

木材の乾燥過程で発生する A E についての

二三の考察 (その 3)

奥村 正悟・廣瀬 浩一・野口 昌巳

A Few Experiments on Acoustic Emissions during Wood Drying III.

Shogo OKUMURA, Koichi HIROSE and Masami NOGUCHI

要 旨

乾燥中の木材における A E の発生機構を探るための研究の第 3 報として、数種の無機塩およびポリエチレングリコール (PEG) で処理したスギとミズナラの小試片を乾燥したときの A E 発生と試片の収縮率、水分蒸発の関係などについて検討した。スギでは処理の種類、乾燥条件にかかわらず乾燥中に検出した A E の総数は試片の木口面の面積収縮率に比例したが、ミズナラでは両者に関係が認められなかった。A E 計測のために設定したデッドタイムと A E 発生の時間間隔の関係を考察した結果、ミズナラでは A E 事象の多量の数え落としのあることが分かった。さらに、A E センサの通常に取り付け方法は試片の局所的な乾燥阻害を引き起こし、A E 発生を長時間持続させることが明らかになった。

1. はじめに

既に報告^{1, 2)}したように、乾燥過程にある木材で検出される A E の大部分は、乾燥割れなどの巨視的な破壊には関係せず、むしろ細胞壁での水分離脱に伴う現象に密接に関係して発生しているもの考えられる。同様の結論は、生材と乾燥途中にある試片の横曲げ試験時の A E 発生を比較した最近の研究³⁾でも得られており、生材では試片が引張側で破壊する直前に A E 発生が集中する特徴的なパターンを示すが、乾燥途中にある試片ではそのような発生パターンはまったく認められず、負荷の有無にかかわらず試験中に多くの A E が発生し続けるとされている。このように、乾燥中の木材から発生する A E の多くは必ずしも巨視的な破壊に結びつかない現象、例えば細胞の収縮に起因する細胞内および細胞間の微小破壊³⁾などに伴うものと考えられるが、乾燥材に吸湿させた後の脱湿過程では A E の発生がほとんどない¹⁾、乾燥材に十分な水分を含ませてから乾燥すると再び A E が発生する^{1, 2)} ことなどがあり、発生機構を明らかにするためにはさらに知見を集めていく必要がある。

本研究では、乾燥中の木材における A E の発生機構を探る研究の一環として、様々な収縮率を得るために 3 段階の相対湿度と収縮を抑制するための無機塩¹⁾およびポリエチレングリコール (PEG)²⁾ による処理を組み合わせる試片の乾燥を行い、その過程で検出される A E の総数と試片の収縮率の関係について検討した。さらに、実験中に明らかになった、A E 事象の数え落とし、A E センサの取り付けによる試片の局所的な乾燥阻害などの A E 計測の問題点についても考察し

察した。

なお、本研究の概要は第41回日本木材学会大会（平成3年4月，松江）において口頭発表した。

2. 実 験

2.1 試 料

試料にはミズナラ（全乾比重0.74）の生材とスギ（0.31）の気乾材を用い，それらの心材部より得た木口面の1辺が50mmの角材から繊維方向の厚さが2mmの試片を作製した。これらの試片は，減圧下で十分吸水させてから後述の処理および乾燥を行った。その際，繊維方向で隣り合う2枚の試片を1組とし，一方をAE計測に，もう一方を含水率測定のための重量測定に用いた。

試片の収縮を抑制するために用いた無機塩は $BaCl_2$ ， $NaCl$ ， $MnCl_2$ ， $MgCl_2$ の4種，PEGは平均分子量1000のものである。試片は，それぞれの塩の飽和水溶液，PEGの9%および25%水溶液に浸し，試片の重量が恒量になるまでそれぞれの溶液中に放置した。

2.2 試片の乾燥とAE計測

試片の乾燥はすべて恒温恒湿器で行い，温度を60°C，相対湿度を塩処理および無処理試片では40，60および80%，PEG処理試片では40%に設定した。ただし，塩処理試片で細胞壁からの水分離脱がまったく起こり得ないと考えられる湿度条件での実験は行っていない。

