

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

奥村 正悟・川元スミレ・森 貴子・野口 昌巳

Acoustic Emissions during Drying of Japanese Oak
(*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*)

Shogo OKUMURA, Sumire KAWAMOTO, Takako MORI
and Masami NOGUCHI

要 旨

木材の乾燥割れをアコースティック・エミッション (AE) を利用して予知するための研究の一環として、実際の乾燥操作における AE の発生特性および割れの発生と密接に関係する乾燥応力と AE の関係を明らかにするため、カップ法で乾燥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、種々の AE 特性値の時間変化、カップ量と AE 特性値の関係などについて検討した。

AE の発生率は雰囲気温度・湿度の設定を変更するごとに大きな過渡的変動を示すものの、全体的にみれば、乾燥開始後スケジュールに応じて徐々にあるいは急激に増大して最大値を示し、材の平均含水率が12~15%に低下したときにほとんど0になった。この変化傾向は AE 信号振幅の100事象ごとの平均値の変化と一致し、両者が最大値をとる時点は、比較的緩やかなスケジュールの場合はカップ量が負の極値を示す少し前であった。このことは、乾燥応力とカップ量の一般的な関係を考慮すると、乾燥応力が極大値をとる前後に振幅の大きな AE が最も多く発生することを意味する。

1. はじめに

木材の乾燥過程でアコースティック・エミッション (AE) が発生することが明らかにされて以来¹⁻³⁾、AE を利用した乾燥割れの予知と防止を目指した基礎的研究が進められ、AE の発生率に及ぼす樹種^{4,5)}、試料形状⁶⁾、乾燥条件⁴⁻⁶⁾の影響などが明らかにされつつある。特に最近では、AE の計数値の経時変化のみならず、AE 信号の振幅分布、波形、周波数スペクトルについても検討されている⁵⁾。また、初歩的な研究ではあるが、AE の発生率を一定の値に保持するように乾燥室の温度・湿度を制御し、割れの発生を防止しながら効率的な乾燥を行うことが既に試みられている⁷⁾。

ところで、木材の乾燥過程で発生する AE についての研究のほとんどは、試料を一定雰囲気中に放置したときに発生する AE を対象としたものである。しかし、実際の乾燥操作では、乾燥室内の雰囲気を一定にしたまま放置することはきわめてまれなことであり、木材の損傷の発生

や乾燥の効率を考慮した一定のスケジュールに従って乾燥を行うのが普通である。したがって、AE による乾燥装置の制御を目的とする場合、実際の木材乾燥操作における全工程を通じた AE の発生特性について知見を得ておく必要がある。

一方、木材の乾燥割れの直接の原因は乾燥応力であり、この応力の繊維直交成分が木材の横引張強度を越えると割れが発生することは論をまたない。したがって、この乾燥応力と AE の関係が明らかになれば、AE による乾燥割れの予知および防止はより一層確実なものになると考えられる。

そこで本研究では、カップ法によって乾燥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を乾燥し、そのときの AE 特性値の時間変化およびカップ量と AE 特性値の関係などについて検討した。

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）において展示発表した。また、本研究の一部は昭和58、59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

水中に保存してあったミズナラ (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*; 京都大学声生演習林産) 生材から厚さ 26 mm, 幅 200 mm の板目板を作製し、そこから AE 計測用試片とカップ試片を得た (Fig. 1)。各試片は約 1 日風乾して含水率を50%前後に低下させてから実験に供試した。カップ試片は常法⁹⁾に従って 1 面 (木表) を残して合成ゴム系接着剤とアルミ箔でシールし、AE 計測用試片は両木口面を同様にシールした。

2.2 AE 計 測

AE 測定系のブロック図を Fig. 2 に示す。AE センサは、AE 波の周波数分析を行うために 0.1~1MHz で平坦な周波数特性 (± 10 dB) をもつものを用い、試料の木表面の中央にシリコングリースの塗膜を介して輪ゴムで圧着、固定した。AE センサの出力である AE 信号は、前置増幅器と主増幅器で 70 dB 増幅した後包絡線検波し、そのピーク値が 200 mV を越えたものを AE 事象としてカウンタで計数した。これらの増幅、検波、弁別を行う AEFT アナライザ (NF 製 AE-973) は、AE 事象の発生時刻と AE 信号のピーク値 (AE 振幅) を検出する機能をもつため、15分ごとに 5 分間これらの情報をコンピュータに取り込み、AE 事象率や AE 信号の振幅分布を求めた。また、カウンタの積算機能を利用して100個の AE 事象についての振幅平均値を求め、AE 事象総数とともにペンレコーダに記録した。さらに、AE 事象として認められた信号の波形は、ウェーブメモリで時間軸変換してから FFT アナライザで適宜観測し、必要に応じて周波数

