

応力波を用いた立木ならびに原木の非破壊的な
材質評価とその応用

The applicability of the stress-wave method to the
nondestructive evaluation of the wood properties of
standing trees and logs.

桐林 真人

2017

—目 次—

第1章 緒言

1. 1	日本の林業とスギ	1
1. 1. 1	スギの分布と特性	1
1. 1. 2	日本人の生活と木材としてのスギの関係	1
1. 1. 3	天然スギの減少と人工増殖	2
1. 1. 4	日本の林業におけるスギの現状	3
1. 2	木材産業を取り巻く情勢と非破壊調査	6
1. 2. 1	工業材料としての国産材の現状	6
1. 2. 2	非破壊調査の必要性	7
1. 2. 3	既往の研究	8
1. 3	研究の目的	9

第2章 強度性能に優れたスギ品種の選抜

2. 1	研究の背景	11
2. 1. 1	健全な林業経営のための優良スギとは	11
2. 1. 2	既往の研究と課題	11
2. 2	出力結果の再現性の向上	14
2. 2. 1	センサーの挿し込み手法の検討	14
2. 2. 2	SPT 計測用器具の作製	16
2. 3	計測手法の改良	19
2. 3. 1	SPT に対する打撃手段やセンサー配置等の影響	19
2. 3. 2	材料と方法	20
2. 3. 3	計測	20
2. 3. 4	結果と考察	22
2. 3. 5	まとめ	26
2. 4	強度性能選抜の精度の向上	27
2. 4. 1	角度補正の検討	27
2. 4. 2	材料と方法	27
2. 4. 3	結果と考察	29
2. 4. 4	角度補正の効果確認 (1)	31
2. 4. 5	角度補正の効果確認 (2)	34

2. 4. 6	非破壊的な密度の推定	37
2. 5	強度性能によるスギの選抜	39
2. 5. 1	現地調査の展開	39
2. 5. 2	調査対象林分	39
2. 5. 3	調査方法	41
2. 5. 4	現地調査結果	41
2. 6	まとめ	42
第3章	はい積み丸太の乾燥行程管理への応力波法の適用	43
3. 1	研究の背景	43
3. 1. 1	木質バイオマス発電の増加と背景	43
3. 1. 2	山陰の風土の特性と鳥取県の取り組み	45
3. 1. 3	予備調査と実地調査の準備	45
3. 1. 4	大規模はい積み調査の問題点	46
3. 2	乾燥に伴うはい積み丸太の重量変化とSPTの関係	47
3. 2. 1	既往の研究	47
3. 2. 2	試験	48
3. 2. 3	結果と考察	52
3. 3	大規模はい積みでの乾燥状況の把握	60
3. 3. 1	鳥取県内での燃料用チップの需要の増加	60
3. 3. 2	試験	60
3. 3. 3	結果と考察	67
3. 4	まとめ	75
第4章	応力波法によるスギ葉枯らし乾燥行程の観察	76
4. 1	研究の背景	76
4. 1. 1	スギ材の生産現場における葉枯らし	76
4. 1. 2	葉枯らし材の出材増に向けて	77
4. 1. 3	既往の研究	78
4. 1. 4	葉枯らしでの非破壊連続計測の試み	78
4. 2	林業試験場内での葉枯らし試験	79
4. 2. 1	研究の経緯	79
4. 2. 2	試験体と試験方法	79

4. 2. 3	結果	82
4. 3	現地での実践	84
4. 3. 1	実施業地での葉枯らしのニーズ	84
4. 3. 2	試験体と試験方法	85
4. 3. 3	結果と考察	86
4. 4	まとめ	87
4. 4. 1	葉枯らし乾燥の行程観察	87
4. 4. 2	実際の施業現地での活用提言	87
第5章 応力波法による樹幹内水分量の季節変化の把握		89
5. 1	研究の背景と既往の研究	89
5. 2	試験木と試験方法	90
5. 2. 1	試験木	90
5. 2. 2	計測	90
5. 2. 3	計測期間と計測手法	92
5. 3	結果	93
5. 3. 1	SPT 値の計測結果	93
5. 3. 2	強度性能選抜への影響	95
5. 3. 3	森林施業への活用	96
5. 3. 4	まとめ	96
総 括		98
引用文献		103
謝 辞		108
摘 要		109
Summary		113
基礎となる学術論文、参考論文		118

第1章 緒 言

1 研究の目的

1.1 日本の林業とスギ

1.1.1 スギの分布と特性

スギ(*Cryptomeria japonica*)は一属一種の日本固有の針葉樹で漢名を「倭木」と書く(写真1-1)。スギの天然分布域は北海道・沖縄地方を除く本土の広範に及んでいる。現存する天然林では、水平分布の北限は青森県西津軽郡鱒ヶ沢町の矢倉山国有林(北緯40°42′)、南限では鹿児島県熊毛郡屋久島町の屋久島(北緯30°15′)が確認されており、その分布は断続的に暖温帯から冷温帯に及んでいる。また垂直分布では、和歌山県新宮町の標高0mから富山県中新川郡立山町の立山・剣岳付近の標高2,050m付近に至る低



写真1-1 スギ人工林(八頭町)

山帯から亜高山帯まで広く分布している⁰¹⁻⁰³。現存するスギ天然林の多くは日本海側に偏在するものの、スギは日本の気候風土に広く適合した樹種であるといえる。

スギの特性としては①下種・萌芽・伏條・挿木ともに良く生立する②適地は全国にわたり特に平地溪間に生立する③成長が早く一般に林分生長量が他樹種に比べ大である④材は比較的軽く運搬が容易で、繊維走行が樹幹に対し平行なので加工しやすく狂い少なく構造的性質に優れ香りあり用途が広い⑤常緑で成木の樹幹の形が雄大荘厳である^{03,04}等が挙げられる。加えて、幹が通直貫満なので製材時の歩留まりが良く、密度が比較的小さいので手で触ったときに暖かみ、柔らかみのある”木味”を持つ。このように優れた特性はスギの使用価値を高め、古くから日本人の生活の様々な場面で用いられてきた。

1.1.2 日本人の生活と木材としてのスギの関係

木理が通直で割裂しやすいスギは、簡易な鉄器とくさび程度の比較的簡単な道具で板等に加工することが可能であった。弥生時代の人類の脳が出土し

たことで知られる鳥取県の青谷上寺地遺跡では、水田等農地の矢板や田下駄などの農具、生活雑器などにスギが多く用いられている⁰⁵⁾。2008年までに発掘された建築部材のうち、92%にあたる5645点がスギ材、また樹種の確認できた木製容器524点のうち約50%がスギ材であった⁰⁶⁾。広く山陰地方に於いても、縄文後期には丸木舟や火きり具、弥生中期では農具や漁労具、什器、祭祀用の建築物などでスギ材の利用が認められるほか、中世へ移行するほど出土木材中に占めるスギの割合が高まっている⁰⁷⁾。さらに近世に至ると、建築材では柱・梁等の構造材や天井板・長押等の内装材等で利用されたほか、特に酒等の液体有価物の輸送や貯蔵のシステムを革新させた桶や樽、什器や家具材に幅広く用いられており⁰⁸⁾、往古から現代に至るまで、スギは日本人の暮らしを支えてきた重要な木質資源であるといえる。

以上のように様々な用途で日本の人々の生活を支えてきたスギに対し、19世紀の植物学者 David Don が、日本の隠れた財宝を意味する *Cryptomeria japonica* という学名を献じたのも首肯せられよう。

1. 1. 3 天然スギの減少と人工増殖

このように往古からスギが日本人に利用されてきた背景として、日本の気候風土に育まれた豊かな天然杉林が各地に存在したことが挙げられる⁰⁶⁾。しかし、平安時代の度重なる遷都・造営による乱伐で田上山地など京都周辺のスギ等の森林資源林が衰退した事例⁰⁹⁾や、佐竹氏が秋田移封後の城下の整備や藩財政立て直しのために天然杉を大量伐採した秋田の事例¹⁰⁾など、有史以降は時代を下るほどに天然スギ林が減少した結果、現存する天然杉林は僅少である。中国山地では鳥取県東部(写真1-2)、広島県西部の限られた地域にしか残っていない⁰²⁾。

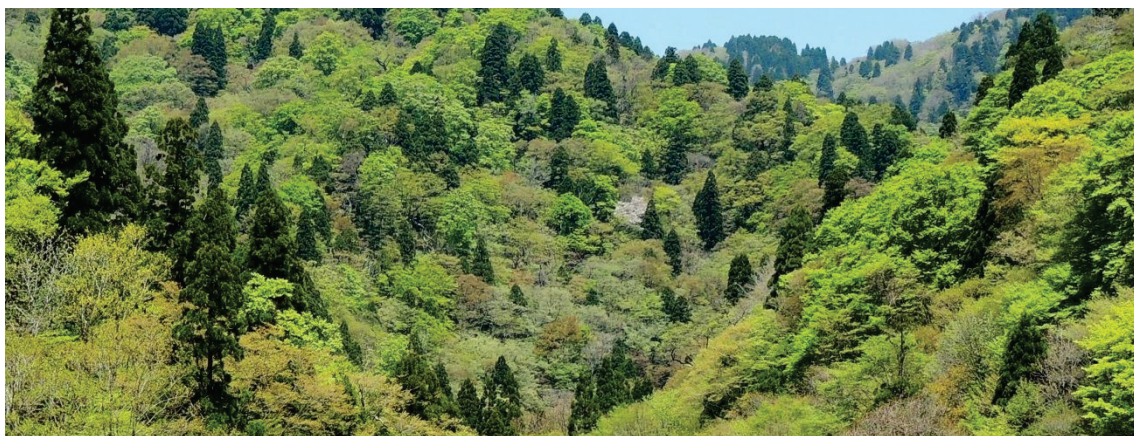


写真1-2 天然スギ(智頭町)

しかし、一方で、挿し木や実生を用いた人工的な増殖が早くから行われていた結果、本州以南のほぼ全域でスギの人工林を目にすることが出来る。

日本の十大林業地の一つと称される鳥取県八頭郡智頭町では、古くから「赤挿法」と言われる挿し木増殖によって小規模ながら人工的な増殖が行われてきた¹¹⁾。同町内には1602年に植林されたと伝えられる¹²⁾「慶長スギ」(写真2)のほか、300年を越えるスギ人工林を筆頭に、林野率90%を越える同町の人工林13,627haのうち、実に64.5%にあたる8,793haをスギが占めている。



写真1-2 慶長スギ(智頭町)

1. 1. 4 日本の林業におけるスギの現状

スギは、我が国を代表する造林樹種の一つとして、戦後の拡大造林施策の展開とともに大面積で造林されてきた。平成24年度の全国のデータ¹³⁾では、全国の造林面積1,029万haのうちスギは448万haで、全人工林の44%を占めている。鳥取県においても全県の人工林面積123,578haのうち50.4%の62,247haがスギで占められている¹⁴⁾(図1-1)。

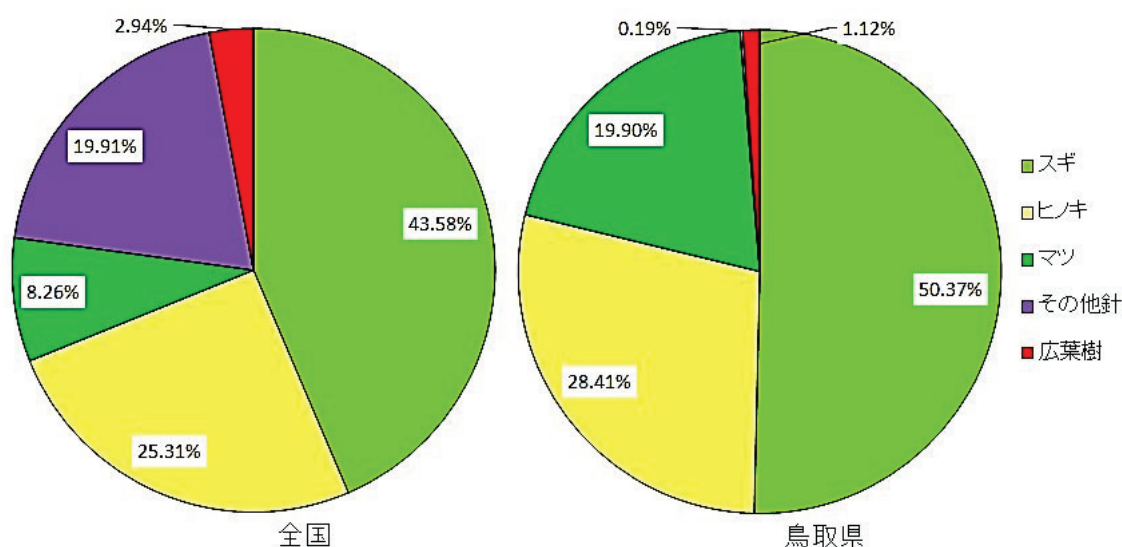


図1-1 全国ならびに鳥取県の人工林における各樹種の割合^{13,14)}

大面積での造林が敢行された一方で、この半世紀に木材を取り巻く情勢は目まぐるしい変転を見せた。昭和 30 年代前半まで、スギ材の価格は諸物価の上昇や国内需要により堅調に上昇基調にあり、木材価格は当面下がりそうにないという見通しが識者から示され¹⁵⁾、投機目的の造林が有望視された。その後、昭和 39 年の木材輸入自由化以降も国産材価格は好景気に下支えされ、昭和 50 年代には最高値を記録し、林野庁は投機目的の造林事業「緑のオーナー制度」を創設し、各地の国有林で皆伐造林を展開した。

しかし昭和 60 年のプラザ合意後に急速に進んだ円高・ドル安により、国産材は安価な外材に市場を奪われる形になって材価が下落する¹⁶⁾。図 1-2 に昭和 35 年以降の全国における木材価格の推移の状況¹³⁾を示す。このような木材価格の下落・低迷は、山間地・林業地域の地域経済に打撃を与えるとともに、山林所有者の造林意欲を減殺させてしまった。

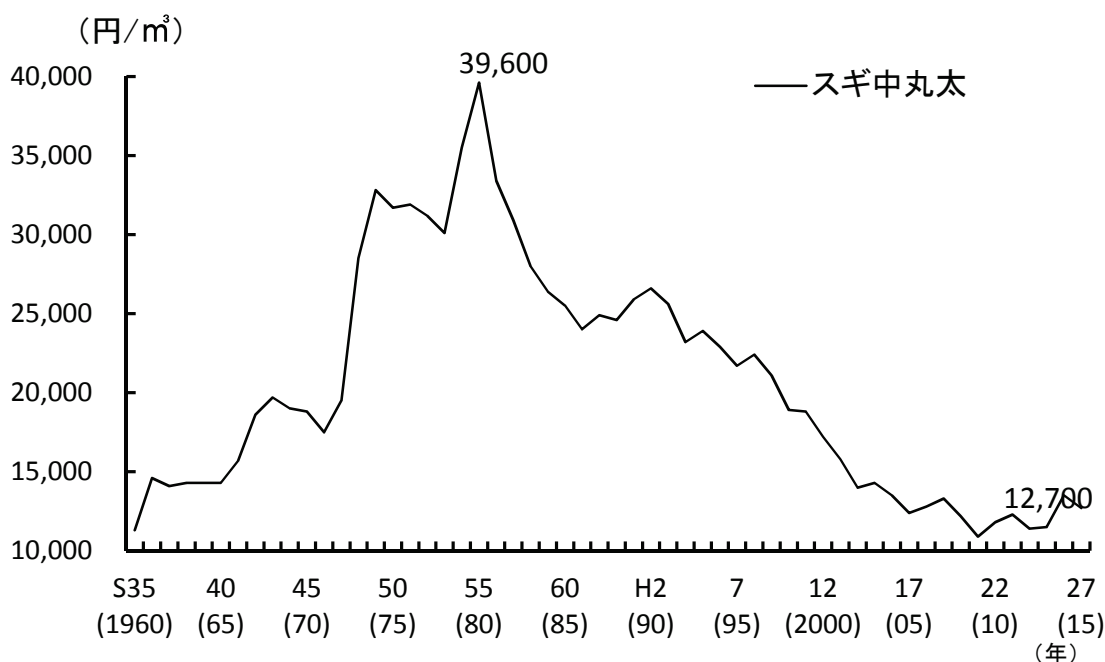


図 1-2 木材価格の推移(全国平均)¹³⁾

一例として、表 1-1 に、鳥取県における標準的な 50 年生スギ林を皆伐再造林する際の試算を示す。この試算に依れば、皆伐によって得られた収益は再造林とその後の保育施業によりほとんど相殺されてしまうことになる。再造林や保育施業では経費の約 7 割が造林事業の補助金として還ってくるので、補助金相当部分が利益といえるが、補助金ありきの森林経営は健全とはいえない。難いうえに、皆伐した初回の林分の造林・保育施業にかかったコストは回収で

きないと考えて良い。なお、各施業の単価には平成 27 年度の鳥取県造林事業標準単価を準用し、補助率は地域森林計画該当、丸太の価格は図 1-2 の平成 27 年度全国単価を用いている。林分材積は鳥取県林分材積表(スギ)八頭地区、伐採搬出はハーベスタやフォワーダ等車両系機械としているが、作業道の開設経費は計上していない。

表 1-1 皆伐再生林の収益試算(鳥取県造林事業実施要領に基づき桐林作成)

(単位:円/ha)

区分	収入	支出	差し引き	備考
前生樹の伐採搬出	0	1,659,000	-1,659,000	皆伐、380m ³ /ha、造材歩留まり0.9
皆伐による収益	4,343,400	304,038	2,380,362	市場手数料7%、スギ、12,700円/m ³
再生林	549,440	808,000	2,121,802	地拵え込、植栽密度3,000本/ha、スギ
10年目までの保育	789,480	1,161,000	1,750,282	雪起こし、追肥なし
11~15年までの保育	160,480	236,000	1,674,762	除伐、枝打ち各一回
合計	5,842,800	4,168,038	1,674,762	←前生樹の植栽保育経費を考慮しない
(うち、補助金)	(1,499,400)		175,362	←造林補助金がない場合の収益

これらの結果、「再生林とその後の保育」という投資が必要で、かつ一時的に公益的機能が発揮できなくなるとされる皆伐施業は激減した。そして、現在は間伐施業による出材が主たる林業生産となっている。

かつては経営戦略の一選択肢である大径良材生産の手法として、一部の優良な林分を対象に長伐期施業が唱えられていたが、現在ではほぼ全ての林分で、経営戦略としてではなく結果論的な長伐期施業へのシフトを強いられつつあるといえよう¹⁷⁾。

ところが、健全な経営が出来なくなった林分では、適期の間伐や枝打ちなど保育施業が不自由分であるため、いわゆる「並材」の大径材が市場へ出荷される事態を招いている。このまま推移すると需給のアンバランスを招き、良材(摘期の保育施業の実施により、無節で年輪幅の均一な通直な構造材が採材可能な丸太をいう)の価格すら下落しかねない。また、林分の高齢化に伴い年間生長量が減少し炭素固定能力が低下するとされているため、地球温暖化などの環境問題の顕在化に伴い地域の森林が担う機能として大きく期待されている二酸化炭素の固定機能が漸減する傾向にある。

以上のような逼塞した状況を打開するためには、次の対策が考えられる。

①個々の木材の性能に応じた適材適所での利用を進め、伐採搬出される木材の付加価値化による単価向上を図る。

②安定した性能の木材生産が可能な産地形成と、森林所有者の林業経営意欲を励起し再造林による森林の公益的機能を回復させるため、品質の明らかなスギ品種を確立する。

国産材の素材生産側と加工流通側が連携し、このような対策を連動させることで、新たな国産材の時代を切り開くことが出来ると筆者は確信する。

1.2 木材産業を取り巻く情勢と非破壊調査

1.2.1 工業材料としての国産材の現状

これまで詳述したように、我が国は温帯モンスーンの温暖多雨な気候帯に属し、往古から人々の暮らしの隣に豊かな森林資源が存在していた。森林から得られる豊富な木材は、住居を始め人間生活の様々な道具に使用されてきた。日常什器を始め、住居にも木材が多用され、現在でも通直性や加工性に優れたスギやヒノキが住居に好んで用いられている。

しかし、平成7年1月17日に発災した阪神淡路大震災が、構造や柱の強度性能に対する一般市民の関心を一気に高め¹⁸⁾、平成7年の建築物の耐震改修の促進に関する法律の制定¹⁹⁾や平成12年の建築基準法の改正を見た。木材業界では日本農林規格(以下、JAS)の機械等級区分²⁰⁾に基づき、性能表示の取り組みを急速に進めている。

一方で、未だに余震の続く関東東北太平洋沖地震(東日本大震災)や、観測史上初めて震度7を立て続けに観測した熊本地震、さらに直近では、震災での死者は出なかったものの多くの家屋が損壊した鳥取県中部地震、そして近い将来に発災が予測されている東海・東南海・南海地震など、多くの家屋が損壊した地震災害の実例や予測は多い。

このような地震災害への不安を払拭できない火山島弧である我が国では、特に近年、住居の「安心・安全」がエンドユーザーから強く問われる時代となっている。また、消費者の住空間に対するニーズが多様化した今日では、工業製品としての木材の「性能」の安定性に対する要求が高まっている。生活様式の多様化に伴い、様々な形の住空間が要求される中、木材の「工業材料」としての位置づけが強まった結果、建築業界からは無垢材・ラミナを問わず、できるだけ高い強度性能を持った木材の安定供給が望まれる状況となっている。

さらに、平成22年に「公共建築物における木材の利用の促進に関する法律」が施行され²¹⁾各自治体でも指針を策定²²⁾した結果、各地で木造公共建築物

が増加した。これらの建築物では、構造材等の強度性能（機械等級区分）が仕様書で指定されるなど、公共建築の現場でも木材に対する強度性能面での要求が厳格になっている。

しかし、木材は生物資源であるため、物理的性能の個体差が大きい^{22,23)}。一例として、鳥取県産スギ材の強度性能の分布²⁴⁾を図3に示す。ヤング係数は平均値 7.35 GPa、最大値 14.67GPa、最小値 2.05GPa、標準偏差 1.44GPa、と大きなばらつきを示している。これでは、求められた曲げ性能（ヤング係数）を有した木材を安定的にまとまった量で供給することが困難であることは想像に難くない。特に大型公共建築物などで、県産材、さらには特定の市町内産材など、地域産の木材を仕様書で指定された場合は、必要な材料の確保が難しく、中でも強度性能のバラツキが大きいスギでは仕様書に規定された資材の調達に難しい。

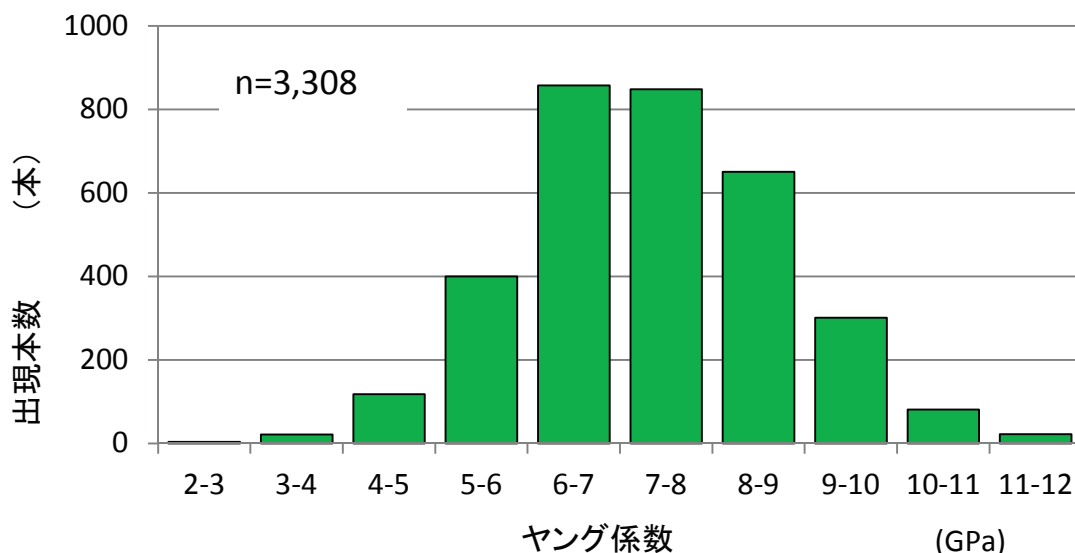


図1-3 鳥取県産スギ材の強度性能（ヤング係数）の出現頻度²⁴⁾

1. 2. 2 非破壊調査の必要性

このような情勢下において、①一定品質の原料や製品の安定供給②市場における原木価格の維持（出来れば価格向上）と山元への高い収益還元③生産の効率化や加工コストの低減、この3つの相反しかねない条件を満たすには、木材の持つ様々な性能を付加価値として活かすことが必要であり、このためには把握した諸性能（木材材質）に基づく適材適所での木材の利活用を図ることが極めて重要となる。

そこで木材工業、林業、それぞれのステージで、加工や伐採以前のコストのかからない、できるだけ早い段階において、木材材質を非破壊的に把握し、用

途に応じた性能を持つ原木や立木の選別を行うことが必要となってくる。特に木材の強度性能については、現状では製造ラインにおいて機械等級区分するまでに、製材、人工乾燥、モルダー加工(かんな仕上げ)といった各工程を経るため、早期の段階での非破壊的手法に基づく強度性能把握は製品の歩留まりや生産コストあるいは原木の付加価値化などに大きな影響を与えうる。

1. 2. 3 既往の研究

木材は生物資源であるため、原材料は各種の性能にばらつきを持つが、工業製品は一定の性能品質を担保されたものでなければならない。木材の含水率や繊維走向、密度、強度などの性能は、工業原料としての木材利用を図る上で重要な要素であるため、木材工業では、超音波や軟 X 線、放射線などを用いた非破壊的な調査手法や可視化が試され、一部は実用に供されてきている^{25,26)}

生産ライン上での非破壊検査対象としては、現状では主に木材の水分(含水率)に関係するもの、節・腐れ等の欠点検出と、強度に関係するものが挙げられる。すなわち、水分計測・乾燥制御、寸法、合板や集成材等での接着の良否判定、原料や製材品の強度性能などである²⁵⁾。強度性能は使用者、設計者、施工者などから、性能の担保や保証を求められており、生産サイドでも材料としての付加価値につなげられる要素として重視されており、各種の非破壊検査手法がグレーディングマシンに採用され²⁷⁾、製造ラインで製品の品質表示に役立てられており、鳥取県内の製材所等にも導入が進みつつある。なお、丸太の段階で調査した強度性能が心持ち製材品やラミナの強度性能と高い相関を持つことがわかっており^{28,29)}、早期の性能把握による選択的な製材による生産コストの削減が模索されつつある。

また、木材中の水分は製品の寸法安定や乾燥コスト、燃料として利用する際の発熱量に大きな影響を与える。このため、含水率等の非破壊的な把握も重要である。特にスギでは、生材含水率が高いうえ、個体毎に含水率のばらつきも大きいため、製品の品質・寸法安定化あるいは乾燥コストのコントロール、さらには木質バイオマス燃料としての利用を考える際に、含水率の非破壊的な把握は欠かせないと考える。

さらに製材加工などの木材工業以前の段階として、林業のステージ、いわゆる川上側で非破壊的な木材性能の把握が可能になれば、選択的な伐採等による生産効率の向上や、目的に即した品種の育成や林分の選択による木質資源の有効活用の展開などを図ることが出来る³⁰⁾。既に生育している個体に

については材質のコントロールができないが、応力波法や曲げたわみ法、あるいは三次元レーザースキャナを使った通直性の計測³¹⁾など、伐採前の生立木での性能把握が試みられつつある。また、今後植林される品種について、優良な遺伝子資源や材質の選抜に基づく新品種育種の実施の展開にも立木の段階での性能把握が重要となってくる³²⁾。

このように林業のステージにおける非破壊的な材質把握は、森林評価システムや素材流通の円滑化、付加価値化のための情報を提供する手段として、さらに将来的には利益率の高い林業経営の展開のためにも期待されている。

1.3 研究の目的

超音波や応力波を用いた非破壊的な性能検査手法は、コンクリート構造物のクラック、あるいは鋳物などの金属製品の探傷や溶接不具合の検出に使われてきた技術である。木材でも、製品の接着不良や含水率検査、さらに街路樹の安全診断(樹幹内部の腐朽の有無の検知)での活用がなされてきた。特に近年は立木の状態での強度性能の把握にも用いられ、林産や育種での応用が広がりつつある。応力波を用いる手法では軽量小型の計測器が市販に供されており山林等での調査に使われているが、出力結果の再現性が低いという欠点があった。

本研究では、簡易で迅速な応力波伝搬時間(Stress wave Propagation Time 以下、SPT)計測が可能な応力波法に注目し、鳥取県の林業のステージでの非破壊的な木材材質の把握とその応用を試みた。これまで述べてきたように、スギは優れた特性を持つ我が国の主要な造林樹種であるが、木材としての強度性能が不安定である。建築物等の強度性能を要求される用途では、柱や梁材に製材した後の性能検査で不合格となることも多く、現場からは強度性能の安定したスギの生産が望まれている。また、木材としてのスギは軽く加工性に優れるものの、生材の含水率が高く、個体差も大きい。このため、木材製品として利用する際の寸法安定性や、エネルギー資源として利用する際の発熱量の確保にあたって、原木の含水率の低減対策が必要であり、現場からは効率的で取り組みやすい乾燥手法の提示を求められている。

そこでスギの付加価値化による林業と中山間地の振興を念頭に、建築業界に要求される性能を持つスギの新品種の探索や、エネルギー資源としての発熱量を確保するためのスギの原料丸太の乾燥状況把握、さらにスギの伝統的な付加価値化技術の一つである葉枯らし乾燥による含水率低減効果の把握について、SPT 計測による非破壊的な強度性能や水分量などの材質の把握と

その活用を試みた。

第2章では、次世代の木材産地形成を睨んだ、強度性能に優れた新たなスギ品種の確立のための、鳥取県産スギ生立木を対象とした SPT 計測に基づく強度性能選抜と、この調査に付随した SPT 計測の出力結果の再現性の向上にかかる計測手法の改良の取組や、立木状態で推定した強度性能と伐採後の丸太や製材品の強度性能との関係について述べる。

第3章では、増大しつつある木材のエネルギー需要を背景に、現場で問題となっている燃料用チップの原料丸太の乾燥手法の提言を目標に、応力波法の適用を試みた。第2章で改良した計測手法に準じた出力結果の再現性の高い SPT 計測を用いて、原料丸太の乾燥状況を効率的に把握する手法を確立し、この手法を用いて鳥取県における原木ヤードでの原料丸太の乾燥の実態を把握し、原料丸太の乾燥に必要な期間の解明に取り組んだ。

森林施業の伐採搬出現場で実施可能な構造材用スギ原木の価格向上対策の一つとして「葉枯らし乾燥」があるが、葉枯らしによる具体的な水分低減効果や、鳥取県内での葉枯らし期間についての研究事例が少ない。そこで第4章では、現場の作業効率維持と、虫害や変色のリスク回避に必要な、葉枯らし乾燥に要する期間の非破壊的な把握を目標に、応力波法の適用を試みた。第2章で改良した計測手法に準じた出力結果の再現性の高い SPT 計測を用い、伐採されたスギ樹幹内の水分変化を調査し、葉枯らしの必要期間の把握を試みるとともに、必要期間の把握によって可能となる葉枯らし材生産のための施業パターンの可能性にも触れる。

林業の現場では一般に「材に水の多い時期、少ない時期がある」と云われる。このような生立木の樹幹内水分の季節変化が事実である場合、第2章で実施した強度性能調査結果に影響する可能性があるが既往の研究事例が少なかった。そこで第5章では、樹幹内水分量の季節変化の把握ならびに変化による強度性能調査への影響の確認に対して応力波法を適用した。第2章で改良した計測手法に準じた出力結果の再現性の高い SPT 計測を用いて、スギ生立木の特定区間を対象に長期間の継続調査を実施し、樹幹内水分量の季節変化の把握を試み、強度性能調査への影響を考察した。また、その結果を参考に、搬出の効率化のための低含水率時期での伐採を提言する。

なお、本論では特に断りの無い限り、「含水率」は全乾法に基づくドライベース(DB)の含水率であり、その算出方法は次のとおりである。

$$\text{時点含水率 (DB) (\%)} = (\text{時点重量 (g)} - \text{全乾重量 (g)}) \div \text{全乾重量 (g)}$$

第2章 強度性能に優れたスギ品種の選抜

2.1 研究の背景

2.1.1 健全な林業経営のための優良スギとは…

前章で述べたように、建築現場で必要とされる強度性能を持つスギ材の大量安定供給は、現状では困難を伴うことが多い。しかし一方で、スギの強度性能は遺伝率が高く育種による改良効果が大いこと^{33,34)}や家系間で差が認められること^{35,36)}等が知られており、強度性能に優れた品種の種苗を育成し、皆伐・再造林をする際に選択的に植栽すれば、将来的に建築ニーズに対応可能な産地形成が可能となると考えられる。このことは、他産地との差別化や有利販売につながる。また、付加価値化に伴う有利販売をテコに、強度性能に優れたスギ品種の種苗を戦略的な山林経営のアイテムの一つとして普及すれば、山林所有者の再造林への意欲を励起し、皆伐再造林の低迷を打開し、健全な林業経営を展開することも可能となる。

このためには、既存のスギ精英樹等の持つ優れた成長性・良好な幹形などの性能^{37,38)}に、高い強度性能を加味した品種を確立する必要がある。そこで鳥取県林業試験場では、強度性能に優れたスギ品種を選抜する研究「強度性能に優れた鳥取県産スギ品種の選抜」に取り組むこととし、筆者が研究担当者となった。この研究では、調査した強度性能に基づきスギ個体を選抜し、母樹として保存することを目的としているため、生立木の状態で強度性能を知る必要があり、非破壊的な手法により強度性能調査を行うこととなった。

2.1.2 既往の研究と課題

生立木での非破壊的な強度性能の調査方法としては、主に次の2つが挙げられる。

- ①静的手法…実際に負荷をかけて「たわみ」を計測する手法
- ②動的手法…超音波や応力波の伝搬時間を計測する手法

このうち①の曲げたわみ法については、治具や計測器の設置などの手間で一本あたりの測定に時間がかかる³⁹⁾、負荷により形成層が傷つくなど、障害が残る、計測対象が人間の体重程度の荷重で適度にたわむような径級の木に限られる、計測時に風の影響を受ける^{40,41)}などの弱点がある。

また②の超音波法では、超音波は木材中での振動の減衰が著しいうえ、超音波が樹皮を透過することが困難なので立木への適用が難しい⁴¹⁾。

一方、②の応力波を用いる計測の場合、計測は比較的簡易で風等の影響

を受けにくいというえ、応力波の伝搬距離は長いので評価対象区間を長くすることが可能である。

応力波伝搬時間 (Stress wave Propagation Time 以下、SPT) の計測による材料評価手法 (以下、応力波伝搬法) では、下式 (1) により応力波伝搬法ヤング係数 E_{WS} を算出する^{30,42)}。

$$E_{WS}(\text{GPa}) = V^2(\text{km/s}) \times \rho(\text{g/cm}^3) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 E_{WS} 、 V 、および ρ はそれぞれ応力波伝搬法ヤング係数、応力波の伝搬速度、密度である。SPT 計測では樹幹に配置した 2 つの加速度センサー間の SPT を測定するが、 V はセンサー間の距離 l を SPT で除して求められる。既往の研究により、立木等の計測で得られた E_{WS} は、伐採後の丸太や製材品で得られる動的ヤング係数 (以下、 E_{fr} 、下式 (2)) と有意な相関関係を持つことが確認されている^{32,41-44)}。

$$E_{fr}(\text{GPa}) = (2 \times \text{共振周波数}(\text{Hz}) \times \text{試験体の長さ}(\text{m}))^2 \times \rho(\text{g/cm}^3) \dots \text{式(2)}$$

なお、立木における SPT 計測では、立木自体の自重は SPT に影響を及ぼさないことが確認されている⁴³⁾ また、応力波の振動数が可聴域程度に十分低ければ、繊維飽和点以上の自由水が木材実質と同相で振動できると考えられ、その結果、木材実質に水分を加えた見かけの密度 (有効密度) で木材のヤング係数を推定できることが報告されている⁴⁵⁾。これらの結果、生立木で計測した SPT に基づき算出した E_{WS} は E_{fr} との相関が高くなると予想される。

近年、立木の強度性能調査で主に用いられている計測機器の FAKOPP (FAKOPP Enterprise (ハンガリー) 製 (写真 2-1)) は、軽量小型でハンドリングに優れ、電池寿命も長く、センサーの設置や計測が簡便で一本あたりの計測時間が短いので、広範囲の山林を跋涉する現地調査に適している。また FAKOPP で計測した SPT に基づき算出された E_{WS} は個体や林分調査に有効であることが報告されている^{46,47)}。



写真 2-1 FAKOPP

そこで、筆者の研究では、FAKOPPによるSPT計測で立木の強度性能選抜を実施することとした。

FAKOPPでのSPT計測では、図2-1のようにスタートセンサーとストップセンサーの2つのセンサーを、樹幹軸方向に平行に1.0 m 間隔で配置し、ハンマー等を用いてスタートセンサーを打撃して起動する^{42,46,47)}。