AEセンサ（共振周波数140kHz，直径12mm）は，板ばねの力でセンサを固定する治具¹⁾を用い

て試片中央部に固定した。このとき，大部分の実験ではセンサ（先端にシリコングリスを塗布）とシリコンゴムで試片をはさみ付けた（Fig. 1 a）が，一部の実験ではセンサの先端にジュラルミンの半球を接着し，これと同じもう一つの半球で試片をはさんだ（Fig. 1 b）。前者の場合は圧力を約1 kgf/cm²に，後者の場合は初期荷重を約0.7kgfに設定した。AEはゲイン70dB，しきい値200mV，デッドタイム1msとして計測し，AE事象総数および100事象ごとの平均AE振幅をレコーダに記録した。

乾燥中の試片の含水率は，ロードセルで測定，記録した含水率測定用試片の重量から求めたが，Fig. 1 aによるセンサ固定の場合は含水率測定用試片の中央部の表裏にセンサと同じ直径のシリコンゴム円板を押し付けて乾燥した。また，木口面の面積収縮率は乾燥の前後における含水率測定用試片の寸法変化から求めた。

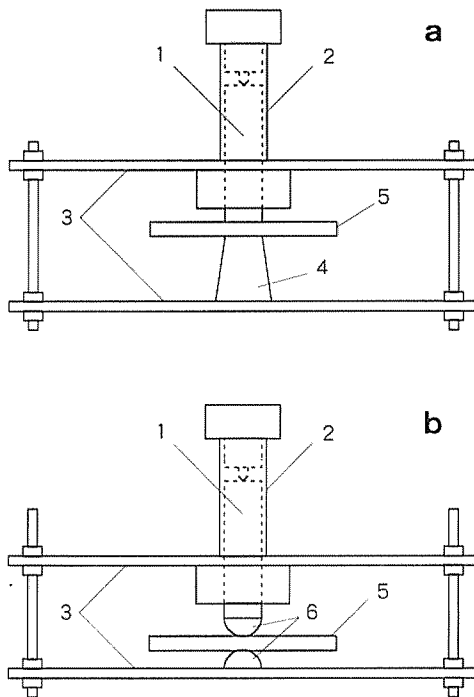


Fig. 1 Mounting of AE sensors on specimens. (a) usual and (b) improved methods.

- | | |
|--------------------|-----------------------------|
| 1, AE sensor; | 2, sensor holder; |
| 3, aluminum plate; | 4, silicone rubber; |
| 5, specimen; | 6, semisphere of duralumin. |

3. 結果と考察

3.1 収縮率とAE発生数の関係

スギの無処理試片を、相対湿度40, 60, 80%で乾燥したときのAE事象総数, 平均AE振幅, 試片の含水率の時間変化をFig. 2に示した。湿度40%の場合, AEは乾燥開始後40分程度, 含水率が70%になるあたりから激しく発生し始め, 含水率がほぼ一定になる頃に発生が弱まり, その後4時間程度たってから発生を停止している。このときのAE事象総数は約32万個である。また, AE発生が停止する少し前に事象率が一旦高くなり, AE振幅も大きくなっていることが分かる。相対湿度が高い場合も, AE発生の基本的パターンは同様であるが, 湿度が高いほどAEが発生し始める時間が遅くなり, AE発生が停止するまでの事象総数は少なくなっている。また, 事象総数が多いほど収縮率は高いことが分かる。

Fig. 3は, NaClの飽和水溶液で処理したスギの試片を乾燥したときの, AEの発生経過および含水率変化を示したものである。塩で処理した試片では, 飽和蒸気圧の低下によって水分蒸発が抑制されるが, このNaClでも相対湿度が40および60%の場合, 乾燥時間は無処理の場合よりも長くなり, 事象総数も無処理の場合の半分以下になっている。また, 湿度80%の場合, 蒸気圧がNaClの飽和水溶液に対する蒸気圧よりも高いため, 試片からの水分蒸発したがって試片の収縮はほとんど起こらず, AEもほとんど発生していない。他の塩で処理したスギの試片でも, 乾燥時間やAE発生数は異なるが, 同様の結果が得られた。

