

木材中の A E 波の伝搬特性

奥村 正悟・川元スミレ・豊田宮代子・野口 昌巳

Propagation Properties of AE Waves in Wood

Shogo OKUMURA, Sumire KAWAMOTO, Miyako TOYOTA
and Masami NOGUCHI

要 旨

木材中を伝搬する A E 波の特性を明らかにするため、シャープペンシルの芯の圧折を擬似 A E 源としたときの A E 信号波形とスペクトル、それらの伝搬距離による変化、A E 波の距離減衰、伝搬速度などを、数樹種の気乾材と 2 樹種の飽水材（厚さ 10~15 mm の板）について調べた。

A E 波には縦波と横波が存在し、繊維方向に伝搬する場合には明瞭に区別された。伝搬距離が長くなると A E 信号に含まれる高周波数成分が顕著に低下した。距離による減衰は縦波よりは横波が、繊維方向の伝搬よりは直交方向で、気乾材よりは飽水材で著しく、また板幅によって減衰の様子が変化した。縦波の伝搬速度は既報の木材中の音速と同様の値が得られ、繊維直交方向の速度は繊維方向の 1/3 前後であった。一方、横波の速度は繊維方向で縦波の約 1/4 であった。

1. は じ め に

アコースティック・エミッション (A E) は固体中でひずみエネルギーが瞬間的に解放されたときに発生するため、その原波形は鋭いインパルス状のものと考えられる¹⁾。これが弾性波となって固体中を伝搬していく間に、周波数や振動モードによる速度分散、減衰などのために波形が変化し、さらにこれを受信したセンサでの変換の過程でセンサの特性に応じた A E 信号波形に変化する。したがって、木材の材料評価や乾燥割れの監視に A E を利用する場合、木材中の A E 波の伝搬特性をあらかじめ把握しておくことは基本的かつ重要な課題の一つである。

木材中の弾性波の伝搬に関しては、伝搬速度 (音速)^{2),3),4)}、その含水率・温度依存性^{3),5)}、減衰^{3),6)} などについて既にいくつかの報告があり、また音速を測定することによって木材の材質⁶⁾⁻⁹⁾ や乾燥時の含水率¹⁰⁾ を評価することも試みられている。しかし、これらのほとんどは弾性波の中の縦波のみを対象としたものであり、いくつかの振動モードが混成していると考えられる¹¹⁾ A E 波の木材中の伝搬特性を、これらの知見のみから予測することは難しい。そこで、擬似 A E 源を用いて、木材中を伝搬する A E 波 (正確にはこれを受信したセンサの出力すなわち A E 信号) の波形とスペクトル、距離による減衰などを、気乾または温潤状態にある数種の木材について検討した。また、A E 波が 2 個のセンサに到達する時間差を利用して伝搬速度を測定することも試みた。

なお、本研究の概要は第 35 回日本木材学会大会 (昭和 60 年 4 月、東京) において口頭発表した。また、本研究の一部は昭和 59 年度科学研究費補助金 (一般研究 B、代表者野口昌巳) によった。

2. 実 験

実験として、繊維方向に比較的長い試料を用いてA E波の波形とスペクトル、および主に繊維方向におけるA E波の距離による減衰を調べた実験Iと、比較的短い試料を用いてA E波の伝搬速度を求めた実験IIを行った。

2. 1 試 料

実験Iに使用した試料の樹種、形状、比重などをTable 1に示す。木取りは板目、まさ目、

Table 1 Specimens for Experiment I.

Species	Moisture condition	Dimension (mm)	Specific gravity
Mizunara	A ^{a)}	63×10×2200 ^{b)}	0.70
	W ^{a)}	30×10×350	1.16
Buna	A	57×10×1950	0.52
White seraya	A	50×15×1010	0.43
	A	200×15×1000	0.43
Sugi	A	45×10×3020	0.40
	W	30×10×304	0.76
Hinoki	A	65×13×3000	0.41
Douglas fir	A	50×13×3035	0.58

a) A and W, air-dried and wet conditions, respectively.

b) (width)×(thickness)×(length along the fiber direction)

追まさが混在している。実験IIの試料もIと同様であるが、繊維直交方向の伝搬速度測定には幅10 cm程度の試料を用いた。試料の含水率は気乾状態で13~17%、ミズナラとスギの温潤状態ではそれぞれ87%と134%であった。

2. 2 A E 計 測

A E計測には、空間フィルタを用いたA Eエネルギー解析装置(NF製A E F TアナライザA E-973)を利用したが、それを含めたA E計測システムの概要をFig. 1に示す。A E F Tアナライザは2チャンネルの信号を増幅、包絡線検波、しきい値弁別する機能および両信号の時間差を監視する機能を備え、2個のA Eセンサに定められた時間間隔(2~32 μs)内に到達したA E波のみを有効とする方法(空間フィルタ)を利用して、狭い監視領域で発生するA Eのみを計測するための装置である。空間フィルタの機能を使わないときは1個のセンサを用いた通常のA E計測も可能である。