しかし、筆者らがこの方法に倣ってSPTを計測してみると、以下のような不具合の発生を確認した。

- ①センサーの差し込み深さが浅いと、SPTの値が異なりやすい。
- ②同じ個体でも計測箇所を変えると値が異なる。
- ③同じ個体の同じセンサー配置でも、打撃力に応じてSPT値が変動する。

非破壊的に推定した強度性能に基づき選抜したスギ個体が、次世代の鳥取県の林業の起爆剤として十分機能するためには、選抜されたスギ個体は必ず高い強度性能を保有していなくてはならない。このためにはSPT計測が信頼性の高いものであることが必須であると考えた。そこで、FAKOPPでのSPT計測における出力結果の再現性を向上させた上で、現地調査を実施した。

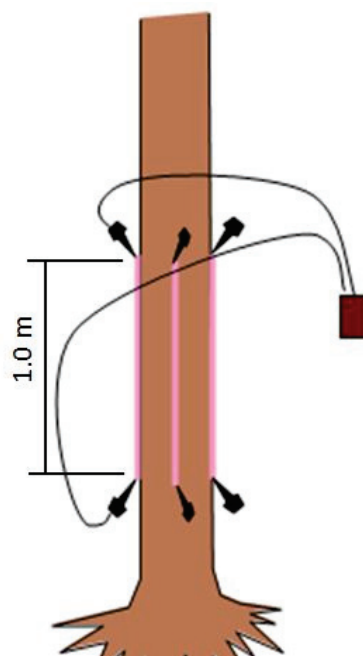


図2-1 FAKOPPでのSPT計測

本章では、野外での応力波伝搬法において安定したSPT値を得るための最適条件を明らかにすることを目的として、センサーの挿入深さ、打撃手段、センサー配置、センサー間隔などの計測手法について、スギ丸太やスギ立木等を用いて計測値の変動係数の比較や計測値の整合性を検討し、出力結果の再現性の向上を図った。さらに立木で推定した強度性能と伐採後の丸太や製材品で計測した強度性能との比較を行い、強度性能の推定精度を検討した。そしてその成果をふまえて鳥取県内で実施した現地調査について述べる。

2.2 出力結果の再現性の向上

2.2.1 センサーの挿し込み手法の検討

2.2.1.1 不具合の確認

「強度性能に優れた鳥取県産スギ品種の選抜」の研究着手にあたり、FAKOPP での SPT 計測手法について関連文献を探すとともにメーカーや先行する他県公設試等の研究機関に問い合わせたが、「樹幹に平行に配置したセンサーをハンマーで打撃する」ということ以外の詳細な情報は得られなかった。そこで、鳥取県林業試験場内のスギ立木で SPT 計測の試行を開始したが、着手時点で第一の問題に直面した。センサーを樹幹に挿す際、手で押し込んだ場合とゴムハンマーで差し込んだ場合とで SPT 値のばらつき具合が異なることが認められたのである。他県情報では、手で押し込む、ゴムハンマーで叩く、他に、センサー先端が形成層に届く程度に軽く挿す、センサーの針の付け根まで叩き込むなど情報が様々だったため、どの程度センサーを樹幹に挿せばよいのか、明らかではなかった。このためセンサーの挿し込み手法の検討から着手した。

2.2.1.2 材料と方法

センサー挿し込み手法の検討には林業試験場内の 31 年生のスギ立木 3 本を供した。立木 1 本ごとに、東西南北それぞれの方向で、樹幹に平行に 1.0 m 間隔でセンサー設置位置を設定し(前掲図 2-1)、センサー挿入箇所を油性ペンでマークした。なお、以降、任意の距離でのセンサー配置を「測線」と標記する。各測線について、①センサーがぐらつかない程度に手で押し込む場合(1.0~1.5 cm 程度の挿入)、②センサーをゴムハンマーで軽打して挿入する場合(2 cm 程度の挿入)、それぞれについて、5 回ずつセンサーをハンマーで打撃して SPT 値を計測し、①②の別に測線毎に計測値のばらつき(変動係数)を算出した。

なお、計測に際しては、測線毎に計測対象区間を統一するため、測線を設定後、始めに①について SPT 計測を行い、その後、センサーを抜かずに②の条件で SPT 計測を行った。

2.2.1.3 結果と考察

センサーの差し込み手法毎に、得られた SPT 値の変動係数について表 2-1 に示す。なお、センサーの平均挿入深さは、①の条件で約 1.2 cm、②の条件で約 2.0 cm だった。

表2-1 センサーの差し込み方の違いによる SPT のばらつき

センサー差し込み手法 試験数(測線)	手による圧入 12	ゴムハンマー 12
変動係数 最大値(%)	3.08	1.47
変動係数 最小値(%)	0.79	0.39
変動係数 平均値(%)	1.62	1.02
変動係数 標準偏差(%)	0.61	0.33

この結果、センサーを手で押し込むより、ゴムハンマーで軽打する方が変動係数が小さくなることが示された。また、このことについてノンパラメトリック検定(ウィルコクソンの符号順位和検定)をしたところ、有意な差が確認できた($P=0.015<0.05$)。

センサーを樹幹に手で圧入する場合、ゴムハンマーを用いた場合に比べて挿入深が浅いため、計測時の打撃に際して僅かではあるがセンサーがぐらつき、樹幹とセンサーとの密着具合が変化する可能性がある。このことが計測値のばらつきの原因になったと考えられた。

このようにセンサーの差し込みについては、ゴムハンマーでセンサーを数回軽打して2 cm 程度挿入すれば、手で押し込む場合に比べ、安定した SPT が得られることがわかった。山林調査では少しでも荷物を軽減したいところであるが、ゴムハンマーの携行は必須であることがわかった。

しかし一方で、計測時にスタートセンサーをハンマーで打撃する際に、打撃力の差で SPT 値が変化する現象が確認された。このため SPT の計測では、出来るだけ同じ力で打撃するようにしたが、ばらつきの発生を防げなかった。図2-2に、ばらつきの少なかったゴムハンマーでのセンサー挿入にかかる測線毎、個体毎の SPT 値の平均値等を示す。

表2-2 測線毎、個体毎の SPT 値のばらつきと平均値(μ s/m)

試験体No.	A				B				C			
測線No.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
試験数	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
測線毎 平均値 (μ s/m)	316.2	320.2	350.0	330.8	329.0	338.2	333.6	305.6	292.2	286.4	275.4	285.2
測線毎 標準偏差 (μ s/m)	2.39	4.71	3.74	3.11	4.36	1.30	1.82	3.58	3.03	3.21	2.79	4.15
測線毎 変動係数 (%)	0.76	1.47	1.07	0.94	1.32	0.39	0.54	1.17	1.04	1.12	1.01	1.45
個体毎 平均値 (μ s/m)	329.30				326.60				284.80			
個体毎 標準偏差 (μ s/m)	13.83				13.18				6.91			
個体毎 変動係数 (%)	4.20				4.03				2.43			

この現象の解消には同じ力でスタートセンサーを打撃する必要があると考えられた。しかし、地面の傾きやその日の体調など、人力を左右する要素は多いため、全ての個体について、ハンマーを用いて同じ打撃力でセンサーを打撃して計測することは不可能である。このため、ハンマーでセンサーを打撃する限り、打撃力の差による SPT 値のばらつきの発生は収束困難と思われた。

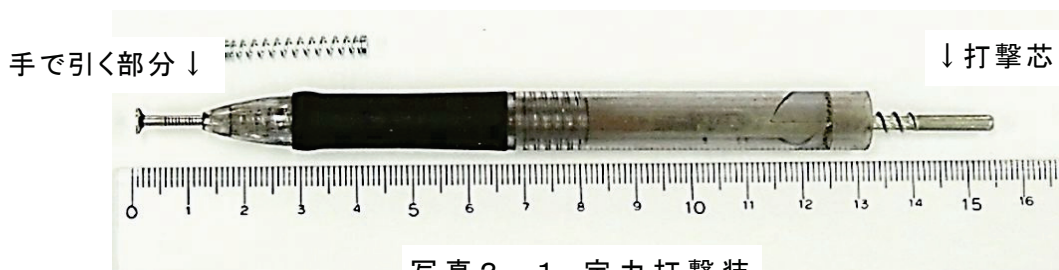
また、表 2-2 に示すように、同じ個体でも測線毎に計測値が異なる傾向があることもわかった。この結果、前掲図 2-1 のセンサー配置による計測では、同じ個体でも測線毎に違う値が出力される可能性が高いことが示された。

2. 2. 2 SPT 計測用器具の作製

2. 2. 2. 1 センサー打撃手段の作製

FAKOPP での SPT 計測における計測値の変動原因の一つとして、ハンマーでセンサーを打撃する際の力の差による影響が大きいと判断した。そこで一定の力での打撃を実現するため、ハンマーに代わる打撃手段として簡便な装置を作製することとした。センサーの起動にどの程度の打撃力が必要か不明だったが、FAKOPP の使用マニュアルに「200～300g 程度の力で打撃する」との記載もあり、比較的小さな力で良いことが想定された。そこで試みに指で弾いたところ十分センサーが反応したので、相当軽い打撃力で起動することがわかった。

定力打撃装置は、打撃力の再現性、現地での作業性や携行性、および研究予算等を考慮した結果、市販のノック式ボールペンを改造して作製した(写真 2-1)。定力の発生は内蔵されているバネに依り、センサーを打撃する射出部先端(打撃芯)には金属棒を使用した。この定力打撃装置は写真 2-2 のように使用する。



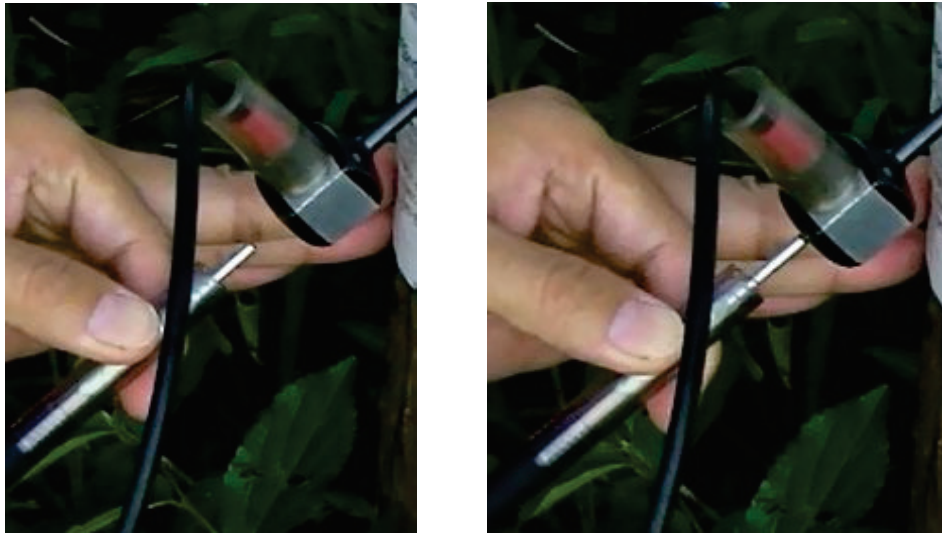


写真2-2 定力打撃装置の使用の状況
尾部をつまんで引っ張り(左)、手を離す(右)

なお、定力打撃装置による打撃でも、ある程度 SPT 値が変動ことが認められた。メーカーカタログによれば $\pm 4 \mu s$ の計測誤差が発生する。このため複数回打撃した結果から異常値を排する、または平均化する手法を取る必要があるが、何回打撃すればよいのか不明であった。このことについても先行する他県の試験場等に問い合わせたが、統一した回答は得られなかった。そこで、打撃回数は7回として、外れ値の可能性のある中央値から遠い2回の計測値を除いた残り5回分の平均値を計測値として用いることとした。

2. 2. 2. 2 センサーの配置の検討と治具の作製

同じ個体を対象に SPT を計測する場合、同じ数値が計測されることが望ましい。しかし、2. 2. 1. 3 で同じ立木でも測線によって数値が異なる傾向があったが、ハンマー打撃による影響の可能性も排せない。

そこで、林業試験場内の平坦地に生育している 31 年生のスギ個体 7 本を対象に、個体毎に東西南北の各方角に図 2-1 のように樹幹に平行な測線を設定して、定力打撃装置を用いて SPT 計測を行い、測線毎の数値を比較した。

この結果、定力打撃装置を用いても測線毎に SPT 値が異なることがわかった。なお、図 2-2 に南側を 100 % としたときの各方角の測線での SPT 値の指数を示す。一般に、立木では北の方角は成長が悪いため年輪が詰まっていると云われるが、このとおりであれば樹幹の北側は年輪幅が狭く、このために SPT は常に最も小さな値となり、100 以下の指数を示すはずである。しかし図示したように南側より小さな値を示す方角は一定していなかった。

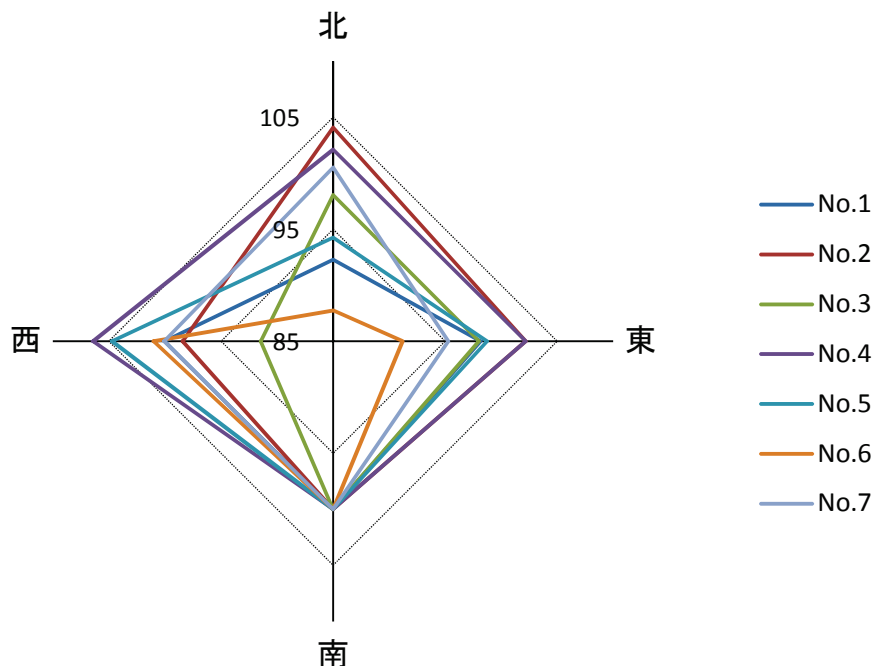


図 2-2 方角毎の SPT 値の指数

このように、同じ個体でも測線毎に計測値が異なる原因として、センサーを樹幹に平行に配した場合、応力波が樹幹の浅いところを経路とするため、局所的な辺材部の評価になりがちで⁴⁸⁾、伝搬経路の枝節や腐れ、あるいはセンサー先端部の早材・晩材の差等に影響を受けてしまうこと^{36,47)}が考えられた。

そこで樹幹の浅いところの性状に影響を受けない SPT の伝搬経路として、樹幹内部を応力波が通過する経路を検討し、センサーを斜めに配置することとし

た。斜め方向では最速の応力波が髓を含む放射断面内を直線的に伝播するとされている⁴¹⁾。

立木に対して斜めにセンサーを配した際、センサー間の正確な距離を数式で求めるには、それぞれのセンサー挿入箇所の直径や垂直距離など複数箇所の正確な計測を要するが、傾斜地の多い山林内での正確な計測は難しい。そこで容易かつ迅速に、正確な間隔でセンサーを配置するため、特にコの字型の木製治具を考案し作製した。この治具は腕木間の内寸を正確に 1.5 m ないし 1.0 m としており、中央には立木等に固定するためのピンを埋め込んである。FAKOPP での SPT 計測では $4\mu\text{s}$ 程度の誤差が出るとされているので、センサー間隔が長い方が誤差を吸収しやすいと予想された。山林での携行を考慮し、治具の主軸には軽量のスギを用い、腕木には強度のあるヒノキを用いた。なお、図 2-3 に治具の模式図を、写真 2-3 に実際の治具を示す。

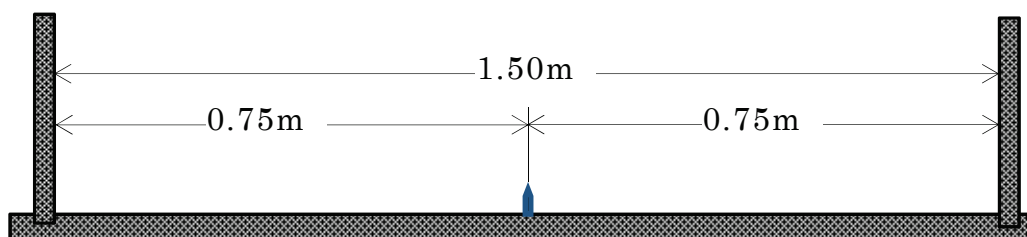


図 2-3 斜めの測線設定用の治具の模式図



写真 2-3 実際の斜め測線設定用治具

2.3 計測手法の改良

2.3.1 SPT 値に対する打撃手段やセンサー配置等の影響

FAKOPP での SPT 計測における打撃手段やセンサー配置の違いによる再現性の検討にあたり、計測手法の違いによる計測値のばらつきを一定の条件下で比較する必要があった。そこで始めに計測者の足場の違いや天候などの影響を排除した状態で、計測手法の違いによる出力結果の再現性を確認し、その後実際の山林で試験することとした。

2.3.2 材料と方法

鳥取県東部の51年生のスギ立木5本から長さ約4mの丸太を各2本(元玉および2番玉)を採材して試験に供した。丸太の情報は下記のとおりである。

長さ方向の中央の直径 179mm~387 mm、平均年輪幅 2.6 ~5.2 mm、密度 0.62 ~0.87 g/cm³、 E_{fr} 5.06 ~9.20 GPa。

なお、丸太の試験は鳥取県林業試験場構内の駐車場内(アスファルト舗装、平坦地)で実施した。

その後、丸太での検討結果を、上述と同じ林分(鳥取県東部の51年生)の立木45本(胸高直径 192 mm~448 mm)に適用し、計測値の再現性や整合性を比較した。

2.3.3 計測

2.3.3.1 丸太での計測

前記の丸太を用いてFAKOPPでのSPT計測に最適な測線の設定、センサー間隔、打撃手段を比較することとした。

測線は、樹幹に対し平行配置および斜め配置の2種類とし、それぞれ対面(図2-4)もしくは対向(図2-5)する2本を設定した。

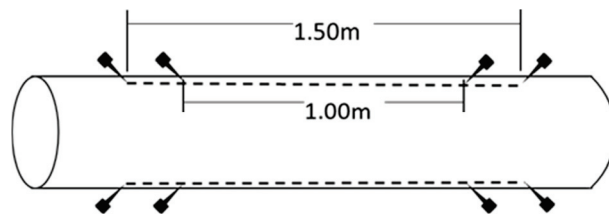


図2-4 平行配置(対面)

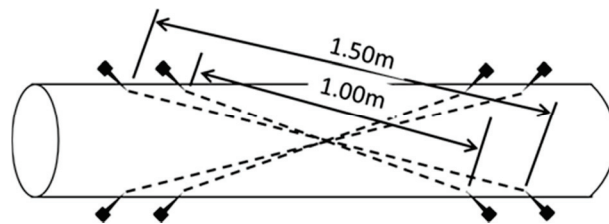


図2-5 斜め配置(対向)

それぞれの配置におけるセンサーの設置間隔(以下、測線長)は、従来の手法に倣った1.0 mと、現地調査で設定可能と考えられる最大限の長さとしての1.5 mの2種類とし、同じ区間の材質評価をするために測線の中心を同一にな

るよう設定した。さらに、木口面から見たときに1回目に設定した測線に対して直交する方向でも測線を設定し計測した(図2-6)。

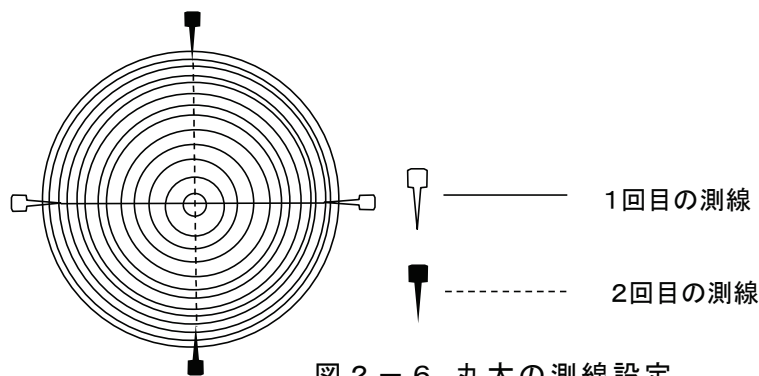


図 2 - 6 丸太の測線設定

スタートセンサーへの打撃方法は、人力によるハンマー打撃と、定力打撃装置を用いた機械的打撃の 2 種とした。一回の計測における打撃回数は 2. 2. 2. 2 に基づき 7 回とし、得られた計測値の変動係数を算定した。さらに中央値から遠い順に 2 つの値を除いた 5 つの計測値の平均値をその測線の SPT 値とし、測線長で除して単位距離あたりに換算した SPT の値を比較した。

センサー配置、センサー間隔、打撃手段のべつによる計測手法の組み合わせを表 2-3 に示す。なお、斜め方向では最速の応力波が髄を含む放射断面内を直線的に伝播するとされている⁴¹⁾ので、応力波はセンサー間を直進すると想定し、斜め測線における測線長は設置間隔のとおりとした。

表 2 - 3 計測手法の組み合わせ

打撃手段	ハンマー打撃		定力打撃装置	
	平行	斜め	平行	斜め
センサー配置	1.0	1.5	1.0	1.5
測線長(m)	1.0	1.5	1.0	1.5

2. 3. 3. 2 立木の計測

立木の調査では、測線は樹幹に対し平行および斜め配置の 2 種類とした。計測者が調査対象木の山側に立って谷側に向いたときの樹幹の左右に測線を設定した。なお、センサーの設置間隔や打撃手段は、丸太の調査で再現性の高かったものを基準とした。立木の調査では、変動係数や単位距離あたりの SPT 値の算出方法を、丸太の調査と同様とした。

2.3.4 結果と考察

2.3.4.1 丸太調査

2.3.4.1.1 計測手法毎の SPT 値のばらつき

丸太での各打撃手段・測線間隔で計測した SPT の出力結果の再現性について、ばらつき(変動係数)を比較した(図2-7)。樹幹に平行な測線長 1.0 m の測線での計測では、ハンマー打撃の変動係数は 4.0 %だが、定力打撃装置を用いると 0.4 %になるなど、ハンマーでの打撃より定力打撃装置での打撃の方が 1/10 まで変動係数が低減し、出力結果の再現性が高まることがわかった。さらに、同じ測線長の場合では、樹幹に平行な測線に比べ斜めの測線の方が出力結果の再現性が高くなり、同じ配置の場合は測線長が長い方が出力結果の再現性が高まる傾向が示された。なお、計測結果について、打撃手段、センサー配置、センサー間隔それぞれの測定条件での変動係数の差異についてウィルコクソンの符号順位和検定を行ったところ、いずれも有意な差を確認した($P<0.01$)。

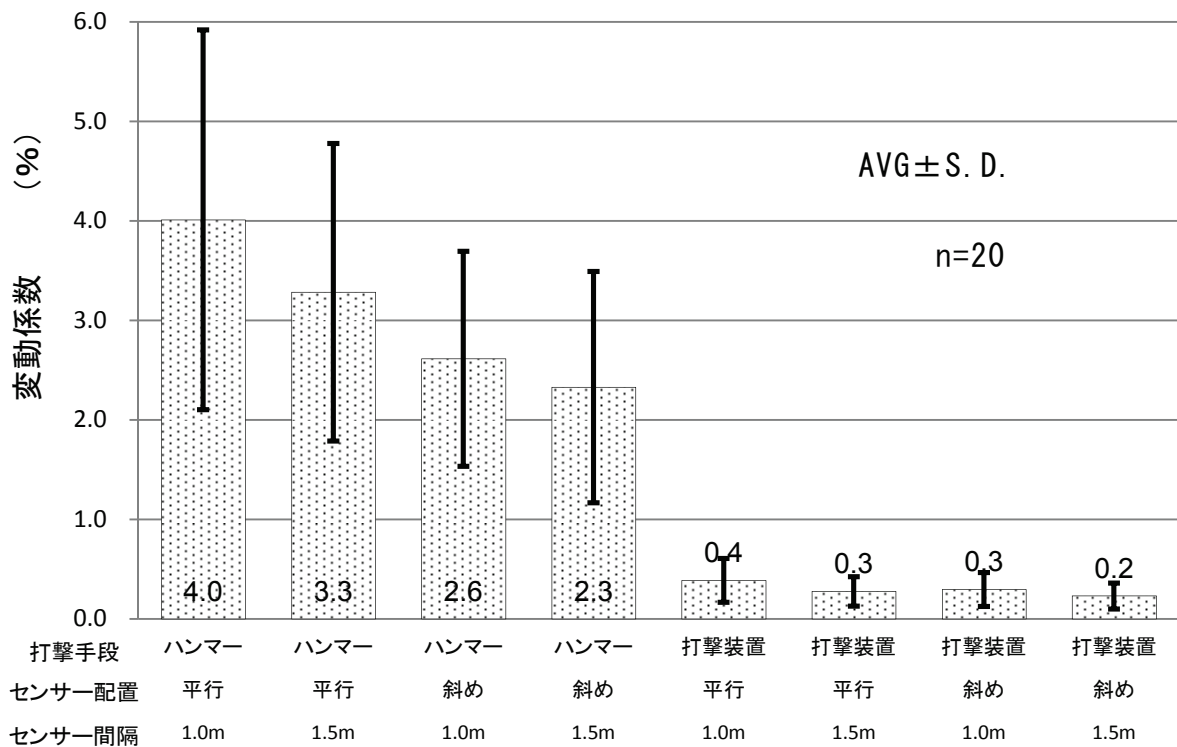


図2-7 丸太計測における計測手法毎の計測値のばらつき

これらの結果、丸太における SPT 計測においては、測線長 1.5 m での斜め配置で定力打撃装置を用いる手法が、従来手法に比べ変動係数が約 1/20 に低減し、最も出力結果の再現性が高まることがわかった。

式(1)からも明らかなように、SPT 値は E_{WS} の算出に際し-2 乗で寄与する。したがって、SPT 値のばらつきは、 E_{WS} 推定に大きく影響する。そこで、丸太の E_{fr} と、打撃で得られた全ての SPT による、密度を 800 kg/m^3 と仮定したときの E_{WS} との関係を見たところ、ハンマー打撃による 1.0 m 間隔の平行測線(以下、従来手法)での計測では E_{WS} のばらつきが大きいため相関もやや弱い値となったが、定力打撃装置を用いた 1.5 m 間隔の斜め測線での計測(以下、新手法)では E_{WS} のばらつきが小さくなり、やや高い相関が示された(図2-8(a)(b))

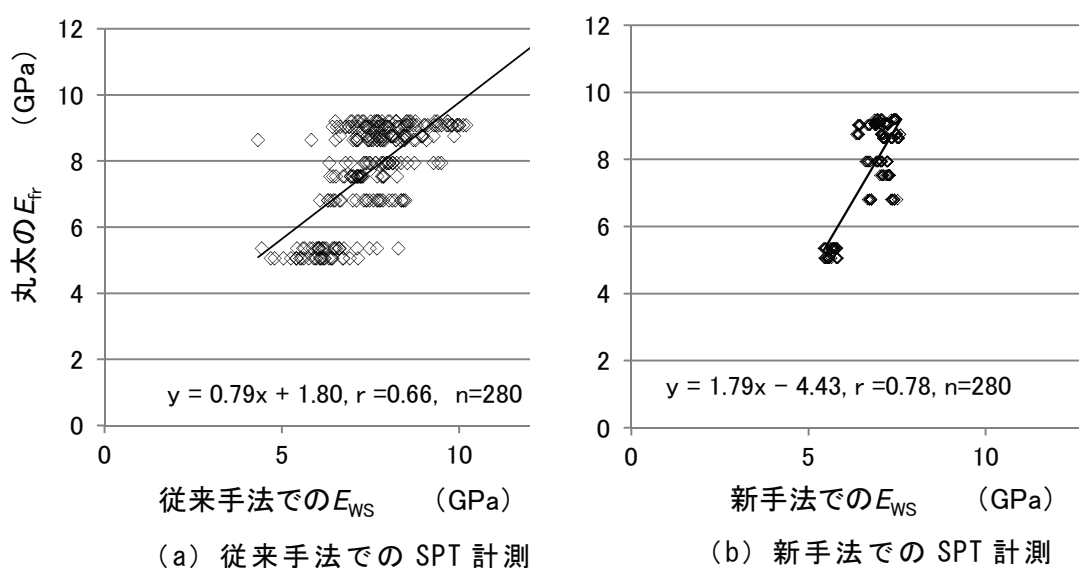
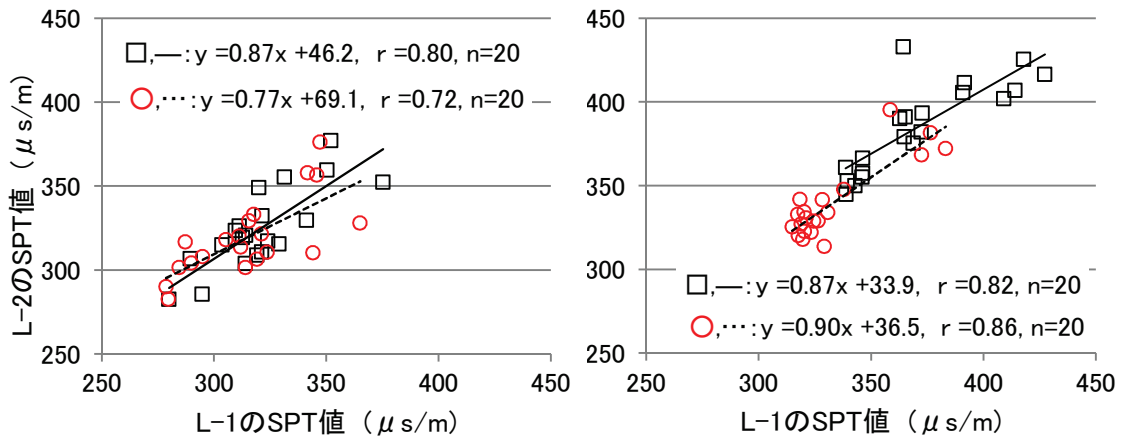


図 2 - 8 丸太で計測した E_{WS} と E_{fr} との関係

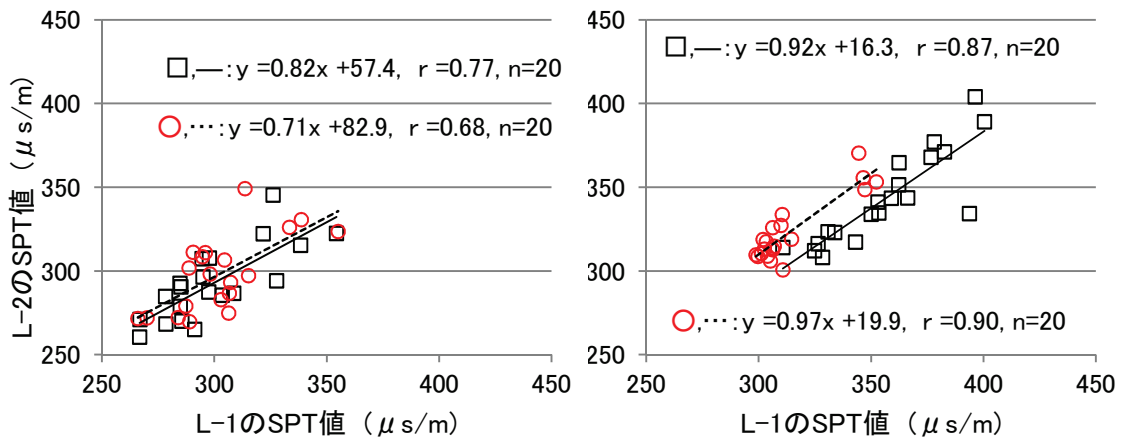
2. 3. 4. 1. 2 計測手法毎の SPT 値の整合性

応力波伝搬法の適正な計測としては、同じ個体であれば測線の位置を変えても測定結果が同じになる(整合性が高い)ことが望ましい。そこで、丸太で計測した SPT 値を各打撃手段・測線間隔別に、対面・対向する測線毎に整理し、各センサー配置における各測線長・各打撃手法での出力結果の整合性を比較した(図2-9(a)~(d))。計測結果の整合性は、回帰式の傾きや切片および相関係数で比較した。この場合、回帰式の切片が 0 に近づき傾きが 1.0 に近くなる、つまり回帰式が $y = x$ に近づきその相関が高いほど、同じ個体で同じ計測値が得られやすい(整合性が高い)ことを意味する。



(a) 平行配置、ハンマー打撃

(b) 斜め配置、ハンマー打撃



(c) 平行配置、定力打撃

(d) 斜め配置、定力打撃

図 2-9 各測定条件における 2 本の測線の計測値の整合性

凡例 □, —: 測線長 1.0m ○, …: 測線長 1.5m

平行配置における回帰式の切片、傾きの平均値はそれぞれ $63.9 \mu s/m$ 、 0.79 だったのに対し、斜め配置ではそれぞれ $26.7 \mu s/m$ 、 0.92 を示した。また、斜め配置の場合、ハンマー打撃における回帰式の切片、傾きの平均値はそれぞれ $35.2 \mu s/m$ 、 0.89 だったのに対し、打撃装置を用いた場合はそれぞれ $18.1 \mu s/m$ 、 0.95 だった。さらに斜め配置で打撃装置を用いた場合では、測線長が $1.0m$ のとき回帰式の切片、傾きはそれぞれ $16.3 \mu s/m$ 、 0.92 だったのに対し、測線長 $1.5m$ のときはそれぞれ $19.9 \mu s/m$ 、 0.97 だった。これらの結果、次のことがわかった。

- ① 平行配置に比べ斜め配置の方が整合性が高い。
- ② 斜め配置の場合、ハンマー打撃より装置での打撃の方が整合性が高い。

③斜め配置で装置での打撃の場合、測線長が長い方が整合性がやや高い。

上記の結果から、丸太における SPT 計測では、測線長 1.5m の斜め配置で打撃装置を用いる場合が、最も出力結果の再現性が高く、得られる SPT 値の整合性も高くなることがわかった。

なお、平行配置では、応力波が樹幹の表面付近の辺材を直線的に通過すると考えられる⁴⁷⁾ため、測線長が長くなるほど測線間の樹皮直下の枝節の存在や辺材の密度などの不均等が応力波に影響し、測線毎の計測値が一致しにくくなったものと考ええる。

2.3.4.2 立木調査

2.3.4.2.1 計測手法毎の SPT 値のばらつき

立木調査では、3.1 の結果から、測線長は 1.5m を基準とし、打撃手段は定力打撃装置を用いた。立木における斜め配置および平行配置での計測による SPT の変動係数を図 2-10 に示す。この結果、立木においても斜め配置の方が平行配置よりもばらつきが小さくなった。変動係数の平均値は、平行配置の場合 1.0 % だったが、斜め配置では 0.3 % に低減した。各測定条件間の差異について、ウィルコクソンの符号順位和検定をしたところ、有意な差を確認した ($P < 0.01$)。

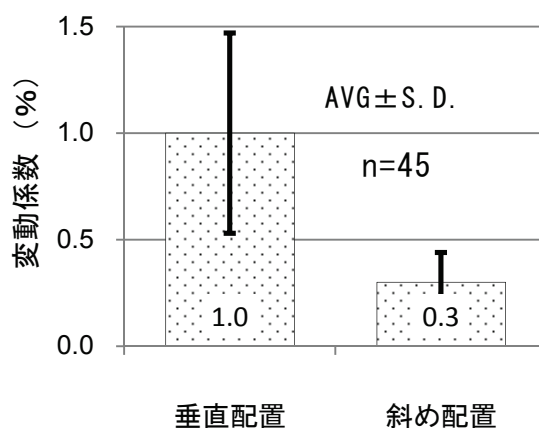


図 2-10 立木計測でのセンサー配置と変動係数の関係

2.3.4.2.2 計測手法毎の SPT 値の整合性

立木での斜め配置、平行配置それぞれで得られた SPT 値から、出力結果の整合性を比較した(図 2-11)。この結果、平行配置における回帰式の切片と傾きはそれぞれ $88.6 \mu\text{s/m}$ 、 0.75 だったのに対し、斜め配置ではそれぞれ $-0.4 \mu\text{s/m}$ 、 1.01 を示し $y = x$ にほぼ等しく、立木の計測においても斜め配置により適正な計測が可能であると考えられた。

