

論 文

応力波伝播速度測定によるカラマツ生立木の非破壊腐朽診断 —九州大学北海道演習林と信州大学野辺山 ステーションにおける調査事例—

小林 元*・古賀信也**・岡野哲郎***・田代直明**

(Accepted May 16, 2008)

要 旨 小林 元・古賀信也・岡野哲郎・田代直明 (2008) 応力波伝播速度測定によるカラマツ生立木の非破壊腐朽診断—九州大学北海道演習林と信州大学野辺山ステーションにおける調査事例— 樹木医学研究 12 : 119~124 九州大学北海道演習林と信州大学野辺山ステーションの50年生カラマツ林において、生立木の腐朽診断を応力波伝播速度測定装置を用いて行った。健全木の樹幹直径方向の応力波伝播速度のヒストグラムは正規分布型を示すが、腐朽木を含んだ林分の個体群全体の分布型は、腐朽木の応力波伝播速度が健全木よりも遅い側に偏って分布するため、左側に裾広がりJ字型の分布型を示した。また、樹幹直径方向の腐朽率(%)と応力波伝播速度($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)との直線回帰式の傾きは $-0.011 \sim -0.015$ 程度の値を示した。さらに、直線回帰式のy-切片は健全木の応力波伝播速度と一致した。本研究で得られたこれらの結果は、応力波伝播速度測定によるカラマツの生立木の腐朽診断を行う上で、有効な知見になると考えられる。

キーワード : 応力波伝播速度, カラマツ, 心材腐朽, ヒストグラム, 腐朽診断

Summary Hajime Kobayashi*, Shinya Koga**, Tetsuo Okano*** and Naoaki Tashiro** (2008) **Non-destructive diagnosis of wood decay in larch trees using a stress wave velocity measurement : case studies in the research forests of Kyushu and Shinshu Universities.** Tree and Forest Health 12 : 119~124 Stress-wave velocity of the trunk in the transverse direction was investigated in 50-year old *Larix kaempferi* stands in the research forests of Kyushu and Shinshu Universities. The frequency distribution of stress-wave velocity classes of sound trees was normally distributed. However, because the stress-wave velocities of decayed trees were lower than those of sound trees, the stress-wave velocity classes exhibited a J-shaped frequency distribution in stands with decayed trees. The slope of the linear regression between the percentage of the decayed portion along the diameter of the trunk and stress-wave velocity ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) ranged from -0.011 to -0.015 . The y-intercept of the linear regression conformed to the average of the stress-wave velocity of sound trees. These findings provide effective information in diagnosing wood decay using stress-wave velocity measurements.

Key words : diagnosis of wood decay, heartwood decay, histogram, *Larix kaempferi*, stress-wave velocity

* 信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター 〒399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村 8304

** 九州大学農学部附属演習林北海道演習林 〒089-3705 北海道足寄郡足寄町北5条1-85

*** 信州大学農学部森林科学科 〒399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村 8304

* Education and Research Center of Alpine Field Science, Shinshu University, Minamiminowa, Nagano 399-4598, Japan

** Ashoro Research Forest, Kyushu University, Ashoro, Hokkaido 089-3705, Japan

*** Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Shinshu University, Minamiminowa, Nagano 399-4598, Japan

※ 樹木医学会では記事中の材料および方法を個別に推奨するものではありません。

I. はじめに

カラマツは日本産の造林樹種のなかで、腐朽病害の発生が最も多い樹木として知られている(阿部 1999)。カラマツの心材腐朽は、地下部から侵入した木材腐朽菌によって樹幹内部が侵されるため(小岩 2002)、外観から腐朽の有無を判定することは難しい(青島・林 1962)。これまでに立木の腐朽を非破壊的に推定する方法として、電気抵抗(黒田・勝屋 1982, 鈴木ら 1984)やボアスコープ(黒田・勝屋 1987, 川崎・鈴木 1992), X線(黒田ら 1988)や γ 線(飯塚 1956, 佐野ら 1998)等を用いる方法が試みられてきた。しかし、これらの装置は高価で操作も複雑な物が多く、多数の個体を短時間でかつ安価に測定する必要のある林業上の実用性に欠けるきらいがあった。