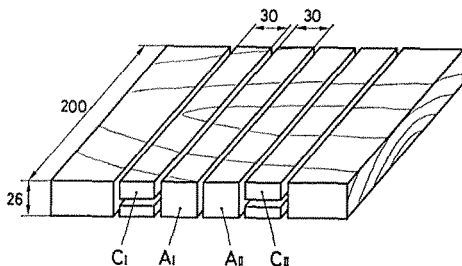


Fig. 1 Preparation of samples for AE measurement (A_I, A_{II}) and cup samples (C_I, C_{II}).

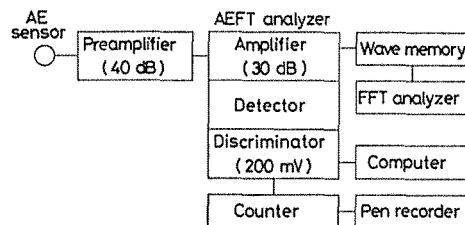


Fig. 2 Block diagram of AE measurement system.

スペクトルを求めた。

2.3 カップ量の測定

乾燥応力の発生経過はくし形試験片やスライス法によって推定されることが多いが、それらは測定に手間がかかり、また試験片を取り出すときに乾燥雰囲気を乱してしまう恐れがある。そこで本研究では、最も簡便に乾燥応力の発生経過を推定できるカップ法を用いた。カップ量の変化は全体的には乾燥応力の消長にほぼ一致するが、一般に木材の表層よりやや内側の部分の応力経過に近く、表層の応力経過よりは遅れるとされている⁹⁾。

カップ試片はスパン 120 mm で固定した 2 本の軸(プラスチック製のスリーブ付)の下側に、木表面が上向きになるように輪ゴムを利用して押し付け、スパン中央のたわみ(カップ量)を試片後方に設置した物差しを利用して一定時間ごとに恒温恒湿器の観測窓越した読み取った (Fig. 3)。また、インダクタンス式変位変換器の可動ロッドを試片上面に接触させることにより、カップ量を連続的に測定することも試みた。なお、輪ゴムの張力はカップ試片の変形と収縮を拘束しないように、また可動ロッドやカップ試片の自重によってカップ試片の上面と固定軸が離れないように調整した。

2.4 乾燥操作

試料の乾燥は Table 1 に示した二つのスケジュールに従い、恒温恒湿器を用いて行った。スケジュール I は乾燥初期を低温、高湿とした比較的緩やかな乾燥条件のものであり、割れやすいとされるミズナラの標準的スケジュール¹⁰⁾に近い。一方、スケジュール II は最初から高温、低湿として試料のきわめて急速な乾燥を促すものである。いずれも米国林産研究所のスケジュール¹¹⁾をもとにしたが、用いた恒温恒湿器の性能上の制約から、乾燥中期～終期の湿度は本来の値よりもかなり高くなっているところがある。

乾燥途中における AE 計測用試片の平均含水率は、ロードセルで測定した試片重量から推定

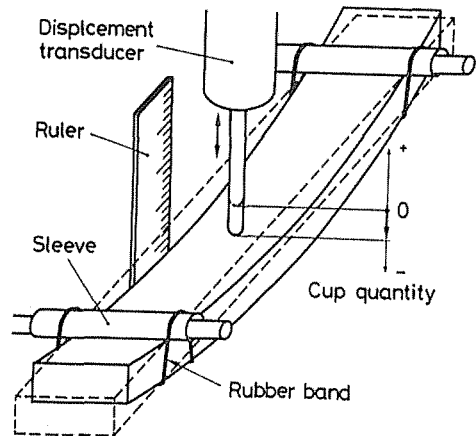


Fig. 3 Measurement of cup quantity.