2. 3 擬似A E源

実験IおよびIIの目的を達するためには、試料の任意の位置で常に一定のエネルギー解放を伴うA Eを発生させる必要がある。そこで、シャープペンシルの芯を試料に押し当てて折ること(圧折)によって、試料表面の1点で瞬間的な荷重変化すなわち擬似的なA Eを発生させる

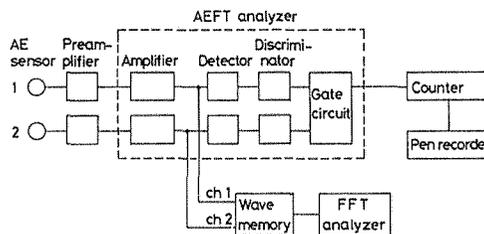


Fig. 1 Block diagram of AE measurement system.

ことにした。この圧折は、AEの原波形解析で試料および計測系の応答関数を求めるときの擬似AE源として利用されているもので、瞬間的な荷重解放がステップ状関数を示すこと、AE計測が対象とする周波数成分を含むこと、再現性のあることなどが確かめられている^{11,12)}。用いた芯は硬度B、直径0.3 mmであり、圧折時の保持角度、芯の出は一連の実験で一定になるようにした。

2. 4 波形とスペクトルの観察 (実験 I)

試料の長手方向の一端に0.1~1 MHzで平坦な周波数特性(±10dB)をもつセンサをシリコングリスの塗膜を介して圧着し、センサから5~160 cm離れた点でシャープペンシルの芯を圧折した (Fig. 2a)。AEは総合利得60 dB、しきい値50 mVまたは100 mVとして測定し、ウェーブメ

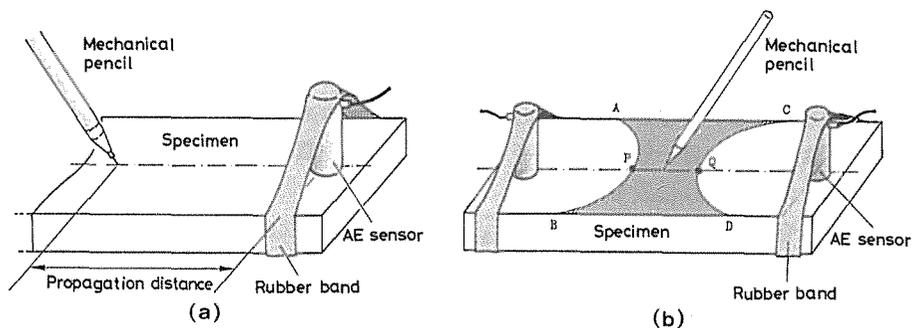


Fig.2 Schematic diagrams of (a) artificial AE generation and (b) spatial filtration in AE detection, in which only AEs generated within a shaded area are detected.

モリで時間軸変換した信号の波形と周波数スペクトル(平均数8)をFFTアナライザで観測した。

2. 5 距離減衰の測定 (実験 I)

AE波の伝搬距離を5または10 cm刻みで変化させたときのAE信号波形を、前項と同様の方法で観測し、信号振幅の極大値をFFTアナライザのCRT上で測定した。振幅値は各伝搬距離について10回測定し、その平均値をAE振幅とした。

2. 6 伝搬速度の測定 (実験 II)

Fig. 2b に示したように、試料の両端にAEセンサを固定し、AEFFTアナライザの空間フィルタの機能を作動させておくと、双曲線状の曲線ABとCDにはさまれた領域で発生したAEのみが計測対象となる。このとき、曲線AB、CDと両センサを結ぶ直線の交点をそれぞれP、Qとすると、この直線方向のAE波の伝搬速度 v は次式で求められる。

$$v = PQ/\Delta t \quad (1)$$

ここで、 Δt はAEFFTアナライザの時間差監視回路で設定した時間差である。

実験では、 Δt を8, 16, 32 μ sに設定し、両センサの中間付近でシャープペンシルの芯の圧折を繰り返して曲線ABとCDを定め、式(1)によって伝搬速度を求めた。なお、それぞれの Δt で5回ずつ測定し、それらを平均して各試料の伝搬速度とした。なお、この実験に用いたセンサは共

振特性 (150 kHz) をもつタイプである。

3. 結果と考察

3.1 波形とスペクトル (実験 I)

