

木材の乾燥応力と アコースティック・エミッション

奥村 正悟・川元スミレ・中川 雅博・野口 昌巳

Relationship between Drying Stresses and
Acoustic Emission of Wood

Shogo OKUMURA, Sumire KAWAMOTO,
Masahiro NAKAGAWA and Masami NOGUCHI

要 旨

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 (AE) と乾燥応力の関係を明らかにするため、応力法で乾燥応力の消長を追跡しながらミズナラとホオノキの板目材を乾燥し、AE 事象率及び AE 振幅と乾燥応力の関係について検討した。また、ミズナラ板材の厚さ方向における AE 発生源の位置標定を試みた。

乾燥雰囲気の設定を変更したときの乾燥応力の過渡的変動に対応して、AE 事象率は一時的な増大 (応力反転前) または減少 (応力反転後) を示し、両者に密接な関係が存在することがわかった。しかし、乾燥応力の全体的な消長と AE 発生は必ずしも対応せず、また AE 発生の樹種による違いも認められた。乾燥初期に材表層部にあった AE の発生域は、応力の反転後次第に内層部に移行し、AE はおもに引張応力の作用域で発生していることがわかった。

1. はじめに

一般にアコースティック・エミッション (AE) は、応力下にある材料の局所的な破壊や塑性変形に際しひずみエネルギーが解放されることによって発生する。したがって、木材の乾燥過程で AE が検出されるということは、種々の乾燥応力¹⁾によって木材中に微小な破壊や変形が生じていることを意味する。しかし、乾燥応力と AE 発生の関係や乾燥材中での AE の発生源については、AE を木材乾燥の自動制御²⁻⁴⁾に応用するうえからも非常に興味深い問題であるが、今までほとんど知見は得られていない。

カップ法で応力の消長を追跡しながら一定のスケジュールに従ってミズナラ板目材を乾燥した前報⁵⁾の実験では、板材の水分傾斜に基づく乾燥応力と AE 発生の間にかかなり密接な関係が存在することが推定された。しかし、カップ法では試片が反るため、カップ量の変化は材表層の応力経過を必ずしも忠実に反映しない^{6,7)}という問題がある。そこで本実験では、カップ試片の自由な反りを拘束するのに必要な力を求める方法 (応力法)⁷⁾によって乾燥応力を推定し、この力

と AE 事象率, AE 振幅の関係について検討した。また, 繊維方向に比較的長い板材を用いて, 割れ発生と AE の関係についても調べた。さらに, 2 個の AE センサを用いて, 板の厚さ方向における AE 発生源の位置標定を試みた。

なお, 本研究の概要は第36回日本木材学会大会(昭和61年4月, 静岡)において口頭発表した。また, 本研究の一部は昭和60年度農林水産業特別試験研究費補助金によった。

2. 実 験

2.1 試料と乾燥操作

ミズナラとホオノキの生材(京都大学芦生演習林産)から厚さ30mm, 幅200mmの板目材を作製し, そこから AE 計測用試片, 応力測定用試片, カップ試片を連続的に得た。AE 計測用試片は繊維方向の長さが60mmと300mmのものを作製し, 前者は両木口面をゴム系接着剤とアルミ箔でシールした。後者は一方の木口面のみを同様にシールし, 他方の木口面での割れ発生を監視しながら乾燥を行った。応力測定用試片とカップ試片は厚さ15mm, 繊維方向の長さ30mmとし, 木表面のみを残して表面をシールした。AE 発生源の位置標定のための試料はこれらとは別に作製し, 特定の蒸発面以外をシールして実験に供した。

すべての乾燥実験は観察窓付の小型の恒温恒湿槽で行った。AE 計測用試片の平均含水率は, ロードセルにつりさげた AE 計測用試片または含水率測定用試片の重量から推定し, あらかじめ定めたスケジュールに従って乾燥操作を行った。

2.2 AE 計測

AE の計測には前報⁵⁾と同様 AEFT アナライザを用いた。AE センサは共振周波数 150kHz のものを用い, 試料の板目面中央にシリコングリスを介して圧着固定した。センサ出力(AE 信号)は60dB 増幅し, しきい値100または200mV で AE 事象を計数した。