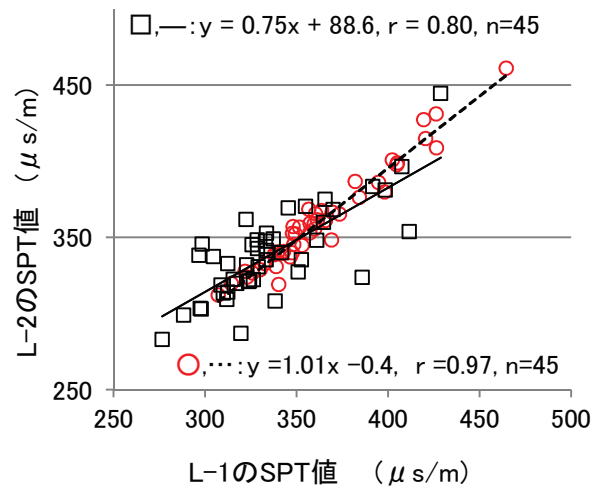


図 2-11 立木計測での整合性の比較
凡例 □, —: 平行配置 ○, - - -: 斜め配置

2.3.5 まとめ

応力波伝搬法において、2.3で得られた知見は以下のとおりである。

- ①簡易な機械力を使ってセンサーを一定の力で打撃することで、出力結果の再現性を高めることができる。
- ②樹幹に対して 1.5 m の間隔で斜めにセンサーを配置することで、立木または丸太の SPT を適正に計測することができる。

なお、このように改良した計測手法を、以後は MM 法 (Measurement of diagonal line by Mechanical knocking (機械的打撃による斜め計測)) と呼称することとした。

一般の山林における、応力波伝搬法による非破壊的な立木の強度性能調査では、特に計測精度と効率が課題であるが、MM 法での SPT 計測で、精度の高い計測の効率的な実施が可能になると考えた。

一方で、測線を斜めに設定するため、立木の直径に応じて測線が立木に対して成す角度等が異なるため、このことが評価に影響する可能性があった。最終的な曲げ強度に近い性能評価にするためには、角度などの影響を排除する工夫が必要になると考えられたので、MM 法による計測結果について角度補正を検討することとした。

2. 4 強度性能選抜の精度の向上

2. 4. 1 角度補正の検討

強度性能に優れたスギ品種の選抜にかかる現地調査では、様々な直径の立木が計測対象となる。同林齢でも個体により肥大成長の良否の差があるが、FAKOPPを用いたMM法でのSPT計測では、樹幹に対し測線がなす角度(以下、測線角度)が大きくなるほどSPT値が大きくなり、このため式(1)によると直径の大きい個体ほど E_{WS} は小さくなり、不利な判定となる。この場合、強度性能に加え成長性も良好な個体が存在しても選抜対象から漏れてしまうことになり、好ましくない。強度性能選抜の精度を高めるには測線角度がSPTに与える影響を明らかにする必要がある。

そこで、立木に対して様々な角度で測線を設定してSPTを計測し、SPTに対する測線角度の影響を検証し、SPT値の角度補正を検討することとした。

2. 4. 2 材料と方法

試験には鳥取県林業試験場内のスギ立木9本(直径148-257 mm、クローン3系統各3本、32年生)を供し、試験体の同じ区間を対象に各種の長さの斜め測線を設定することで、同じ評価区間における様々な角度でのSPT値を得ることとした。なお、測線の設定に当たっては、前出のコの字型治具を0.3mから1.5mまで0.1mピッチで間隔を調整できるように改造した(写真2-4)。

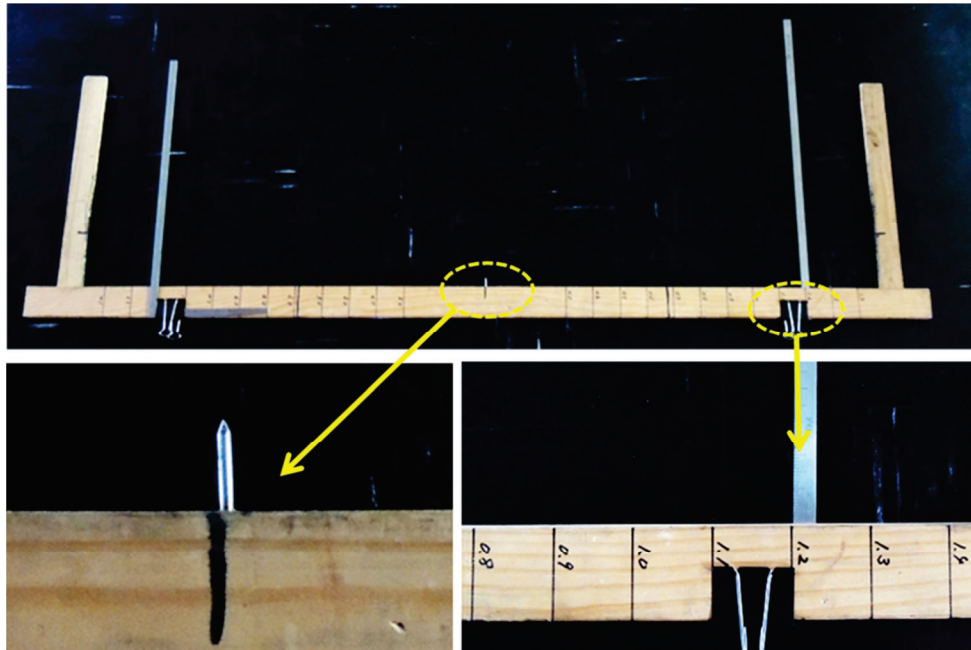


写真2-4 間隔調整用に改造した治具
センターの釘と測線長さの調整用の印

治具の中心を立木の胸高部分に釘で固定し(写真2-5)計測対象区間の中心を統一したうえで、立木1本につき、直径方向1測線ならびに斜め方向13測線(見かけの L :0.3m~1.5m)を設定した(図2-12)。また、センサーの差し込み角度は樹幹に対して目視で概ね45度になるよう留意した。なお、センサーの先端から2.0 cmの箇所にはけがき線を入れて、センサーの挿し込みに際してけがき線まで挿し込むことでセンサーの挿入深さを統一した。その上で、図2-12のようにセンサー先端間距離 L を算出した。



写真2-5 立木に固定した治具と
センサー挿入箇所のマーク

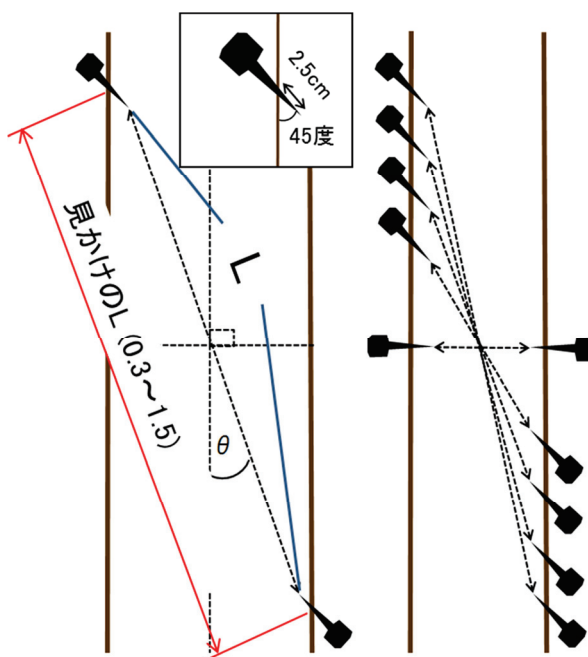


図2-12 立木に設定した測線と
センター先端間距離

測線角度 θ は、測線中央での樹幹方向に対するセンサーの先端間の角度とした(図2-12)。なお、 L と θ の関係について、一例を表2-4に示す。

表2-4 L (センサー先端間距離) と θ (測線角度) の関係の例
単位: L (mm), θ (度)

見かけのL	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900
真のL	1461	1361	1261	1160	1060	960	859
θ	5.8	6.3	6.8	7.4	8.1	8.9	10.0
見かけのL	800	700	600	500	400	300	184
真のL	759	659	558	459	360	266	134
θ	11.3	13.0	15.4	18.9	24.4	34.0	90.0

SPT の計測は MM 法に準じ、センサーの打撃には全て同じ定力打撃装置を用いた。1 測線あたり 7 回打撃し、中央値から最も遠い値を 2 つ除いた 5 回分の平均値をその測線の SPT とした。計測した SPT は単位距離あたりの値に換算した上で、測線角度との関係を調べた。

2. 4. 3 結果と考察

2. 4. 3. 1 測線角度と SPT の関係

9本の立木で計測した SPT と角度の関係について、クローンごとに図 2-13 (a)~(c)に示す。この結果、測線角度と SPT には有意な強い正の相関が認められた($P<0.01$)。すなわち、測線角度が大きくなるに従って単位距離あたりの SPT 値が大きくなることが明らかとなった。なお、回帰式の傾きや切片にクローン間で差がある可能性も示された。

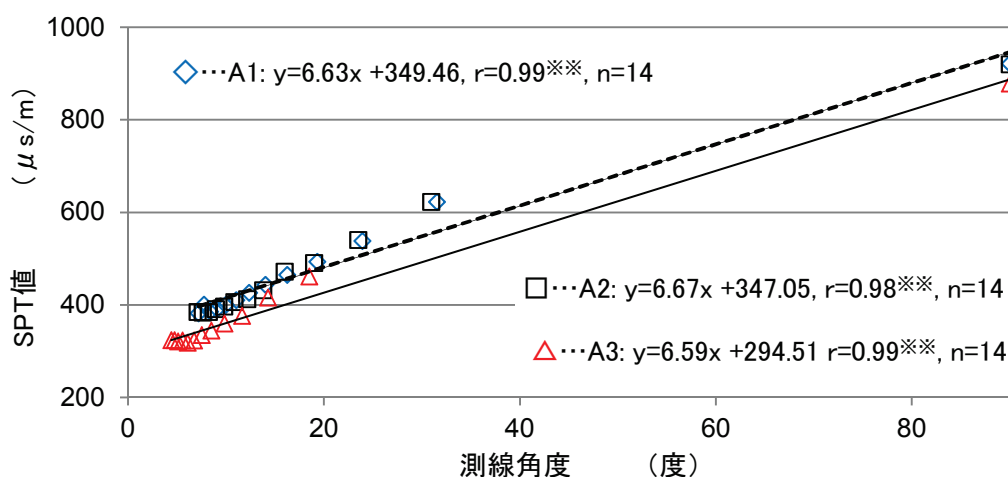


図 2-13 (a) 測線角度と SPT の関係 (クローン A 系統) *** ($P<0.01$)

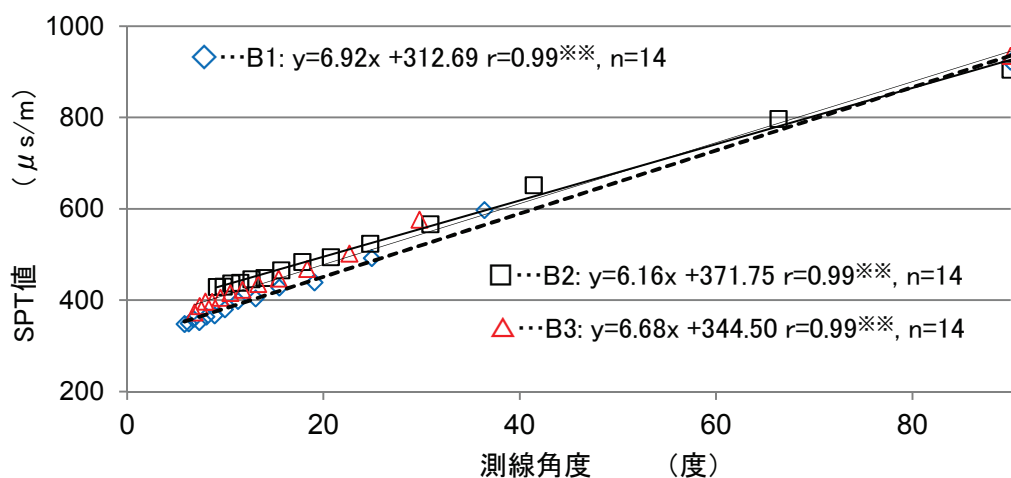


図 2-13 (b) 測線角度と SPT の関係 (クローン B 系統) *** ($P<0.01$)

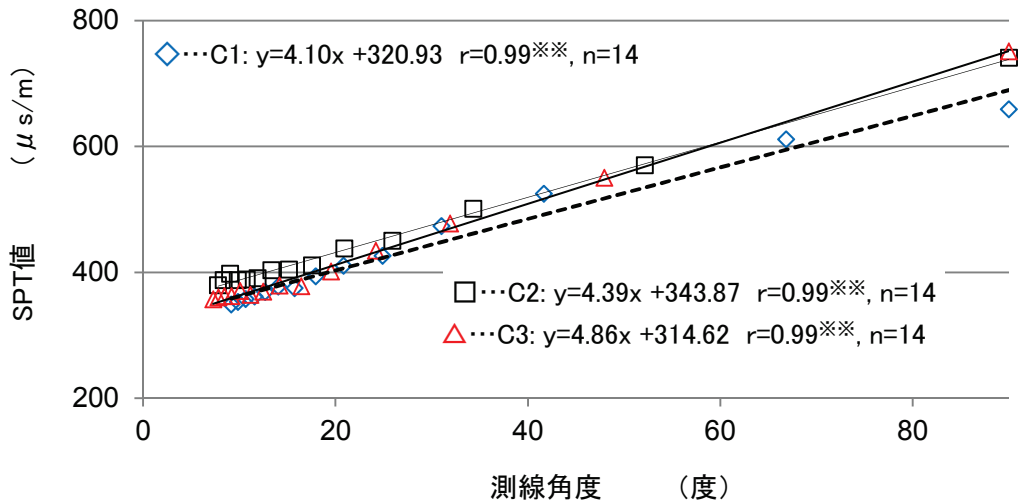


図 2 - 1 3 (c) 測線角度と SPT の関係 (クローン C 系統) ** (P<0.01)

2. 4. 3. 2 測線角度と SPT の増加比

図 2-13 で得られた回帰式を用いて、直径 250 mm をスギの標準的な直径と仮定し、立木を測線距離 1.5 m で測定するときの測線角度 (9.59 度) における SPT (基準 SPT) を算出した。この基準 SPT に対する各測線角度における SPT の増加比を算出した。この結果、測線角度と増加比には強い正の相関が認められた (図 2-14)。この回帰式によれば、仮に直径 40cm の立木を測線距離 1.5m で計測した場合、測線角度は約 15.46 度と大きくなるが、このとき基準 SPT に対する増加比は平均で約 1.1 となる。つまり、測線距離を 1.5m に固定して計測した SPT を基にヤング係数を算出すると、大径木になるほどヤング係数を低く算出することになる。

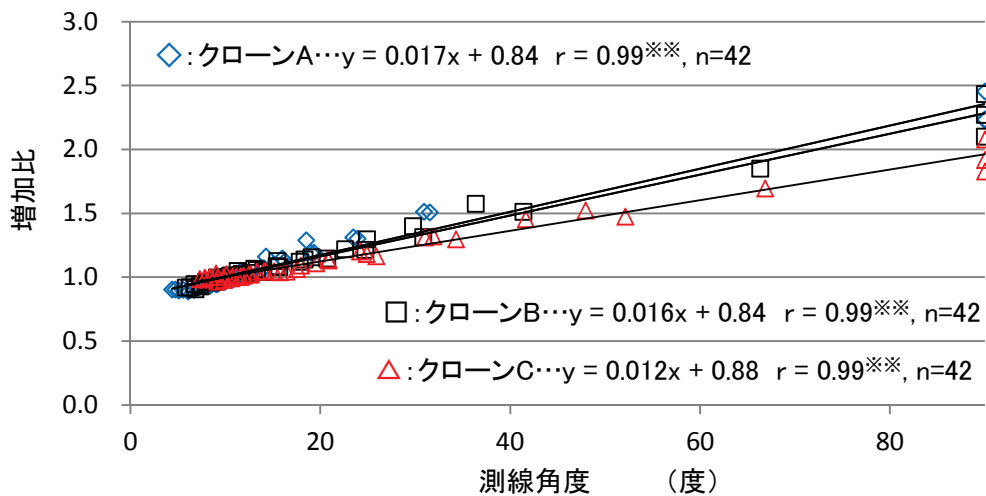


図 2 - 1 4 測線角度と SPT 増加比の関係 ** (P<0.01)

2. 4. 3. 3 測線角度による大径木の SPT の補正

上記の結果から、様々な直径のスギを計測する場合、センサー間隔 1.5m の斜め方向(任意の測線角度)と直径方向(測線角度 90 度)の 2 測線の SPT を計測することで図 2-13 のような測線角度と SPT 値の関係式を作成し、それを用いてある一定の角度における SPT に補正すれば、 E_{WS} 算出の際の測線角度の影響を少なくすることが出来ると考えられた。

2. 4. 4 角度補正の効果確認(1)

2. 4. 4. 1 伐採後の丸太の強度性能との比較

MM 法での計測とその出力結果の補正により、実際に立木で計測した SPT にもとづく強度性能(E_{WS})と、伐採後の丸太で算定した E_{fr} との関係を確認し、推定精度を検討した。

また、現地の立木で FAKOPP による調査を実施する際には、手の届く範囲(胸高部位付近)までの計測に留まり、これより上の部位の強度性能が適正に評価できるか不明である。そこで立木での強度性能把握が計測区間外の部位(4m 丸太 2 玉分、8m 程度まで)も含めて把握することも目的に、立木で計測した SPT で E_{WS} を算出し伐採後の丸太の E_{fr} と比較し、推定精度を確認した。

2. 4. 4. 2 材料

試験には広島県廿日市市吉和地内の民有林(46~50 年生)のスギ・ヒノキ立木各 15 本の計 30 本を供した。なお、この試験は広島県立総合技術研究所 林業技術センター主催による平成 26 年度中国五県が連携した共同研究に向けた勉強会「森林利用分科会」で実施したものである。

2. 4. 4. 3 試験方法

2. 4. 4. 3. 1 SPT の計測と E_{WS} の算出

SPT の計測には FAKOPP を用いた。センサーの測線は MM 法と直径方向の各 1 本、および従来手法として樹幹に平行な 1 本(センサー間隔 1.0m)を設定した(図 2-15)。センサーの打撃には、MM 法と直径方向については定力打撃装置、従来手法には人力でのハンマー打撃を用いた。MM 法で計測した SPT

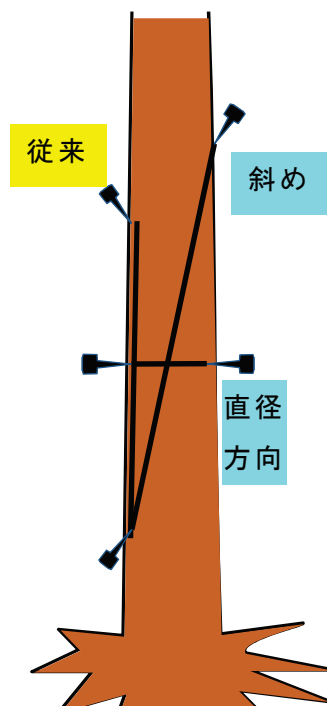


図 2-15
立木の測線配置

(MM-SPT)については2.4.3.3に基づき、直径方向の計測で得た SPT を用いて角度補正もおこなった(補正-SPT)。得られた3種類の SPT(従来手法 SPT、MM-SPT、補正-SPT)について、式(1)により E_{WS} を算出した。なお、立木の非破壊調査では密度情報が不明であるが、伐倒時の辺材の有効密度のばらつきが小さいので有効密度を定数として用いることで効率的な調査が可能とされている⁴²⁾。そこで今回はまず立木状態の密度を仮密度(定数 0.9g/cm^3)とし、仮密度での E_{WS} を算出したのち、丸太の調査で得られた密度のうち、元玉と2番玉の平均値を用いて実密度での E_{WS} を算出した。

2.4.4.3.2 丸太の強度性能の算定

立木での調査後、1ヶ月以内に試験体を伐採し、元玉と2番玉をそれぞれ約4.0m に造材した。各丸太は搬出した後、長さ、直径(元口、末口)、重量を計測し、スペクトラムアナライザを用いて固有振動数を計測し、前出式(2)により E_{fr} を求めた。

2.4.4.4 結果と考察

2.4.4.4.1 仮密度での E_{WS} と E_{fr} との関係

立木で求めた SPT と定数の密度に基づく仮密度 E_{WS} と丸太の E_{fr} との関係を図2-16(a)~(c)に示す。この結果、いずれも有意な相関が確認された($P<0.01$)。なお、補正-SPT>MM-SPT>従来手法の順に、各 E_{WS} と丸太で得られた E_{fr} との相関が強く、MM法で得られた SPT を角度補正することで丸太の強度性能の推定精度が向上することが明らかになった。なお、 E_{WS} が E_{fr} より高い値となっているが、これは丸太の密度が平均で 0.7g/cm^3 と小さかったため、仮密度を 0.9g/cm^3 として算出した E_{WS} の方が高く算定されたと考える。

試験体における MM 法での計測区間中心直径は 184~413mm で、測線角度が 7.05 度~15.98 度とばらついたが、MM-SPT による E_{WS} の推定精度は従来手法によるものと比べて高く、この程度の角度までは適正な強度性能推定が可能であると思われたが、母樹を選抜するための強度性能調査では選抜の精度をより高めるために角度補正を行った方がよいと判断した。

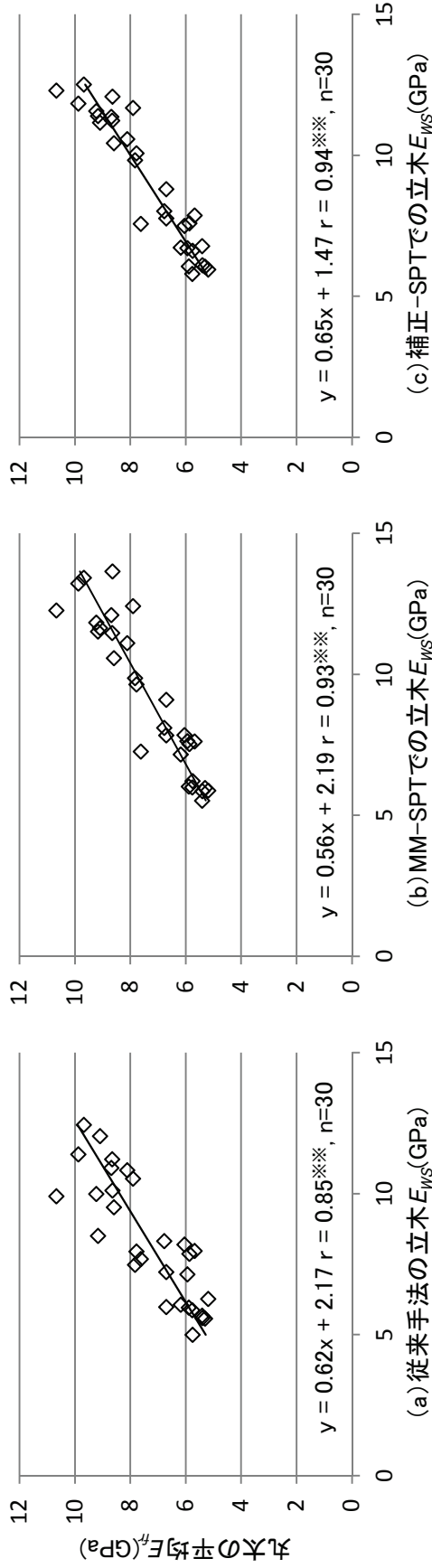


図 2 - 1 6 仮密度で算出した E_{ws} と E_{fr} の関係 *** ($P < 0.01$)

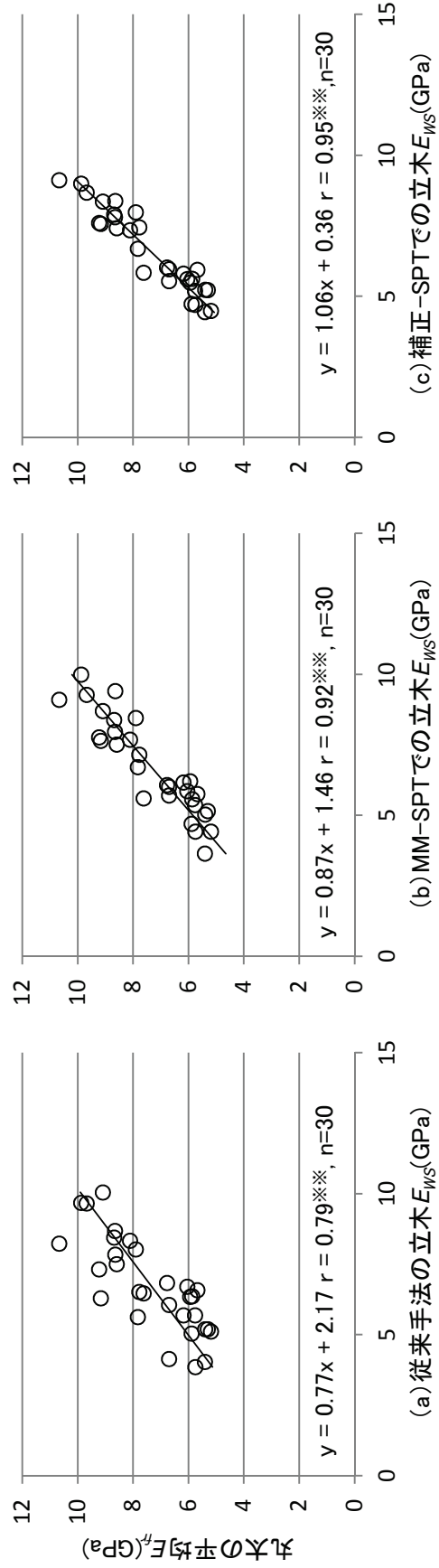


図 2 - 1 7 実際の密度で算出した E_{ws} と E_{fr} の関係 *** ($P < 0.01$)

2. 4. 4. 4. 2 実密度での E_{WS} と E_{fr} との関係

立木で求めた SPT と実際の丸太の密度に基づく実密度 E_{WS} と丸太の E_{fr} との関係を図 2-17(a)～(c)に示す。いずれも有意な相関が確認され、前項と同様に補正-SPT>MM-SPT>従来手法の順に、各 E_{WS} と丸太で得られた E_{fr} との相関が高かったが、特に補正-SPT による E_{WS} と E_{fr} の回帰式が、この中では最も $y=x$ に近く、良好な関係を示した。このことは、MM 法での SPT 値を角度補正することで、密度以外の要素を、より正確に推定できていると考えられた。そして、非破壊的に実際の密度を得ることが出来れば、さらに高い精度で伐採後の強度性能を推定できると考えた。

2. 4. 5 角度補正の効果確認(2)

2. 4. 5. 1 製材後の柱の強度性能との比較

前項では、立木で推定した E_{WS} と丸太の E_{fr} の関係について確認したが、我々が建築物で木材を使用するとき、丸太のままではなく柱や梁などの製材品を使用する。立木において MM 法で得た SPT 値を角度補正すると丸太の E_{fr} の推定に有効であるが、製材後の強度性能との関係を確認する必要がある。そこで、今までの鳥取県内での試験で用いた立木を対象に、伐採、製材後の強度性能を調査し、立木で推定した E_{WS} との関係を確認した。

2. 4. 5. 2 試験体と試験方法

試験体は鳥取県林業試験場内のスギ(31～33 年生)16 本と、鳥取県東部の智頭町及び若桜町産のスギ(60～72 年生)10 本の計 26 本を用いた。

それぞれの試験体について、立木の状態で 2. 4. 4. 3. 1 にならひ、樹幹に平行な測線以外の測線を設定し、FAKOPP により SPT 計測を行った。その後、各試験体を伐採後、現地で 3.2～4.1 m の長さに造材後、智頭産については元玉のみ、若桜は元玉と 2 番玉、林業試験場内のスギは原則 2 番玉まで(2 番玉の末口が 10cm 未満のものは元玉のみ)を搬出し、鳥取県林業試験場構内にて 2. 4. 4. 3. 2 の方法で E_{fr} を算出した。

全ての丸太は計測後に鳥取県林業試験場内の送材車付き帯のこ盤で末口直径(114～414 mm 平均 227 mm)に応じた寸法で正角材に製材した。その後半年以上屋内で天然乾燥後、蒸気加熱式木材乾燥機で人工乾燥を行った。乾燥後の試験体を修正挽きしてモルダーで仕上げ、75mm 正角～150mm 正角までの柱材 45 本を得た。この柱材について、鳥取県林業試験場の実大強度試験機を用い、「構造用木材の強度試験マニュアル」に則って 3 等分点 4 点加

重式で試験を行い、曲げ強さ(MOR)と曲げヤング係数(MOE)を求めた(写真2-6)。なお、一連の計測で得られた強度性能では、1個体から2本の丸太や柱を得たものについては、平均値を算出して扱うこととした。



写真2-6 立木で強度性能推定した個体の製材品の曲げ試験状況

2.4.5.3 結果と考察

立木で求めた SPT と定数の密度から、角度補正前の SPT に基づく E_{WS} と (MM- E_{WS}) と角度補正後の SPT に基づく E_{WS} (補正- E_{WS}) の2種類の E_{WS} を求めた。これら E_{WS} と、丸太の E_{fr} 及び製材後の柱の強度性能 (MOE、MOR) との関係を図2-18~20に示す。

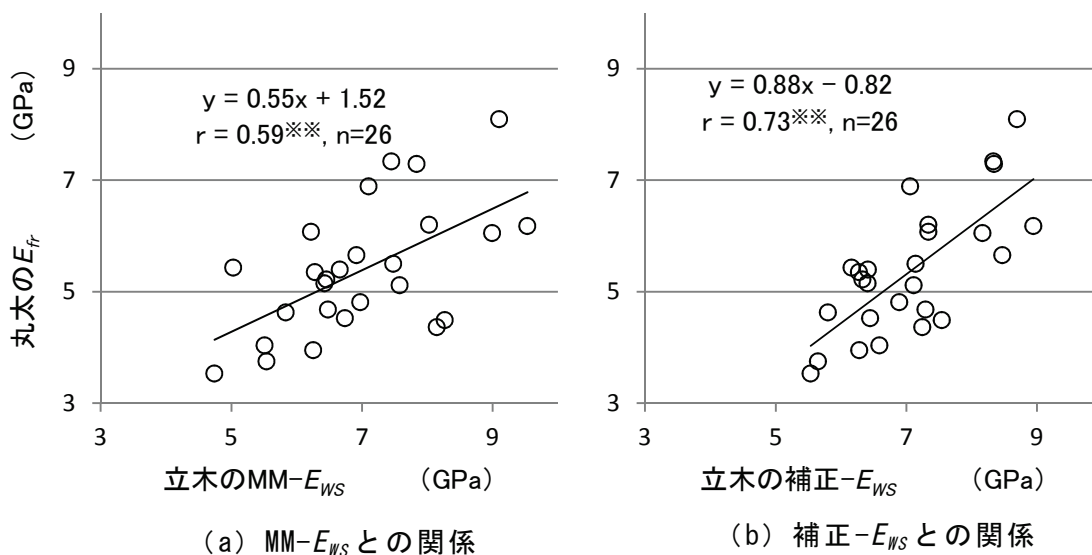


図2-18 立木で推定した E_{WS} と丸太の E_{fr} との関係 *** ($P < 0.01$)

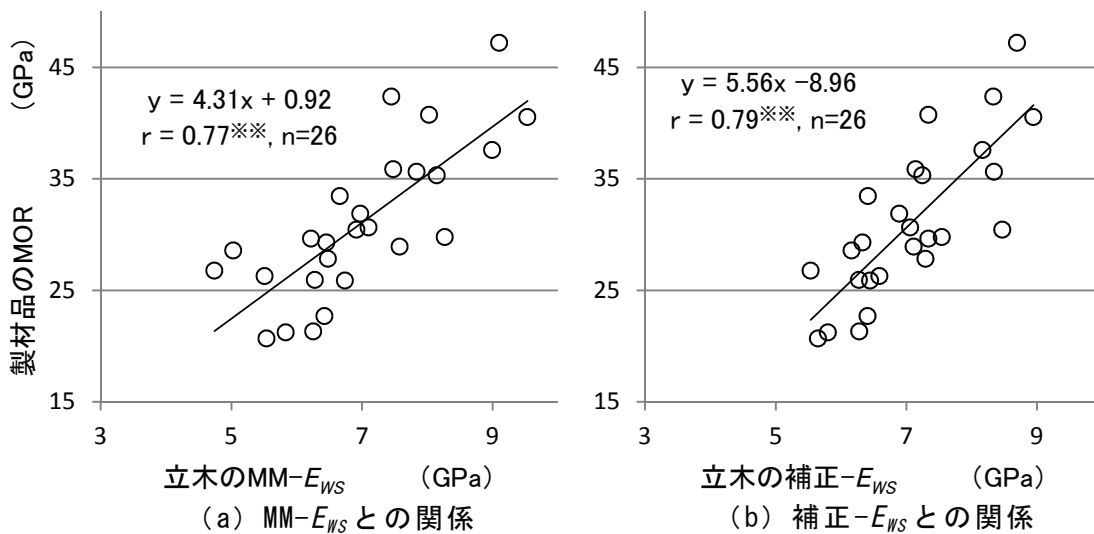


図 2 - 1 9 立木で推定した E_{WS} と製材品の MOR との関係 *** ($P < 0.01$)

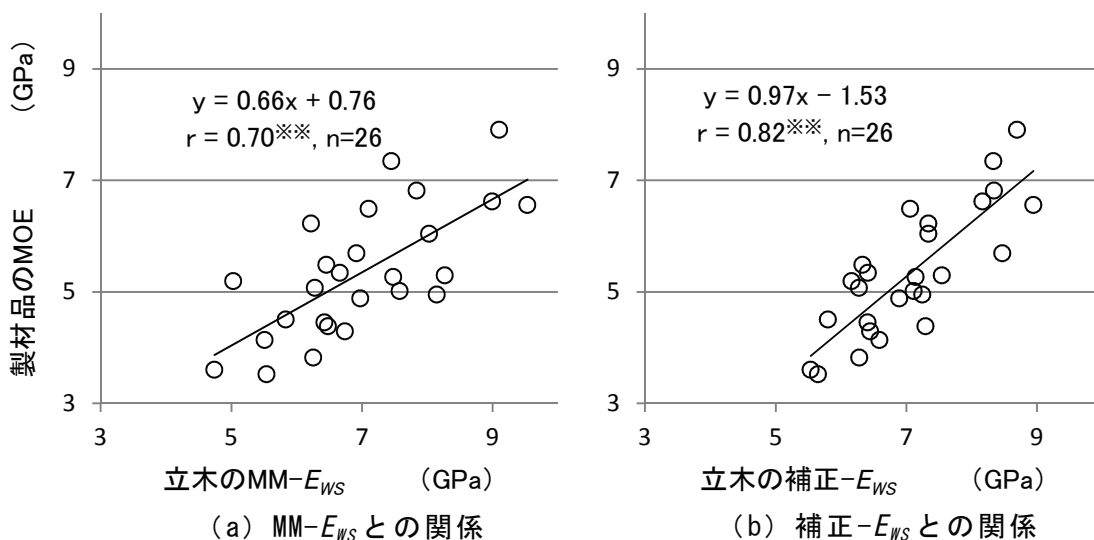


図 2 - 2 0 立木で推定した E_{WS} と製材品の MOE との関係 *** ($P < 0.01$)

いずれも有意な関係 ($P < 0.01$) が認められたが、角度補正した SPT に基づく EWS のほうが高い相関を示す結果となった。MOR の値を決定する最大荷重は、製材品の節や目切れなど、強度性能以外の要因も関与するため、MOR と EWS との相関が低下しても不自然ではないが、大きく乖離することはなかった。さらに実際の柱の強度性能として注目される MOE と EWS との相関が最も高くなっているが、このことは立木における応力波を用いた非破壊的強度性能の推定において、筆者らによる計測手法の改良が有効であることを示していると判断した。

2.4.6 非破壊的な密度の推定

2.4.6.1 密度推定の必要性

応力波を用いた立木の状態での強度性能推定では、式(1)に示されるとおり、密度も重要である。密度が判明すれば、2.4.4.4.2のように、伐採後の丸太の強度性能を高い精度で推定することが可能になる。そこで、FAKOPPでのSPT計測による密度の推定の可能性を検討した。

2.4.6.2 材料

この試験には鳥取県東部産のスギ丸太(L=4.0m)67本を用いた。試験に供した丸太は燃料チップ用に仕分けされたもので、林齢や伐採後の経過時間、番玉などは不明である。

2.4.6.3 試験準備と試験方法

FAKOPPはセンサーの打撃力で出力されるSPT値が異なる。これは、一定の打撃力の差を設けることによって、強度性能以外の要素を検出できる可能性を示すものであると推測された。そこで、異なる一定の打撃力を発する装置として、通常の定力打撃装置(以下、強定)のほかに、ノック式ボールペンのバネを切り縮めて打撃力を弱くした定力打撃装置(以下、弱定)を作成した。

測定では、全ての試験体についてコンベックスで長さを、輪尺で中央部の直径を計測した後、丸太中央を中心として斜め方向と軸方向(各1.5m間隔)と直径方向でのFAKOPPのセンサー配置を設定し(図2-21)、前述の2種類の定力打撃装置によりSPT計測を行った。SPTの計測後、フォークリフトを用いて試験体をスリングで吊下してロードセルにより重量を計測し、体積と重量から密度を求めた。