繊維方向に伝搬したAEの波形とスペクトルの例を、ミズナラとベイマツについて Fig. 3 に示す。図から、実験に用いた擬似AE源は、いわゆる突発型AEに類似したAE波を発生していること、そのAE波の振幅は伝搬距離と共に顕著に小さくなるのが分かる。また、周波数スペクトルは、AE源がセンサの近くにある場合は40~150 kHzの周波数範囲で比較的平坦であるが、AE源が遠ざかるにつれて次第に高周波数成分が抑制され、20~80 kHzの成分のみが残ってくる。ここで注目すべきことは、一団のAE波の中に少なくとも2種類の波が存在することである。一つはセンサに最初に到達する振幅の小さな、波長の短い波であり、もう一つは、やや遅れてセンサに到達する振幅の大きな、波長の長い波である。この両者はAE源がセンサに近い場合には区別しにくい、AE源が遠ざかるにつれてセンサへの到達時間の差が大きくなるため、明瞭に区別できるようになる。すなわち、二つの波の伝搬速度は本来異なることが分かる。

ところで、AEセンサは一般に指向性をもち、受圧面に垂直な刺激に対して最も感度が高い。そこで、センサの取り付け位置を3通りに変えて波形を観測した (Fig. 4)。図から分かるように、AE波の進行方向に対してセンサの受圧面が垂直になるようにすると (Fig. 4 のC)、センサに早く到達する波の振幅が明らかに大きくなった。

一般に固体中の弾性波には縦波、横波、表面波があり、多くの場合横波の伝搬速度は縦波の約60%、表面波の速度は横波の約90%である。また本実験のように有限厚さの板の場合は純粋な表面波は存在しない。したがって、Fig. 3 と 4 にみられる二つの波はそれぞれ縦波と横波に相当するものと考えられる。なお、繊維方向に伝搬するAE波の波形とスペクトルについては他の樹種でも同様の結果が得られたが、繊維に直交する方向では縦波と横波の区別は判然とせず、高周波成分が低下する傾向が認められた (Fig. 5)。また、繊維方向の伝搬で気乾材と湿潤材を比較すると、湿潤材では振幅の距離による低下が著しく、高周波成分のレベルも低くなっており、さらに最大振幅に達するまでの時間が長くなり、縦波と

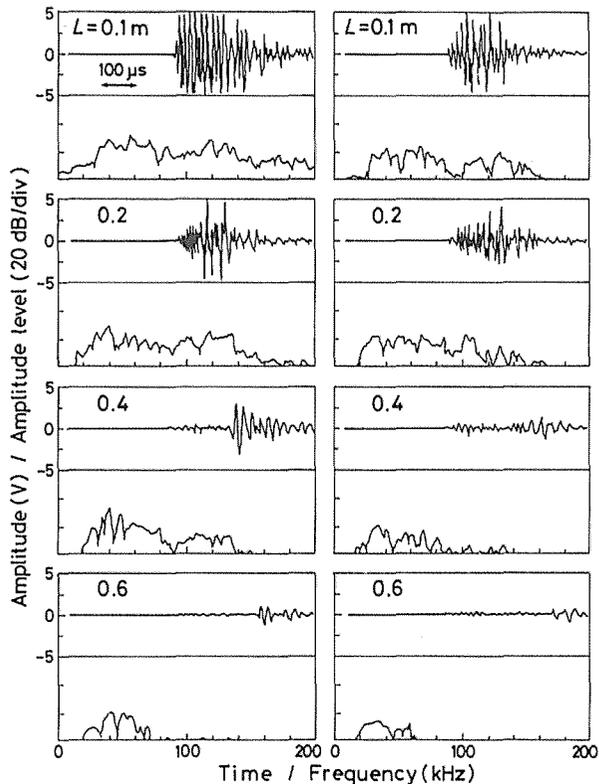


Fig. 3 Waveforms (upper) and frequency spectra (lower) of AEs propagated longitudinally in air-dried specimens of Douglas fir (left) and mizunara (right) through different distances, L .

