

超音波による立木の材質測定と立木材質マップの作成

中 村 昇*

Measurement of the Properties of Standing Trees with Ultrasonics and Mapping of the Properties

Noboru NAKAMURA*

1. はじめに

筆者らは、打撃法による応力波を用いて、スギ立木の材質を測定し、次のようなことを既報¹⁻³⁾で明らかにした。

①いくつかの林分について、応力波の速度を用いて算出された見かけのヤング係数により、材質の差、および林齢の違いによる材質の変化の傾向を確認できる。

②応力波の伝播速度の2乗と各試験体の見かけの密度を用いて算出した見かけのヤング係数との関係について、原点を通る直線で単回帰分析を行った結果、決定係数が高かった。このことにより、それぞれの林分における見かけの密度は、ほぼ一定と見なせることができる。また、それぞれの回帰係数より各林分の見かけの密度が推定できる。

③応力波の伝播速度は、立木の材質に関する新たな指標と考えることができる。

本研究では、打撃法による応力波より周波数が高く、計測が簡便な超音波を用いて立木の材質測定を行い、超音波による立木材質測定の可能性を検討した。また、超音波により測定した立木の材質と成長の指標である胸高直径および樹高との関係について考察した。さらに、このような方法を用いて、限られた林班ではあるが森林内における立木材質マップを作成した。

2. 試験体と試験方法

2.1 試験体

試験体は、トドマツ (*Abies sachalinensis*: 13, 19, 20, 30 年生, 天然林木), カラマツ (*Larix leptolepis*: 24 年生), カラマツ, グイマツ (*Larix gmelinii*) 各 2 個体によるカラマツ相互 2 面交雑家系 (25 年生, 以後カラマツ雑種と呼ぶ) である。トドマツ 19 年生については、北濱内, 標高 230 m から 1,200 m にいたる 8 標高の産地から、20 年生については、さらに 1,250 m を加えた 9 標高の産地から得られた種子を、標高 230 m に播種し植栽したものである。表-1 に概要を示した。

2.2 試験方法

測定に用いた超音波試験器は、SYLVATEST (スイス SANDES SA 製, 周波数 30 kHz) であ

* 東京大学農学部附属演習林北海道演習林
University Forest in Hokkaido, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

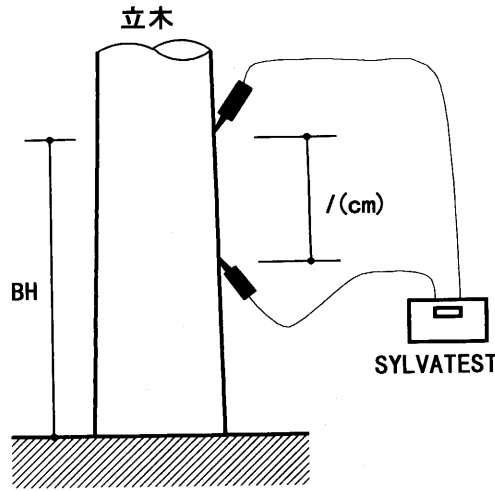


図-1 立木における超音波伝播時間の測定.

Fig. 1. The schematic diagram of measuring the propagating time in standing trees.

注: BH, 胸高; L, スパン; SYLVATEST, 超音波試験器.

m の 1 番玉を用いた。

$$E_F = (2f_1 L)^2 \cdot \rho / g \quad (L \text{ は丸太の長さ})$$

また、立木における見かけのヤング係数 E_U は、次式により算出した。

$$E_U = v_U^2 \cdot \rho / g \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度である。

3. 結果と考察

3.1 見かけのヤング係数

各試験体における見かけのヤング係数 E_U の値を、表-2 に示した。これより以下のことがわかる。

(1) トドマツでは、年生が大きくなるにしたがい、 E_U の値が大きくなる。特に、13年生から19年生の間に急激に大きくなる。これは、次のように考えることができる。(1)式で示したように E_U の値は、超音波伝播速度と密度から算出されるが、表-2 に示したように、超音波伝播速度の値が大きくなっているためである。

(2) カラマツ雑種では、グイマツがからんだ方が E_U の値が大きい。

つまり、超音波による測定においても、打撃法による応力波を用いたスギ立木と同様、冒頭で述べた①と同じことが認められる。丸太のヤング係数 E_F についても、トドマツ 20年生を除いて同様の傾向が認められたことも、このことを裏付けるものである。