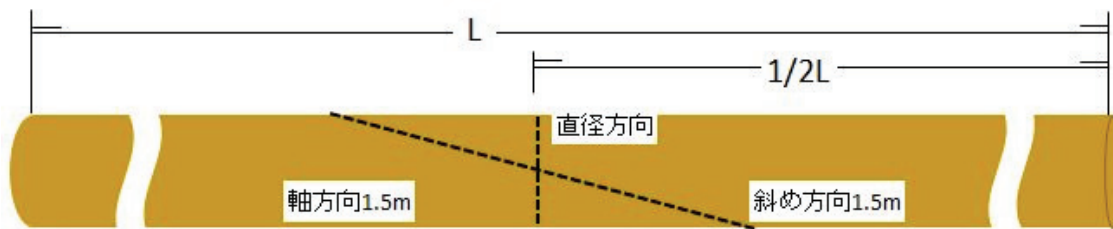


図2-21 丸太に設定した測線

なお、このときFFTスペクトラムアナライザにより固有振動数を求め、 E_{fr} を算出した。計測の終了した試験体はチェーンソーで鋸断して計測区間の中央部から厚さ2cm程度の円盤を採取し、全乾法で含水率を求めた。

2. 4. 6. 4 結果と考察

図2-22に丸太の密度と含水率を示す。密度は $0.51 \sim 1.08 \text{ g/cm}^3$ 、含水率は $27.6 \sim 165.5 \%$ まで、様々な状態の丸太を試験対象にすることができた。なお、試験体の E_{fr} は平均 8.25 GPa 、最高 11.06 GPa 、最低 5.39 GPa だった。

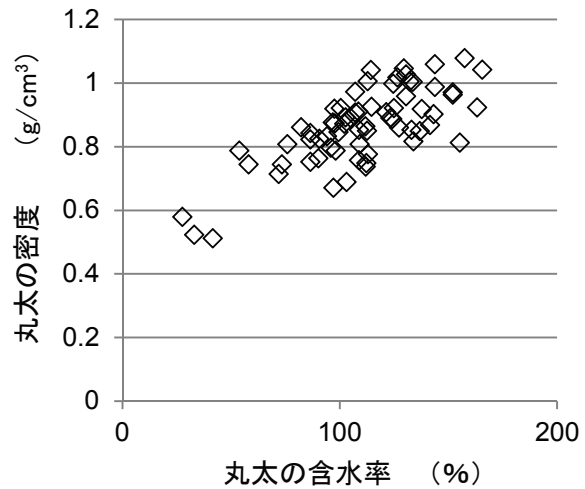


図2-22 丸太の密度と含水率

試験体の斜め方向と軸方向で、2種類の定力打撃装置により計測した SPT の関係を、図2-23、

24に示す。両者は極めて高い相関を示し、このことは同じ成分を検知していることを意味すると考えられた。このため、当初想定していた打撃力の差での密度等の検出の可能性は低いと思われた。念のため、丸太で得られた各測線の SPT を強定・弱定に分けて、それぞれを説明変数とし、密度や含水率を目的変数として多変量解析(重回帰分析)を試みたが、いずれの SPT も密度や含水率の推定に対して有効ではない($P > 0.05$)という結果となった。また、斜め、直径、軸の各方向における強定、弱定で得られた SPT 値の差や、図2-23の回帰式を用い強定の SPT 値で予測した SPT 値と実測した弱定 SPT 値の差を用い、同様の解析を試みたが、いずれの数値も密度や含水率との関係が無かった($P > 0.05$)。このため、FAKOPP を用いた SPT 計測による非破壊的な密度や含水率の推定は、困難であることが明らかになった。

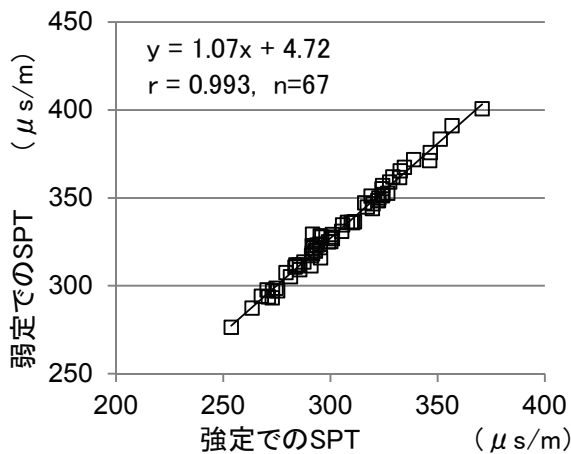


図2-23 斜め方向の SPT

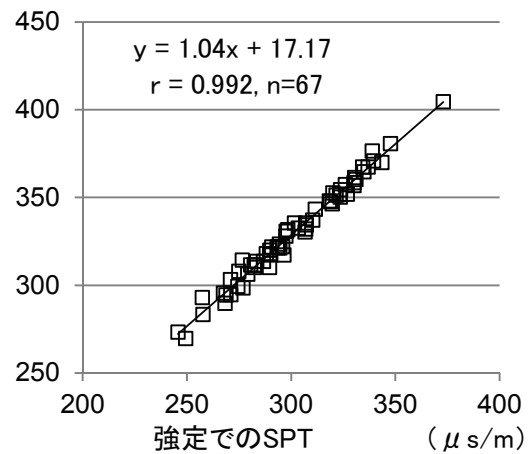


図2-24 軸方向の SPT

2.5 強度性能によるスギの選抜

2.5.1 現地調査の展開

これまで詳述したように、FAKOPPを用いたSPT計測において計測手法を改良し、その補正方法も確立したことで、生立木での強度性能選抜の精度を向上させることができたので、これらを適用した現地調査を実施した。

2.5.2 調査対象林分

調査は鳥取県内の国・県・市町有林のうち、以下の理由により昭和50年以前に植栽されたスギ人工林または天然林を対象にした。

スギ人工林では、昭和50年代初頭に、鳥取県が推奨した特定のスギ品種が県内種苗市場を席卷した。この影響で、これ以降のスギ植栽地のほとんどが当該品種で占められている。この品種は挿し穂の歩留まりが良く、活着も旺盛である反面、枝が多く、気根も出やすいため「葉節」が多く、製材品としての評価が高くない。また強度性能は平均的なスギの域を出ない。このため、スギ人工林の調査では、当該品種が出現する以前の造林地を対象とした。

天然林では、スギの生育密度が低く調査効率が上がらない反面、実生の個体が多いので遺伝子の多様性が期待できる。さらに積雪の深い地域では、雪の匍行圧などに強い個体が選択的に生き残っていると考えられ、強度性能の高い個体の出現が期待できた。そこで空中写真でスギが確認できる天然林は可能な限り調査対象とした。

なお、FAKOPPでの調査は非破壊ではあるが、センサーを樹幹に挿すため、調査後のセンサー挿入箇所の変色や変形、菌害の恐れがある。このため調査した個体を構造材等に用いる場合は出来るだけ早く伐採搬出するか、県が取得する必要があった。さらに調査の結果、調査対象林分で選抜対象の個体が無かった場合は、その林分の評価を落としかねない。このため、個人や企業等の所有する林分は調査対象外とした。なお、調査した林分の概要を表2—5に、位置を図2—25に示す。

表 2 - 5 強度性能調査対象林分一覽

調査地区名	調査面積 (ha)	密度 (本/ha)	目視調査 本数(本)	SPT調査 本数(本)
若桜	10.4	900	9,360	95
駒帰	9.8	1,100	10,780	78
口宇波	9.6	1,500	14,400	91
芦津	65.0	80	5,200	79
板井原	7.3	1,800	13,086	81
神戸上	2.5	1,800	4,500	24
井原	13.0	700	9,100	91
新屋	32.3	1,500	48,450	95
出立	4.6	1,500	6,900	21
三滝	8.0	30	240	8
芦津2	19.7	40	788	23
久住	0.5		154	154
北村	6.0	40	240	8
中津	4.2	50	210	0
アビレ	0.1	2,000	200	5
羽田井	2.2		208	208
試験場内	0.1		25	25
計	195.3		123,816	1,086

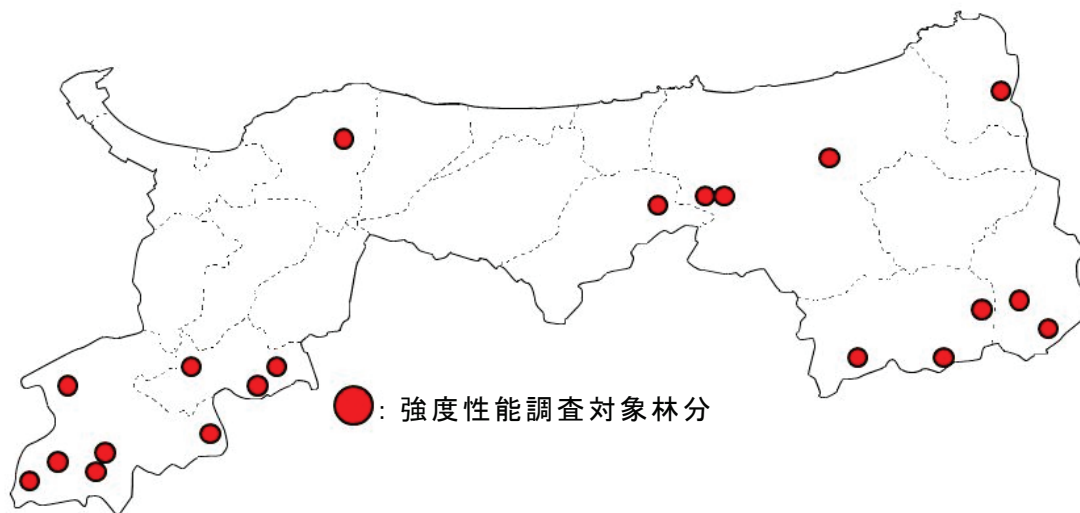


図 2 - 2 5 強度性能調査対象林分 位置図

2.5.3 調査方法

現地調査では、林分を等高線上又は上下にジグザグに踏査しながら、目視で成長性、通直性、枝付き等に優れた個体を選抜した上で、外見の優れた個体を対象に FAKOPP を用い MM 法により SPT 計測を行った(写真2-7)。角度補正は現地での計算が困難なので、別途室内で強度性能を推定したうえで、特に強度性能が高い(E_{WS} 9.0GPa 以上)と推定された個体について、再度現地に赴きマーキングを行った。その後、好適な時期に現地で採穂を実施した。



写真2-7 天然林での調査状況

2.5.4 現地調査結果

現地調査で得た SPT で算出した E_{WS} の出現頻度分布を図2-26に示す。立木で推定した鳥取県の強度性能の平均値は 6.8 GPa で、平均的なスギの値を示した。なお、ヒノキ(9.0GPa)以上の強度性能を有すると推定される個体のうち、上位の 24 本を対象に採穂と育苗を実施中である(写真2-8)。

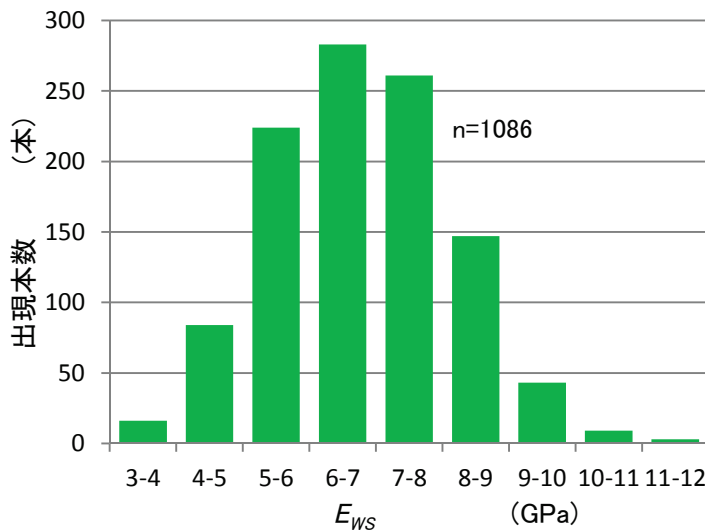


図2-26 立木の E_{WS} の出現頻度分布



写真2-8 挿し木の育成状況

2.6 まとめ

本章では建築業界で求められる強度性能のスギ材の安定的な生産の基礎となる強度性能の高いスギ品種の確立を目的に、確実に強度性能が優れているスギ個体を母樹として確保するために、応力波を用いた非破壊的な強度性能調査手法の精度の向上とスギ立木の強度性能選抜に取り組んだ。そして応力波伝搬時間測定機 FAKOPP を用いた SPT 計測にあたって、計測に際しセンサーの打撃手段として定力打撃装置を用いることで出力結果の再現性の向上を実現した。またセンサーを樹幹に対して斜めに配置し、センサー間隔も 1.5 m に伸ばした結果、計測位置の違いによる SPT 値の差を解消するとともに計測機械により発生する $4\mu\text{s}$ 程度の計測誤差を吸収し得る適正な SPT 計測を実現した。さらに、改良した計測手法の問題点を解消する補正方法を検討し、センサーの斜め配置に伴って発生する樹幹に対する測線の角度の差を、角度補正することにより、伐採後の丸太や製材後の柱材での強度性能を立木の状態で精度良く推定することを実現した。

そして精度の高い調査手法を用い、鳥取県内の公有林のスギ立木を対象に強度性能を調査した結果、外観的に形質に優れ、かつ高い強度性能を確実に有する個体を複数確認することができた。鳥取県林業試験場では、このうち 24 個体を強度性能の高いスギ品種の母樹として、採穂・育苗を開始した。

本章で得られた知見は、次世代のスギ品種の育種の基礎に寄与するものであるとともに、他の樹種における立木段階での強度性能選抜や選択的な伐採など、林業の育種や現地作業の効率化・生産性に貢献できるものであると確信する。さらに、本研究が一助となって、今後、スギ材をはじめとする林業・木材産業の付加価値化が浸透し、原木価格の向上に伴う中山間地の活性化と、人工林の循環利用による県土の健全な維持管理が推進されることを祈念する。

第3章 はい積み丸太の乾燥行程管理への応力波法の適用

3.1 研究の背景

3.1.1 木質バイオマス発電の増加と背景

平成23年3月11日、東北地方太平洋沖に発生した M_w 9.0の巨大地震は、我が国の観測史上最大規模の津波災害を関東・東北地方の沿岸地域にもたらした。そして二万人を超える死者・行方不明者を出した津波は、商業稼働中の原子力発電所における全電源喪失と炉心溶融事故を惹起した。この結果、大量の放射性物質が大気中に放出され、一部は福島県をはじめ東北・関東地方等の土壤に沈積した。発災から6年近くが経過した現在も、多くの被災された方々が困難な生活を強いられる状況が続いている。

このような、極めて不幸な形で、電力供給源としての原子力に帯同していた核の危険が白日の下にさらされ、その信頼が大きく失墜した結果、新たな電力供給源として再生可能なエネルギーに対する注目が高まった。

温帯モンスーンの我が国では、木材は再生可能な資源の筆頭であり、また前章で詳述したように戦後の造林木が大量に伐期を迎えているため、発電用の木質バイオマスとして大きな期待が寄せられている。さらに平成24年7月の再生可能エネルギーの固定価格買取制度導入を受け、各地で木質バイオマスを使用する発電施設の新設が相次いでいる^{49,50)}(写真3-1)。



写真3-1 木質バイオマス発電所 鳥取県境港市(左)、岡山県真庭市(右)

これらの発電施設では、一部の実験的な丸太燃焼プラントを除いて、木材は破砕された燃料チップ(写真3-2)の形状で利用されることがほとんどである。

燃料用木材チップの発熱量は含水率に大きく左右されるため⁵¹⁾、低含水率のチップの使用が望ましいが、破碎後のサイロ等でのチップの自然乾燥は難しいとされている⁵²⁾。

そこで、チップ工場では低含水率のチップを生産するために大量の燃料用チップ原料原木丸太(以下、原料丸太)を大規模な「はい積み」状態でストックし(写真3-3)、ある程度の期間放置して自然乾燥させた後にチップに加工するようにしている。しかし、この状態では原料丸太の乾き具合の把握が不可能で、乾燥のための原料丸太の放置期間(以下、はい積み期間)には基準がない。



写真3-2 燃料チップ



写真3-3 チップ工場の原木ヤードにおける丸太のはい積み状況

平成26年に鳥取県内の各チップ工場に対し、原料丸太のはい積み期間等について聞き取りを行った結果では、はい積み期間は3ヶ月未満～2年間まで大きなばらつきを示した。これははい積み期間が、原料丸太の入荷状況やチップの出荷先の需要の多寡に左右されるために生じるばらつきであるとのことだった。しかし、いずれの工場でも、放置期間が長く、はい積みの山の高さが高いほど原料丸太の含水率が低下する、との認識が共通していた。ところが、この認識は数値的な根拠に乏しく、一部のチップ工場では、長期間はい積みを放置したことでストックヤードの使用効率の低下と乾燥不十分なチップの製造による買い取り価格の低下を招き、会計検査院の是正指摘を受けた経緯もある。

コスト的にも出力的にも、安定した木質バイオマス発電を支えるためには、低含水率のチップを安定的に生産する必要がある。そして効率的な原木ヤードの運用をも考慮すると、原料丸太をチップ加工に適した含水率となるまで乾燥させるために要する最短期間の把握が必要であり、さらに梅雨期や秋季の長雨および冬季の積雪の影響の把握も必要と考えられた。

3. 1. 2 山陰の風土の特性と鳥取県の取り組み

山陰地方は文字どおり「陰」の地方である。晴天日数が少なく、年間を通じて湿度が高く、特に冬季は積雪・凍結があるなど、屋外での木材の自然乾燥には不利な条件が多い地域である。しかし、このような条件下でも、大出力の木質バイオマス発電所が建設され稼働し始めている現在、低含水率の良質な燃料チップの安定供給は、チップ生産事業者のみならず、林業行政や森林組合等素材生産業者も含め、喫緊の課題となっている。

このことに対して、鳥取県林業試験場では、燃料チップ用原木丸太の効率的な自然乾燥方法を実地で検証することとし、平成 27 年度から県内3カ所のチップ工場において、丸太のはい積みの積み方の違いによる乾燥の違いを把握することとなった。

3. 1. 3 予備調査と実地調査の準備

県内各地での調査に先立ち、平成 26 年度に森田らは小規模なはいを林業試験場構内に設定し、個々の丸太を定期的に重量計測することで、屋外のはい積みにおける丸太の乾燥状況を調査し、はいの内外における丸太の乾燥状況の差を把握した⁵³⁾。

森田らの研究では、鳥取県における小規模はい積みされたスギ丸太の乾燥状況は次のとおりであることがわかった。

- ①はいの内側よりも外側の方が早く乾燥する。
- ②はいの北側よりも南側の方が早く乾燥する。
- ③丸太の直径が小さい方が早く乾燥する。
- ④長期間の屋外放置では、季節によって丸太の乾燥が進まない、あるいは逆に含水率が上がる。

これらの結果は他県の調査の結果⁵⁴⁾と同様であり、日照・湿度等の自然条件的に不利な鳥取県であっても、ある程度の期間をおけば、露天の自然乾燥で原料丸太の含水率を確実に低減させることが可能であることが示された。

3. 1. 4 大規模はい積み調査の問題点

このようなはい積みにおける丸太の乾燥状況把握の研究では、はいにおける各丸太の配置が個別の乾燥具合に大きく影響する。このため、乾燥状況を把握するための重量計測の前後で、各丸太の位置が変わらないように原型復旧する必要がある^{55,56)}。

森田ら⁵³⁾も、この原則に従って、はいを元通りに積み直すために、全ての丸太に番号を付して各丸太の配置を記録して重量計測を行い、丸太の番号に基づいてはいを原型復旧している。

しかし、実際のチップ工場の原木ヤードでの乾燥状況を再現するためには、実際のはいに近い大きさのはいを設定する必要がある。このようなはいは予備試験のはい積みより遙かに大規模にならざるをえない。また、個々の丸太も偏心材や曲がり材などがほとんどで通直なものが少ないので、きれいなはい積みは当初から実現不可能である。このため、計測毎にはいを崩した後に元通りに積み直すことは極めて難しい。

さらに個々の丸太の重量が数十～数百キロと重いため、人力による持ち運びや計測が出来ない。そこで重量計測毎にグラップルやフォークリフト等の機械の使用が必要となるが、稼働中の工場には機械やオペレーターの余剰が無い上、消費した燃油代や賃借料金も発生するため、定期的かつ個別の重量計測は、人員・機材的にも、予算的にも、さらには前述したように技術的にも極めて困難であることが予想された。

そこで、県内各地のチップ工場における実大はい積みでの乾燥状況調査にあたっては、はいを崩すことなく、はい積み状態のまま個別の原木丸太の重量変化を計測する手法の開発が必要となった。

本章では、チップ原木ヤードにおける大規模はい積みでの、はいの積み方の違い等による乾燥状況の違いを把握するため、応力波法を用いたはい積みの原料丸太の重量変化計測手法の確立の取組と、効率的な乾燥のためのはい積み方法や必要期間の提言について述べる。

なお本章では、燃料用チップ取引の慣例に従って、含水率は湿量基準(ウェットベース(WB))で算出することとし、その算出方法は次のとおりである。

$$\text{時点含水率(WB)}(\%) = (\text{時点重量(g)} - \text{全乾重量(g)}) \div \text{時点重量(g)}$$

3. 2 乾燥に伴うはい積み丸太の重量変化と SPT の関係

3. 2. 1 既往の研究

スギ材における含水率と材を伝わる音速の関係については、無欠点の小試験片や板材を用いた研究が行われており、音速等の計測により非破壊的に含水率の把握が出来るとされている^{57,58)}。

前章で述べたように、桐林らは SPT が計測できる FAKOPP を用い、スギの造林品種について立木状態で非破壊的にかつ精度の高い強度性能把握を試みた結果、FAKOPP を用いた SPT 計測において、出力結果の再現性が高い計測手法 (MM 法) を確立した⁵⁹⁾。

しかし、応力波伝搬法による木材の強度性能推定では、非破壊的に木材の密度を知る必要があった。そこで筆者は丸太の含水率が SPT に及ぼす影響を明らかにし、非破壊的に SPT 計測により密度もしくは含水率等を推定することを目的に、丸太の自然乾燥過程における重量や SPT の変化等を計測し、SPT と丸太に含まれる水分量などとの関係を調べた経緯がある⁶⁰⁾。

この結果、SPT 計測による密度の推定は出来なかったものの、実大丸太における乾燥行程での水分減少と SPT の変化に極めて高い相関があることを確認した。これは木質部分に比べて水の SPT が遅いため、理論的には木材の含水率が低くなるほど SPT 値が小さくなるが、精度の高い MM 法での ST 計測で検知が可能となったものと考えられる。

はい積みされた丸太は、隣接する丸太などの曲がり具合や枝節の出具合次第で、不規則に複数の点で拘束された状況であることが予測される。しかし、このような状況の丸太でも、SPT 計測に用いる FAKOPP は、センサー間を伝わる最速の応力波を検知するので、SPT 値は測定対象の拘束状態に左右されにくいのではないかと推測した。そして、はい積み丸太の水分減少を FAKOPP での SPT 計測で調査できるのではないかと考えた。丸太の水分減少とは、すなわち丸太の乾燥に伴う重量変化に他ならない。

そこで、森田らの予備調査⁵³⁾と平行して、予備調査で使われたものと同じ小規模はい積みの状態で、定期的に丸太の SPT 計測を行い、森田らが行った乾燥による重量の変化と、SPT の変化との関係を調べ、SPT 計測によるはい積み状態での丸太の重量変化の把握を試みた。

3. 2. 2 試験

3. 2. 2. 1 試験体

試験には鳥取県東部の木材市場で「燃料用丸太」に選別された鳥取県産のスギ皮付き丸太(材長約 3.0 m 直径 109 mm~367 mm)(以下、丸太)を 30 本用いた。なお、この試験体群は森田ら⁵³⁾が用いたものと同じである。

3. 2. 2. 2 丸太の含水率等の計測

試験開始時に丸太の両端から円盤を採取し、全乾法で含水率を求め、両端の円盤の平均値を丸太の含水率とした。なお、含水率は湿量基準(ウェットベース(wb))で算出した。その後、丸太の重量・直径・長さを計測した。

3. 2. 2. 3 丸太の区分とはい積み

各丸太を末口径の大きさに小(末口径 150 mm 未満)、中(末口径 150 mm 以上 220 mm 未満)、大(末口径 220 mm 以上)に区分し、10 本ずつ写真 3-4 のように露天にはい積みした。はい積みには際しては図 3-1 のとおり個別の丸太に番号を付し、はいにおける丸太の配置による乾燥の違いを把握するため、既報⁵⁵⁾に基づき表・中・裏に区分した。



写真 3-4 試験場構内に設置したはい積み 左から径級大、中、小

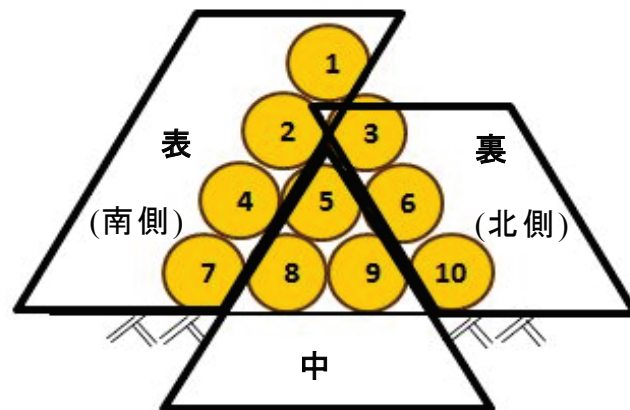


図3-1 はい積みにおける各丸太の番号と「表」、「中」「裏」の区分

3. 2. 2. 4 丸太の重量計測と調査期間

3. 2. 2. 3ではい積みした丸太について、平成 26 年 8 月 12 日から平成 27 年 1 月 29 日までの間、概ね 20 日毎に個別に重量を計測した。重量の計測では各丸太をフォークリフトを用いてスリングで吊下し、ロードセルによって重量を計測した(写真3-5)。なお、重量計測前後での各丸太の状況変化を最小限にとどめるため、丸太に付した番号に基づいて丸太が元の配置になるように、はいを復旧した。



写真3-5 フォークリフトを用いた丸太の重量計測の状況

3. 2. 2. 5 丸太のSPT計測と調査期間

SPT 計測は重量計測と同じ期間に行った。SPT 計測には FAKOPP を用い、概ね二週間毎にはいを崩さずに計測した(写真3-6)。なお、丸太の拘束状態が FAKOPP で計測される SPT 与える影響を確認するため、期間中1回のみ、はいの状態ですべて SPT 計測した直後にはいを崩して SPT 計測を行い、はい積みとバラの状態での丸太の SPT 値の違いを計測することとした。



写真3-6 FAKOPP を用いた丸太の SPT 計測の状況

SPT 計測の測線設定において、両木口の同じ箇所にセンサーを配した場合(図3-2)、FAKOPP で計測される最速の応力波の伝搬経路は樹幹に平行になると考えられる。屋外での丸太の自然乾燥では、丸太の樹皮に近い側と芯の方では乾燥具合が異なることが想定されるため、樹幹に平行な応力波伝搬経路の場合、丸太全体の乾燥具合を過大、または過小に評価する可能性がある。

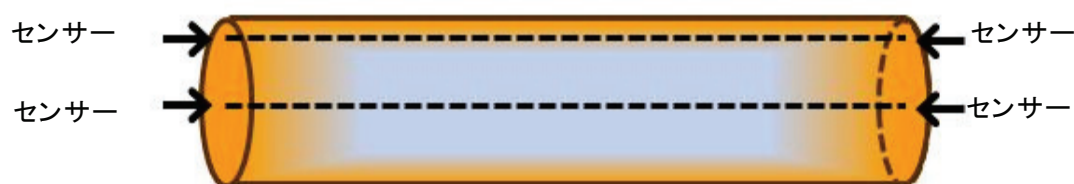


図3-2 両木口の同じ箇所でのセンサー配置

そこで、両木口で反対側となる位置にセンサーを挿入し、丸太の中心軸を挟んで斜めになるような測線を設定することとした(図3-3)。この場合、応力波は髄を含む放射断面内を直線的に伝播するとされている⁴¹⁾ので、丸太全体の水分状態の評価が可能であると仮定した。

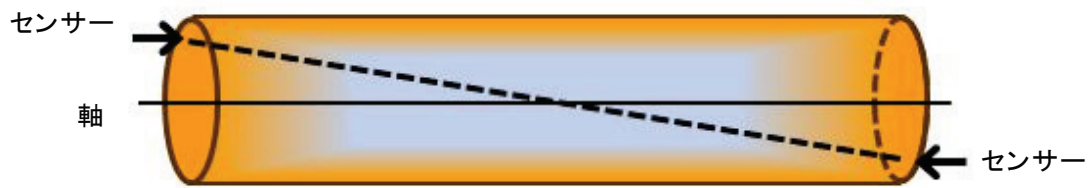


図3-3 両木口で反対に位置する箇所でのセンサー配置

FAKOPP のセンサー挿入箇所には油性ペンで印を付け、毎回同じ箇所にセンサーを挿すことで計測区間を統一した。なお、センサーの打撃には定力打撃装置を用い、出力結果の再現性を担保した。

3. 2. 2. 6 計測値の処理

計測した丸太の重量とSPTは次のように扱った。①初回の計測値を期首値とした。②期首値を100%として、その後の計測値を期首値に対する指数(以下、相対値)とした。③重量計測とSPT計測が同一日に実施できなかった場合は、前後の計測値の変化を日数割りして同一日の数値を算出した。

3. 2. 3 結果と考察

3. 2. 3. 1 はい積み前後の SPT 値の違い

はい積み状態と、はいを崩した状態とで SPT 値に差が発生すると仮定した際、その原因は丸太の自重による丸太の拘束状態にあると考えられた。そこで、はい積みされた際に自重による丸太の拘束が SPT に影響して差が出やすいと推定される最も重量の大きな「大」のはいを対象に、丸太の拘束状態が FAKOPP で計測される SPT 与える影響を確認するため、はいの状態での SPT 計測した直後に、はいを崩して SPT 計測を行い、はい積み前後の SPT 値を比較した(図3-4)。この結果、はい積み状態とバラの状態では SPT 値に差がないことが確認できた。

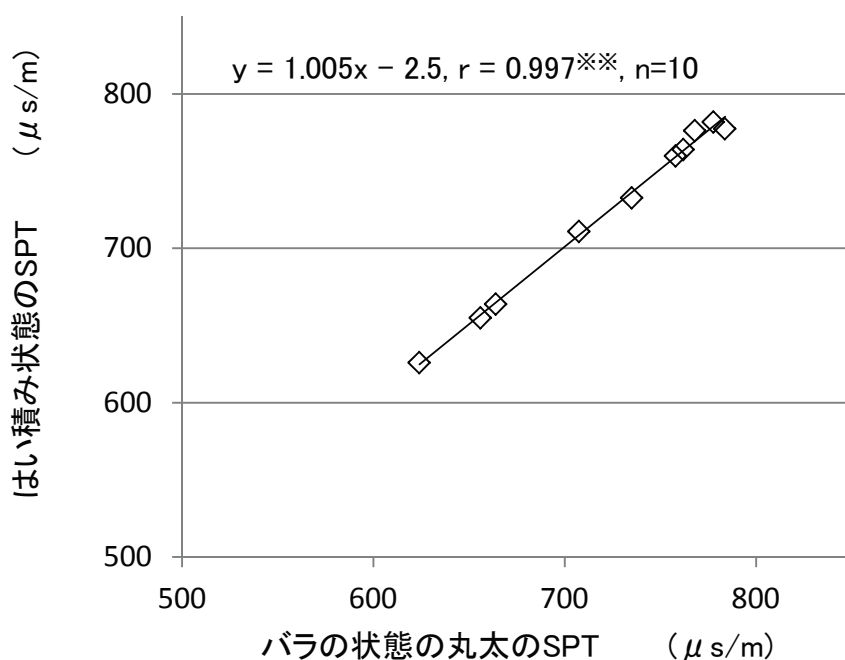


図3-4 はい積みとバラの状態での丸太の SPT の関係 ***(P<0.01)

3. 2. 3. 2 含水率と SPT の経時変化

実測した重量の経時的な推移を図3-5(a)-(c)に、SPT 値の経時的な推移を図3-6(a)-(c)に示す。

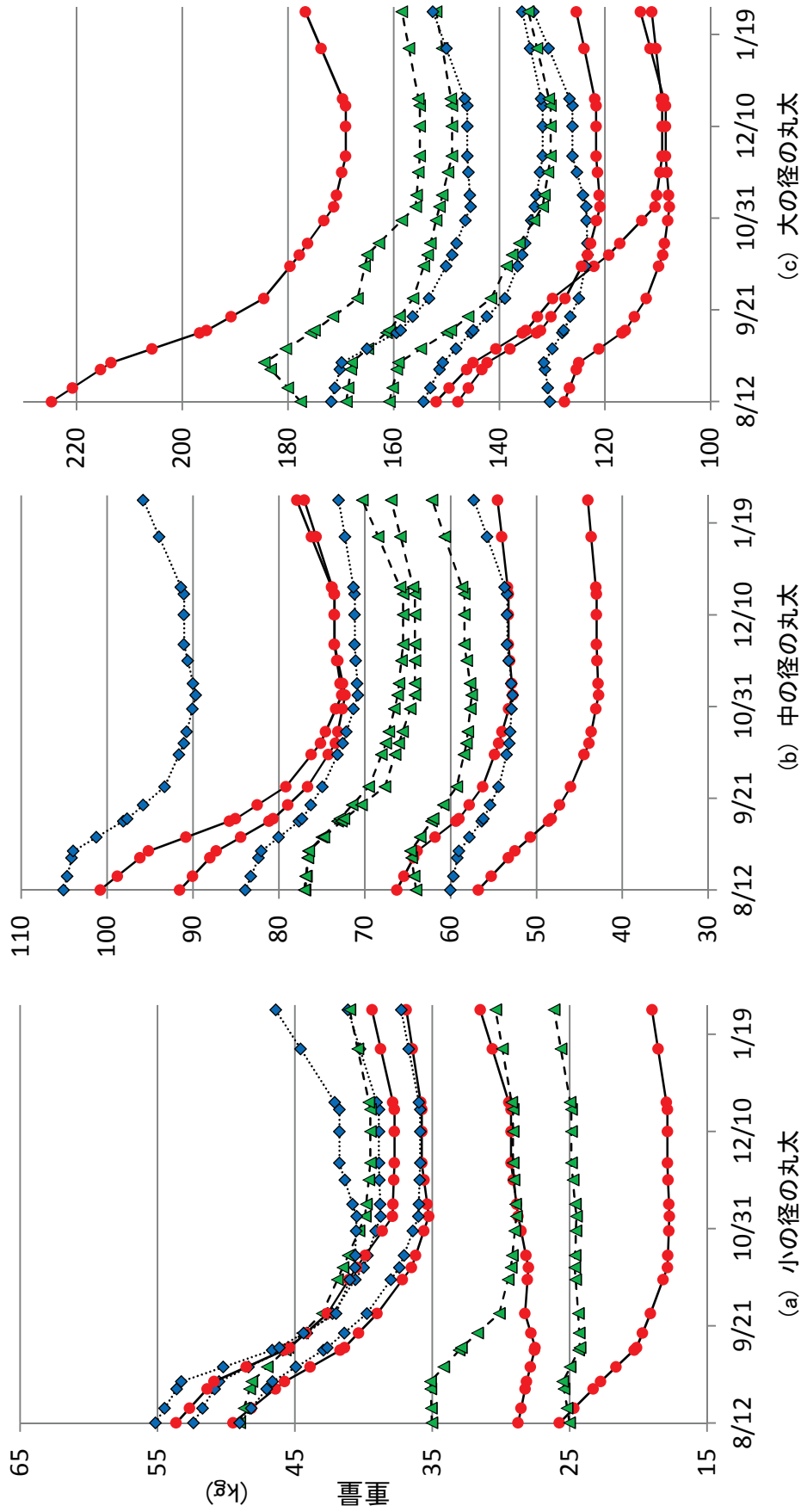


図3-5 丸太の重量の推移

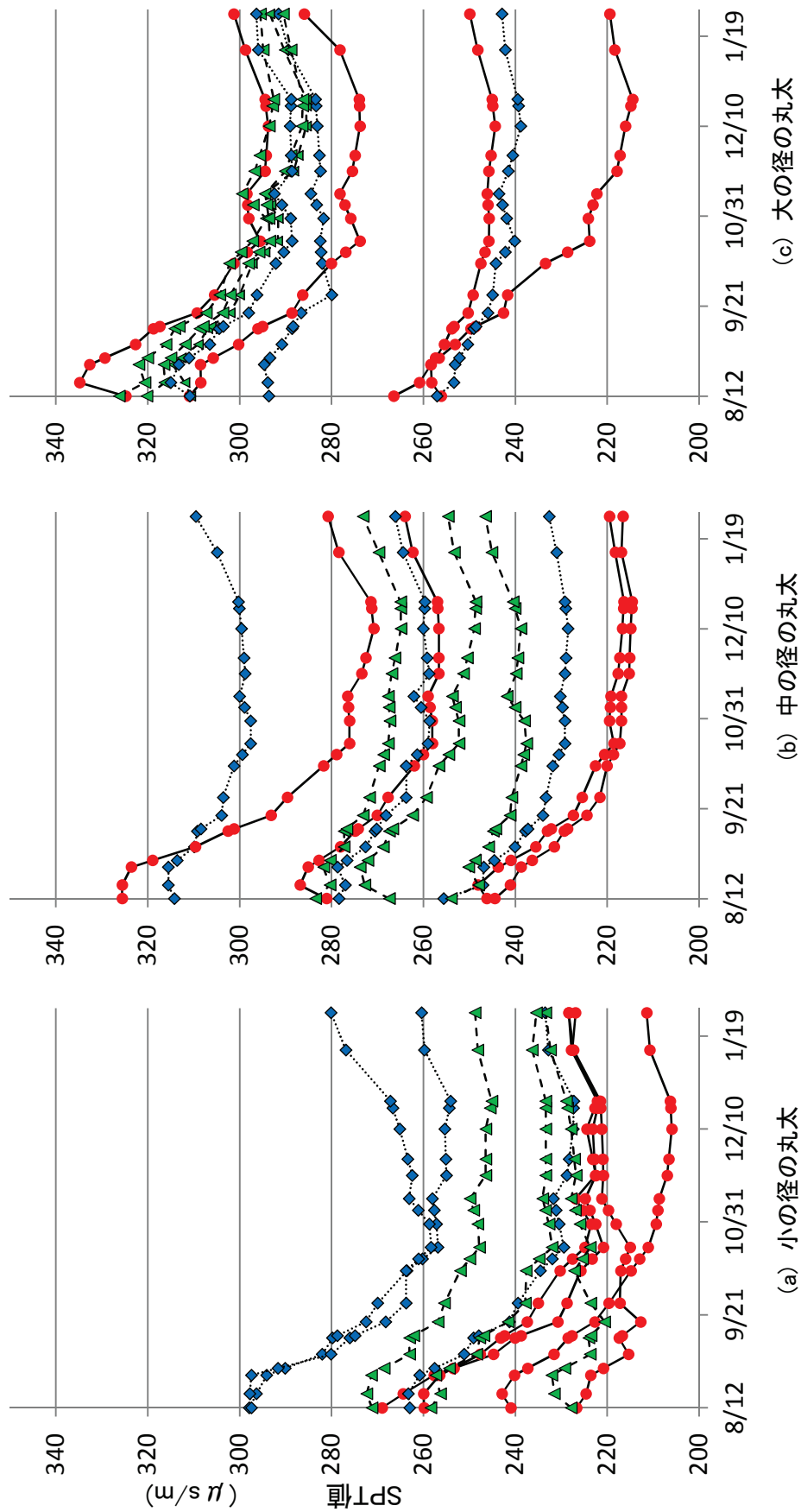


図3-6 丸太のSPTの推移

図3-5、3-6の各図から、原料丸太の乾燥に伴う重量の変化と同様に SPT も変化していることが判読される。重量、SPT とともに、小 > 中 > 大の順に変化が大きく、同じはいでも表側の丸太は裏側や中側の丸太に比べて変化が大きいことが確認できた。また、天気の良い 10 月末頃までは乾燥が進むため重量が大きく低下し、同様に SPT 値が小さくなっているが、以降はそれぞれ微増に転じている。これは晩秋の長雨と、その後の降雪・凍結時期に露天の丸太が水分を吸収した可能性を示している。