2.3 乾燥応力の測定

応力測定装置⁷⁾は, 小型の恒温恒湿槽や乾燥器内でも容易に取り扱えるように設計, 製作し, 材質はステンレス鋼である(Fig. 1)。応力測定用試片は蒸発面を上側にしてセットし, その両端部を引張ばねで軸を連結された一対のニードルベアリング(下側のベアリングの軸は棒に固定)で上下から支持した。試片の反りは, 高さ調節ねじを介して両端固定はりの中央に固定された一対のかまぼこ形支持金具(下側の金具に固定された2本の棒が上側の金具を貫通し, 棒に取り付けた圧縮ばねの力で試片を上下からはさみつける)によって拘束した。この拘束力(中央荷重)は, はりに貼付した4枚のひずみゲージを用いて測定した。

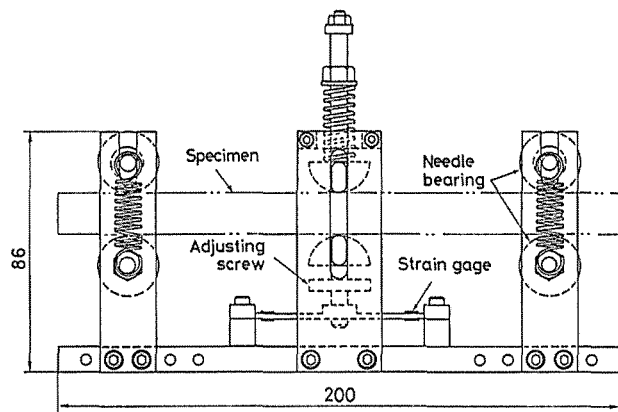


Fig. 1 Apparatus for measurement of drying stress.

2.4 AE 源の位置標定

AE 発生源の位置を標定するためには、木材中で発生した AE 波が 2 個の AE センサに到達する時間差と AE 波の伝搬速度を知る必要がある。AE 波の到達時間差は、60dB 増幅したセンサの出力を 2 チャンネルのウェーブメモリ (サンプリング周期 50ns) で A/D 変換してからコンピュータに転送し、CRT 上に再生した二つの AE 信号波形の立ち上がり時点の差として求めた (Fig. 2a)。このときのウェーブメモリのサンプリング開始のトリガは、しきい値を 100mV としたときの事象発生とした。また、AE 波の伝搬速度は一方のセンサに方形波を印加して疑似 AE 波を発生させ、その AE 波がもう一方のセンサに到達するのに要する時間から求めた (Fig. 2b)。

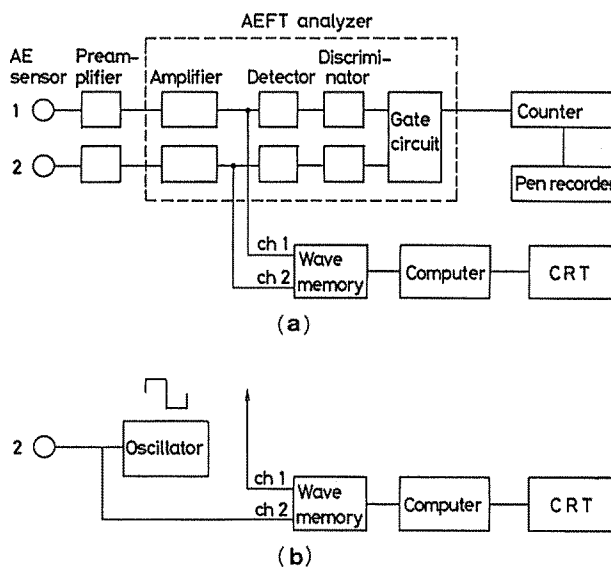


Fig. 2 Block diagrams of systems for location of AE source (a) and measurement of propagation speed of AE wave (b).