近年、樹幹内部に腐朽等の欠陥が存在するとその部位の応力波伝播速度が低下することを利用した木材腐朽探知装置がいくつか開発され、その有効性が示されている(永石ら 1997, Yamaguchi *et al.* 2001)。筆者らはこれまでカラマツを対象とした研究で、樹幹内部の腐朽の大きな個体では、応力波の伝播速度から高い正解率で腐朽の有無を判定でき(小林ら 2007)、さらに、腐朽径の大きさも推定できることを明らかにした(小林ら 2006)。しかしながら、これら2つの研究は同一の林分で行われた調査結果に基づいており、ここで得られた調査結果が他のカラマツ林でも普遍的に成立するかどうか確かめる必要があった。

本研究では、先の研究(小林ら 2006, 2007)と林齢のほぼ等しい2つのカラマツ林分で新たに応力波の測定を行い、先の調査事例と比較した。さらに、これらの調査結果をまとめて、カラマツの立木腐朽を応力波伝播速度から診断する方法に新たな知見を加えることを試みた。

II. 試験地と調査方法

九州大学試験地

北海道足寄町にある、九州大学農学部附属演習林北海道演習林 27 林班の 51 年生カラマツ林を調査対象とした。このカラマツ林は標高 262~364 m, 平均斜度 28°の南向き斜面に位置している。調査木は 2006 年春に主伐予定の 1,130 個体の中から 147 個体を選んだ。調査木は斜面上部から下部まで、直径に偏りが生じないように選んだ。

2005 年 5 月と 7 月および 8 月に、マイクロ・セカンドタイマー(FAKOPP Enterprise, ハンガリー)を用いて調査木の樹幹直径方向の応力波伝播時間を立木の状態で

測定した。この測定は地上高 30~40 cm の地際部で行い、伐採後の伐根断面と可能な限り一致するようにした。センサーピンを外樹皮の亀裂部から木部に 1 cm 程度の深さに差し込み、安定させた。測定方向は、斜面の最大傾斜方向に対して直角の 1 方向のみとした。測定値には 3 回~5 回の平均値を用いた。測定後、応力波伝播時間測定部位の直径を輪尺で樹皮厚を込みにして測定した。樹幹直径を応力波伝播時間で除して、樹幹直径方向の応力波伝播速度を求めた。なお、応力波伝播速度を求める際には、直径が 0 cm の時の伝播時間が 0 秒になるよう時間補正を施した。立木伐採後の 2006 年 6 月に伐根の断面を観察して、腐朽の有無を確認した。この際、腐朽の見られた個体については、腐朽径を測定した。腐朽径は応力波と同様に、斜面の最大傾斜方向に対して直角方向で測定した。樹幹断面の腐朽径を伐根直径で除して直径腐朽率を求めた。

信州大学試験地

長野県南牧村にある、信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター野辺山ステーション 3 林班の 53 年生カラマツ林を調査対象とした。このカラマツ林は標高 1,365 m, 平均斜度 10°の南向き斜面に位置している。2005 年に行われた腐朽個体の調査では、この林分のおよそ 3 割の個体に心材部の腐朽が見られた(小川ら 2006, 2007)。

調査地に 0.14 ha のプロットを設け、プロット内の全ての個体について腐朽の有無を立木状態で調べた。腐朽の有無は電動ドリルを用いて立木の地上高 30~40 cm の地際部に直径 10 mm, 長さ 20 cm の穴を 4~8 方位放射方向に開け、そのとき得られた木屑を観察して判定した。2006 年 11 月と 12 月に、マイクロ・セカンドタイマーを用いてカラマツの樹幹直径方向の応力波伝播時間を立木状態で測定した。測定はドリルで開けた穴の直上で行い、腐朽判定を行った箇所と応力波の測定箇所がなるべく一致するようにした。応力波伝播時間の測定は、九州大学試験地と同じ方法で行った。

2006 年 12 月にプロットの中から腐朽木を 5 個体選んで地上高 30 cm の地際部で伐倒した。伐倒後、樹幹を地際部から 25 cm または 50 cm の間隔で腐朽が見られなくなるまで玉切りし、木口面の直径と腐朽径および応力波伝播時間を測定した。なお、木口面の直径と腐朽径、および応力波伝播時間は樹幹断面の長径 1 方向のみを測定した。