3.2 見かけのヤング係数と成長との関係

E_U と成長の指標である DBH および TH と E_U の関係を考察した。すべてのトドマツについ

表-2 超音波伝播速度およびヤング係数

Table 2. Ultrasonic velocities and moduli of elasticity of the standing trees

| 樹種年生 | 標高 (m) および 組合せ | 個数 | 超音波伝播速度 | | | | E_U | | | | E_F | | | |
|-------------------|--------------------------------|-----|---------|------|------|------------|-----------------------|------|-----|------------|-----------------------|------|------|------------|
| | | | 平均 | 最小 | 最大 | COV (%) | 平均 | 最小 | 最大 | COV (%) | 平均 | 最小 | 最大 | COV (%) |
| | | | (km/s) | | | | (tf/cm ²) | | | | (tf/cm ²) | | | |
| トドマツ 13 年生 | | 29 | 2.35 | 1.70 | 4.71 | 27.4 | 55.0 | 30.2 | 150 | 49.4 | 37.6 | 21.2 | 94.5 | 49.1 |
| | 230 | 20 | 3.75 | 2.89 | 3.86 | 10.1 | 120 | 78.4 | 157 | 16.9 | 86.2 | 46.7 | 117 | 22.7 |
| | 340 | 18 | 3.86 | 2.48 | 4.35 | 12.5 | 125 | 56.4 | 159 | 20.5 | 92.3 | 47.6 | 123 | 22.9 |
| トドマツ 19 年生 | 420 | 17 | 3.89 | 3.00 | 4.17 | 7.6 | 119 | 59.0 | 145 | 20.7 | 90.0 | 47.4 | 111 | 20.4 |
| | 530 | 16 | 3.67 | 2.36 | 4.29 | 13.3 | 122 | 50.8 | 146 | 21.2 | 96.8 | 52.2 | 133 | 17.6 |
| 植栽位置 | 750 | 19 | 4.06 | 3.49 | 4.48 | 13.7 | 140 | 102 | 170 | 12.3 | 98.8 | 71.2 | 129 | 15.5 |
| 標高 230m | 940 | 19 | 3.90 | 2.83 | 4.23 | 8.5 | 127 | 73.5 | 150 | 15.2 | 99.0 | 65.0 | 118 | 11.2 |
| | 1100 | 18 | 3.85 | 2.94 | 4.48 | 10.2 | 128 | 81.5 | 162 | 17.0 | 98.1 | 74.7 | 127 | 14.7 |
| | 1200 | 13 | 3.66 | 2.21 | 4.41 | 15.6 | 120 | 64.3 | 172 | 23.0 | 86.3 | 28.8 | 111 | 24.8 |
| 小計 | | 140 | 3.84 | 2.21 | 4.48 | 11.0 | 125 | 50.8 | 172 | 19.0 | 92.6 | 28.8 | 133 | 19.7 |
| | 230 | 13 | 3.96 | 3.74 | 4.12 | 3.31 | 126 | 111 | 153 | 10.7 | 81.4 | 66.2 | 102 | 12.2 |
| | 340 | 15 | 4.03 | 3.67 | 4.35 | 4.70 | 134 | 105 | 167 | 13.1 | 85.1 | 65.9 | 116 | 14.6 |
| トドマツ 20 年生 | 420 | 15 | 4.04 | 3.74 | 4.26 | 4.07 | 131 | 105 | 151 | 10.7 | 80.7 | 61.2 | 98.7 | 14.8 |
| | 530 | 15 | 4.05 | 3.70 | 4.30 | 4.40 | 130 | 112 | 152 | 8.4 | 77.0 | 64.3 | 93.1 | 10.8 |
| 植栽位置 | 750 | 10 | 3.97 | 3.60 | 4.12 | 3.70 | 131 | 113 | 157 | 9.4 | 73.9 | 55.8 | 90.5 | 14.5 |
| 展示樹木園 | 940 | 15 | 3.92 | 3.51 | 4.21 | 4.11 | 131 | 115 | 155 | 8.8 | 77.0 | 66.9 | 93.1 | 9.6 |
| (標高 230m) | 1100 | 15 | 3.72 | 3.45 | 4.00 | 4.76 | 120 | 92.6 | 139 | 10.9 | 66.8 | 44.9 | 89.5 | 13.6 |
| | 1200 | 15 | 3.57 | 2.90 | 3.85 | 6.21 | 112 | 83.4 | 135 | 11.1 | 63.9 | 50.3 | 85.3 | 17.5 |
| | 1250 | 5 | 3.56 | 2.90 | 4.65 | 16.53 | 99.8 | 82.8 | 111 | 13.6 | 55.2 | 45.3 | 63.3 | 11.6 |
| 小計 | | 118 | 3.89 | 2.90 | 4.65 | 7.01 | 126 | 82.8 | 167 | 12.7 | 74.8 | 44.9 | 116 | 17.2 |
| トドマツ 30 年生 | | 34 | 4.34 | 3.74 | 4.76 | 5.4 | 148 | 97.2 | 188 | 13.1 | 82.0 | 64.5 | 97.9 | 9.4 |
| トドマツ天然林木 | | 28 | 4.36 | 3.88 | 4.82 | 5.6 | 151 | 109 | 200 | 14.1 | 92.8 | 59.9 | 120 | 13.2 |
| トドマツすべて | | 349 | 3.81 | 1.70 | 4.82 | 16.3 | 123 | 30.2 | 200 | 25.4 | 80.8 | 21.2 | 133 | 27.1 |
| カラマツ雑種 (25 年生) | L·L | 52 | 4.55 | 3.67 | 4.94 | 5.9 | 139 | 82.5 | 181 | 15.1 | 79.3 | 45.1 | 102 | 16.5 |
| | L·G _s | 138 | 4.81 | 3.67 | 5.26 | 4.6 | 174 | 81.8 | 217 | 12.8 | 106 | 45.4 | 133 | 13.6 |
| | G _s ·G _s | 37 | 4.68 | 3.77 | 5.19 | 7.3 | 184 | 114 | 238 | 15.6 | 105 | 81.1 | 135 | 14.1 |
| 小計 | | 227 | 4.73 | 3.67 | 5.26 | 5.9 | 168 | 81.8 | 238 | 16.8 | 100 | 45.1 | 135 | 18.1 |
| カラマツ 24 年生 | | 28 | 4.21 | 3.48 | 4.82 | 7.9 | 132 | 78.1 | 181 | 19.2 | 66.0 | 42.1 | 90.0 | 19.9 |

