

# 木材の乾燥過程で発生する AE についての二三の考察 (続)

奥村 正悟・丑丸 靖史・野口 昌巳

Further Experiments on Acoustic Emissions  
during Wood Drying

Shogo OKUMURA, Yasushi USHIMARU and Masami NOGUCHI

## 要 旨

乾燥中の木材における AE の発生機構を探るための研究の続報として、木取りの異なる 2 種類の生材小試片を用いて乾燥と吸水を 10 回繰り返したときの乾燥時の AE 発生、および割れを生じさせるために板目小試片の接線方向の収縮を拘束して乾燥したときの AE 発生と AE 源の位置について検討した。

乾燥と吸水を繰り返すと AE 発生が若干変化する場合もあるが、基本的な発生パターンは乾燥回数によって変化せず、樹種および木取りに特有の AE 発生を繰り返した。収縮を拘束すると AE 事象総数がわずかに増えるが、AE の発生経過は拘束しない場合と同様であった。このことおよび AE 源の位置標定結果から、乾燥過程で検出される AE のうち収縮拘束による応力や割れに関係するのはわずかであり、大部分はそれらに関係なく試片全体から発生していると結論した。

## 1. はじめに

既往の研究<sup>1-6)</sup>によって、木材の乾燥過程では突発型の AE がかなり多量に発生すること、その総発生数および単位時間当りの発生数は樹種および乾燥条件に依存し、とくに関係湿度の変化に敏感に反応すること、乾燥の進行によって木材が平衡含水率に達すると AE 発生は停止することなどが明らかにされている。これらの知見は、乾燥中の木材では瞬間的にエネルギーを解放するような微小な破壊あるいは変形が相当数生起していることを示している。しかし、乾燥中の木材における主要な損傷の一つである乾燥割れおよびその原因となる乾燥応力と AE 発生の関係は不明確であり、乾燥過程における水分移動を含めた木材の内部状態の微視的な変化と AE 発生の関係、すなわち AE の発生機構についてはほとんど明らかにされていない。

そこで前報<sup>7)</sup>では、乾燥中の木材における AE の発生機構を探るための二三の基礎的な実験を試み、AE は生材の乾燥過程でのみ顕著に発生し、その後繊維飽和点以下で吸放湿を繰り返してもほとんど発生しないこと、木口円板に横断面の収縮異方性に基づく応力を軽減するための半径方向の切り込みを入れても AE 発生はほとんど変化しないこと、両木口面のみを蒸発面とした試料における AE の主な発生域は含水率が繊維飽和点を示す付近にあることなどを明らかにした。さらに、吸放湿を繰り返した試料を水中浸漬後乾燥すると再び多量の AE が発生するという興味

深い知見を得た。本研究では、これらの結果を踏まえ、試料を乾燥した後に十分な水分を与えて再度乾燥することを繰り返したときの AE 発生 (実験 I), および試料に割れを発生させるために収縮を拘束して乾燥したときの AE 発生と AE 源の位置 (実験 II) について検討した。

なお、本研究の概要は第 39 回日本木材学会大会 (平成元年 4 月, 那覇) において口頭発表した。また、本研究の一部は昭和 63 年度科学研究費補助金 (総合研究 (A), 代表者野口昌巳) によった。

## 2. 実 験

### 2.1 試料と実験操作

用いた試料は芦生演習林産のミズナラ (気乾比重 0.72 ~ 0.76), ミズメ (0.60 ~ 0.61), スギ (0.33 ~ 0.39) の生材である。ミズナラとミズメは心材から, スギは辺材 (板目, 後述) および辺材と心材にまたがった部位 (木口) から試片を作製した。

実験 I では木取りの違う 2 種類の試片 (木口 50 (R) × 50 (T) × 5 (L) mm, 板目 5 (R) × 50 (T) × 50 (L) mm) を用い, 乾燥 (乾球温度 60°C, 関係湿度 60%) と吸水 (減圧下で 12 ~ 30 時間水中浸漬) を 10 回繰り返した。AE は 1 ~ 5 回目および 10 回目の乾燥時に, センサを試片の中央部に取り付けて計測した。なお, ミズメは板目試片のみを用いた。

実験 II では実験 I と同形の板目試片の両木口に切り欠き (深さ 12 mm, 幅 24 mm) を入れたものを用い, 実験 I と同じ条件で乾燥した。このとき, 半数の試片は切り欠きにアルミニウム合金製のくさびを押し付けて接線方向の収縮を拘束し (Fig. 1, 2), 残りの半数は対照試片としてくさび無しで乾燥した。AE は二つのセンサで計測し, AE の発生経過, 総発生数, 発生位置などを両試片で比較した。なお, AE 発生を比較した 1 組の試片は同一の板目板 (幅 50 mm, 厚さ 5 mm) の隣接部位から採取した。また, 拘束試料ではカッタナイフを用いて切り欠きの底に深さ約 1 mm の切り込みを入れた。