3. 結果と考察

3.1 乾燥応力と AE

繊維方向の長さ 60mm のミズナラとホオノキを、標準的なスケジュールに従って乾燥したときの中央荷重、5 分間当たりの AE 事象率、AE 振幅 (100 事象ごとの平均値) の経時変化を Fig. 3 に示した。ミズナラについてはカップ量の変化も示した。

ミズナラ、ホオノキの場合とも中央荷重は乾燥雰囲気の設定変更ごとに過渡的な変動を示している。この変動は常に材表面部に、ある大きさの引張応力成分を付け加えたように現れ、中央荷重が反転する以前では材内の乾燥応力を増大させ、反転以後は応力を緩和させている。中央荷重の過渡的な変動に対応して、AE 事象率も大きく変動しているが、特にミズナラで顕著であり、AE 振幅にも対応する変動が認められる。この事象率の変動は、中央荷重の符号が反転する以前では乾燥応力の過渡的な増大に対応した急激な事象率の増加として現れ、反転以後では応力の過渡的な緩和に伴う事象率の低下として現れている。

過渡的な変動を除外した場合の AE 事象率のピークは、ミズナラでは中央荷重が極大となる前後で、カップ量が負の極値をとる少し前頃とみられるが、設定変更に伴う変動が余りに大きいため、前報⁵⁾ のようには明確ではない。ミズナラの事象率は表面部の引張応力が低下して圧縮に転じた後もかなり高いレベルを維持しているが、乾燥終期には AE の発生がほとんど停止した。一方、ホオノキでは事象率が初期に急増した後、中央荷重が極大をとる頃に極小となり、荷重が反転する少し前に再びピークを示してその後急減している。また、ホオノキでは AE 振幅が事象率の 2 番目のピークに少し遅れて最大値をとり、ミズナラのような両者の対応関係は認められ

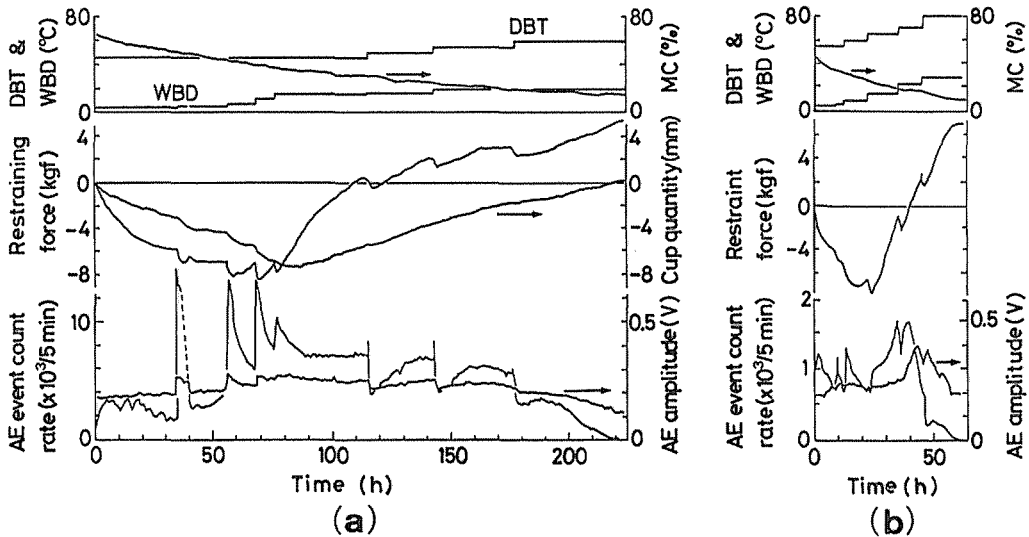


Fig. 3 Changes of moisture content (MC), restraining force, cup quantity, AE event count rate and AE amplitude during drying Japanese oak (a) and cucurbit tree (b) of 60 mm length. The threshold for AE signal was set at 100 mV. DBT and WBD denote dry-bulb temperature and wet-bulb depression, respectively.

