

# 応力波法によるスギ生立木の長期モニタリング

桐林真人

## 応力波法によるスギ生立木の長期モニタリング\*1

桐林真人\*2

木材内部を伝播する応力波の速度は水分量の影響を受け変化するため、応力波により生立木の樹幹内水分量の変化を非破壊的に検知できる可能性がある。そこで、スギ (*Cryptomeria japonica*) 生立木の樹幹の特定区間を対象に、長期間の応力波伝播時間の計測を行い、変化を調べた。約 69 か月間にわたって計測した結果、応力波伝播時間の値は梅雨期に増加し秋期に減少する変化を繰り返し、その変動の幅は経年的に漸減する傾向を示した。

キーワード：立木，応力波，季節変化

Long-term monitoring of the trunk of standing *Cryptomeria japonica* (sugi) trees by the stress wave method\*1

Masato Kiribayashi\*2

Since the velocity of stress waves propagating inside wood changes under the influence of water content, it may be possible to detect the change in the water content in the trunk of standing trees non-destructively by stress wave. Therefore, I studied the relative changes in a specific section of the trunk of some standing *Cryptomeria japonica* (sugi) trees by measuring the long-term stress wave propagation time. As a result of measurement for about 69 months, the following was confirmed that the value of stress wave propagation time repeatedly increased in the rainy season and decreased in the autumn, and the range of fluctuation tended to decrease gradually over the years.

Keywords: Standing trees, Stress wave, Seasonal change

## 1. はじめに

生立木の樹幹内水分量の変化は、伐採後の木材利用における搬出や乾燥、エネルギー利用に影響するほか、樹木生理・生態等の研究分野にも波及する重要な情報である。樹木の形成層は概ね春から晩夏に活動するが<sup>1)</sup>、このような樹木の成長活動に伴う樹幹内水分量の季節的な変動は古くから指摘されており、スギなどの用材樹種では辺材の生材含水率が伐採時期によって異なることが知られている<sup>2)</sup>。また、林業関係者の間では、スギ生立木

の樹幹内水分量が季節的に変動することが一般的に認識されており、梅雨期などの樹幹内水分が多い時期は「水を上げている」「木が動いている」、秋から春にかけては樹幹内水分が少ないとして「木が止まっている」「木が動かない」などと表現し、彼岸から彼岸まで（9月中下旬から3月中下旬）を伐採に適しているとして「伐り時期」としている。

しかし、生立木の水分量の季節変化に関する具体的な研究事例は広葉樹の事例<sup>3)</sup>も含め、未だ少ない。さらに

\*1 本報の一部は、日本木材学会中国・四国支部 第30回研究発表会（2018年9月，高知）において発表した。

\*2 鳥取県林業試験場 〒680-1203 鳥取県鳥取市稲常 113 電話 0858-85-6221

複数年にわたって同一個体を非破壊的に調査した事例は僅少である<sup>9)</sup>。また、個体間や、同一個体でも部位により含水率等のばらつきが大きいスギでは、まとまった季節変化が認められないとされており<sup>6-10)</sup>、林業関係者の感覚との乖離があった。

ところで筆者らは、強度性能に優れたスギ品種を応力波法によって非破壊的に探すため、応力波伝播時間 (Stress wave Propagation Time 以下、SPT) 計測器 FAKOPP (Fakopp Enterprise, Hungary) を用いた立木における強度性能調査において、従来行われていたセンサーの配置や打撃手段を改良し、出力結果の再現性の高い SPT 計測手法である MM 法を確立した<sup>11)</sup>。その過程で、実大材の特定区間を対象とした MM 法による SPT 計測では、乾燥による木材内部の水分減少に伴って直線的に SPT 値が小さくなることを確認し、木材内部の水分量の変化と SPT 値の変化との間に高い相関があることを明らかにした<sup>12)</sup>。そしてこの手法を応用し、はい積みされた燃料用丸太の乾燥状況が SPT 計測によって把握できることを明らかにした<sup>13)</sup>。

筆者はこれらの知見に基づき、非破壊的な手法による生立木の樹幹内水分量の変化の把握を試み、スギ生立木の特定区間を対象とした約 22 か月間の SPT 計測によって、樹幹内水分量が季節変化している可能性があることを示した<sup>14)</sup>。

本研究では、スギ生立木の樹幹内における SPT 値の変化の規則性を確認するため、既報<sup>14)</sup>に引き続いて同じ個体群を対象に SPT 計測を長期間継続実施した結果を報告する。

## 2. 材料と方法

### 2.1 供試材料と計測期間

試験には既報<sup>14)</sup>と同じ鳥取県林業試験場内のスギ 6 本 (精英樹交配ミュータンス) を供した。なお、試験開始時の林齢は 33 年生で、試験期間の期首・期末における測定区間中心の直径は表 1 に示すとおりである。