実験に用いた試片は全て繊維方向に隣接する 2 枚を 1 組

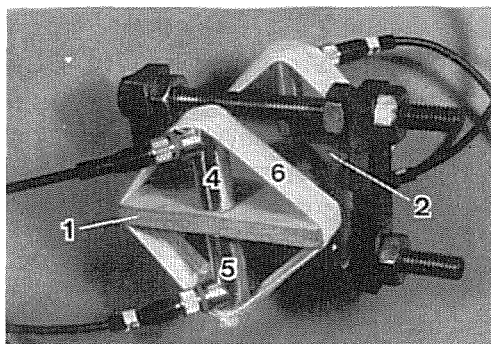


Fig. 2 Setup for Experiment II.  
1-5, see Fig. 1; 6, rubber band.

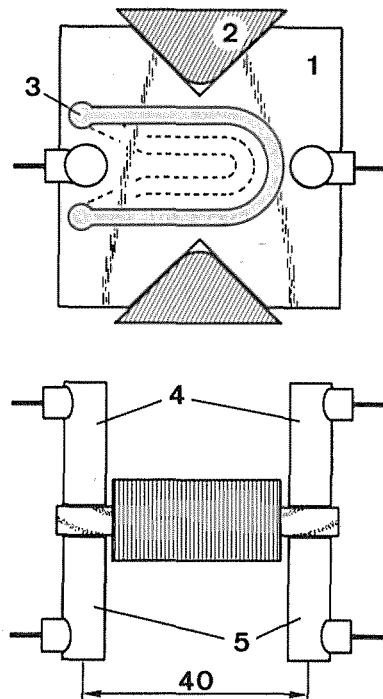


Fig. 1 Specimen and AE sensors mounted for Experiment II.  
1, specimen; 2, aluminum alloy; 3, conducting paint; 4, sensor for AE measurement; 5, sensor for measurement of propagation speed of AE wave.

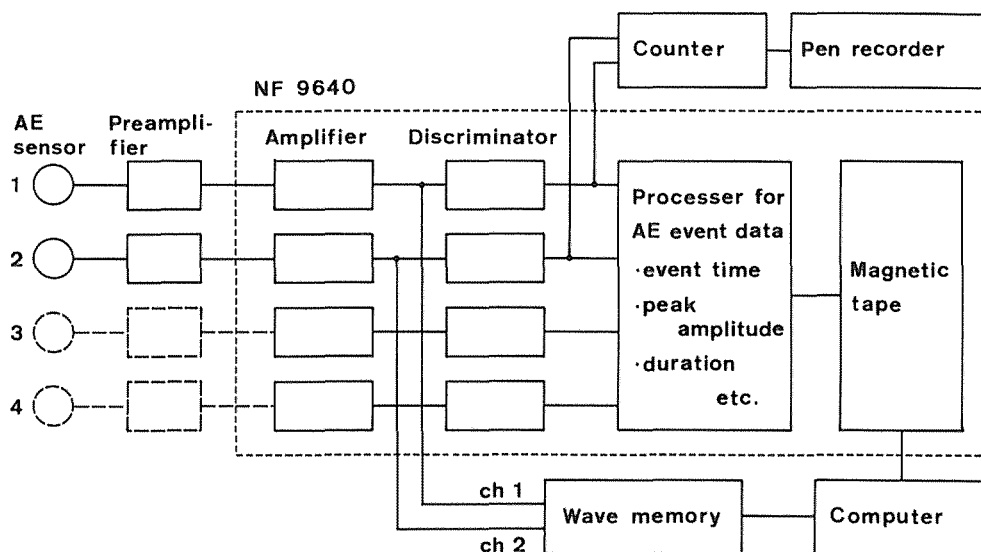


Fig.3 Block diagram of AE measurement for Experiment II.