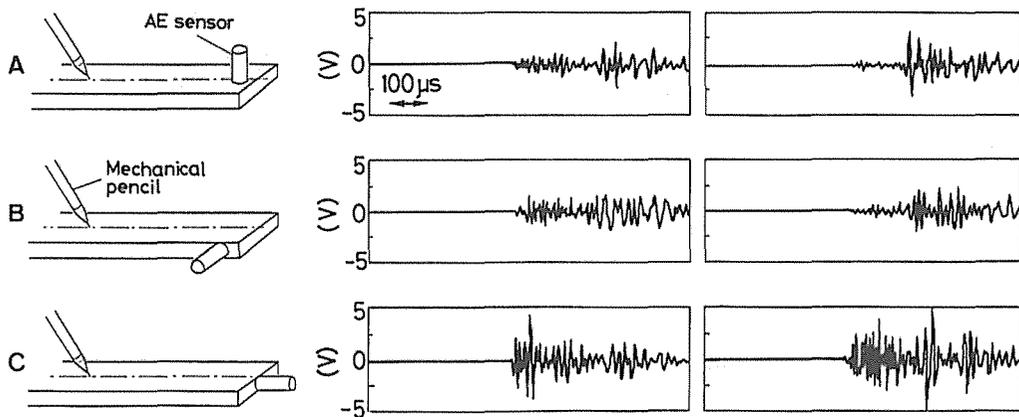


Fig. 4 Effect of mounting direction of an AE sensor on waveforms of AEs propagated longitudinally in air-dried specimens of white seraya (left) and hinoki (right). Propagation distance, 0.3 m.

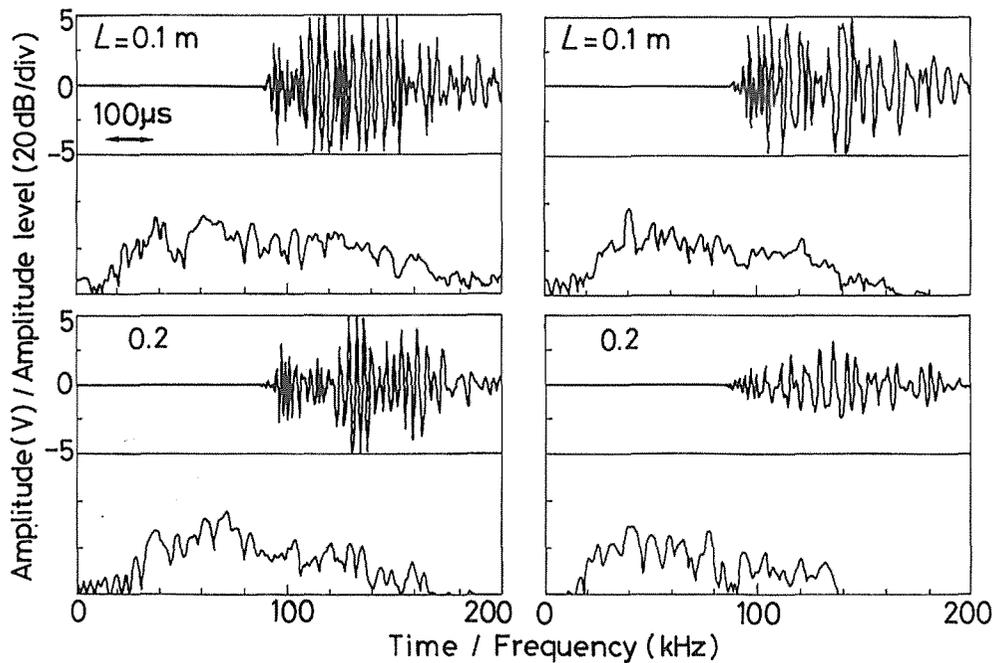


Fig. 5 Waveforms (upper) and frequency spectra (lower) of AEs propagated longitudinally (left) and radially (right) in air-dried specimens of white seraya. L , propagation distance.