Table 1 Drying schedules

No.	Moisture content (%)	Dry-bulb temperature (°C)	Wet-bulb temperature (°C)	Relative humidity (%)	Equilibrium moisture content (%)
I	50-40	43.3	40.5	84	16.0
	40-35	43.3	38.9	76	13.5
	35-30	43.3	35.5	60	9.8
	30-25	48.7	36.3	45	7.3
	25-20	54.4	40.0	43	6.5
	20-15	60.0	44.1	42	6.3
	15-	82.2	63.0	43	5.2
II	50-40	71.1	54.5	44	6.0
	40-35	71.1	48.6	31	4.3
	35-30	71.1	48.8	33	4.6
	30-20	76.7	52.2	29	3.7
	20-	82.2	56.5	30	3.8

し、この含水率をもとに乾・湿球温度の設定を変更した。なお、両スケジュールによる乾燥とも含水率が約10%に低下するまで続けた。

3. 結果と考察

スケジュールⅠとⅡに従って乾燥操作を行ったときの試料含水率、AE 事象総数、AE 事象率(300秒当たり)、AE 振幅(100事象ごとの平均値)、カップ量の経時変化をまとめて Fig. 4 に示す。ここで、AE 振幅とカップ量は5時間ごとの値をプロットしてある。また、スケジュールⅠのAE 事象率とAE 振幅は一部区間で測定値が欠損したため、その区間は破線で結んだ。

なお、両スケジュールによる乾燥でAE 計測用試片に割れなどの明らかな損傷は発生しなかった。

3.1 AE 計数値と AE 振幅

AE 発生の推移をAE 事象率の全体的傾向からみてみると、AE は乾燥開始直後から発生し始め、乾燥中期頃に最大の発生率を示し、試料含水率が12~15%に低下した乾燥終期にその発生がほとんど停止した。このとき、スケジュールⅠではAE 事象率が緩やかに上昇して最大値をとった後緩やかに下降していくのに対し、スケジュールⅡでは乾燥開始直後に事象率が急増して比較的高い値を保持し続け、乾燥終期に急速に減少した。AE の発生が停止したときの含水率は、最終的な平衡含水率に比較してかなり高い値である。また、乾燥途中におけるAE 事象率の急激な変動のほとんどは、Fig. 4 からわかるように、乾・湿球温度の設定変更に対応したものであり、乾燥条件が厳しくなるごとに急上昇とそれに続く漸減を繰り返した。

スケジュールⅠとⅡにおけるAE の総発生数はそれぞれ約250万と約100万であった(Fig. 4)。一般に、乾燥条件が厳しいほどAE の発生率が高く⁴⁻⁶⁾、したがって微かな割れがより多く発生していることが推定される。そのため、乾燥条件が厳しい場合、乾燥時間は短くなるものの乾燥の全過程を通じたAE の総発生数も多くなることが予期された。しかし、本研究では急速な乾燥を行ったスケジュールⅡの方が緩やかな乾燥のⅠよりも総発生数が少なかった。この点については、スケジュールⅡがⅠに比べてあまりにも苛酷な乾燥条件であったため、今後さらに検討する必要がある。

AE 信号の振幅は乾燥開始から徐々に大きくなり、乾燥中期に最大値を示した後次第に小さくなって、終期にはしきい値(200 mV)程度にまで低下した(Fig. 4)。この動きはAE 事象率の全体的な変化傾向に一致し、AE の発生率が高いときには振幅の大きなAE の発生割合が高いことを示している。なお、AE 振幅の分布は既報⁹⁾と同様の対数直線分布であり、乾燥途中で分布曲線の形状が顕著に変化することはなかった。

3.2 AE 信号の波形と周波数スペクトル

AE 信号の波形は既報⁹⁾と同様の200 μ s以下の持続時間を示す突発型であったが、用いたAE センサが共振特性をもたないタイプのため、当然のことながら単純な正弦波状の波形は観察されなかった。これらのAE 信号の周波数スペクトルの一例をスケジュールⅠの場合についてFig. 5に示す。Fig. 5は各含水率段階における64個のAE 事象についての平均スペクトルを示したものである。乾燥中期のスペクトルで0.5~1MHzの周波数成分がやや増加する傾向が認められるものの、乾燥経過に対応したAE 信号波形およびスペクトルの一般的な変化傾向を認めるまでには至らなかった。

ところで、木材用のAE センサが備えるべき特性については現在のところほとんど知られていない。しかし、Fig. 5からAE 信号は主として300 kHz以下の周波数成分を含み、しかも