とし、一方を AE 計測用、他方をロードセルによる重量（含水率）測定用として用いた。

## 2.2 AE 計測

実験 I と II で用いた AE センサはいずれも共振周波数 150 kHz である。センサの出力は総合利得 70 dB で増幅後、しきい値 200 mV を越えたものを AE 事象として計数した。

実験 I での試料へのセンサの取り付け方および用いた AE 計測装置は前報<sup>7)</sup>と同様である。また、AE 事象総数、AE 事象率、AE 事象の最大振幅の 100 事象ごとの平均である平均 AE 振幅は、ペンレコーダに記録した事象総数および平均 AE 振幅を 5～50 分間隔で読み取って求めた。

実験 II の AE 計測には、4 チャンネルの AE 信号を増幅してしきい値弁別し、それぞれの AE 事象の発生時刻、最大振幅、持続時間など（事象データ）を高速で磁気テープに記録できる装置（NF 製 9640）を用いた（Fig. 3）。ただし、この実験では二つのチャンネルのみを利用し、通常はカウンタで実験 I と同様の事象計数のみを行い、15 分～1 時間ごとに各チャンネル約 1000 個の事象データを磁気テープに記録し、実験終了後にコンピュータで解析した。また、AE 信号の波形を 2 チャンネルのウェーブメモリを利用して適宜記録した。AE 源の位置標定には AE 事象の発生時刻（AE 信号がしきい値を越えた時刻）および事象データを収集する直前または直後に測定した AE 波の伝搬速度を用いた。伝搬速度は、試片の裏側に AE 計測用とは別のセンサを二つ取り付け、一方に方形波を印加して発生させた擬似 AE 波がもう一方に到達するのに要する時間をウェーブメモリで測定することによって求めた（Fig. 1）。

## 2.3 割れの検出

実験 II における割れの発生は、試片の表と裏に塗布した導電性塗料（幅約 3 mm）の破断によって検出した（Fig. 1）。切り欠きの底から割れが進展すると、まず外側（切り欠きの底から約 3 mm）の回路が遮断され、さらに割れが進展すると内側（切り欠きの底から約 8 mm）の回路が遮断される。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 乾燥吸水の繰り返しと AE 発生 (実験 I)

生材小試片を用いて乾燥と吸水を繰り返したときの 1～5 回目と 10 回目の乾燥における AE 事象総数 ( $T$ ), AE 事象率 ( $R$ ), 最大振幅を 100 事象ごとに平均した平均 AE 振幅 ( $P$ ), および試片の重量変化から求めた含水率 ( $M$ ) の時間変化を Fig. 4 に示す。

ミズナラ木口試片の 1 回目の乾燥では, 事象率の曲線から分かるように, AE は乾燥開始直後から含水率の低下がほとんど認められなくなる約 2 時間の間に二つのピークを示して多量に発生し, その後低レベル (2000 /min 程度) の発生を約 15 時間続けてから発生を停止した。一方, 2 回目以降の乾燥では, 乾燥初期の事象率曲線が 1 回目とやや異なるものの, 事象率, 事象総数, 平均振幅の全体的な時間変化の様子は乾燥を重ねてもほとんど変化していない。ミズナラの板目試片についても, AE の基本的な発生パターンは乾燥回数によって変化していない。しかし, 事象率曲線の形は木口試片に比べて安定せず, とくに 1 回目で認められた乾燥初期の事象率の高い部分が 2 回目以降では消失している。また板目試片では, 含水率の低下は木口試片よりも遅いが, 含水率の低下が認められなくなるとともに AE 発生が停止するため, AE の発生期間は木口試片よりも短い。

スギの木口および板目, ミズメの板目試片についてもミズナラと同様, 事象総数, 事象率, 平均振幅の時間変化の基本的な形は乾燥回数によって変化しなかった (Fig. 4 b, c)。しかし, スギの板目試片では乾燥前半での, ミズメの板目試片では乾燥後半での事象率が乾燥回数とともに変化し, スギの板目試片の場合は AE 発生が停止するまでの事象総数が乾燥回数とともに低下する傾向を示した。また, ミズナラと同様, スギについても板目試片が木口試片よりも短い時間で AE 発生を停止した。なお, 乾燥中の平均 AE 振幅はミズナラでは比較的安定しているが, スギとミズメでは AE 発生が停止する直前に急上昇してピークを示した後急激に低下した。

以上のように, 一旦乾燥した試片に十分な水分を与えてから乾燥すると, 再び多量の AE が発生するという現象<sup>7)</sup>は, 乾燥と吸水を 2 回以上繰り返しても生起することが確かめられた。しかも, 10 回程度の乾燥と吸水の繰り返しでは AE 発生の基本的パターンは乾燥回数によって変化せず, 樹種および木取りに特有のパターンを繰り返すことがわかった。なお, 予備実験によって, 吸水過程では AE 発生が無いことを確かめた。