Fig. 4は無処理およびPEGの9%, 25%水溶液で処理したスギの試片について, AE発生経

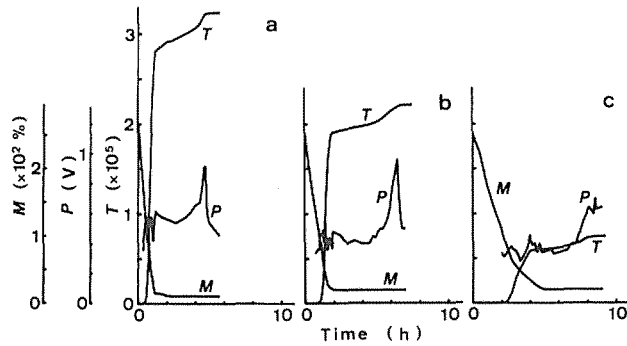


Fig. 2 Changes of AE total event count (T), mean AE amplitude per 100 events (P) and moisture content (M) during drying of water-soaked specimens of sugi at relative humidities of (a) 40, (b) 60 and (c) 80%. Shrinkage in area (%) at final stage [moisture content, %]: (a) 8.57 [10.9], (b) 6.82 [19.1], (c) 4.06 [20.6].

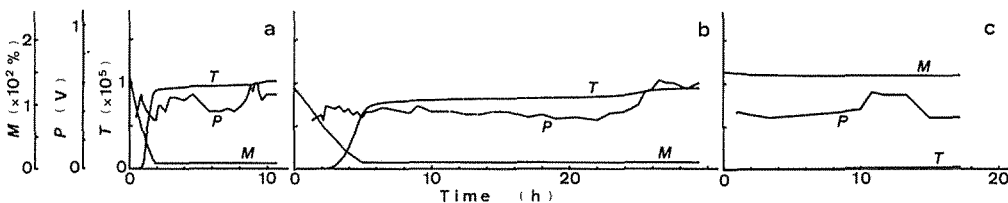


Fig. 3 Same as Fig. 2 but for specimens of sugi treated with a saturated solution of NaCl. Shrinkage in area (%) at final stage [moisture content, %]: (a) 3.86 [8.7], (b) 2.26 [10.0], (c) 0.10 [145.5].

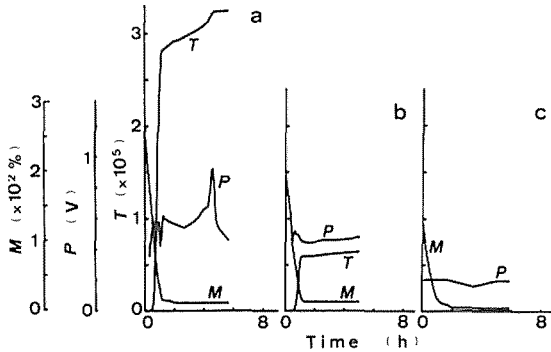


Fig. 4 Same as Fig. 2 but for specimens of sugi (a) water-soaked and treated with (b) 9 % and (c) 25 % solutions of PEG under a relative humidity of 40 %. Shrinkage in area (%) at final stage [moisture content, %]: (a) 8.57 [10.9], (b) 3.60 [12.6], (c) 0.00 [5.4].

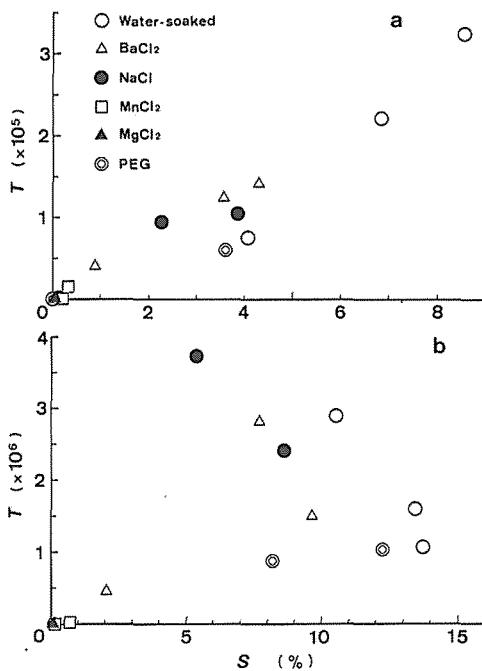


Fig. 5 Relations between shrinkage in area (S) and AE total event count (T) for all specimens of (a) sugi and (b) mizunara.

