置付けている．

最後に第 6 章では第 2 章から第 5 章までを総括し，本論文で得られた結果と今後の展望を述べる．以上，本論文は大きく 3 つの目的のもと，6 つの章から構成されている．

## 第2章 振動スペクトルに基づいた立木材質の非破壊推定

### 2.1 緒言

第1章で述べてきたように木材の品質保証及び性能向上におけるニーズが高まる中、木材性質を正確に評価することが求められている。また、木材加工現場で木材性質の評価を実施すると考えると、非破壊的に迅速かつ簡便に評価できることが不可欠である。

そのほか、木材性質を評価する上で重要視すべきは、立木の状態でその木材性質を評価することである。木材の性質を評価する際、試験体を作成するためには森林から対象となる個体を選別し、伐倒し、煩雑な加工作業を経る必要がある。伐倒や加工には危険性を伴い、試験体を作成し評価する一連の作業には、大きな労力と時間を費やさなければならない。立木の状態でその木材を評価することができれば、それらの負担を軽減できるほか、長い年月をかけて成長した木という貴重な資源を不適切な伐倒により失うことも少なくなる。また、立木の状態で密度やヤング係数等の木材性質を簡便に計測できれば、木材産業だけでなく、林業分野においても有益となり得る。例えば、樹高や胸高直径等の樹木の成長に関する形質は、伐採することなく立木の状態で計測することができる。このような成長形質データに基づいて作成される蓄積量などの統計データや収穫予測表などは、森林資源の育成及び管理のための重要な基盤情報となっている。密度等の木材性質も立木の状態で評価することができれば、収量だけでなく木材資源の質的な評価にも繋がると考えられる。立木の材質評価は、林木育種における精英樹選抜や防災の観点からの街路樹診断等の場面においても重要である。林木育種については、ユーカリやデーダマツ、スギ等で遺伝子情報が整備されてきており [31]、形質変異における染色体領域を推定するなどの試みに向けて、遺伝子情報と木材性質の関係性を明らかにするための研究が進んでいる [32] [33] [34]。この解析には、大量のサンプルの木材性質データが必要であり、測定には精度が高くかつ迅速にデータを取得することが求められている [35]。このような背景を踏まえると、立木の状態で木材性質を簡便迅速に評価することは、木材産業だけでなく、林木育種や森林管理等の様々な立場から期待されている。

立木の状態で木材性質を非破壊的に評価する方法は、これまでも盛んに研究され多

くの手法が提案されてきたが、それぞれの目的や使用状況の違いから一長一短である。小泉ら（1986）は、樹幹に直接負荷をかけ、たわみ量から静的にヤング係数を測定する方法を提案したが [36]、これは大径の立木への適用が難しい。X線 CT 法により密度や含水率を評価する試み [37]もあるが、作業能率、コストの面から山中での調査には適さない。簡易な手法として、打撃による応力波や超音波などの振動現象を利用した方法が多くの研究で報告されている [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [45] [46]。近年はポータブルタイプの計測機器も市販されており、これを用いて計測した応力波伝播速度とヤング係数との関係性を分析・応用する研究も進んでいる [47] [48] [49]。また、釜口ら（2000）は、樹幹の側面をハンマーで打撃して得られる共振周波数から心材含水率を評価する横打撃共振法を考案した [50] [51]。これらの方法は、簡便性やコストの面からきわめて優れた技術といえるが、含水率、密度、ヤング係数がすべて未知な場合（立木の場合、通常すべて未知である）、計測精度に不安がある。例えば、応力波によって立木のヤング係数を推定する際、応力波伝播速度と密度の積からヤング係数が求められるが、立木の状態では通常、密度は不明である。立木の密度は含水率や個体の違いによって大きく変動することから、密度を文献値のような定数として代入してしまうと、計測誤差につながる場合もある。立木の状態でそれぞれの木材性質を推測できる方法もある。例えば、ピロディンという携帯型の測定器がある。ピロディンの打ち込み深さは木材の強度との相関関係 [52] [53] [54]及び容積密度との相関関係 [55] [56] [57]があることが認められているが、それぞれの性質の測定にそれぞれの測定器を用いるのは作業の負担もコストも大きい。これらのような課題に対する解決への糸口として期待されているのが NIR 分光技術である。所与の木材性質を迅速かつ正確に推定するために多変量情報を有する NIR スペクトルからのキャリブレーションモデルの開発が進められている。例えば、ヤング係数と密接に関係があるとされている木材性質の一つのマイクロフィブリル傾角の推定に NIR スペクトルを用いた研究報告 [58] [59] [60] [61]や、そのほか化学組成 [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69]、木材表面の粗さ等の表面状態 [70] [71]や水分状態 [72] [73] [74] [75]等の推定に NIR 技術を用いた研究が盛んに行われている。あらゆる木材性質の推定に用いられる NIR 分光技術は、含水率、ヤング係数及び密度といった複数の木材性質を同時に評価できるシステム開発の研究もされている [26] [27]。応用性も高く、非破壊性、迅速さ、簡便性といった現場での利用しやすさも備えた

NIR 分光技術は、今後ますます木材の具体的な品質証明における有効な手法として研究が進むことが期待できる。上述してきたように NIR 分光技術の進歩は目覚ましく、あらゆる木材性質を推定できる万能な装置とも捉えられるが、NIR スペクトルとは異なる多次元情報を用いて複数の木材性質を推定することは不可能なのだろうか。所与の木材の実態を評価するうえでは、NIR スペクトルデータといった特定の座標系に依存しないはずである。また、NIR 分光技術は有用な分析方法であるが、その計器は比較的高価になる場合が多いといった消極的な一面もみられる。

そこで本研究は、NIR 分光法以外で複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することを目的に、立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いて含水率、密度およびヤング係数といった複数の木材性質を同時に非破壊的に推定できるかを試みる。NIR 分光法以外で複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することは、木材科学の基盤的知見を蓄積するためにも意義は大きい。本研究は、打撃による振動スペクトルを用いた立木の木材性質の推定の研究の端緒として、直接立木を実験対象とせず、長さおよび径を揃えた丸太を用い、いくつかの打撃方法で得られた結果に基づき、立木への応用可能性を考察した。

尚、本研究は木材学会誌（2017）に受理された [76]。

## 2.2 供試材料および実験方法

### 2.2.1 供試材料

鳥取大学農学部教育研究林蒜山の森（岡山県真庭市）に生育するスギ（*Cryptomeria japonica*）の立木 10 本を伐倒し、その胸高部位付近より長さ約 700 mm の丸太を採取した。丸太は鳥取県林業試験場に搬入後、ロータリーレースを用いて直径が 130 mm になるように円柱加工した。このため、得られた丸太はすべて心材部からなっていた。また平均年輪数は 23 であった。可能な限り広範囲な生材含水率データを取得することを目的として、円柱丸太は振動試験開始までの約 2 か月間水中に浸漬した。

### 2.2.2 振動試験

振動試験は次の3つの打撃方法に従って行った (Fig.3). 打撃方法①は, 丸太の両木口面に加振部と受振部を設置し縦振動を与えるものとした. 測定は, 丸太を柔らかいスポンジの上に寝かせた状態で行い, 両端自由とした. これは丸太の動的ヤング係数の実測値を得ることを主目的としている. 打撃方法②は, 丸太中央部の相対する側面に加振部と受振部を設置し横振動を与えるもので, 釜口ら (2000) の手法 [50] [51] と等価である. 打撃方法③は, 丸太側面の軸方向に沿うように加振部と受振部を 30 mm 離して設置し, 縦振動ないしはたわみ振動を想定した振動を与えるものとした. 打撃方法②および③は, 実際の立木での応用を想定し, 丸太を立てた状態で実施した. ただし, 丸太は治具等で固定しなかったため, 加振は丸太の接地が保てなくなるほど大きな揺れが生じない程度の強さで打撃した. 加振は先端が球形のステンレス製打撃棒によって与えた. 振動データは, 受振部に圧電式加速度ピックアップ (RION 社製 PV-91C) を両面テープで接着固定し, データロガー (KEYENCE 社製 NR-CA04) でサンプリング周期 10  $\mu$ s (サンプリング数 100,000) の条件で収集した. 振動スペクトルは, 同振動データを波形解析ソフト WAVE LOGGER (KEYENCE 社製) を用いて高速フーリエ変換することによって得た.

### 2.2.3 実測データの収集

振動試験は, 丸太を実験室内に放置し自然乾燥させながら約 5 か月間一定間隔 (1 週間) で実施した. 各試験時には, 振動データのほか, 材長, 直径および重量を測定し, その時点の丸太の密度 (以下, 密度と略記する) を得た. また, 上述の打撃方法①で得た縦振動スペクトルの 1 次共振周波数と密度から, 各時点の動的ヤング係数 (以下, ヤング係数と略記する) を算出した. 最終の試験が終了した後, 丸太を乾燥機 (105°C) に 1 週間入れ, 重量を測定した. これを全乾重量とみなし, 各試験時の含水率を算出した. 計測した各時点の総数は 196 であったことから, 仮想的に, 様々な含水率, 密度, ヤング係数をもつ 196 本の丸太を準備したとみなし, 以下の解析を進めた.



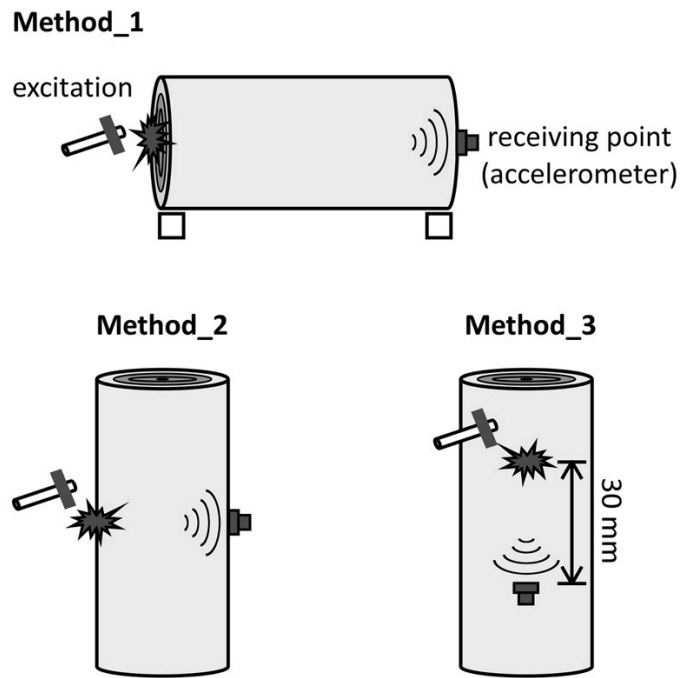


Fig.3. 立木を打撃して得られる振動スペクトルの測定における打撃方法

## 2.3 データ分析

各計測時点における丸太の含水率、密度、ヤング係数を、それに対応する上述の各打撃方法で得た振動スペクトルを説明変数として推定する統計モデルの構築を試みた。すなわち、一連のスペクトルデータを説明変数  $\mathbf{X}$  と仮定し、目的変数  $y$  である各計測時点の含水率、密度およびヤング係数を推定する以下の線形回帰モデルを考えた。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^p X_j \beta_j. \quad (3)$$

パラメータ推定の最も一般的な手法として、残差平方和が最小になるように係数  $\beta$  を求める最小二乗法が考えられる。本実験における説明変数行列  $\mathbf{X}$  は、196 行（サンプル） $\times$  10,000 列（周波数）と高次元であった。説明変数の数が過剰な場合、いわゆる過学習を引き起こし汎化誤差が著しく低下することが懸念される [77]。そこで本研究では、正則化項としてパラメータ  $\beta$  の L1 ノルムを指定した以下の Lasso (least absolute shrinkage and selection operator) モデル [78] をあてはめることによって縮小推定を行った。

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \left\| y - \sum_{j=1}^p X_j \beta_j \right\|_2^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j|. \quad (4)$$

ここで、 $\lambda (\geq 0)$  は縮小度合を制御する複雑度パラメータを示す。なお、打撃の強弱などの影響を取り除くため、各スペクトルは正規化処理を施した。モデル構築に先立ち、全データセット（総数 196）を検量モデル作成用 (88) と同モデルの評価用 (88) の二つのデータセットに分け、得られたモデルの汎化性能を評価した。計算は、R version 4.0.3 において lars パッケージ [79] を用いて行った。

スペクトル行列を次元圧縮し縮小推定する方法として、PLS (partial least squares) 回帰法 [80] [81] の適用も試みた。同法は、目的変数行列  $\mathbf{Y}$  (本研究では 1 変数のベクトル)、説明変数行列  $\mathbf{X}$  とともに下式のように主成分 (固有値) 分解し、得られたスコア値  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{U}$  によって説明する手法である。

$$\begin{aligned}
\mathbf{X} &= \sum_{j=1}^h \mathbf{t}_j \mathbf{p}_j + \mathbf{R}_X = \mathbf{TP} + \mathbf{R}_X \\
\mathbf{Y} &= \sum_{j=1}^h \mathbf{u}_j \mathbf{q}_j + \mathbf{R}_Y = \mathbf{UQ} + \mathbf{R}_Y
\end{aligned}
\tag{5}$$

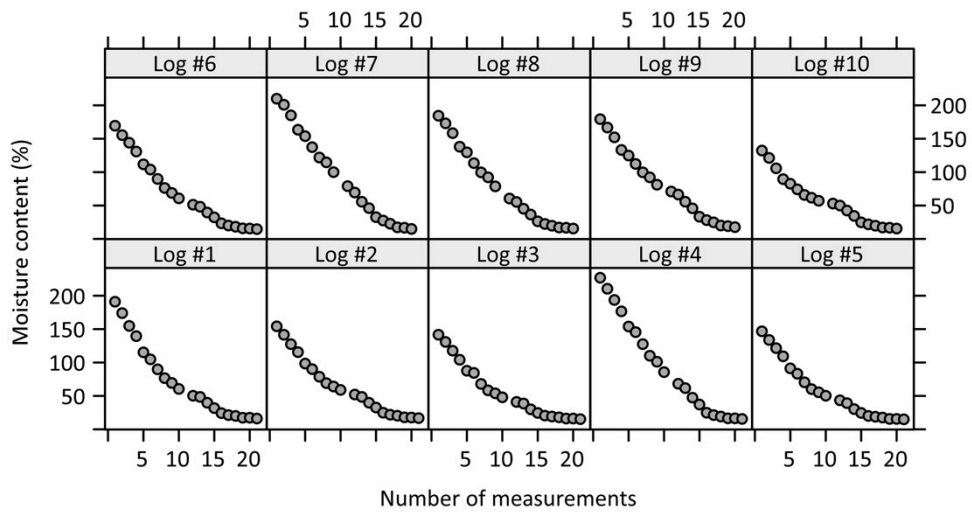
ここで、 $\mathbf{t}$  および  $\mathbf{p}$  は、それぞれ説明変数（スペクトル）のスコアベクトルおよびローディングベクトル、 $\mathbf{u}$  および  $\mathbf{q}$  は、それぞれ目的変数のスコアベクトルおよびローディングベクトルを示す。 $\mathbf{T}$ 、 $\mathbf{U}$  は  $\mathbf{t}$ 、 $\mathbf{u}$  をまとめたスコア行列、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$  は  $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{q}$  をまとめたローディング行列、 $\mathbf{R}_X$ 、 $\mathbf{R}_Y$  は誤差項を示す。 $\mathbf{t}$  と  $\mathbf{u}$  の相関をとりながらスコアを決定するのが PLS の特徴であり、得られたスコア行列  $\mathbf{T}$  および  $\mathbf{U}$  は、元の情報  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  と関連づけられた低次元のフルランク行列になる。なお、最適主成分は、フルクロスバリデーションにより最も残差の少ないものを採用した。計算は、R version 4.0.3 において pls パッケージ [82] を用いて行った。

## 2.4 結果と考察

### 2.4.1 各木材性質の実測データと振動スペクトルの変動

各供試丸太の含水率の推移を Fig.4 に示した。含水率の変動幅は 14.8% から 226.8% まで広範囲にわたった (Table 1)。立木としては 10 本のバリエーションしかないためヤング係数のバラツキはやや小さい結果であった (4.86 - 8.39 GPa) が、密度については、含水率と同様に広範囲に変動した (332.3 - 970.4 kg / m<sup>3</sup>)。

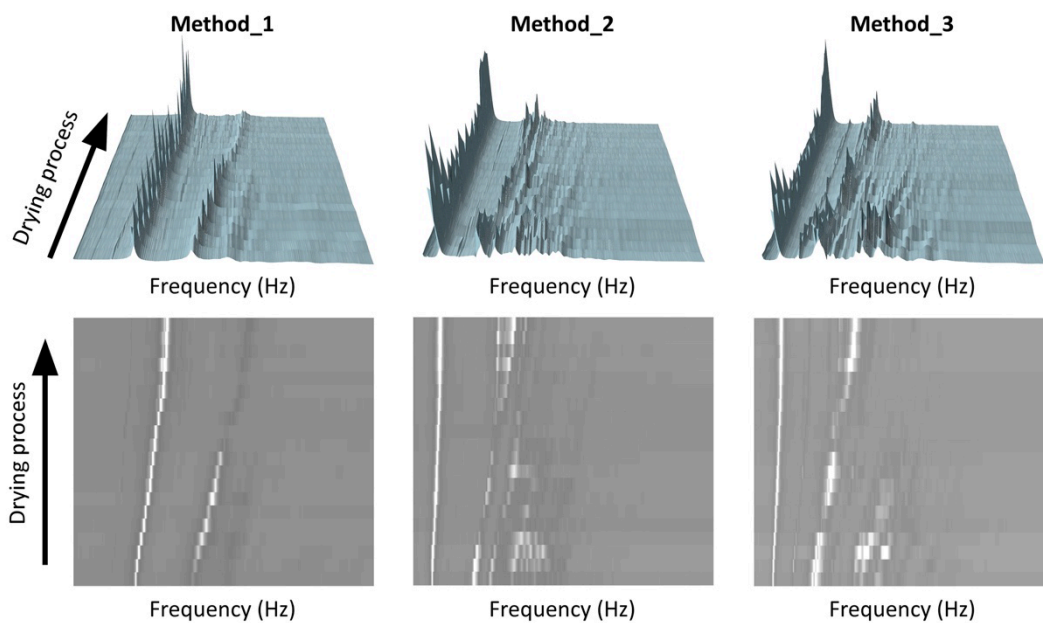
各計測時点、すなわち自然乾燥にともなう振動スペクトルの変動の一例を Fig.5 に示した。図の上段は 3 次元プロットであり、Z 軸は各周波数の振動強度を示す。例えば、打撃方法①の縦振動に着目すると、乾燥にともない、すなわち含水率の低下とともに一次ピークが高周波数側にシフトすることが分かる。二次ピークも同様に含水率低下にともない高周波数へのシフトが認められるとともに、徐々にピーク強度が減少し、最後は消失する様子が観察された。その他の打撃方法についても、含水率低下にともなう振動スペクトルが特徴的に変動する傾向が認められた。これらの実験事実



**Fig.4.** 乾燥に伴う各供試丸太の含水率の推移

**Table 1.** 乾燥工程における丸太の含水率，密度，ヤング係数の実測値

木材性質	最小値	最大値	平均	標準偏差
含水率 (%)	14.8	226.8	72.3	53.3
密度 (km/m <sup>3</sup> )	332.3	970.4	567.6	162.8
ヤング係数 (GPa)	4.86	8.39	6.52	1.05



**Fig.5.** 乾燥にともなう振動スペクトルの変動

図上：3次元プロットであり、Z軸は各周波数の振動強度を示す。

図下：2次元プロットであり、振動強度は灰色から白色に増加する。

から、各時点の振動スペクトルはその時の丸太の材質状態を反映した多変量情報とみなすことができると考えられる。

### 2.4.2 Lasso 回帰

Lasso 回帰の結果、いずれの打撃方法においても、含水率および密度については良好な精度の推定モデルが得られ、同モデルを未知試料にあてはめても同様な精度で推定可能であった (Table 2)。例えば、含水率については、決定係数が 0.90 - 0.92、誤差の二乗平均平方根 (root mean square error, RMSE) は 19.0 - 24.3%であり、実測値の変動幅の約 1 割程度の誤差で推定できることが分かった。一方、ヤング係数については、RMSE は 0.65 - 0.84 GPa と小さい値であったものの、決定係数は 0.23 - 0.53 とモデルの説明率は低い結果となった。この要因の一つとして、上述したとおりサンプル立木本数が少なく、ヤング係数の変動幅が小さかったことが考えられる。今後、幅広いヤング係数を有する多数の立木で実測データを収集し、それに基づいて推定モデルを構築することによって精度は改善できると考えられる。また、Lasso 解においてパラメータ  $\beta$  が非ゼロになる説明変数の数は、例えば打撃方法①の場合、含水率、密度およびヤング係数でそれぞれ、20、15 および 9 であり、いずれの形質とも元の次元数 (10,000) からの大幅な縮小推定が可能であった。非ゼロとなった説明変数、すなわち各形質の変動を説明するのに重要な変数は、Fig. 5 においてスペクトルのピーク強度が大きく変動する周波数帯に対応した。