統計解析

樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との直線回帰式に、試験地間で有意差があるかどうか共分散分析により

確認した (スネデカー・コ克蘭 1972)。

III. 結 果

九州大学試験地では調査木 147 個体中, 30 個体 (20%) の伐根に心材部の腐朽が見られた。一方, 信州大学試験地では 152 個体中, 38 個体 (25%) の調査木に心材部の腐朽が見られた。

図-1 に, 樹幹断面の直径と応力波伝播時間との関係を示した。樹幹断面の直径は, 九州大学試験地では 19.6~59.7 cm の範囲にあり, 信州大学試験地では 13.2~41.0 cm の範囲にあった。応力波の伝播時間は樹幹断面の直径が大きくなるにつれて増加し, 健全木においては両者の間に高い正の相関が認められた (九州大学試験地: $r=0.888$, 信州大学試験地: $r=0.922$)。腐朽木の応力波伝播時間は, 同じ直径の健全木よりも長い時間を示す傾向が見られた。腐朽木においても樹幹断面の直径と応力波伝播時間との間に有意な正の相関が認められたが, 相関係数は健全木よりも低かった (九州大学試験地: $r=0.638$, 信州大学試験地: $r=0.720$)。

樹幹断面の直径を応力波伝播時間で除して, 応力波伝播速度を求めた。図-2 に, 健全木と腐朽木の応力波伝播速度のヒストグラムを示した。健全木の応力波伝播速度

は九州大学試験地と信州大学試験地で, それぞれ $1.3\sim 2.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ と $1.0\sim 1.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲にあり, それぞれ $1.7\sim 1.8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ と $1.2\sim 1.3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ の階級に中央値を持つ正規分布に近い分布型を示した。健全木の応力波伝播速度の平均値と標準偏差は, 九州大学試験地では 1.76 ± 0.16 , 信州大学試験地では 1.26 ± 0.12 であった。

腐朽木の応力波伝播速度は九州大学試験地では $0.7\sim 1.9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 信州大学試験地では $0.6\sim 1.4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲にあった。腐朽木の応力波伝播速度の平均値と標準偏差は, 九州大学試験地では 1.27 ± 0.34 , 信州大学試験地では 1.03 ± 0.21 であった。

健全木と腐朽木の伝播速度は, 九州大学試験地では $1.3\sim 1.9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 信州大学試験地では $1.0\sim 1.4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ までの範囲で両者が重なり合う階級が見られた。このように健全木と腐朽木が重なり合って分布する階級では, 測定木中に占める腐朽木の割合が応力波伝播速度によって異なることになる。図-3 に応力波伝播速度によって, 腐朽木の割合がどのように変化するか示した。腐朽木の割合は応力波伝播速度が速くなるにしたがって低下する傾向を示した。腐朽木の割合は九州大学試験地では, 応力波伝播速度が $1.3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ より遅い階級では 100% で,

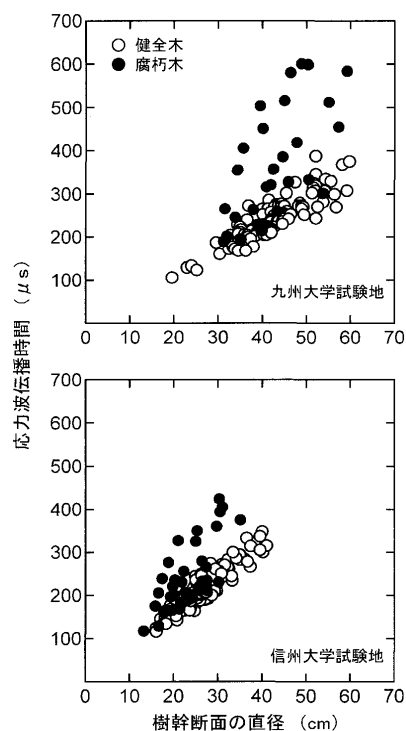


図-1. 地際部における樹幹断面の直径と応力波伝播時間との関係

Fig. 1. Relationship between trunk diameter at ground height and transit time of the stress-wave.