行った試片についても得られたが (Fig. 5 b), ミズナラの場合にはA E事象率が極めて高く, しかも毎分2200程度で飽和していたことから, それらのA E計数値は実際のA E発生数を反映していないと考えられる。

A Eの事象計数法では, A Eが次々とセンサに到達すると, センサからはFig. 7に示すような

過と含水率変化を示したものである (図の無処理の結果はFig. 2 aと同じ)。PEGで処理した試片では, 無処理と同様の含水率低下すなわち水分蒸発を示すが, 試片の収縮は大きく抑制され, A Eの発生数もかなり少なくなっている。とくに, 25%水溶液で処理した試片では収縮は認められず, A Eも全く発生していない。なお, 図にはしきい値程度の平均A E振幅が記録されているが, これは環境中の電気雑音によるものである。

以上のように, スギでは試片の木口面の面積収縮率が大きいほど乾燥中のA E事象総数が多いので, 両者の関係を無処理および処理試片のすべてについてプロットした (Fig. 5 a)。プロットはある程度ばらついているが, 両者は大略比例関係を示すことが分かる。すなわち, 乾燥条件や処理条件によってそれぞれの試片における乾燥速度やA E事象率は異なるが, 乾燥中に発生するA Eの総数はその過程での試片の収縮率に比例する。

3.2 A E事象の数え落としについて

スギの場合と同様に, ミズナラの無処理試片を乾燥したときのA E発生経過と含水率変化をFig. 6に示した。ミズナラでは, 乾燥開始直後からA Eが発生し始めるなどの違いはあるが, 激しいA E発生の後に緩やかな発生が続くこと, 相対湿度が高いほどA E発生が継続する時間が長いことなど, A Eの発生経過はスギと同様である。しかし, 乾燥中に検出されたA E事象総数は, ミズナラでは相対湿度が高いほど, すなわち収縮率が低いほど多いという, スギの場合とは異なる結果になっている。同様の結果は処理を

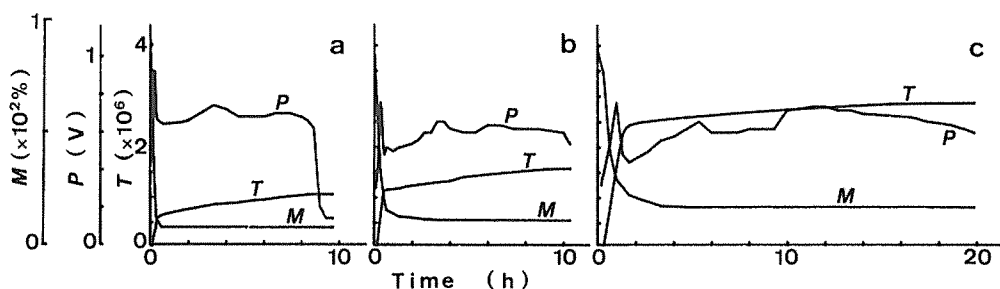


Fig. 6 Same as Fig. 2 but for water-soaked specimens of mizunara.
Shrinkage in area (%) at final stage [moisture content, %]:
(a) 13.7 [7.5], (b) 13.4 [10.9], (c) 10.5 [16.7].

信号が出力され、その信号または包絡線検波信号の電圧が設定されたしきい値を越えるとAE事象として計数される。このとき、計測系にデッドタイム、すなわちAEの反射波を二重に数えることを防止するための不感時間 (T_D) が設定してあると、その間にセンサに到達したAEは計数されない。いま、一定時間内にセンサに到達するAEの数がポアソン分布に従うと仮定すると、隣合う二つのAEの時間間隔 T (図の T_1, T_2, T_3 で示される時間) の確率密度関数 $f(T)$ は、

$$f(T) = Re^{-RT} \quad (1)$$

で表される指数分布となる。ここで、 R はAEの単位時間当りの平均到達数、すなわち事象率である。したがって、デッドタイムが T_D の場合、AE事象として数え落とされずに計数される確率 P は

$$P = \int_{T_D}^{\infty} f(T) dT = e^{-RT_D} \quad (2)$$

で求められる。そこで、本実験のデッドタイム 1ms の場合について、数え落としがない場合の事象率 (R) と実際に計測される事象率 ($R \cdot P$) の関係を見てみると (Fig. 8), R が毎秒100を越えるあたりから数え落としが次第に多くなり、毎秒1000では6割程度も数え落としのあることが分かる。なお、図の $R \cdot P$ は毎秒360程度で飽和しているが、これはミズナラで計測された事象率の飽和値 (22000/min) にほぼ一致している。また、図に示したデッドタイム 0.1ms の曲線は、AE信号の持続時間を 0.1ms として⁶⁾、デッドタイムを設定せずに計測した場合に相当する。