直径の計測には輪尺を用いた。なお、試験体は隣接していないが同一林分内にあり、斜面方向、傾斜、土質等の環境条件はほぼ同じであった。

表1 測定区間中心の直径

試験体 No.	1	2	3	4	5	6
期首の直径(mm)	256	280	331	177	189	289
期末の直径(mm)	298	314	380	200	212	314
肥大生長量(mm)	42	34	49	23	23	25

SPT 計測は 2015 年 5 月 21 日 (平行測線は 2015 年 12 月 7 日) から 2021 年 1 月 4 日までの 2056 日、約 69 ヶ月間 (平行測線は 1856 日、約 62 か月間) に、概ね 20 日間隔で 132 回 (平行測線は 119 回) 実施した。平均測定間隔は 14.7 日であった。

### 2.2 測定方法

試験では、生立木の樹幹の特定区間を対象に、FAKOPP を用いて 100 万分の 1 秒単位で SPT を計測した。FAKOPP のセンサーの配置 (以下、測線) は、樹幹に対して斜め方向 (以下、斜め測線) と平行方向 (以下、平行測線) の 2 種とし、センサー間隔 (以下、測線長) は 3.0 m とした。なお、既報<sup>14)</sup>では直径方向でも計測を実施していたが、ばらつきが大きくまとまった変化として捉え難いことと、作業安全を考慮し、計測を中止した。

SPT 計測の具体的な手順は以下のとおりである。

- ①ムカデ梯子をロープで試験体に固定する。
- ②高所の指定箇所のシーリング (ガムテープ) を剥がし、定位置に FAKOPP のストップセンサーを挿入して緩みがない程度までゴムハンマーで軽打した後、センサーの未挿入部分の長さを鋼尺で計測する。このとき挿入したストップセンサーは斜め測線と平行測線の共通となる (図 1-①)。
- ③斜め測線の低所の指定箇所のシーリング (ガムテープ) を剥がし、定位置に FAKOPP のスタートセンサーを挿入して緩みがない程度にゴムハンマーで軽打した後、センサーの未挿入部分の長さを鋼尺で計測す

る(図1-②)。

- ④定力打撃装置<sup>11)</sup>を用いてスタートセンサーを3~5回打撃して数値の安定を確認する。FAKOPPには±4μsの機械的な測定誤差があるとされるが、測定値がこの範囲内であることを確かめる。
- ⑤定力打撃装置を用いてスタートセンサーを7回打撃して7つの計測値を得る。
- ⑥平行測線も同様に測定する(図1-③)。
- ⑦SPT計測終了後は、センサーを抜き取り、センサー挿入部分をガムテープでシールし、乾燥や雨水の浸入等を出来るだけ排除する。
- ⑧ムカデ梯子を次の試験体に移動する。

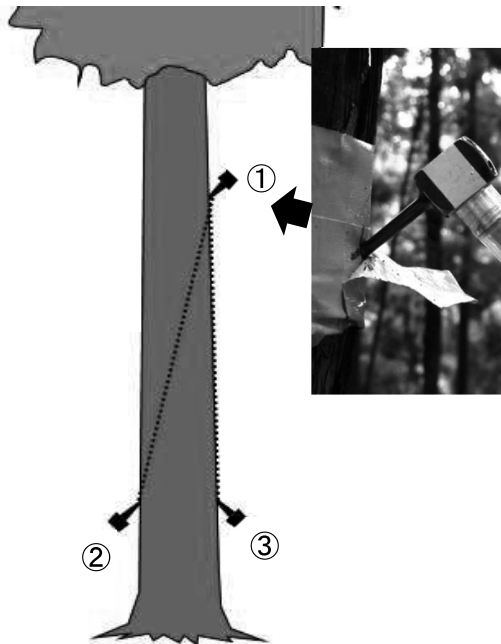


図1 SPT計測の模式図

なお、樹幹内水分の日変化は認められない<sup>6)</sup>とされているが、念のため、葉からの蒸散が多い時間帯(午前10時~午後2時)に全てのSPT計測を実施した。また、出力結果の再現性を確保するため、全ての計測で同じ定力打撃装置を使用した。

## 2.3 計測値の処理方法

### 2.3.1 SPT値

斜め測線、平行測線それぞれで得た各7つの計測値について、中央値から遠い2つの値を控除し、残った5つ

の値の平均値を、その日の計測値とした。なお、計測毎に得られた7つの計測値のばらつき(変動係数)は、斜め測線の平均値が0.18%、平行測線の平均値が0.17%であり、安定した計測が実施できていた。

計測値を単位距離に換算する際、計測毎のセンサー挿入深さの僅かな変化の影響を排除する必要がある。そこで、2.2②③⑥で計測したセンサーの未挿入部分の長さを、センサーの全長から控除して「センサー挿入長さ」を算出し、これを測線長から控除して、その計測時の測線長を算出した。この測線長により計測値を除して、単位距離での値(以下、SPT値)に換算した。得られた6本の試験体のSPT値から計測回毎の平均値を算出した。