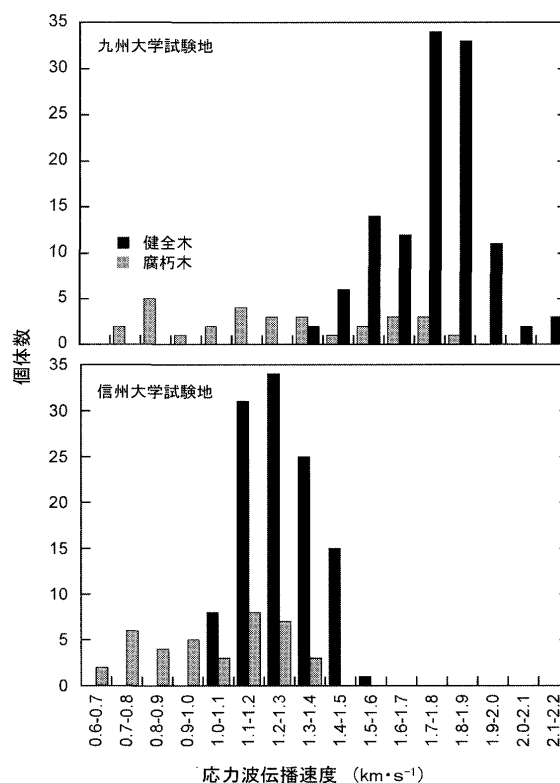


図-2. 健全木と腐朽木の応力波伝播速度のヒストグラム

Fig. 2. Numbers of sound (black bar) and decayed (gray bar) trees with changing stress-wave velocity.

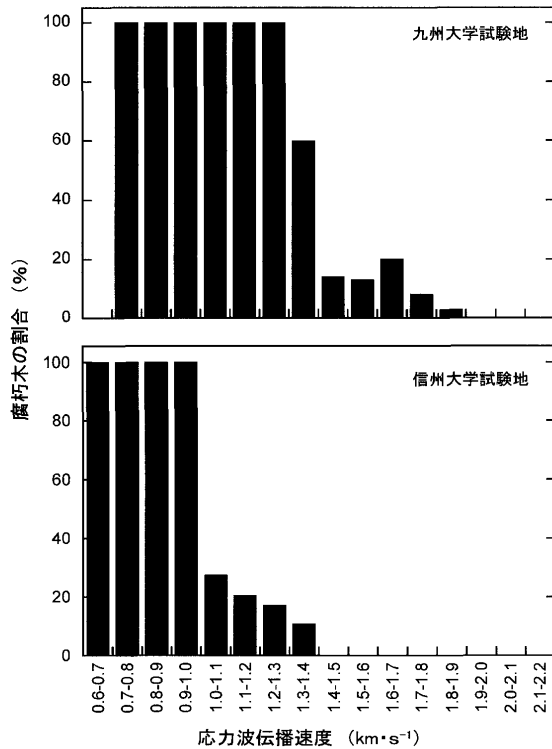


図-3. 応力波伝播速度と腐朽木の割合

Fig. 3. Decrease in the percentage of decayed trees with increasing stress-wave velocity.

1.3~1.4 km·s⁻¹の階級では60%まで低下した。応力波伝播速度が1.4 km·s⁻¹より速い階級では、腐朽木の割合は20%以下であった。一方、信州大学試験地では応力波伝播速度が1.0 km·s⁻¹より遅い階級では100%で、応力波伝播速度が1.0 km·s⁻¹より速い階級では、腐朽木の割合は30%以下であった。

図-4と5に、樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との関係を示した。九州大学と信州大学の両試験地において、応力波の伝播速度は樹幹の直径腐朽率が増加するにしたがって低下した。両者の関係を直線式で近似したところ、次式を得た。九州大学試験地： $y = -0.015x + 1.79$, $r = 0.857$ 。信州大学試験地： $y = -0.011x + 1.36$, $r = 0.936$ 。両試験地の直線回帰式の傾きに有意差は認められなかったが(共分散分析, $p = 0.065$)、 y -切片は九州大学試験地が信州大学試験地より有意に高い値を示した($p < 0.001$)。

IV. 考 察

健全木の応力波伝播速度

九州大学試験地と信州大学試験地における健全木の応力波伝播速度の平均値は、それぞれ1.76 km·s⁻¹と1.26 km·s⁻¹であった(図-2)。本研究とほぼ林齢の等しい