3. 2. 3. 3 重量と SPT の変化の関係

径級別にまとめた丸太の重量の相対値と SPT の相対値の関係を、図3-7 (a)-(c)に示す。なお、重量並びに SPT の相対値は、10 組に 1 組の割合でデータを抜き取り、残ったデータで図3-7を作成した。抜き取ったデータは、図3-7で得られる関係式を用いた SPT 相対値による重量相対値の推定の精度検証(後述)に用いた。径級別の丸太の重量の相対値と SPT の相対値には高い有意な相関が認められた($P < 0.01$)。

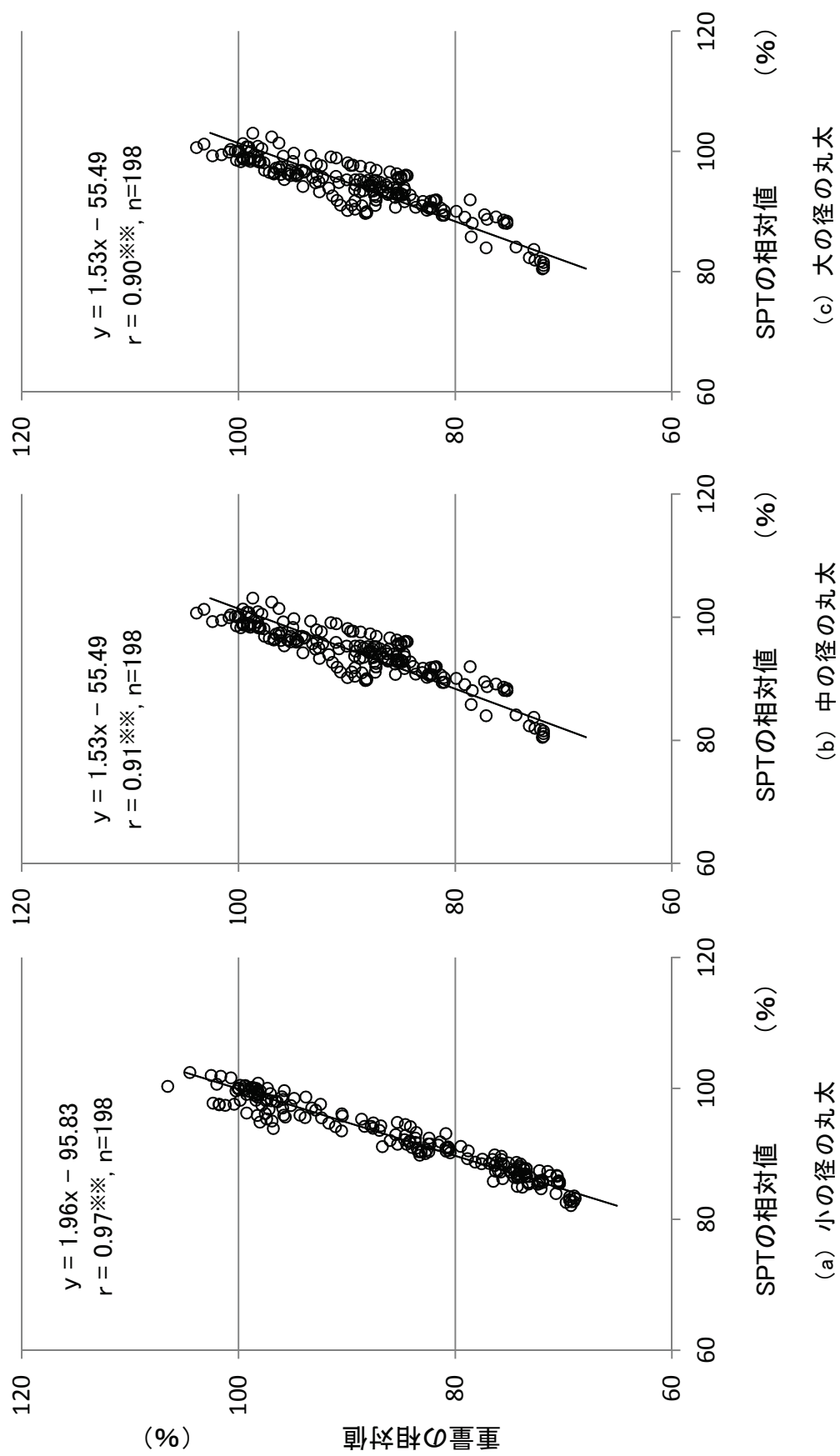
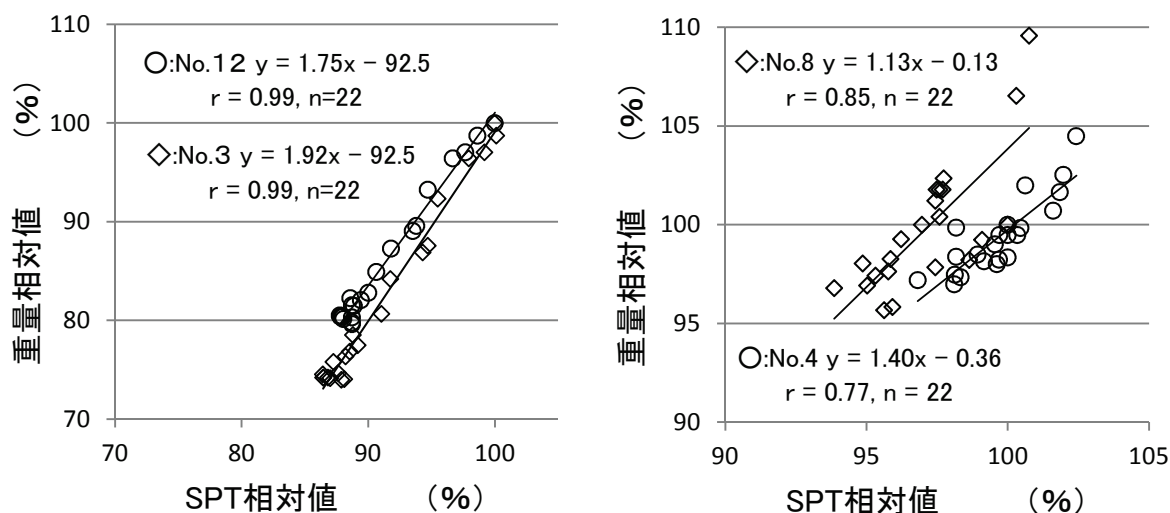


図3-7 SPTと重量の相対値の関係 ※※(P<0.01)

また、個別の丸太における重量の相対値と SPT の相対値の関係の一例を図3-8に示す。ほとんどが図3-8(a)のような直線的な強い相関を示したが、一部の丸太では図3-8(b)のようにやや低い相関を示した。図3-8(b)のような関係となった丸太は、当初の含水率(wb 含水率)が低かった(No.4:30.2%、No.8:7.2%)。このため、ある程度以下の低含水率域では、SPT 計測による重量の推移の推定精度が低下すると考えられた。



(a)通常の丸太

(b)開始時点で低含水率だった丸太

図3-8 個別の丸太における SPT と重量の相対値の関係の事例

3. 2. 3. 4 SPT 計測による重量相対値の推定の精度

図3-7(a)～(c)に示された丸太の径級毎の回帰式と、3. 2. 3. 3で抜き取った検証用データを用い、SPT の相対値から重量の相対値を推定し、実際の重量相対値と比較して推定精度を検証した。

この結果、径級毎の推定誤差の二乗の平均平方根(RMSE)は、小:3.32 %、中:2.69 %、大:3.58 %であり、SPT の相対値を使って、高い精度で重量の相対値を推定できることが分かった。

なお、図3-7(a)～(c)に示された丸太の径級毎の回帰式を用いて、SPT 計測で推定した重量の推移と実測した重量の推移の事例を図3-9に示す。若干の相違があるが、重量計測に際して、降雨直後で樹皮等が湿潤な状態だったり、樹皮が広範囲で剥離して重量計測に影響したこともあるので、このことも合わせて判断すると、SPT 計測により、実測に近い重量推移の推定が、概ね可能であると考えられた。

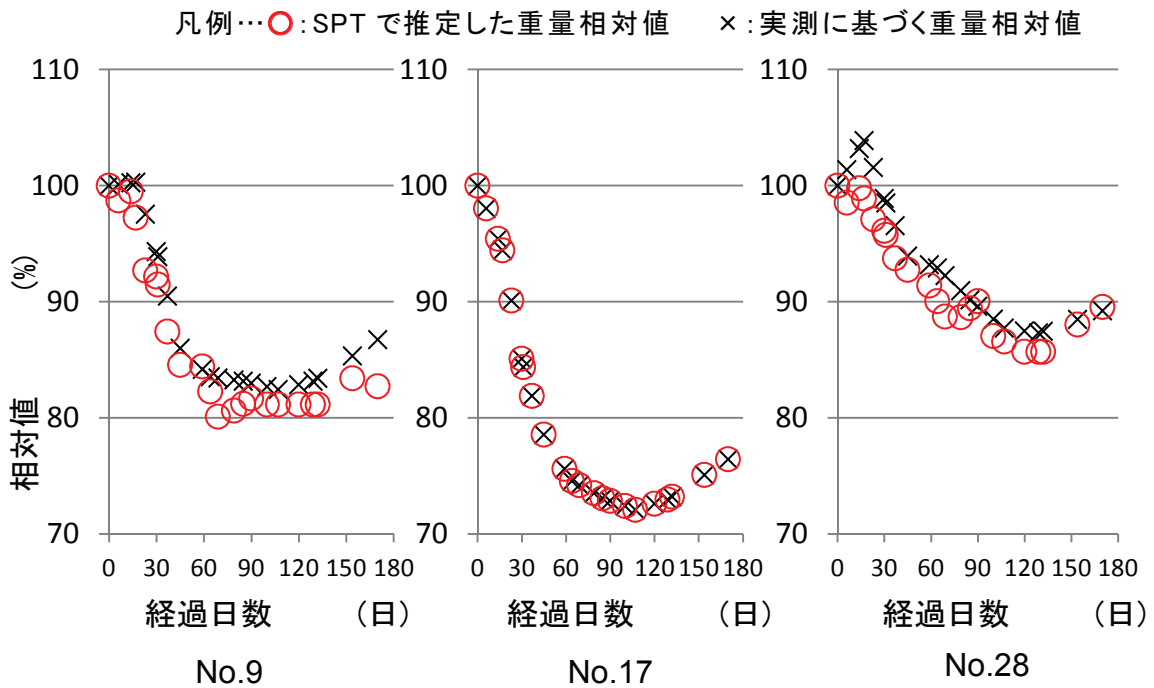


図3-9 SPT 相対値で推定した重量と実測の重量の相対値の推移の事例

3. 2. 3. 5 SPT による重量変化の推移の推定

図3-7に示された丸太の径級毎の回帰式と全ての SPT の相対値から重量の相対値を算出し、はい積みの表・中・裏の別(図3-1)にまとめ、その経時変化を図3-10に示す。森田の報告⁵³⁾のとおり、表の丸太が裏や中の丸太に比べて重量の変化が大きいことや、冬期には重量が増加に転じることが確認でき、SPT 計測によってスギ実大丸太のはい全体の乾燥の傾向が十分把握できることが示された。

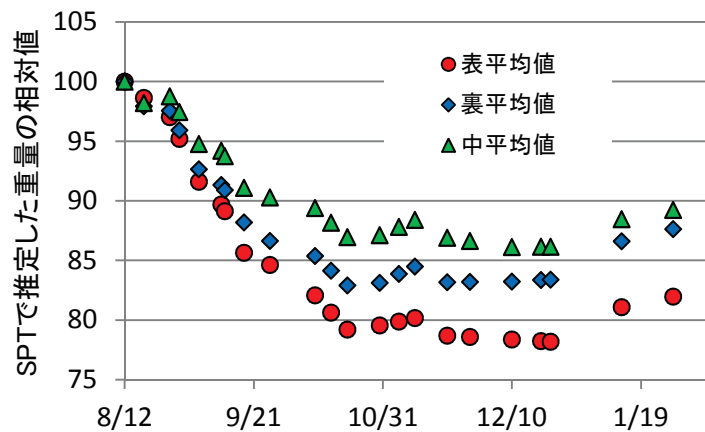


図3-10 SPT で推定した配置毎の重量の相対値

3. 2. 3. 6 SPTによる含水率変化の推移の推定

全ての丸太について、試験開始時の丸太の含水率と計測した重量に基づき、計測日毎の含水率を算出した。その上で、期首の含水率を 100 %として計測日毎の含水率の相対値を求めて 30 本の平均値を算出し、SPT の相対値の平均値との関係を調べた(図3-11)。その結果、両者には高い相関が認められた。図3-11の関係式を用いると、wb 含水率 45 %の丸太を得るには、今回の丸太(期首の平均含水率が 53.6 %)の場合は含水率相対値が約 84 %となるので、SPT の相対値が 93.3 %以下になればよいことが分かる。

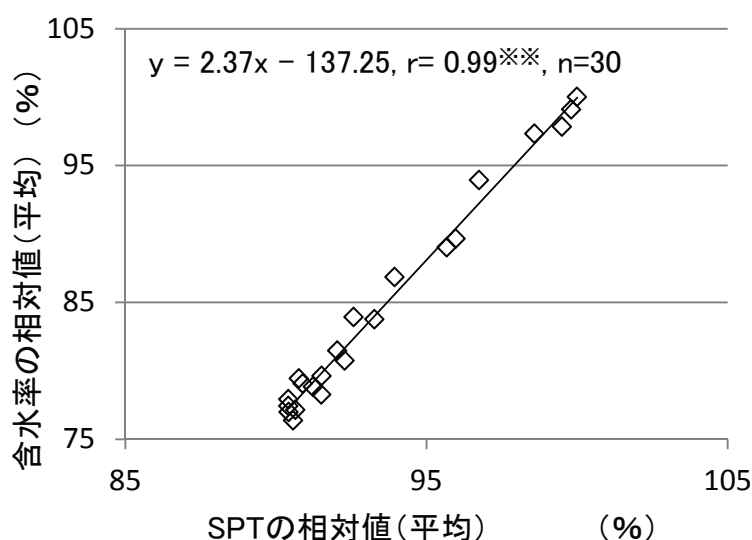


図3-11 SPTで推定した配置毎の重量の相対値 ***($P < 0.01$)

以上のように、はい積み状態での SPT 計測と個別の丸太の重量計測を行った結果、次のことが明らかになった。

- ①計測当初(期首)の重量と SPT をそれぞれ 100%としたときの各相対値は、径級毎に高い相関を持つ。
- ②SPT の相対値と重量の相対値との関係を表す回帰式を用いて、SPT の相対値から推定した重量の相対値は、高い精度で実際の重量の相対値を推定可能で、はい積み状態での SPT 計測により丸太の重量変化を把握できる。なお、はい積み状態とバラの状態での SPT 値に差は認められない。

これらの知見から、県内各地のチップ工場のヤードにおけるはい積み丸太の乾燥調査を SPT 計測によって行うことが可能であると判断した。

3.3 大規模はい積みでの乾燥状況の把握

3.3.1 鳥取県内での燃料用チップの需要の増加

鳥取県内では日新バイオマス発電(前掲写真3-1、5,700kwh 平成27年2月竣工)に加え、県内最大の三洋製紙バイオマス発電(16,700kwh 平成29年1月竣工)が稼働予定である。このため、現在の約4倍近い原料丸太の需要の増加が見込まれ、かつ、今以上に低含水率の燃料チップの安定供給が求められる状況となっている。

山陰地方では、冬期は降雪のため伐採搬出が少なくなるが、安定的に現在の4倍近い原料丸太を確保するには冬季積雪までに冬期間に使用する原料丸太をストックする必要がある。しかし、兵庫県等県外の発電事業者からの引き合いも多いためチップの県外流出が著しく、チップ生産事業者の自助努力による原料丸太のストックが期待できない。そこで鳥取県では原料丸太の安定的な確保のために「木質バイオマス燃料供給支援事業」を創設し、原料丸太の貯木の支援を開始した。

このような情勢にあって、含水率の低い燃料チップの安定供給と、チップ工場の原木ヤードの効率的な運用のためには、原料丸太の乾燥に要する期間の把握と、効率的な乾燥を促すはい積み手法の提案が必要となった。

そこで、3.2で得られた知見を用い、チップ生産業者の原木ヤードにおいて、大規模はい積みにおけるはいの積み方やはい積み時期の違いによるチップ用原木丸太の乾燥状況を調査した。

3.3.2 試験

3.3.2.1 試験体と試験地

試験は鳥取県内のチップ生産業者3社の原木ヤードで実施した。図3-12に各原木ヤードの所在を示す。



図3-12 鳥取県内のチップ生産業者3社の原木ヤードの位置

それぞれのヤードにおいて、「目落とし積み」(図3-13)と「さん積み」(図3-14)(一部のヤードでは使用機材の都合で「かんざし積み」(図3-15)となった)の、主に二種の積み方のはいを設置して、はいの積み方の違いによる乾燥状況の差異の把握を試みた。

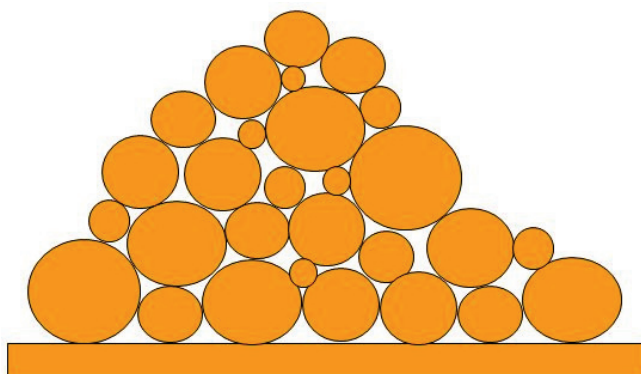


図3-13 目落とし積み(りん無し)

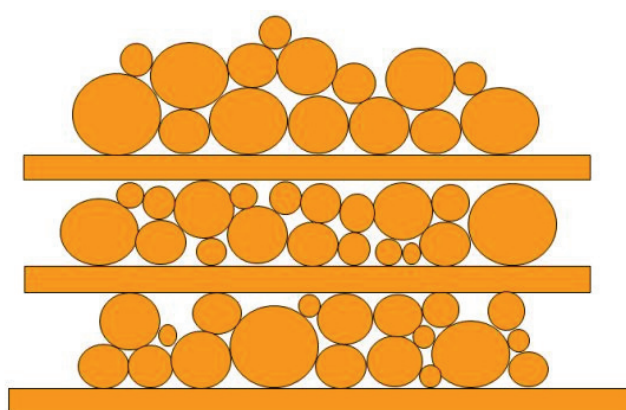


図3-14 さん積み(りん有り)

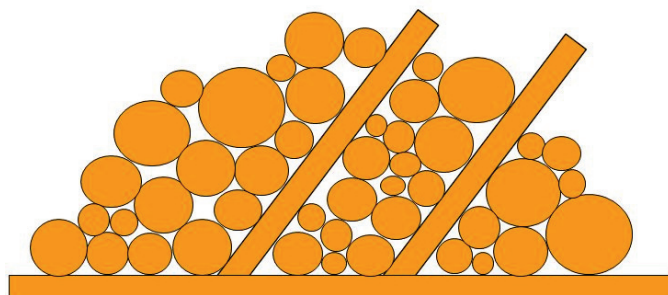


図3-15 かんざし積み(りん有り)

3.3.2.2 試験期間と試験体

試験始期は、はい積みの開始時期の違いによる乾燥の差を確認するため、夏期にはいを積んだ「夏開始」と、冬季にはいを積んだ「冬開始」の二種類を設定した。夏開始は概ね8月前後にはい積みを行い、冬開始は概ね12月にはい積みを行った。それぞれのヤードではい積みした日に、初回のSPT計測を実施した。なお、日南地区では冬開始のはいを1つ増設し、ブルーシートで被覆して違いを確認することとした。表3-1に各試験地におけるはい積みの種類を示す。また、写真3-7～9にそれぞれのヤードにおける実際の各試験はい積みを掲示する。

各はいは概ね100本程度の規模でこのうち40本程度を計測対象の試験体とした。試験体はい積み直前に伐採搬出されたものを用いた。原料丸太の長さは関金地区のみ2m、その他の地区は4mである。なお、いずれのはいでも降雨や直射の影響を受ける最外縁の丸太は計測対象外としている。

表3-1 各試験地のはい積み

場所	開始日	終了日	はいの 積み方	りんの 有無	その他 の条件	はい積み名称
八頭	H27.7.26	H28.10.21	かんざし	有		八頭 夏開始 りん有り
			目落とし	無		八頭 夏開始 りん無し
	H27.12.28	H28.10.21	かんざし	有		八頭 冬開始 りん有り
			目落とし	無		八頭 冬開始 りん無し
関金	H27.8.5	H28.9.7	さん積み	有	砂利土場	関金 夏開始 りん有り
			目落とし	無	砂利土場	関金 夏開始 りん無し
	H27.12.21	H28.9.7	さん積み	有	砂利土場	関金 冬開始 りん有り
			目落とし	無	砂利土場	関金 冬開始 りん無し
日南	H27.7.24	H28.9.14	さん積み	有		日南 夏開始 りん有り
			目落とし	無		日南 夏開始 りん無し
	H27.12.22	H28.9.14	さん積み	有	シート被覆	日南 冬開始 シート
			さん積み	有		日南 冬開始 りん有り
			目落とし	無		日南 冬開始 りん無し



(a)夏開始 りん無し



(b)夏開始 りん有り



(c)冬開始 りん無し



(d)冬開始 りん有り

写真3-7 八頭地区のはい積み
使用機材の都合でかんざし積みになっている。



(a)夏開始 りん無し



(b)夏開始 りん有り



(c)冬開始 りん無し



(d)冬開始 りん有り

写真3-8 関金地区のはい積み



(a)夏開始 りん無し



(b)夏開始 りん有り



(c)冬開始 りん無し



(d)冬開始 りん有り



(e)冬開始 りん有り、シート被覆

写真3-9 日南地区のはい積み

3.3.2.3 丸太の区分

3.3.2.3.1 径級による区分

計測対象の丸太は、既報⁵³⁾に倣って各丸太を末口径の大きさを小(末口径150mm未満)、中(末口径150mm以上220mm未満)、大(末口径220mm以上)に区分した。

3.3.2.3.2 はい積みにおける丸太の配置での区分

夏開始のはいについては、径級の区分の他に、はい積みされた状態における地面からの高さを次のように区分し、丸太の重量軽減の差の有無を確認することとした。

①目落とし積みのはい…0.0～0.5m、0.5～1.0m、1.0～1.5m

②さん積み、かんざし積みのはい…最下段、二段目、三段目

なお、各はいでの径級別、配置別の本数は表3-2のとおりである。

表3-2 はい積み毎の径級と配置による丸太の区分

はい積み名称	調査対象本数							
	径級区分				配置での区分			
	小	中	大	計	1段目 または 0.5mまで	2段目 または 0.5m～1.0m	3段目 または 1.0m以上	計
八頭 夏 りん有り	28本	15本	7本	50本	16本	29本	5本	50本
八頭 夏 りん無し	16本	15本	10本	41本	19本	13本	9本	41本
八頭 冬 りん有り	19本	14本	3本	36本				
八頭 冬 りん無し	14本	13本	6本	33本				
関金 夏 りん有り	20本	24本	2本	46本	21本	19本	6本	46本
関金 夏 りん無し	12本	19本	10本	41本	16本	20本	5本	41本
関金 冬 りん有り	13本	30本	1本	44本				
関金 冬 りん無し	14本	18本	8本	40本				
日南 夏 りん有り	25本	10本	1本	36本	17本	16本	3本	36本
日南 夏 りん無し	19本	14本	2本	35本	18本	14本	3本	35本
日南 冬 シート	18本	19本	3本	40本				
日南 冬 りん有り	22本	14本	3本	39本				
日南 冬 りん無し	24本	13本	2本	39本				

3. 3. 2. 4 SPT 計測

丸太の SPT 計測には FAKOPP を用いた。FAKOPP のセンサー挿入箇所には油性ペン等で印を付け(写真3-10)、毎回同じ箇所にセンサーを挿すことで計測区間を統一した。なお、センサーの打撃には定力打撃装置を用い、出力結果の再現性を担保した(写真3-11)。はい積みした日に最初の SPT 計測を行った。その後、概ね1ヶ月毎に SPT 計測を行い、得られた SPT は次のように扱った。①初回の計測値を期首値とした。②期首値を 100 %として、その後の計測値を期首値に対する指数(以下、相対値)とした。



写真3-10 センサー挿入箇所のマーク



写真3-11 計測の状況

3. 3. 2. 5 計測値の処理

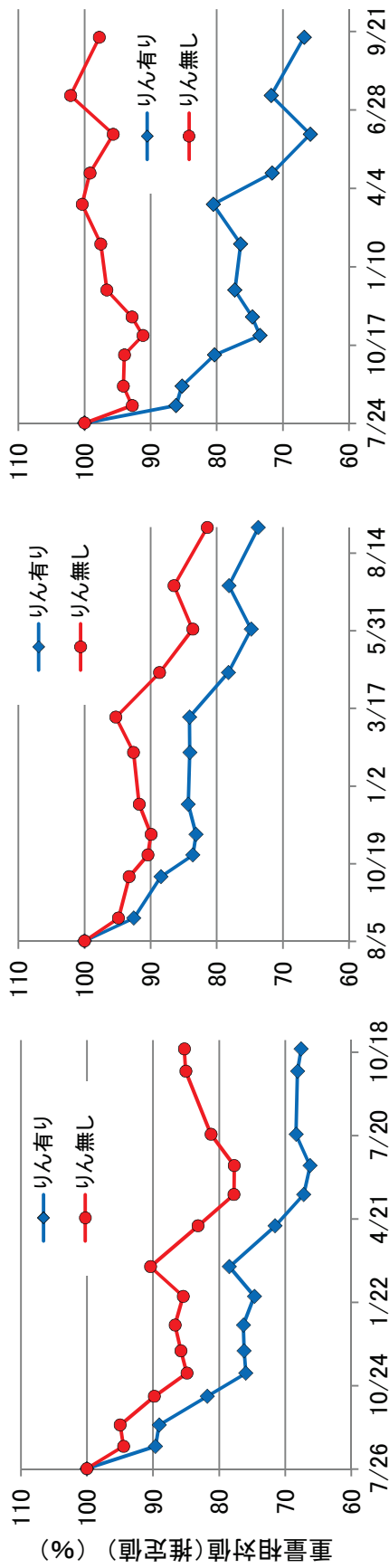
計測した丸太の SPT は3. 2. 2. 6と同様に、次のように扱った。

- ①初回の計測値を期首値とし、期首値を 100 %として、その後の計測値を期首値に対する指数(以下、相対値)とした。
- ②各径級毎に、図3-7の回帰式を適用し、推定重量相対値を算出した。
- ③夏開始のはいと冬開始のはいで SPT 計測が同一経過日数の日に実施できなかった場合は、前後の計測の間の SPT の変化が直線的であると仮定して、値の変化を日数割りして同一経過日数での SPT 値を算出し、推定重量相対値を算定した。

3. 3. 3 結果と考察

3. 3. 3. 1 はいの積み方による原料丸太の乾燥の違い

各地区の夏開始、冬開始のはい積みについて、目落とし積み(以下、りん無し)と、さん積み・かんざし積み(以下、りん有り)の別に、推定重量相対値の平均値を算出し、経時変化を比較した(図3-16、17)。

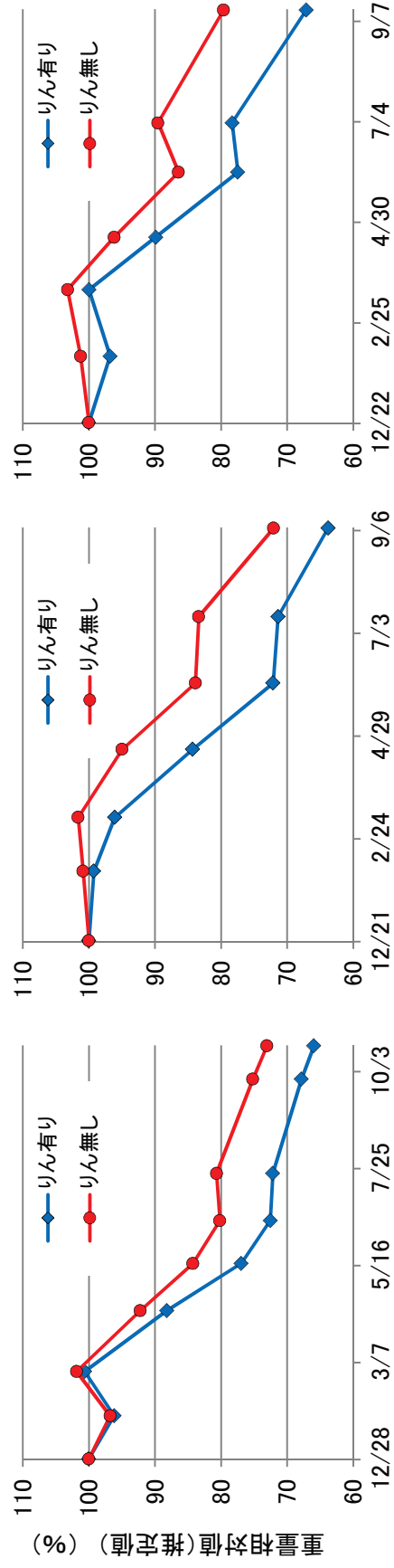


(c) 日南地区

(b) 関金地区

(a) 八頭地区

図3-16 はい積みの違いによる重量相対値の推移の差(夏開始)



(c) 日南地区

(b) 関金地区

(a) 八頭地区

図3-17 はい積みの違いによる重量相対値の推移の差(冬開始)

いずれの地区でもりん無しに比べてりん有りの方が、原料丸太の乾燥が進むことがわかった。なお、全地区の計測最終日におけるりん無しとりん有りの推定重量相対値について、マン・ホイットニーの U 検定を行ったところ、いずれの地区でもりん無しとりん有りには有意な差があることが確認できた($P < 0.01$)。

これらの推定重量相対値の推移から、次のことがわかった。

- ①夏開始は秋期まで、冬開始は3月から5月にかけて乾燥が進む。
- ②冬期間は原料丸太の乾燥が進まない。
- ③梅雨時期等、長期間の降雨がある期間は乾燥が戻る。

なお、日南地区の夏開始・りん無しのはいは、他地区のりん無しのはいと比べて乾燥が進まなかったが、これは図3-13のようにりんの上に目落とし積みをするのではなく、アスファルトの土場に直接目落とし積みをしたために、はいの底部の通気が無く、このことが影響して乾燥が進まなかったと考えられる。

3. 3. 3. 2 被覆の有無による原料丸太の乾燥の違い

日南地区の冬開始のりん有りのはい積みについて、ブルーシートによる被覆有りと被覆無しの別に、推定重量相対値の平均値を算出し、経時変化を比較したところ、はいをブルーシートで被覆した方が、被覆無しのはいより乾燥が進むことが示されたが、当初想定していたほどには差がでなかった(図3-18)。計測最終日のそれぞれのはいの推定重量相対値についてマン・ホイットニーの U 検定を行ったところ、やや有意な差が確認されたにとどまった($P < 0.05$)。このことから、原料丸太の冬期間の乾燥に対しては、被覆の効果は少ないと考えられた

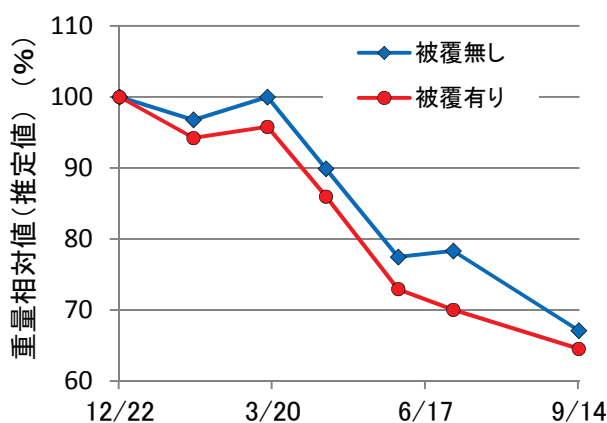


図3-18 被覆の有無による重量相対値の推移の差

3. 3. 3. 3 径級による原料丸太の乾燥の違い

各地区のはい積みについて、3. 3. 2. 3. 1で区分した径級毎に、推定重量相対値の平均値を算出し、経時変化を比較した(図3-19~22)。りん有りのはいでは径級の小さい丸太の乾燥が進んだが、りん無しのはいでは径級の別