### 2.4.3 PLS 回帰

上述の Lasso 回帰の結果と同様に、いずれの打撃方法においても、含水率および密度については良好な精度の推定モデルが得られ、同モデルを未知試料にあてはめても同様な精度で推定可能であった (Table 3)。すなわち、含水率および密度の PLS モデルは、決定係数がそれぞれ 0.81 - 0.87、0.80 - 0.84、RMSE がそれぞれ 19.6 - 23.5%、65.0 - 73.3 kg / m<sup>3</sup>であった。ヤング係数については、Lasso モデルと同様に、RMSE は 0.77 - 0.81 GPa と小さい値であったものの、決定係数は 0.12 - 0.38 とモデルの説明率は低い結果となった。

**Table 2.** Lasso 回帰における含水率，密度，ヤング係数の推定結果

※RMSE：二乗平均平方根誤差

		Method1	Method2	Method3
含水率 (%)	決定係数	0.90	0.90	0.92
	RMSE	19.0	22.2	24.3
密度 ( $\text{km}/\text{m}^3$ )	決定係数	0.76	0.88	0.83
	RMSE	93.6	59.0	73.8
ヤング係数 (GPa)	決定係数	0.53	0.23	0.36
	RMSE	0.65	0.84	0.80



**Table 3.** PLS 回帰における含水率，密度，ヤング係数の推定結果

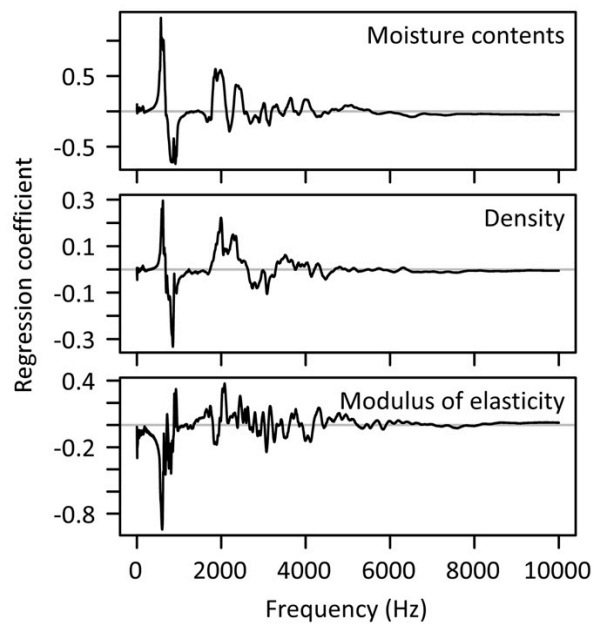
※RMSE：二乗平均平方根誤差

		Method1	Method2	Method3
含水率 (%)	決定係数	0.87	0.84	0.81
	RMSE	19.6	21.8	23.5
密度 ( $\text{km}/\text{m}^3$ )	決定係数	0.80	0.84	0.84
	RMSE	73.3	65.2	65.0
ヤング係数 (GPa)	決定係数	0.35	0.38	0.12
	RMSE	0.77	0.81	0.81

各 PLS モデルの最適主成分数は、打撃方法の違いに依存せず、いずれの形質とも 2~6 であった。したがって、振動スペクトルという膨大な説明変数を用いるとしても、固有ベクトルで展開することによって、少数の潜在変数で、かつ変数間の共線性を回避しつつ未知試料に対して頑強な木材性質の推定モデルを構築できると考えられる。なお、上述の PLS モデルは、一つの振動スペクトル情報から、含水率、密度およびヤング係数という 3 つの形質の推定を実現している。元のスペクトル情報をどのように使い分けて三つの形質を推定しているかを考察するため、それぞれの形質の推定モデルに対応する回帰係数のラインプロットを、打撃方法③の場合を一例として Fig.6 に示した。含水率と密度については、比較的類似した周波数領域で同符号の高い回帰係数を示す傾向が認められた。本研究における密度は、任意の含水率状態における重量と体積から算出したものであることから、含水率と密度の推定に類似した説明変数が強く寄与することは理解できる。ヤング係数については、含水率と密度とは符号や周波数が異なる領域で高い回帰係数を示す傾向であった。いずれにしても、様々な含水率、密度およびヤング係数の状態に応じて、各周波数の振動強度が複雑に連成して変動するスペクトル情報を、それぞれの形質の変動に強く関与する変数に変換することによって良好な推定が実現していると考えられる。

## 2.5 結論

以上のように、Lasso モデル、PLS モデルともに、振動スペクトル情報から回帰に強く寄与する変数を選択することによって、特に含水率と密度については高い精度で推定できることが分かった。このことから、NIR スペクトルのみならず、立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いても含水率や密度といった複数の木材性質を同時に推定できるといえる。打撃方法②および③、すなわち丸太の側面からの打撃においても高い推定精度が得られたことは、本研究で提案した方法が実際の立木を想定した非破壊推定にも適用可能であることを示唆している。ただし、ヤング係数については必ずしも十分な推定精度を得られなかった。その主な理由として、本研究の供試材料は、立木としては 10 本のバリエーションしかなく、ヤング係数のバラツキ (4.86 - 8.39 GPa) は、やや小さい結果となってしまったためと考えられる。このことも考慮して、今後は、実際の立木を対象にして、様々な樹齢や径級の個体から幅広いデータを収集して、より信頼性の高い推定モデルの構築を目指す必要がある。



**Fig.6.** 含水率，密度，ヤング係数の PLS 回帰による推定モデルに対応する  
回帰係数のラインプロット

## 第3章 近赤外スペクトル行列の固有値分布に基づいた木材収縮変動の評価

### 3.1 緒言

第3章および第4章は、第1章で述べたように物理学的な考察を用いて木材の状態やその変動を評価することを目的として研究を進めた。物理学的考察を用いて木材の状態やその変化を評価する研究はこれまで木材分野ではほとんどされてこなかったため、本研究はその足がかりと位置づけ、ケーススタディとして既往の研究で高い正の相関があるとされている木材の密度と収縮率に着眼し、本研究の物理学的アプローチ手法の妥当性を評価しつつ実施した。

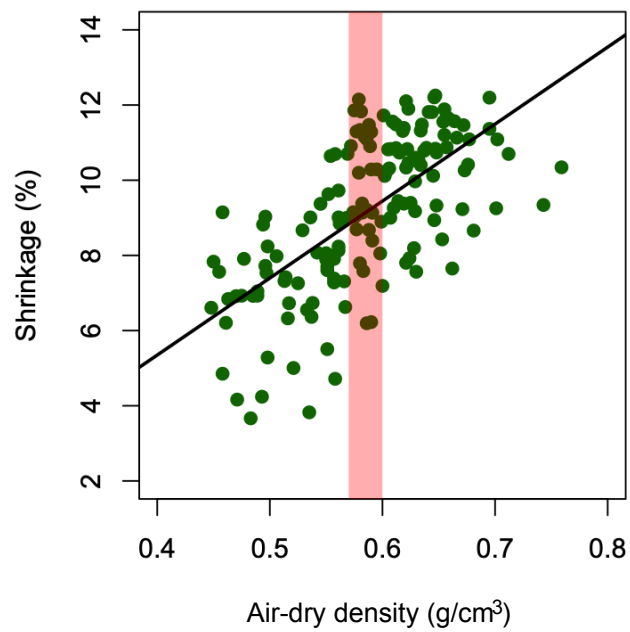
木材と水との密接な相互関係は、木材分野における科学的側面及び産業的側面において重要な問題の一つである [83]。木材と水の相互作用は、木材の寸法変化としても認識することができる。特に、乾燥が施されていない生材状態から平衡含水率のように低い含水率への寸法変化のことを収縮という [84]。森林を構成し生きている「木」として存在しているときは、周囲の温度や圧力の条件のもと、平衡含水率よりも高い含水率を有しているため、伐採後の木材はその環境条件下で程度の差はあるが、収縮をおこす。このような寸法変化は、大気相対湿度の影響を受けるため、季節的要因、日毎の天候等の変動により、製材後の含水率が低い木材であっても寸法変化は発生する可能性がある。第1章で説明したように、木材に関連する法改正により大型の木質構造物の建築が後押しされる中、利用する木材の寸法が大きくなれば収縮の度合いは大きくなると想定でき、寸法変化は木材の品質保証において重要項目の一つであるといえる。寸法変化を評価することにおいて、その実用性及び重要性が高まってきたが、所与の木材の寸法変化を正確に予測できる方法は少ない。その理由の一つとして考えられるのが、木材の寸法変化は、乾燥または水分の吸収によって始めて測定することができる木材性質であり、予測することが難しいためである。さらにヤング係数や含水率等のように木材加工及び生産ラインで評価する木材性質の対象の一つとして寸法変化も推定する必要があると考え、非破壊的で、且つ一つ一つの材木について予測可能であることが重要である。

木材の寸法変化は細胞壁の非結晶領域に水分が出入りすることで発生しており、正常な木材における寸法変化は繊維飽和点以下の含水率でのみ起こる [85]。したがっ

て、木材の寸法変化の大きさは、その木材を構成する細胞壁の量、すなわち木材の密度に強く関係しており [86]、接線方向、半径方向の体積の収縮と膨張率は、木材の密度の増加に伴い直線的に増加する傾向にあるといわれている [85]。木材の密度は、重量と体積のみの測定で計算できるため、木材密度に基づくキャリブレーションモデルを事前に準備することができれば、現場における生産ラインで、個々の木材の寸法変化を評価できる可能性がある。しかし、実際に収縮率と木材密度を実測し図示すると、その関係性は弱いことが読み取れる (Fig.7)。同等の密度値である木材であっても、実質的には異なる収縮を示している (Fig.7 の赤色で示した領域)。同等の密度値を示すサンプル群内において収縮率が最大のサンプルと最小のサンプルを比較すると、収縮率は約 2 倍もの差が生じていることがわかる。Newlin ら (1919) は北米産の 121 種における全体積収縮率と容積密度についての原点を通る回帰直線を示したが、関係式からのばらつきも大きいことが注意されている [87]。

細胞壁における水分の出入りで生じるはずの寸法変化が、なぜ同等の密度の値を示す木材で異なる収縮率を示すのであろうか。その要因として 2 つ考えることができる。1 つは、細胞壁内の分子の組成比と構成である。たとえば、細胞壁のセルロースマイクロフィブリルの角度が木材の収縮の異方性を引き起こすことはよく知られている [88] [89] [90]。もう 1 つの要因は、木材の細胞壁の分布パターンである。針葉樹や広葉樹における環孔材および散孔材は、同じ木材密度であっても、異なる寸法変化を示す可能性がある [86]。つまり細胞壁の量だけでなく、細胞壁の分布パターンや細胞壁内の分子構造が要因となり、木材の寸法変化に影響を与えていると想定される。第 3 章では、細胞壁内の分子の組成比と構成に着目し、第 4 章では木材の細胞壁の分布パターンに着目する。

Fig.7 にみられる木材密度と収縮率の弱い関係における要因は、別の視点からも理解することができると考えられる。木材は、密度、機械的特性、化学的成分、解剖学的特徴など、さまざまな木材性質によって特徴付けられてその木材の状態が決まる。言い換えれば、木材は、 $n$ 次元の実数空間  $\mathbf{R}^n$ 内における点、 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  として定義できる。ここで、 $n$ は正の整数である。変数  $x_1$ が木材の含水率である場合、含水率の減少に伴い、木材の寸法は変化し、強度は徐々に増加する [84]。さらに、細胞の形態や細胞壁内の分子の構成も、木材の寸法変化に伴って変化する。従って、対象とする変数  $x_1$ の変動の背後には、結果として他の複数の変数  $x_2, \dots, x_n$ も変化する



**Fig.7.** スギの気乾条件下での収縮率と木材密度の関係

黒線は回帰直線を示す.

同程度の密度値を示すサンプルは赤色の長方形の領域から収集した.

ているといえる。Fig.7 は、 $X$  を  $\mathbf{R}^2$  の平面に投影したものと理解できるが、この場合、複数の次元における情報が失われているため、木材の状態を正確に評価するためには、木材が有する多次元的な性質が協調的に変化していることを考慮する必要がある。

藤本 (2019) は、NIR スペクトル行列の固有値分布に基づいて複数の木材性質の変動を包括的に評価する方法を提案した [91]。NIR スペクトルといった木材から得られた  $n$  次元データは、その木材の状態における物理的側面を表す状態ベクトルと見なすことができる。いくつかの状態ベクトルで構成される行列から計算された固有値は、木材の多くの性質間の相互作用を表すことになる。さらに、固有値はその木材の状態におけるエネルギー状態を表すため [92] [93]、木材の状態は熱力学および統計力学のアプローチからも議論することができる。この方法の注目すべき点は、木材からの  $n$  次元データは、必ずしも密度や収縮率といった木材の性質と 1 対 1 の対応を示す必要がないということである。この事実は、NIR スペクトルや音響スペクトル等の多次元的及び間接的な情報を用いて、木材の様々な性質を推定した既往の多くの研究によって裏付けられている [23] [94] [24]。これらの研究で得られた統計的な推定モデルは、コベクトル (一次形式)、つまり、 $n$  次元ベクトル空間  $V$  から実数空間  $\mathbf{R}$  ( $\omega: V \rightarrow \mathbf{R}$ ) への線形写像である [95]。  $V$  上のコベクトル全体の集合は、双対ベクトル空間  $V^*$  を形成する。このことは、基底を除き本質的な違いはなく、それらが双対的な関係にある場合、間接的な情報を用いて木材の状態の変動を包括的に評価することができるかと期待できる。

同等の密度の値を有する木材の収縮の変化は、複数の木材性質や変数が協調的に変化する代表例といえる。第 3 章の研究では、物理学的考察を用いて、NIR スペクトル行列の固有値分析に基づき木材の収縮変動を評価するための新しい手法を提案する。分散共分散行列から計算された固有値全体の集合は、木材のエネルギー固有状態を表すハミルトニアンとして扱われ、熱力学と統計力学の観点から変動を説明できると考えられる。

尚、第 3 章の研究は Vibrational Spectroscopy (2020) に受理された [96]

## 3.2 供試材料及び実験方法

### 3.2.1 サンプルの前処理

サンプルは、鳥取大学農学部教育研究林蒜山の森（岡山県真庭市）にて 50 年生のスギの林分（北緯 35 度 16 分，東経 133 度 36 分，標高約 540 m）から得た。2017 年に 20 本伐採し，各丸太から採取された元玉 2 m により本研究のサンプルを作成した。丸太から髓を中心として板を切り出し，半径方向 20 mm×接線方向 20 mm×繊維方向 500 mm の棒状のサンプルを連続的に加工した。そこから合計 155 個のサンプル（20 mm×20 mm×20 mm）を切削し，実験に使用した。すべてのサンプルは心材から取得している。

### 3.2.2 収縮試験

本研究は生材状態から全乾状態における収縮を対象とし，収縮率の測定は JIS-Z-2101 : 1994 [97]に準拠し，サンプルにおける木材の密度は，生材密度，気乾密度，全乾密度の条件で計測した。本研究は接線方向における収縮率に着眼して議論を進める。

気乾状態における木材密度と収縮率との関係を Fig.7 に示す。収縮率は木材密度と正の相関関係にあるが（相関係数= 0.69），データは大きく分散していると読み取れることから弱い線形関係であるといえる。木材の寸法変化は，細胞壁でのみ生じる水の相互作用による現象であるゆえに，木材の寸法変化は木材密度と密接に関係している [86]と想定できるが，実際は，同程度の木材密度の値を示すサンプル群において収縮率の分布にばらつきが生じていることがわかる（Fig.7 の赤色の領域）。この収縮率の違いを明らかにするために，同程度の木材密度（ $0.585 \pm 0.015 \text{ g/cm}^3$ ）において 20 個のサンプルを抽出し，2 つのグループに分けた。1 つのグループは，収縮率が 6.20%～8.90%の範囲を示した低収縮率グループであり，もう 1 つのグループは，収縮率が 11.10%～12.15%を示した高収縮率グループである。それぞれ収縮率の平均は，低収縮率のグループが 7.77%，高収縮率グループが 11.52%であり，各グループのサンプル数はそれぞれ 10 サンプルである。



### 3.2.3 NIR 測定

NIR スペクトルは、フーリエ変換型分光器 (MATRIX-F, Bruker Optics Co., Tokyo, Japan) を使用し、光ファイバプローブ (測定部位の径 $\approx 3.5$  mm) を試料の木口面の晩材部分におしあて拡散反射モードで計測した。スペクトル測定したサンプルは、収縮率を測定した後の気乾状態のサンプルである。NIR スペクトルの計測条件は、波数領域  $10000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 、波数分解能  $8\text{ cm}^{-1}$  とし、SN 比向上のためスキャン回数を 64 回とした。 $4\text{ cm}^{-1}$  のスペクトル間隔に対応する 2 つのゼロフィリングを適用し、単一の平均スペクトルに処理した。計算の煩雑さを軽減することを目的として、本研究の分析では、 $9000\text{ cm}^{-1}$  から  $4500\text{ cm}^{-1}$  の波数範囲を解析対象とする。スペクトルを分析するにあたり、処理前のスペクトルは正規化され、 $9000\text{ cm}^{-1}$  ~  $4500\text{ cm}^{-1}$  のスペクトルの波数範囲における合計 1168 のデータ点をスペクトル変数として以下の解析に用いた。

### 3.3 データ分析

それぞれの収縮率グループのスペクトル行列  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{C} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ ) から計算された分散共分散行列  $\mathbf{C}$  は、下式により固有値分解される [98] [99]。

$$\mathbf{C}\mathbf{u}_i = E_i \mathbf{u}_i \quad (i = 1, \dots, N), \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{u}_i$  は固有ベクトルで、 $E_i$  は  $\mathbf{u}_i$  に対応する固有値である。各固有ベクトル  $\mathbf{u}_i$  に対応する射影は、回帰分析に使用されることが多い [80] [100] [101]。

式(6)の固有値問題は、ベクトル  $\mathbf{u}_i$  の長さを定数に制限した 2 次最適化問題として定式化される [92]:

$$\max_{\mathbf{u}} \{\mathbf{u}_i^T \mathbf{C}\mathbf{u}_i\}, \text{ subject to } |\mathbf{u}_i|^2 = \text{constant}, (i = 1, \dots, N). \quad (7)$$

ここで、 $\max_X \{f(X)\}$  は、 $X$  に関する関数  $f(X)$  が最大になるように定める。ランダム行列理論によれば、二次形式の最適解は分散共分散行列に対応するエネルギー関数、

すなわち、ハミルトニアン  $H$  とみなすことができる [92] [93] :

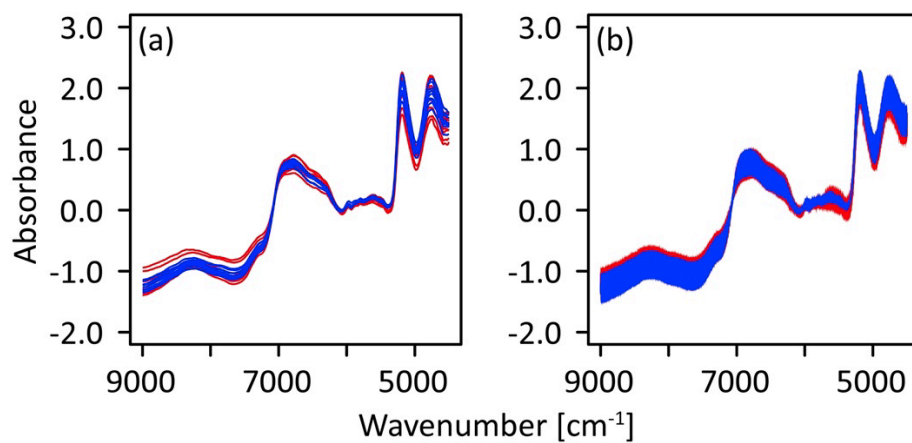
$$H(\mathbf{u}|\mathbf{C}) \equiv \mathbf{u}_i^T \mathbf{C} \mathbf{u}_i \quad (i = 1, \dots, N). \quad (8)$$

したがって、物理学的アプローチに沿った分析が可能となる [102] [103] [104]. たとえば、以下に記述するように分配関数及びヘルムホルツの自由エネルギーを計算することが可能になるため、物理学的またはエネルギー的な視点から木材の収縮の変化を議論することができると考えられる. これらの計算は、R version 4.0.3.の標準関数を用いて実行した.