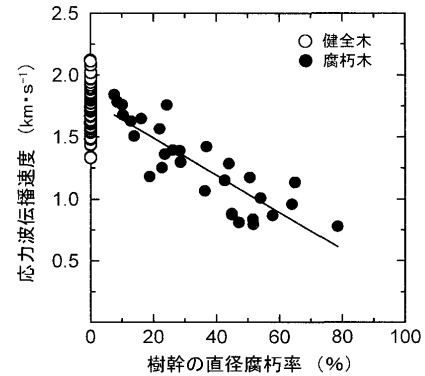


図-4. 九州大学試験地における樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との関係

九州大学試験地における樹幹の直径腐朽率は、伐根断面の腐朽径を伐根直径で除した値で表した。図中の直線は一次回帰式を表す($y = -0.015x + 1.79$, $r = 0.857$)。健全木は回帰から除外した。

Fig. 4. Relationship between the percentage of the decayed portion along the diameter of the trunk and stress-wave velocity, in the research forest of Kyushu University.

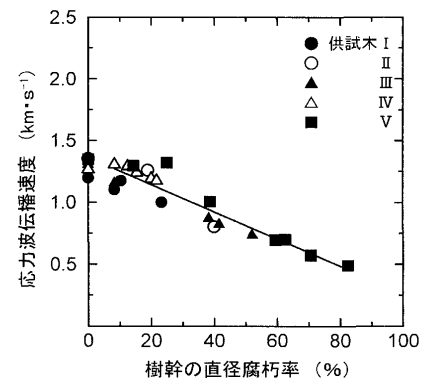


図-5. 信州大学試験地における樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との関係

信州大学試験地における樹幹の直径腐朽率は、腐朽木5個体の樹幹の任意の高さにおける腐朽径をその高さの樹幹直径で除した値で表した。図中の直線は一次回帰式を表す($y = -0.011x + 1.36$, $r = 0.936$)。腐朽が認められなかった樹幹断面は回帰から除外した。

Fig. 5. Relationship between the percentage of the decayed portion along the diameter of the trunk and stress-wave velocity, in the research forest of Shinshu University.

九州大学試験地の別のカラマツ林において、健全木の応力波伝播速度の平均値は1.86 km·s⁻¹であった(小林ら2006)。本研究の九州大学試験地の応力波伝播速度はこの値と近かったが、信州大学試験地の応力波伝播速度より1.4倍高い値を示した。これまでに報告されているカラマツの樹幹直径方向の応力波伝播速度はおよそ0.7~

1.5 km・s⁻¹の範囲にあり (Yamaguchi *et al.* 2001, 小岩 2003), 信州大学試験地の値はこの範囲内に収まっているが, 九州大学試験地の値はこれらより高い。一般に, 応力波伝播速度は材の温度, 密度, 組織構造や繊維飽和点以下の含水率に影響されるといわれているが, 立木状態の含水率は通常繊維飽和点以上であり, また温度の影響も1度の温度上昇に対し3 m・s⁻¹の減少とごく僅かである (伏谷ら 1989)。したがって, 今後, 九州大学試験地の応力波伝播速度がなぜ高い値を示したのか材の密度や組織構造を中心に調べる必要がある。

腐朽木の応力波伝播速度

筆者らの先の研究では, 腐朽木の応力波伝播速度のヒストグラムは健全木で最も速い階級を除くすべての階級で健全木と重なり合って分布していた (小林ら 2007)。本研究においても, 腐朽木の応力波伝播速度は健全木と重なり合って分布していたが, 重なり合う範囲は先の研究と比べると狭かった (図-2, 3)。筆者らの先の研究のカラマツ林では, 林分全体のおよそ6割の個体に心材部の腐朽が見られた (Kobayashi *et al.* 2004)。これに対し, 本研究のカラマツ林の腐朽木の割合は2~3割と低かった。このように, 腐朽木の割合の多い林分ほど健全木と腐朽木の応力波伝播速度が広い範囲で重なり合って分布する現象は, 心材腐朽の被害発生がある特定の応力波伝播速度の健全木に集中しておきけるのではなく, すべての健全木にランダムにおきている可能性を示していると考えられる。

