

# 木質材料の性能評価と非破壊検査



日 本 木 材 学 会  
木材強度・木質構造研究会

1995年10月

# 木質材料の性能評価と非破壊検査

## 目 次

### 1部 新しい流れの中での木材の性能評価

1. 限界状態設計への移行に伴う木材の評価方法・・・・・・・・・・・・・・・・ 1  
(名古屋大学農学部 平島 義彦)
2. 破壊力学と今後の木質構造設計の接点・・・・・・・・・・・・・・・・ 7  
(京都大学農学部 増田 稔)
3. 強度データ収集の現状・・・・・・・・・・・・・・・・ 13  
(東京大学農学部 中村 昇)

### 2部 木材・木質材料の非破壊検査

4. 非破壊的手法による木材の強度評価・・・・・・・・・・・・・・・・ 28  
-製材品の強度等級区分および生物劣化材の診断・残存強度評価のために-  
(農水省森林総合研究所 田中 俊成)
5. ヤング率による立木・丸太・製材・木質材料のグレーディング・・・・・・・・ 40  
(静岡大学農学部 祖父江 信夫)
6. AEによる木材・木質材料の非破壊検査・・・・・・・・・・・・・・・・ 62  
(東京農工大学農学部 佐藤 敬一)
7. 木質構造の耐震診断・・・・・・・・・・・・・・・・ 75  
(農水省森林総合研究所 神谷 文夫)

# 1. 限界状態設計への移行に伴う木材の評価方法

名古屋大学農学部 平島 義彦

## これからの設計法

わが国の建築基準法をはじめとした建築基準は一般に仕様規定が多く、これに対する性能規定は非常に数が限られている。このことは筆者のように研究を職業としている者にとって、研究成果を社会に還元していく上で強い障壁と感じられるのであるが、国内のみならず海外諸国からもこの点についての指摘が行われている。海外の設計技術者、建材メーカー、住宅メーカーなどにとっては、わが国の仕様規定型建築基準は、大きな非関税障壁として目の前に立ち塞がり、結果としてわが国の建材、住宅、設計業界は鎖国的な状態にあることを認めねばならない。ところで最近はこの異常な状態が認識されるようになり、性能評価型設計法への移行が検討されるようになってきた。現行の法の規定する設計法は基本的に許容応力度設計法で、建物の安全性を評価するのは、この法に規定された設計法一つである。安定性を評価する方法には幾つかのものがああり、その多様性を受容するところに技術の進歩があると考えられる。限界状態設計法はいくつかあるであろう性能評価型設計法のうちの一つである。限界状態設計法では、建物などの限界状態を定義し、その状態になる確率を一定限度以下にしようとする設計法である。性能評価型設計法では、性能を具体的に明示するが、その性能を否定的に表現したものが限界状態である。例えば、ある建物に対して大地震でも「ひっくり返らないで存続する」という性能を要求したとすれば、その否定形「ひっくり返る」のが限界状態である。

## 木質構造の限界状態

限界状態を定義するには、構造物の外力に対する挙動を把握し、その挙動を精確に数式等で記述するという2つのことを考慮に入れておかなければならない。数式表現が極めて難しいというような場合には、数式で追える範囲内でかつ構造物にとって安全側となることをもって限界状態とせざるを得ない。構造物の挙動の記述が可能かどうかは、ここではとりあえず不問にして、木質構造の限界状態について、今夏札幌で開かれた日本建築学会大会パネルディスカッション「限界状態とは何か」の資料から引用しよう。このPDは木質構造を含めた鉄筋コンクリート造など9構造でそれぞれ限界状態をどのように考えるかについて総合的にディスカッションしたものである。