ところで, ミズナラの木口試料の 10 回目の乾燥時に試料中央部で軽微な割れの発生が認められたことを除いて, 実験中の試料にはいわゆる乾燥割れなどの巨視的な破壊は生じておらず, また割れが認められたときの AE 発生に他の場合と異なるところは見出せない。したがって, 検出された AE の多くは巨視的な破壊には直接結び付かない微小な破壊あるいは変形に伴って発生していると考えるのが最も自然であろう。この AE の発生機構を本実験の結果から論じることにはできないが, AE の発生パターンに樹種および木取りによる顕著な差が認められることから, 木材の組織構造および水分移動の異方性が AE 発生に密接に関与していることは確かである。また, 乾燥回数による AE 発生パターンの変化については, 生材の乾燥である 1 回目と 2 回目以降の差は分布状態も含めた含水率の差に帰することができるであろう。一方, 2 回目以降に認められる変化は, 乾燥と吸水の繰り返しによる木材の質的な変化, 例えば木材の枯らしなどに関係しているものと考えられる。なお, 乾燥と吸水を 10 回繰り返した試料について, 繊維および仮道管壁の内腔面を SEM で観察してみたが, 1 回乾燥しただけの試料に比べて特別な変化は認められな

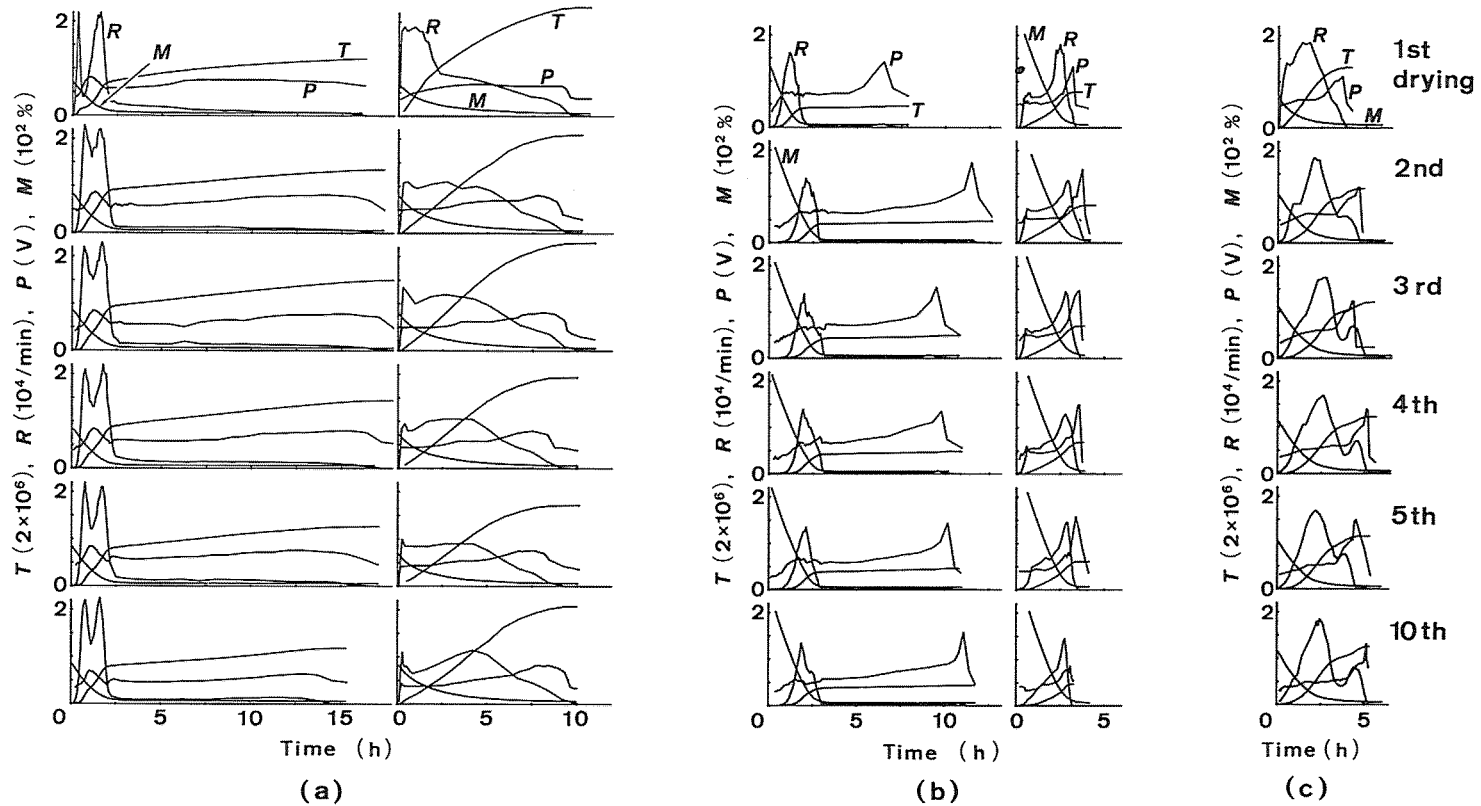


Fig. 4 AE generation during drying of cross-cut (left) and flat-sawn (right) specimens of (a) mizunara and (b) sugi and (c) flat-sawn specimen of mizume in repeated cycles of drying and wetting (Experiment I).  
 $T$ , AE total event count;  $R$ , AE event count rate;  $P$ , mean AE amplitude per 100 events;  $M$ , moisture content.

かった。