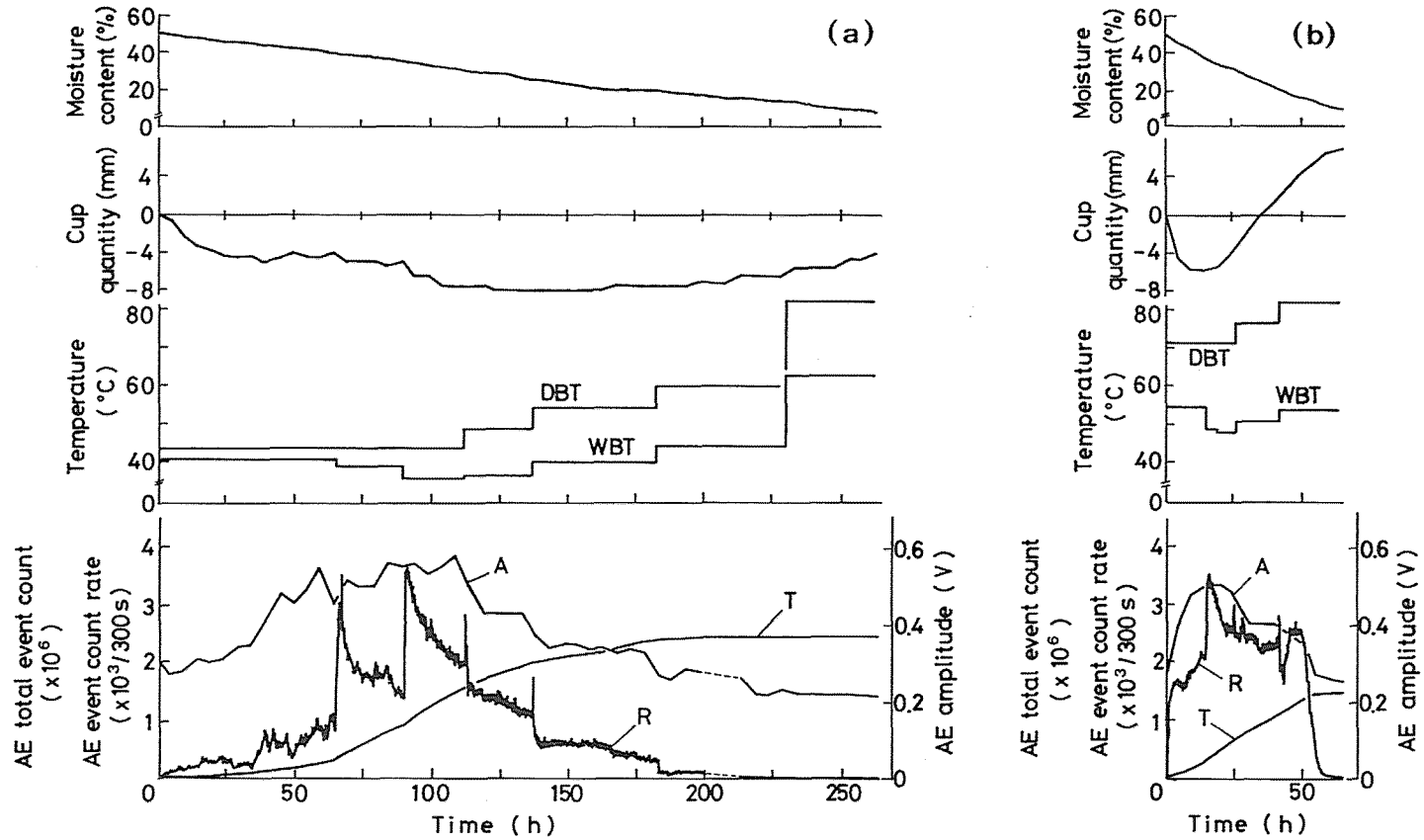


Fig. 4 Changes of cup quantity and AE characteristics during drying using schedules I(a) and II(b).
 DBT: Dry-bulb temperature, WBT: Wet-bulb temperature, A:AE amplitude, R:AE event count rate, T:AE total event count.