注: COV, 変動係数; L, カラマツ; G_s, グイマツ; ・, 正逆組合せ両方を表す;
E_U, 超音波伝播速度による見かけのヤング係数; E_F, 打撃音によるヤング係数.

て, DBH および TH と E_U の関係をそれぞれ図-2, 図-3 に示した。同様に, カラマツ雑種について DBH および TH と E_U の関係をそれぞれ図-4, 図-5 に示した。これより以下のことがわかる。

(3) トドマツ全体については DBH や TH が大きくなると, E_U の値も大きくなる傾向が認められるが, カラマツ雑種全体では認められない。

(4) それぞれの年生について見ると, トドマツ 13, 19 および 20 年生では同様の傾向が認められるが, 30 年生については逆に DBH や TH が大きくなると, E_U の値は小さくなる傾向が認められる。一方, カラマツ雑種では, いずれの組合せにおいても, ほぼ同様の傾向が認められる。

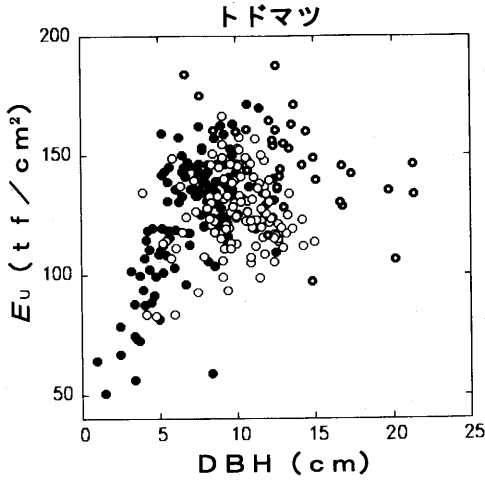


図-2 胸高直径と見かけのヤング係数との関係。

Fig. 2. The relationships between diameters at breast height and MOE calculated from the velocities of ultrasonics.