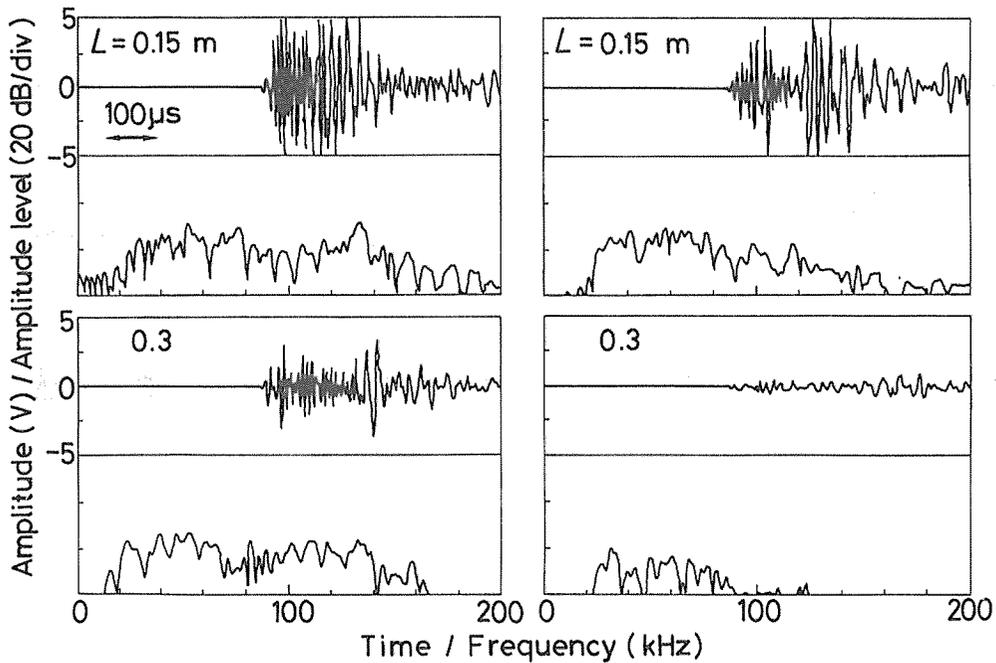


Fig. 6 Waveforms (upper) and frequency spectra (lower) of AEs propagated longitudinally in air-dried (left) and wet (right) specimens of mizunara. L , propagation distance.

横波の到達時間差が大きくなった (Fig. 6)。

ちなみに、AE波が気乾材の繊維方向に伝搬するときの縦波と横波の到達時間差と伝搬距離の関係を、6樹種の気乾材について Fig. 7 に示す。図から明らかなように、到達時間差は伝搬距離に比例し、その比例定数は樹種によらず 0.5 ms/m 前後であった。このことは、縦波と横波がそれぞれ単位長さ伝搬するのに要する時間の差が樹種によらずほぼ等しいことを意味する。なお、湿潤材では直線の傾きは気乾材よりも大きくなり、両波の到達時間の差は気材乾の場合よりも大きい。

実際のAE計測では種々の波形¹⁴⁾が観測されるが縦波と横波を識別することは一般に難しい。これは、使われる試料が比較的小さいために伝搬距離が本実験よりかなり短いこと、伝搬してくる方向が様々であることなどによるためと考えられる。

3. 2 距離による減衰 (実験 I)

気乾材の繊維方向に伝搬するときの振幅 (伝搬距離 0.9 m の振幅に対する比) と伝搬距離の

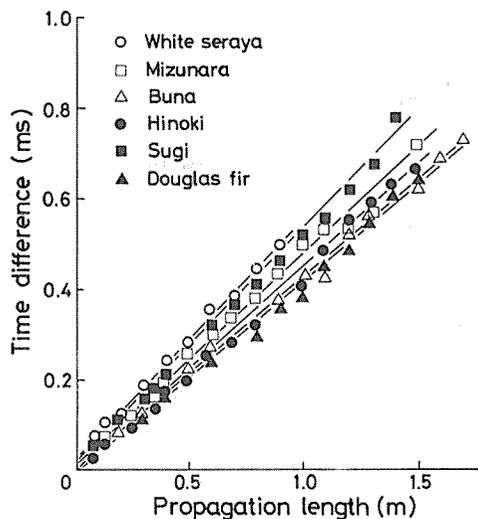


Fig. 7 Changes in arrival-time difference between longitudinal and transverse waves with propagation distance for longitudinal propagation in air-dried specimens.

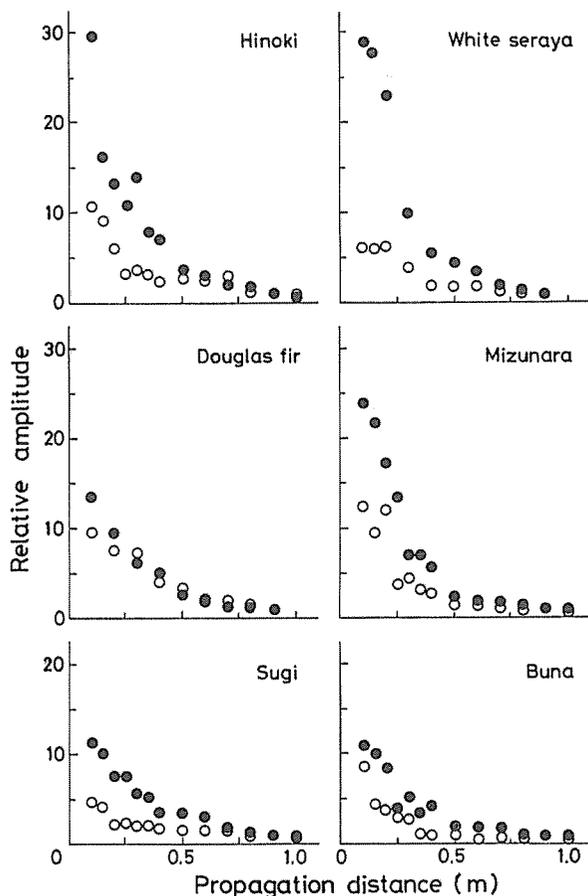


Fig. 8 Damping of longitudinal (○) and transverse (●) waves propagated longitudinally in air-dried specimens. Note that amplitudes are relative to an amplitude at a distance of 0.9 m.