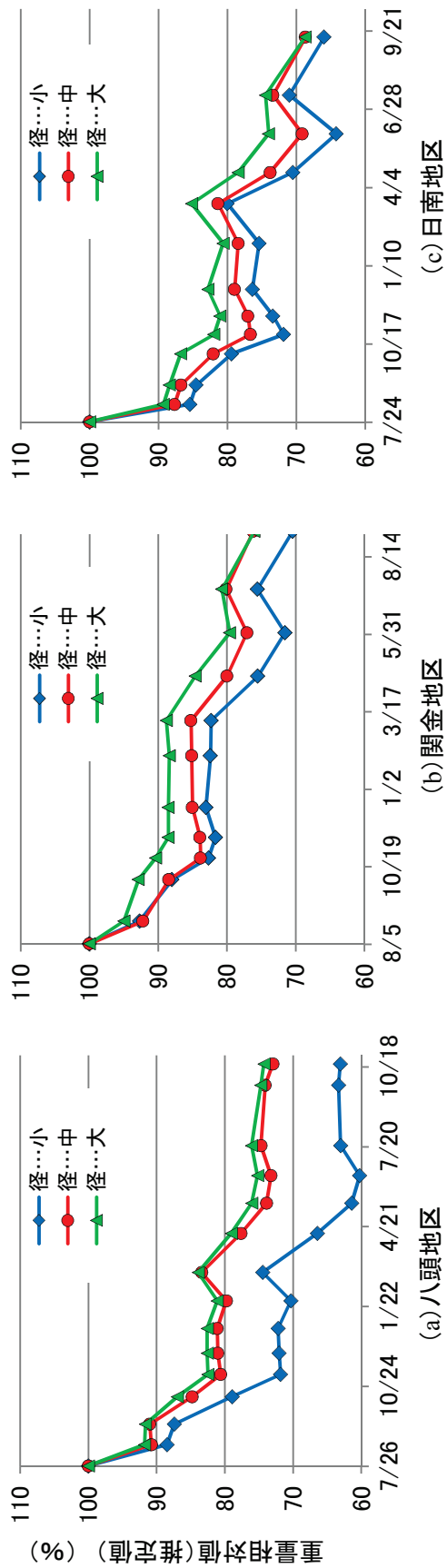


図3-19 夏開始、りん有りのはいにおける原料丸太の径級別の推定重量相対値の推移

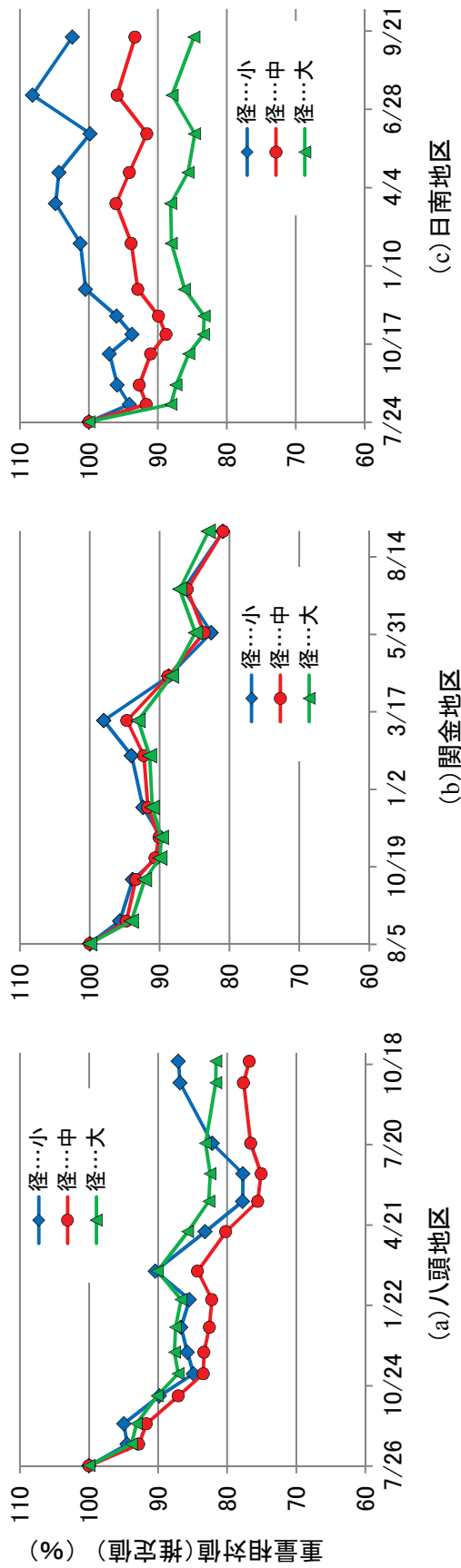
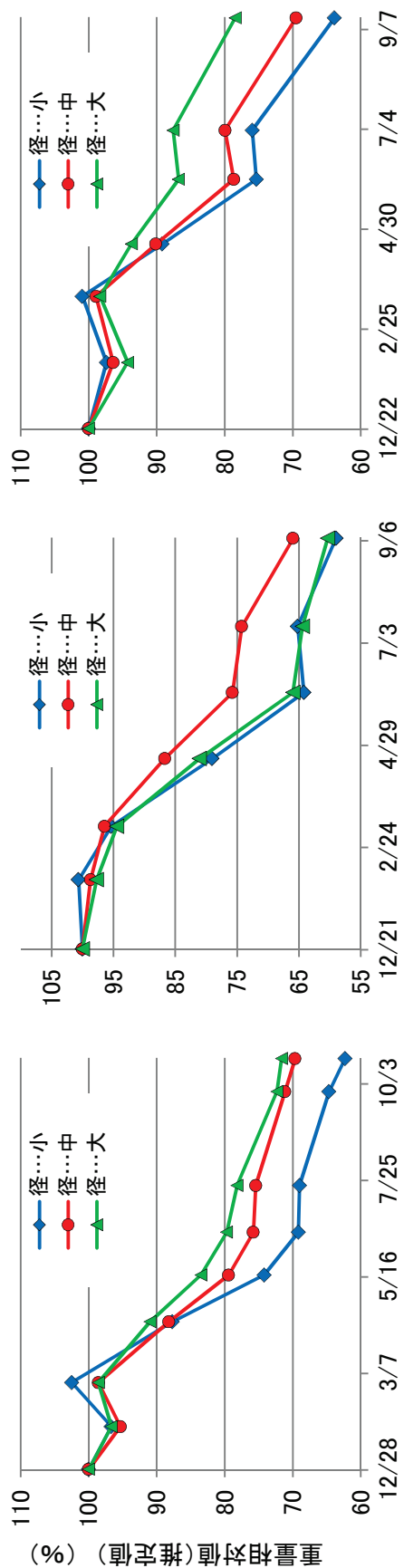
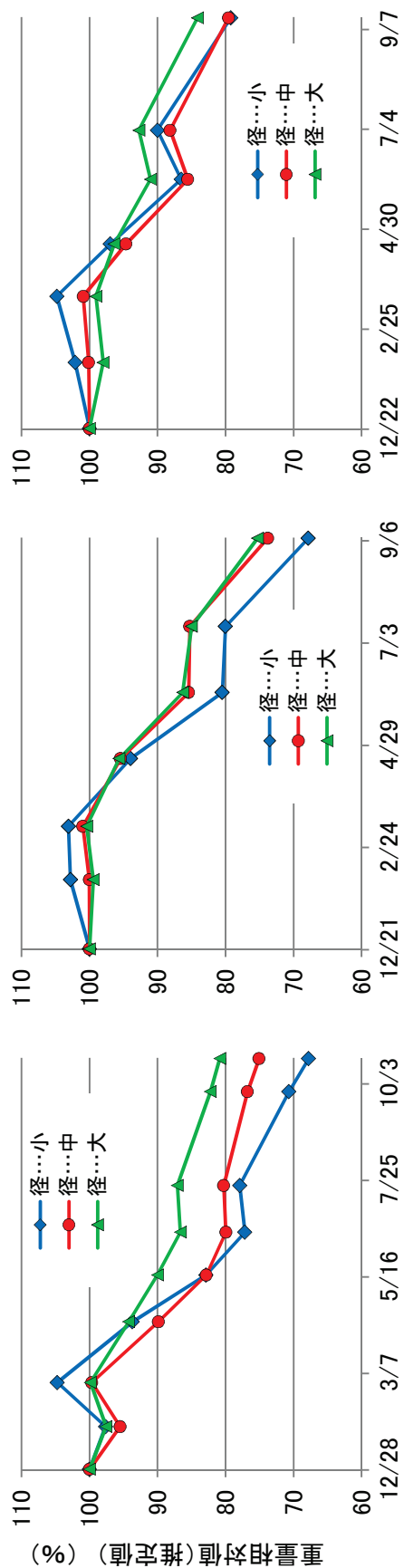


図3-20 夏開始、りん無しのはいにおける原料丸太の径級別の推定重量相対値の推移



(a) 八頭地区

図3-21 冬開始、りん有りのはいにおける原料丸太の径級別の推定重量相対値の推移



(a) 八頭地区

図3-22 冬開始、りん無しのはいにおける原料丸太の径級別の推定重量相対値の推移

での乾燥の進み方には大きな差が見られなかった。また、りん無しのはいでは径級の小さい丸太が一度乾燥するものの、冬季の積雪や梅雨の長雨により乾燥が戻る、もしくは当初より重量が増加する傾向が顕著に表れた。

また冬開始のはいでは、径級の大きな丸太で、りんの有無による乾燥の差が少ないように判読される。そこで計測最終日のそれぞれのはいの推定重量相対値についてマン・ホイットニーの U 検定を行ったところ、りんの有無による推定相対重量の差が無いことが確認された ($P>0.05$)。りんを挟みながらいを積むさん積みは、積む際に現場の手間がかかりましになるため、径級の大きな原料丸太では冬開始の場合は目落とし積みでも良いと言える。

3. 3. 3. 4 配置による原料丸太の乾燥の違い

各地区のはい積みについて、3. 3. 2. 3. 2で区分したはいにおける原料丸太の配置毎に、推定重量相対値の平均値を算出し、経時変化を比較した(図 3-23、24)。

はいの中での原料丸太の配置による乾燥の差では、りん有りのはいでは、八頭地区と日南地区において、1段目が最も乾燥が進んでいた。これは上部のはいが降雨や積雪を遮ったことと、最下部の通風が確保されていたためと考えられる。このことを実大のはい積みに応用する場合は、出来るだけさん積みの段数を増やし全体を高く積むことで、乾燥した原料丸太の増産が期待できる。

しかし、りん有りのはいでも、関金地区では最も乾燥が遅れた。これは、関金地区の土場が未舗装だったことが大きく影響していると考えられる。未舗装の土場では地面からの湿度の供給が続き、下部の原料丸太の乾燥を遅らせたと推定される⁵⁵⁾。なお、関金地区では原料丸太が他地区より短かったにもかかわらず、この結果は原料丸太が短い方が乾燥が進むという既往の研究⁶¹⁾と逆の結果となり、土場の地面の性状がはいの乾燥に与える影響が大きいことが示された。

また、日南地区のりん無しのはいでは、地上高 1.0m 以上と、1.0m 未満で乾燥の進行に差が生じている。これは同地区のりん無しのはいが、土場に直接目落とし積みされたために、はいの下部での通気が無く、はいの上部だけが通風や日射加温で乾燥したためであると考えられる。

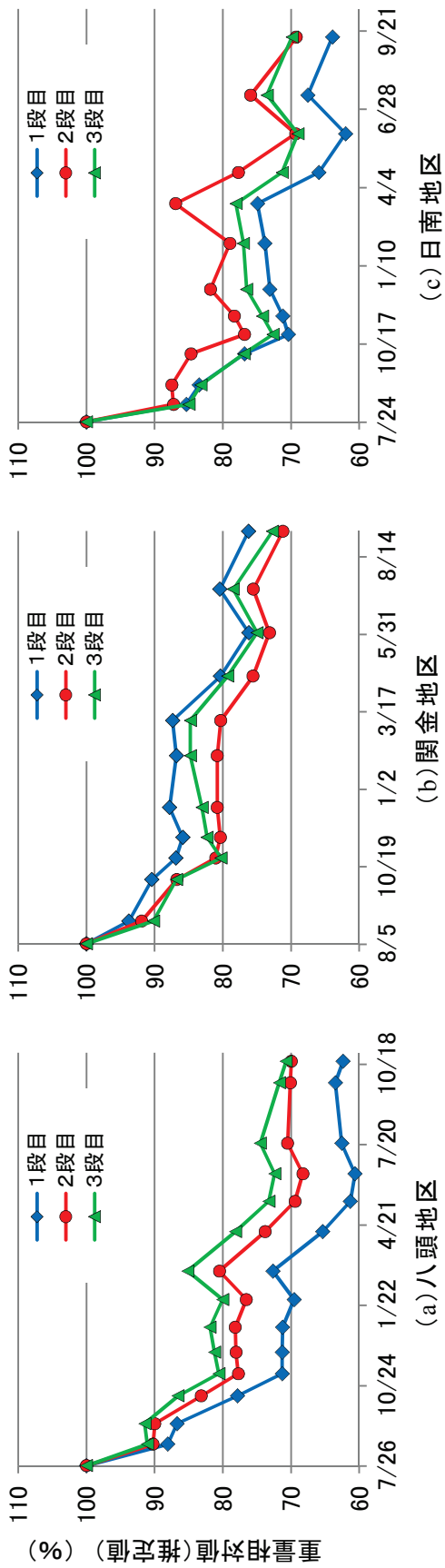


図3-23 りん有りのはいにおける原料丸太の配置別の推定重量相対値の推移

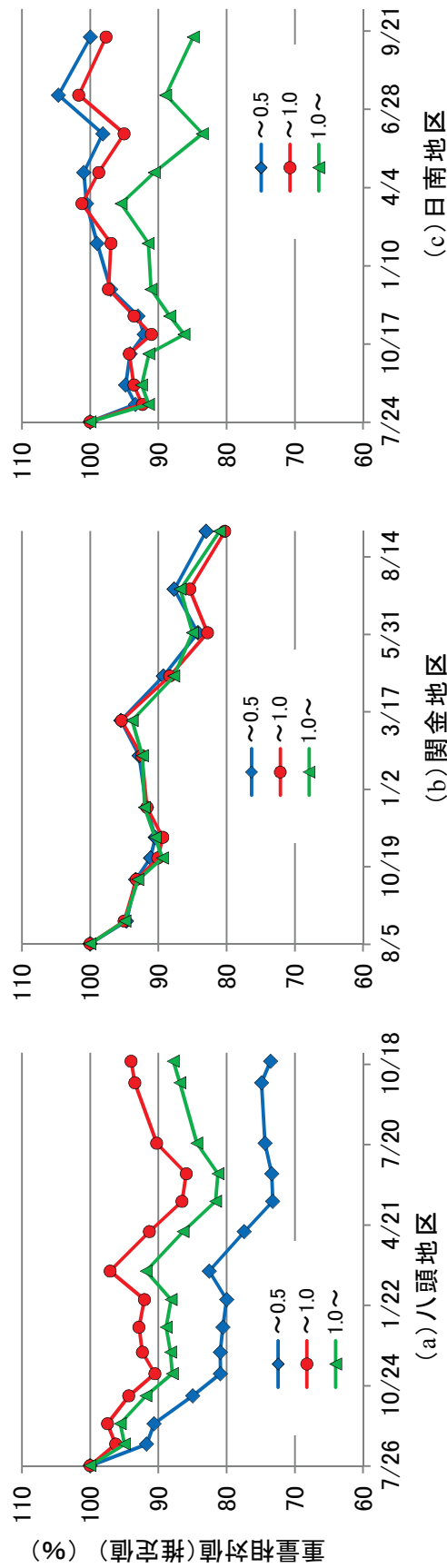


図3-24 りん無しのはいにおける原料丸太の配置別の推定重量相対値の推移

3. 3. 3. 5 乾燥始期による乾燥の差と必要な乾燥期間の推定

全地区の夏開始、冬開始それぞれのりん有りのはいについて、全ての試験体における開始から15日ごとの推定重量相対値を算定し、平均値を比較した(図3-25)。

この結果、夏開始のはいは冬開始のはいに比べ、短期間で乾燥することが明らかになった。さらに冬開始のはいでは、当初の60日間ではほとんど乾燥しないが、後半の60日間で乾燥が進んでいることがわかった。

この図を用いて、原料丸太の乾燥に必要な期間を試算した。

3. 2で用いた試験体を参考に、期首の原料丸太の含水率を

55%、期首の原料丸太の重量を100kgと仮定して、目標含水率を45%とした場合、木質重量は変化しないので、目標含水率時の原料丸太の重量は次のように求められる。

期首の状態：目標時の状態 = 55% : 45%

目標時の丸太重量相対値 = $45\% \div 55\% = 0.818$

つまり目標含水率時の重量相対値は81.8%となる。そこで、図3-25から重量相対値81.8%になる日数を求めると、夏開始は約80日、冬開始は約135日間が必要となることがわかった。

この結果を用いれば、りん有りのはいの管理として、8月1日に積んだはいの場合は10月20日過ぎ、12月1日に積んだはいは4月15日過ぎにチップ加工すれば、好適な燃料チップを生産できることになる。また、冬期間の乾燥が進まないことも考慮すると、冬季から4月にかけてチップ加工する予定の原料丸太は9月上旬までにははい積みを行ってストックすることが望ましい。さらに、5月以降のチップ加工丸太は3月当初にははい積みすれば、春季に乾燥が急激に進むので、好適な含水率への短期間での低減が期待できると考える。

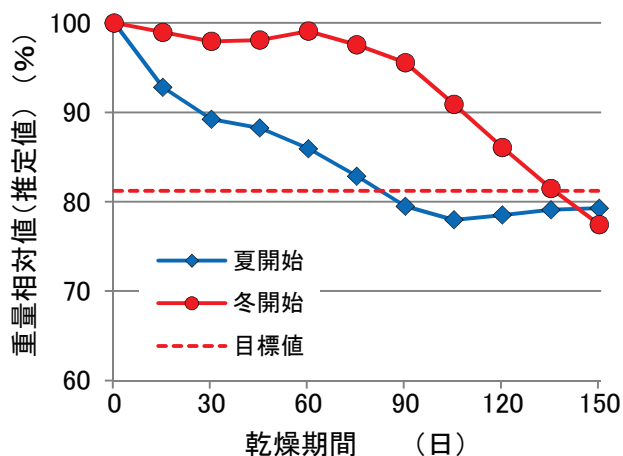


図3-25 りん有りのはいにおける原料丸太の開始時期別の推定重量相対値の推移

3.4 まとめ

原料丸太の乾燥について SPT 計測を用いたところ、次のようなことが明らかになった。

- ①原料丸太の乾燥に伴う重量の減少と SPT 値の減少には高い相関があり、重量の期首値に対する相対値を SPT 計測によって高い精度で推定可能である。
- ②はい積み状態とばらした状態の原料丸太では SPT 値に変化が無く、はい積み状態での SPT 計測により適正な調査が可能である。
- ③はい積みに際してりんを挟む積み方(さん積み、かんざし積み)が、原料丸太の乾燥に有効である。なお、はいの最下部にはりんを設け通気を確保しなければならない。
- ④径の小さな原料丸太はりんをする効果が大きい。
- ⑤原料丸太の乾燥が進む時期が決まっている。梅雨期、積雪期は乾燥が進まず、乾燥が戻る恐れがある。
- ⑥冬期にはいをブルーシートで被覆しても、乾燥に対する効果が小さい。
- ⑦さん積みでは段数が多いほど、多くの原料丸太を適正に乾燥させられる。
- ⑧原料丸太の乾燥に必要な期間の目安は、夏開始は約 80 日、冬開始は約 135 日間程度である。

なお、燃料チップ用の丸太について、実際のヤードでの乾燥状況把握のためには、はい積みした直後から定期的に特定の丸太(複数本が望ましい)の SPT を計測することで、重量変化の把握が可能であると考えられる。特に、計測対象の丸太の期首含水率を把握しておけば、目標値に達したか否かを判定でき、効率的なヤード運営と低含水率のチップの生産が可能となる。

これらの知見をチップ生産事業者に普及し、適正含水率チップの安定供給を実現するとともに、素材のカスケード利用と地域への還元に繋げていきたいと考える。

第4章 応力波法によるスギ葉枯らし乾燥行程の観察

4.1 研究の背景

4.1.1 スギ材の生産現場における葉枯らし

木材は組織内に様々な形で水を含むが、生材の場合、水分のほとんどは「自由水」という形で細胞内に存在している。木材が平衡含水率に達するまでは、水分量の変化に伴い、割れ、ねじれ、収縮などの寸法変化が発生する⁶²⁻⁶⁴⁾。このため、工業材料としての木材の品質安定のためには、様々な手段で木材に含まれる水分を減少させる乾燥行程が必須となる。

我が国の代表的な造林樹種であるスギは、成長性・加工性等に優れる一方で、含水率が高いという欠点を持つ。このために、天然乾燥では長い期間を要し、また人工乾燥では多くの燃油を消費する。そのようなスギの素材生産現場では、材色の改善や搬出時の重量軽減等を目的に、伐木を造材しないで枝条をつけたままで林内に放置する「葉枯らし」が行われることがある⁶⁵⁾(写真4-1)。



写真4-1 鳥取県内での葉枯らし実施の状況

特に左の例では定石どおり梢を斜面上方に向け、木口を切り株に乗せている

かつて、木材を河川等で流送していた時代には、葉枯らしは木材に浮力を与えるために必須の作業とされた時代もあったが⁶⁶⁾、近年は主に材色の改善による市場での単価向上を目的に葉枯らしが実施されている。

スギは心材色によっても価格が異なり、心材色が黒い「黒心」は、心材色の赤い「赤心」に比べ、原木単価が二割以上の安値で取引される(写真4-2)。

葉枯らし材は材色が良好になるとされ⁶⁷⁾、木材市場で高値が付けられる。特に伐採当初に「黒心」だったスギについて葉枯らしを行うと、心材色が改善し

「赤心」になるといわれており、古くからの林業地である智頭町では、大径材で無節の良材では好んで葉枯らしが実施されている。



写真4-2 鳥取県東部の木材市場でのスギ赤心材(左)とスギ黒心材(右)
このときの m^3 単価は赤心 19,000 円/ m^3 、黒心 13,000 円/ m^3 (2015.12 智頭)

葉枯らし材は、きざみ(加工)時の刃あたりが良いといわれ、また香りがよい、艶がある等、天然乾燥の無垢材を扱う工務店や大工等に珍重され、また施主が特に指定することもある。

さらに、葉枯らし材は出材以前に含水率が低減しているため、人工乾燥経費が低減されることが示されるなど^{68,69)}、有利な点が多い付加価値化の技術であると考えられ、昭和63年からは、国有林野施業で葉枯らし材を搬出し、「サンドライ」という名称でブランド化を推進した経緯もある。

しかし、葉枯らし材の生産現場では、伐採後しばらく経過してから再度現場に通うことになるため、作業効率が低下し伐採搬出経費の増加が避けられない。このため近年は葉枯らし乾燥材の出荷が低迷している。葉枯らしによる原木単価向上と現場の手間の増が相殺する状況ではあるが、市場関係者や無垢材嗜好の工務店ではスギ葉枯らし材の出材に対する要求が根強い。

4. 1. 2 葉枯らし材の出材増に向けて

葉枯らし乾燥技術を積極的に利用し、現場作業の効率化とスギ材の付加価値化を両立させるためには、葉枯らしに要する期間や含水率の低減状況の把握が必要であると考えられる。

特に、葉枯らしに必要な期間を把握し林業事業者へ情報提示できれば、具体的な作業計画に積極的に葉枯らしを組み込むことが可能になり、次の施業

との作業リンクができて、「二度手間」の解消に繋げることが出来るほか、長期の林内放置による虫害や菌による変色等、材価の低下に繋がるリスクを計画的に回避することが出来るようになると思う。

また、葉枯らしは、良材の単価向上のためのみならず、木質バイオマス発電所用の原料丸太の含水率低減のためにも有効な手段である⁷⁰⁾ので、葉枯らしにかかる森林事業者へのペイバックのシステムを構築できれば、森林事業者、チップ製造業者、発電事業者の三者それぞれにとって有益となりうると考える。

4. 1. 3 既往の研究

葉枯らしに必要な期間については、伐採時期や伐採条件、使用機械、気候などの環境に左右され⁷¹⁾、地域によって1年以上の長い期間が必要とされる場合もあった⁷²⁾。1980年代に全国的に葉枯らしに必要な期間についての研究がなされた経緯がある。このときの研究では、葉枯らしの期間は概ね2~3ヵ月程度でよいという結果が得られている⁶⁵⁾。しかし、伐採の時期や伐採率、あるいは施業地の標高や斜面方向など、各条件によって葉枯らしに要される期間は異なる⁷¹⁾ことが推定されるが、後述するように、このときの研究手法では施業パターンを増やすことが困難で調査内容は限られている。また、晴天日数が少なく冬期の積雪も多い鳥取県での知見は少なく⁷³⁾、その後の進展がないため、葉枯らしは一部の林業地でのみ行われるにとどまっている。

従来の葉枯らし研究では、多くの試験体を一斉に伐採した後、定期的の一部の試験体を鋸断して円盤等を採取し含水率を計測していた。このため、同じ試験体における水分量の変化の連続的な把握は不可能だった。特にスギでは含水率の個体差が大きく、乾燥の進行にも個体差があるという可能性が否定できないため、試験体を鋸断し円盤を採取する方法では限界がある。葉枯らしでの乾燥状況の推移を適正に把握するためには、同一の試験体を対象とした非破壊的な手法での継続的な調査が望ましい。

4. 1. 4 葉枯らしでの非破壊連続計測の試み

さて、第2章で詳述したように、桐林らは立木の強度性能選抜のために、FAKOPPを用いたSPT計測における出力結果の再現性を高めた計測手法としてMM法を確立した⁵⁹⁾。この過程で桐林らは、MM法を用いて室内におけるスギ丸太の自然乾燥行程を計測した結果、実大材においてSPTと丸太に含まれる水分量の変化に高い相関があることを確認した⁶⁰⁾。さらに、このことを応用し露天に放置したはい積み状態の丸太の乾燥に伴う重量の変化を、SPT計測を

用いて非破壊的に、かつ効率よく把握できることを示したところである⁷⁴⁾。

本章では出力結果の再現性の高い MM 法による SPT 計測を用いて、同一個体における葉枯らし乾燥行程での水分減少を非破壊的に把握し、葉枯らしに要する期間の測定と含水率低減効果の推定を試みたうえで、葉枯らしの期間の把握を前提にした森林施業の現場における葉枯らし施業の進め方について述べる。

4. 2 林業試験場内での葉枯らし試験

4. 2. 1 研究の経緯

第2章で角度補正などの試験に用いたスギは多数のセンサー挿入傷が付いたため、伐採搬出することになったが、このとき伐採木の位置や機材の関係で、試験体を人力で直近の林道まで引き出さなければならなくなった。伐採直後の生材は水分が多く重いため、人力での引き出しは困難だった。そこで可能な限り重量軽減を図るため数ヶ月間の葉枯らしを行い、SPT 計測によってこの間の重量の推移の観察を試みた。

4. 2. 2 試験体と試験方法

4. 2. 2. 1 試験体と試験期間

葉枯らし行程での含水率変化の把握には FAKOPP による SPT 計測を用い、試験には林業試験場内の 31 年生のスギ 12 本（胸高直径 185 mm～295 mm）を供した。試験体の SPT 計測は平成 26 年 9 月 1 日から翌年 2 月 2 日まで行った。

4. 2. 2. 2 伐採条件と伐採時期

近年はコスト的に再造林が困難なので、葉枯らしに有利とされる皆伐施業が僅少となっている。このような実情に対し、試験体の伐採条件は 1 割未満の間伐率の抜き伐りなので、低間伐林の林内での葉枯らしが再現できると考えた。

伐採は、伐採後の試験体の虫害を避けるため盛夏までの期間を避け、平成 26 年 9 月 1 日から同月 3 日にかけて試験体を伐採した。

4. 2. 2. 3 SPT 計測

SPT の計測には FAKOPP を用いた。全ての試験体について、MM 法に準じた斜め方向(センサー間隔 1.5 m)のセンサー配置(以下、測線)を設定した(図4-1、写真4-3)。なお、斜め配置の場合、応力波は髄を含む放射断面内を直線的に伝播するとされている⁴¹⁾ので、計測では測線内における樹幹全体の水分状態の評価が可能であると仮定した。

測線設定では、計測毎の計測区間を統一するため、毎回同じ箇所センサーを挿入出来る様に、対象部分にガムテープを巻き油性ペンで挿入箇所をマークし(写真4-4)、樹幹に対して概ね 45 度の角度で挿入した。

さらに、SPT 計測では緩みがない程度にセンサーをゴムハンマーで樹幹に打ち込むが、本調査では同一箇所へセンサーを挿入するため、計測の回を重ねる度に差し込み深さが漸増する。応力波の伝搬経路を2つのセンサーの先端を結んだ直線と仮定した際、計測毎のセンサーの挿入深さの違いによるセンサー先端間距離の差が SPT に与える影響を控除するため、計測毎にセンサーの未挿入延長を鋼尺で計測してセンサー挿入深さを求めた(写真4-5、図4-2)。

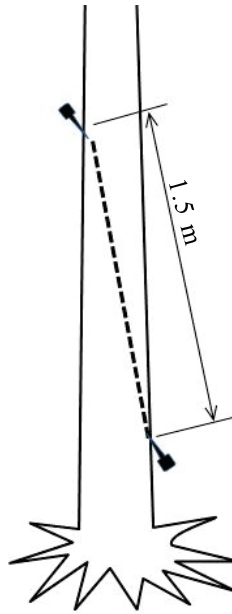


図4-1 測線の設定, 写真4-3 試験



写真4-4 センサー挿入箇所のマーク



写真4-5 センサー未挿入長(a)の計測

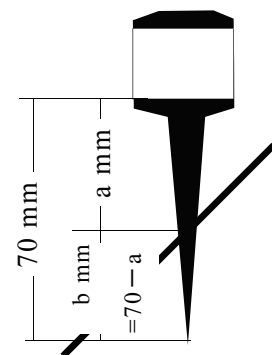


図4-2 センサー挿入深(b)の算出

初回の計測は伐採直後に行い、その後は概ね 10 日毎に、マークした箇所にセンサーを挿入して SPT を計測した。FAKOPP のセンサーの打撃には毎回同じ定力打撃装置を用い、出力結果の再現性を担保した。

4. 2. 2. 4 含水率の計測と密度の算出

試験体の伐採直後に、試験体元口から厚さ 3 cm の円盤を採取し、全乾法で含水率を求め期首の値(以下、期首含水率)とした。また、試験終了日に試験体から丸太を造材した直後に、各丸太の木口から厚さ約 3 cm の円盤を採取し全乾法で含水率を求め、個体毎の平均を求めて期末の値(以下、期末含水率)とした。また、各丸太は寸法・重量を計測して密度(以下、期末密度)を求めた。そして、葉枯らし乾燥程度の水分減少では体積に変化がないという仮定の下で期末密度と期末含水率および期首含水率を用い、式(3)を用いて伐採直後の密度(期首密度)を推定した。

$$\left. \begin{aligned} &(\text{期末密度} \div (100 + \text{期末含水率})) \times 100 = \text{木質の密度} \\ &(\text{木質の密度} \times (100 + \text{期首含水率})) \times 100 = \text{期首の密度} \end{aligned} \right\} \dots \text{式(3)}$$

4. 2. 2. 5 計測値の処理

計測した SPT は次のように扱った。

- ① 樹幹上のセンサー挿入マークに基づく見かけのセンサー間距離(1.5 m)と胸高直径から樹幹に対する測線の成す角度(測線角度)を算出した。
- ② センサー挿入角度を 45 度と仮定し、測線角度とセンサー挿入角度との角度差と、センサーの挿入深さおよび見かけのセンサー間距離から計測回毎のセンサー先端間の距離を算出した。
- ③ センサー先端間距離で SPT 値を除して単位距離あたりの SPT を求めた。
- ④ 初回の計測値を期首値とし、期首値を 100 %として、その後の計測値を期首値に対する指数(以下、相対値)とした。

4. 2. 3 結果

4. 2. 3. 1 SPT 値の経時変化

図4-3に期末における丸太(元玉)の密度及び含水率の相対値(相対値=期末の値÷期首の値)と SPT の相対値との関係を示す。それぞれについて有意な相関が確認できた。また標準誤差も、密度の相対値と SPT 相対値: 2.76 %、含水率の相対値と SPT 相対値: 4.95 %、と小さく、SPT の相対値から密度や含水率の相対値を推定できることが示された。

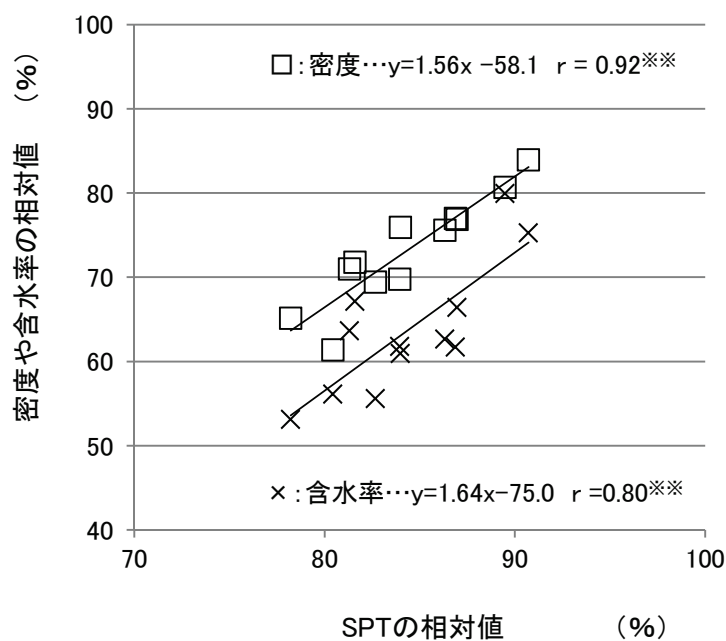
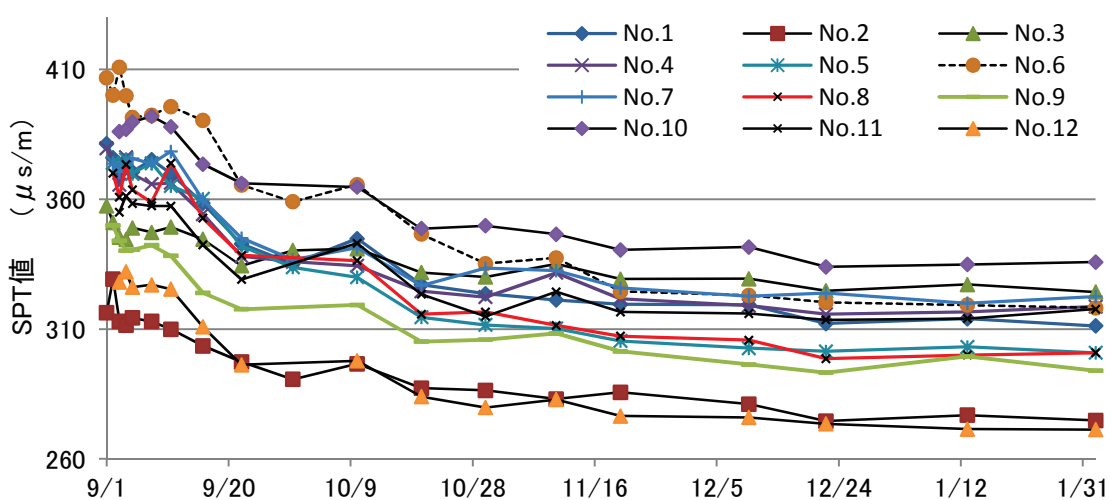
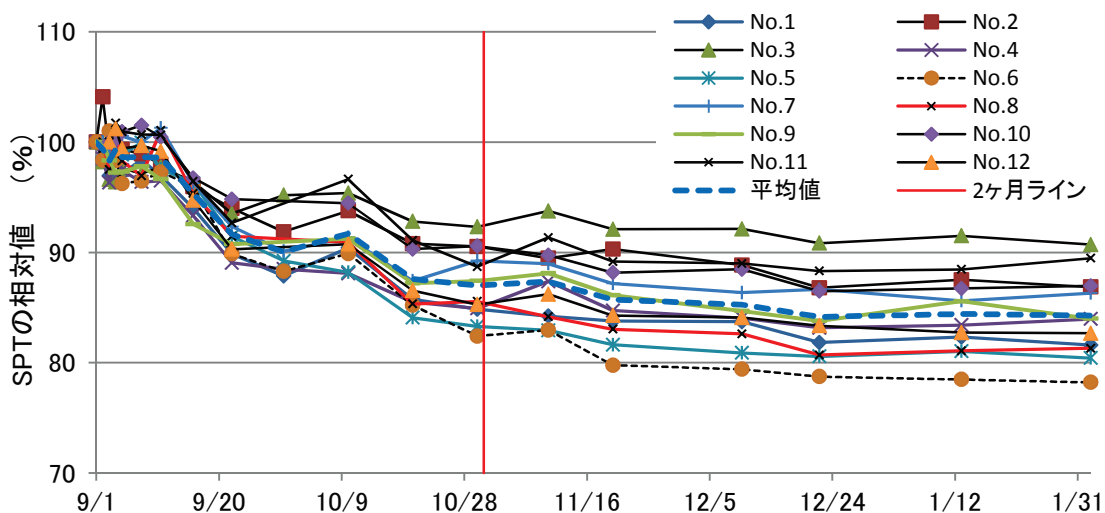


図4-3 密度ならびに含水率の相対値と SPT の相対値との関係

また図4-4に試験中の SPT の絶対値ならびに相対値の経時変化を示す。SPTは伐採後から急激な低下を示すが、約2ヶ月経過した時点でSPT の変化がほぼ平衡状態になった。このことから、鳥取県では9月当初に伐採する場合、葉枯らしに必要な期間は概ね2ヶ月間であることが示されるとともに、このことは既往の研究結果(73)を裏付ける内容であった。また、このことにより、SPTを計測することで非破壊的かつ連続的に、同じ個体を用いて葉枯らし乾燥における水分変化の行程を追跡調査できる可能性が示された。