注: DBH, 胸高直径; E_u , 超音波伝播速度から求められる見かけのヤング係数; ●, 19 年生; ○, 20 年生; ◎, 30 年生。

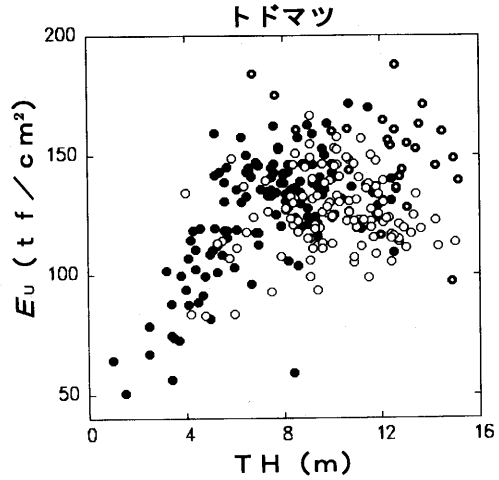


図-3 樹高と見かけのヤング係数との関係。

Fig. 3. The relationships between tree heights and MOE calculated from the velocities of ultrasonics.

注: TH, 樹高; E_u , 超音波伝播速度から求められる見かけのヤング係数; ●, 19 年生; ○, 20 年生; ◎, 30 年生。

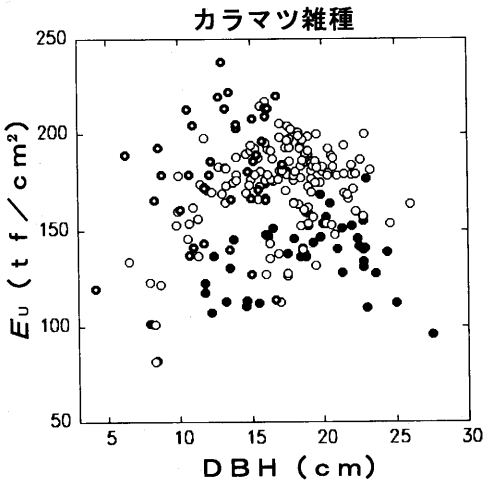


図-4 胸高直径と見かけのヤング係数との関係。

Fig. 4. The relationships between diameters at breast height and MOE calculated from the velocities of ultrasonics.

注: DBH, 胸高直径; E_u , 超音波伝播速度から求められる見かけのヤング係数; ●, L·L; ○, $G_s \cdot L$; ◎, $G_s \cdot G_s$; L, カラマツ; G_s , グイマツ; ・, 正逆組合せ両方。

以上のことは、DBH および TH と E_u の関係でも同様であった。このような傾向は、2~5 年生の苗木における地際直径および苗木高と静的なヤング係数との関係⁴⁾とは異なっており、年生が増すにつれて傾向が変わってくるのかどうかは、現在のところ定かではない。

このように樹種により、また年生により異なった傾向が見られるため、 E_u と成長との関係を明

らかにするには、今後のデータの蓄積が必要である。

3.3 見かけの密度

例としてすべてのトドマツについて、 v_U の 2 乗と E_U の関係を図-6 に表した。この図には、原点を通る単回帰分析を行った結果得られた回帰直線 $y=ax$ (a は回帰係数) も併せて示してある。このときの決定係数 r^2 の値がかなり高いことから、 v_U^2 と E_U は比例関係に近いと判断でき、試験地の立木の密度はほぼ一定とみなしてよいことがわかる。さらに、この回帰直線と (1) 式を比較すれば、回帰係数 a から見かけの密度の推定値 ρ_c を換算することができる。同様の検討を他の試験体についても行った。結果を表-3 に示した。これより、いずれの試験体についても r^2 の値は比

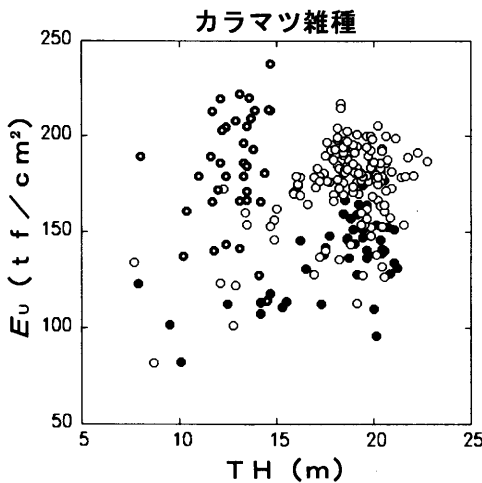


図-5 樹高と見かけのヤング係数との関係。

Fig. 5. The relationships between tree heights and MOE calculated from the velocities of ultrasonics.