様子も変化するはずである。そこで、ホワイトセラヤ気乾材の板(厚さ1.5 cm)を用い、幅を1.3~20 cm に変えて振幅と伝搬距離の関係を調べた (Fig. 10)。図から、A E源からの距離が同一の場合の振幅は試料の幅が狭いほど大きいこと、試料の幅によって減衰の様子が異なり、とくに横波では幅が広がるに伴ってA E源に近いところでの減衰が顕著になることが分かる。

3. 3 伝搬速度 (実験 II)

3. 1 節で述べたように、木材中を伝搬するA E波には縦波と横波が存在しているため、2. 5節の方法でA E波の伝搬速度を求める場合には注意が必要である。すなわち、A E事象を認知するためのしきい値のレベルが低い場合には縦波の速度を、高い場合には横波の速度を求めることになる。そこで、この点に注意しながらしきい値を設定し、7 樹種の気乾材とミズナラ、スギの湿潤材について、繊維に平行および直交方向の伝搬速度を測定した。なお、湿潤材については、水温を20または60°Cに設定した恒温水槽に試料を浸して測定した。結果を Table 2 に示す。

Table 2 の縦波の速度は既に報告されている結果^{2~5)}と同様であり、気乾材の繊維方向では

関係を Fig. 8 に示す。図から明らかなように、一般にA E波の振幅は伝搬距離0.5 mまでの範囲で急激に小さくなり、それ以降の減衰は緩やかであった。しかし、距離0.1 mと0.9 mの振幅比は樹種によって異なり、また横波の方が縦波よりも距離による減衰が強く現れる傾向があった。繊維に直交する方向でのA E波の減衰については、試料の都合上定量的な結果を得ることができなかったが、Fig. 5の波形から繊維方向よりも減衰の著しいことは確かである。なお、Fig. 8の値を両対数グラフにプロットすると、縦波で-1~-1.5、横波で-1.2~-1.7の傾きが得られるが、ばらつきがかなり大きく、この距離範囲で直線関係が仮定できるかどうか判断できなかった。

Fig. 9は同一試料の湿潤と気乾状態で距離減衰を測定したものである。Fig. 8と比べて気乾材の距離減衰がうまく測定できていないようであり、また測定値のばらつきも大きい、湿潤材の減衰が気乾材よりもかなり大きいことが分かる。

A E波の減衰には広がり損失、内部摩擦による損失などが関与するが、広がり損失は試料の形と寸法に密接に関係し、試料寸法が異なれば距離減衰の

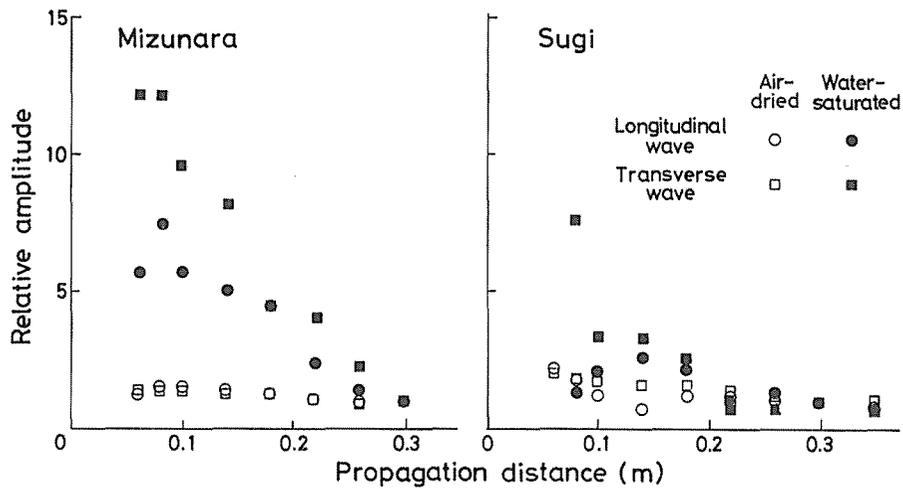


Fig. 9 Damping of AE waves propagated longitudinally in air-dried and wet specimens. Note that amplitudes are relative to an amplitude at a distance of 0.3 m.