### 3.2 収縮拘束と AE 発生 (実験 II)

木材の乾燥割れおよびその原因となる乾燥応力が AE 発生と密接に関係しているのであれば、乾燥中に割れる試料の方が割れないものより多くの AE を発生するはずである。この観点から前報<sup>7)</sup>では木口円板における半径方向の切り込みの有無と AE 発生との関係について検討し、切り込みは割れや変形を著しく軽減するが、AE 発生にはほとんど影響を及ぼさない、すなわち横断面の収縮異方性に基づく割れや応力は AE 発生にそれほど関係していないと結論した。しかし、巨視的な割れに関係しない AE が切り込みの影響を隠した、あるいは円板の周辺部で発生した AE が随に取り付けたセンサに到達するまでに減衰した<sup>8)</sup>可能性も残っている。そこで、本実験では比較的小さい試片を用い、AE の発生経過、発生位置、振幅分布などに及ぼす収縮拘束の影響を検討した。

Fig. 5 は収縮を拘束した試片と対照試片について、AE 事象率と含水率の時間変化を示したものである。なお、図には 2 個のセンサそれぞれで計測した事象率の時間変化を示し、また AE 発生が停止するまでに各センサで検出した AE 事象総数を付記した。Fig. 5 からわかるように、試片の温度や含水率分布が安定しないと考えられる乾燥初期を除いて、事象率は拘束、対照試片ともほぼ同様の経過をたどり、ミズナラでは乾燥開始後約 7.5 時間、ミズメとスギでは約 3 時間で AE 発生が停止した。両試片の事象総数を 2 個のセンサの計数値の平均で比較すると、拘束した方がミズナラで 17%、ミズメで 20%、スギで 8% 多くなっている。拘束試片に塗布した導電塗料は、ミズナラでは外側が 2.8 時間に、スギでは外側が 2.2 時間に、内側が 2.8 時間に破断したが、その時間付近で事象率に特別な変化は認められない。なお、ミズメでは切り欠きの底に割れ

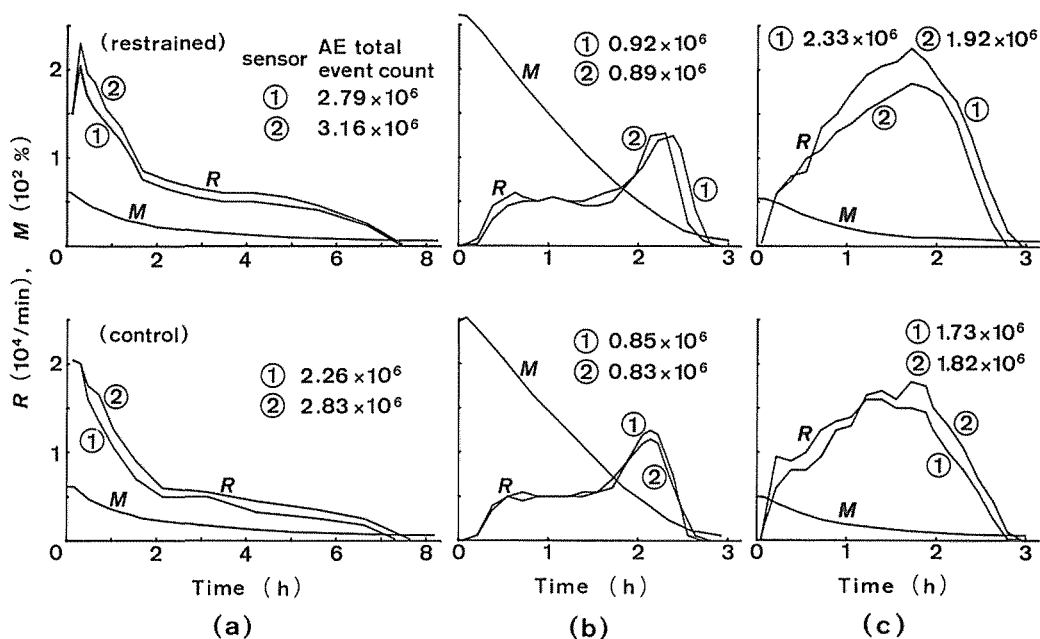


Fig. 5 AE event count rate and final AE total event count measured with two sensors in drying of restrained (upper) and control (lower) specimens of (a) mizunara, (b) sugi and (c) mizume (Experiment II).