(a) SPT の絶対値の経時変化



(b) SPT の相対値の経時変化

図4-4 SPT の試験期間中の変化

4. 2. 3. 2 葉枯らしの効果

図4-3の回帰式から、2ヶ月経過時点(SPTの相対値の平均87%)での密度と含水率の相対値を算出すると、それぞれ約78%、約68%となり、2ヶ月程度の葉枯らし期間を設けることで、伐採直後に比べ、密度で約2割、含水率で約3割の減少が期待できることがわかった。

なお、実測の含水率は、期首は266%~150%だったが、期末では151%~93%だった。

実際の森林施業の現場では、間伐率・伐採時期・標高等の現場条件が組み合わさり、様々な条件での葉枯らし乾燥施業が想定される。SPT計測によって効率的に葉枯らし乾燥の推移を調査すれば、各施業条件における最適な葉枯らし乾燥期間の把握とマニュアル化が可能になると思われる。

4. 3 現地での実践

4. 3. 1 実施業地での葉枯らしのニーズ

鳥取県八頭郡智頭町では、山林所有者自らが所有林の保育施業や伐採搬出を行う「自伐林家」を地域林業の起爆剤として育成すべく、町や県などが林業家団体の技術研修をサポートしている。特に自伐林家では、搬出した木材の単価が経営に与える影響が大きいため、木材市場が求める材長や材質の木材の出荷に意欲的であり、付加価値化の手段としての葉枯らし施業に対する関心が高い。自伐林家の技術向上研修の一環として、鳥取県東部農林事務所八頭事務所(以下、八頭事務所)では平成28年9月13日に伐木造材葉枯らし研修を企画した。この研修に先立ち、現地で葉枯らしに供されたスギの重量軽減効果等の数値化について八頭事務所から依頼を受けた。そこで、実際の施業現地における葉枯らしの乾燥による重量軽減効果を、SPT計測により非破壊的に把握した。

4. 3. 2 試験体と試験方法

試験は鳥取県八頭郡智頭町宇波地内の石谷林業社有林で実施した。当該地では作業道の開設と搬出間伐施業を連続して実施しており、目視で外観の優れた個体を対象に先行伐採し、作業道開設後に他の間伐木と同時に搬出を行っている。

試験では、八頭総合事務所の指定に基づき、9月下旬の木材市場への出材と研修のために7月中旬に伐採されたスギ7本(約90年生)を計測対象にした。SPT計測の測線設定にあたり、試験体の直径が太すぎ、通常の治具では測線設定が困難なうえに、1.5mの測線長では測線角度が大きく、適正に水分の減少を把握できない恐れがあった。そこで、測線角度を出来るだけ小さく、かつ評価対象区間を長くするため、FAKOPPのセンサーのケーブル長さいっぱい(約3.5m)を測線長とし、元口から1.0m以上離れた箇所を基点として、樹幹に斜めに測線を設定した。測線長は3.5mと仮定した。樹幹にはセンサー挿入箇所がわかるようにガムテープを巻き、センサー挿入箇所には油性ペンでマークし、毎回同じ箇所にセンサーを挿入するようにした。そのほかのセンサー挿入深や打撃回数、SPT値の扱い等は4.2.2.5と同じである。伐採から5日後の平成28年7月15日に初回の計測を行い、以後は一週間おきに平成28年9月9日までSPT計測を行った(写真4-6)。



写真4-6 計測の状況

4. 3. 3 結果と考察

図4-5に SPT の相対値の経時変化を示す。期末の SPT 相対値は平均 93.12 %、最大値 96.49 %、最小値 88.45 %だった。4. 2での調査と比べ、早期に相対値の減少が弱まり、一定値に達する傾向が認められた。これは、伐採率が3割で、4. 2の試験より通風等の条件が良好だった一方で、盛夏の伐採で温湿度が高く降雨が多かったことが影響し、葉からの蒸散が進まなかったためと考えられる。

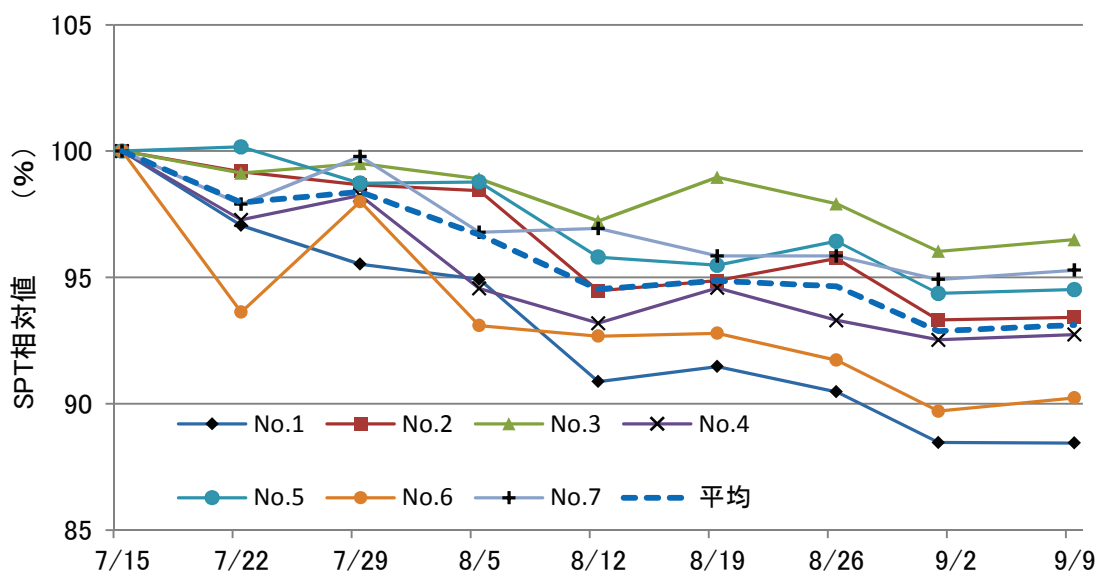


図4-5 SPTの相対値の試験期間中の変化

SPTの相対値と図4-3の回帰式から密度等の相対値を試算すると、期首に比べて密度が平均で87.2%に、含水率は77.7%に減少していた。これは重量が1割以上減少していることを示している。

このことについて、平成28年9月13日開催の研修(写真4-7)で紹介したところ、参加された自伐林家や森林組合の方からは、材色の改善と同様に葉枯らしの重量軽減効果に対して大きな関心が寄せられ、搬出作業等の効率や作業の安全性に対して、スギ原木丸太の重量軽減が強く求められていることがわかった。



写真4-7 研修会の状況

4.4 まとめ

4.4.1 葉枯らし乾燥の行程観察

葉枯らしに要する期間の把握と含水率低減効果を推定するため、葉枯らし中のスギにおいて同一区間の SPT 計測を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ① SPT を計測することで、非破壊的かつ連続的に、同じ個体を用いて葉枯らし乾燥における水分変化の行程を調査可能であることが明らかになった。
- ② 9月当初に1割伐程度の間伐条件で伐採した場合、計測当初(期首)の SPT を 100 % とすると、概ね2ヶ月で 87 % まで低減し、その後はほぼ平衡状態となる。これは2ヶ月程度の葉枯らしにより、密度(重量)が約2割、含水率が約3割低減することを意味する。
- ③ 7月中旬の3割伐程度の間伐条件で伐採した場合は、1ヶ月半でほぼ平衡状態となり、その重量低減効果は約 13 % である。

4.4.2 実際の施業現地での活用提言

現時点までの調査により、積雪期以外では葉枯らしには概ね2ヶ月程度の期間で良いことがわかった。このことを応用し、生産コストを出来るだけ抑えた形で葉枯らし生産を行うためには、森林事業体の班編制を若干細分化した上での次の施業パターンが考えられる。

① 団地化施業地、大面積施業地の場合

- (1) 伐採班と作業道作設班が同時に施業地端部に入る。伐採班は出来るだけ作業道作設班と進度を合わせる。
- (2) 伐採着手から2ヶ月後に搬出班が施業地端部に入り、作業道先端方向に作業を進めつつ搬出する。
- (3) 伐採班は概ね 10 月いっぱい以内で年内の伐採搬出予定箇所の伐採を終了させ、材の搬出は 12 月中を目処に完了させる。

② 不連続な施業地の場合

- (1) 伐採班が作業道支障木と伐採搬出予定木を伐採する。
- (2) 伐採から2ヶ月後に作業道作設班が搬出を兼ねて施業地に入る。なお、このとき伐採班はすでに別の現場の伐採を行っていること。
- (3) 伐採班は概ね 10 月いっぱい以内で年内の伐採搬出予定箇所の伐採を終了させる

なお、この施業を展開するには、各班の編成は次のようにするべきであると

考える。

- ・伐採班…最低単位としてチェーンソーマン3名(事故対応のため)、可搬式エンジンウィンチ1台(懸かり木処理)と雑役1名(歩荷・輜重)
- ・作業道作設班…バックホウ2台、うち1台はバケット容量 0.30m³ 以下の小型機でよい。グラップル兼用バケット(ザウルスロボ)があればなお良い。
- ・搬出班…リモコンウィンチ付きグラップル、ハーベスタまたはプロセッサが各1台、フォワーダ2台(グラップル付きフォワーダの場合は積載量減になるためグラップル無しで良い。オペレーターはフォワーダ2台に対し1名で良い)、積み込み土場には別にグラップルを1台待機(このグラップルにはオペレーターをつけない)。

自伐林家の場合は、労務費は考慮しなくても良いというものの、手間の軽減が必要なので、山見や作業道の線形踏査の時点で葉枯らし予定の木を決定しておくことが有効であると考え。原木価格が高くなる特市に搬出できるように、搬出予定の概ね2ヶ月前に対象木を伐採する。このとき、特に作業道を未開設の作設予定区域では、あまり奥の方まで事前伐際をしないように注意が必要である。搬出できなかった場合、長期間の林内残置に伴い変色等のリスクがあるほか、無理な作業による事故等を誘発しかねないためである。

なお、梅雨時期にかかる葉枯らしは、害菌による材の変色や虫害のおそれがある⁷⁵⁾ので、この期間の施業は避けた方がよいと考えられる。

本章の研究に基づき、鳥取県林業試験場では、SPT 計測による葉枯らしの必要期間の把握に基づく効率的な葉枯らし施業マニュアルの作製を目標に、平成 29 年度から「県産スギ材の効率的な葉枯らし乾燥システムの開発」の試験研究を開始することが決定した。色差計を用いた材色改善効果の数値化も含め、様々な施業条件下での葉枯らしの情報を蓄積することでの確かなマニュアルを作製し、行政と連携して葉枯らし施業の普及を図り、安定供給や付加価値化の確立に繋げたい。

第5章 応力波法による樹幹内水分量の季節変化の把握

5.1 研究の背景と既往の研究

生立木の含水率は、伐採後の木材利用のみならず樹木生理・生態などの他の研究分野にも波及する重要な情報であると考えられる。季節毎の成長活動に伴い樹幹内の水分量の変動する可能性は古くから指摘されている。特にスギなどの用材樹種では、林業関係者の間で、「水を上げている」「水が多い」または「木が動かない」などの表現で、生立木の水分量が季節変化する、とされており、「水を上げている」時期に伐採すると皮がむけやすい、あるいは搬出に際して重い、かびやすく変色しやすい、などといわれている。

しかし、生立木の含水率の季節変化に関する研究事例は広葉樹も含め未だ少ない状況である⁷⁶⁾。また調査手法として同一林分を対象に定期的に複数の個体を伐採して円盤を採取し、全乾法で含水率を把握する場合⁷⁷⁾には、特にスギでは個体毎の含水率のばらつきが大きいため、計測結果が季節による変化か個体の性質によるものかの判断が難しい。さらに非破壊的に同一個体を追跡した事例では、応力波法では個体毎に季節変化は認められるものの、林分としては変化にまとまりが認められず⁷⁸⁾、また土壌水分計を活用したモニタリングでは、センサーのために開けた穴の周辺の乾燥や、雨水や凍結によるノイズが大きく、現時点で試行段階^{79,80)}という結論となっている。

さて、第二章で立木の強度推定調査を鳥取県内各地で実施するにあたり、応力波伝搬法ヤング係数の算定に必要な立木の SPT 計測に際して、樹幹内の水分量等の影響で SPT 値が変化する可能性が懸念され⁸¹⁾、樹幹内水分量の季節変化が調査結果に与える影響を考慮する必要があるが生じた。しかし、既存の研究事例が少ないうえに、その結論—成長期(4月～9月)と成長休止期(10月～3月)、あるいは季節における顕著な変動傾向が認められなかった(池田ら⁷⁸⁾)—が林業関係者の感覚と乖離しており、何らかの手法で生立木の樹幹内水分量の季節変化を調査する必要があると思われた。

特に木材としてのスギの有効活用を考える際には含水率のコントロールが欠かせないが、樹幹内水分量の季節変化を把握できれば、好適な伐採時期等の指標が提示できる。これは効率的な施業や生産の基礎資料として重要事案である。そこでスギ生立木を対象に、非破壊的な樹幹内水分量の季節変化の把握を試みた。

本章では数本のスギ個体を対象に、約 18 ヶ月に渡って調査した結果を報告するとともに、低含水率のスギ材生産のための施業提案を行う。

5.2 試験木と試験方法

5.2.1 試験木

試験木は鳥取県林業試験場内の33年生(試験開始時林齢)スギ6本(精英樹交配ミュータンス)を用いた。試験木は隣接してはいないが同一林分内に生育しており、斜面方向、傾斜、土質等の環境条件はほぼ同じである。

5.2.2 計測

5.2.2.1 計測手法の検討

樹幹内の水分条件の把握手法として横打撃共振法が知られており、特に心材含水率の把握が可能とされている^{82,83)}。この手法は樹幹に加速度ピックアップ端子を当て、樹幹の反対側をプラスチックハンマー等で軽打し、1~4kHzの振動数のピークを読み取り、次式(4)により心材含水率を推定する。

$$\text{心材含水率} = 1.93 \times 10^{11} \times 1 \div (\text{横打撃共振周波数 (Hz)} \times \text{直径 (m)})^2 - 100$$

…式(4)

中田はこの手法を用いてスギ立木を2カ年に渡って計測し、季節変動の観察に成功している⁸⁴⁾。

同様の手法を、鳥取県林業試験場内のスギ立木6本を対象に、スペクトラムアナライザー(リオン SA78)に加速度ピックアップを接続して試してみたが、どのように打撃しても波形が乱れ、ピークの読み取りが困難であった。これは打撃の加力方向を加速度ピックアップの正反対に出来なかったことや、樹皮による打撃力や振動の減衰が大きかったためと推測したが、確定できなかった。そのため、横打撃共振法による調査は断念した。

一方、これまでの丸太の乾燥行程の研究等^{60,74)}から、樹幹に含まれる水分変化を、ある時点に対する相対値として把握するにはSPT計測も有効ではないかと考えた。FAKOPPでのSPT計測には習熟しており、出力結果も単純である。そこで立木の樹幹内水分変化の調査にはFAKOPPによるSPT計測を用い、計測期首の値に対する計測毎の変化を相対値として調べることにした。

5.2.2.2 斜めの測線の設定

既往の研究手法で生立木の樹幹内水分の季節変化を検知しにくかった原因として、水分の変化がわずかだったためではないかと推測した。わずかな変化を検知するには感度を高める必要がある。SPT計測にはFAKOPPを用いる

が、センサー間の距離が短いと SPT 値自体が小さくなるが、このとき樹幹内水分の季節変化が僅少だと、水分量の変化による SPT 値の変動を数値のばらつきとして誤認しかねない。そこで計測される SPT 値を出来るだけ大きな値にするため、可能な限りセンサー間距離を伸ばすこととした。

計測者(筆者)の安全性も考慮した結果、立木に対し斜め方向でセンサー間隔 3.0 m の測線を設定した。斜め配置の場合、応力波は髄を含む放射断面内を直線的に伝播するとされている⁴¹⁾ので、計測では測線内における樹幹全体の水分状態の評価が可能であると考えた。

センサーを樹幹に対し斜めに配するため、大型のコの字型の木製治具を作製した(写真5-1)。これは第2章で紹介した治具と基本的に同じ構造で、両端の腕木の間の内寸が 3.0 m に固定してあり、腕木間の中心に位置する釘で試験体に固定できる。

試験体に対する治具の設置状況は写真5-2のとおりで、下部のセンサーは根張り部分を避け、地上高 0.7~1.0 m 程度の箇所を設置した。

測線の設定に際しては、試験体にハシゴを固縛して治具を設置後、治具の腕木があたる箇所を中心に試験体の樹幹をガムテープで養生し、センサー挿入箇所を油性ペンでマークした。このようにすることで、計測に際して毎回同じ箇所にセンサーを挿入できるようにした。



写真5-1 (左) 3.0 m の治具

写真5-2 (右) 立木への設置状況

5. 2. 2. 3 直径方向の測線

非破壊的な生立木樹幹の含水率等の推定手法である横打撃共振法では特定域の振動数のピークを計測するので、最速の応力波を計測する FAKOPP での SPT 計測とは異なるが、直径方向での SPT 値の変化についても心材含水率等の季節変動を検知できる可能性があるので計測を試行することとした。直径方向の測線は、斜め方向の測線の中央を対象に、樹幹に対して直角に設定した。なお、該当箇所直径(測線間距離)は輪尺を用いて計測した。

5. 2. 2. 4 樹幹に平行な測線

樹幹内水分量の変化に対し、形成層などの細胞活動の影響が大きい場合、樹皮直下での水分量の変化が最も大きくなるはずである。そこで、樹幹に平行な測線も設定することとした。センサー間隔は 3.0 m である。なお、このことを思いついたのは計測開始から半年程度経過した後だったため、計測回数は少なくなった。

5. 2. 3 計測期間と計測手法

SPT 計測は平成 27 年 5 月 21 日(樹幹に平行な測線は平成 27 年 12 月 7 日)から、平成 28 年 11 月 10 日まで、概ね 20 日間隔で実施した。計測に際し、高所へのセンサー打ち込み等は試験体にムカデ梯子を固定して行った(写真 5-3)。SPT 計測では、FAKOPP のセンサーをゴムハンマーで軽打して、緩みがない程度に樹幹の指定の箇所に挿入した。なお、計測毎にセンサーの挿入深さが若干異なるため、4. 2. 2. 3 と同様にセンサーの未挿入部分の長さを鋼尺で計測し、センサー挿入深さを樹幹表面のセンサー設置間隔(この場合は 3.0 m)から控除してセンサー先端間距離を算出し、センサーの挿入深さが SPT に与える影響を排除した。

計測ではセンサーの打撃に毎回同じ定力打撃装置を用いて、出力結果の再現性を担保した。

また、センサー挿入箇所は計測終了毎にガムテープでシールし、センサー抜き取り後のセンサ



写真 5-3 SPT 計測状況

一挿入箇所の乾燥や降雨による加湿等を可能な限り防いで、センサー抜き取り後のセンサー挿入箇所の乾燥や雨水の浸入を出来るだけ排除した。

なお、樹幹内水分の日変化は認められないとされている⁷⁸⁾が、形成層では水分量の日変化の可能性が否定できない。この試験では、特に斜めの測線においては推定される応力波の伝搬経路から、樹幹全体の水分状態の把握が可能であると考えたが、念のため、SPT 計測は葉からの蒸散が多い時間帯(午前 10 時～午後 2 時)に実施した。

5. 3. 結果

5. 3. 1 SPT 値の計測結果

図5-1に斜め方向、直径方向、樹幹に平行な方向での SPT の相対値の経時変化を示す。それぞれの方向で得られた SPT には変化が認められたが、特に斜め方向と樹幹に平行な方向での SPT 相対値では、まとまった変化が確認できた。梅雨から夏季に向かって値が増加し、その後は減少に転じて冬季に最も小さな値を示す状況が認められた。

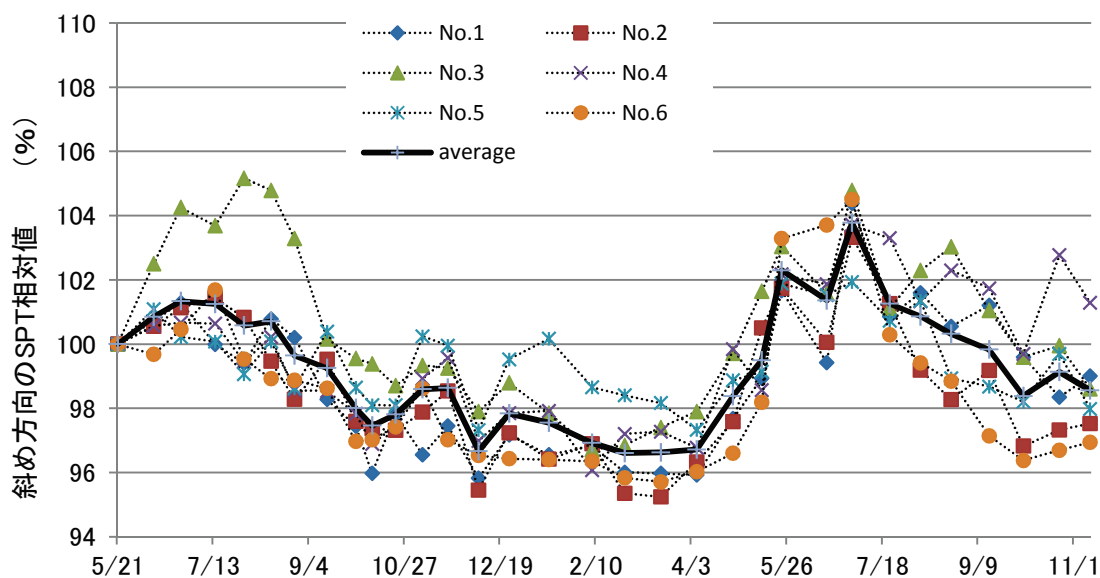


図 5 - 1 (a) 斜め方向の SPT の相対値の経時変化

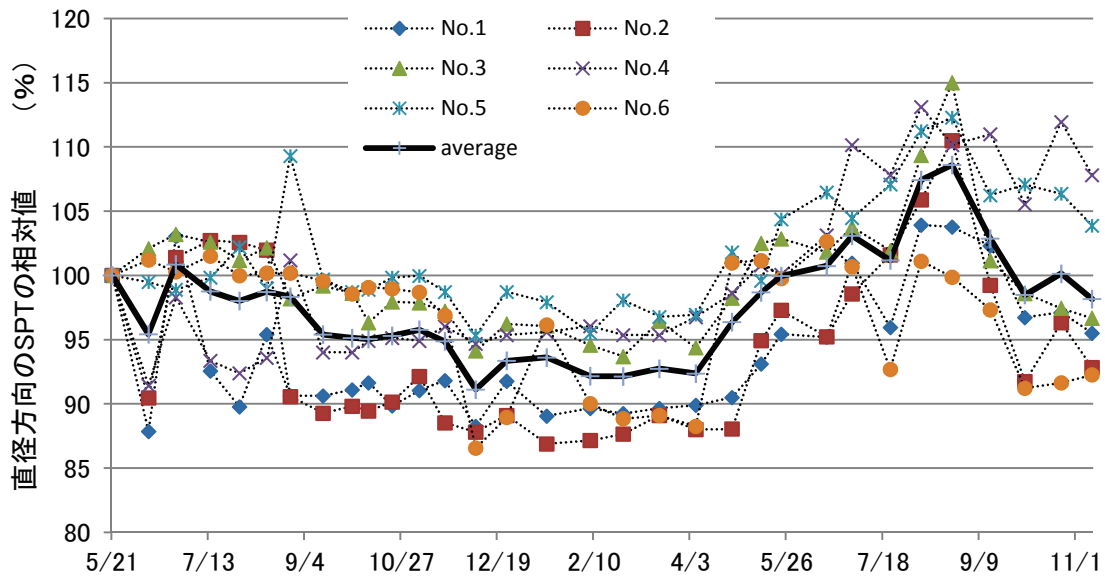


図 5 - 1 (b) 直径方向の SPT の相対値の経時変化

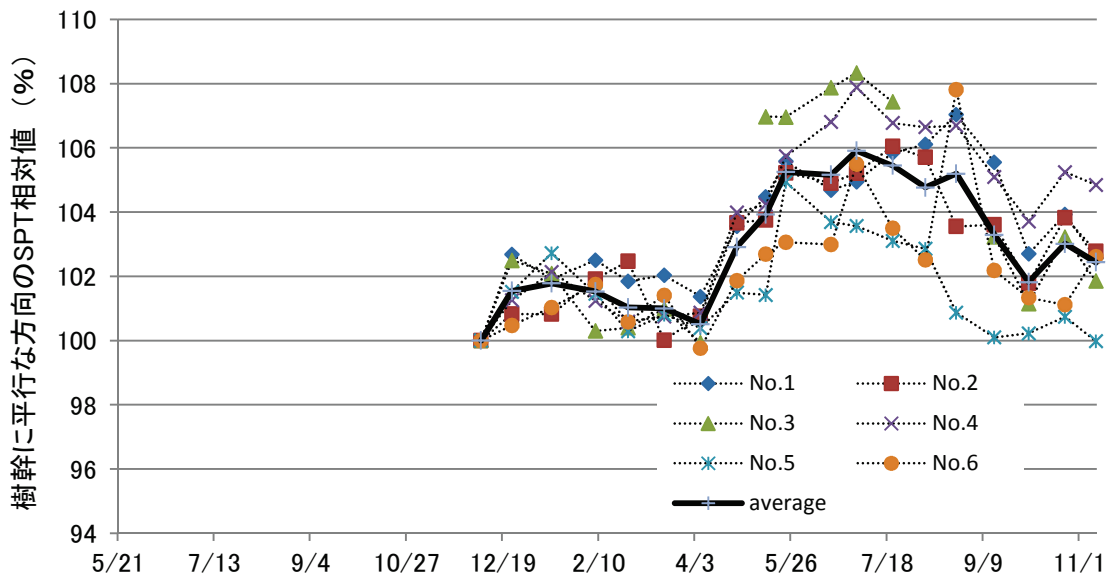


図 5 - 1 (c) 樹幹に平行な方向の SPT の相対値の経時変化

特に斜め方向では開始時点の一年後には全ての個体の SPT 相対値がほぼ 100 % に復帰しており、一年間の樹幹内水分の増減サイクルをほぼ捉えたと判断して良いと考える。なお、計測毎の相対値の変動係数は、斜め方向では最大値 2.3 %、最小値 0.5 %、平均値 1.3 % で、樹幹に平行な方向では最大値 2.8 %、最小値 0.6 %、平均値 1.4 % であり、計測毎の個体間の相対値のバラツキは小さく、SPT 相対値の変化にはまとまりがあると考えられた。

さらに、斜め方向と平行な方向における SPT 相対値の平均値の推移を図5-2に示す。両者とも同様な変化を示しており、このことから生立木樹幹内部での同じ現象を検知していると判断できる。

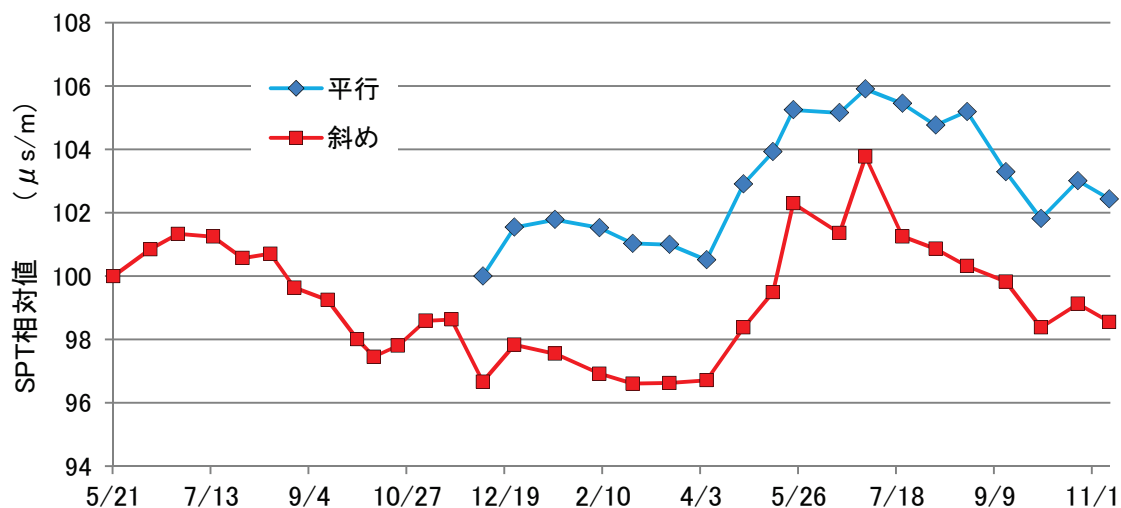


図5-2 斜め方向と平行な方向での SPT 相対値の平均値の経時変化

立木内で大きく変動する可能性のあるのは水分であることと、水分は木材に比べて応力波の伝搬速度が遅いため、樹幹内の水分が増加すると SPT 相対値も増加することから、計測結果は立木内の水分状況を反映していると推察された。この計測により、梅雨から夏季にかけて、スギが「水を上げている」状況や、冬季に「木が動かない」とされる状況を検知することができたと考えられる。

なお、図5-1(b)に示すように、直径方向での SPT 相対値は、平均値の変化は斜め方向と似た傾向が認められるが、バラツキは他に比べて大きかった。計測毎の相対値の変動係数は、斜め方向では最大値 7.5 %、最小値 2.1 %、平均値 4.9 %で、変化の仕方にまとまりがあるとは認めがたい状況であった。

また、樹幹に平行な方向では、平成 28 年 4 月以降で No.3 に複数回の欠測が発生している。これは 4 月 26 日以降の計測で、それまでの約 1.6 倍の数値が計測されるようになったためである。これは 4 月初めに強風が吹いた際に、樹幹が大きく揺られてセンサー間の繊維に離断が発生してしまったためと推測される。この異常値は 9 月以降は収束傾向にあるが、樹幹内水分の状況の非破壊的かつ安定的な観察には、センサーを斜めに配置した方が良いと思われる。

5.3.2 強度性能選抜への影響

図5-1(a)に示したように、斜め方向での期間中の SPT 相対値の平均の最

大値は、平成 28 年 7 月 1 日の 103.8 %で、最小値は平成 28 年 2 月 26 日の 96.6 %であり、約 7.2ポイントの差がある。このことは盛夏と厳冬期では強度性能選抜の計測結果に差が生じることを意味している。例えば、あるスギ立木で 5 月に $400 \mu\text{s/m}$ の SPT 値が計測されたとした場合、同じスギ立木が 2 月の計測では $386.4 \mu\text{s/m}$ 、7 月の計測では $415.1 \mu\text{s/m}$ の計測値を示すこととなる。樹幹の密度を一定値 (0.9 g/cm^3) とすると、式(1)によれば、2 月の計測では、 E_{WS} を 6.03 GPa、7 月の計測では E_{WS} を 5.22 GPa と評価することとなり、同じスギ立木の強度性能の評価で 13 %の差が生じることとなる。このことに対しては、最も水分の多い時期あるいは少ない時期を避けて計測する、水分の多い時期に計測して過大評価を避けるなどの対策や、何らかの補正を行うことが有効と考えられる。ちなみに、第 2 章で実施した現地調査では、作業効率を考慮し盛夏や冬季を避けていた。特に、高い強度性能のスギ個体を確保した地域の調査は 9～11 月上旬に実施している。これらの調査地が 5. 2 と同じ季節変化を示した場合、この期間の SPT 値の平均の最大値は 99.8 %、最小値は 97.5 %であり、式(1)によれば 5 月に比べ E_{WS} を最大で 4.7% 高く評価する可能性がある。第 2 章で最終的に母樹として選定したスギ個体のうち、最も強度性能の低いものは 9.47GPa であり、これが過大評価だと仮定した場合の適正值は 9.04 GPa となり、概ね目標値に達していると評価できる。

5. 3. 3 森林施業への活用

SPT 相対値が減少している時期(9 月～3 月)は樹幹内水分が少ないと推測されるので、この時期のスギの伐採搬出は他の時期に比べて重量が比較的軽いと判断できる。鳥取県では冬期の積雪期間は作業ができないため、実質的に作業できる期間は 9 月から 12 月の降雪までと、3 月の融雪以降に限られる。ただし、9 月から 10 月の伐採で葉枯らしも併せて行い、降雪期までの搬出を狙えば、相当の重量軽減効果が期待でき、搬出労務の軽減や、製材後の乾燥コストの低減に役立つと判断できる。

5. 3. 4 まとめ

スギ生立木に対し、約 18 ヶ月にわたり、センサー間隔 3.0 m での SPT 計測を実施した結果、次のことが明らかになった。

- ①スギ生立木の特定区間を対象に計測した SPT には、季節による変化が認められ、変化の原因として樹幹内の水分量の季節変化が影響していると考えられた。

②観察された SPT 相対値の経時変化は、立木の活動周期と概ね一致していた。

③SPT 値に季節変化が認められるので、時期によっては強度性能調査への影響を考慮する必要がある。

この手法はスギ以外の樹種での樹幹内水分量の季節変化の把握にも活用できると考えられ、樹木生理や山地水文など他の研究分野への展開が期待できると思われる。

総 括

日本固有の針葉樹であるスギは、成長性、樹幹形質、木材としての加工性などに優れた優秀な造林樹種であり、日本人の生活、文化に古くから深く関わる有用な木材原料である。木材として、それを使用する人々を支えとともに、その生産や育林を担う人々の生活をも支えてきた。近年、再生可能な資源のサステナブルな利活用に注目が集まるなかで、スギをはじめとした山林の資源の価値が見直され、用途が徐々に広がりつつある。

しかし、林業経営を支える木材価格は長年低迷を続けており、保育施業を伴う人工林の健全な循環利用と維持管理が困難になっている。また、日本農林規格等の品質表示が進み、工業材料としての木材では特に強度性能や寸法安定性に関わる含水率などの品質が強く問われる時代となっているが、木材は生物材料であるため各種の品質が不安定である。特にスギでは強度性能に著しいばらつきがあり、工業製品の素材としての利用の妨げとなるほか、原木価格の低迷の一因となっている。

木材製品の品質管理と原木価格の向上のためには、木材の材質に応じた適材適所での利用が望ましい。木材を使った工業製品の製造ラインでは、製品の品質管理のために、早くから非破壊的な木材品質の調査手法が取り入れられてきているが、原木の価格には反映されにくい。山林所有者や素材生産事業者などの「川上」側が、加工以前の早い段階で非破壊的に木材の品質を把握し、選択的に出荷する、あるいは工業材料として要求される品質を持つ品種を育成することで、原木価格の向上が期待出来ると考える。

さらに木材としてのスギは軽く加工性に優れるが、生材の含水率が高く、個体差も大きい。このため、木材製品として利用する際の寸法安定性や、エネルギー資源として利用する際の発熱量の確保にあたって、原木の含水率の低減対策が必要であり、現場からは効率的で取り組みやすい乾燥手法の提示を求められており、このことに対する調査手法の確立も必要となっている。

本研究では、木材材質に対する非破壊的な検査手法の中でも応力波法に注目した。木材内部を伝わる応力波は、内部の腐朽や空洞だけでな

く、木材の強度、密度、水分量(含水率)の影響を受けるので、簡易な計測により強度性能調査等が可能とされている。そこで、次世代の林業を支える新たなスギの品種としての強度性能に優れた個体の探索ならびに、燃料利用に際しての原木の乾燥状況の調査手法の確立と効率的な乾燥手法の提言、さらに既存のスギの生産ステージにおける葉枯らしなどの付加価値化技術の数値化などに対し、応力波法の適用を試みた。

第2章では、頻発する地震災害や建築関連法令の改正を背景に、利用者側の要求が高まっている木材の強度性能に注目し、既存のスギ精英樹等の持つ優れた成長性・良好な形質といった性能に、高い強度性能を加味した品種を確立するため、応力波伝搬法による非破壊的な立木の強度性能推定の精度の向上と、強度性能に優れたスギ品種の選抜に取り組んだ。

この中で筆者は、計測器 FAKOPP を用いた応力波伝搬時間(SPT)計測における出力結果の再現性と信頼性を高めるため、打撃手法やセンサー配置の改良を試みた。定力打撃装置の使用とセンサーを樹幹に対し斜めに配置することによって、計測結果のばらつきを従来の約 1/20 に低減するとともに、計測箇所に影響されず同じ個体であれば同じ値が得られる適正な計測を実現した。また、センサーを樹幹に対して一定間隔で斜めに配するため、調査対象木の直径が大きくなるほど、センサーを結んだ線が樹幹になす角度(測線角度)が大きくなるとともに SPT 値が大きくなるため、太い木は強度性能が低く推定されがちだったが、測線角度と SPT 値に直線的な関係があることを確認し、角度補正の方法を確立した。そして、この手法を用いて立木の状態で推定した強度性能が、伐採後の丸太や製材品の曲げ性能を高い精度で推定できていることを確認した。

