

木材の乾燥過程で発生するAEに ついての二三の考察

奥村 正悟・清瀧登志子・野口 昌巳

A Few Experiments on Acoustic Emissions during Wood Drying

Shogo OKUMURA, Toshiko KIYOTAKI 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、生材小試片を用いて乾燥と吸湿を繰り返したときの AE 発生、木口円板乾燥時の AE 発生に及ぼす半径方向の切り込みの影響、而木口面のみを蒸発面とした試料乾燥時の AE 源の位置と繊維方向の含水率分布の関係について検討した。

AE は生材の乾燥過程で顕著に発生し、その後の繊維飽和点以下での乾湿繰り返しではほとんど発生しなかったが、水中浸漬後乾燥すると再び多量に発生した。円板に切り込みを入れると試料の変形や割れは著しく軽減されたが、AE 事象率や AE 総数には切り込みの影響が認められなかった。木口面のみから乾燥が進行する場合、AE のおもな発生域は含水率が繊維飽和点を示す付近にあり、その領域が木口面から内部へと移行するにつれて AE の発生域も内部に移行することが確かめられた。

1. はじめに

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) および乾燥制御への AE の応用については、発生する AE が突発型であること¹⁻⁴⁾、その単位時間当たりの発生数 (発生率) が樹種や乾燥条件 (とくに関係湿度) に依存すること¹⁻⁴⁾、AE の発生率やその時間微分があらかじめ定めたレベルを越えないように関係湿度を制御すれば割れの発生が防止できること⁵⁻⁷⁾などが既に明らかにされている。このような AE は、木材内部に生じた種々の乾燥応力によって引き起こされた微小な破壊に伴って発生していると考えられる。しかし、巨視的な割れの原因となる乾燥応力の消長と AE 発生が必ずしも対応しないこと⁸⁾、割れ発生によって応力が緩和されたはずなのに AE 発生率が上昇を続けること⁹⁾、割れが発生しない場合でも木材の強度試験に比べて一般にかなり多量の AE が発生することなどがあり、AE がどのような応力下のどのような破壊に伴って発生しているのか、巨視的な破壊 (乾燥割れ) と微小な破壊 (AE 発生) はどのように関係しているのか、などについてはまだ不明な点が多い。そこで本研究では、乾燥中の木材における AE の発生機構を探るための基礎的な実験を二三試みた。

まず、生材の小試片を用いて乾燥と吸湿を繰り返し、一旦乾燥した材の吸湿過程での AE 発生の有無と、吸湿後に再度乾燥したときの AE 発生について調べた (実験 I)。次に、木材横断

面の収縮異方性に基づく応力と AE 発生との関係について検討するため、木口円板の乾燥過程での AE 発生に及ぼす半径方向の切り込みの影響を調べた (実験 II)。さらに、両木口面のみを蒸発面とした試料を用い、乾燥過程における AE 発生源の位置と繊維方向の含水率分布の関係について検討した (実験 III)。

なお、本研究の概要は第37回日本木材学会大会 (昭和62年4月、京都) において展示発表した。また、本研究の一部は昭和61年度科学研究費補助金 (総合研究(B), 代表者野口昌己) によった。

2. 実 験

2.1 試料と実験操作

実験に用いた試料の形状と寸法、AE センサの取り付け位置を Fig. 1 に示す。試料は水中に保存 (ベイツガは冷蔵) してあった生材から作製し、ポリエチレン袋に入れて冷蔵庫で1~2か月放置してから実験に供した。

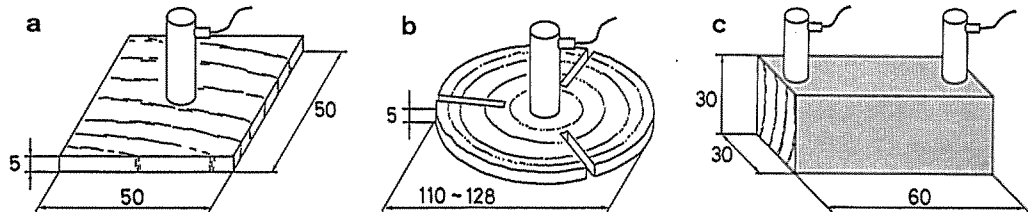


Fig. 1. Specimens and AE sensors mounted for Experiments (a) I, (b) II and (c) III.