## 3.4 結果と考察

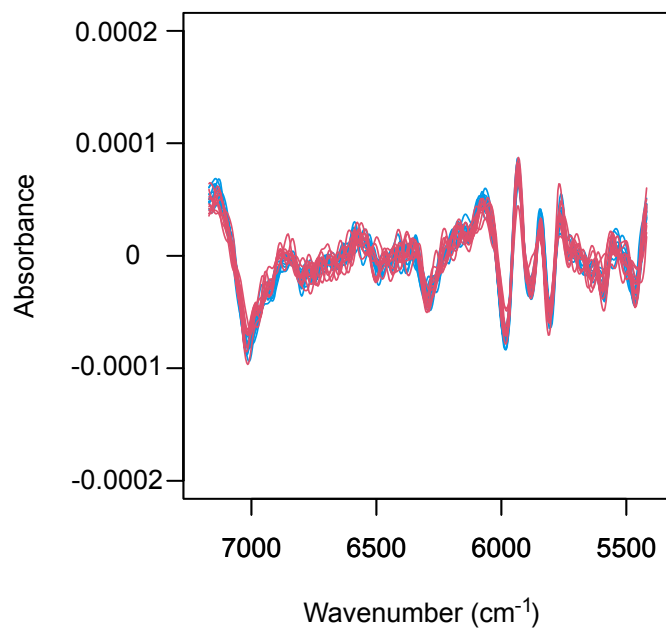
### 3.4.1 スペクトル変動

Fig.8 (a) は、低収縮率グループ (青) と高収縮率グループ (赤) において正規化されたスペクトル変動を示す. 高収縮率グループは、特に高い波数領域で、低収縮率グループよりもわずかに高い吸光度を示した. 二次微分スペクトルからは、吸光度の強度の差が特定のバンドで増強されていることが読み取れる (Fig.9). たとえば、 $5986 \text{ cm}^{-1}$  のピークにて、低収縮率グループは高収縮率グループよりも高い吸光度値を示している.  $5986 \text{ cm}^{-1}$  はリグニンの芳香族基の C-H 伸縮モードの最初の倍音に割り当てられるため [105], 疎水性であるリグニンを多く含むサンプルは、収縮率は小さいと考えられる. 本研究では、統計力学等の物理学的手法と考察に基づいてスペクトル変動を解析していくことが目的であるため、スペクトル変動を個々の変数 (波数) として捉えるのではなく、その木材を構成するシステム全体として検討した. 統計力学は、膨大な数のマイクロ要素からなるシステム、つまり多体システムの物理的特性を扱う [106] [107]. 本研究では、スペクトル変数 ( $\nu_1, \dots, \nu_n$ ) を木材システムを構成するミクロ的要素と見なし、この仮定に基づき木材状態は統計集団の観点からマクロ的なシステムとして説明することができる.



**Fig.8.** オリジナルのサンプル (a) とブートストラップサンプルの平均から生成されたシミュレーションサンプル (b) の NIR スペクトル

スペクトルは正規化し、青色が低収縮率グループ、赤色が高収縮率グループを示す。



**Fig.9.** 低収縮率グループ（青）及び高収縮率グループ（赤）の二次微分スペクトル

統計力学的処方則に則って分析するにあたり、各収縮率におけるサンプルグループは平衡状態にあると仮定される [102] [103]. 平衡状態に達するには、ほぼ同じ変動パターンを示す多数のスペクトルを収集する必要があるが、本研究では、それぞれの収縮率グループにおいて 10 個とサンプル数が少ないため、ブートストラップのサンプリング手法に基づき 1000 個のサンプルをシミュレートした [108]. 各波数の吸光度値は、測定データの経験的分布に従うと仮定され、ブートストラップ標本の平均は、R バージョン 4.0.3 の `simpleboot` パッケージを用いて 1000 回繰り返し取得した [109]. その結果、各収縮率グループで 1000 行 1168 列のスペクトル行列が得られ (Fig.8 (b)), 以下の分析を進めた. この  $1000 \times 1168$  のランダム行列から計算された分散共分散行列の要素は、ガウス型直交アンサンブルであると想定される [93]. 処理の結果、元のスペクトルにおける横方向の接続が部分的に消去された. ただし、低収縮率グループ (または高収縮率グループ) のスペクトルは、ほぼ確実に青 (または赤) の領域に表示される.

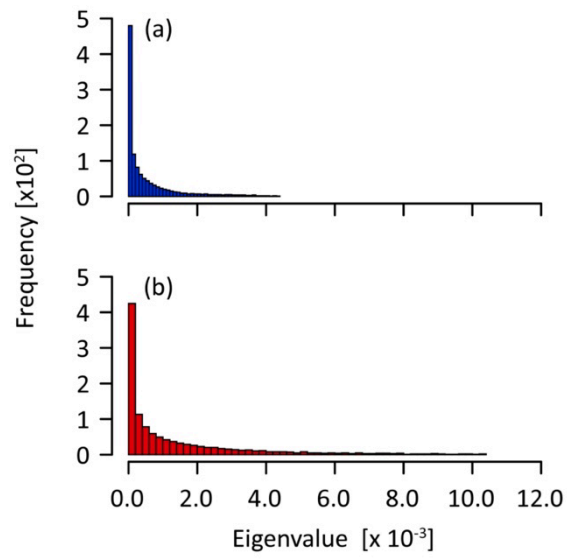
### 3.4.2 固有値分布と収縮率変動におけるエネルギー学的視点

式 (6) から計算された (エネルギー) 固有値  $E_i$  の分布を Fig.10 に示す. 高収縮率グループ (Fig.10 (b)) の固有値分布は、低収縮率グループ (Fig.10 (a)) の固有値分布と比較して広く分布していることが読み取れる. この結果は、高収縮率グループのスペクトル行列が低収縮率グループのスペクトル行列よりも秩序立って変化することを表している. 上記のように、固有値全体の集合は、エネルギー関数、すなわち、式(8)で表されるハミルトニアン  $H$  として認識できる. また、分布関数  $Z$  とヘルムホルツの自由エネルギー  $F$  を下式のように定義する [92].

$$Z(\beta|\mathbf{C}) = \int d\mathbf{u} \exp(-\beta H(\mathbf{u}|\mathbf{C})) \delta(|\mathbf{u}|^2 - N), \quad (9)$$

$$f(\beta|\mathbf{C}) = -\frac{1}{N\beta} \log Z(\beta|\mathbf{C}), \quad (10)$$

ここで、 $\beta$  は物理学における逆温度を意味し、 $\delta(\mathbf{x})$  はディラックのデルタ関数を指す.  $Z$  と  $f$  はどちらも  $\beta$  に依存するが、行列  $\mathbf{C}$  の第一固有値  $E_1$  は、 $\beta \rightarrow \infty$  の範囲内で  $f$  によ



**Fig.10.** 低収縮率グループ (a) と高収縮率グループ (b) の固有値分布

って評価できる [92].

$$E_1 = 2 \lim_{\beta \rightarrow \infty} f(\beta | \mathbf{C}). \quad (11)$$

高収縮率グループの最大固有値は，低収縮率グループよりも大きいことが Fig.10 から読み取れる．これらの結果は，大きな寸法変化を有する木材は多くの自由エネルギーがあることを意味する．

同程度の密度の値を示す木材間の収縮の違いは，細胞壁内の分子の状態，つまり化学成分の比率やセルロースの結晶化度等に由来する．Fujimoto (2019) の研究 [91] では，収縮率サンプルとエンドマッチした曲げヤング係数を測定した．ヤング係数は収縮と正の相関があり（相関係数= 0.80），低収縮率グループは 10.98 GPa (8.70–13.17 GPa)を示し，高収縮率サンプルは 13.76 GPa (12.80–14.41 GPa)であった．結果，木材の密度の値がほぼ等しい場合であっても，より硬い木材は大きく収縮する傾向があることを示している．細胞壁のセルロースマイクロフィブリルの形状は，この事実を説明することができる好例といえる [84] [110] [111]．高収縮率グループでみられた高いヘルムホルツの自由エネルギーは，大きな剛性を有する木材であり，多くの仕事を実行できることを示している [84]．実際に，大きな寸法変化を有する木材には，収縮の際に生じる応力に関連する多くの仕事が含まれていると想定できる．

### 3.4.3 収縮に関連する木材状態におけるランダム性

正規化係数として分配関数を使用し，対象のシステムがエネルギー固有状態  $i$  をとる確率分布は下式のように表される．

$$p_i = Z^{-1} \exp(-\beta E_i). \quad (12)$$

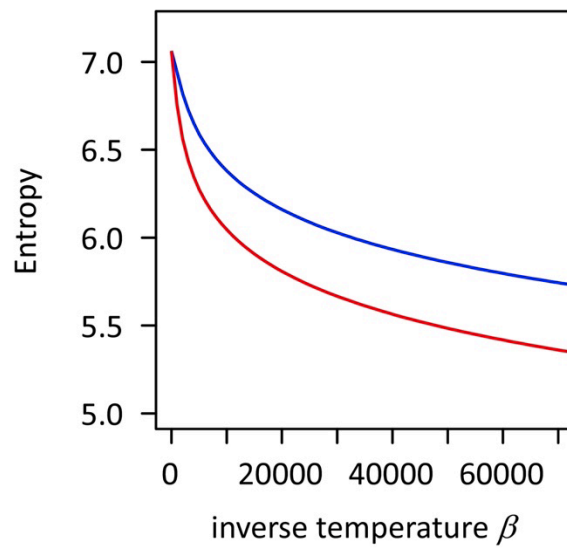
次に，確率  $p_i$  の関数としてシャノンエントロピー  $S$  を導くことができる．

$$S = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (13)$$

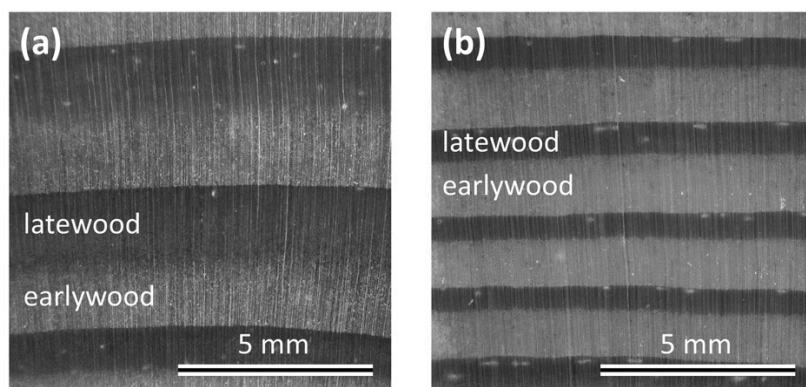
Fig.11 は、 $\beta$ によるエントロピー $S$ の変化を示している。エントロピーを計算するために $\beta$ の領域を設定した。低収縮率グループは高収縮率グループよりも高いエントロピーを示し、寸法変化の小さい木材は無秩序な構造をしていることが示唆された。

同程度の密度の値を示す木材サンプル間における収縮の違いは、木材の細胞壁の分布パターンの違いからも導き出すことが可能である。たとえば、針葉樹の場合、早材から晩材への移行は、細胞壁の分布パターンの違いとして生じる可能性がある。低収縮率サンプルと高収縮率サンプルのそれぞれの横断面を光学顕微鏡で観察した写真をFig.12に示す。低収縮率サンプルでは、早材から晩材への移行が滑らかに変化していることがわかる (Fig.12 (a))。一方で、高収縮率サンプルは、年輪幅が狭く、早材から晩材への急激な移行を示した (Fig.12 (b))。低収縮率グループにみられる低い自由エネルギーと高いエントロピーは、寸法変化がほとんどなく、これらの木材が無秩序な構造を持っていることを示唆している。この考察は、Fig.12 (a)にみられる細胞構造と関連しており、接線方向の収縮と膨張は主に晩材の変化によって制御されるという既往の研究と一致した [86]。Wohlertら (2012) はセルロース分子の変形メカニズムを研究し、エントロピーが超微結晶セルロースの剛性に影響を及ぼし、温度の上昇に伴うヤング係数の低下は、エントロピーによるものであることを報告した [112]。本研究が物理学的手法に則り導き出した低収縮率グループの高いエントロピーは、機械的特性と木材のミクロ的構造との関係によっても説明することができる [113] [114]。また、NIR スペクトルには細胞構造の変動や分子構造に関する情報が含まれているため、NIR 分光法は収縮に関連するあらゆる要素を抽出していると想定できる。





**Fig.11.** 逆温度  $\beta$  に伴うシャノンエントロピーの変化  
青線は低収縮率グループ，赤線は高収縮率グループを示す.



**Fig.12.** 低収縮率サンプル (a) と高収縮率サンプル (b) の横断面におけるそれぞれの光学顕微鏡写真

明るい色の領域は、薄い細胞壁を有した大きな細胞で構成された早材であり、濃い色の領域は、厚い細胞壁を有した小さな細胞で構成された晩材を示す。スケールバーは5mm.

### 3.5 結論

木材は多くの性質や変数によって特徴付けられるため、複数の自由度を持つ物理系とみなすことができ、変動あるいはばらつきを伴うことが知られている [106] [107] [115]. 本研究で明らかとなった収縮の変動は、複数の自由度を持った物理系としてのばらつきであり、木材を実数空間  $\mathbf{R}^n$  における点  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  と見なした. NIR スペクトルは、いくつかのスペクトル変数、すなわち各波数  $\nu_i$  での吸光度または透過率といった値を持つ  $n$  次元データとして取得された. スペクトル変数  $(\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n)$  は、木材の性質  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  と 1 対 1 には対応しないが、NIR スペクトル行列から計算された固有値における解析結果は、顕微鏡画像から観察した実際の描像及び既往の知見と整合が取れた. このことから、物理学的な考察を用いて木材の状態やその変動を包括的に評価できることが示唆される.

## 第4章 固有値分析に基づいた木材の細胞壁分布パターンにおけるエネルギー学的考察

### 4.1 緒言

第3章に引き続き第4章は、物理学的な考察を用いて木材の状態やその変動を評価することを目的として研究を進めた。第4章では、同じ密度を示す木材の収縮率の違いの要因とされている、細胞壁の分布パターンについて着目し、研究を実施した。

木材の顕微鏡観察では、木材を構成する多様な細胞のサイズや形状の違いから樹種を識別できるなど、それぞれの樹種において特有のパターンや配列があることが知られている [86] [116]。細胞配列の違いは、細胞壁の分布から特定することが可能であり、その分布のパターンは、その木材の性質を決定する。細胞壁が密集していると、木材の密度は増加し、結果として、高い強度や大きな寸法変化といった特徴も見出すのである [84]。一方で、第3章でも説明したように、ほぼ同じ密度の値を示す木材であっても、強度と収縮にばらつきがみられることがあること [91]から、木材の細胞壁の量だけでなく、細胞壁の分布パターンにおいても定量的に評価しなければならないといえる。

藤田ら (1986, 1991) によって報告された木材構造の画像におけるフーリエ変換分析は、細胞壁の分布を定量的に評価するための有効かつ注目すべき手法といえる [117] [118]。彼らは木材細胞における中心のドットマップの高速フーリエ変換処理により出力されたパワースペクトルから木材細胞の配置を評価することで、様々な樹種の細胞形状を再構築した [119] [120] [121] [122] [123] [124] [125] [126]。

基本的に、 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ は、有限な次元のベクトル空間  $V$  の正規直交基底であり、 $n$  は正の整数である。 $V$  におけるすべての  $f$  は、線形結合  $f = \sum f^i e_i$  であり、 $f^i$  は実数空間  $\mathbf{R}$  の要素とえる。 $F^i: V \rightarrow \mathbf{R}$  を、 $i$  番目の座標  $F^i(f) = f^i$  を選択する線形関数とすると、 $F^i$  は次式のように特徴付けることができる。

$$F^i(e_j) = \delta_j^i = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j; \\ 0 & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (14)$$

座標関数 $F^1, F^2, \dots, F^n$ は、 $V^*$ で表される $V$ の双対空間の基底を形成する [95]. フーリエ係数は座標関数であるため、2次元画像データは $\mathbf{R}^n$ 上の点 $(f^1, f^2, \dots, f^n)$ で認識でき、この視点は、後述する議論において重要な役割を果たす.

木材は、解剖学的特徴だけでなく、木材の密度、機械的特性、化学成分など多くの特性や変数によっても特徴付けることができる. 第3章でも述べたように、任意の木材を $\mathbf{R}^n$ 上の $n$ 個の変数の組、すなわち、 $n$ 次元ベクトルデータ $X = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ として表すことができ、また、木材の性質や変数は相互に関連しているため、木材の複数の性質がその他の性質と比較してどのように変化するかを包括的に評価する必要がある. 木材サンプルから取得された $n$ 次元データは、木材を構成する系における物理学的側面を表す状態ベクトルと見なすことができる. 測定技術の進歩を考えると、木材の多次元データは、たとえば、電磁スペクトルからも簡便に測定することが可能である [23] [127] [128]. また、第3章で述べたように木材から得られた多次元ベクトルデータにおける変数が、密度や強度といった実際の木材性質と必ずしも1対1に対応する必要はない. このことは密度などの木材性質が、そのような間接的な情報で推定評価できるという多くの既往の研究からも支持することができる [24]. 実際の木材性質とスペクトル変数のように互いが双対的な関係にある場合、間接的な情報によって木材の状態や変動を包括的に評価できることが期待される.

物理学の文脈 [129] [93]では、データ行列からの得られた固有値集合が、対象となる系のエネルギー状態とみなせることから、同手法の手続きに基づくことにより熱力学および統計力学の観点から木材の変動を考察することができる [103] [104]. エネルギーは、熱力学から場の量子論までの幅広い物理システムにおける保存量として位置付けられる最も重要な物理量の1つといえる [130]. エネルギーに基づく木材の変動、すなわち確率論的エネルギーの評価 [131]は、木材の状態やその変化を評価する上で従来にはない新しい視点を与える有効な手段となると考えられる.

細胞壁で生じる水分の出入りのみで発生する木材の収縮は、実際は同程度の密度を有する木材であっても異なる収縮の挙動を示す. 上述してきたようにその要因は主に2つ考えられる. 1つが細胞壁内の分子構造の状態、もう一方が、木材の細胞壁の分布パターンである [86] [84] [132]. 第3章では、前者の細胞壁の分子構造の状態について NIR スペクトル行列の固有値によって十分に説明できることを明らかにした. 第4章の研究では、後者の細胞壁の分布パターンに着目し、木材の断面における光学

顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルを用いて物理学的アプローチに基づき考察した。

尚、第4章のこの研究は *Journal of Wood Science* (2020) に受理された [133]。

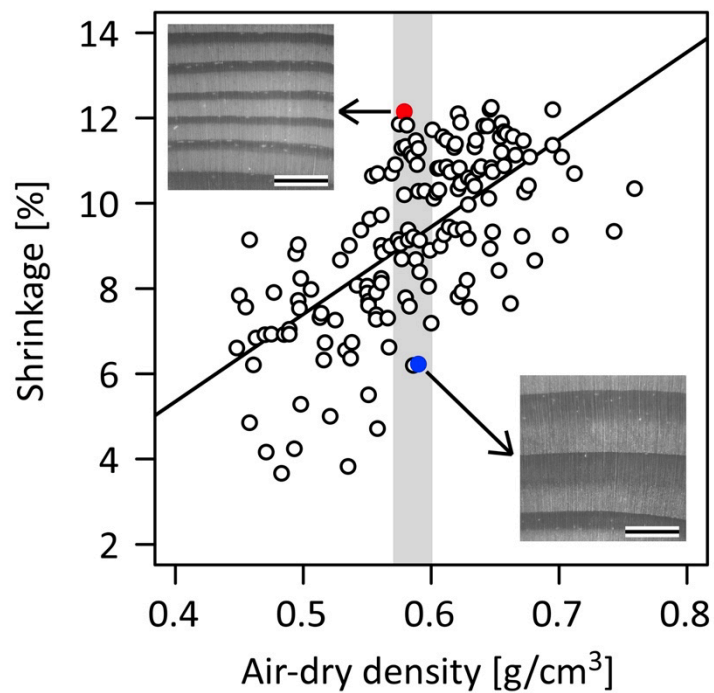
## 4.2 供試材料及び実験方法

### 4.2.1 供試材料と収縮試験

第4章で用いた実験サンプルは、第3章と同様であり、鳥取大学農学部教育研究林蒜山の森（岡山県真庭市）にて樹齢50年のスギの林分から入手した。サンプルの取得場所の詳細と加工手順においては第3章で説明した通りだが、簡潔に加工手順を示すと、20mm×20mm×20mmの寸法に加工された合計155のサンプルが20本の立木から取得され、収縮率の測定に使用した。本研究の計測から得られた収縮率の結果は、木材のいずれの方向（接線方向、半径方向、繊維方向）においても類似した傾向を示したため、生材状態から全乾状態への条件下における接線方向の収縮をピックアップし、議論を進める。試験手順は、JIS-Z-2101:1994 [97]で設定されている規格に準拠して実施し、木材密度は、生材密度、気乾密度、全乾密度を測定した。