100 kHz 前後のスペクトルレベルが最も高くなっていることがわかる。このことは、少なくとも乾燥中の木材から発生する AE を効率よく検出する場合、感度の高い共振特性をもつセンサを用い、その共振波数を 300 kHz 以下、できれば 100 kHz 前後にすることが望ましいことを意味する。また、AE 波が木材中を伝搬する間に 80 kHz 以上の高周波成分は著しく減衰すること¹²⁾を考慮すると、最適な共振周波数はさらに低いところにある可能性がある。いずれにしても、100 kHz 以下でも平坦な周波数特性をもつセンサを用いてさらに検討する必要がある。

3.3 乾燥応力と AE

乾燥の進行に伴うカップ量の変化は Fig. 4 に示した。スケジュール I では、カップ量は乾燥開始後負側に緩やかに大きくなって極値を示した後 0 に近づくが、乾燥終了時になっても符号を反転するには至っていない。一方スケジュール II では、カップ量は負側に急激に増大して極値をとり、符号を反転した後乾燥終了時にはかなり大きな正の値を示した。スケジュール I でカップ量の反転が認められなかったのは、乾燥条件がミズナラにとって比較的緩やかであったことと、終期の湿度条件が本来のものよりかなり緩やかであったことによるものと考えられる。また、スケジュール II では急速な乾燥のために反転後のカップ量がかかなり大きく、乾燥後半にかかなり大きな引張応力が試料内部に発生していることが推測される。

カップ量と AE 事象率および AE 振幅の関係を明確にするため、含水率 5% ごとこのこれらの値をプロットしたものを Fig. 6 に示す。前述のように、乾・湿球温度の設定変更に伴う変動を除外すれば、AE 事象率と AE 振幅は含水率 35% 前後の時点で最大値を示したが、その時点はス

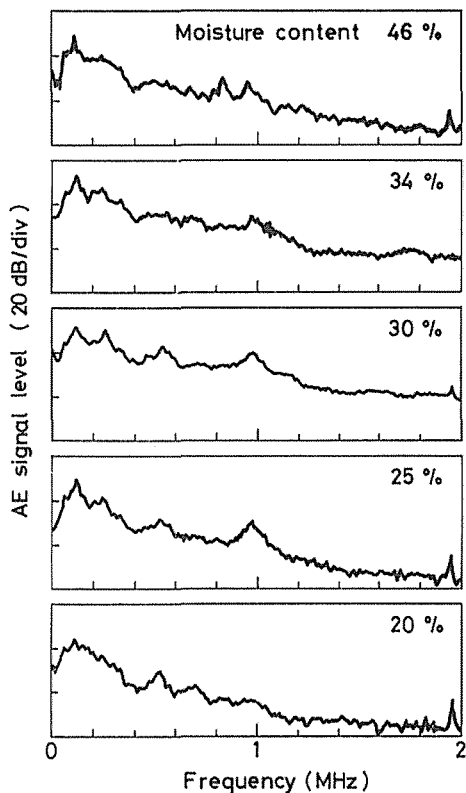


Fig. 5 Frequency spectra of AE signals during drying (schedule I).

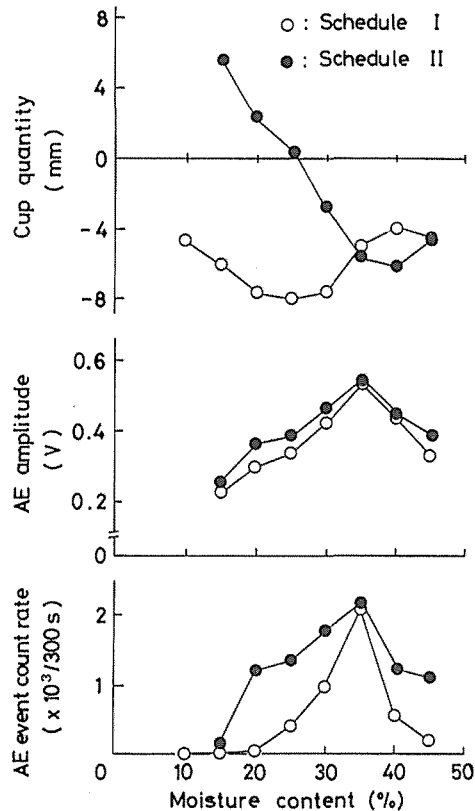


Fig. 6 Relation between cup quantity and AE characteristics.