実験 I ではミズナラ、ケヤキ、ミズメ、スギ、ベイツガから得た繊維方向の厚さ 5 mm の試料を用い、温度 60°C—関係湿度 40% での乾燥と 60°C—95% での吸湿を繰り返した。この際、繊維方向に隣接する試料 3 枚を 1 組とし、AE 計測用、ロードセルによる重量 (含水率) 測定用、インダクタンス式変位変換器による接線方向の寸法 (収縮率) 測定用としてそれぞれ用いた。なお、試料の木取りの都合上、寸法測定方向と年輪方向は必ずしも一致せず、45° 近くそれた場合もある。

実験 II ではスギとケヤキを用い、それぞれの丸太から厚さ 5 mm の円板 2 枚を連続して作製し、一方の円板には半径方向に切り込み (半径の約 2/3 の深さ) を入れた (Fig. 1b)。これらの円板は 60°C—45% または 80°C—40% の条件で乾燥し、随に取り付けたセンサで AE を計数した。そ

れと同時に、試料重量の測定および目視による試料の変形と割れの観察も行った。

実験 III ではミズナラとベイツガを用い、両木口面を残してゴム系接着剤とアルミ箔で表面をシールした。試料は 3 個を 1 組として 60°C—40% で乾燥し、その内の 1 個には、AE 発生源の位置標定のために、木口面近くに 2 個の AE センサを取り付けた (Fig. 1c)。他の試料は乾燥途中に適宜取り出して繊維方向約 4 mm ごとに鋸断し、木口割れの存否を目視によって調べてから、それぞれの含水率を求めた。

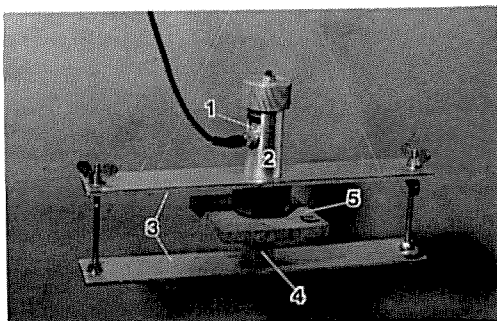


Fig. 2. Apparatus for attachment of an AE sensor to specimens.

- 1, AE sensor ; 2, sensor holder ;
- 3, aluminum plate ; 4, silicone rubber ;
- 5, specimen.

2.2 AE 計測

AE センサは共振周波数 150kHz のものを用い、60dB 増幅後にしきい値 200mV (一部 100mV) を越えたものを AE 事象として計数した。実験Ⅲにおける AE 発生源の位置は、発生した AE 波が 2 個のセンサに到達する時間差の分布から推定した。これらの測定に用いた装置や方法は既報^{8,9)}と同様である。なお、実験ⅠとⅡにおける試料へのセンサの取り付けには Fig. 2 に示した治具を用い、常に一定圧力でセンサを固定できるようにした。

3. 結果と考察

3.1 乾湿繰り返しと AE 発生

生材試料を低湿度と高湿度に繰り返しさらしたときの AE 事象率 (30秒当たり)、試料の平均含水率、収縮率の変化を Fig. 3 と 4 に示す。これらの図から明らかなように、AE 発生はどの樹種においても最初の乾燥を開始した直後から急増し、スギでは明確な二つのピークを他の樹種では一つのピークを示した後で急減した。その後、ミズメ、スギ、バイツガでは AE 発生はほとんど停止し、引き続き吸湿と乾燥の繰り返しによっても AE はまったく発生しなかった。一方、ミズナラとケヤキでは吸湿の開始とともに AE 発生は抑止されたが、2 回目の乾燥を始めると再び AE が発生した。しかし、事象率は 1 回目の吸湿を開始する直前の値を越えることはなく、きわめて低い値であった。この AE も 2 回目の乾燥途中で発生を停止し、その後の吸湿と乾燥過程での発生はほとんど認められない。