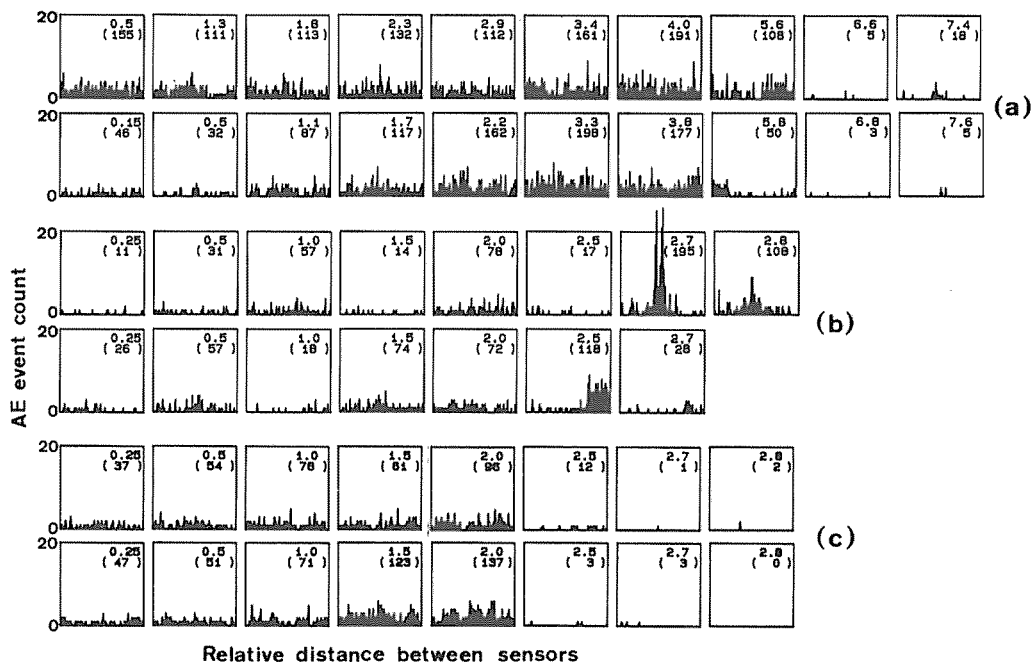


Fig. 6 Linear distributions of AE sources at different times in drying of restrained (upper) and control (lower) specimens of (a) mizunara, (b) sugi and (c) mizume shown in Fig. 5.

Numerals without and with parenthesis indicate drying time in hour and total count of AE events located among about 1000 event pairs, respectively.

は生じたが、導電塗料を破断するところまで進展しなかった。

Fig. 5 に示した拘束と対照試片の乾燥過程における AE 源の一次元位置標定結果を、二つのセンサ間の頻度分布として表したものを Fig. 6 に示す。なお、各時間で位置標定できた AE の個数を図に付記した。また、AE 波の伝搬速度は、ミズナラは 1.11 ~ 1.12 km/s で乾燥中ほぼ一定であったが、乾燥の進行とともにミズメでは 1.21 から 1.31 km/s に、スギでは 1.35 から 1.12 km/s に変化した。Fig. 6 から、どの樹種についても、拘束の有無にかかわらず AE は二つのセンサ間でほぼ均等に発生していることがわかる。しかし、ミズナラとスギの拘束試片では、AE 発生が停止する直前になると発生源が中央部に集中する傾向を示した。すなわち、この時点で発生した AE の多くは収縮拘束によって生じた割れの進展に関係していると考えられる。ただし、割れはこの時点よりもかなり前に生じているので、割れに関係した AE が多数発生しているのであれば、より以前の時点でも AE 源が中央部に集中していてもいいはずである。この点については、AE 発生が活発なときには、試片全体から発生する割れに関係しない AE が大部分を占めるために位置標定の結果が均一分布となるが、AE 発生が停止する直前になると割れに関する AE のみが残るようになり、AE 源が中央部へ集中する結果になると考えれば理解できるであろう。