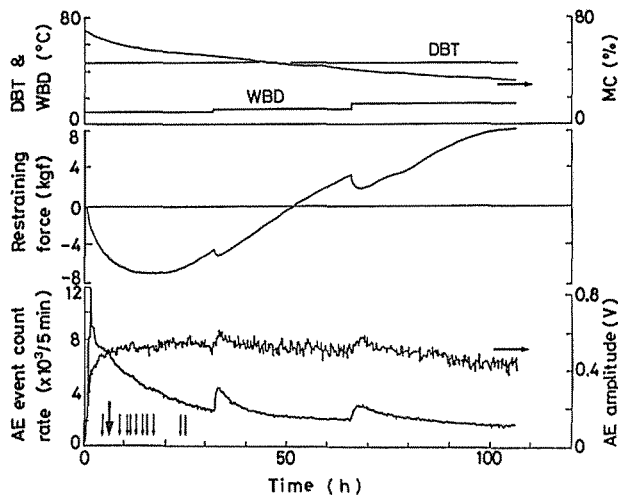


Fig. 4 Same as Fig. 3 but for oak of 300 mm length and with a threshold of 200 mV. End checks occurred at points indicated by small arrows and one of them developed into a surface check (large arrow).

率は乾燥開始直後に急増してピークを示し、その後徐々に低下した。そのピークの位置は中央荷重が極大となるよりもかなり前であり、材のごく表層の引張応力のみによって多量のAEが発生していることがうかがわれる。事象率と中央荷重のピークの位置が一致しないことと、中央荷重が正側に反転して大きな値をとっているにもかかわらず事象率が漸減の傾向を示すことから、材全体の乾燥応力の消長とAE発生が必ずしも対応しないことが推察される。

雰囲気の設定変更に伴う中央荷重とAE事象率の過渡的変動は、Fig. 3の場合と同様である

ない。

乾燥応力及び割れ発生とAEの関係を調べるために、繊維方向の長さを300mmとした試料について実験を行った。割れの発生は8mmカメラの微速度撮影(1コマ/2min)で監視することを試みたが、分解能の点で不十分であったため、もっぱら目視による監視を行った。

Fig. 4はミズナラを最初から温度差を大きい目(8.5°C)にして乾燥したときの結果である。乾燥条件がかなり厳しいため、材表面のセットが早く進行し、中央荷重は早いに符号を反転している。この場合のAE事象

が、Fig. 4ではしきい値を200mVと高い目に設定したため変動幅も小さくなっている。また、中央荷重反転後の設定変更で、乾燥応力は緩和されているにもかかわらず AE の発生が増加している。これは、試料の平均含水率がまだ40%程度にしか低下していないため、材内の一部の層で乾燥応力の増大があったことを示しているものと考えられる。

割れについては、その発生点を矢印で示したが (Fig. 4), 中央荷重が極大値をとる頃を中心に多くの木口割れが発生し、その一つは短い表面割れ (長さ50mm) にまで伸展した。しかし、割れの発生時期は事象率がピークを越えてからであり、割れの発生や伸展に直接むすびつくような AE の挙動を見出すことはできなかった。

Fig. 5は、繊維方向の長さ300mmのホオノキを Fig. 3と同様のスケジュールで乾燥したときの結果である。Fig. 3の結果と同様、ホオノキでは材表面の引張応力が発達する乾燥初期に AE 発生が一つのピークを示し、その後減少して低いレベルをしばらく維持し、応力が反転する少し前に再び発生のピークを示した。このように、乾燥応力が極大となる頃に一旦低下した AE 発生がその後再び増加することについては樹種特性や乾燥応力との関係から大変興味深い点である。

木口割れは、乾燥初期において事象率が急増するときと、最初の設定変更で事象率が大きく変動したときに多数発生し (図中の矢印で示した時点で10個程度発生)、その一つは2回目の設定変更直後に表面割れ (長さ70mm) に伸展した。