Fig. 5 はミズナラとスギについて同様の実験を行ったときの結果であるが、ここでは 3 回目の乾燥を終えた試料を水中に浸漬して十分な水分を与え、密封容器内に数日間放置してから再度乾燥したときの AE 発生も調べた。Fig. 5 の場合も、1 回目の生材からの乾燥過程およびその後の乾湿繰り返し時の AE 発生は Fig. 3, 4 と同様である。しかし、水中浸漬後にもう一度乾燥すると、3 回目の乾燥過程までに発生を停止していた AE が再び顕著に発生し、ミズナラでは

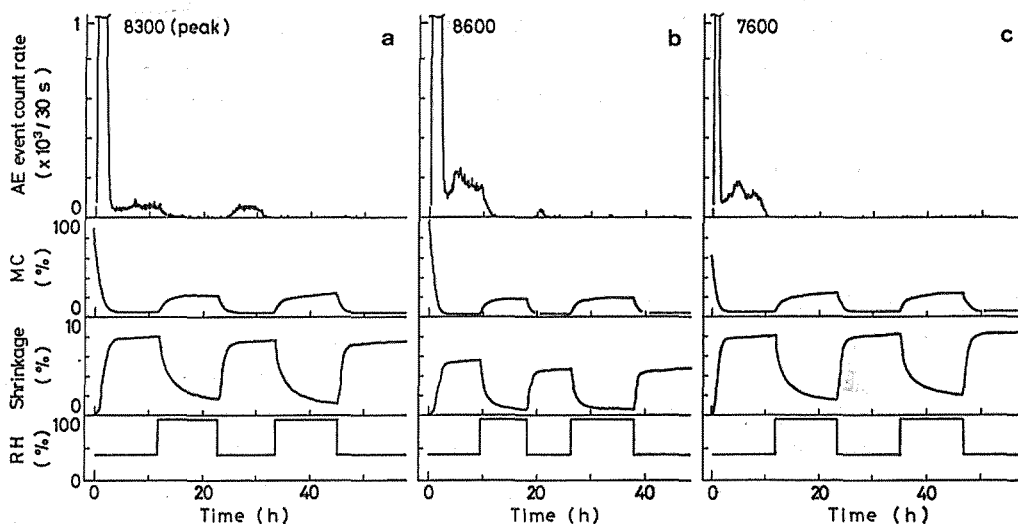


Fig. 3. Changes of AE event count rate, moisture content (MC) and shrinkage during a repetitive change of relative humidity (RH) for (a) mizunara, (b) keyaki and (c) mizume (Experiment I). The temperature was kept constant at 60°C.

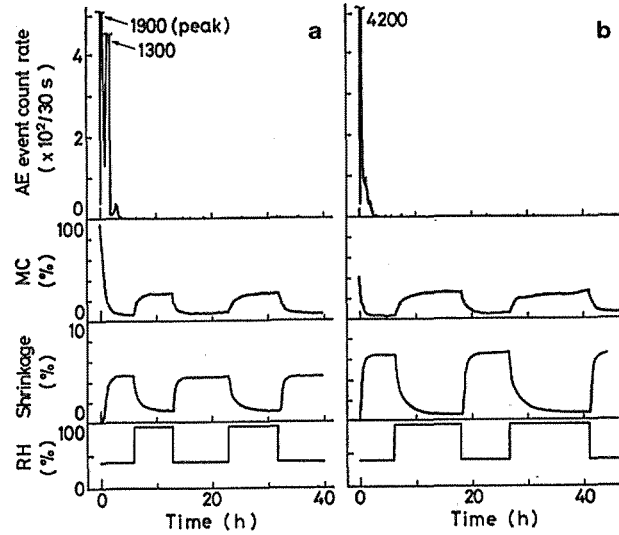


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for (a) sugi and (b) hemlock.

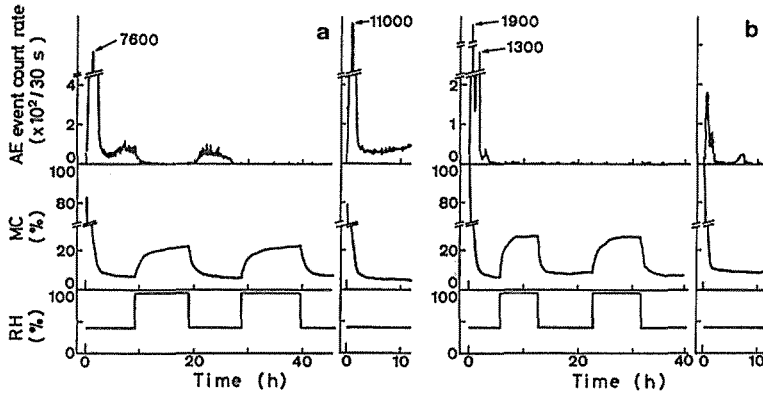


Fig. 5. AE generation in re-drying the specimen soaked in water after a repetitive change of RH.
a, mizunara ; b, sugi.