ところで、それぞれの時点でセンサ当たり約 1000 個の AE 事象についてのデータを収集したにもかかわらず、位置標定できたのは多い場合で 200 個程度であった。これは、一方のセンサで検出した AE のうち、もう一方のセンサでも検出できるのはせいぜい 20% であることを意味する。すなわち、本実験の場合センサ間距離が 40 mm であるから、試料表面に取り付けた 1 個のセ

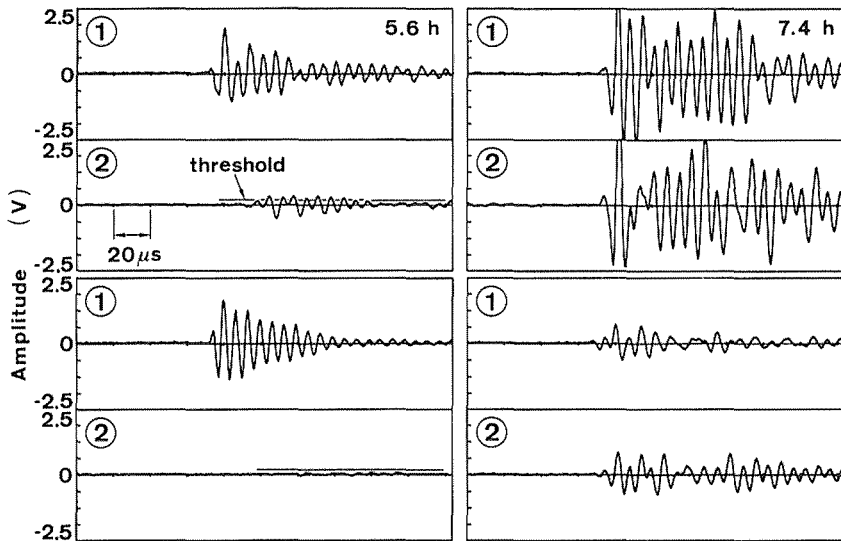


Fig. 7 Examples of a pair of AE signals from two sensors recorded at 5.6 h (left) and 7.4 h (right) in drying of restrained specimen of mizunara shown in Fig. 5a.

ンサが AE 発生を十分に監視できる範囲は半径で 20 mm にも満たないことになる。このことを AE 信号波形から考察するため、Fig. 7 にミズナラの拘束試料で 5.6 および 7.4 時間に記録した AE 信号波形の例を示す。ここで、5.6 時間の二組の波形は位置標定が可能な場合 (上) と不可能な場合 (下) の例であり、多くの AE は、後者の波形のように、一方のセンサでかなり大きい振幅の AE として検出されても、他方のセンサではほとんど検出できないか、検出できてもしきい値を越えることができないほど減衰していることになる。また、AE 発生が停止する直前の 7.4 時間では、観察した波形の半数以上が二つのセンサにほぼ同時に到達しており (Fig. 7 b), AE は主に試片の中央部で発生していることがわかる。

Fig. 8 はスギの拘束と対照試片について、乾燥中の各時点において二つのセンサで検出した合計約 2000 個の AE 事象の最大振幅の分布を示したものである。図から、拘束試料の乾燥末期に分布がやや乱れている以外は、乾燥末期に時間および拘束の有無にかかわらず、振幅分布の形はほとんど変化していないことがわかる。これはミズメとミズナラについても同様であっ

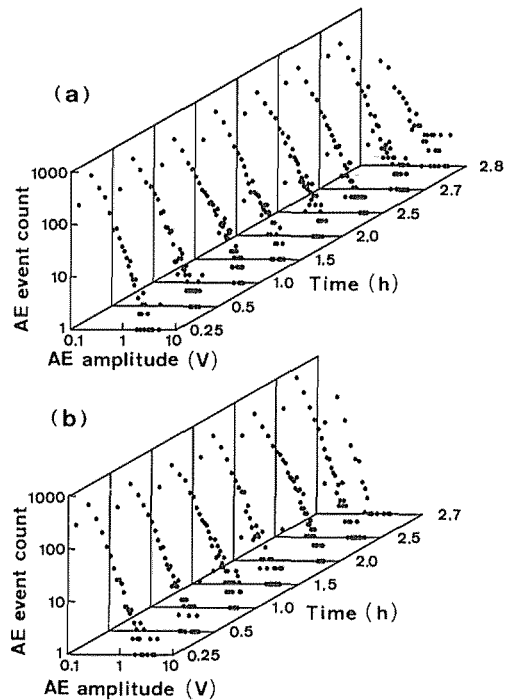


Fig. 8 Amplitude distributions of AE signals from two sensors at different times in drying of (a) restrained and (b) control specimens of sugi shown in Fig. 5b.