3.3 センサ取り付け法とAE発生

スギ、ミズナラの場合とも、AEは試片の含水率がほぼ一定になった後も長時間発生し続けたが、これは試片中央部をセンサとシリコンゴムではさみ付けたため (Fig. 1a), その部分の水

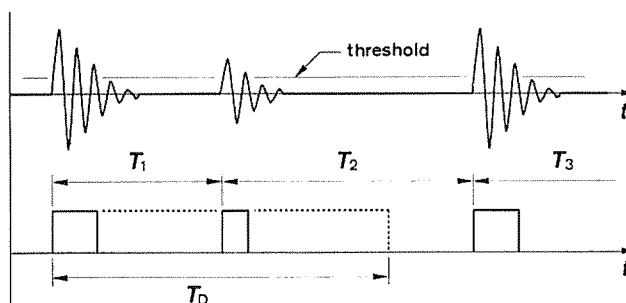


Fig. 7 AE signals from a sensor (upper) and pulses for event count (lower).
 T_1, T_2 and T_3 : time intervals between AE arrivals.
 T_D : dead time.

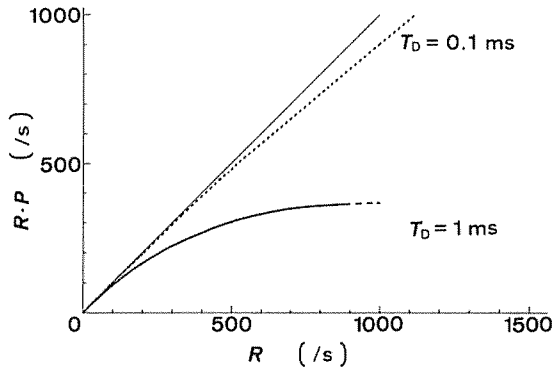


Fig. 8 Relation between rate of AE arrival (R) and AE event count rate expected from Equation 2 ($R \cdot P$) for dead times of 1 and 0.1 ms.

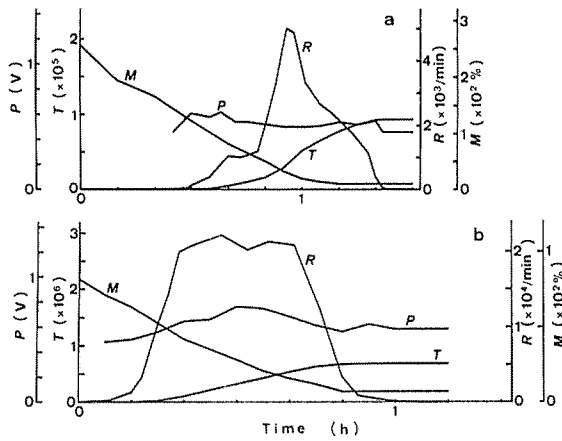


Fig. 9 AE generation during drying of water-soaked specimens of (a) sugi and (b) mizunara at a relative humidity of 40 % using an improved method of sensor mounting as in Fig. 1b. Shrinkage in area (%) at final stage [moisture content, %]: (a) 8.82 [10.0], (b) 12.7 [6.9]. R : AE event count rate. T , P and M : same as in Fig. 2.

分蒸発が他の部分よりも遅れた結果ではないかと考えられる。そこで、試片の乾燥をできるだけ阻害しないように、ジュラルミンの半球で試片をはさみ付けてAEを計測することを試みた (Fig. 1 b)。

Fig. 9 はスギとミズナラの無処理試片を相対湿度40%で乾燥した場合の計測結果である。ジュラルミンの半球を用いると、両樹種ともAE発生は1~1.5時間のきわめて短時間で停止し、本実験のような小さい試片の場合は、従来のセンサ取り付け方法では若干問題のあることが確かめられた。ちなみに、前報²⁾でAE発生が継続する時間が板目試片よりも木口試片で長かったのは、センサによるこの乾燥阻害が原因と考えられる。なお、ミズナラの事象率が毎分22000程度で飽和しているのは、上述したデッドタイム1msによるAEの数え落としのためと考えられる。