1回目の乾燥時の事象率を上回る値にまで達した。

乾燥過程における表面と内部の水分傾斜に基づく応力が AE 発生を支配しているのであれば、乾燥した材の吸湿過程における逆の水分傾斜によって AE が発生しても不思議ではない。また、木材の吸放湿の過程における AE 発生にカイザー効果が存在するのであれば、乾燥材の吸湿操作や吸湿後の再放湿操作をしても、応力が前の値を越えない限り AE は発生しないはずである。このような観点から Fig. 3～5 の結果をみると、AE は最初の乾燥過程でのみ顕著に発生し、吸湿過程および 2～3 回目の乾燥過程ではほとんど発生しなかったことから、木材の吸放湿過程での AE 発生にはカイザー効果が存在し、ミズナラとケヤキでは 2 回目の乾燥過程における応力が 1 回目の最終段階での値を越えたものの、一般に吸湿過程および 2～3 回目の乾燥過程での応力は新たに AE を発生させるまでに至らなかったという一つの推論が成り立つ。この考え方

からすると、一旦乾燥した試料にもう一度繊維飽和点を越えるような水分を与えてから乾燥した場合の AE 発生 (Fig. 5) は、十分な水分の供給によるカイザー効果の回復として説明しなければならない。一方、生材や水中浸漬試料のように繊維飽和点を越える水分を含んだ試料の乾燥過程でのみ AE が発生することから、AE の発生には繊維飽和点を越える水分の存在が必須条件であることも考えられる。これらの点については、初期含水率の異なる試料の乾燥や、水中浸漬と乾燥の繰り返しを行って検討する必要がある。

3.2 横断面の収縮異方性に基づく応力と AE 発生

丸太や心持角材を乾燥したときの割れ発生には、横断面における収縮異方性に基づいて生じた接線方向の引張応力が重要な役割を果たしている。したがって、接線方向の自由な収縮を拘束しないようにすると、この種の応力すなわち割れは発生せず、もし丸太や心持角材の AE 発生がこの応力に深く関わっているのであれば、AE の発生数も顕著に低下するはずである。

円板に切り込みを入れずに乾燥すると、スギでは乾燥中の円板の反りが著しく、乾燥開始から 1~1.5 時間後に周縁部で発生した割れが乾燥の進行とともに髄近くまで進展した。ケヤキではこのような割れは発生せず、円板中央部がわずかにふくらむ程度であった。一方、円板に半径方向の切り込み (Fig. 1) を入れると、乾燥中の試料に変形や割れはほとんど認められず、横断面における収縮異方性による応力は切り込みによって著しく低減されたものと考えられる。

Fig. 6 は円板乾燥時の AE 事象率と平均含水率の経時変化の一例である。図には乾燥終了時までの AE 事象総数も付記した。なお、含水率変化には切り込みの有無による違いが認められなかったので 1 本の曲線で示した。Fig. 6 から、切り込みの有無にかかわらず、スギでは含水率 70~80% および 20~30% で、ケヤキでは 30% 付近で AE 事象率が極大値をとっていることがわかる。切り込みを入れると、60°C-45% で乾燥したスギのように事象率のピーク値が低くなる場