### 2.3.2 相対値

前項で得たSPT値について、計測期首値を100%としたときの指数(以下、相対値)をそれぞれ算出した。

特に、相対値の平均値については、測定日間のSPT値の変化を直線的なものと仮定し、測定日間で変化した値を測定間隔日数で割り戻して毎日の変化値を算出したうえで、1か月を上旬・中旬・下旬の3旬に分け、各旬における相対値の平均値を算出し、その変化を見た。

### 2.3.3 異常値の取り扱い

2016年4月16日から17日にかけて、調査地周辺では強風が吹き、鳥取地方気象台では最大風速18.2m、瞬間最大風速31.2mを観測した。この直後の2016年4月26日の計測以降、No.3の平行測線では従前の値の約1.6倍の異常値が度々計測されるようになり<sup>14)</sup>、2018年10月からは異常値しか計測されなくなった。このため平行測線についてはNo.3以外の5本の計測値を解析に用いることとした。強風後に平行測線で異常値が計測される現象は、鳥取県八頭郡若桜町内における2020年の調査でも検知されたため(未発表)、測線内の樹幹において、強風によって樹幹がたわみ、樹皮下で組織の異常、いわゆる「もめ」ができたことが、応力波の伝播経路に干渉

し異常値を発生させたのではないかと推測するが、原因の特定には至っていない。

また、2018年2月6日は全ての測線で計測値が異常に小さな値を示したため、後述する各年の変化の最小値から控除している。この日は気温が極めて低く、鳥取地方気象台（標高7m）では日平均気温-1.9℃、最低気温-6.2℃を記録しており、標高が高い試験地周辺（標高125m）ではさらに気温が低かったと推定されるが、この低温のためSPT値が小さくなった可能性がある。中田は横打撃振動法の計測において、冬期の樹幹の凍結に伴い計測値が変動すると報告しており<sup>5)</sup>、この計測値も記録的な低温により樹幹の一部が凍結したことが影響したためであると推察される。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 計測期間における変化

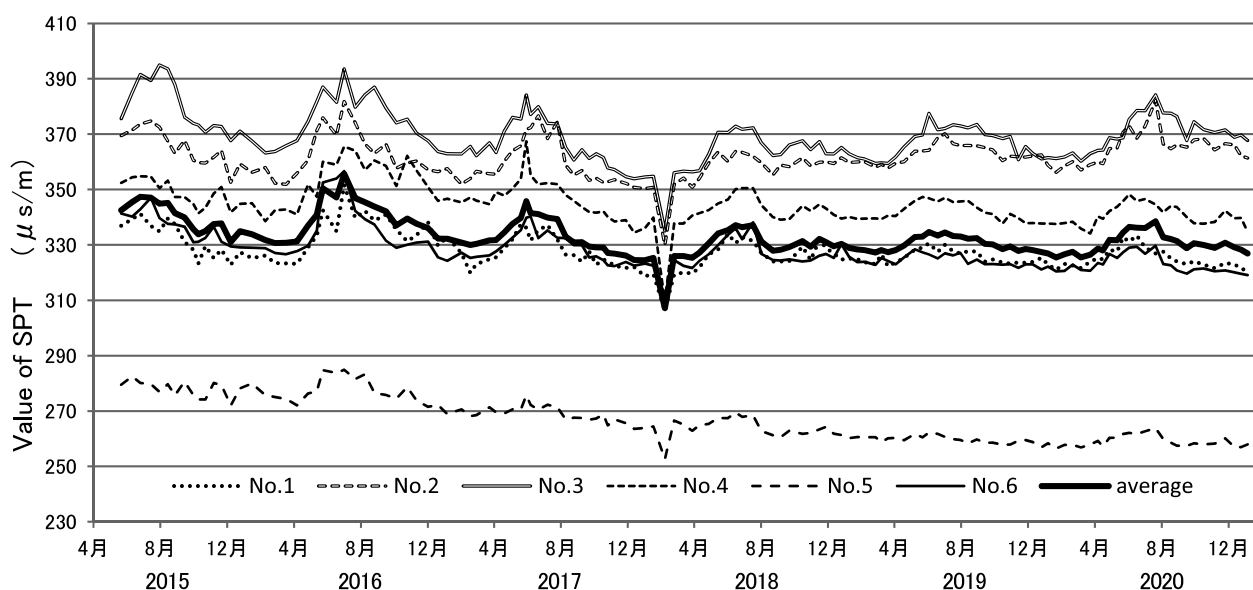


図2 斜め測線で計測した SPT 値の経時変化

#### 3.1.1 SPT 値

全計測期間における各試験体の SPT 値の経時変化を図2、3に示す。各測線で得られた SPT 値にはそれぞれ初夏に大きな値を示し、初秋から冬期は小さな値となる波状の周期的な変化が認められた。