第3章でも述べた通り気乾状態の条件下における収縮率と木材密度を実測値分布として示すと、両者の関係は弱いものの（相関係数=0.69）、正の線形相関を示す（Fig.13）。Fig.13の灰色の領域で示した同程度の木材密度（ $0.585 \pm 0.015 \text{ g/cm}^3$ ）のサンプルでも、約2倍の収縮率の違いがみられる。そこで、木材密度の値が同程度（Fig.13の灰色の領域）の20のサンプルを低収縮率グループと高収縮率グループの2つに分割した。それぞれのグループにおける詳細は第3章と同様であるが、低収縮率グループは6.20～8.90%（平均7.77%）の領域であり、高収縮率グループは11.10～12.15%（平均11.52%）の領域で分割しており、それぞれのグループは10個のサンプル数を有する。

それぞれのグループから抽出したサンプルについて横断面を光学顕微鏡により観察したところ、低収縮率サンプルでは、早材から晩材への移行がなめらかに変化していたことに対し、高収縮率サンプルでは、年輪幅が狭く、早材から晩材へと際立った移



**Fig.13.** スギの気乾条件下での収縮率と木材密度の関係

黒線は回帰直線を示す．同程度の密度値を示すサンプルは灰色の長方形の領域から収集した．横断面の光学顕微鏡写真は，下が低収縮サンプル，上が高収縮サンプルである．スケールバーは 5mm．

行を示していた。このように両者は細胞壁の分布パターンに明らかな違いがあるわけだが、その違いをより定量的に評価するために、物理学的手順に基づき解析を行う。

#### 4.2.2 画像分析

スライディングマイクロトームを使用して、低収縮率グループと高収縮率グループそれぞれから代表的なサンプルを 1 つ抽出し、横断面から厚さ  $20\ \mu\text{m}$  の切片を切り出した。切片は水性サフランインで染色した。画像データは、光学顕微鏡に取り付けたデジタルカメラを使用して撮影された。撮影は、視野のサイズが  $0.5\ (\text{T}) \times 0.4\ (\text{R})\ \text{mm}$ 、ピクセル数は  $2560 \times 1920$  の条件のもと、切片の放射方向に対して 4 列の連続画像を収集した。それぞれの列で 25 枚撮影され合計 100 枚の画像を取得した。Fig.14 を参照し画像解析の手順を説明すると、各画像をコンピューターに読み込ませてヒストグラムベースにてグレースケールの二値化を適用した (Step 1 および Step 2)。次に、二値化された画像の行列データがベクトルデータに変換すると (Step 3)、ポアソン矩形パルス様の信号として観察される。これは細胞壁または細胞の内腔の出現パターンとみなせる。計算時間の短縮と計算の煩雑さを避けるため、画像の中央にある  $500 \times 500$  ピクセルの限られた領域でベクトル変換を実行した。このときベクトルの長さは 250,000 であった。最後に、パワースペクトル密度は、高速フーリエ変換を使用して計算されたスペクトルから推定された (Step 4)。画像取得とそのデータ処理は、R ver. 4.0.3.における `imager` [134]および `tuneR` [135]パッケージを使用して実行した。

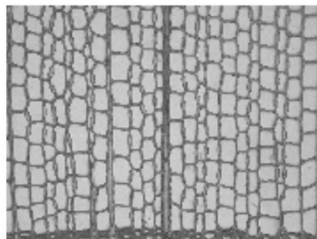
#### 4.3 データ分析

データ分析の手順において、本研究は顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルを用いているといったデータの取得方法を除いて第 3 章と同様に進める。切片の列ごとに取得された合計 100 枚の画像を処理し、100 個のパワースペクトルを含む行列データとして固有値分析を実行した (式 (6) ~ (8))。

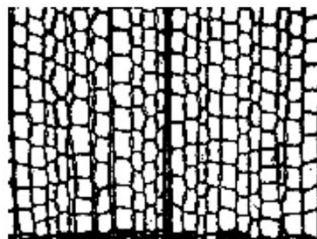
ヘルムホルツの自由エネルギーやエントロピーなどの物理量は、分配関数から取得することができる。これらの熱力学や統計力学といった物理学的アプローチに基づい



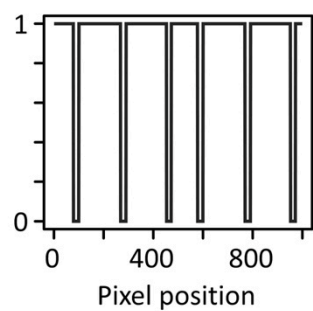
**Step 1:**  
Load gray image



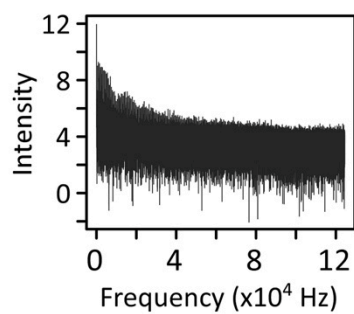
**Step 2:**  
Transform to binary data



**Step 3:**  
Transform to vector data



**Step 4:**  
Fast Fourier transform



**Fig.14.** 細胞壁の分布パターンにおける画像解析の手順

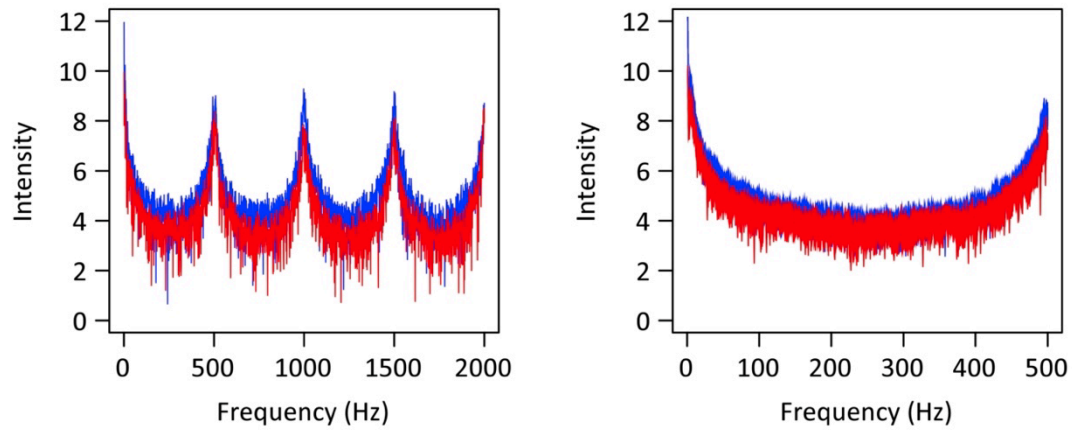
て低収縮率グループと高収縮率グループにおける細胞壁の分布パターンを分析した。

## 4.4 結果と考察

### 4.4.1 スペクトル変動

Fig.15 (左) は、典型的なパワースペクトルの例を示しており、その拡大が Fig.14 Step 4 である。青と赤の線は、それぞれ早材と晩材のスペクトルを示しており、早材のスペクトルの強度は、晩材の強度よりもわずかに高くなっている。行列からベクトルへの変換において、両者のスペクトルが 500Hz ごとに繰り返されるため、以下の分析では、計算の複雑さを軽減することを目的として、1~500Hz の制限された周波数間隔に焦点を当てる。通常のスเปクトル分析では、特定の周波数のピーク強度が最も重要になる場合が多いが、第 3 章同様に、第 4 章の研究においても、物理学的手順に基づいてスペクトル変動を考察していくため、スペクトル変動における変数（すなわち、周波数）を個別に追いかけるのではなく、木材という系として議論を進める。

また、解析の対象としたサンプルは平衡統計物理学の要件に準拠する平衡状態にあると想定した。本研究におけるパワースペクトルは、所与の木材の物理学的状態を表す状態ベクトルと見なすことができるが、平衡状態を達成するには、ほぼ同様の変動パターンを示す多くのスペクトルが必要となる。そのため固有値分析を行うにあたって、ブートストラップのサンプリング手順 [108] に従い、500 サンプルをシミュレートした。各周波数での強度は、測定データの経験的分布に従うと想定され、ブートストラップ標本の平均は、simpleboot パッケージを用いて 500 回繰り返すことによって取得された [109]。このシミュレーションは、早材と晩材の画像を使用して実行され、その結果、それぞれ 500 行 500 列の早材と晩材のデータに対応するスペクトル行列が、低収縮率サンプルと高収縮率サンプルの両方で取得された (Fig.15 (右))。また、この 500×500 のランダム行列から計算された分散共分散行列の要素は、ガウス型直交アンサンブルに従うと仮定される [93]。



**Fig.15.** 左：早材（青い線）と晩材（赤い線）におけるパワースペクトル.  
 右：ブートストラップサンプルの平均から生成されたスペクトル.

#### 4.4.2 固有値分布

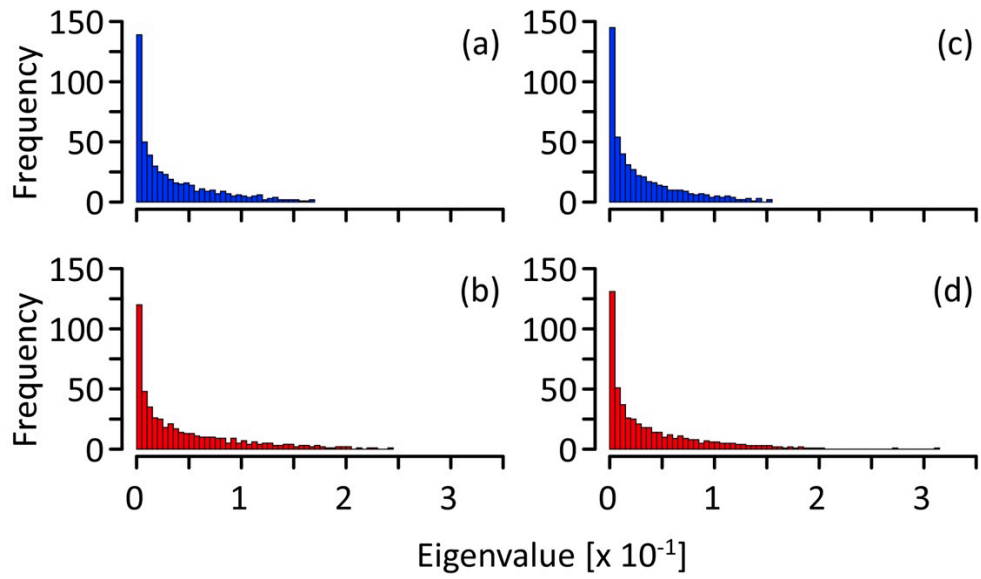
式 (6) より低収縮率サンプルの分散共分散行列  $\mathbf{C}$  から計算されたエネルギー固有値の分布 (Fig.16) において, 晩材 (Fig.16 (b)) の固有値は, 早材 (Fig.16 (a)) の固有値と比較して広く分布していることが読み取れる. 高収縮率サンプルでも同様の結果が得られた (Fig.16 (c), (d)). これらの結果は, 晩材のスペクトル行列が早材のスペクトル行列よりも秩序立った規則正しい変化をしていることを示唆している. 事実, 晩材の画像では, ほとんどが細胞壁で占められていたため, 細胞壁の分布に特徴的な変化は観察できなかった.

正規化係数として分配関数を使用すると, 対象のシステムがエネルギー固有状態  $E_i$  にある確率は第 3 章同様に式 (12) で表せられる. 各エネルギー固有状態に対応する確率  $p_i$  の分布 (Fig.17) が示すように, 低収縮率サンプル (Fig.17 (a)) と高収縮率サンプル (Fig.17 (b)) を比較すると, 高収縮率サンプルの方が広く分布しており, 一方で, 早材 (青い線) と晩材 (赤い線) を比較すると, 晩材の方が広く分布していることがわかる. これは, 早材の細胞壁分布が晩材と比較して無秩序なパターンを示すことを示唆している. 光学顕微鏡写真 (Fig.13) から明らかなように, 低収縮率サンプルは, 高収縮率サンプルよりも多くの早材を有しており, 無秩序な細胞構造を持っていることが読み取れる.

#### 4.4.3 細胞壁の分布におけるエネルギー学的考察

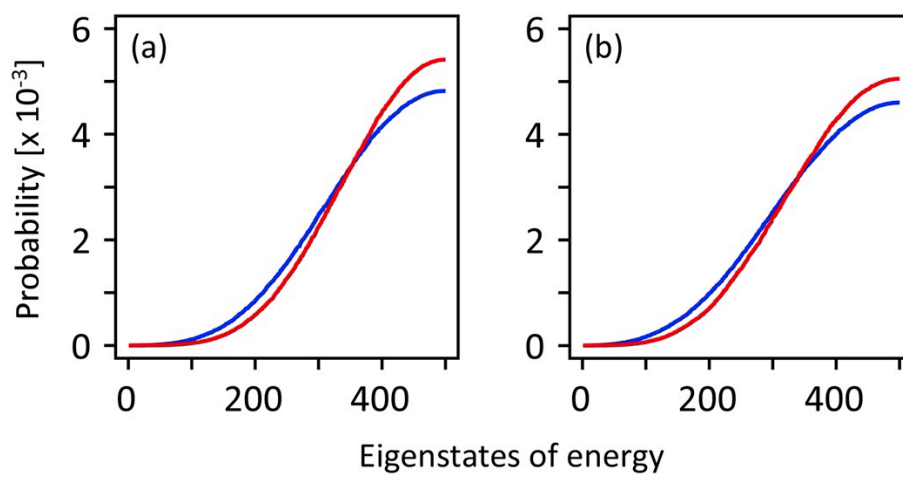
固有値集合  $\{E_1, E_2, \dots, E_N\}$  を用いて熱力学及び統計力学における物理量が計算され, その結果に基づいて細胞壁の分布パターンを定量的に評価する. ヘルムホルツの自由エネルギー  $F$  は, 上で述べたように式 (10) により導出できる. ヘルムホルツの自由エネルギーは, 対象とするシステムの物理的特性に関するすべての情報が含まれているという意味で重要な物理量である. 分配関数  $Z$  及びヘルムホルツの自由エネルギー  $F$  はどちらも  $\beta$  に依存するが, 行列  $\mathbf{C}$  の最大固有値  $E_1$  は,  $\beta \rightarrow \infty$  [23] の条件のもと  $F$  を評価することができる (式 (11)).

固有値分布 (Fig.16) で明らかなように, 低収縮率サンプルと高収縮率サンプルでは, 晩材に関連付けられた第一 (最大) 固有値, すなわちヘルムホルツの自由エネルギーは, 早材よりも高い結果となった. 加えて, 高収縮率サンプルは, 晩材の保有



**Fig.16.** 低収縮率サンプル（左の列）と高収縮率サンプル（右の列）のスペクトルから計算された固有値の分布.

(a) 及び(c)が早材に対応し, (b)及び(d)は晩材に対応する.



**Fig.17.** 低収縮率サンプル (a) と高収縮率サンプル (b) のスペクトルから計算された各エネルギー固有状態に対応する確率分布.

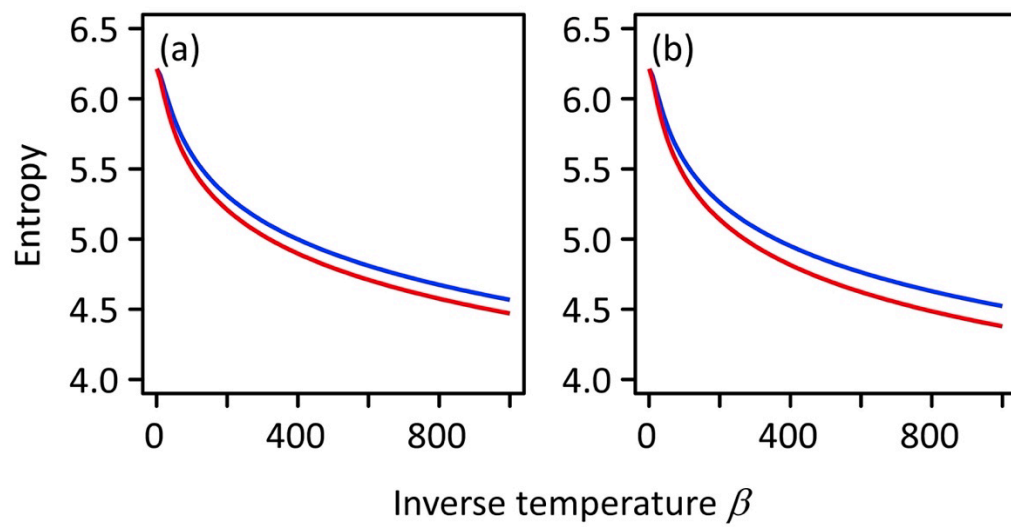
青線は早材, 赤線は晩材を示す.

量が多いため、ヘルムホルツの自由エネルギーが大きいことが特徴といえる。この結果は、Fig.13の光学顕微鏡写真における実際の描像と、接線方向の収縮は主に晩材の変化によって制御されるという既往の知見と一致していた [86]。大きな寸法変化は、収縮や膨張時に生じる応力において多くの仕事が伴うと想定できることから、本研究結果は既往の知見や描像と整合性があるといえる。本研究では、ほぼ同じ密度を示す木材を扱っていることから、熱力学及び統計力学といった物理学的アプローチに基づいた固有値分析は、木材収縮に影響を与える密度以外のさまざまな要因に関する多くの情報を伝達し、木材の寸法変化に関する包括的な理解に役立つと期待できる。

次に、第3章同様にシャノンエントロピー $S$ を計算した(式(13))。Fig.18は、 $\beta$ によるエントロピー $S$ の変化を示す。エントロピーを計算するために $\beta$ の領域を設定した。低収縮率サンプルと高収縮率サンプルの両者において、早材は晩材よりも大きなエントロピーを示すことが読み取れる。したがって、低収縮率サンプルは、早材の保有率が高いため、大きなエントロピーを示した。これらの結果は光学顕微鏡により観察される実際の描像と一致している(Fig.13)。具体的に述べると、光学顕微鏡写真から読み取れる低収縮率サンプルの早材から晩材への滑らかな段階的な移行は、細胞壁の分布がより均一である状態(あるいは均一になる方向に作用した状態)といった大きなエントロピーを有する状態と考えられる。一方で、早材と晩材の境界が明瞭である高収縮率サンプルは、早材から晩材へと秩序だつて移行していると考えられ、エントロピーが小さい状態であると想定できる。

Fig.19は、低収縮率サンプル(a)と高収縮率サンプル(b)のグレースケール顕微鏡写真の光度のヒストグラムを示した図である。一般に、光度の分布は、細胞壁と内腔のコントラストによる二峰性を示すが、各ピークにおける鋭利さは両サンプル間で明らかに異なっていた。すなわち、高収縮率サンプルの顕微鏡写真では2つのピークが明確に識別されたが、低収縮率サンプルではピークが滑らかになっていた。

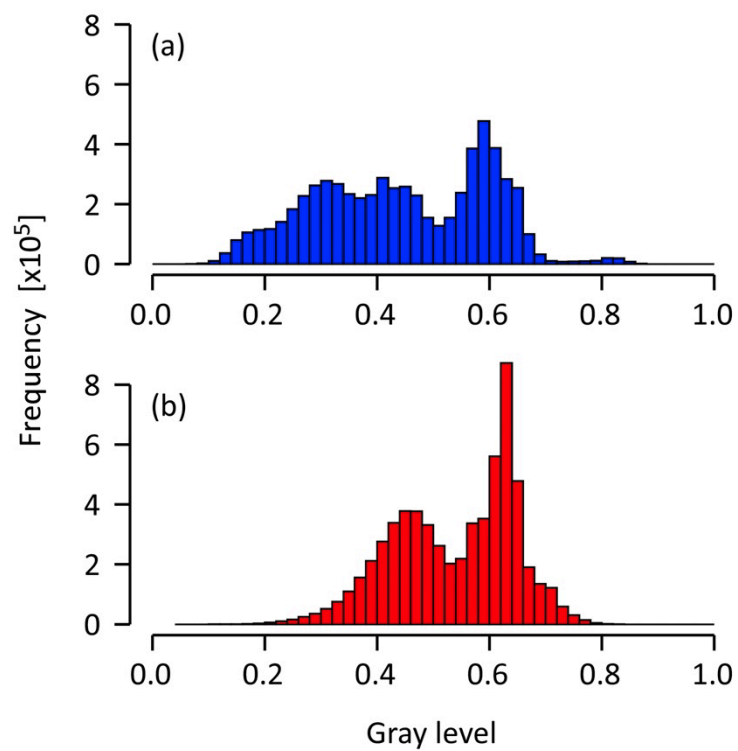
本研究で適応した熱力学及び統計力学のアプローチは、多くの要因が個別にではなく協調的に所与のシステムに寄与する現象を評価するのに適していることが知られている [107] [106] [115]。第3章に引き続き述べてきたように、木材は多自由度を持つ物理系と仮定することができ、この仮定に基づくと、スペクトル変数は解析力学における一般化座標のようなものであると想定できる [107]。つまり、データ点の変動は、構成される空間内の点粒子の動きであるかのように見なされ、実際に、事後分布をシ



**Fig.18.** 低収縮率サンプル (a) と高収縮率サンプル (b) のスペクトルから計算された逆温度  $\beta$  によるシャノンエントロピーの変化.

青線は早材, 赤線は晩材を示す.