注: TH, 樹高; E_U , 超音波伝播速度から求められる見かけのヤング係数; ●, L・L; ○, G_s ・L; ◎, G_s ・ G_s ; L, カラマツ; G_s , グイマツ; ・, 正逆組合せ両方。

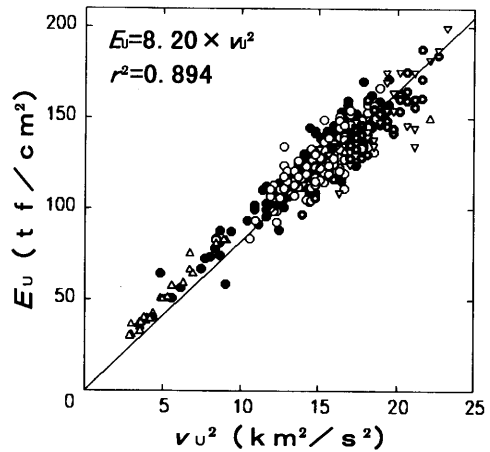


図-6 超音波伝播速度の 2 乗と見かけのヤング係数との関係。

Fig. 6. The relationships between the squares of ultrasonic velocities and MOE calculated from those values.

注: v^2 , 超音波伝播速度の 2 乗; E_U , 超音波伝播速度から求められる見かけのヤング係数; ●, 19 年生; ○, 20 年生; ◎, 30 年生; △, 13 年生; ▽, 天然林木; r^2 , 決定係数。

表-3 単回帰分析の結果

Table 3. Results of linear regression

| | トドマツ | | | | | 全体 | カラマツ雑種 (25 年生) | | | | カラマツ 24 年生 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------|---------------|-------|------------|
| | 13 年生 | 19 年生 | 20 年生 | 30 年生 | 天然林木 | | L・L | L・ G_s | G_s ・ G_s | 全体 | |
| a | 8.25 | 8.37 | 0.25 | 7.84 | 7.87 | 8.20 | 6.72 | 7.51 | 8.38 | 7.57 | 7.46 |
| r^2 | 0.953 | 0.768 | 0.656 | 0.812 | 0.579 | 0.894 | 0.794 | 0.624 | 0.851 | 0.531 | 0.899 |
| ρ_c | 0.809 | 0.820 | 0.809 | 0.768 | 0.771 | 0.804 | 0.659 | 0.736 | 0.821 | 0.742 | 0.731 |

注: a , 回帰係数; r^2 , 決定係数; ρ_c , 推定密度。

較的高く、見かけの密度はほぼ一定とみなすことができる。したがって、超音波による測定においても、打撃法による応力波を用いたスギ立木と同様、冒頭で述べた②と同じことが認められる。

3.4 超音波伝播速度

各試験体について、 v_U の値を表-2に示した。 E_U と同様の傾向が伺える。したがって、超音波による測定においても、応力波を用いたスギ立木と同様、冒頭で述べた③と同じことが認められる。

3.5 打撃法による応力波伝播速度と超音波伝播速度との比較

スギ立木に関し、打撃法による応力波伝播速度 v_s より算出した見かけのヤング係数 E_s の値と、トドマツ、カラマツ立木における超音波伝播速度より算出した見かけのヤング係数 E_U の値を比較したところ、 E_U の方が大きいことがわかった。この理由として、スギ立木とトドマツ、カラマツ立木の密度について大きな差異が認められないことから、 v_s より v_U の方が大きいことが挙げられる。 v_U が v_s より大きいのは、超音波の方が周波数が高いこと⁹⁾、また直進性を有することなどが考えられる。しかし、スギ立木の E_s およびトドマツ、カラマツ立木の E_U の値の傾向が、スギ、トドマツ、カラマツ丸太の E_F の分布と同様の傾向を示していることから、 E_F の大きな試験体では v_U も大きくなり、したがって E_U の値も大きく表れると考えられる。