### A 水平力に対する限界状態

#### a 終局限界状態

終局限界状態として、構造物の倒壊（これは人命の損失につながる）、あるいは復元力

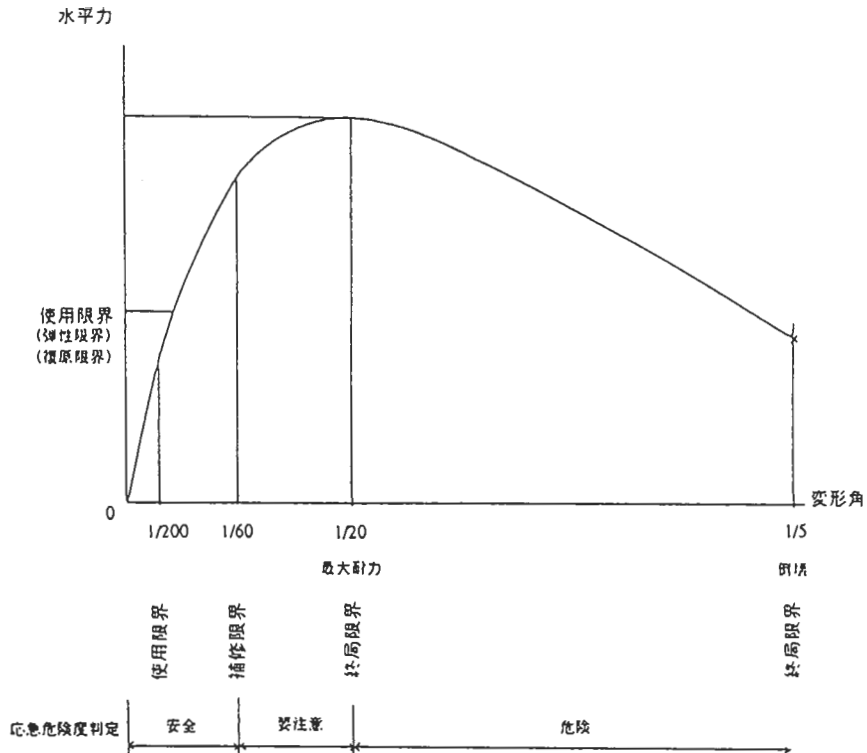


図1 木質構造における水平力-変形角の関係と限界状態

が急激に低下する限界を採る。

#### b 使用限界状態

構造体に有害な変形が残留し、これが累積していく限界を使用限界状態とし、部材および接合部の弾性限界あるいは復原限界を採る。また非構造部材に有害な損傷が生ずる変形を使用限界状態とする。変形角としては $1/200$ または $1/120$ など。

#### c 補修限界状態

これまでの使用限界状態、終局限界状態の二極の限界状態の考え方に新たに補修、継続使用の限界を設定し、総合的に被害を予測しその程度を「制御する設計」を考える。この場合変形角を補修限界の一つの指標と考えてみると、これは木質構造の場合構法によって大きく異なり、 $1/60$ あたりから倒壊限界に近い変形角にまでいたる。

### B 鉛直力に対する限界状態

#### a 終局限界状態

図の縦軸水平力を鉛直荷重に、横軸変形角を撓みとすれば、この場合も同じようにして考えることができる。終局限界状態として最大耐力を採る。

## b 使用限界状態

構造体に変形や振動が生じて通常の使用に支障を来す状態をいう。梁の撓みではスパン／300、2 cm など。また構造体の変形により非構造部材に有害な損傷が生ずる状態をいう。

## c 火災に対する限界状態

火災が発生してから30分、1時間といった一定時間経過後に部材の落下や建物の崩壊が生ずる状態をいう。

また地震により火災が発生しかつ防火被覆材が落下するなどして防火措置の効果が損なわれた状態で30分、1時間といった一定時間経過後に部材の落下や建物の崩壊が生ずる状態をいう。

## 限界状態設計法の特徴

この設計法の特徴、特に導入に使うメリットについて見てみると、

- 1 共通の指標を使った設計により構造種別間の安全性の比較が行えるようになる。許容応力度設計法では、このことは困難が多い。
- 2 建物の重要度係数が合理的に導入できる。
- 3 建物の耐用年限に応じた合理的設計が可能。
- 4 従来の設計法との断絶なしにスムーズな移行ができる（キャリブレーション）。これにより統計データなどが不完全であっても、それに対応した設計法ができる。
- 5 木質構造にとって、従来ともすれば等閑視されがちであった弾性限界以後の構造物の挙動に目を向ける研究や設計が行われる。
- 6 木質材料開発の目標設定（例えばバラツキの減少）ができ、またそれが正当に評価され、開発成果の還元がスムーズに行われる。

先に限界状態設計法は、建物の限界状態（例えば地震による倒壊）を定義し、その状態になる確率を一定限度以下にしようとする設計法であると述べたが、建築構造物は、大量生産される工業製品等とは異なり、一般に1回限りのもの（one-off）であるので、直接構造物の破壊確率と結びつくとは考えない方がよい。むしろ、この設計法による建物が数多く建設され、長い時間経過を経ていくうちに自然災害などのダメージを幾度も経験していくことによって、限界状態設計法でいう破壊確率が実際のそれに近づいていくと考える方がより適切だろう。

## 木材の性能評価と限界状態設計法

限界状態設計法では、材料強度及び荷重を確率変数として扱う。ただし最終の設計式においては確率計算は必要としないフォーマットとなっている。破壊確率を直接計算するのは、一般に非常に困難である。そこで信頼性・安全性を評価する簡便な物差し—信頼性指標 reliability index  $\beta$  を導入する。 $\beta$  は材料強度・荷重の確率分布の平均値と標準偏差(2