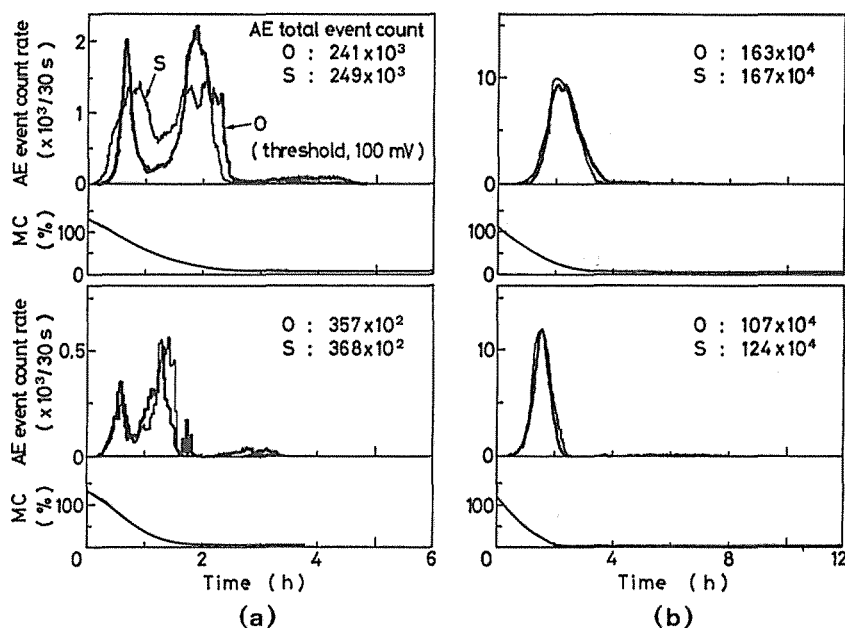


Fig. 6. AE event count rate and final AE total event count in drying disc specimens of (a) sugi and (b) keyaki with (S) and without (O) the radial slits in 60°C-45% (upper) and 80°C-40% (lower) conditions (Experiment II).

合もあるが、他の場合は事象率に切り込みの影響は認められず、同様の値と時間変化を示した。また、事象総数は、切り込みのある方がやや大きい場合もあるが、両者ではほとんど差がなく、切り込みの効果を認めることはできなかった。このような結果は、ケヤキ木口円板の乾燥において、割れ発生と事象総数にはあまり関係がなく、割れが発生しても事象率が低下せずに最大値まで上昇を続けるという知見⁹⁾とも符合する。したがって、円板の乾燥過程における AE 発生には、横断面の収縮異方性による応力およびその応力に起因する割れの発生と進展がそれほど関与していないことが推定される。ただし、切り込みのないケヤキ円板で、予期された顕著な変形や割れが観察されなかったこと、試料が薄いとはいえ繊維方向の水分傾斜を無視することができず、それに基づく応力によって発生した AE が切り込みの効果を隠してしまった可能性があることなど、試料および実験計画に多少問題があるため、異なった試料および乾燥条件についてさらに検討する必要がある。

3.3 AE発生源の位置と含水率分布

AE 発生と含水率の関係については、試料の最も早く乾燥する部分が繊維飽和点を切る頃、すなわちその部分が収縮を始める頃に AE の発生が始まることが既に確かめられている¹⁰⁾。また、乾燥の進行に伴って AE の発生源は蒸発面である試料表面から内層へと移行することも確かめられている⁸⁾。しかし、AE 発生源の位置と含水率分布の関係についてはまったく知見が得られていない。そこで、両木口面のみを蒸発面とした試料について、繊維方向の含水率分布と AE 発生源の位置の関係を検討した。

Fig. 7 はミズナラの含水率と AE 事象率の経時変化、および矢印で示した時点で測定した到達時間差の分布と繊維方向の含水率分布を示す。なお、含水率分布に付記した丸印は鋸断した試料に割れが確認されたことを示す。AE 発生は乾燥開始後 1 時間あたりから活発になって 4 時間前後で最大に達し、最初に含水率を測定した 6 時間ではやや低下するもののまだかなり高いレベ