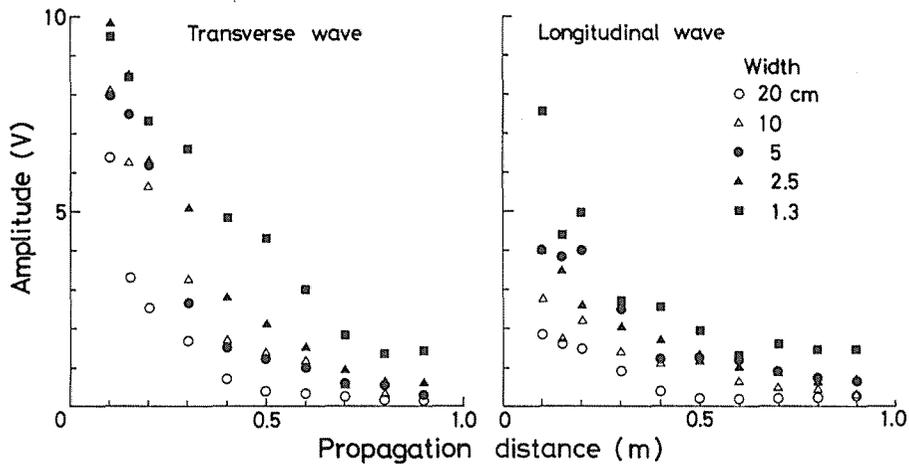


Fig. 10 Effect of specimen width on damping of AE waves propagated longitudinally in air-dried specimens of white seraya.

4.4~5.8 km/s の値を示し、直交方向の速度はその 1/3 程度であった。一方、湿潤材の繊維方向の速度は値のばらつきが大きい気乾材の 80% 程度の値を示す場合が多く、直交方向では気乾材とほとんど差がなかった。湿潤材の温度の影響は、60°C の方が速度がやや低い傾向が認められるものの、明確ではなかった。表には繊維方向に伝搬する横波の速度も示したが、この値は Fig. 7 に示した直線の傾きと、縦波の速度から計算によって求めたものである。横波の速度は気乾材、湿潤材ともに縦波の約 1/4 であった。

Table 2 Propagation velocities of AE waves a)

Species	Air-dried		Wet			
	v_L b) (km/s)	v_T b) (km/s)	at 20° C		at 60° C	
			v_L (km/s)	v_T (km/s)	v_L (km/s)	v_T (km/s)
Mizunara ^{d)} A	4.5 (1.5) ^{c)}	1.4	5.3 (0.9)	2.0	4.3 (0.9)	1.8
B	5.1 (1.5)	1.4	3.9 (0.9)	2.1	3.8 (0.8)	1.7
Buna	4.4 (1.5)	1.4	—	—	—	—
White seraya	4.5 (1.2)	1.8	—	—	—	—
Mizume	5.0 (1.4)	1.9	—	—	—	—
Sugi ^{e)} A	4.4 (1.3)	} 1.5	3.2 (1.0)	} 1.5	2.7 (0.9)	} 1.7
B	5.1 (1.4)		4.2 (1.1)		4.2 (1.1)	
C	5.8 (1.4)		3.7 (1.0)		3.6 (1.0)	
Hinoki	5.7 (1.6)	—	—	—	—	—

a) Velocities of longitudinal waves unless otherwise stated.

b) v_L and v_T , velocities of AEs propagated longitudinally and transversely, respectively.

c) Velocity of transverse waves estimated from that of longitudinal waves and the slopes of the lines such as in Fig. 7.

d) Specimens A and B are taken from heartwood and sapwood, respectively.

e) Specimens A, B and C contain 5th–15th, 16th–28th and 29th–54th annual rings, respectively.

4. お わ り に

A E 波の伝搬特性に関連して実際の A E 計測で問題になるのは、(1)センサが検出した個々の A E が試料のどこでどのように発生したのか、(2)試料に取り付けた 1 個のセンサでどの範囲の A E 発生をカバーできるのか、(3) A E 源の位置標定にどの波を利用し、伝搬速度およびセンサへの到達時間をどのように決定するかなどの点である。(1)の点は測定した A E 信号波形をどのように解釈するかの問題に帰着し、原波形解析が最も明確な解答を提示できる。しかし、測定系の応答関数を決定するための擬似 A E 源と実際の A E 源の位置はほぼ一致する必要がある、またセンサの指向性および A E 発生時の荷重解放の方向性を考慮すると、破壊の態様や位置があらかじめ分かっていないときの解析はかなり複雑になる。