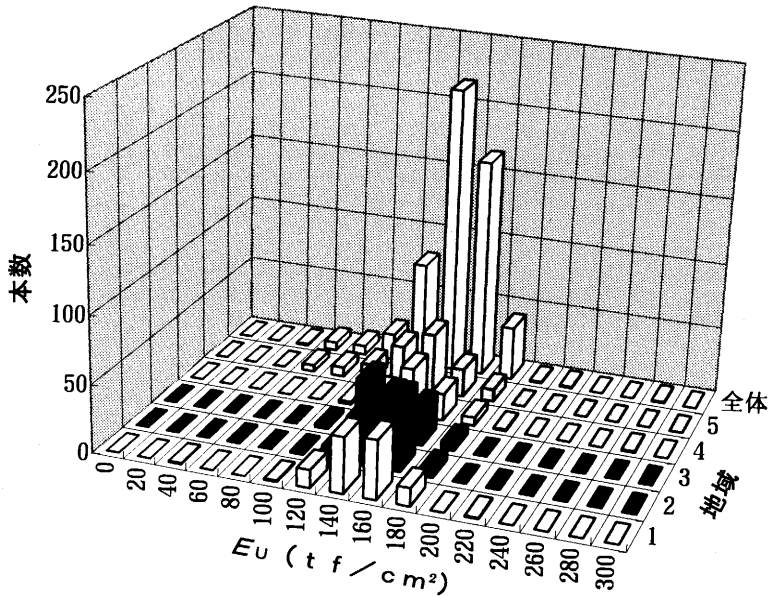


図-7 東京大学北海道演習林 84 林班 A 小班における立木材質マップ。

Fig. 7. MOE distributions of standing trees at subcompartment A in component 84, The Tokyo University Forest in Hokkaido.

注：地域番号は図-9を参照，横軸の数字は，例えば 20 は E_U の値が 20-40 (tf/cm²) の範囲に入っていることを表す。

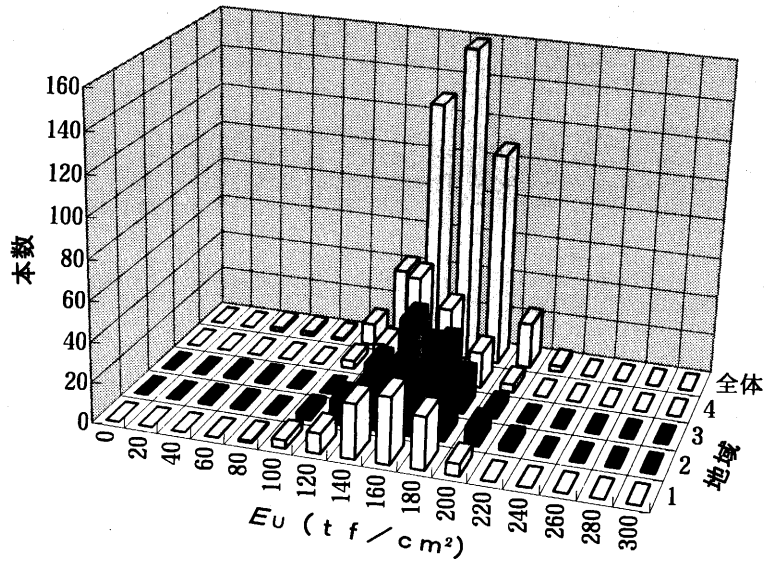


図-8 東京大学北海道演習林 43 林班 A 小班における立木材質マップ。

Fig. 8. MOE distributions of standing trees at subcompartment A in component 48, The Tokyo University Forest in Hokkaido.

注：地域番号は図-10を参照，横軸の数字は，例えば20は E_U の値が20-40 (tf/cm²)の範囲に入っていることを表す。

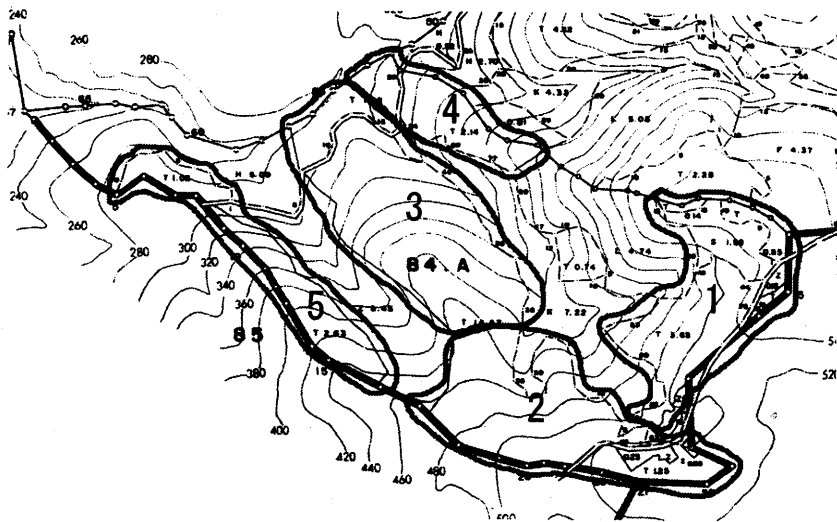


図-9 東京大学北海道演習林 84 林班 A 小班における地域区分。

Fig. 9. Division of subcompartment A in compartment 84, The Tokyo University Forest in Hokkaido.