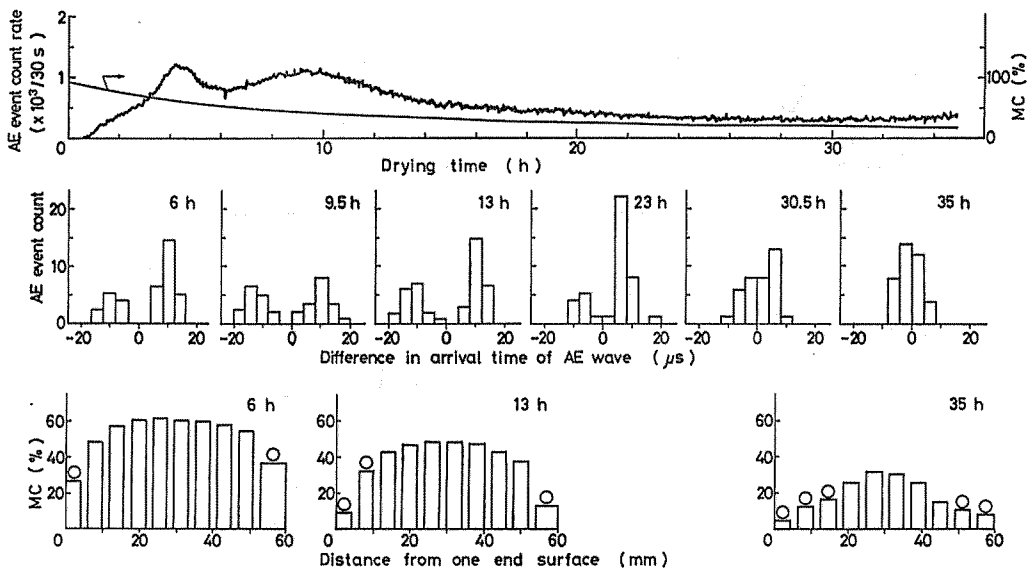


Fig. 7. Changes of AE rate, distribution of difference in arrival time and longitudinal distribution of moisture during drying of mizunara in a 60°C-40% condition (Experiment III). There were end checks in the sections marked with a circle.

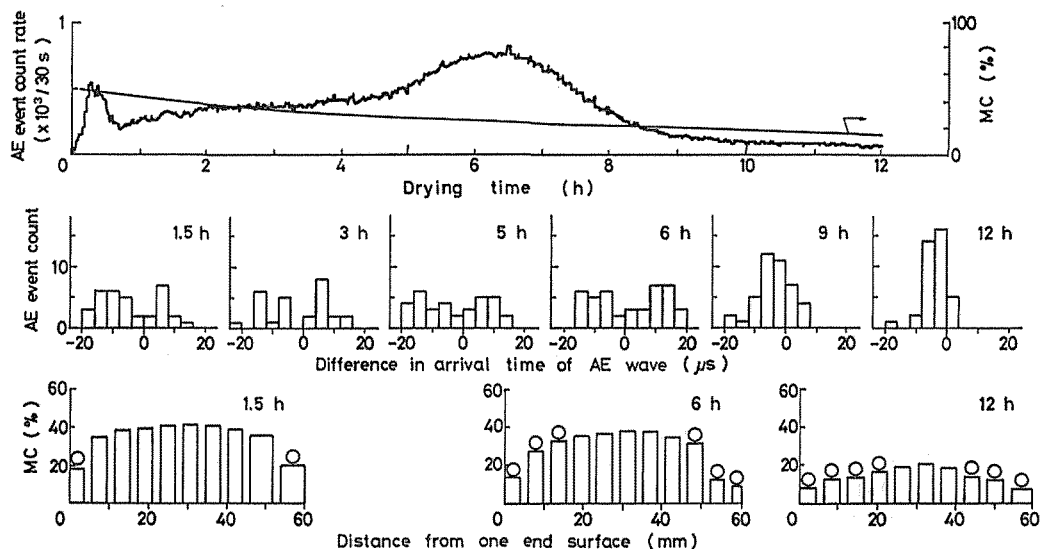


Fig. 8. Same as Fig. 7 but for hemlock.

ルにある。このとき、AE 波の到達時間差は絶対値のほぼ等しい 2 箇所にてピークをもち、AE は両センサの近く、すなわち両木口面近くでもおもに発生していることが推定できる。このことは、そのときの含水率が両木口面近くでのみ繊維飽和点程度まで低下し、内部はまだかなり高い値を保持していることから裏付けられる。その後、到達時間差の分布は AE 発生がまだ高レベルにある 18 時間後もほとんど変わらず、含水率も木口面近くを除いて繊維飽和点以上である。しかし、23 時間後になると時間差分布の二つのピークは 0 に近付き始め、AE 発生がかなり低下した 35 時間後には明らかに一つのピークに収束し、AE は両センサから等距離の領域すなわち試料中央部でもおもに発生していることがわかる。そのときの含水率は試料中央部でも繊維飽和点程度にまで低下していた。