次に、各試験体の年ごとの最大値と最小値ならびに標準偏差、変動係数を表2に示す。2018年2月6日を除き、2016年から2020年における年間（1月～12月）の SPT 値の最大値と最小値の差の平均は、斜め測線で 17.94  $\mu s/m$ 、平行測線で 14.71  $\mu s/m$  であった。実測される値はこの約3倍の数値で、FAKOPPの測定誤差 ( $\pm 4 \mu s$ ) を大きく超える。また、2.4測定値の処理方法で述べたように計測毎の7つの測定値の変動係数は僅少でばらつきは小さい。これらのことから、図に示される変動は測定誤差や計測のばらつきではなく、材内で生じている明瞭な変化を示していると考えられる。

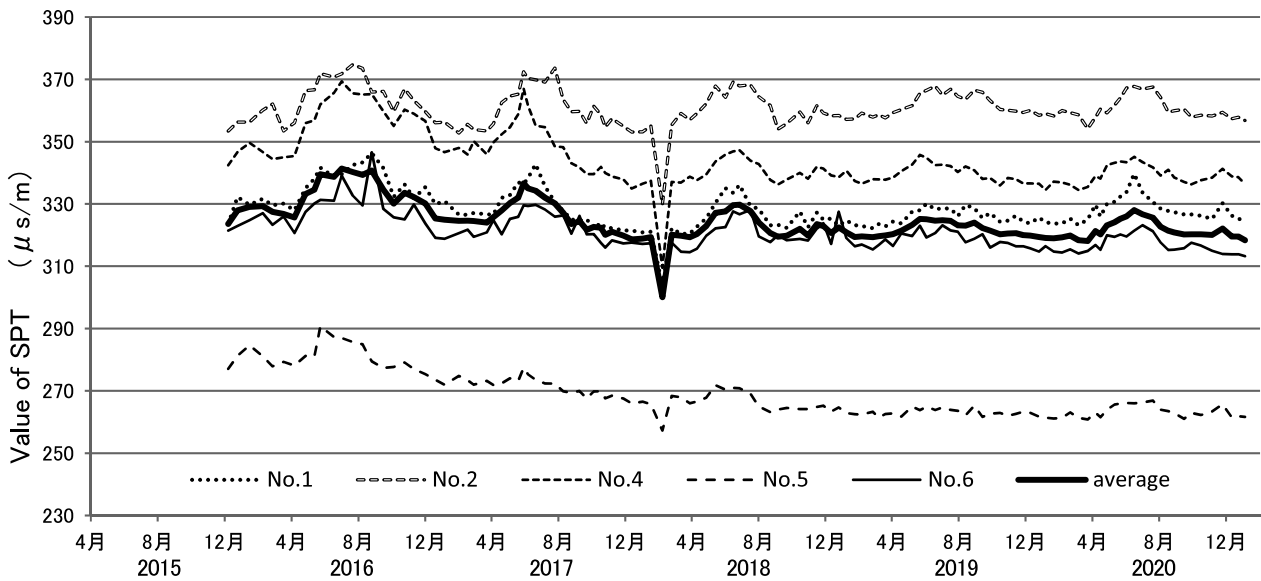


図3 平行測線で計測した SPT 値の経時変化

表2 斜め測線で計測された SPT 値の年間変化の平均値

期間	2016年1月～2020年12月 (2018年2月6日を除く)						
測線種	斜め測線						
試験体 No.	1	2	3	4	5	6	平均
各年の最大値 (μs/m)	337.42	374.85	382.42	355.77	271.21	338.62	343.38
各年の最小値 (μs/m)	321.01	353.38	358.27	336.18	261.78	322.04	325.44
最大値と最小値の差 (μs/m)	16.41	21.47	24.14	19.59	9.44	16.58	17.94
標準偏差 (μs/m)	4.75	5.96	7.05	5.26	2.60	4.92	5.09
変動係数 (%)	1.44	1.65	1.91	1.52	0.97	1.49	1.50

表3 平行測線で計測された SPT 値の年間変化の平均値

期間	2016年1月～2020年12月 (2018年2月6日を除く)						
測線種	平行測線						
試験体 No.	1	2	4	5	6	平均	
各年の最大値 (μs/m)	338.96	370.62	354.88	274.41	330.11	333.80	
各年の最小値 (μs/m)	323.02	354.15	337.17	264.98	315.62	318.99	
最大値と最小値の差 (μs/m)	15.94	16.48	17.71	9.91	13.50	14.71	
標準偏差 (μs/m)	4.50	5.00	5.08	2.62	3.98	4.24	
変動係数 (%)	1.37	1.38	1.46	0.97	1.23	1.28	

### 3.1.2 SPT 相対値

物体中を伝わる応力波の伝播速度は、物体の密度等の影響を受ける<sup>15)</sup>。このため図2、3に示したように、各試験体の SPT 値にはそれぞれの試験体の密度等により絶対値のばらつきが生じる。そこで期首値を 100 % とした相対値により、経時変化を示した (図4、5)。