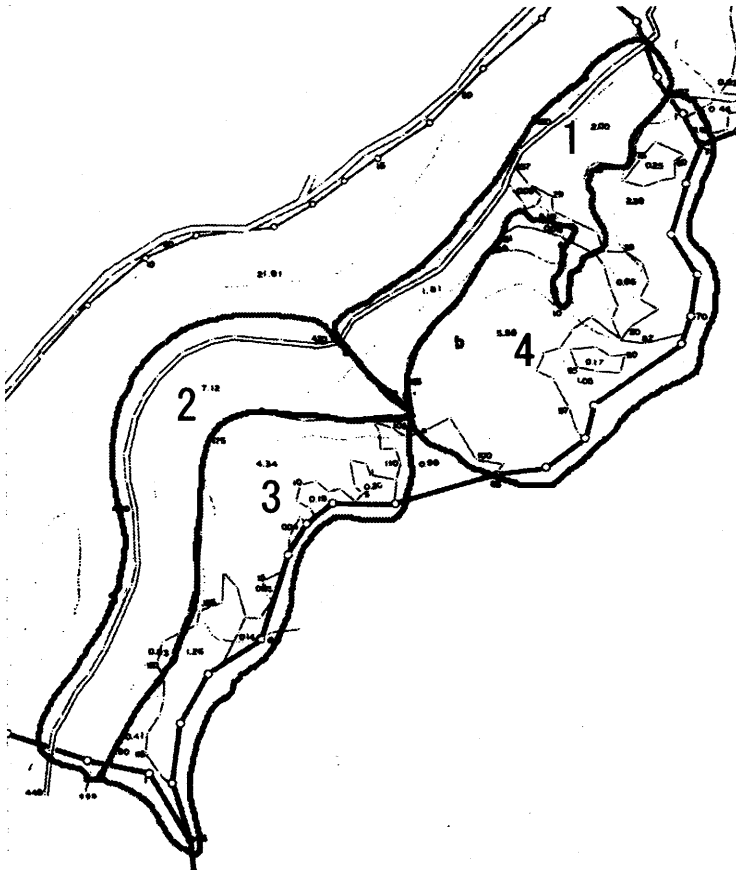


図-10 東京大学北海道演習林 43 林班 A 小班における地域区分.

Fig. 10. Division of subcompartment A in compartment 43, The Tokyo University Forest in Hokkaido.

3.6 立木材質マップの作成

3.3 で得られた推定密度を用いて、森林内における立木のヤング係数の分布を得ることができる。例として、東京大学北海道演習林 84 林班 A 小班および 43 林班 A 小班におけるトドマツ立木のヤング係数の分布を図-7 および図-8 に示した。また各林小班における地域区分を図-9 および図-10 に示した。これより、たとえば、84 林班 A 小班においては、5 番の地域においてヤング係数の小さな立木が存在していること、43 林班 A 小班では 2 番の地域にヤング係数の大きな立木が存在していることなどがわかる。

このように、森林内におけるヤング係数についての材質マップが作成できれば、伐採や素材生産、さらには製品を製造する上で重要な情報になると考えられる。

4. ま と め

トドマツ、カラマツ立木に関し、超音波により材質測定を行ってきた結果、以下のことが明ら

かになった。

(1) スギ立木に関し、打撃法による応力波を用いた測定と同様、冒頭で述べた①～③と同じことが認められた。

(2) カラマツ雑種においては、立木の状態で見かけのヤング係数について、家系間の差異が認められた。

(3) 見かけのヤング係数と成長の指標である胸高直径、樹高との間の関係については、今後のデータの蓄積が必要である。

(4) 森林内における立木の材質マップを得ることができ、地形等の環境と材質の関係を調べる上で、また素材生産を行う上で、有力な情報となると考えられる。

謝 辞

試験体の採材および測定にあたり、たくさんの職員の方々にお世話になりました。ここに深く感謝いたします。

要 旨

トドマツ、カラマツ立木に関し、超音波により材質測定を行ってきた結果、以下のことが明らかになった。

(1) いくつかの林分について、超音波伝播速度を用いて算出された見かけのヤング係数により、材質の差、および林齢の違いによる材質の変化の傾向が確認された。

(2) 超音波伝播速度の2乗と各試験体の見かけの密度を用いて算出した見かけのヤング係数との関係について、原点を通る直線で単回帰分析を行った結果、決定係数が高かった。このことにより、それぞれの林分における見かけの密度は、ほぼ一定と見なせることができた。また、それぞれの回帰係数より各林分の見かけの密度が推定できた。