3.2 AE の発生位置

AE 発生源の位置を標定するためには、発生した AE 波がそれぞれのセンサに到達して、十分な大きさの信号として検出される必要がある。したがって、AE 波が木材中を伝搬する間にかなりの程度減衰すること⁸⁾を考慮すると、センサ間の距離すなわち位置標定が可能な範囲には一定の限界があるはずである。そこで、この限界を明らかにするため一つの予備的実験を行った。すなわち、二つの柁目面の中央部以外をシールしたミズナラ生材 (繊維方向と接線方向30mm、半径方向80mm) を急速に乾燥し、そのときに発生する AE の半径方向の位置標定を試料端面に取り付けたセンサで行った (Fig. 6)。位置標定は、乾燥開始後0, 3.8, 7.8, 12時間のそれぞれの時点で連続的に得た40個の AE について行い、標定結果はセンサ1からの距離を5mm刻みとしたときの度数分布で表した。

Fig. 6の左側のグラフはウェーブメモリのトリガ源をセンサ1の出力とした場合の結果であり、右側のグラフはトリガ源をセンサ2の出力とした場合の結果である。本来は露出部全体にわたっ

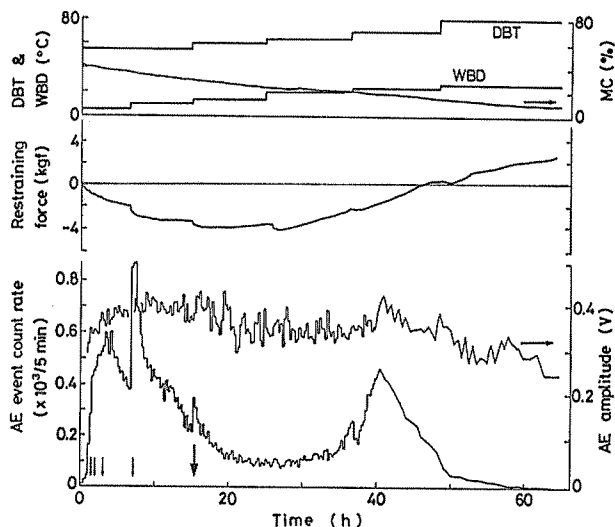


Fig. 5 Same as Fig. 3 but for cucurbit tree of 300 mm length and with a threshold of 200 mV. End checks occurred at points indicated by small arrows and one of them developed into a surface check (large arrow).

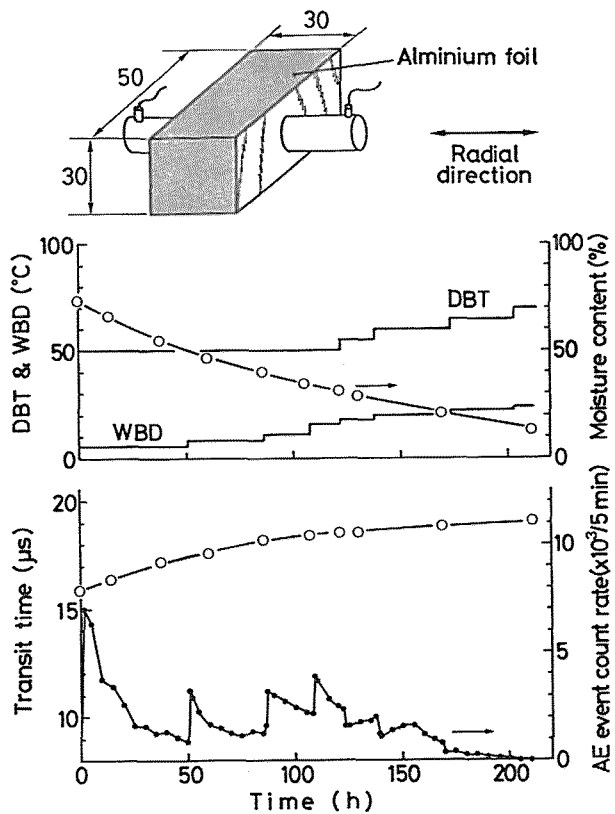


Fig. 7 Changes of moisture content, AE rate and transit time of artificial AE waves through an oak specimen.