2018年2月6日を除く、2016年から2020年における試験体毎の各年間 (1月～12月) の SPT 相対値は、斜め

測線においては、最大値の平均が 100.1 %、最小値の平均が 95.0 %、最大値と最小値の差の平均が 5.2 % だった。また、平行測線においては、最大値の平均が 106.7 %、最小値の平均が 98.5 %、最大値と最小値の差の平均が 4.5 % だった。このことから、各試験体において毎年、SPT 相対値で概ね 5 % 程度の変化が発生していると考えられた。

なお、木材を伝播する応力波の速度は、木材の温度の

影響も受けるとされている<sup>15)</sup>。そこで樹幹の温度の変化が気温の変化にほぼ等しいと仮定し、図4、5に各測定日の平均気温（鳥取地方気象台計測値）を併せて示す。

図示された気温の推移と SPT 相対値の平均値の推移を比較すると、次のように不一致の点が認められた。

①最低値を示した後の動向。平均気温は2月に最低値を記録した後、概ね一定の割合で上昇し続けたが、SPT 相対値は3月下旬まで大きな変化を示さず、その後急激に増加した。

②最高値を示す時期とその後の動向。平均気温は8月に最高値を示した後、概ね一定の割合で12月まで下降し続けたが、SPT 相対値は6月下旬に最高値を示した後は減少し始めた。SPT 相対値の減少の割合は概ね9月頃には緩やかになった。

このように、自然環境の温度域では樹幹の温度変化が応力波に及ぼす影響は小さいと考えられ、SPT 相対値等の変化には、湿度や降雨量、日照時間の変化などを総合した、いわゆる「季節」の影響が大きいと推察する。