**Fig.19.** 低収縮サンプル (a) と高収縮サンプル (b) のグレースケール顕微鏡写真 (Fig. 13) の光度のヒストグラム.

ミュレートするハミルトニアンモンテカルロ法では、確率分布のモデルパラメータ空間を配位空間と見なし、対数事後分布を使用して位置エネルギーを評価している [136]. この研究では光学顕微鏡の画像データにおけるパワースペクトルを使用した。上記の考察に基づき多次元スペクトルと類する情報であれば、情報源に依存せずに木材からのデータを任意に選択することができる。したがって、本研究によって提案された概念は、木材状態の包括的評価のみならず、分野の垣根を超えて幅広く適用することが可能であると期待できる。

#### 4.5 結論

木材の寸法変化の大きさに応じて、サンプルにおける細胞壁の分布パターンに明らかな違いがあることが本研究の物理学的手法に基づくことで定量的に示すことができた。よって、任意の系のエネルギー状態を表す固有値集合は、木材の細胞壁分布を評価することが可能であると考えられる。木材の寸法変化は、密度以外にも多くの要因を伴う複雑な現象であるが、第3章を含めて提案した本研究の物理学的アプローチは、多くの要因が個別にではなく協調的にその系に寄与する現象を評価するのに役立つと期待できる。本論文では収縮率と密度の関係性に着眼して議論を進めたが、将来的には密度や収縮率といった特定の性質の枠組みを超えた包括的な評価手法として有効であると期待できる。

## **第5章 地域資源活用における多角的意義の創出のための物理学的考察**

### **5.1 緒言**

第5章は第3章および第4章の延長にあるともいえるが、第1章で述べたように第5章の目的は、木材という資源を通して物理学的考察から地域資源をその地域で使う意義に対して新たな視点を探索することである。我々人類にとってより一般的な欲求である食に関連する「地域資源の活用」を題材として本章は議論を展開する。地域資源や地産地消というワードは地域活性化を促進するために頻繁に耳にするが、研究分野としては社会学や経済学関連からの報告が多い。持続可能な環境の在り方が強く問われるようになった今、これまでにはない視点から地域資源を使う意義を問う必要が求められている。そこで本研究は木材という資源を通して物理学的考察から地域資源をその地域で使う意義に対して新たな視点を探索する。地域資源を使う意義について統計力学をはじめとする物理学的なアプローチから考察する研究はこれまでほとんどなく、本研究はまさにチャレンジングではあるが、多次元的要素が協調的に変動するような複雑な系の理解において、物理学的な考察が有用であることはこれまで述べた通りである。また、木材は自立的に移動が不可能な生物であるため、その環境に適応して生きており、その地域の情報を多く有していると考えられる。木材という資源を通して物理学的考察から地域資源を使う意義を考えることは、地域資源を使うといった複雑な事象に対しても、これまでにはない新たな理解を与えてくれると期待される。そこで本研究は、地域資源を地域で使う意義を問うために、まずは既往の知見を整理し、物理学的視点を取り込むといった新たな提案や、その提案に至るまでの着想点に重きをおいて議論を進める。

### **5.2 地域資源を使う意義における既往の知見の整理**

人口減少や地場産業の衰退等の地域疲弊問題は、日本全体の社会経済に影響を及ぼす避けて通れない課題である。多くの地方自治体は地域再生を求め、様々な施策を講じており、その基盤的な情報提供という役割としても、クラウドファンディングや再

生可能エネルギー、アート、観光、人材育成等の各方面から地域再生における研究が行われている [137] [138] [139] [140] [141] [142]。地域再生や地域活性化に取り組む活動において、食と観光が融合したフードツーリズムがある。フードツーリズムとは、日本において明確な定義づけがないものの、安田（2012）は「地域の特徴ある食や食文化を楽しむことを主な旅行動機、旅行目的、目的地での活動とする旅行、その考え方」と定義しており、地域の食をただ食べるという行為ではなく、わざわざ食べに行くという行為を指す [143]。事実、国内旅行において食目的の旅行者が6割を占めるなど、フードツーリズムは地域活性化における効果的手段として報告されている [144]。昨今は新型コロナウイルス感染症の蔓延によって、人の移動は規制及び自粛されているが、アフターコロナでは、世界における移動が再び自由になることを想定すると、フードツーリズムの需要が大きく下がり続けることはないと考えられる。とはいえ、旅の多様化が進み、地域活性化事業において地域間での競合が激化する中で、より魅力的な地域資源を提示し、わざわざ食べに行く価値を得ることができる根拠を示すことが各地域に求められている。ゆえに、自然や伝統文化を含むその地域特有の資源を活用した取組は、他地域との差別化が期待できるのと同時に、地場産業に経済波及効果をもたらす、地域課題解決における強力な糸口として各地で実施されてきた。研究の側面からもそれらの活動を支持するようにフードツーリズムに関する取り組みが見られ、例えば、石田ら（2019） [145]は、地域の食をどのような観光資源と組み合わせるのが地域活性化において有効であるかを調べるために、地域の食を地域名産の高級料理と B 級グルメの2つに分け、それらを楽しむ観光客が、観光地までの移動や金銭的制約、仲間との時間の共有等のあらゆるセグメントにおいて何を重視しているかについてアンケート調査と分析を行った。結果、B 級グルメを活用するためには、刺激的な観光や移動型の観光に関する地域資源との組み合わせが有効であるなど、地域の食であっても B 級グルメと高級料理ではセグメントが異なることが示され、地域の食と観光資源の組み合わせを的確に実施することがより有効的な地域資源の活用及び地域活性化において重要になると報告されている。このように食に関わる地域資源を用いた地域活性化事業は自治体の実際の取り組みや研究として行われてきている。

しかし、成功している地域は一部にすぎないことも事実である。その要因の一つとして筆者は次のように考えている。これまで考えられてきた地域資源を使うという根

源的動機は、端的に言えば地域の経済を循環させることを中心としているように考えられる。地域活性化や地方再生といった言葉の背景には、常に「経済」という事柄が付き纏っているように見える。そのため地域資源の活用において議論する場合、再生エネルギーや人材育成、観光といった立場や視点は多様であろうとも、暗黙の達成すべき目的は、地域の経済を潤わせることになる。では仮に、地域が疲弊していなかったら、少量ロットで効率の悪いと考えられる地域産の資源を使う意義はなくなってしまふのであろうか。地域を維持し活性化させるために地域資源を有効に使うことは言うまでもなく重要なことであるが、“地域の資源を地域で使う”という事象には、「経済」という人間都合の合理性だけでなく、自然の仕組み、すなわち物理法則としての合理性もあるのではないだろうか。地域資源を活用した地域活性化事業を成功させている地域は一部しかないと上述したが、経済合理性を中心として考えてしまうと、地域資源を活用して地域活性を促すのは容易には達成できないと考えられる。なぜなら、生産者の立場からすると、高価な地域の素材を使うという選択がとりにくく、一方で消費者の立場からすると、いくら地域志向が高まりつつあっても、価格以上の価値がなければリピーターにはなり得ないというジレンマが生じてしまうためである。これらのことを考えると、地域資源の活用の意義について、経済合理性に関わるアプローチが主流であったフードツーリズム 研究や観光学研究において、自然の仕組みや自然の摂理に相当するような自然科学的なアプローチといった新しい視点から地域資源を使う学術的な意義を探索することも必要なのではないだろうか。自然科学的なアプローチから地域資源を使う意義や合理性を導き出すことができれば、地域活性化事業において、他地域との差別化を図るための有益な情報の提示としても貢献できると期待できる。

### 5.3 物理学的考察に至った着想点

そこで本研究は、地域資源を使う意義についてこれまで研究されにくかった自然科学的アプローチ、すなわち物理学的視点から探索することを試みる。具体的にいうと、空気や水、微生物や各種原材料等のその地域で育まれた素材同士（以下、地域産）で作ったものと、その地域以外で生産された外部のものを投入して作ったもの（以下、外部産）では、両者を比較するとそれぞれの素材が反応しあう動向に違いがあるので

はないかといった仮説を立て、その違いを物理学的な考察に基づいて探索を試みる。本研究では、地域産の素材で作ったものと外部産の素材でつくったものという漠然としたそれぞれの事象について、物理学的考察に基づき第3章及び第4章で提示したようなエントロピーを数値として定量的に明示することを成果の一つとして目指す。また、地域資源を活用する意義として、「経済」という人間都合の合理性だけでなく、自然の仕組みを表す物理法則としての合理性もあるのではないかというこれまでにはない考え方を提案していること自体にも、冒頭で述べたように本研究の価値として位置付けたい。

本研究は、地域資源を使う意義について物理学的アプローチを使うといった“手法”としても（すなわち、従来は経済学や社会学関連からのアプローチが多かった）、また、“目的”としても（すなわち、従来は経済合理性を目的とされることが多かった）、従来にはない提案に基づき議論を展開していくが、その切り口として、奈良県吉野町と鳥取県智頭町での杉樽醸造させた地ビール事業をケーススタディとして本研究は実施する。両地域は日本屈指のスギ林業地であり、地域固有資源である杉樽の文化伝統を持つという共通項があるが、それぞれの地域における背景について以下に説明する。

鳥取県八頭郡智頭町は鳥取県の南東部に位置する。2020年農林業センサスによると、総土地面積 22,470 ha に対し、森林面積は 20,753 ha であるため、森林率は 92.4%に達する [146]。また、民有林の総数は 17,337 ha に対し、人工林は 13,628 ha であり、人工林率は 78.6 %を占める [147]。町が杉のまちと宣言しているように、智頭町にとって林業は地域活性化の核となる基幹産業として位置付けられている [148]。慶長スギと呼ばれる樹齢 380 年近くの人工林が現存していることから、池田光政が鳥取藩主に封ぜられた頃にはすでにスギの人工植栽が行われていたと考えると、智頭町林業の歴史は長い [149]。智頭杉の特徴としては、1) 年輪が緻密で木目が均等に詰まった木質のため強く、歪みが生じにくい。2) 中心の材色は鮮やかな淡紅色で、内装材として優美な気品さがある。3) 節のない均一で、同質な木材が揃う。4) 芳香で木の香りが長く続き、気分を和らげることができることがあげられる [150]。樽材としても用いられていた歴史があり、智頭杉の樽丸は「吉野樽丸」として出荷されることもあったこと [149]から、吉野に匹敵する優良な樽丸であったことが読み取れる。長伐期施行における優良な大径材生産は現在も継続されているが、智頭町でスギを樽材として使用し、製造する営みはなくなってしまっている。

奈良県吉野郡吉野町は奈良県の中部に位置する。2020年農林業センサスによると、総土地面積9,565 haに対し、森林面積は7,904 haであるため、森林率は82.6%に達する[151]。また、民有林の総数は77,057 haに対し、人工林は56,695 ha、そのうちの針葉樹面積は56,529 haであり、人工林率は73.6%を占め、人工林のうちスギを含む針葉樹が占める割合は、99.7%である[152]。日本を代表する伝統的林業の一つである吉野では、極端な密植と弱度の間伐を複数繰り返した長伐期施業により、年輪幅が密で均一であり、強度の優れた高級材の産地である[153]。樽の歴史も根深く、明治以降の灘方面における上方酒造業の発展に伴って樽丸や樽酒の需要が高まったことから、香りも良く木目が細かく水漏れしない吉野杉はそれらに用いられる材として重宝された[154]。むしろ、明治後期から大正にかけて吉野林業は樽丸を中心に生産されていた時代背景を持つが、現在では樽はほとんど生産されていない[155]。

近年、木材価格の低迷や林業従事者の高齢化及び後継者不足によって林業は低迷しているが、両地域も例外ではなく、両者の主要産業である林業は衰退傾向にあり、手入れの行き届かないスギ林が増える傾向にある。この現状が続けば、景観の悪化を招くだけでなく、土砂災害等の危険性も高まる。そのため林業の重要性を叫ぶ声が高まりつつあり、スギの利用促進が求められるが、スギ材はヒノキ等と比べ、材が柔らかく、大量ロットの建築材利用に万能には使えない部分もあるため、スギ材利用促進においては、利用方法の多様化を図ることが必要であるといえる。このような背景の中、両地域で地ビールを製造する店舗の一部では、その地域の伝統継承・復活のために杉樽での地ビール製造に手がけようという機運が生まれつつある。とりわけ酒類においては、原材料だけでなく、その地域固有の水などの要素によっても仕上がりが大きく異なることが知られている[156]ものの、“地域の資源を地域で使う”ことを物理学的な視点からアプローチした学術的データは少ない。ビールは、日本酒と比較すると水の影響について厳密にはわかっていない部分があるが、一般的に水の硬度は酵母の働きに影響を及ぼし、濃い色のビールには硬水が、薄い色のビールには軟水が適しているといわれている。ビールの全成分のうち、約9割が水であることを考えると、水は主成分として実質的にはビールの仕上がりに少なからず影響を与えていることが想定される。さらに、その地域に住み着く酵母を用いてビールを醸造した場合、そもそもその地域の水に適した酵母が生育していると考えられるため、両者の反応には自然の摂理といえるような必然な振る舞いをしていることが想像できる。近年の地ビー

ル事業は、その地域で生産された原材料を使用するなど、“その土地ならではの味が楽しめるビール造り”に価値が置かれるようになってきている [157]ことから、同じ地域で産出された原材料同士の反応や振る舞いを明らかにする意義は大きくなってきている。日本の地ビールは品質が向上しており、このことが新たな味わいのビールを求める消費者層を築き上げている [158]。地ビールは日本酒やワイン等の他の酒に比べユニークさが売りとなる傾向が強く、その独自性をいかに明示させて、差別化できるかが求められているといえる。地域の固有資源をその地域で使ったときの原材料同士の反応を、物理学的アプローチによって考察することにより、自然の仕組みとしての合理性を見いだすことができれば、地域資源を使った事業について他地域との差別化を図るための有益な情報になると期待できる。このような背景から、本研究はケーススタディとして“杉樽”と“地ビール”に着眼し実施したが、地域の資源をその地域で使うことにおけるエピソードとして以下にもう少し紹介したい。

地域資源を使う意義を自然科学的アプローチにより明示できないかという着想に至った経緯には、筆者は研究者であり、且つ地域連携リサーチ・アドミニストレーター (University Research Administrator, 以下 URA) という立場であったことが大きい。地域連携 URA では、地域の真の課題を探索し、大学が有する知的資源を融合させ、社会実装を実現できるようにマネジメントを行う。地域と密接な立場であるゆえに直接現場の声を聞くが、「地元産を使ったモノづくりが最も出来のいいものになる」という話をよく耳にする。例えば、「栽培20年以上の他地域の米農家の米を用いるよりも栽培経験が数年であっても地元の米農家の米を用いたほうが発酵が進み、見た目も味も優れたものが出来上がった」という。無論、栽培の質は経験の長い前者の方が優位であるにも関わらず、結果として後者の方が何度試しても優れた製品ができたという。また、ワインの世界では「シャブリには牡蠣が合う」という定説がある。この言葉が生まれてきた背景を読み解くと、シャブリの地層には牡蠣の貝殻が多く含まれるという事実がある。ワインにおけるぶどうはその土地の個性に強く影響され、いわゆるテロワールをもつ。牡蠣の貝殻を含む土で育ったぶどうを用いて醸造されたワインには、牡蠣の要素に由来する特徴を有し、さらには牡蠣という共通点が有効に働くことで料理とのマリアージュが成立しているとも考えられる。これらのエピソードから考えられることとして、空気や水、作物、微生物等の同じ地域で育まれたもの同士が交わり合うからこそ、外部産を使った時とは異なる反応が生み出されているの



ではないだろうか。このことを明らかにできれば、他地域と類似している地域資源でも明瞭に独自性を見いだすことが可能になると期待できる。実際に醸造過程で杉のチップを漬け込んだビールは商品化されており、スギを地域資源として活用したいと考える地域は多くある。このように利用したい地域資源が他の地域と重なることは多々あり、これまでは他地域と差別化することにおいて困難を極めてきたわけだが、その地域で生育したのだからこその特徴を見いだすことができれば話は変わってくる。米農家のエピソードをはじめ上述したことは現場で経験的に言われており、商品の売りとして発信したいと望まれながらも、学術的に証明されていないため、データが足りていない現状がある。

地域資源を活用する意義として、「経済」という人間都合の合理性だけでなく、自然の仕組みを表す物理学的な視点での合理性もあるのではないかというこれまでにはない考え方を提案するまでの考え方や根拠を上述してきたが、このような提案に至るまでの考えやプロセスを提示したことも、本研究の価値の一つと考えている。以下は実際の実験的手順を展開し、その結果に基づいて考察していく。具体的にいうと、空気や水、微生物、各種原材料等のその地域で育まれた素材同士で作ったものと、その地域以外で生産された外部のものを投入して作ったものでは、両者を比較するとそれぞれの素材が反応しあう動向に違いがあると仮説を立て、その違いを物理学的な考察に基づいて探索を試みる (Fig.20)。この反応や動向は、水や酵母といった原材料をはじめとする多次元的な要素が協調的に変動するシステムと考えることができることから、物理学的考察が役立つと期待できる。地域産の素材で作ったものと外部産の素材でつくったものという漠然としたそれぞれの事象について、第3章及び第4章で提案した物理学的アプローチからエントロピーを計算し、数値として定量的に明示することを本研究の成果の一つとして目指す。

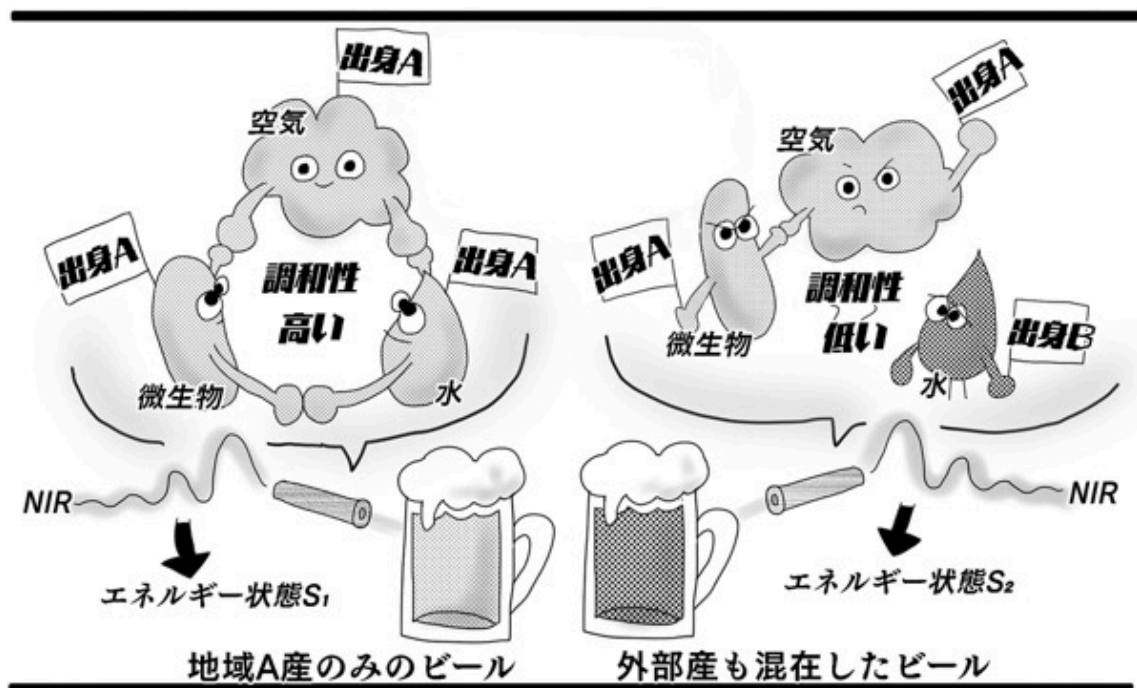


Fig.20. 第5章で提案したイメージ図.