同様な結果はベイツガについても得られた (Fig. 8)。すなわち、乾燥開始後 6 時間までは到達時間差は二つのピークをもち、木口面近くのみが繊維飽和点を下回っているが、AE 事象率がかなり低下し、試料中央部の含水率が約 20% となった 12 時間後には時間差の分布は一つのピークに収束した。

このような知見から、AE のおもな発生域は含水率が繊維飽和点を示す付近にあり、その領域が乾燥の進行とともに木口面から内部へと移行するにつれて、AE の発生域も内部に移行することが明らかになった。なお、AE 発生域の移行と歩調を合わせるように木口割れも内部へと進展するが、両者の関係についてはこの実験の範囲内ではこれ以上議論できない。この点は、個々の AE の発生位置を特定する真の位置標定によらねばならない。

4. おわりに

AE を利用した乾燥装置の自動制御は、ケヤキ木口円板の乾燥について既に実用規模の装置で成果があげられている^{6,7)}。しかし、板材や角材の乾燥については、制御方法の提案¹¹⁾はあるものの、まだ十分な成果が得られていない。その原因としては、板材では試料寸法をある程度以上に

大きくしなければ割れが発生しないこと，試料が大きくなると AE 波の距離減衰によって割れの前兆となる AE が十分とらえられないことなどをあげることができるが，より本質的には AE を利用した乾燥制御の基礎となる AE の発生機構が十分に解明されていないことが考えられる。本研究では，AE の発生機構についての予備的研究として問題点を指摘するにとどまったが，水分傾斜や収縮異方性による応力のみならず，収縮能の異なる組織間や細胞壁層間で発生する応力，水分非平衡下での変形や破壊などを考慮に入れた本格的な検討が待たれる。

引用文献

- 1) NOGUCHI, M., KAGAWA, Y. and KATAGIRI, J.: Detection of acoustic emissions during hardwoods drying. *Mokuzai Gakkaishi*. 26 (9). 637-638, 1980
- 2) KAGAWA, Y., NOGUCHI, M. and KATAGIRI, J.: Detection of acoustic emissions in the process of timber drying. *Acoustics Letters*. 3 (8). 150-153, 1980
- 3) 野口昌巳・加川幸雄・片桐 護：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
- 4) 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 (8). 171-175, 1985
- 5) 喜多山繁・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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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. 251-250, 1986
- 9) 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
- 10) 野口昌巳：木材の乾燥過程におけるアコースティック・エミッション。第29回木材と水研究会シンポジウム講演要旨集. 6-7, 1983
- 11) 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

Résumé

This paper describes three preliminary experiments to examine the generation mechanism of acoustic emission (AE) from wood during drying. First, the AE generation in a drying/damping sequence was examined for small specimens of the three hardwoods, mizunara, keyaki and mizume, and of two softwoods, sugi and hemlock (Experiment I). Secondly, AE measurements during drying of disc specimens were compared between with and without the radial slits (Fig.1), which had been expected to prevent drying checks caused by a difference in radial and tangential shrinkage (Experiment II). Lastly, the difference in arrival time of AE waves at two AE sensors and the moisture distribution along the length were measured in drying the specimens of which longitudinal surfaces were sealed (Fig.1), and the relationship between the locations of AEs and the moisture distribution were examined (Experiment III). The gain and the threshold for AE signals were set at 60 dB and 200 mV in all experiments, unless otherwise stated.

In Experiment I, a great quantity of AEs were generated during the first drying step

from the green condition and few AEs occurred in the subsequent steps of damping and re-drying (Fig.3 and 4). The AE activity, however, was restored by soaking the specimen in water (Fig.5). There was little effect of the radial slits on the AE generation of the disc specimens (Fig.6) , though warping and checking were noticeably eliminated in the slitted discs. In Experiment III, AEs occurred near the both end surfaces at the early stages of drying when only the region close to the end was dried below the fiber saturation point, and their locations moved to the interior of the specimen when the moisture content in that place reached the fiber saturation point (Fig.7 and 8) . This suggests that AEs are mainly generated in the region in which the moisture content decreases to about the fiber saturation point.