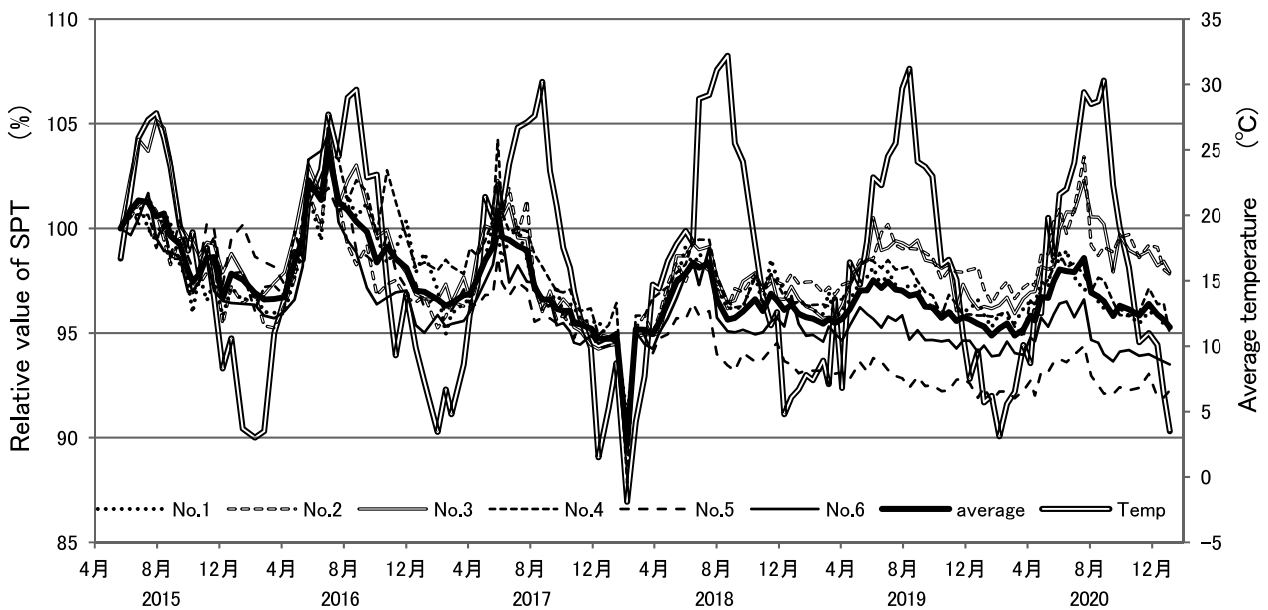


図4 斜め測線の SPT 相対値の経時変化と気温の推移

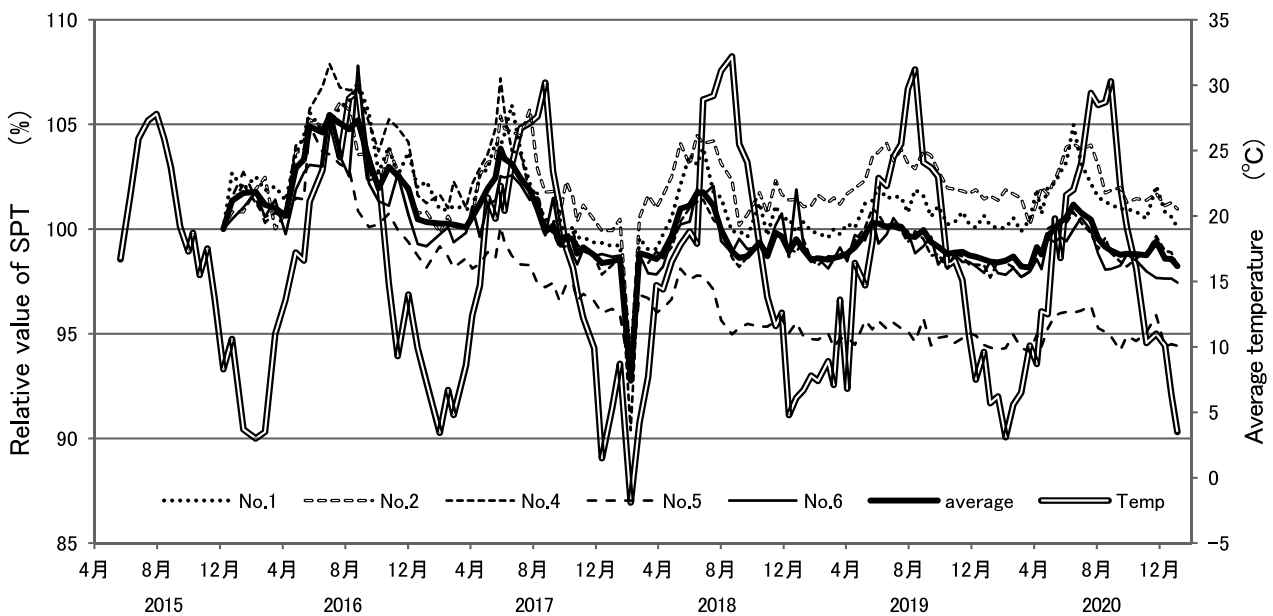


図5 平行測線の SPT 相対値の経時変化と気温の推移

### 3.2 各年間の SPT 相対値の変化

図6, 7に, 斜め測線と平行測線の相対値の平均値について, 各年の旬毎の推移を重ねて示す。

両測線ともに, 相対値は3月中下旬頃から増加し始め, 梅雨時期にかけてピークを示すが, その後は減少に転じ, 9月下旬以降は3月下旬まで低位で推移する状況を毎年繰り返していることが明確に認められた。

### 3.3 SPT 値等の季節的变化の原因

本研究で計測された SPT 値等の変動は, スギ生立木樹幹内における, 特定の事象の季節的な変化の繰り返しを示している。水分は木材に比べて応力波の伝播速度が遅いため木材内の水分が減少すると SPT 相対値も減少する<sup>13)</sup>こと, 水分は生立木樹幹内において季節的な変化を示すと考えられる<sup>23)</sup>ことから, 計測結果は生立木の樹幹内水分量の変化に影響されている可能性が高い。

黒田<sup>16)</sup>によれば, 2011年の福島第一原発事故後の放射性セシウムの影響調査の結果として, 直接セシウムが付着した樹皮だけでなく, 辺材や心材へのセシウムの浸透が確認された。この現象は辺材から心材への元素移動が低含水率の移行帯(白線帯)で制限されると考えられる

スギでも確認されたことから, 辺材から心材への木部柔細胞を介した元素移動の可能性があると指摘している。

特に樹体の成長活動が活発な春から梅雨期にかけては糖質や無機栄養素の必要量が増加することが考えられるが, このような成分移動のために樹幹全体で含水率が上昇している可能性がある。

林業関係者の間では, スギの伐採搬出に際して比較的木材が軽く樹皮が剥けにくい伐採適期(伐り時期)を「彼岸から彼岸まで(9月中旬から3月中旬まで)」と表現する。また, 春から梅雨時期にかけては木材が比較的軽く樹皮が剥けやすいとして「木が動く」「水を上げている」等と表現するが, 本研究で観察された SPT 値等の季節的な変化, すなわち, 3月下旬から6月下旬にかけて上昇, その後は下降に転じて9月から3月の間は低位で推移する変動は, 林業関係者の感覚的な表現と一致するものであった。

スギは含水率が高い樹種であるため, できるだけ含水率が低い時期の伐採搬出が望ましいが, 本研究により林業関係者の云う「伐り時期」を裏付ける数値的情報が得られたのではないかと考える。