自然の仕組みとして図左のように地域産は各要素同士が仲良くしているが、図右のように外部産は各要素が反発しあっている状態であるのではないかと仮説をイメージした。

## 5.4 供試材料及び実験方法

### 5.4.1 サンプル作成

本研究は、奈良県吉野町と鳥取県智頭町での杉樽醸造させた地ビール事業をケーススタディとして以下の4つの組み合わせを想定し、物理学的考察を実施する。

- A, 智頭で智頭杉樽により製造したビール
- B, 智頭で吉野杉樽により製造したビール
- C, 吉野で吉野杉樽により製造したビール
- D, 吉野で智頭杉樽により製造したビール。

AとCが同じ地域同士で製造したビールとなり（地域産）、BとDが他の地域の要素が混在しつくられたビール（外部産）となる。本研究は初歩的研究と位置付け、スギの木粉を樽の代替として用いて実験を実施した。また、第3章及び第4章で実施してきた物理学的手法により解析するための多次元データは液体でも測定が可能なNIRスペクトルを用いた。

材料は、鳥取県智頭町及び奈良県吉野町の林分から収穫したスギである。樽材に適した特徴を有するために、自然乾燥を2年行なっている材をそれぞれの地域から5個体分（合計10個体分）得た。木粉の作成の手順として、各材に対して辺材と心材の境目である移行材に位置する年輪から心材向きに数えて10年輪目～14年輪目の心材を木粉にした。木粉は、のこを用いて上記の対象の年輪を削ることで採取した。木粉の粒度を揃えるために、直径300  $\mu\text{m}$  のふるいを通し、その木粉が入った蓋付ガラス瓶を智頭杉と吉野杉それぞれ10本作成した。つまり智頭杉はAにガラス瓶5本、Dにガラス瓶5本、吉野杉はBにガラス瓶5本、Cにガラス瓶5本である。それぞれのスギにおいて5個体分用いることで、可能な限りその地域の特性を偏りなく有していることを再現した。ビールは、智頭町及び吉野町それぞれで、クラフトビールの製造を手がけている店舗の協力を得て（以下、智頭町で製造されたビールを智頭ビール、吉野町で製造されたビールを吉野ビールとする）、原材料はそれぞれの地域で育った酵母と水を使い醸造したビールを用いた。大麦とホップはそれぞれの地域での入

手が不可能であったため輸入産という同じ条件で揃えた。製造法及び天然酵母の採取法においても同程度の条件下で実施していただいた。A~D の指定の組み合わせに従って木粉が入ったガラス瓶にビールを注入し、14 日間の期間にて 1 日 1 回 NIR スペクトルを測定した。計測期間中の試料の保存場所は冷蔵庫で、計測時の温度は 4~5°C であった。

#### 5.4.2 NIR 測定

近赤外スペクトルは、フーリエ変換型分光器 (MATRIX-F, Bruker Optics Co., Tokyo, Japan) を使用し、光ファイバプローブ (測定部位の径 $\approx$  3.5 mm) にて拡散反射モードで計測した。NIR スペクトルの計測条件は、波数領域 10000 から 4150  $\text{cm}^{-1}$ 、波数分解能 8  $\text{cm}^{-1}$  とし、SN 比向上のためスキャン回数を 32 回とした。計算の煩雑さを軽減することを目的として、本研究の分析では、7200  $\text{cm}^{-1}$  から 6500  $\text{cm}^{-1}$  の波数範囲を解析対象とする。スペクトルを分析するにあたり、処理前のスペクトルは正規化され、7200  $\text{cm}^{-1}$  から 6500  $\text{cm}^{-1}$  のスペクトルの波数範囲における合計 170 のデータ点をスペクトル変数として以下の解析に用いた。解析には最も顕著な反応が見られると想定される最終日の 14 日目のデータを対象として以下の解析を行った。

#### 5.5 データ分析

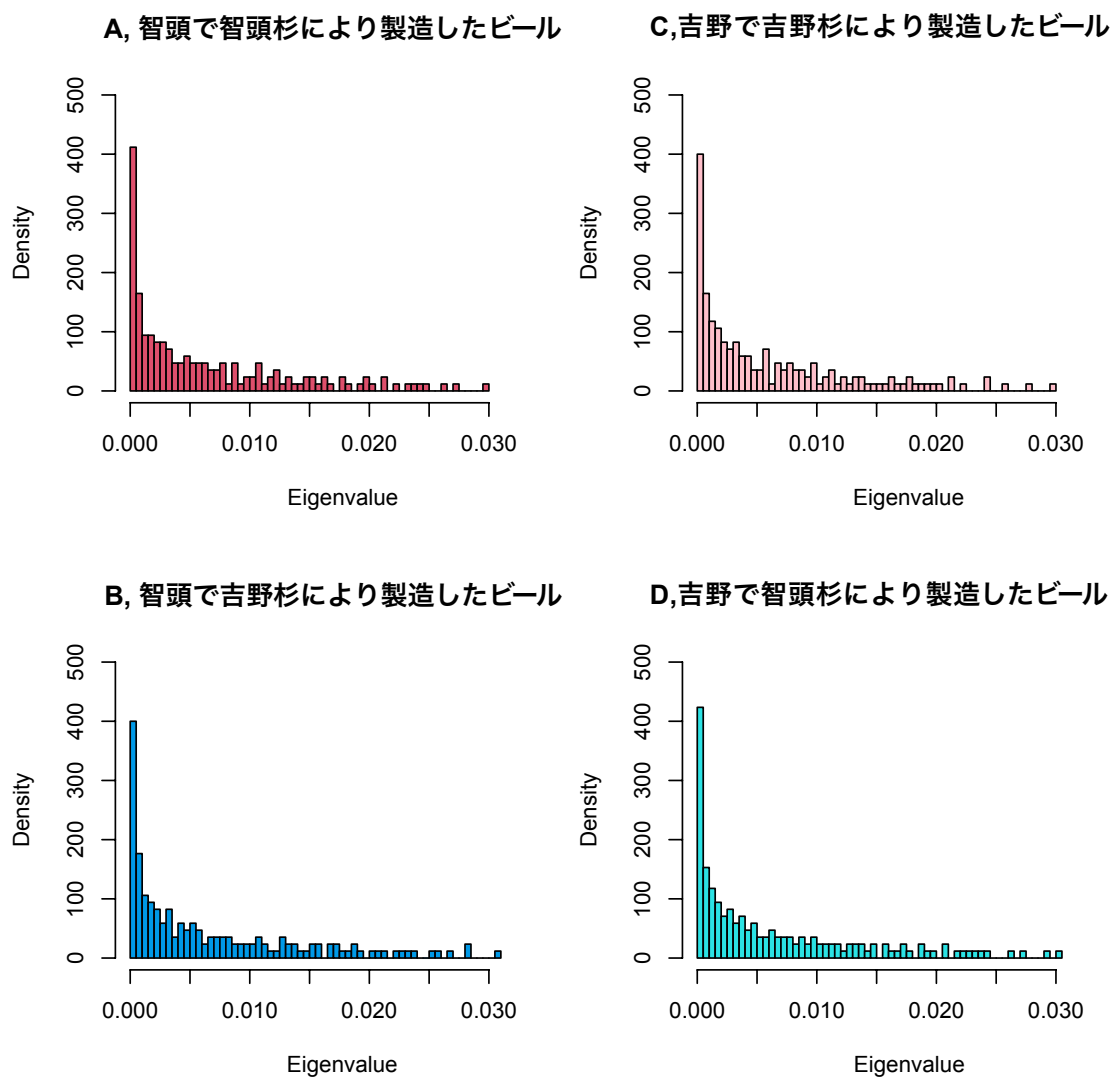
データ分析は第 3 章および第 4 章と同様に、スペクトル行列  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{C} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ ) から計算された分散共分散行列  $\mathbf{C}$  に固有値分解が適用され、固有値問題は、固有値ベクトル  $\mathbf{u}_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) に関する 2 次形式  $\mathbf{u}_i^T \mathbf{C} \mathbf{u}_i$  を最大化することによって解かれる [129] [93]。固有値集合  $\{E_1, E_2, \dots, E_N\}$  は、ハミルトニアン  $H$  と呼ばれるエネルギー関数と見なすことができ、統計力学の処方に沿った分析が可能となる [102] [103] [104]。これらの計算は、R version 4.0.3 の標準関数を用いて実行した。

解析したサンプルは平衡統計物理学の要件に準拠する平衡状態にあると想定した。本研究における NIR スペクトルは、所与の木材の物理学的状態を表す状態ベクトルと見なすことができるが、平衡状態を達成するには、ほぼ同様の変動パターンを示す多

くのスペクトルが必要となる．そのため固有値分析を行うにあたって，ブートストラップのサンプリング手順 [108]に従い 170 サンプルをシミュレートした．各周波数での強度は，測定データの経験的分布に従うと想定され，ブートストラップ標本の平均は，simplebootパッケージを用いて 170 回繰り返すことによって取得された [109]．このシミュレーションは，A~D の各組み合わせに実行され，その結果，それぞれ 170 行×170 列のスペクトル行列データが取得された．また，この 170 行×170 列のランダム行列から計算された分散共分散行列の要素は，ガウス型直交アンサンブルに従うと仮定される．

## 5.6 結果と考察

組み合わせ A~D におけるエネルギー固有値  $E_i$  の分布を Fig.21 に示す．それぞれの分布を比較しても大きな違いはみられなかったため，さらに詳細な検討をするために，シャノンエントロピー  $S$  を数値として算出し考察する．シャノンエントロピー  $S$  の算出方法は第 3 章および第 4 章と同様の手順により求めた (式 (6) ~ (13))．結果，エントロピーは，A, 智頭で智頭杉樽により製造したビールが 4.4987, B, 智頭で吉野杉樽により製造したビールが 4.4905, C, 吉野で吉野杉樽により製造したビールが 4.5282, D, 吉野で智頭杉樽により製造したビールが 4.5060 であった．数値の高い順から並べると，C, D, A, B となった．「CD」「AB」とグルーピングし，グループ間で比較すると，小数点第一位のスケールで差がみられた．「CD」が吉野で製造されたビール、「AB」が智頭で製造されたビールであることから，ビールの種類がエントロピーの数値に大きく影響を与えていることが考えられる．そこでそれぞれのグループ内で，すなわち C と D, A と B をそれぞれ比較した結果，C は D よりも大きい数値を示し，A は B よりも大きい数値を示した．つまり A と C である地域産は，B と D における外部産よりもエントロピーは大きい値となった．この結果から，エントロピーが大きい地域産は，より無秩序な状態であり，一方で，エントロピーが小さい外部産は，より秩序だった状態であると推測できる．地域資源の活用を軸に閉鎖系でない“地域”という系を統計力学的に議論することはたしかに危険性を伴うが，ブートストラップのシミュレーションによって平衡状態であると仮定することで，計算結果に基づいて物理学的な考察を進めることを試みた．以下に示す考察は，一つの考え方



**Fig.21.** 組み合わせ A~D における固有値分布

や見解として述べてみたい。

エントロピーというと熱力学の第二法則を連想できるが、それによると閉鎖系のエントロピーは常に増大するというものである。宇宙は究極の閉鎖系であり、エントロピーが常に増大している状態であるなら、行き着く先のエントロピーが最大になった状態というのは、星や生命といったあらゆるすべての物質が粉々に砕かれて宇宙空間を漂う熱的死であるという。ビッグバンにはじまり時空の構造そのものが時間変化していくという今日の宇宙モデルを考えるとこのような考察の現実的な意味は薄い[159]といわれているが、エントロピーが増大していくといった無秩序に向かう現象がより自然で必然性の高いことであるのは、我々の普段の生活からもうかがえる。コーヒーにミルクを入れたら勝手に混ざることや、熱湯に冷水を入れるとぬるま湯になることは、まさにその例である。そのように考えると、自然の仕組みや自然の摂理としてより必然である方向は、無秩序になっていく向きにあるのではないかと想定できる。本研究の結果では、外部産に比べ、地域産はエントロピーが大きい、すなわちより無秩序な状態であることが示唆された。よって上述した考察に基づくならば、同じ地域で生育した素材同士での反応は、エントロピーが増大するといったより自然の流れに沿ったものだといえる。同じ地域で生育したものの同士の振る舞いは、より無理のない自然の仕組みに沿った姿というのは感覚的にも理解できる。その地域にはその地域の環境に適合できるものしか外部の力なしでは生息できないはずで、その地域に自然に存在しているという事実はある意味、無理がない自然な姿だと考えられる。そのように考えると、何らかの力の投入によって他の地域の素材を混ぜて作った成果物よりも、同じ地域で育った素材同士で作った成果物の方が自然に負荷をかけない状態であるとも考えられる。このことは、地域活性化のために地域資源を使うという従来の意義だけでなく、SDGs といった持続可能な環境のあり方を考えていく一つの見解としても意義があると期待される。

## 5.7 結論

本研究は、まだまだ仮説の段階にあり、更なる研究が必要とされるが、第3章及び第4章で提案した物理学的アプローチにより木材という資源を通し“地域の資源をその地域で使う”といった事象に対してエントロピーを数値で提示し、その結果に基づ

き考察した。これまでにはなかった切り口から仮説を組み立て、地域資源を使う意義について新たな視点から提案できたことは、持続可能な環境のあり方を考えていく一つの見解として貢献できると期待される。



## 第6章 総括と展望

### 6.1 本論文の総括

本論文は大きく3つの目的をもって構成されており、それぞれの目的に対して研究を進めてきた。ここでは全体を振り返り総括する。

本論文の1つ目の目的は、NIR分光法といった光学的手法以外で、複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することである。この目的の背景としては、複数の木材性質を同時に評価できるNIR分光法は、木材の質を保証するために有用な手法といえるが、決してNIRスペクトルデータといった特定の座標系に依らずとも、所与の木材の質（実態）というのを表現できるはずであるという発想に基づく。また、NIR分光器は比較的高価になる場合が多いという側面もある。木材科学の基盤的知見を蓄積するためにも、NIR分光法以外で複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することも重要であるといえる。これらを踏まえて、第2章の研究では、光学的手法ではない立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いて含水率、密度およびヤング係数といった複数の木材性質を同時に非破壊的に推定できるかを試みた。Lassoモデル、PLSモデルの2つのモデルを用いて推定した結果、両モデルとも振動スペクトル情報から回帰に強く寄与する変数を選択することによって、特に含水率と密度については高い精度で推定できることが分かった。このことから、NIRスペクトルのみならず、立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いても含水率や密度といった複数の性質を同時に推定できるといえる。本研究は打撃による振動スペクトルを用いて立木の性質の推定を試みる研究の端緒として、直接立木を実験対象とせず、長さおよび径を揃えた丸太を用い、いくつかの打撃方法で得られた結果に基づき、立木への応用可能性を考察したものでもある。ヤング係数について必ずしも十分な推定精度を得られなかったことも考慮し、今後は実際の立木を対象に、様々な樹齢や径級の個体から幅広いデータを収集して、より信頼性の高い推定モデルの構築を目指す必要がある。

本論文の2つ目の目的は、物理学的な考察を用いて木材の状態やその変動を評価することである。第2章の研究成果からも木材から得られる多次元データを解析することで複数の性質の値を同時に予測できることが明らかとなってきた。一方で、木材は

多次元的な性質が協調的に変動する系であると考えれば、直接的に知り得る限られた性質だけでなく、その背後に隠れた性質の変動を含めた包括的な評価ができるアプローチ方法も必要であると考えられる。つまり、個別に各性質の“値”を追いかけるのみならず、互いの性質が連動し“変化”することに目を向けた包括的な視点により木材の状態やその変化を評価する必要がある。本論文では統計力学をはじめとする物理学的な考察から木材の状態やその変化を評価することを目的としたが、物理学的考察を用いて木材の状態やその変動を評価する研究は木材分野ではこれまでされてこなかったため、その足がかりとすべく、既往の研究で高い正の相関があるとされている木材の密度と収縮率を題材として研究を進めた。既往の研究に基づくと、収縮は細胞壁内の水の挙動により生じるため、同じ密度値を示すサンプル群は同じ収縮率値を示すと考えることができるが、同じ密度値である材でも収縮率は大きくばらつく。その要因として、1. 細胞壁の分子構造の分布の状態、2. 木材の細胞壁分布の状態が考えられるため、第3章は1. 細胞壁の分子構造の分布の状態に着眼し、データはNIRスペクトルを用い、第4章は、2. 木材の細胞壁分布の状態について、木材の断面における光学顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルをデータとして用いて、それぞれ物理学的アプローチに基づき考察した。結果として、両スペクトルの解析ともに、早材を多く有する低収縮率グループは高収縮率グループと比較し、固有値分布が狭く、ヘルムホルツの自由エネルギーが小さく、エントロピーが大きくなった。一方、晩材を多く有する高収縮率グループは低収縮率グループに比べ、固有値分布が広く、ヘルムホルツの自由エネルギーが大きく、エントロピーが小さくなった。また、これらの研究はNIRスペクトルと光学顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルといった異なる情報源からの解析であったが、両結果に整合性が担保でき、既往の研究知見や光学顕微鏡により観察される実際の木材構造の描像と本研究で解析した結果が一致した。よって、物理学的手順に則って同程度の密度値を示す木材の収縮率の変動を議論することが可能であることが示唆できた。

本論文の3つ目の目的は、第3章及び第4章の研究の延長とも位置付けられるが、木材という資源を通して物理学的考察から地域資源をその地域で使う意義に対して新たな視点を探索することである。第3章及び第4章の研究結果からも物理学的なアプローチを適用することにより、多次元的要素により構成される事象に対して、その“系”の振る舞いとして物理学の言葉で表現できることがわかった。地域資源を地域

で使うという事象も多次元的な要因が互いに影響し合いながら変動している複雑な事象であり、また、持続可能な環境のあり方が強く問われるようになった近年では、経済に関連する視点のみならず、自然科学の視点からも地域資源を使う意義を考えることが重要といえる。そこで本研究では、地域資源を使う意義を、その地域の情報を多く蓄積していると考えられる木材という資源を通して物理学的考察から検討する。研究の端緒として、地域資源を地域で使う意義についてこれまでどのような視点から意義があると述べていたのかを整理し、地ビール事業を一種のケーススタディとして研究を進めた。非常にチャレンジングな研究であり、確証を持った明確な答えを導くためにはさらなる研究が必要となるが、ここでは、地域資源を地域で使う意義を問うために、従来の経済合理性とは異なる視点での新たな提案や、その提案に至るまでの考察についても論点を持つ研究と位置付け実施した。既往の研究や見解、現場からの聞き取りをまとめると、現場の実体験としては自然の仕組みとしても地域資源を地域で使うということには意味があるのではないかと考えられていることがわかった。このことを踏まえ、木材（木樽）という地域資源を用いた地ビール事業を例に、物理学的考察に基づいて研究を実施したところ、エントロピーを定量的に明示し、地域資源をその地域で使うことに対し、これまでにはなかった切り口から仮説を組み立て考察した。本研究は初歩的段階であるが、地域資源を使う意義について問いていくための新たな視点を提案できたことは意義があると考えられる。

以上、本論文は3つの目的を柱として構成されたが、これらの研究は、所与の木材の実態（この“実態”というのは“木材性質”及び“木材状態”といった両方の概念を踏まえたうえでの描像、いわゆる野崎 [28]がいったような真の存在のことを本論文では指す）を捉えるうえで、特定の座標系には依らないという概念に基づき考察を深めてきた。木材を“系”として捉えた物理学的なアプローチにより導き出された物理量は、まさにある木材の系の状態（実態）を一言で表現してくれる。木材をはじめ、第5章のトピック（地域資源をその地域で使う意義）のように、世の中は、多数の要素によって複雑に構成された事象や物体で溢れかえっている。それらの実態を表現するには、個別にその要素だけを追いかけても、その実態を簡明に語ることは難しい。最新の装置等を駆使し、木材性質を網羅的に計測することで新たな情報を蓄積していく研究も不可欠であるが、木という生物をさらに深く理解するためには、木材を多自由度の物理“系”として捉えた新たな視点も重要であると考えられる。そのような意

味でも本論文の研究は、木材科学への新たな見解を与える研究として貢献できると期待している。

## 6.2 今後の展望

### 6.2.1 研究手法としての展望

物理学的考察に基づいて木材という多自由度の物理系を包括的に評価する研究は木材分野ではほとんどされてなく、今後はさらに本研究手法の妥当性を向上させるために、NIR スペクトルデータや顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルデータ以外の情報源を用いて分析を行うことや収縮率と密度以外の異なる木材性質を対象に実施するなど基盤的な情報を蓄積させていく必要がある。また、本論文の研究は、物理学的な考察を用いることで、個別に各性質の“値”を追いかけるのみならず、互いの性質が連動し“変化”するといった“系”としての振る舞いを評価してきたが、今後はそこに時間を組み込んだその“系”における時間的変化についても検討していきたい。

第5章では地域資源を使う意義についての新たな視点を提案する糸口として、木材という地域資源を通して物理学的な考察をする研究を進めた。地域資源を地域で使うといった事象以外にも、多次元的要素が協調的に変動する複雑な事象は世の中に溢れている。例えば、木製楽器であるバイオリンの音色は、その楽器が有する多次元的な要素が互いに影響しあった表れであると考えられる。音色は音響学では音波の波形に関係するものと知られており [160], JIS [161]では「聴覚に関する音の属性の一つで、物理的に異なる二つの音が、たとえ同じ音の大きさ及び高さであっても異なった感じに聞こえるとき、その相違に対応する属性」と定義づけられている。バイオリンは、木材の強度と軽さ（密度）が満たされた材を用いて製作され、音がなるという機能を満たした楽器として成立する。しかし、数十億するストラディバリウスと習い初めの人が使う廉価なバイオリンでは、両者とも機能は満たしているにも関わらず、その音色は異なる。その音色の違いは、材料となった木材性質に依るものだけではないが、音色の異なりの背後には、多くの要素が協調的に変化している姿が想像される。この