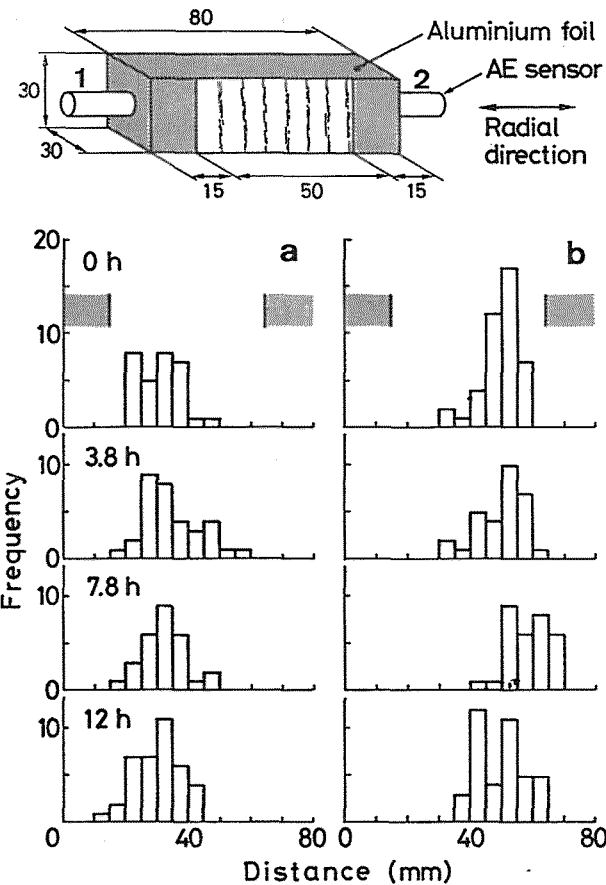


Fig. 6 Radial distributions of AE during drying oak at a DBT of 60°C and a WBD of 16°C. Note that a wave memory was triggered by AE signals from sensor 1 (a) and from sensor 2 (b).

て均等に AE が発生しているはずであるが、左右のグラフとも AE 事象の発生を監視させたセンサ寄りの半分のみから AE が発生している結果になった。これは、ミズナラの半径方向すなわち板厚方向では、センサからの距離が40mmを越える地点で発生した AE の多くは、距離減衰によってしきい値（この場合 100mV）を越えることができないことを意味する。したがって、乾燥中の木材について AE 源の位置標定を行う場合、かなり狭い間隔でセンサを配置する必要があることになる。また、単なる AE 計測の場合でも、1個のセンサが AE 事象の発生を監視できる範囲は上述のように限られているので、センサの設置場所には留意する必要がある。なお、繊維方向については、距離減衰が半径方向よりは小さいため AE 波の到達距離は当然大きくなる。

次に、厚さ30mmのミズナラ板材の乾燥を想定して、AE 発生源の板厚方向の位置標定を行った。試料は両板目面以外をシールし、やや厳しい条件で乾燥した。Fig. 7 には、乾燥条件、含水率と AE 事象率の変化、一方のセンサに方形波を印加して発生させた疑似 AE 波がもう一方のセンサに到達するのに要した時間の変化を示した。一般に、含水率が低下すると木材中を伝搬する弾性波の速度は大きくなるが、この実験では到着時間が次第に長くなり、乾燥の進行とともに速度が若干低下する結果となった。

この実験では、二つのセンサを結ぶ方向の試料寸法に対して垂直方向の寸法が同じかそれ以上のため、時間差から機械的に一次元の位置標定を行うことができない。そこで、センサ軸を含む二つの平面 A, B 上での等時間差曲線を求めてみた (Fig. 8)。ただし、AE 波の半径方向の伝搬速度は 1.56km/s とした。また、接線方向と半径方向の速度は等しく、繊維方向の速度は半径方向の 2.5 倍で、伝搬速度のベクトルは繊維方向を長軸とする回転楕円体を形成すると仮定した。センサの大きさは考慮していない。Fig. 8 によると、A 面では時間差によって AE 源の深さを推定できるが、B 面では時間差の絶対値が大きくなった場合、表面からある深さのところまで発生した AE と、表面で発生した AE を区別できないことがわかる。したがって、位置標定の結果