(2)の点については本実験で検討した距離減衰が密接に関係し、発生時に十分な振幅をもつ A E も、ある伝搬距離を越すとセンサで検出できなくなる。この距離は、原理的には距離減衰の程度、発生源における振幅、および測定系の雑音レベルが分かれば容易に求められる。しかし、木材の場合距離減衰は樹種、試料形状、含水率、波の種類、伝搬方向などによって異なり、また A E 信号振幅はセンサの取り付け方によっても異なる。さらに、発生源での A E の大きさについても十分な知見が得られていないため、センサが A E 発生を監視できる範囲を簡単に決めることはできない。この距離減衰がとくに問題になるのは含水率の高い比較的大きな試料で、しかも A E の発生位置があらかじめ予測できない場合である。それに当るのは木材乾燥時の A E 計測であり、試料寸法が小さくても減衰の大きい繊維直交方向では伝搬距離が 4 cm を越えると A E が検出できないことがある¹³⁾。ちなみに、木材乾燥時の A E を本実験と同じ計測系で総合利得 60dB として測定したとき¹⁴⁾の平均振幅 0.5 V を伝搬距離 1 cm における振幅と仮定し、振幅は距離の -1.5 乗に比例するものとする、振幅は伝搬距離 19~8.8 cm でこの測定系の雑音レベル 6~19 mV まで低下することになる。しきい値は通常雑音レベルの 2~3 倍に設定することが多いので、その場合はこの距離はさらに短くなる。

A E 源の位置標定に必要な伝搬速度の決定とセンサへの到達時間差の測定では、縦波と横波のどちらを利用するかでA E 信号波形の取り扱い方が変わってくる。既製の標定システムでは到達時間差の測定をA E 信号がしきい値を越えた時点、あるいは振幅が極大値をとる時点を基準にしている。しかし、本実験の結果からも明らかなように、伝搬距離や伝搬方向によって波形は複雑に変化するため、このような方法で測定した時間差にはかなりの誤差が含まれる。この点からは、A E 信号の初動時点すなわち縦波の到達時点を基準にする¹³⁾方がよいことが分かる。

貴重な試料を提供して頂いた奈良県林業試験場の小林好紀主任研究員に、記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 尾上守夫ほか5名：アコースティック・エミッションの基礎と応用。コロナ社。p.15, 1982
- 2) 秋山 朗：木材の振動並びに音響学的性質について。東大理工学研報。1 (3, 4)。38—41, 1947
- 3) JAMES, W. L. : Effect of temperature and moisture content on internal friction and speed of sound in Douglas-fir. Forest Prod. J. 11 (9). 383-390, 1961
- 4) BURMESTER, A. : Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. Holz Roh- Werkstoff 23. 227-236, 1965
- 5) GERHARDS, C. C. : Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. Forest Prod. J. 25 (4). 51-57, 1975
- 6) DUNLOP, J. I. : Testing of poles by using acoustic pulse method. Wood Sci. Technol. 15. 301-310, 1981
- 7) LEE, I. D. G. : A non-destructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using an ultrasonic pulse technique. J. Inst. Wood Sci. 1958 (1). 1-15, 1958
- 8) BECKER, H. : Möglichkeiten der Anwendung von Ultraschall bei der Untersuchung von Holz und Holzspanplatten. Holzforschung 21. 135-145, 1967
- 9) WAUBKE, N. V., MÄRKL, J. ; Einsatz der Ultraschall-Impulszeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. Teil 1: Vorversuch mit Kanthölzern. Holz Roh- Werkstoff 40. 189-192, 1982
- 10) JAMES, W. L., BOONE, R. S., GALLIGAN, W. L. : Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. Forest Prod. J. 32 (9). 27-34, 1982
- 11) 岸 輝雄：原波形解析における新しいA E の展望。材料科学。19(5)。261—266, 1983
- 12) 中尾哲也・田中千秋・高橋 徹：木材の曲げ破壊時に発生する大振幅A E の原波形解析。木材学会誌。32。591—595, 1986
- 13) 奥村正悟・川元スミレ・中川雅博・野口昌巳：木材の乾燥応力とアコースティック・エミッション。京大演報。58。251—259, 1986
- 14) 野口昌巳・奥村正悟・川元スミレ：木材の乾燥過程で発生するアコースティック・エミッションの特性。木材学会誌。31。171—175, 1985

Résumé

To clarify the propagation properties of acoustic emissions (AE) in wood, the signal of a breaking pencil lead was employed as an artificial AE source (Fig.2) and the waveforms and frequency spectra of AEs propagated in air-dried and wet specimens were observed for several species (Table 1). The damping and the propagation velocity of AE waves in wood were also examined.

AE waves contained both a longitudinal-wave component, which arrived first at an AE sensor, and a transverse-wave one, which arrived later, and they were distinguished clearly when propagating longitudinally (Figs. 3 and 4). AE waves attenuated and changed in form during the propagation in wood, and their components of the higher frequencies

decreased remarkably with propagation distance (Fig. 3). Attenuation of AEs during the propagation in wood was greater for transverse waves than longitudinal ones, and it depended on the propagation direction in wood, the moisture content and the specimen width (Figs. 5, 6, and 8-10). Velocities of longitudinal-wave components were the same as the sound velocities reported previously, and the transverse velocities were approximately 1/3 of longitudinal ones (Table 2). The velocities of transverse waves were estimated at about 1/4 of longitudinal ones when propagating longitudinally.