ことは一例に過ぎないが、地域資源をその地域で使う意義の他にも、木材という資源を通して物理学的な考察をすることで、これまでにない見解を得られる事象は多くあると考えられる。特にバイオリンの音色や木樽熟成をしたお酒の味といった芸術分野に相当する領域では、個別に各性質の“値”を追いかけるのみならず、“系”の振る舞いとして評価することで、音色や味といった複雑な事象を評価する新たなアプローチとして有用性が高いと考えられるため、特にそのような領域を対象として研究を進めていきたいと考えている。

### 6.2.2 研究成果を社会へ発信・還元するための活動の展望

本論文の研究は、学術雑誌および学会にて発表したものを含むが、研究内容や成果を学術の世界だけでなく、国民に広く発信していくことは、研究者における義務の一つといえる。しかし、現実的には科学者は、学会等の科学的な場での発信が多く、非科学者に対して広く発信する機会は少ない。このことは、間接的に木材産業の衰退を招く原因となる可能性がある。なぜなら、いまは非科学者であっても、将来木材分野を支える子供達に木材科学の魅力が行き届いていない可能性が高いからである。学術の場以外での発信を通して、将来の木材産業を支える科学者の卵である子供達に木材の魅力を広く伝えていく重要性は大きい。筆者は研究者である傍ら、地域連携URAとして研究成果における社会的発信を実施してきた。その一環としてこれまで、身近であるが着目されにくい土木を題材とした絵本を執筆するなどの活動をしてきた (Fig.22)。木材科学の魅力を学会発表等の学術の場の発信に留まらず、イラストや低年齢向け図書の製作などを通して、わかりやすく研究内容を発信できる活動を実施することで、学術と一般社会の双方向のサイエンスコミュニケーションを確立することも今後の展望の一つである。



Fig.22. 筆者作/絵 クイズ形式型絵本教材

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，本論文を執筆できる機会をいただき，丁寧にご指導を頂いた主指導教員の鳥取大学 藤本高明准教授に謹んで深く感謝申し上げます。また，多くのご助言とご指導をいただきました副指導教員である鳥取大学 芳賀弘和准教授，島根大学 久保満佐子准教授に心から感謝申し上げます。

杉樽の研究にて，仮説段階であるにも関わらず，親身に話を聞いてくださり，研究材料の提供をはじめ多大なご協力をいただきましたタルマーリー 渡邊格様，奥大和ビール 米田義則様，赤堀農林 赤堀宗範様，吉野林業に携わる野村正夫様，鳥取県立智頭農林高等学校 天川敏之様，智頭町役場 松田絵里様に深く御礼申し上げます。

供試材料の収集にあたり多大なご協力を頂いた鳥取県林業試験場の川上敬介様，鳥取大学農学部附属教育研究林の技術職員である福富昭吾様，米田亜沙美様に感謝いたします。

## 引用文献

- [1] 内閣府, “令和元年度 森林と生活に関する世論調査,” 2019. [オンライン]. Available: <https://survey.gov-online.go.jp/r01/r01-sinrin/2-3.html>. [アクセス日: 2021].
- [2] 林野庁, “令和2年度 森林・林業白書,” 2021.
- [3] 経済産業省, “新型コロナがもたらす供給制約 ; ウッドショックの影響,” 2021. [オンライン]. Available: [https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikai\\_setsu/hitokoto\\_kako/20210719hitokoto.html](https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikai_setsu/hitokoto_kako/20210719hitokoto.html). [アクセス日: 2021].
- [4] 住宅新報 web, “社説 深刻度増す「ウッドショック」 新築・中古流通で内需刺激を,” 2021. [オンライン]. Available: <https://www.jutakus.com/newsp/id/0000047410>. [アクセス日: 2021].
- [5] 日刊木材新聞社, 2021.
- [6] B. Zobel , J. Buijtenen, Wood Variation. Its Cause and Control., Springer, Berlin, 1989.
- [7] B. Zobel , J. Talbert, Applied forest tree improvement., Wiley, New York, 1984.
- [8] B. Zobel , J. Jett, Genetics of Wood Production., Springer, Berlin, 2011.
- [9] K. Takata , Y. Teraoka, Genotypic effects on the variation of wood quality and growth traits in the plantation forest made by cutting cultivars of *Cryptomeria japonica* D. Don., *Journal of Wood Science*, 2002,48(2), pp. 106- 113.
- [10] T. Ikeda, K. Mishima, K. Takata , N. Tomaru, The origin and genetic variability of vegetatively propagated clones identified from old planted trees and plantations of *Thujaopsis dolabrata* var. *hondae* in Ishikawa Prefecture, Japan, *Tree Genetics & Genomes* , 2019,15(80) .
- [11] M. Inanaga, Y. Hasegawa, K. Mishima , K. Takata, Genetic Diversity and Structure of Japanese Endemic Genus *Thujaopsis* (Cupressaceae) Using EST-SSR Markers, *Forests* , 2020,11(9).
- [12] A. Koizumi, K. Takata, K. Yamashita , R. Nakada, ANATOMICAL CHARACTERISTICS AND MECHANICAL PROPERTIES OF *LARIX SIBIRICA* GROWN IN SOUTH-CENTRAL SIBERIA, *IAWA Journal*, 2003, 24 (4),pp. 355-370.
- [13] K. Uchiyama, H. Iwata, Y. Moriguchi, T. Ujino-Ihara, S. Ueno, Y. Taguchi, M. Tsubomura, K. Mishima, T. Iki, A. Watanabe, N. Futamura, K. Shinohara , Y. Tsumura, Demonstration of genome-wide association studies for identifying markers for wood property and male strobili traits in *Cryptomeria japonica*., *PLOS ONE* , 2013, 8(11), pp.1-12.
- [14] 森英樹, スギの成長や材質の QTL 解析と環境による変動, *日本木材学*



- 会 組織と材質研究会 2021 年春の研究会 講演要旨集, 2021.
- [15] 伏谷賢美, 木方洋二, 岡野健, 佐道建, 竹村富男, 則元京, 有馬孝禮, 堤壽一, 平井信之, 木材の科学 2 木材の物理, 文永堂出版, 1989.
- [16] 塔村真一郎, 梅村研二, 木部破断率測定における画像解析法の検討: 目視法による測定値との差異, 木材工業, 2001, 56(4), pp. 167-172.
- [17] 守口海, 今井信, 柴田直明, 吉田孝久, 山内仁人, 現行等級区分法の改良による木材強度の予測精度の向上可能性-許容節径比に相当するパラメータの最適化-, 長野県林業総合センター研究報告 第 28 号, 2013.
- [18] 澤井聖一, 世界で一番やさしい 木材 最新改訂版, 株式会社エクスタレッジ, 2020.
- [19] 尾崎幸洋, 分光学への招待 光が拓く新しい計測技術, 産業図書, 2004.
- [20] 尾崎幸洋, 分光法シリーズ第 2 巻 近赤外分光法, 講談社, 2015.
- [21] 尾崎幸洋., 近赤外分光法-現状と将来, 農業機械学会 第 56 回大会講演要旨, 1997.
- [22] 岩元睦夫, 河野澄夫, 魚住純, 近赤外分光法入門, 幸書房, 2002.
- [23] S. Tsuchikawa, A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper, Applied Spectroscopy Reviews, 2007, 42, pp. 43-71.
- [24] S. Tsuchikawa, H. Kobori, A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology, Journal of Wood Science, 2015, 61, pp. 213-220.
- [25] P. Hoffmeyer, J. Pedersen, Evaluation of density and strength of Norway spruce wood by near-infrared reflectance spectroscopy., Holz als Rohund Werkstoff, 1995, 53, pp. 165-170..
- [26] 北海道立林産試験場材質科, 飯田工業(株), 三友工業(株), 名古屋大学, 木材諸性質評価に適した近赤外スペクトル分析手法の検討, 北海道立林産試験場 年報 平成 21 年度, pp. 30.
- [27] 土川覚, 小堀光, 稲垣哲也, 藤本高明, 伊藤万理耶, 内田一彦, 米森寛, 山内健次, 大倉力, 指田邦夫, 朴善姫., 近赤外分光方式による木材多形質高速非破壊測定装置の開発-含水率および曲げヤング率の推定-, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 2013, 63.
- [28] 野崎亮太, 図解でわかる線型代数, 日本実業出版社, 2004.
- [29] 田崎晴明, 新物理学シリーズ 37 統計力学 I, 培風館, 2018.
- [30] 前野昌弘, よくわかる解析力学, 東京図書, 2021.
- [31] D. Neale, A. Kremer, Forest tree genomics: growing resources and applications., Nature Reviews Genetics, 2011,12, pp. 111-121.
- [32] C. Lepoittevin, L. Harvengt, C. Plomion, P. Garnier-Gege, Association mapping for growth, straightness and wood chemistry traits in the Pinus pinaster Aquitaine breeding population., Tree Genetics and Genome, 2012, 8, pp. 113-126.
- [33] 三嶋賢太郎, 井城泰一, 宮本尚子, 渡辺敦史, 関東育種基本区におけるスギ精英樹クローンの立木材質の評価., 木材学会誌, 2011, 57, pp. 256-264.

- [34] 坪村美代子, 武津英太郎, 渡辺敦史, 関東育種基本区におけるスギ精英樹クローン雄花着花量の評価., 日本森林学会誌, 2013, 95, pp. 156-162.
- [35] 井城泰一, 【特集】ゲノム情報に基づく林木育種の可能性 -スギを対象として- 材質形質育種の可能性, 森林遺伝育種, 2014, 3, pp. 164-166.
- [36] 小泉章夫, 上田恒司, 立木の曲げ試験による材質評価., 木材学会誌, 1986, 32, pp. 669-676.
- [37] V. Bucur, Acoustics of forests and acoustic quality control of some forest products., 2nd Edition, Acoustics of wood, 2006.
- [38] C. Gerhards, Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art., Forest Prod. J, 1982, 32(2), pp. 20-25.
- [39] R. Ross, R. Pellerin, NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves., Forest Prod. J., 1988, 38(5), pp. 39-45.
- [40] 小玉泰義, 音速による変断面形状を有する木材のヤング係数推定方法 (第1報) 丸太材への適用性.: 木材学会誌, 1990, 36, pp. 997-1003.
- [41] 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章, 応力波による立木の材質測定 (第1報) 測定方法と応力波の伝播経路., 木材学会誌, 1992, 38, pp. 739-746.
- [42] 祖父江信夫, シミュレーションによる繊維飽和点以上の木材中における応力波伝播速度の検討., 木材学会誌, 1993, 39, pp. 903-909.
- [43] 池田潔彦, 木野直樹, 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (第1報) スギ立木含水率の季節変動と応力波伝播速度による評価., 木材学会誌, 2000, 46, pp. 181-188.
- [44] 池田潔彦, 大森昭壽, 有馬孝禮, 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (第3報) スギ精英樹立木の材質評価., 木材学会誌, 2000, 46, pp. 558-565.
- [45] 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章, 応力波による立木の材質測定 (第2報) 立木への適用., 木材学会誌, 1992, 38, pp. 747-752.
- [46] 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章, 応力波による立木の材質測定 (第3報) 林分としての立木材質評価., 木材学会誌, 1993, 39, pp. 903-909.
- [47] S. Kumar, K. Jayawickrama, J. Lee, M. Lausberg, Direct and Indirect measures of stiffness and strength show high heritability in a wind-pollinated radiata pine progeny test in New Zealand., Silvae Genetica, 2002, 51, pp. 256-261.
- [48] 井城泰一, 田村明, 西岡直樹, 阿部正信, トドマツ精英樹等クローンの動的ヤング率における樹高方向の変動と立木非破壊評価., 木材学会誌, 2006, 52, pp. 344-351.
- [49] F. Ishiguri, R. Matsui, K. Iizuka, S. Yokota, N. Yoshizawa, Prediction of the mechanical properties of lumber by stress-wave velocity and pilodyn penetration of 36-year-old Japanese larch trees., Holz als Roh-und Werkstoff, 2008, 66, pp. 275-280.
- [50] 釜口明子, 中尾哲也, 小玉泰義, 横打撃共振法によるスギ立木心材含水率非破壊的推定., 木材学会誌, 2000, 46, pp. 13-19.

- [51] 釜口明子, 中尾哲也, 中井毅尚, 横打撃共振法によるスギ立木心材含水率の非破壊調査., 樹木医学研究, 2000, 4(1), pp. 1-7.
- [52] P. Hoffmeyer, The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood, Proceedings of the 4th Non-destructive Testing of Wood Symposium, Pullman, Washington, 1978, pp. 47-66.
- [53] M. Chudnoff, W. E. Eslyn, D. B. Mckeever, Decay in mine timber: Part III, Species-independent stress grading., Forest Prod. J., 1984, 34(3), pp. 43-50.
- [54] 田中俊成, 中井孝, スギ間伐実大材の“PILODYN”により判定した腐朽度と曲げ強度, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 1983, 33, pp. 223.
- [55] D. Cown, Comparison of the Pilodyn and Torsiometer methods for the rapid assessment of wood density in living trees., New Zealand Journal of Forest Science, 1978, 8, pp. 384-391.
- [56] F. Taylor, Rapid determination of southern pine specific gravity with a Pilodyn tester., Forest Science, 1981, 27, pp. 59-61.
- [57] E. Fukatsu, A. Tamura, M. Takahashi, Y. Fukuda, R. Nakada, M. Kubota, K. Susumu, Efficiency of the indirect selection and the evaluation of the genotype by environment interaction using Pilodyn for the genetic improvement of wood density in *Cryptomeria japonica*., Journal of Forest Research, 2011, 16(2), p. 128-135.
- [58] L. Schmleck, R. Evans, J. Ilic, Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy., Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31, pp. 1671-1675.
- [59] L. Schmleck, R. Evans, J. Ilic, Estimation of *Pinus radiata* D. Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy., Journal of Wood Science, 2002, 48, p. 132-137.
- [60] L. Schmleck, R. Evans, Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy., IAWA journal, 2002, 23, pp. 225-234.
- [61] S. Jones PD, G. Peter, R. Daniels, A. Clark, Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia., Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35, p. 85-92.
- [62] A. Alves, R. Simoes, D. Stackpole, R. Vaillancourt, B. Potts, M. Schwanninger, J. Rodrigues, Determination of the syringyl/gDetermination of the syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin by near infrared-based partial least squares regression models using analytical pyrolysis as the reference method., J Near Infrared Spectrosc, 2011, 19, pp. 343-348.
- [63] A. Alves, R. Simoes, C. Santos, B. Potts, J. Rodrigues, M. Schwanninger, Determination of *Eucalyptus globulus* wood extractives content by near infrared-based partial least squares regression models: comparison between extraction procedures., J

Near Infrared Spectrosc, 2012, 20, pp. 275-285.

- [64] A. da Silva, T. Monteiro Pastore, J. Batista Braga, F. Davrieux, E. Arakaki Okino, V. Rauber Coradin, J. Alves Camargos , A. Soares Do Prado, Assessment of total phenols and extractives of mahogany wood by near infrared spectroscopy (NIRS)., *Holzforschung*, 2013, 67, pp. 1-8.
- [65] W. He , H. Hu, Rapid prediction of different wood species extractives and lignin content using near infrared spectroscopy., *J Wood Chem Technol*, 2013, 33, pp. 52-64.
- [66] C. Lepoittevin, J. Rousseau, A. Guillemin, C. Gauvrit, F. Besson, D. Perez, L. Harvengt , C. Plomion, Genetic parameters of growth, straightness and wood chemistry traits in *Pinus pinaster*., *Ann For Sci*, 2011, 68, pp. 873-884.
- [67] M. Schwanninger, J. Rodrigues, N. Gierlinger , B. Hinterstoisser, Determination of lignin content in Norway Spruce wood by fourier transformed near infrared spectroscopy and partial least squares regression. Part 1: wavenumber selection and evaluation of the selected range., *J Near Infrared Spectrosc*, 2011, 19, pp. 319-329.
- [68] M. Schwanninger, J. Rodrigues, N. Gierlinger , B. Hinterstoisser, Determination of lignin content in Norway Spruce wood by fourier transformed near infrared spectroscopy and partial least squares regression analysis. Part 2: development and evaluation of the final model., *J Near Infrared Spectrosc*, 2011, 19, pp. 331-341.
- [69] B. Uner, I. Karaman, H. Tanriverdi , D. Ozdemir, Determination of lignin and extractive content of Turkish Pine (*Pinus brutia* TEN.) trees using near infrared spectroscopy and multivariate calibration., *Wood Sci Technol*, 2011, 45, pp. 121-134.
- [70] S. Tsuchikawa , S. Tsutsumi, Application of near infrared spectrophotometry to wood. 5. Calibration equations for physical conditions of wood., *Mokuzai Gakkaishi*, 1997,43, pp. 149-158.
- [71] W. Gindl , A. Teischinger, The potential of Vis- and NIR-spectroscopy for the nondestructive evaluation of grain-angle in wood., *Wood and Fiber Science*, 2002, 34, pp. 651-656.
- [72] S. Tsuchikawa, M. Torii , S. Tsutsumi, Application of near infrared spectrophotometry to wood. 4. Calibration equations for moisture content., *Mokuzai Gakkaishi*, 1996, 42, pp. 743-754..
- [73] L. Thygesen , S. Lundqvist, NIR measurement of moisture content in wood under unstable temperature conditions. Part 1. Thermal effects in near infrared spectra of wood., *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2000, 8, pp. 183-189.
- [74] L. Thygesen , S. Lundqvist, NIR measurement of moisture content in wood under unstable temperature conditions. Part 2. Handling temperature fluctuations., *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2000, 8, pp. 191-199.
- [75] S. Tsuchikawa , S. Tsutsumi, Adsorptive and capillary condensed water in biological material., *Journal of Materials Science Letters*, 1998, 17, pp. 661-663..