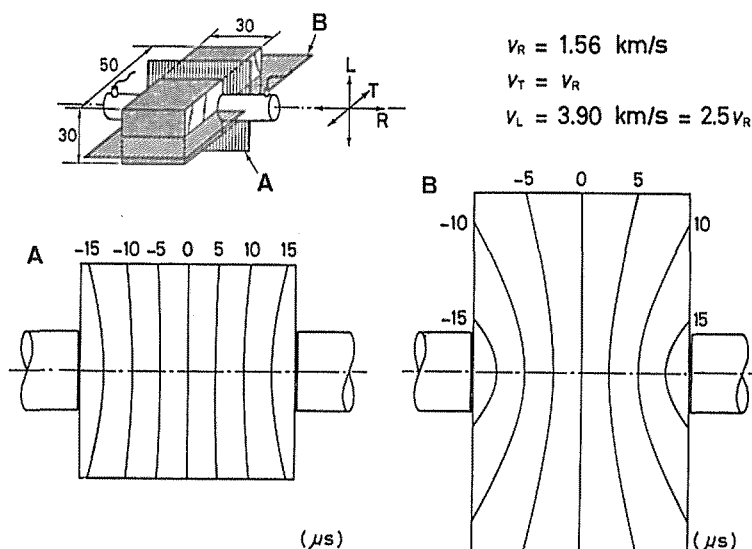


Fig. 8 Curves of equal difference in arrival time on two planes A and B calculated based on a few assumptions. v_R , v_T and v_L denote radial, tangential and longitudinal speeds of AE propagation, respectively.

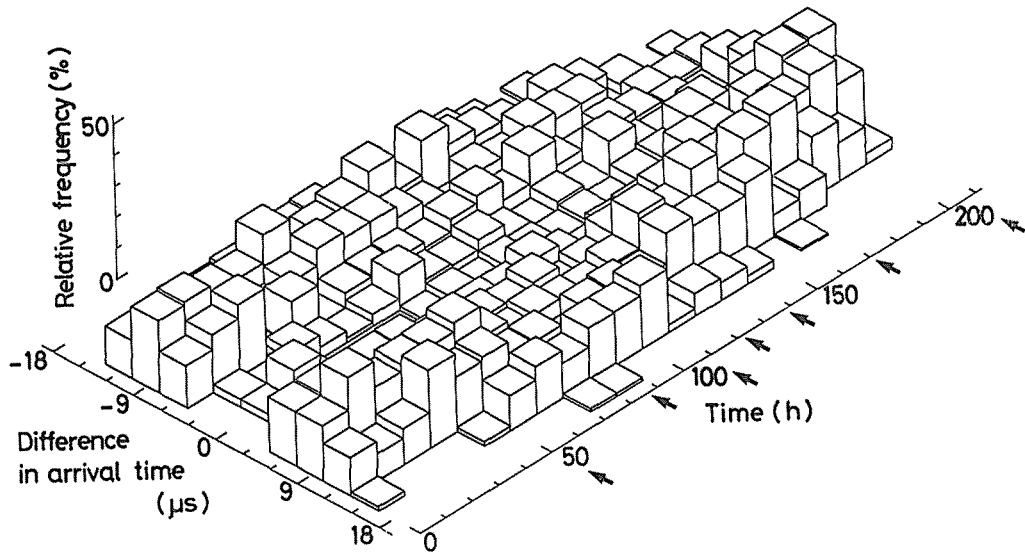


Fig. 9 Changes of distribution of difference in arrival time during drying. Drying condition was changed at points indicated by arrows.