健全木の応力波伝播速度のヒストグラムは, 九州大学と信州大学の両試験地において正規分布型を示した (図-2)。筆者らは先の研究においても, 健全木の応力波伝播速度のヒストグラムは正規分布することを報告している (小林ら 2007)。一方, 腐朽木の応力波伝播速度は健全木より低い範囲に偏って分布していた。このことが原因として, 九州大学と信州大学の両試験地において, 林分全体の応力波伝播速度の分布型は左側に裾広がりJ字型の分布型を示した。このように腐朽木を含んだ林分の応力波伝播速度がJ字型の分布型を示す現象は, 筆者らの先の報告でも示されており (小林ら 2007), 心材腐朽の進行したカラマツ林の大きな特徴であるといえる。

樹幹の直径腐朽率

応力波の伝播速度は, 樹幹の直径腐朽率が増加するにしたがって直線的に低下した (図-4, 5)。本研究では, 樹幹の直径腐朽率の調べ方が九州大学試験地と信州大学試験地で異なっている。すなわち, 九州大学試験地では立木伐採後の伐根断面で調べているのに対し, 信州大学試験地では腐朽木の樹幹を玉切りして調べている。この

ように, 比較している樹幹部での腐朽位置が異なるにも関わらず, 樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との直線回帰式の傾きには九州大学試験地と信州大学試験地で有意差は認められなかった (九州大学試験地: -0.015, 信州大学試験地: -0.011)。筆者らの先の研究では, 立木伐採後の伐根断面で調べた直線回帰式の傾きは-0.012であったが (小林ら 2006), この値は本研究で得られた値の範囲内にあった。これらの結果は, 樹幹部のいずれの位置においても応力波伝播速度は樹幹の直径腐朽率が大きくなった分, 同じ速度が低下することを意味している。

樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との直線回帰式のy-切片は樹幹の直径腐朽率が0%の時の応力波伝播速度, すなわち健全木の応力波伝播速度を表している。九州大学試験地においては直線回帰式のy-切片は1.79で, 健全木の応力波伝播速度の平均値1.76とほぼ一致していた (図-4)。信州大学試験地においても, 直線回帰式のy-切片と健全木の応力波伝播速度の平均値は, それぞれ1.36と1.26で, 概ね一致していた (図-5)。直線回帰式のy-切片が健全木の応力波伝播速度の平均値と一致する現象は筆者らの先の報告 (小林ら 2006) でも示されている (y-切片: 1.89, 平均値: 1.86)。

応力波伝播速度による腐朽診断

カラマツ林においては, 健全木の応力波伝播速度のヒストグラムは正規分布すること, また, 腐朽木の応力波伝播速度は健全木より低い範囲に偏って分布し, その結果, 腐朽木を含んだ林分では応力波伝播速度の分布型は左側に裾広がりJ字型の分布型を示すことを明らかにした。応力波伝播速度は樹幹の直径腐朽率が大きくなるほど低下する。したがって, 立木腐朽が進行した林分ほど応力波伝播速度の分布型は左側に裾広がりに伸長してゆくことになる。このことから, 応力波伝播速度のヒストグラムの分布型は腐朽木の進展を林分レベルで診断する上での有効な指標になると考えられる。さらに本研究では, 樹幹の直径腐朽率と応力波伝播速度との直線回帰式の傾きは, 樹幹の直径腐朽率を立木伐採後の伐根断面で調べた場合と腐朽木の樹幹を玉切りして調べた場合とでは変わらず, -0.011~-0.015程度の値を示すこと, また, 直線回帰式のy-切片は健全木の応力波伝播速度と一致することを明らかにした。本研究で得られたこれらの結果は, 応力波測定によるカラマツの立木腐朽診断を行う上で, 有効な知見になると考えられる。

謝 辞

信州大学農学部の久馬 忠教授には, 同附属アルプス

圏フィールド科学教育研究センター野辺山ステーションを利用するにあたって数多くの便宜を図っていただいた。九州大学演習林技術職員の山内康平氏、長慶一郎氏、大崎 繁氏、鍛冶清弘氏ならび信州大学森林科学科学生(当時)の野村遼介氏、縦山友里絵氏、小川憲子氏には野外調査を手伝っていただいた。また、九州大学附属宮崎演習林の内海泰弘助教には、本論文をまとめるにあたって適切な助言をいただいた。信州大学農学部の(故)川崎圭造教授にはカラマツの心材腐朽についてご教示いただいた。ここに厚く御礼申し上げます。なお、本研究の一部は九州大学教育研究プログラム・研究拠点形成プロジェクト(B)「立木の非破壊的品質評価技術の開発にむけた基礎的研究」(平成16年度~17年度、代表:古賀信也)の助成を受けて行われた。