- [76] 堤晴彩, 織辺俊爾, 芳賀弘和, 藤本高明, 振動スペクトルに基づいた立木材質の非破壊推定, 木材学会誌, 2017, 63(6), pp. 291-296.
- [77] C. Bishop, Linear Models for Regression. “Pattern recognition and machine learning” , Springer, New York, 2006, pp. 137-178.
- [78] R. Tibshirani, Regression shrinkage and selection via the Lasso., J. R. Stat. Soc., 1996, B58, pp. 267-288 .
- [79] T. Hastie, “R Package ‘lars’ ,” 2015. [オンライン]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/lars/lars.pdf>. [アクセス日: 2021].
- [80] R. Kramer, Partial Least-Squares. “Chemometric Techniques for Quantitative Analysis” , Marcel Dekker, New York, 1998, pp. 131-142.
- [81] 長谷川健, スペクトルと濃度のそれぞれの誤差. “スペクトル定量分析” , 講談社, 2007.
- [82] Kristian Hovde Liland, Bjørn-Helge Mevik, Ron Wehrens , P. Hiemstra, “R Pack-age ‘pls’ ,” 2021. [オンライン]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/pls/pls.pdf>. [アクセス日: 2021].
- [83] C. Skaar, Wood water relation., Springer-Verlag, New York, 1988.
- [84] J. Dinwoodie, Timber: its nature and behavior, 2nd edn, E & FN Spon, London, 2000.
- [85] 石丸優, 古田裕三 , 杉山真樹, 木材科学講座 3 木材の物理, 海青社, 2017.
- [86] A. Panshin , C. de Zeeuw, Textbook of wood technology, 3rd edn, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [87] J. Newlin , T. Wilkson, The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity, U.S. Dept. Agric. Bull, 1919.
- [88] N. Barber , B. Meylan, The anisotropic shrinkage of wood. A theoretical model., *Holzforschung*, 1964, 18, pp. 146-156.
- [89] B. Meylan, The influence of microfibril angle on the longitudinal shrinkage-moisture content relationship, *Wood Science and Technology*, 1972, 6, pp. 293-301.
- [90] H. Yamamoto, F. Sassus, M. Ninomiya , J. Gril, A model of anisotropic swelling and shrinking process of wood, Part 2. A simulation of shrinking wood, *Wood Science and Technology* , 2001, 35, pp. 167-181 .
- [91] T. Fujimoto, Evaluation of wood variation based on the eigenvalue distribution of near infrared spectral matrix, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2019, 27, pp. 175-180.
- [92] Y. Kabashima, H. Takahashi, First eigenvalue/eigenvector in sparse random symmetric matrices: influences of degree fluctuation, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2012, 45, pp.1-22.
- [93] M. Mehta, Random Matrices, 3rd edn, Elsevier Ltd, London,

- 2004.
- [94] S. Tsuchikawa , M. Schwanninger, A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2), *Applied Spectroscopy Reviews*, 2013, 48, pp. 560-587.
- [95] L. Tu, *An Introduction to Manifolds*, Springer Science + Business Media, LLC, NY, 2008.
- [96] H. Tsutsumi, H. Haga , T. Fujimoto, Variation in wood shrinkage evaluated by the eigenvalue distribution of the near infrared spectral matrix, *Vibrational Spectroscopy*, 2020, 109, pp.1-5.
- [97] Japanese Industrial Standards, *Methods of Test for Woods*, JIS-Z-2101, Japanese Industrial Standards, Tokyo, 1994.
- [98] H. Siesler, D. Burns, E. Ciurczak (Eds.), *Handbook of Near-Infrared Analysis*, 3rd edn., Taylor & Francis, Boca Raton, 2001.
- [99] L. Bokobza, H. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata, H. Heise (Eds.), *Near-Infrared Spectroscopy, Principles, Instruments, Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- [100] H. Bjørsvik, H. Martens, D. Burns, E. Ciurczak (Eds.), *Handbook of NearInfrared Analysis*, 3rd edn., Taylor & Francis, Boca Raton, 2001.
- [101] R. Wehrens, *Chemometrics with R. Multivariate Data Analysis in the Natural Sciences and Life Sciences*, Springer, Berlin, 2011.
- [102] C. Hermann, *Statistical Physics. Including Applications to Condensed Matter*, Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2005.
- [103] C. Helrich, *Modern Thermodynamics with Statistical Mechanics.*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [104] D. Landau , K. Binder, *A Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics*. 4th edn., Cambridge University Press, Cambridge UK, 2015.
- [105] M. Schwanninger, J. Rodrigues , K. Fackler, A Review of Band Assignments in near Infrared Spectra of Wood and Wood Components, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2011, 19, pp. 287-308.
- [106] R. Kubo, M. Toda , N. Hashitsume, *Statistical Physics II. Nonequilibrium Statistical Mechanics*, 2nd edn., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [107] M. Toda, R. Kubo , N. Saitô, *Statistical Physics I. Equilibrium Statistical Mechanics*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.
- [108] B. Efron , R. Tibshirani, *An Introduction to the Bootstrap.*, Chapman and Hall, New York, 1993.
- [109] R. Peng, “Simpleboot: simple bootstrap routines. R package Vignette [R package version 1.1-3],” 2019. [オンライン]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/simpleboot/simpleboot.pdf> . [アクセス日: 2021].
- [110] J Harris, B. Meylan, The Influence of Microfibril Angle on

- Longitudinal and Tangential Shrinkage in *Pinus radiata*, *Holzforschung*, 1965, 19, pp. 144-153.
- [111] K. Abe , H. Yamamoto, Behavior of the cellulose microfibril in shrinking woods, *Journal of Wood Science*, 2006, 52, pp. 15-19.
- [112] J. Wohler, M. Bergensträhle-Wohler , L. Berglund, Deformation of cellulose nanocrystals: entropy, internal energy and temperature dependence, *Cellulose*, 2012, 19, pp. 1821-1836.
- [113] T. Fujimoto, H. Yamamoto , S. Tsuchikawa, Estimation of Wood Stiffness and Strength Properties of Hybrid Larch by Near-Infrared Spectroscopy, *Applied Spectroscopy*, 2007, 61, pp. 882-888 .
- [114] A. Zink-Sharp, J. Barnett , G. Jeronimidis., (Eds.) *Wood Quality and its Biological Basis*, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2003, pp. 197-209.
- [115] F. Schwabl, *Statistical Mechanics*, 2nd edn., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [116] F. Schweingruber, A. Börner , E. Schulze, *Atlas of Woody Plant Stems. Evolution, Structure, and Environmental Modifications.*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [117] M. Fujita, T. Kaneko, S. Hata, H. Saiki, H. Harada, Periodical analysis of wood structure I: some trials by the optical Fourier transformation (in Japanese)., *Bull Kyoto Univ Forest*, 1986, 60, pp. 276-284.
- [118] M. Fujita, H. Hata, S. H, Periodical analysis of wood structure IV: characteristics of the power spectral pattern of wood sections and application of non-microscopic wood pictures., *Mem Coll Agr Kyoto Univ*, 1991, 138, p. 11-23.
- [119] Maekawa T, Fujita M , H. Saiki, Characterization of cell arrangement by polar coordinate analysis of power spectral patterns (in Japanese)., *J Soc Mater Sci Jpn*, 1993, 42, pp. 126-131.
- [120] 藤田稔, 緑川葉子 , 石田洋二, 木材細胞形態の定量的画像処理のための環境設定(第1報) 積算画像処理における各種誤差の検定, *木材学会誌*, 2002, 48, pp. 332-340.
- [121] 藤田稔, 尾形善之, 木材細胞形態の定量的画像処理のための環境設定(第1報) フィルムスキャナによる超広領域画像の非顕微鏡的サンプリングの試み, *木材学会誌*, 2002, 48, pp. 341-347.
- [122] 緑川葉子 , 藤田稔, フーリエ変換画像処理による木部基本組織横断面の形状解析(第3報) 針葉樹 22 種の早材仮道管の形状復元とその特徴を規格化するための数種パラメータ, *木材学会誌*, 2005, 51(4), pp. 218-226.
- [123] Y. Midorikawa, M. Fujita, Transverse shape analysis of xylem ground tissues by Fourier transform image analysis II: cell wall directions and reconstruction of cell shapes., *J Wood Sci*, 2005, 51, pp. 209-217.
- [124] Y. Midorikawa, Y. Ishida, M. Fujita, Transverse shape analysis of xylem ground tissues by Fourier transform image analysis I:

- trial for statistical expression of cell arrangements with fluctuation., *J Wood Sci*, 2005, 51, pp. 201-208.
- [125] 紀昌子, 石田洋二, 土居正明, 藤田稔, 木部細胞形態の定量的画像処理のための環境設定(第3報)細胞壁厚さの高精度測定法, *木材学会誌*, 2004, 50(1), pp. 1-9.
- [126] 緑川葉子, 藤田稔, 木部細胞形態の定量的画像処理のための環境設定(第4報): フーリエ変換画像処理における全体的工程管理, *木材学会誌*, 2004, 50(2), pp. 73-82.
- [127] T. Inagaki, B. Ahmed, I. Hartley, S. Tsuchikawa, M. Reid, Simultaneous prediction of density and moisture content of wood by terahertz time domain spectroscopy., *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2014, 35, pp. 949-961.
- [128] I. Santoni, E. Callone, A. Sandak, J. Sandak, S. Dirè, Solid state NMR and IR characterization of wood polymer structure in relation to tree provenance., *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117, pp. 710-721.
- [129] Y. Kabashima, H. Takahashi, First eigenvalue/eigenvector in sparse random symmetric matrices: influences of degree fluctuation., *J Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2012, 45, pp.1-22.
- [130] H. Tasaki, Typicality of thermal equilibrium and thermalization in isolated macroscopic quantum systems., *J Statistical Physics*, 2016, 163, pp. 937-997.
- [131] K. Sekimoto, *Stochastic Energetics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [132] I. Cave, A theory of the shrinkage of wood., *Wood Sci Technol*, 1972, 6, pp. 284-292.
- [133] H. Tsutsumi, H. Haga, T. Fujimoto, Energetics of the distribution of cell wall in wood based on an eigenvalue analysis, *Journal of Wood Science*, 2020, 66, pp.1-7
- [134] S. Barthelme, “imager: Package ‘imager’,” 2021. [オンライン]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/imager/imager.pdf>. [アクセス日: 2021].
- [135] U. Ligges, S. Krey, O. Mersmann, S. Schnackenberg, “Package ‘tuneR’, R package,” 2021. [オンライン]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/tuneR/tuneR.pdf>. [アクセス日: 2021].
- [136] A. Gelman, J. Carlin, H. Stern, D. Dunson, A. Vehtari, D. Rubin, *Bayesian Data Analysis*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2014, pp. 351-467.
- [137] 松尾順介, クラウドファンディングと地域再生, *証券経済研究*, 2014, 88, pp. 17-39.
- [138] 白井信雄, 李秀澈, 再生可能エネルギーの導入による地域再生への期待: 日本と韓国の国民意識の比較分析, *環境情報科学 学術研究論文集*, 2016, 30, pp. 291-296.
- [139] 長畑実, 枝廣可奈子, 現代アートを活用した地域の再生・創造に関する



- る研究--直島アートプロジェクトを事例として, 大学教育, 2010, pp. 131-143.
- [140] 久保園洋一, 瀬田史彦, 人口減少・高齢化期における公営住宅の活用に関する研究 -地域再生計画に基づく公営住宅の目的外使用に着目して-, 日本建築学会計画系論文集, 2012, 77, pp. 2825-2831.
- [141] 太田隆之, 観光地生のための政策課題と地域政策の可能性・方向性, 静岡大学経済研究センター研究叢書, 2010, pp. 12-47.
- [142] 大野邦夫, 西口美津子, 地域コミュニティの再生に貢献する人材育成に関する検討, 情報処理学会研究報告, 2013, 91(2), pp. 1-8.
- [143] 安田亘宏, 日本のフードツーリズムの変遷についての考察, 日本国際観光学会論文集, 2012, 19, pp. 102-109.
- [144] C. HALL, FOOD TOURISM Around the world, Butterworth Heinemann, 2003.
- [145] 石田貴士, 丸山敦史, フードツーリズムのセグメンテーション分析, 開発学研究, 2019, 29, pp. 34-41.
- [146] 農林業センサス統計, “2020年農林業センサス 市町村の姿 グラフと統計でみる農林水産業 鳥取県智頭町,” 2021. [オンライン]. Available: <http://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/31/328/details.html>. [アクセス日: 2021].
- [147] 鳥取県, “平成 31 年度鳥取県林業統計,” [オンライン]. Available: <https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1027087/R1-1-2..pdf>. [アクセス日: 2021].
- [148] 智頭町役場, “まちの概要 杉のまち,” [オンライン]. Available: [https://www1.town.chizu.tottori.jp/chizu/kikaku/about\\_chizu/gaiyou/](https://www1.town.chizu.tottori.jp/chizu/kikaku/about_chizu/gaiyou/). [アクセス日: 2021].
- [149] 久田喜二, 日本の林業地一生涯立ちと現状一 智頭林業, 社団法人全国林業改良普及協会, 1984.
- [150] 智頭町森林組合, “智頭杉の魅力,” [オンライン]. Available: <http://chizushinrin.com/attraction/index.html>. [アクセス日: 2021].
- [151] 農林業センサス, “2020年農林業センサス 市町村の姿 グラフと統計でみる農林水産業 奈良県吉野町,” 2021. [オンライン]. Available: <http://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/29/441/details.html>. [アクセス日: 2021].
- [152] 奈良県, “令和元年度 奈良県林業統計,” [オンライン]. Available: <http://www.pref.nara.jp/secure/60021/R1ringyoutoukei.pdf>. [アクセス日: 2021].
- [153] 植田拓也, 浦出俊和, 大平和弘, 上甫木昭春, 吉野林業の森林管理における山守の実態とその存続に関する研究, 農村計画学会誌, 2012, 31, pp. 315-320.
- [154] 北村又左衛門, 吉野林業概要(改訂版), 北村林業, 1954.
- [155] 岩水豊, 吉野林業の育林技術の成立と展開, 林業試験場研究報告, 1970.
- [156] 船山淳, 日本酒の味わいと地質の関係の一考察, 日本醸造協会誌, 2016, 111, pp. 801-807.

- [157] ビール酒造組合編, ビール百科, ビール酒造組合, 1993.
- [158] 黄金井康巳, 地ビール業界の現況と展望, 日本醸造協会誌, 2012, 107(1), pp. 11-18.
- [159] 田崎晴明, 新物理学シリーズ 32 熱力学=現代的な視点から, 培風館, 2019.
- [160] 日本音響学会, 音のなんでも小事典: 脳が音を聴くしくみから超音波顕微鏡まで, 講談社, 1996.
- [161] 日本工業規格 JIS-Z 8106 音響用語 (音声聴覚・音楽), 2000.

## 摘要

本論文は、所与の木材のその性質・状態を評価するうえで、座標系の取り方に依存しないという概念のもと、3つの目的をもって研究を実施した。

1つ目の目的は、近赤外（Near InfraRed, 以下 NIR）分光法といった光学的手法以外で、複数の木材性質を同時に評価できる手法を探索することである。この目的の背景としては、複数の木材性質を同時に評価できる NIR 分光法は、木材の質を保証するために有用な手法といえるが、決して NIR スペクトルデータといった特定の座標系に依らずとも、所与の木材の性質というのを表現できるはずであるという発想に基づく。そこで本研究では、立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いて含水率、密度およびヤング係数といった複数の木材性質を同時に非破壊的に推定できるかを試みた。Lasso モデル、PLS モデルの 2 つのモデルを用いて推定した結果、特に含水率と密度については高い精度で推定できることが分かった。このことから、NIR スペクトルのみならず、立木を打撃して得られる振動スペクトルを用いても含水率や密度といった複数の性質を同時に推定できるといえる。

2つ目の目的は、物理学的な考察を用いて木材の状態やその変動を評価することである。木材は多次元的な性質が協調的に変動する系であると考えれば、直接的に知り得る限られた性質だけでなく、その背後に隠れた性質の変動を含めた包括的な評価ができるアプローチ方法も必要であると考えられる。つまり、個別に各性質の“値”を追いかけるのみならず、互いの性質が連動し“変化”することに目を向けた、木材を“系”と捉える包括的な視点により木材の状態やその変化を評価する必要がある。そこで本研究は、木材の状態やその変動を評価するために、“系”を扱う物理学的考察に基づき、その端緒とすべく、既往の研究で高い正の相関があるとされている木材の密度と収縮率に着目し研究を進めた。同じ密度値である材でも、実測しその分布をみると、収縮率は大きくばらつくことが読み取れるが、その要因として、1. 細胞壁の分子構造の分布の状態、2. 木材の細胞壁分布の状態が考えられる。本研究では 1. 細胞壁の分子構造の分布の状態に対して NIR スペクトルを用い、2. 木材の細胞壁分布の状態に対しては木材の断面における光学顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルをデータとして用いて、物理学的アプローチに基づき考察した。結果として、

両スペクトルの解析ともに、早材を多く有する低収縮率グループは高収縮率グループと比較し、固有値分布が狭く、ヘルムホルツの自由エネルギーが小さく、エントロピーが大きくなった。一方、晩材を多く有する高収縮率グループはその逆となった。これらの研究は、NIR スペクトルと光学顕微鏡画像のフーリエ変換から得られたスペクトルといった異なる情報源からの解析であったが、結果に整合性が担保でき、既往の研究知見や実際の光学顕微鏡における木材構造の観察結果と両研究結果が一致した。よって、物理学的考察に基づいて所与の木材の状態やその変動を評価できると示唆される。

3 つ目の目的は、木材という資源を通して物理学的考察から地域資源をその地域で使う意義に対して新たな視点を探索することである。地域資源をその地域で使うという事象も多次元的な要因が互いに影響し合いながら変動している複雑な事象であり、また、持続可能な環境のあり方が強く問われるようになった近年では、経済学等の視点のみならず、自然科学の視点からも地域資源を使う意義を考えることが求められている。そこで本研究では、地域資源を使う意義を、その地域の情報を多く蓄積していると考えられる木材という資源を通して物理学的考察から検討する。研究の端緒として、地域資源をその地域で使う意義についての既往の研究や見解、現場からの聞き取りをまとめると、現場の実体験としては地域資源を地域で使うことは自然の仕組みに逆らわない方法であるのではないかと考えられている場合があることがわかった。このことを踏まえ、木材（木樽）という地域資源を用いた地ビール事業を例に、物理学的考察に基づいて研究を実施したところ、それぞれのサンプルグループに対してエントロピーを定量的に明示し、地域資源をその地域で使う意義に対し、これまでにはなかった切り口から提案した。確証を持った明確な答えを導くためにはさらなる研究が必要となるが、地域資源をその地域で使う意義を問うために、物理学的視点を取り込むといった新たな提案をできたことは意義があると考えられる。

以上、本論文は3つの目的を柱として構成された。所与の木材の実態を捉えるうえで、座標系の取り方に依らないという概念に基づき物理学的に考察することは、多数の要素によって複雑に構成された事象や物体の実態を簡明に表現するために役立つと考えられる。木という生物をさらに深く理解するためには、木材を多自由度の物理“系”と捉えた新たな視点も重要であるといえる。

## **Abstract**

In this paper, we report the results of the research conducted with three objectives based on the concept that “capturing the properties of a given piece of wood does not depend on how the coordinate system is used.”

The first objective was to find a method other than optical ones, such as near infrared (NIR) spectroscopy, that could be employed to simultaneously evaluate multiple wood properties. NIR spectroscopy can be an effective method for assessing the properties of wood. However, we aimed to measure the properties of a given wood sample without relying on a specific coordinate system such as NIR spectral data. Herein, we attempted to simultaneously estimate multiple wood properties such as water content, density, and Young's modulus by analyzing the vibrational spectra obtained on standing trees. Using least absolute shrinkage and selection operator and partial least squares models, it was found that water content and density can be estimated with high accuracy. Therefore, properties such as water content and density can be simultaneously estimated on the basis of NIR spectra as well as the vibrational spectra on standing trees.

The second objective was to evaluate wood variations on the basis of physical approaches. Considering that wood is a system in which multidimensional properties change in a coordinated manner, it is necessary to have an approach that allows the comprehensive evaluation of the properties that can be directly measured but also the variations of other correlated properties. Therefore, this study was based on such a comprehensive approach to evaluate the properties of wood and their variations. As a starting point, we focused on the density and shrinkage of wood, whose correlation was reported in previous studies. Even if the wood has the same density, the measured shrinkage rate varies significantly; the possible causes are the molecular structure of the cell wall and the cell-wall distribution of the wood. In this study, NIR spectroscopy was performed to evaluate the molecular structure of the cell wall, and the cell wall distribution was

analyzed using the spectrum obtained from the Fourier transformation of a microscopic image from a cross section of wood based on a physical approaches. As a result, in both spectral analyses, a low-shrinkage group, containing earlywood, had a narrower eigenvalue distribution, lower Helmholtz free energy, and higher entropy than a high-shrinkage group, which comprised latewood. These properties were analyzed with different techniques such as NIR spectroscopy and the spectrum obtained from the Fourier transformation of a microscopic image from a cross section of wood. These results were strongly consistent with observations from micrographs and previous knowledge of the physical properties of woods. Therefore, wood variations can be evaluated on the basis of physical property approaches.

The third objective was to explore a new perspective on the significance of using regional resources based on physical approaches. The use of local resources is a complex system wherein multidimensional factors influence each other. Moreover, in recent years, given the strong global emphasis on sustainability, it is necessary to consider the importance of using local resources not only from an economic perspective but also from an environmental protection viewpoint. In this study, we conducted research based on physical approaches, considering an example a craft beer business that uses local resources e.g., wood (wooden barrels), and calculated the entropy for each sample group. This has enabled us to determine the significance of using regional resources from an unprecedented perspective. Our research allows the implementation of a new proposal to incorporate a physical perspective for determining the significance of using regional resources in that region; however, further research is needed to derive a definitive and clear perspective.

As mentioned above, this paper is composed of three objectives. The evaluation of physical approaches based on the concept of "capturing the actual condition of a given piece of wood does not depend on how the coordinate system is used" is an effective strategy for expressing the system that are composed of a combination many elements. To gain in-depth understanding of the properties

of wood, a new perspective that regards wood as a physical system with multiple degrees of freedom is important.

## 学位論文の基礎となる学会誌公表論文リスト

1. 題目：振動スペクトルに基づいた立木材質の非破壊推定

著者名：堤晴彩, 織辺俊爾, 芳賀弘和, 藤本高明

学術雑誌名 卷・号・頁：木材学会誌 63(6): 291-296

(DOI:<https://doi.org/10.2488/jwrs.63.291>)

出版: オンライン公表: 受理:

発表年月又は受理年月日（発表予定年月）：2017.11

本研究は学位論文における第2章の基礎となっている。

2. 題目：Variation in wood shrinkage evaluated by the eigenvalue distribution of the near infrared spectral matrix

著者名：Tsutsumi, H., Haga, H. and Fujimoto, T.

学術雑誌名 卷・号・頁：Vibrational Spectroscopy 109(103091):1-5

(DOI: [10.1016/j.vibspec.2020.103091](https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103091))

出版: オンライン公表: 受理:

発表年月又は受理年月日（発表予定年月）：2020.7

本研究は学位論文における第3章の基礎となっている。



3. 題目 : Energetics of the distribution of cell wall in wood based on an eigenvalue analysis

著者名 : Tsutsumi, H., Haga, H. and Fujimoto, T.

学術雑誌名 巻・号・頁 : Journal of Wood Science 66(58):1-7  
(DOI: 10.1186/s10086-020-01908-w)

出版: オンライン公表 :  受理:

発表年月又は受理年月日 (発表予定年月) :2020.9

本研究は学位論文における第4章の基礎となっている。