た。

以上のように、接線方向の収縮を拘束して巨視的な割れを発生させた場合、確かに割れに関係すると考えられる AE が検出された。しかし、その AE は事象総数を 1~2 割程度増すことはあっても、乾燥過程の全体を通じた事象率や振幅分布にはほとんど影響を及ぼさず、乾燥中に検出した大部分の AE は割れに関係なく試片全体から発生していることが明らかになった。

#### 4. お わ り に

前報<sup>7)</sup>および本研究で得られた知見を総合すると、木材は生材や乾燥後に吸水させた材のように繊維飽和点以上の十分な水分を含んだ状態から水分を放出させると AE を発生し、その一部は乾燥応力に基づく巨視的な破壊（割れ）に関係しているものの、大部分は割れの発生や進展には直接関係しないと結論できる。この割れに直接結び付かない AE の発生機構は現時点では不明であり、乾燥あるいは乾燥と吸水の繰り返しの過程で木材に現れる質的あるいは微細構造の変化と結び付けて今後検討すべき課題である。また、木材乾燥への AE の応用に関しては二つの問題が残る。その一つは、乾燥割れの監視に AE を利用する場合、乾燥過程で多量に検出される AE の中から割れに関係する AE をどのように選別するかということである。本研究でも AE 信号の振幅と持続時間の点から一部検討したが、割れに関係する AE の特徴を抽出するまでには至らなかった。もう一つの問題は、本研究の位置標定結果から明らかなように、1 個のセンサが AE 発生を監視できる範囲がかなり狭いことである。測定系の S/N を改善してしきい値をできるだけ低くすれば、センサの監視範囲をある程度広げることは可能である。しかし、雑音の混入しやすい現場への応用を考慮すると、しきい値を本研究の設定値よりも大幅に下げるとはかなり難しいであろう。

#### 引 用 文 献

- 1) BECKER, H. F.: Schallemissionen während der Holz Trocknung. Holz als Roh- und Werkstoff. 40 (9). 345-350, 1982
- 2) 野口昌巳・加川幸雄・片桐 譲: 広葉樹の乾燥過程で発生するアコースティック・エミッション. 木材学会誌. 29 (1). 20-23, 1983
- 3) 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 (3). 171-175, 1985
- 4) 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
- 5) 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
- 6) NOGUCHI, M., KITAYAMA, S., SATOYOSHI, K. and UMETSU, J.: Feedback control for drying *Zelkova serrata* using in-process acoustic emission monitoring. Forest Prod. J. 37 (1). 28-34, 1987
- 7) 奥村正悟・清瀧登志子・野口昌巳: 木材の乾燥過程で発生する AE についての二三の考察. 京大演報. 59. 283-291, 1987
- 8) 奥村正悟・川元スミレ・豊田宮代子・野口昌巳: 木材中の AE 波の伝搬特性. 京大演報. 60. 299-309, 1988

#### Résumé

This paper describes further experiments to examine the generation mechanism of acoustic emission (AE) during wood drying. First, the AE generation during repea-

ted cycles of drying and wetting was examined for small specimens of two types, cross-cut (50 (R)  $\times$  50 (T)  $\times$  5 (L) mm) and flat-sawn (5 (R)  $\times$  50 (T)  $\times$  50 (L) mm), of mizunara, sugi and mizume (Experiment I). Secondly, flat-sawn specimens were dried under restraint of the tangential shrinkage (Figs. 1 and 2), and some AE parameters and the locations of AE sources were compared with those for control ones (Fig. 3) (Experiment II). The gain and threshold for AE signals were set at 70 dB and 200 mV in two experiments.

The basic process of AE generation during wood drying hardly changed with the repetition of drying and wetting cycles, though the generation process was more or less modified probably due to some change of the physical nature of wood (Fig. 4). A great quantity of AEs were generated repeatedly in a peculiar manner depending on species and specimen types. Although drying checks were induced by restraining the shrinkage and the final AE total event count was somewhat greater for the restrained specimens than the control ones, curves of event count rate for both specimens were quite similar (Fig. 5). The AEs due to the checking of the restrained specimens were discernible in the AE location only when the AE generation almost ceased close to the end of the drying (Fig. 6). From these findings it was concluded that only a few AEs were generated in connection to the checking and most of AEs detected were generated irrespective of the checking from the whole of the specimen.