最後に、以上のことを考慮して、ジュラルミンの半球でミズナラの無処理試片を挟み付け、相対湿度40, 60, 80%で乾燥したときの木口面の面積収縮率とAE事象総数の関係を、デッドタイムを設定した場合と設定しない場合についてFig.10に示す。デッドタイムを設定した場合は収縮率と事象総数の関係は不明瞭であるが、設定しない場合は収縮率とともに事象率が大きくなり、スギの場合と同様の関係が存在していることが分かる。

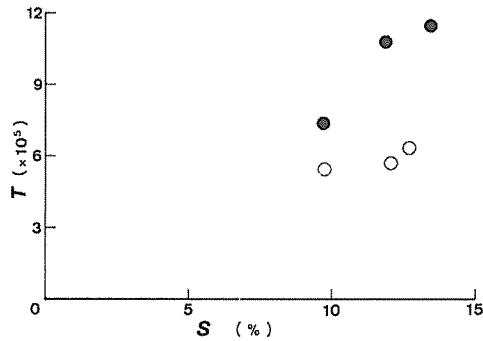


Fig. 10 Relation between shrinkage in area (S) and AE total event count (T) measured with (○) and without (●) a dead time of 1 ms for water-soaked specimens of mizunara. AE sensor, mounted as in Fig. 1b

4. おわりに

本報を含めた一連の実験から、乾燥中の木材で検出されるAEの基本的な性質はかなり明確になったが、AEの発生機構そのものについてはほとんど解明できなかった。このAEは木材の細胞レベルでの水分移動やそれに伴う変形と密接に関係していることは確かであり、AEの発生機構の解明はそれらの問題の新しい展開のみならず、水分非平衡下の木材の力学的挙動の解明にもつながると考えられる。乾燥工程の制御などの応用面では、既に指摘²⁾したように、巨視的な破壊に関係するAEの選別法が重要な課題として残っている。いずれにしても、乾燥中の木材から発生するAEについての実験は、本実験で考察したAE計測上の問題点および試料中でのAEの減衰の問題²⁾を考慮して行われるべきであり、そうすればAE計数値を定量的に取り扱うことも可能になるであろう。

引用文献

- 1) 奥村正悟・清瀧登志子・野口昌巳 (1987) 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
- 2) 奥村正悟・丑丸靖史・野口昌巳 (1989) 木材の乾燥過程で発生するAEについての二三の考察 (続). 京大演報. 61. 319-328
- 3) Rice, R.W. and Skaar, Ch. (1990) Acoustic emission patterns from the surfaces of red oak wafers under transverse bending stress. Wood Sci. Technol. 24. 123-129
- 4) Stamm, A.J. (1934) Effect of inorganic salts upon the swelling and shrinkage of wood. J. Am. Chem. Soc. 56. 1195-1204
- 5) Stamm, A.J. (1956) Dimensional stabilization of wood with carbowaxes. Forest Prod. J. 6 (5). 201-204
- 6) 野口昌巳・奥村正悟・川元スマレ (1985) 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

Résumé

This is a continuation of two previous reports to examine the generation mechanism of acoustic emission (AE) during wood drying. Thin cross-cut specimens (2 x 50 x 50 mm) of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and mizunara (*Quercus mongolica* Fisch var. *grosseserrata* Rhed. et Wils) were treated with four saturated salt solutions, BaCl₂, NaCl, MnCl₂ and MgCl₂, and 9 and 25 % aqueous solutions of polyethylene glycol (PEG) with a molecular weight of 1000. The AE generation was monitored during drying of the treated and water-soaked specimens at a temperature of 60 °C and a relative humidity of 40, 60 or 80 %, and the shrinkage of specimens was measured. The gain, threshold and dead time for AE signals were 70 dB, 200 mV and 1 ms, respectively.

For specimens of sugi the AE total event count during drying increased with the shrinkage in area of cross-cut surfaces (Figs. 2, 3 and 4) and a proportional relation existed between them, regardless of the treatment (Fig. 5 a). It was difficult, however, to find a certain relation between the AE total event count and the shrinkage for mizunara (Figs. 5 b and 6)

This could be ascribed to the miscounting of AE events, which is unavoidable in counting the events generated at the higher rate using a measurement system with the deadtime (Figs. 7 and 8). No employment of the deadtime resulted in a good relationship between the AE total event count and the shrinkage of specimens (Fig. 10). The retardation of specimen drying due to the mounting of an AE sensor and the improvement of sensor mounting are also discussed (Figs. 1, 9 and 10).