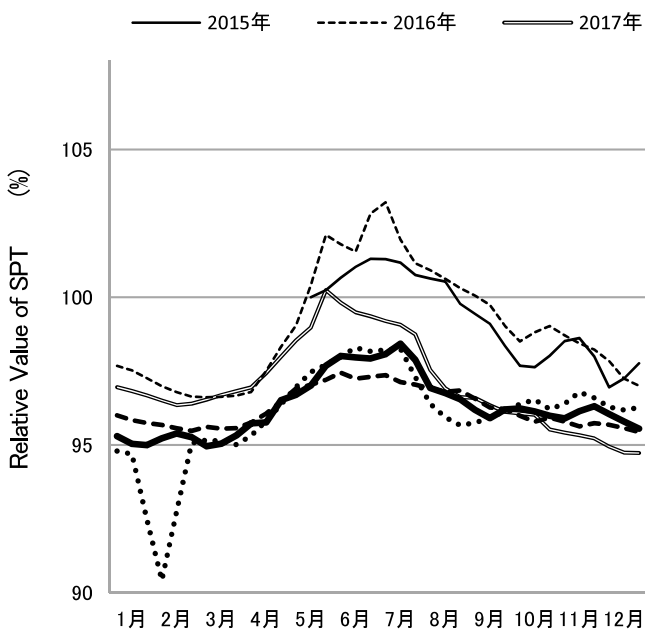


図6 斜め測線の SPT 相対値の推移の年次比較

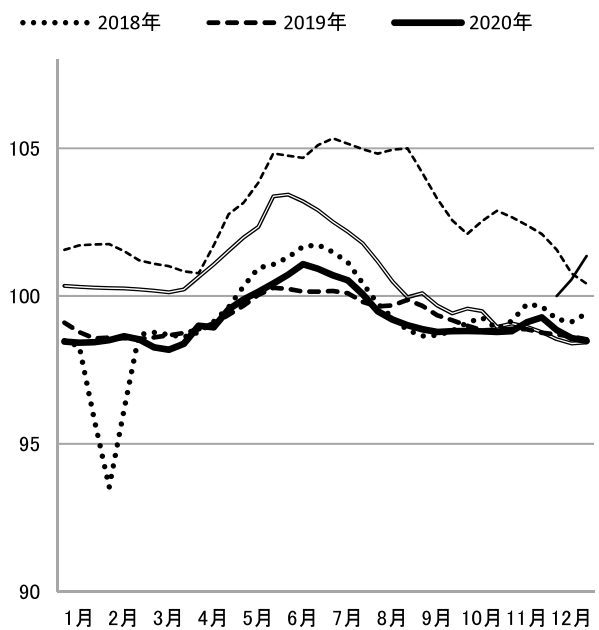


図7 平行測線の SPT 相対値の推移の年次比較



### 3.4 SPT 相対値の経年的漸減

さて、図4～7に示すように、両測線の相対値はともに、経年的に漸減する傾向を示している。2018年以降の年間推移は、2015年～2017年の年間推移より全般に低い値となっている。

この原因として、試験体の肥大生長や、センサー挿入深さの漸増に伴い、測定対象区間が異同していた可能性を考える。センサーは毎回同じ箇所へ挿入するため、先端部が次第に深くなり、期首時点より心材に近い部分を評価していた可能性があった。表4、5に各試験体の肥大生長とセンサー挿入深さとの関係を示す。

表4 斜め測線における肥大生長とセンサー挿入深さとの関係

試験体 No.	1	2	3	4	5	6
肥大成長量 (mm)	42.0	34.0	49.0	23.0	23.0	25.0
センサー挿入深さ 期首値 (mm)	29.7	31.8	31.1	29.0	26.9	28.3
センサー挿入深さ 期末値 (mm)	49.5	54.4	46.7	54.4	53.7	50.2
センサー挿入深さの増分 (mm)	19.8	22.6	15.6	25.4	26.8	21.9
期首測定深さとの関係	22.2	11.4	33.4	-2.4	-3.8	3.1

表5 平行測線における肥大生長とセンサー挿入深さとの関係

試験体 No.	1	2	4	5	6
肥大成長量 半径分 (mm)	21.0	17.0	11.5	11.5	12.5
センサー挿入深さ 期首値 (mm)	31.8	31.8	33.2	30.4	31.8
センサー挿入深さ 期末値 (mm)	48.1	48.8	50.2	55.2	55.2
センサー挿入深さの増分 (mm)	16.3	17.0	17.0	24.7	23.3
期首測定深さとの関係	4.7	0.0	-5.5	-13.2	-10.8

センサー挿入深さは、両センサーの挿入長さの合計値とセンサー挿入角度(45度)から算出した。表4、5の「期首測定深さとの関係」において、期末のセンサー先端位置が期首の位置より樹芯から離れていればプラスの値、樹芯に近ければマイナスの値となる。斜め測線では、No.1, 2, 3で期末時点に期首時に比べ11.4mm～33.4mm外側の部位も含めて計測したことを示している。これは水分が比較的多いと推定される辺材部の情報も継続的に包含して計測していた可能性を示唆する。応力波の伝播

経路に辺材部が占める割合が大きくなると、計測値は漸増傾向を示すと考えられるが、実測された計測値自体は漸減した。またNo.4, 5, 6はセンサー先端部の深さが期首時に対し-3.8mm～-3.1mmとなっており、僅かながら期首より樹芯に近い部位の計測になっているが、ほぼ同じ区間を計測し続けていたと判断できるため、樹幹の肥大生長はSPT相対値の漸減に影響していないと考えられる。