スケジュールⅠではカップ量が負の極値をとる時点よりも少し前であった (Fig. 4, 6)。これは、一般にカップ量の変化が材表面部の応力経過よりも遅れること⁹⁾を考慮すると、AE 事象率と AE 振幅が最大値をとる時点は表面部の引張応力が極大となる時点にほぼ一致し、そのとき振幅の比較的大きな AE が最も頻繁に発生することを意味する。一方スケジュールⅡの場合には、カップ量が極値をとった直後に AE 事象率と AE 振幅が最大となり、上記の考察をあてはめると、AE 事象率と AE 振幅が最大となる時点は乾燥応力が極大を示す時点に必ずしも一致しないことになる。しかし、スケジュールⅡはあまりにも苛酷な乾燥条件であったためにカップ量と応力の一般的な関係がくずれている可能性があり、またカップ量と AE 特性値が極値をとる時点の時間的ずれは小さいことから、材表面部の引張応力と AE の発生が密接に関係していることは疑いない。スケジュールⅡで注目されるのは、乾燥後半でカップ量が強く反転する頃に、最大値を過ぎた AE 振幅がショルダ状になって比較的高い値を示し、AE 事象率もこのあたりでかなり高い値をとり続けていることである。これは、推測の域を出ないが、試料内部に生じた引張応力の増大と関係しているのではないかと考えられる。

3. お わ り に

スケジュールに従った乾燥の全工程を通じた AE 計測を行った結果、乾燥割れの直接的な原因である乾燥応力と AE 事象率および AE 振幅はかなり密接な対応関係をもつことが明らかになった。しかし、本研究では乾燥応力を必ずしも忠実に反映しないとされるカップ法を用いたため、これらの AE 特性値と乾燥応力の関係を十分解明するには至らなかった。この点は乾燥応力の推定方法を工夫してさらに検討する必要がある。また、温・湿度の設定を変更するごとに AE 事象率が大きく変動したが、この原因を応力の消長から解明することも今後の課題である。

引 用 文 献

- 1) Noguchi, M., Y. Kagawa and J. Katagiri: Detection of acoustic emissions during hardwoods drying. *Mokuzai Gakkaishi* 26 (9): 637-638, 1980
- 2) Kagawa, Y., M. Noguchi and J. Katagiri: Detection of acoustic emission in the process of timber drying. *Acoustics Letters* 3 (8): 150-153, 1980
- 3) Skaar, C., W. T. Simpson and R. M. Honeycutt: Use of acoustic emissions to identify high levels of stress during oak lumber drying. *Forest Prod. J.* 30 (2): 21-22, 1980
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Becker, H. F.: Schallemissionen während der Holz Trocknung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 40 (9): 345-350, 1982
- 7) Honeycutt, R. M., C. Skaar and W. T. Simpson: Use of acoustic emissions to control drying rate of red oak. *Forest Prod. J.* 35 (1): 48-50, 1985
- 8) 西尾茂：カップ法による木材乾燥応力の推定。木材工業 27(12):596-598, 1972
- 9) 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, 1976
- 10) 林業試験場(監修)：木材工業ハンドブック(改訂3版), 丸善, pp. 306-308, 1982
- 11) Rasmussen, E. F.: Dry Kiln Operator's Manual. *Agriculture Handbook No. 188*, Forest Service, U.S.D.A., pp. 117-129, 1961
- 12) 川元スミレ・豊田富代子・奥村正悟・野口昌巳：未発表

Résumé

Acoustic emissions (AEs) produced during wood drying have been examined by several researchers including the present authors. Their purpose is to detect the development of early stages of surface and internal checking in lumbers during drying by measuring the frequency or the intensity of AEs. This paper deals with the characteristics of AEs during the whole process of kiln drying and the relation between some AE characteristics and the drying stresses which cause the surface and internal checks. Specimens of Japanese oak were dried in a small drying chamber using two different drying schedules (Fig. 1, Table 1). The AE event count rate, the AE cumulative event count, the AE amplitude, and the wave form and spectrum of AE signals were measured during the whole drying processes (Fig. 2). The drying stresses of specimens were estimated from the deformation of a cup sample, which was half the thickness of the original board and of which all the faces except one were covered with aluminium foil (Figs. 1 and 3).

Although the AE rate showed remarkable transient variations each time the dry- and wet-bulb temperatures were changed, it generally increased slowly or rapidly, depending on the drying conditions, towards a maximum rate and then decline towards zero (Fig. 4). The AE generation almost ceased at 12–15% in moisture content of specimens for the both drying schedules. The AE amplitude, the average value of 100 events, had a similar tendency to the AE rate, and for the moderate drying schedule (schedule I) their maxima appeared a little before the cup quantity reached the negative peak (Figs. 4 and 6). This implies that stronger AEs are most frequently generated when the drying stresses are the greatest, since the deformation of a cup sample usually delays to the development of drying stresses near the surface of the lumber being dried.