引用文献

- 阿部恭久(1999) 樹木の腐朽病害。(樹木医学. 鈴木和夫編, 朝倉書店, 東京). 228-244.
- 青島清雄・林 康夫(1962) カラマツの心腐れ病菌について. 日林講 **72**: 308-309.
- 伏谷賢美・木方洋二・岡野 健・佐道 健・竹村富男・則元京・有馬孝禮・堤 壽一・平井信之(1989) 木材の物理. 275 pp., 文永堂出版, 東京.
- 飯塚徳義(1956) γ -線による生立木(トドマツ)の内部腐朽鑑定法に関する研究. 東大演報 **52**: 143-163.
- 川崎圭造・鈴木直人(1992) カラマツの心腐れ病—内視鏡による生立木の罹病判定—. 日林中支論 **40**: 231-232.
- Kobayashi, H., Kaji, K., Osaki, S., Koga, S. and Okano, T. (2004) Butt rot in twenty to fifty years old *Larix kaempferi* stands at the Hokkaido Branch of Kyushu University Forests. IUFRO International Symposium "Larix 2004" Final Program and Abstract, p. 59.
- 小林 元・古賀信也・田代直明・大崎 繁・山内康平・鍛冶清弘・内海泰弘・岡野哲郎(2006) 応力波測定によるカラマツ生立木の非破壊腐朽診断—腐朽径の推定—. 中森研 **54**: 55-56.
- 小林 元・古賀信也・田代直明・大崎 繁・山内康平・鍛冶清弘・内海泰弘・岡野哲郎(2007) カラマツ生立木の非破壊腐朽診断—応力波測定法と打診法の比較—. 樹木医学研究 **11**: 9-12.
- 小岩俊行(2002) カラマツ根株心腐病菌の侵入口. 日林誌 **84**: 9-15.
- 小岩俊行(2003) カラマツ生立木における応力波伝播速度に影響する要因と根株心腐病の影響. 日林学術講 **114**: 760.
- 黒田吉雄・勝屋敬三(1982) シゴメータによるカラマツの根株心腐れの診断に関する基礎資料(I). 筑波大演報 **1**: 17-20.
- 黒田吉雄・勝屋敬三(1987) ポアスコープによるカラマツ根株心腐れ病の診断. 筑波大演報 **3**: 83-87.
- 黒田吉雄・大沢正嗣・勝屋敬三(1988) X線診断装置(コンピュータ断層撮影)によるカラマツ樹幹内の根株心腐病の調査. 日林論 **99**: 545-546.
- 永石憲道・神庭正則・笠松滋久・渡辺直明(1997) 音速測定を用いた樹木内部欠陥診断. 樹木医学研究 **1**: 35-42.
- 小川憲子・岡野哲郎・川崎圭造(2006) 野辺山のカラマツ心腐れ病の罹病率および分布様式. 中森研 **54**: 25-26.
- 小川憲子・岡野哲郎・川崎圭造(2007) 野辺山ステーションにおけるカラマツ心腐病の発生と腐朽量推定方法の検討. 信大 AFC 報 **5**: 35-41.
- 佐野 真・石橋 聡・山口岳広(1998) 樹幹内部の形質の非破壊測定を試み. 北方林業 **50**: 101-104.
- スネデカー・コ克蘭(1972) 共分散分析.(統計的方法原書第6版. 畑村又好・奥野忠一・津村善郎訳, 岩波書店, 東京). 394-416.
- 鈴木和夫・吉田成章・堂園安生・橋本平一・小林享夫(1984) スギ生立木の変色・腐朽, 特に材の電気抵抗値と検出された菌類. 林試研報 **328**: 107-117.
- Yamaguchi, T., Sasaki, K. and Sakamoto, Y. (2001) Evaluation of a stress-wave timer for the minimally destructive detection of decay in living trees in northern-Japanese forests. J. For. Res. **6**: 117-120.