また、FAKOPPでの斜め測線による計測では、測線が樹幹に対して成す角度(以下、測線角度)が大きくなるに従い、SPT値が直線的に大きくなるのが明らかになっている<sup>17)</sup>。そこで試験体の肥大生長やセンサー挿入深さの変化に伴う、期首と期末における測線角度の関係を表6に示し、測線角度の経年変化に起因する計測値の変化の可能性を検討する。

表6 斜め測線における肥大生長に伴う測線角度の変化

試験体 No.	1	2	3	4	5	6
期首の測線角度 (°)	4.37	4.80	5.80	2.86	3.13	5.04
期末の測線角度 (°)	4.84	5.06	6.49	2.84	3.08	5.14
期首と期末の差 (°)	0.47	0.26	0.69	-0.02	-0.05	0.10

No.1, 2, 3では0.26°～0.69°の測線角度の増が認められるため、計測値が大きくなることが考えられるが、実測された計測値は期首時より小さい値を示した。また、No.4, 5, 6は期首時との角度差は-0.05°～-0.10°と極めて小さかった。このように斜め測線における肥大生長に伴う測線角度の変化やセンサー挿入深さの変化の影響はほとんど無いと判断できる。

また、平行測線ではNo.5で13.2mm、No.6で10.8mm、期首より深い部分を計測するようになっていた。スギでは辺材と心材の間に白線帯と呼ばれる移行組織があり、白線帯は含水率が低いとされる<sup>18)</sup>。これは図5においてNo.5の相対値が特に低位を推移していることと関係する可能性も考えられるものの、特定には至っていない。なお、No.5と同じく期首より深い部分の評価となってい

た No.6 では、相対値の減少の度合いが No.5 より小さく、他の試験体の相対値も同様の漸減を示していたため、全体的に相対値には漸減傾向があると考えられる。

このような相対値の経年的な漸減は、応力波の伝播経路における経年的な樹幹内の含水率の低下、もしくはなんらかの材質の変化を示している可能性があると考えられる。図 4, 5 では個々の試験体における SPT 相対値の経年的な漸減の状況が読み取れるが、個体差が認められる。スギは辺材の厚さや辺材部の年輪数、白線帯の有無などが個体によって大きく変動するため、SPT 相対値の経年的な漸減の試験体間のばらつきは、このような個々の性質を表している可能性も考えられるが、伐採しないと分からないため、現時点では解明できていない。

#### 4. まとめ

応力波法を用いて、スギ生立木の樹幹内水分の季節変化を約 69 ヶ月にわたって調べた結果、得られた知見は以下のとおりである。

- ①スギ生立木の特定区間を対象に計測した SPT 値には、季節的な変化が毎年繰り返す状況が明瞭に認められた。この周期的変動の主な原因として、樹幹内の水分量の季節的な変化の影響が考えられた。
- ②観察された SPT 相対値の季節変化は、林業関係者の言う立木の活動周期と一致していた。
- ③計測された SPT 値には経年的な漸減が認められ、その減少具合には個体差があった。これは測定区間における含水率の低下や木質成分のなんらかの変化を捉えている可能性を示唆すると考えられた。

なお、本調査は現在も継続中である。可能な限り調査を継続し、SPT 値の上昇開始期とシュート成長との関係や、SPT 値の経年的な変化等についての新たな知見を得たいと考える。

#### <文献>

1)井上真ほか, 2003, 森林の百科, p284~286

- 2)寺澤眞, 2004, 乾燥木材の全て (改訂増補版), p592-593
- 3) (社) 日本林業技術協会編, 2001, 林業百科事典, p978
- 4)矢沢亀吉, 1960, 木材学会誌 6 (4), p170-175
- 5)中田了五, 2007, 林木育種センター研究報告, 第 23 号, p210-219
- 6)西野吉彦ほか, 2013, 森林バイオマス利用学会誌 8 (2), pp41-45
- 7)静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター, 2010, 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
- 8)池田潔彦・木野直樹, 2000, 木材学会誌 46 (3), p181-188
- 9)中田了五, 2015, 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
- 10)中田了五, 2016, 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
- 11)桐林真人ほか, 2015, 森林バイオマス利用学会誌 10 (2), pp41-47
- 12)桐林真人ほか, 2012, 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
- 13)桐林真人ほか, 2016, 木材工業 71 (8), p312-316
- 14) 桐林真人, 2017, 森林バイオマス利用学会誌 12 (1), pp9-15
- 15)伏谷賢美ほか, 1985, 木材の科学・2 木材の物理, p226-227
- 16) 黒田克史, 2015, 木材学会誌 61(3), p131-135
- 17) 桐林真人ほか, 2013, 第 63 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p130, 要旨集 CD…D28-P-AM01
- 18)岡野健, 祖父江信夫編, 2013, 木材科学ハンドブック (普及版), p57