(3) 超音波伝播速度は、立木の材質に関する新たな指標と考えることができた。

すなわち、超音波の伝播速度を用いても、スギ立木に関し、打撃法による応力波を用いた、我々の既報の測定と等価な結果が得られることが判明した。

(4) カラマツ雑種においては、立木の状態で見かけのヤング係数について、家系間の差異が認められた。

(5) 見かけのヤング係数と成長の指標である胸高直径、樹高との間の関係については、今後のデータの蓄積が必要である。

(6) 今回の方法を用いれば、森林内における立木の材質マップを得ることができ、地形等の環境と材質の関係を調べる上で、また素材生産を行う上で、有力な情報となると考えられる。

キーワード：超音波、超音波伝播速度、立木、ヤング係数、立木材質マップ

参 考 文 献

- 1) 名波直道ほか3名：応力波による立木の材質測定（第1報）、木材学会誌、38, 739-746, 1992.
- 2) 名波直道ほか3名：応力波による立木の材質測定（第2報）、木材学会誌、38, 747-752, 1992.
- 3) 名波直道ほか3名：応力波による立木の材質測定（第3報）、木材学会誌、39, 903-909, 1993.
- 4) 中村 昇・小泉章夫：平成7年度科学研究費補助金研究成果報告書、p. 1-39, 1996.

- 5) 中村 昇・名波直道: スギ材の放湿過程における音波の速度とヤング係数, 木材学会誌, 39, 1341-1348, 1993.

(1996年3月28日受付)

(1996年7月19日受理)

Summary

The MOE (Modulus of Elasticity) of standing trees was measured with ultrasonics. The species were Todo-fir (*Abies sachalinensis*) and Larch (*Larix leptolepis*). The results are summarized as follows:

(1) There were differences between the values of the MOE for certain forest stands at different locations and of different ages.

(2) A simple linear regression line between the squares of the propagation velocities (v) of ultrasonics and the MOE which passes the origin produced a relatively large coefficient determination for each forest stand. Thus the density, calculated from the regression coefficient, for each forest stand could be estimated as a constant value.

(3) A similar trend for the MOE was obtained from the velocity v of ultrasonics. Thus, v could be used instead of the MOE as an index for the properties of standing trees.

The same results were obtained for standing Sugi (*Cryptomeria japonica*) where stress waves produced by the hitting method were used, as reported in a previous paper.

(4) Differences in the MOE were recognized between families in hybrid larch.

(5) More data are needed to clarify the relationships between the diameters at breast height, tree heights and the MOE.

(6) Maps of the MOE for standing trees in forest stands could be made by means of the estimated density. Such maps could provide very useful information for bucking and timber production.

Key words: Ultrasonics, Velocities of ultrasonics, Standing trees, Modulus of Elasticity, Property maps of standing trees

Hormonal Responses of Petioles and Embryos in *Ginkgo biloba* Cultures

Hiroki INOUE, Seiji SATO, Shigehiro KAMODA,
Tamami TERADA and Yoshimasa SABURI

Hormonal responses of petioles, embryos and green calli induced from these explants in *Ginkgo biloba* cultures were investigated. Addition of 2,4-D or NAA caused green callus formation under illumination from both explants. These calli were able to be subcultured on the same medium. Addition of IAA or IBA alone promoted immature germination of excised embryos. Mature embryos germinated on hormone-free medium. Induced calli did not redifferentiate by combining of growth regulators or modifying the mineral salt in the media.

Measurement of the Properties of Standing Trees with Ultrasonics and Mapping of the Properties

Noboru NAKAMURA

The MOE (Modulus of Elasticity) of standing trees was measured with ultrasonics. The species for the experiment were Todo-fir (*Abies sachalinensis*) and Larch (*Larix leptolepis*). There were differences between the values of the MOE for certain forest stands at different locations and of different ages. The velocities of ultrasonics could be used instead of the MOE as an index for the properties of standing trees. But more data are needed to clarify the relationships between the diameters at breast height, tree heights and the MOE. Maps of the MOE for standing trees in forest stands could be made by means of the estimated density. These maps could provide very useful information for bucking and timber production.