は表面からの距離ではなく、測定した時間差のままに表示することにした。

Fig. 9 は、10時間ごとに集計した到達時間差の分布を全乾燥時間について表示したものである。時間差の分布は、乾燥初期では絶対値の大きい方に二つのピークをもち、おもに試料表面または表面近くで AE が発生していることがわかる。一方、設定変更に伴う AE 事象率の過渡的低下が現れ (Fig. 7)、応力が反転したと考えられる 100 時間以後では、二つのピークが時間差 0 の付近に収束する傾向を示し、AE の発生域が次第に内層部に移行していることが推定される。また、図中に矢印で示した雰囲気の設定変更直後に時間差の分布が全体的に外側 (絶対値が大きくなる方向) に広がり、ピークの位置が急に変化する傾向が認められた。これは、前節で指摘した乾燥応力の過渡的変動に対応しており、設定変更に伴って AE の発生域が一時的に移動することを示唆しているものと考えられる。

4. おわりに

乾燥中の板材に発生する応力と AE の関係及び AE 発生源の板厚方向の位置について検討した結果、乾燥応力、特に材内の引張応力成分が AE の発生に深くかかわっていることを確かめることができた。しかし、中央荷重から推定される応力の大きさと AE 事象率は必ずしも対応せず、両者の一般的な関係を見出すことはできなかった。この点については、応力分布の形や最大引張応力の推移、さらに樹種特性などを考慮して検討する必要がある。また、木材の収縮異方性や組織の収縮能の差に基づく応力と AE の関係は、心持材の割れや木口割れの発生部位などに関連して興味深い問題であり、検討すべき課題の一つである。なお、木口面近くでの割れの発生や伸展を AE でとらえられなかったのは、割れに関して発生した AE 波がセンサまで到達しなかったことによるとも考えられ、センサの配置を考慮してさらに検討する必要がある。

引用文献

- 1) Schniewind, A. P.: On the nature of drying stresses in wood. *Holz Roh-Werkstoff* **14** (6). 161-168, 1960
- 2) Honeycutt, R. M., Skaar, C. and Simpson, W. T.: Use of acoustic emissions to control drying rate of red oak. *Forest Prod. J.* **35** (1). 48-50, 1985
- 3) 喜多山繁・淡輪邦彦・里吉健二・野口昌巳: 木材乾燥の AE によるモニタリング. *木材工業*. **40** (10). 464-469, 1985
- 4) Kitayama, S., Noguchi, M. and Satoyoshi, K.: Automatic control system of drying zelkova wood by acoustic emission monitoring. *Acoustics Letters* **9** (4). 45-48, 1985
- 5) 奥村正悟・川元スミレ・森 貴子・野口昌巳: ミズナラの乾燥過程におけるアコースティック・エミッション. *京大演報*. **57**. 300-307, 1986
- 6) 西尾 茂: カップ法による木材乾燥応力の推定 (第2報) カップ法とスライス法の比較. *木材学会誌*. **22** (11). 626-631, 1977
- 7) 井阪三郎: 乾燥応力を利用した木材乾燥スケジュールの自動制御について (1). *木材工業*. **32** (1). 8-11, 1977
- 8) 川元スミレ・豊田宮代子・奥村正悟・野口昌巳: 木材中の AE 波の伝搬特性. 第35回日本木材学会大会研究発表要旨集. p.52, 1985

Résumé

The purpose of this paper is to examine the relationship between acoustic emission (AE) from wood during drying and the drying stresses which cause the surface and internal checks. Specimens of 30 mm thickness, of Japanese oak and cucumbertree, were dried in a small drying chamber, and the AE event count rate and the AE amplitude were measured. The drying stresses of specimens were estimated from the force required to restrain a specimen from cupping (Fig.1). The specimen for this purpose was half the thickness of the original one and all of the faces except one were covered with aluminium foil. Furthermore, the source of emission during drying was located along the thickness of an oak specimen by comparing the arrival time of the signal at two AE sensors (Fig. 2).

The AE rate increased or decreased transiently before or after the reversal of stress in response to the transient variations of drying stress which occurred each time the dry- and wet-bulb temperatures were changed (Figs. 3, 4 and 5). This confirms that there is a close relationship between AE and drying stresses. The AE rate, however, was not necessarily affected by the magnitude of stress, especially for cucumbertree (Fig. 5). The locations of AEs were in the outer zone of wood at early stages of drying, and they moved towards the inner zone after the reversal of stress (Figs. 7, 8 and 9). This suggests that AEs are mainly generated in the region where the wood fibers are stressed in tension.