このように改良した SPT 計測手法を用いて鳥取県内のスギ約 12 万本を対象に目視選別を行い、外見的に形質良好と判断された 1086 本を非破壊的に強度性能調査した結果、平均的なヒノキ(9.0GPa)より高い強度性能を有するスギ個体を複数確認し、このうち 24 本を母樹として確保した。現在これらの個体から枝を採取し、挿し木して増殖中である。今後これらのクローンは品種登録されるとともに、遺伝資源としても活用が期待され

る。

第3章では、東日本大震災以降、木質バイオマス発電所等の増設に伴い急速に燃料用木材チップの需要が増加していることを背景に、原料丸太の効率的な乾燥のためのはい積み手法や、必要とされるはい積み期間の提言を目標に、応力波法を用いたはい積みにおける原料丸太の乾燥状況の把握を試みた。

FAKOPPで計測されるSPTはセンサー間を伝わる最速のもので、丸太の拘束の影響を受けにくく、さらに木材強度が同じ場合、SPTは木材の密度や含水率に影響されるので、特定の丸太の乾燥状況を相対的に捉えようと推定した。

まず、はい積み状態での原料丸太の水分変化を計測する手法の確立を目的に、小規模なはいを対象に、個々の丸太の重量を定期的に計測するとともに、はい積み状態で各丸太の木口間のSPTをFAKOPPで計測したところ、乾燥に伴う丸太の重量の変化とSPTの変化に高い相関があることが認められた。この結果、はい積み状態で丸太のSPT計測を行い期首値に対する相対値を調べることで、原料丸太の水分変化の把握、すなわち乾燥状況の調査が可能であることが明らかになった。

この手法を用い、鳥取県内3箇所チップ生産事業者のヤードで、季節・積み方の別に比較的大規模なはい積みを設け、原料丸太の乾燥状況を調査したところ、りんのあるはい積みでは丸太が早く乾燥することや、降雨・積雪により乾燥が戻ること、長期間丸太を放置するだけでは含水率の低いチップの生産ができないこと、夏期の乾燥開始は約80日間、冬期の乾燥開始では約130日間の乾燥期間を要することなどが明らかになった。

この成果の一部はすでに県内チップ生産事業者に伝達され、効率的な乾燥が可能なはい積み手法が普及しつつある。今後は、さらに本章の研究結果が現場で活用され、より高品質な燃料チップの生産と安定的な電力供給に資することと期待している。

第4章では、古くから林業地域で実施されてきたスギの「葉枯らし」乾燥について、増産のための葉枯らし施業のマニュアル化に繋げるため、葉枯

らし中のスギ樹幹内の水分状態を応力波法を用いて非破壊的に把握した。日本各地で葉枯らし乾燥に関する既往の研究はあるものの、含水率等の調査のために試験体は計測毎に鋸断しなければならないので、含水率等の条件が個体毎に大きく異なるスギでは、実態の把握が困難であった。また、鳥取県内での研究事例も少ない。葉枯らし乾燥に必要な期間の具体的な情報が少ないために、新規参入者や新規地域での取組が困難で、実施は一部地域にとどまっている。しかし、葉枯らし材は原木価格が高く、スギ材の付加価値化の技術として極めて有益で、林業事業者から研修会開催の要望もあった。

そこで、スギ葉枯らしの水分変化の非破壊的調査に応力波法を適用した。木材を伝わる SPT は、木材の強度、密度、含水率の影響を受けるが、特定の区間を、定期的に計測する際には、その区間の木材内の水分の変化を相対的に検出することが可能であると推定した。鳥取県林業試験場内のスギを対象に、SPT 計測による非破壊的な葉枯らしによる水分減少の把握を試みた結果、伐採後約 2 ヶ月で SPT の値の変化が緩やかになることが認められ、葉枯らしに要する期間が概ね 2 ヶ月であることが把握できた。また、この結果は既往の研究を裏付ける内容であった。このことにより SPT 計測によって、従来の研究手法より効率的かつ非破壊的に葉枯らし乾燥に伴う水分変化の推定が可能であることが示された。

鳥取県林業試験場では平成 29 年度から本章で得られた手法を用い、葉枯らしの試験研究を実施しマニュアル作成に取り組むことが決定した。葉枯らしの取組が増加すれば、葉枯らし材の安定供給や市場価格の向上も期待出来ると確信する。

第 5 章では、既往の研究が少なく、未だに確定的な調査手法が確立されていない生立木の樹幹内水分の季節変化の把握に対し、応力波法の適用を試みた。

生立木の水分状況が季節変化することについては、林業関係者の間では半ば常識のようにいわれているが、数値化されていない。しかし、樹幹内水分量の多寡は SPT 値に影響する可能性があり、特に第 2 章で取り組んだスギの強度性能選抜においては、調査する時期によって調査結果が異

なることは好ましくない。そこで第2章で確立した SPT 計測手法を応用してスギ生立木 6 本を対象に 18 ヶ月間にわたり定期的に樹幹の特定区間を計測した。計測では定力打撃装置を用い、センサー間隔を 3.0 m に設定し、センサー挿入箇所はガムテープで養生した。計測の結果、SPT 値が春から盛夏にかけて増加し、秋から冬にかけて減少することが確認できた。この変化は、樹幹内の水分量が増加するために発生していると推測され、計測開始時点の一年後には全ての個体の SPT 相対値がほぼ 100 % に復帰し、一年間の樹幹内水分の増減サイクルを概ね捉えることができたと判断される。変化の幅は最大で 7%にとどまるので、強度性能選抜にほとんど影響しないと考えられるが、林業関係者の感覚の数値化に成功したといえる。

この成果は、比較的水分の少ない軽量な時期での伐採による生産労務の削減など、林業の施業現場での活用が考えられるほか、この手法をスギ以外の樹種に用いることにより樹木生理や山地水文など他の研究分野への展開が期待出来る。

以上のように、我が国の主要な造林樹種であるスギを対象に、特に鳥取県の林業・木材産業が抱えるいくつかの課題に対して、応力波法による非破壊的な材質の把握の精度向上とその応用による解決を試み、それぞれ成果を見ることができた。

これまでも、そしてこれからも、スギは日本の林業の基幹をなす樹種である。「国の宝は山なり、山の衰えは国の衰えなり」と、秋田藩の家老 渋江内膳政光(～1614)の遺訓にある。関ヶ原の合戦後、佐竹氏が常陸から出羽に滅封されたとき、逼迫した藩の財政を支えたのは豊かな天然スギ資源(秋田スギ)であった。鳥取県のような田舎の地方自治体が健全に存続するためには、中山間地域の活性化と長期的視野に基づく農林業の振興施策が欠かせないが、そのためには先ず、「国の宝は山なり」と言わしめられる状況を創造しなければならない。本研究の成果が将来のスギ材の原木価格向上に繋がり、今後の林業業界の復権・発展と、中山間地域の活性による持続可能な地域社会の構築実現に資することを強く祈念し、総括とする。

引用文献

- 01 坂口勝美ほか:新版 スギのすべて, p10-11, (社)全国林業普及協会, 1983
- 02 佐藤彌太郎ほか:増訂 スギの研究, p7-8, 東京書籍, 1955
- 03 坂口勝美ほか:日本のスギ, 第1巻 p10-29, (社)全国林業改良普及協会, 1959
- 04 佐藤彌太郎ほか:増訂 スギの研究, p97-98, 東京書籍, 1955
- 05 青谷上寺地遺跡(パンフレット), 鳥取県教育委員会, 2007
- 06 安昭炫:青谷上寺地遺跡と周辺域の弥生時代の景観史, 第四紀研究 54(5), p311-321, 2015
- 07 古川郁夫ほか:古代から近世までの山陰地方において利用された木材の樹種選択性, 鳥大演研報, No,24 p39-53, 1996
- 08 木材の工芸的利用(復刻版第二号), (財)林業科学技術振興所, 1985
- 09 滋賀県南西部に分布する風化花崗岩の表層崩壊の特徴, 稲垣秀輝, 応用地質, 第41巻第2号, p103-p112, 2000
- 10 井原俊一:日本の美林, p46-48, 岩波新書 516, 1997
- 11 佐藤彌太郎ほか:増訂 スギの研究, p646-657, 東京書籍, 1955
- 12 井原俊一:日本の美林, p79-86, 岩波新書 516, 1997
- 13 林野庁:スギ/ヒノキに関するデータ, 林野庁業務資料, 林野庁 HP, 2016
- 14 鳥取県:林野面積及び蓄積, 鳥取県林業統計, 鳥取県 HP, 2016
- 15 坂口勝美ほか:日本のスギ, 第4巻, p134-137, (社)全国林業改良普及協会, 1960
- 16 遠藤日男:スギの行くべき道, p48-75, 林業改良普及双書 141, (社)全国林業改良普及協会, 2002
- 17 桜井尚武ほか:長伐期林の実際—その効果と取り扱い技術—, p5-10,p154-159, わかりやすい林業研究解説シリーズ No.110, (財)林業科学技術振興所, 2002
- 18 藤澤義武(共著):木材の材質検定法とその実際, p1-7, (社)林木育種協会, 2001
- 19 建築物の耐震改修の促進に関する法律, 平成7年10月27日法律第23号, 1995
- 20 素材の日本農林規格, 平成19年8月21日全部改正, 農林水産省告示第1052号, 2005
- 21 公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律, 平成22年5月26日法律第36号, 2010

- 22 たとえば, 鳥取県:鳥取県産材利用推進指針, 平成 27 年 3 月改訂, 2015
- 23 たとえば, 大熊幹章ほか:木材の利用2 木材の工学, p2, 文永堂出版株式会社, 1991, 東京
- 24 大平智恵子ほか:鳥取県産スギ材の強度性能 DB, 未発表
- 25 たとえば, 祖父江信夫:木材の非破壊検査, 木材学会誌 Vol,39, No,9, p973-979, 1993
- 26 たとえば, Voichita Bucur :Nondestructive Characterization and Imaging of Wood, Springer Series in Wood Science, 2002
- 27 たとえば, 大熊幹章:木材の利用2 木材の工学, p104-107, 文永堂出版株式会社, 1991, 東京
- 28 有馬孝禮ほか:周波数分析による丸太区分とその製品生産工程への応用, 材料, Vol.42, No.473, p141-146, 1993
- 29 飯島康男ほか:秋田県産スギ材の強度特性(第3報)丸太とひき板材質の関連, 木材学会誌, Vol.43, No.2, p159-164, 1997
- 30 祖父江信夫:立木・丸太を起点とした木材利用の俯瞰と非破壊検査、強度研究, 第 62 回日本木材学会大会 研究発表要旨集, p107, 要旨集 CD…S17-04-1300 (部門別企画公演), 2012
- 31 佐野俊和ら:地上型 3 次元レーザースキャナによる立木矢高計測調査, 第 21 回森林利用学会学術研究発表会 講演要旨集, p19, 2014
- 32 たとえば, 池田潔彦:応力波伝搬速度法による立木ヤング係数評価とその利用, 林木の育種, No.205, p1-5, 2002
- 33 藤沢義武ほか:スギ(*Cryptomeria Japonica* D.Don)の材質と遺伝 精英樹クローンにおける丸太ヤング係数と直径成長のクローン間差と検定林間の相関関係, 木材学会誌, Vol.38, No.7, p638-644, 1992
- 34 社団法人林木育種協会編:林木の材質検定法とその実際—国産材を活かす林木育種へ向けて—, p27-31(この項は藤澤義武著), 2001
- 35 外山三郎:スギの遺伝子保存と育種—種子及び苗木から樹齢 50 年生までの総括—, p141-148, 1994
- 36 藤本浩平ほか:優良品種の選抜技術支援(高知県におけるスギ精英樹の材質特性), 高知県立森林技術センター研究報告, 第 35 号, p47-62, 2010
- 37 植田幸秀ほか:20 年を経過したスギ精英樹クローンの成長と樹幹特性について—樹幹解析によって得られたクローンの成長と樹幹形質—, 鳥取県林業試験場研究報告, No.37, p25-39, 1999
- 38 鳥取県林業試験場:スギ精英樹樹幹解析結果報告書, p8-13, 1999

- 39 廣田篤彦ほか:スギの立木ヤング係数の品種間差, 日林九支論集, No.47, p235-236, 1994
- 40 小泉章夫:生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究, 北大演研報, No.44, p1345-1346
- 41 名波直道ほか:応力波による立木の材質推定(第1報)測定方法と応力波の伝搬経路, 木材学会誌, Vol38, No.8, p739-746, 1992
- 42 池田潔彦:応力波伝搬速度による立木ヤング係数評価の現状とその適用, 木材工業, vol.57, No.9, p374-379, 2002
- 43 名波直道ほか:応力波による立木の材質推定(第2報)立木への適用, 木材学会誌, Vol38, No.8, p747-752, 1992
- 44 Xiping Wang:Nondestructive Evaluation of Standing Trees with a Stress Wave Method, Wood and Fiber Science, 33(3), p522-533, 2001
- 45 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, Vol39, No.3, p271-276, 1993
- 46 藤澤義武ほか:FAKOPPによるスギクローンの非破壊的材質評価, 第53回日本木材学会大会 研究発表要旨集, p55, 2003
- 47 藤澤義武ほか:ファコップを用いた材質優良個体の非破壊的選抜技術, 九州森林研究, No.56, p180-181, 2003
- 48 池田潔彦ほか:応力波伝播速度による立木材質の評価と適用(第2報)応力波伝播速度によるスギ林分の評価と平角製材製造への適用, 木材学会誌, Vol46, No.3, p189-196, 2000
- 49 たとえば 林野庁:平成26年度森林・林業白書, p165, 2014
- 50 たとえば 日刊木材新聞:急がれる供給システム整備, 平成28年1月7日, 8面, 2016
- 51 たとえば (独)森林総合研究所監修:改訂4版 木材工業ハンドブック, p1036, 丸善, 2004
- 52 たとえば 伊地知秀太ほか:鹿児島県における木質チップ燃料の供給・利用実態とその課題, 鹿大演研報, 39, p15-19, 2012
- 53 森田浩也ほか:はい積み保管した燃料用丸太の含水率変動(第1報), 第65回日本木材学会大会研究発表要旨集, p153, 要旨集 CD…E17-P-S03, 2015
- 54 多田野修:チップボイラー燃料利用のための木材の自然乾燥(その2)—丸太の保管条件別の含水率変化—, 岩手県林業技術センター 研究成果速報, No.221, 2006
- 55 水田展洋:保管条件の違いによるスギ小径丸太の含水率変化, 東北森林科学

- 会誌第 15 巻第 1 号, p6-10, 2010
- 56 古川邦明:林内に椴積みした林地残材の乾燥課程, 現代林業, 2013.7 月号, p34-39, 2013
- 57 関恵元ほか:音速法によるスギ材天然乾燥過程における含水率の推定, 木材学会誌, Vol.48, No.4, p225-232, 2002
- 58 小玉泰義ほか:木材の音速に及ぼす密度、含有水分の影響, 木材工業, Vol.51, No.4, p154-156, 1996
- 59 桐林真人ら:スギ丸太ならびに立木での応力波伝搬時間計測における出力結果の再現性の向上, 森林バイオマス利用学会誌, Vol.10, No.2, p41-47, 2015
- 60 桐林真人ら:丸太の含有水分の変化と応力波伝搬速度との関係について, 日本木材学会中国・四国支部第 24 回研究発表会 研究発表要旨集, p78, 2012
- 61 片桐幸彦ほか:スギ丸太の夏期及び冬季における天然乾燥試験—丸太の形状や設置方法の違いによる乾燥過程の比較—, 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p184, 要旨集 CD…E28-P-03, 2016
- 62 たとえば 日本木材学会編:第 2 章 水と木材, 木質の物理, p50-66, 2007
- 63 たとえば 日本木材学会編:Ⅲ. 木材の乾燥, 木材の加工, 64-101, 1991
- 64 たとえば C.Skaar:Hygroexpansion in Wood, Wood-Water Relations, p122-176, Springer Series in Wood Science, 1988
- 65 社団法人 全国林業改良普及協会編:葉枯らし乾燥, p10-23, 林業改良普及双書 104, (社)全国林業改良普及協会, 1990
- 66 佐野真一:宮本常一が見た日本, p281-290, 筑摩書房, 2010
- 67 林良興ほか:スギ葉枯らし材生産過程における材成分と材色の変化, 木材学会誌, Vol.34, No.11, p934-941, 1988
- 68 社団法人 全国林業改良普及協会編:葉枯らし乾燥, p29, 林業改良普及双書 104, (社)全国林業改良普及協会, 1990
- 69 河崎弥生:葉枯らし処理したスギ材の人工乾燥, 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p127, 2002
- 70 山形県森林研究研修センター:葉枯らしによる燃料用スギ材の乾燥試験報告書, 山形県, 2014
- 71 小田久人:宮崎県産スギ葉枯らし丸太と柱材の含水率, 第 49 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p122, 1999
- 72 徳島県農林水産部林業課:スギ葉枯らし乾燥の手引き, p5, 1988
- 73 鳥取県:乾燥材生産の実務 I, p6, 1991
- 74 桐林真人ら:応力波を使ったはい積み丸太の乾燥行程管理, 木材工業, Vol.71,

No.8, p312-316, 2016

- 75 最新木材工業辞典出版委員会編:最新 木材工業辞典, (社)日本木材加工技術協会, p106-107, 1999
- 76 矢沢亀吉:広葉樹とくにブナ立木の季節別ならびに辺・心材別の生材含水率, 木材学会誌, Vol.6, No.4, p170-175, 1960
- 77 静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター:静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター情報 わかりやすい森林・林業 11 伐採時期によりスギ立木の水分量は異なるのか?, 静岡県, 2010
- 78 池田潔彦ほか: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, Vol.46, No.3, p181-188, 2000
- 79 中田了五:針葉樹生立木樹幹含水率の連続モニタリング, 第 65 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p64, 要旨集 CD…B18-03-1400, 2015
- 80 中田了五:針葉樹生立木樹幹含水率の連続モニタリング(第2報), 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p76, 要旨集 CD…B29-01-0915, 2016
- 81 池田潔彦ほか:応力波伝播法によるスギ立木材質の季節変動, 第 44 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p226, 1994
- 82 釜口明子ほか:横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率非破壊推定, 木材学会誌, Vol.46, No.1, p13-19, 2000
- 83 釜口明子ほか:横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率の測定 含水率計との比較および各品種の高さ方向の分布, 木材学会誌, Vol.47, No.3, p235-241, 2001
- 84 中田了五:スギの樹幹内水分分布の変異とその変動要因に関する研究, 林木育種センター研究報告 第 23 号, p210-219, 2007

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の執筆にあたり、研究全般にわたって御指導御鞭撻を賜った鳥取大学農学部 特任教授 農学博士 山本福寿先生、鳥取大学農学部 准教授 農学博士 藤本高明先生、鳥取大学農学部 教授 農学博士 日置佳之先生、島根大学生物資源科学部准教授 理学博士 川口英之先生に、衷心より感謝申し上げます。

また、本研究の遂行にかかり、大学院における在職での研究を許可され、かつ課程履修にあたって格別のご配慮を賜った 鳥取県林業試験場 大西良幸場長、木材利用研究室 野間修一室長、ならびに林業試験場の皆様、特に現地調査全般において絶大なるご助力を賜った玉木操 現業職長、研究者としての規範を示し続けていただいた木材利用研究室 農学博士 川上敬介 主任研究員、はい積み丸太の研究の機会を提供いただいた木材利用研究室 森田浩也 主任研究員、また進学に際し快く背中を押してくださった中部総合事務所農林局林業振興課 西村臣博 課長補佐、西部総合事務所農林局農林業振興課林業振興室 阿部竜三 室長の諸氏に対し、心から感謝申し上げます。

さらに、手のかかる盛りの息子を差し置いて進学するという我が儘をきいてくれた妻、ろくに遊んでくれない父を許してくれた息子、代替えを延ばして村の役員等地域の役割を引き受けてくれた父母、父の大病という災禍を技術と真心で支えてくれた妹など、一族の深い理解と多大な協力には感謝しきれない。

皆様のおかげをもって本稿をまとめることが出来ました。堅苦しい文句を書き連ねましたが、皆様には大変お世話になりました。ありがとうございました。

摘 要

1 序章

スギは多くの優れた特性を持つ日本固有の針葉樹である。スギの成長は早く、かつ通直に成長し、木目は真っ直ぐで加工性に優れているので、多くのものに使われてきた。製品や住宅など、スギは木材として日本人の生活を支えてきた。優れた加工性能を持つスギは、昔から造林木として植林されてきた。スギは前世紀の中頃から集中的に植林され、その結果、スギの植林地は日本の全人工林の43%を占めている。しかし、近年の木材価格の低迷がスギの適正な評価と利用を低迷させている。

さらに、木材は生物材料なので、密度や強度性能などにばらつきを持つ。木材としてのスギの諸性能で個体差が大きいことはよく知られていることである。鳥取県産のスギ材の強度性能は3.5 GPa~12 GPaまでのばらつきが確認されている。スギの強度性能のようなばらつきは、工業利用には好ましくない。このため工業利用する以前に木材の性能を明らかにすることは、木質資源の有効活用と適正な価格維持のために極めて重要となる。さらに、早期で安価な木材の性能把握にもとづく選別は林木の品種改良や適切な木製品の品質管理に不可欠である。

非破壊的に木材の強度性能を推定する手法の一つに応力波法が挙げられる。本研究では鳥取県産のスギを対象に、スギの品種改良のための強度性能に優れたスギ個体の選抜ならびに、伐採木や丸太の乾燥状況の把握、スギ立木の水分の季節変動観察に対し、応力波法の活用を試みた。

2 強度性能に優れたスギ品種の選抜

木材は生物材料なので強度性能等が不安定であるため、工業製品の素材として使いにくく価格が低迷し、適正な人工林の保育や更新の妨げとなっている。高値で売れる見込みがある強度性能の高い品種を創出することは、この状況を打破する手段の一つとして有効である。強度性能の高いスギ品種の確立のための強度性能選抜調査では、選抜結果を母樹として残すため、非破壊的に立木の強度を調査しなければならない。非破壊的な立木の強度性能の調査手法として応力波の伝搬速度の計測が知られている。応力波伝搬時間(Stress-wave propagation time、以下、SPT)の測定器のFAKKOPP(Fakopp Enterprise、Hungary)を用いたスギ立木の計測では、一般的に樹幹に平行に配置したセンサーをハンマーで打撃して計測するが、この計測手法では計測値

に大きなバラツキが生じる。出力結果の再現性が低い原因として、センサーの打撃手法やセンサーの配置が考えられた。

そこで打撃手法やセンサーの配置および間隔を改良した結果、定力打撃装置の使用とセンサー間隔 1.5m での斜め方向の計測で計測値のバラツキが 1/20 以下に低減し、さらに同じ個体で同じ計測結果が得やすいことを確認した。また、この手法を用いて立木で推定した強度性能と、伐採後の丸太や柱で計測した強度性能に有意な高い相関が確認できた。

このように FAKOPP での立木の SPT 計測における最適な手法を確立した後、この計測手法を用い、鳥取県内の公有林を対象にスギ立木の強度性能選抜を実施した。調査の結果、平均的なヒノキより強い強度性能を持つスギを複数確認し確保することができた。現在これらの個体から枝を採取し、挿し木して増殖中である。今後これらのクローンは品種登録されるとともに、遺伝資源としても活用が期待される。

3 はい積み丸太の乾燥行程管理への応力波法の適用

東日本大震災以降、木材のエネルギー利用が増大しつつある。多くの木材が燃料用チップとして消費されているが、チップに含まれる含水率は発熱量に大きく影響する。しかし、サイロでのチップの乾燥は極めて困難である。このため、燃料用チップの原料となる丸太の乾燥管理が重要となる。

ところが、原料丸太は自然乾燥させるためにストックヤードで大規模なはい積み状態で放置されるため、はい積みされた丸太の水分状態を把握し適切に管理することは困難である。そこで、はい積み状態の丸太の水分変化を、はいを崩さずに把握する手法を確立した上で、効率的な丸太の乾燥ができる積み方の検討をすることにした。

はじめに小規模なはいを用い、個々の丸太の質量を定期的に計測するとともに、前章で改良した手法を使って、はい積み状態で丸太の木口間の SPT を計測した。その結果、乾燥に伴う丸太の質量の変化と SPT の変化に有意な高い相関が認められ、SPT 計測を用いて丸太の乾燥行程の管理ができることがわかった。

この手法を用いて、鳥取県内3箇所の実際のストックヤードでの丸太の積み方の違いによる乾燥の違いを調べた。調査の結果、さん積みのように隙間のある積み方をすることで大きなはいの丸太の水分量が早期に低下することがわかった。また、季節や天候によっては、水分量が上昇することもわかり、長期間丸太を放置するだけでは含水率の低いチップの生産ができないことが明らかに

なった。さらに乾燥開始季節の違いによる丸太の乾燥に必要な期間も把握することができた。

今回得られた知見は、大規模なはい積みでの丸太の乾燥の目安として活用が期待出来る。

4 応力波法によるスギ葉枯らし乾燥行程の観察

スギは木材として優れた性能を有しているが、含水率が高いため、利用に際しては人工乾燥等の乾燥行程が必須である。伐採後のスギを現地で乾燥させる伝統的手法として葉枯らし乾燥がある。葉枯らし材は、材の色や香りが良いため、天然乾燥の無垢材として好まれ、木材市場では高値で取引される。しかし葉枯らし材の生産は現場の工程数を増やすため、出荷が低迷している。効率的な葉枯らし材生産のためには葉枯らしに必要な期間の把握が必要である。

このため以前から葉枯らし期間の研究が実施されてきた。しかし、既往の研究では試験体を鋸断し含水率を計測する手法を採っている。スギでは含水率の個体差が大きいため、葉枯らし期間の調査は非破壊的手法が望ましいが、既往の研究では乾燥期間中の含水率の推移を非破壊的に把握できていない。これまでに我々は、乾燥中の丸太の重量変化と SPT の変化には強い正の相関があることを確認した。そこで、葉枯らし中のスギについて、葉枯らしに要する期間を把握するため SPT 計測を行った。

この結果、SPT 値は伐採後急激に低下し、2ヶ月後には平衡状態となることがわかった。このことは伐採木の水分量が2ヶ月間減少し、その後は安定したことを意味している。これは今までの研究結果を裏付ける結果であり、SPT 計測により非破壊的に伐採木の水分の変化が観察できることが証明された。

この知見を用いれば、伐採時期や伐採の密度の差による乾燥に必要な期間の把握が容易になるので、取り組みやすい葉枯らし施業のマニュアル作成に活用する予定である。

5 応力波法による樹幹内水分量の季節変化の把握

樹木における生立木の含水率は、伐採後の木材利用のみならず樹木生理・生態などの他の研究分野にも波及する重要な情報である。しかし生立木の含水率の季節変化に関する研究事例は広葉樹も含め未だ少ない状況である。一方で、生立木の含水率が季節変化することは林業関係者の間で一般的にいわれていることである。

生立木の水分量の変化は SPT の値に影響するので、応力波を使った強度性能選抜に影響する。そこで、特定のスギ立木を対象に、長期間にわたって SPT を計測し変化を調べることで樹幹内水分の変化の把握を試みた。その結果、わずかながら木の水分が季節変化することが明らかになった。その変化は SPT 値で数%なので、強度性能選抜の調査結果にほとんど影響しないが、少しでも軽量の伐木を出荷したい林業関係者には有益な情報である。また、この計測手法による樹幹内の水分変化の把握はスギ以外の樹種にも有効であると考えられるので、他の研究分野での応用が期待できる。

6 まとめ

本研究では、林業・木材産業が抱えるいくつかの問題に対し、応力波法を応用し、スギの材質性能の非破壊的な把握による解決を試みた。FAKOPP を用いた SPT の計測手法を改良して、精度の高い計測を実現し、この手法を使って次世代のスギ品種の確保や、燃料用丸太や立木などの木材の水分変化を把握し効率的な乾燥手法や乾燥に要する期間を提言することができた。スギはこれからも日本の林業を支える主力品種である。本研究の成果がこれからの林業に微力ながらも寄与できることを確信する。

Summary

1 Prologue

Sugi (*Cryptomeria japonica*) is a conifer endemic to Japan that has many superior characteristics for producing high-quality timber. Sugi grows straight and quickly. Because sugi wood has a fine grain and is easy to process, it has many end uses. In Japan, sugi has traditionally been used to build houses and to create wooden articles used in daily life. As a result of its ease of processing, sugi has long been planted as a profitable timber tree. Indeed, sugi has been grown intensively in Japan since the middle of the 20th century. As a result, sugi accounts for approximately 43 % of the total area of forest plantations in Japan. However, in recent years, wood prices have dropped, meaning that the appropriate evaluation and use of sugi wood has declined.

Because wood is the product of living trees, its characteristics can vary greatly, various performance including the density and strength. It is well known that the properties of sugi wood show wide variations. For example, the strength of sugi wood harvested from Tottori Prefecture varies from 3.5 to 12 GPa. This wide variation in strength is not optimal for industrial uses. Thus, it is important to determine the characteristics of wood that may affect performance prior to industrial use for the effective use of the wood and the establishment of an appropriate price. Rapid and cost-effective methods of evaluating the properties of wood are required for forest tree breeding programs and for sorting wood resources to determine the appropriate end products.

One technique to nondestructively estimate the strength performance of wood uses the stress-wave method. The purpose of the current study was to apply the stress-wave technique to sugi wood grown in Tottori for the following purposes: 1) to select strong trees for breeding, 2) to observe the drying process of felled trees and logs, and 3) to evaluate the water-fluctuations in standing trees.

2 Selecting new varieties of sugi for high-strength performance

The recent decline in wood prices has discouraged forest owners from properly managing their plantations and second planting. One way to

counteract this situation is to breed trees for higher-strength wood that can then command a higher market price. To breed such wood, it is necessary to first nondestructively evaluate the strength of standing trees and then select trees with good wood strength that can be used for breeding programs.

Measuring stress-wave velocity is a nondestructive method that can be used to assess the stiffness of standing woody stems. In this study, stress-wave propagation time (SPT) was measured in the stems of sugi standing trees using a Fakopp microsecond timer (Fakopp Enterprise, Hungary). In normal Fakopp measurement, the sensors are arranged parallel to logs or standing trees at 1.0-m intervals and sensors are hit manually with a hammer. However, SPT values tend to vary greatly and it is difficult to obtain consistent results using this method. This issue with repeatability is likely the result of the sensor arrangement and the method of hitting sensors. Therefore, we examined several aspects of the measurement technique, such as the striking force of the hammer as well as the alignment and interval of the sensors, to obtain more reliable SPT values.

The results of this investigation indicated that under optimal conditions, the sensors are hit with a constant force using the simple machine which was made with a knock-type ball-point pen and the sensors are aligned diagonally against the longitudinal direction of the logs at 1.5-m intervals. The coefficient of variance for the measured SPTs using this optimized method was reduced to 1/20 that of the values gained by conventional methods. There was a meaningful strong correlation between the values for strength performance of standing trees measured using the optimized method and the actual values for timber strength performance taken after trees were felled ($r=0.94$, $p<0.01$).

After determining the optimal conditions for the wave stress method, we then used the method to select sugi trees with particularly high-strength wood for breeding in the publicly owned forests of Tottori Prefecture. During this investigation, we discovered more than one sugi tree that had greater wood strength than the average hinoki (*Chamaecyparis obtusa*). We gathered some branch from these selected sugi trees and planted the cuttings. The trees are currently being propagated and we will register the clones as a new variety. This new variety is expected to provide a genetic resource for future tree

breeding programs in Tottori.

3 Application of the stress-wave technique to manage drying of decked logs

Since the Great East Japan Earthquake and Nuclear Disaster, the use of wood for energy production has increased. Wood is often made into chips for fuel but the water content of logs strongly affects the heat generated by woodchips. However, it is very difficult to dry woodchips in a silo. Therefore, careful management of the wood-drying process is very important during the period when logs are stored for later processing into woodchips.

However, logs are typically left in large logging decks in the stockyard, making it very difficult to properly manage the water contents in decked logs. Therefore, we decided to test the most efficient way to load logs for drying using our improved technique for determining water content based on SPT. First, we created a small pile of decked logs and then measured the weight of each log at regular intervals of date using a standard technique. We also measured the SPT of the butt ends of logs using our improved technique. There was a highly significant, positive correlation between the weight of logs during drying and their SPT ($r=0.93, p<0.01$). This finding means that it is possible to manage the process of drying piled logs by measuring their SPT.

Using this technique, we evaluated the differences between water contents in piled logs according to how logs were loaded in large logging decks in the stockyard. The results of this investigation indicated that the water content of the logs decreased more quickly in large piles when they were piled crosswise than under other piling arrangements. Water contents also varied depending on the season and the weather. Thus, a considerable amount of time was required to determine which logs would not be able to produce woodchips with sufficiently low water content. Through this investigation, we were also able to determine differences in the time needed for drying logs according to the start date of the drying season. These results will help to determine how logs should be loaded and dried in large piles for woodchip production.

4 Monitoring the natural drying process of felled sugi trees by measuring stress wave properties.

The sugi tree is an excellent source of timber; however, its water content is

high and it must be dried, often via a kiln, prior to use. Hagarashi, or natural-drying is a traditional method in which timber is allowed to dry naturally after felling. Because hagarashi wood has an appealing color and fragrance, it commands a relatively high price on the wood market. However, the production of hagarashi wood increases the number of on-site steps required to process the wood, meaning that shipment timing is more complicated. Determining the period necessary for natural drying is important for effective hagarashi wood processing.

Therefore, study of the time needed for natural drying have been carried out. However, the conventional technique requires one to cut a sample tree with a saw and measure the water contents. Because sugi tend to have large individual differences in water content, a nondestructive technique is desirable for determining the appropriate time for drying. However, up till now, no methods have been developed to nondestructively measure changes in water content during the natural drying process. Yet, we found a highly significant correlation between the weight of logs during drying and their SPT. Thus, we tried to measure the SPT of felled sugi trees during natural drying for grasp of the time needed for natural drying.

We found that the SPT decreased rapidly for approximately 2 months after felling and then reached equilibrium, indicating that the water content of the felled trees declined for approximately 2 months and then became stable. This result was supported by research of the past. Our results demonstrate that one can nondestructively determine the water content of sugi logs by measuring their SPT. Using this information, we can determine the periods necessary for natural drying under various felling patterns, which should make the natural drying process easier to carry out.

5 Evaluating seasonal changes in the water contents of standing tree trunks trees using the stress-wave method

Determining the water content of standing tree trunks is important not only to assess potential uses for wood after felling but also to determine other aspects of tree growth cycles. However, there are few studies on seasonal changes in the water content of standing trees, including broadleaf species. Yet, anecdotal evidence from individuals concerned with forestry suggests

that the water content of standing trees changes seasonally.

Because water content appears to be correlated with SPT values, changes in the water content of standing trees would influence the selection of trees for high-strength wood using the stress-wave method. Therefore, we attempted to determine changes in the water content of standing sugi trees by measuring trends in SPT over a long period and analyzing whether any seasonal changes occurred in SPT values.

The results revealed that the water content of the standing trees did demonstrate seasonal changes. The results revealed that the water content of the standing trees did demonstrate seasonal changes. However, because these seasonal changes only amounted to a few percent of the total SPT value, they are unlikely to influence the selection of trees for strength performance. Despite this, information on small changes in water content and, hence, timber weight would be useful for suppliers who wish to ship lighter trees. In addition, this information should be useful in other research fields because we expect that the technique will be also effective for tree species other than sugi.

6 Conclusions

In this study, we applied the stress-wave method towards improving the strength and, hence, the value of sugi wood. We developed an improved technique for the stress-wave method to measure SPT, and achieved high-precision SPT measurements. Using these results, we were able to determine and select individual trees with high-strength wood and develop a new, higher-strength sugi variety. Furthermore, we were able to evaluate changes in water levels in the decked logs, felled trees, standing trees. Sugi is expected to be the most important forestry tree in Japan in the future. Therefore, the results of this study should contribute greatly to the success of future forestry.

基礎となる学術論文および参考論文

1 基礎となる学術論文

題 目 : スギ丸太ならびに立木での応力波伝搬時間計測における出力結果の再現性の向上

著 者 名 : 桐林真人, 西村臣博, 藤本高明, 山本福壽

学術誌名 : 森林バイオマス利用学会誌

巻・号・頁 : Vol.10, No.2, pp.41-47

発表年月 : 2015年12月

該当項目 : 第2章

題 目 : 応力波を使ったはい積み丸太の乾燥行程管理

著 者 名 : 桐林真人, 森田浩也, 藤本高明

学術誌名 : 木材工業

巻・号・頁 : 第71巻, 第8号, pp.312-316

発表年月 : 2016年8月

該当項目 : 第3章

題 目 : 応力波伝搬時間計測によるスギ葉枯らしの乾燥行程の観察

著 者 名 : 桐林真人, 藤本高明

学術誌名 : 木材工業

巻・号・頁 : 第72巻, 第3号(掲載予定)

発表年月 : 2016年7月26日受理 (2017年3月発表予定)

該当項目 : 第4章

2 参考論文

題 目 : スギ丸太の応力波伝搬時間による製材品の曲げ性能の推定

著 者 名 : 桐林真人, 西村臣博, 川上敬介, 森田浩也, 柴田寛

学術誌名 : 鳥取県林業試験場研究報告

巻・号・頁 : 第44号 pp41-45

発表年月 : 2012年3月

該当項目 : 第2章