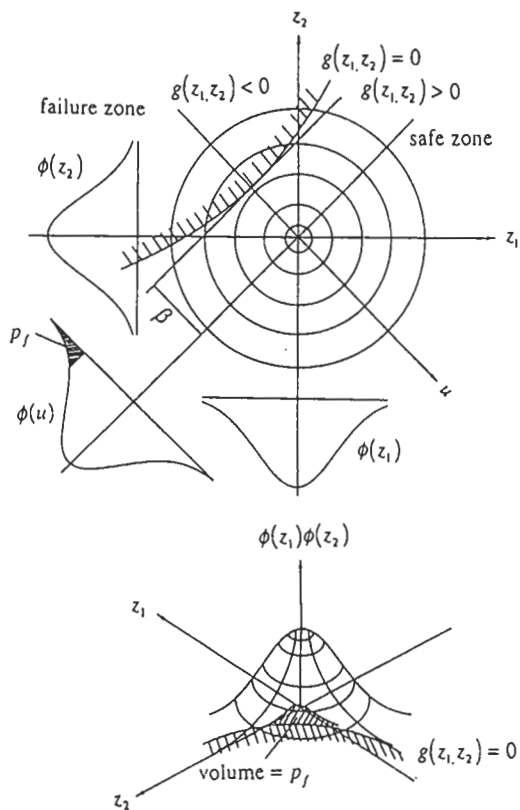


図2 2変数の場合の破壊曲面

次モーメント)を用いて安全性を評価するもので、 $\beta$ を用いる方法は2次モーメント法とも呼ばれる。材料強度、荷重の確率分布関数を用いて構造物の限界状態を表現したものを性能関数(破壊基準関数)というが、確率変数が2変数の場合の状態を図2に示した。この図は2変数の同時確率密度関数を平面的及び立体的に表現したもので、各変数の周辺確率密度関数の分布も表されている。この図において、個々の確率変数 $z_1, z_2$ を相関のない標準正規変数に変換して、破壊基準関数 $g(z_1, z_2)$ を標準化空間で表現したとき、原点からその限界局面への距離が信頼性指標 $\beta$ となる。これが限界状態設計法導入に際し用いられる $\beta$ の意味であるが、設計しようとする構造物を考えた場合、これに用いる材料強度の分布は図で考えたようなものでなければならず、また使用材料はその母集団からランダムに抽出したものである必要がある。さて、このことを木造の構造物で考えてみよう。ある特定の建物を建てる場合、用いる木材は、例えばスギを用いるとすれば、そのスギはスギという言葉で括られる木材の、その強度の母集団からランダムに抽出したものであると考えられるだろうか。木材の流通を考えてみたとき、これはどうてい考えられないことである。

多分、その建物に用いられるスギは、ある特定の地域から産出されたもので、一部の偏った分布のものから抽出されたものであると考えるべきであろう。図3にこのことを表してみた。建物に使用した材料は公称分布の下方に存在していたとしても、設計においては、それより材料強度が高く評価されている公称分布からランダムに抽出されたものとして評価される。この場合、危険側評価である。また、この反対の事象も起こり得る。このように木材の評価において、バラツキの大きい場合には、その強度を過大にあるいは過小に評価することになり、合理的な設計に結びつかないこととなる。その対策としては次の2つが考えられる。

1 できるだけ狭い地域での材料強度の母集団分布を求め、これに対応した評価を行う。  
この場合、構造物に使用する木材の出処は明らかでなければならない。

2 MSRのような非破壊検査により評価を行う。

1については、各県、市、町、、、など、流通で特定できる範囲でできるだけ木理細かな調査が必要となる。2については、その性能評価の概念を図4に示した。パラメータと強度の回帰関係が常に保証されていれば、先に述べた地域の偏り等から解放される。限界状態設計法を現実のものとするには、このように材料強度の評価、特に前述の1、2の方法による評価が必須のものであると考える。

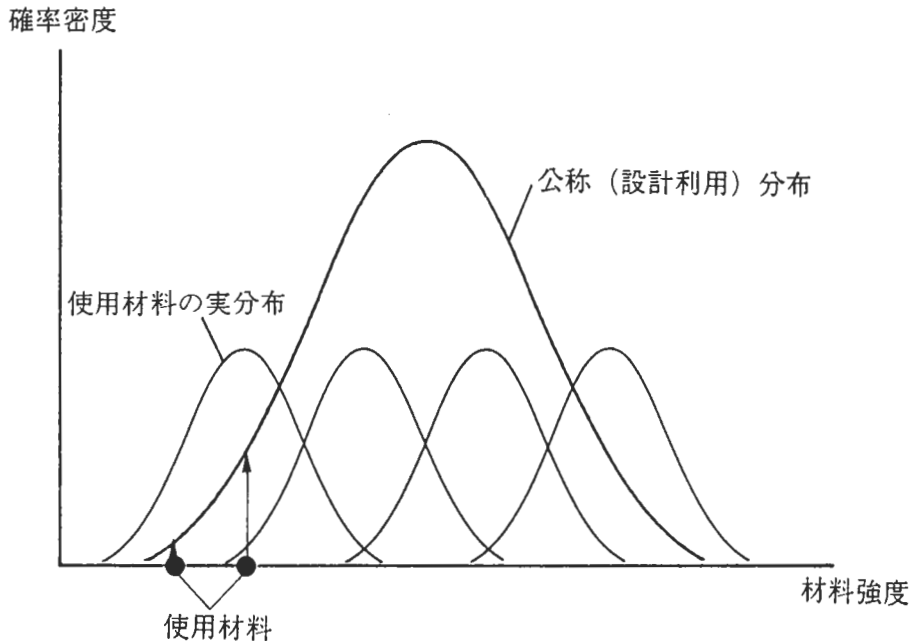


図3 使用材料の実分布と公称分布

材料強度

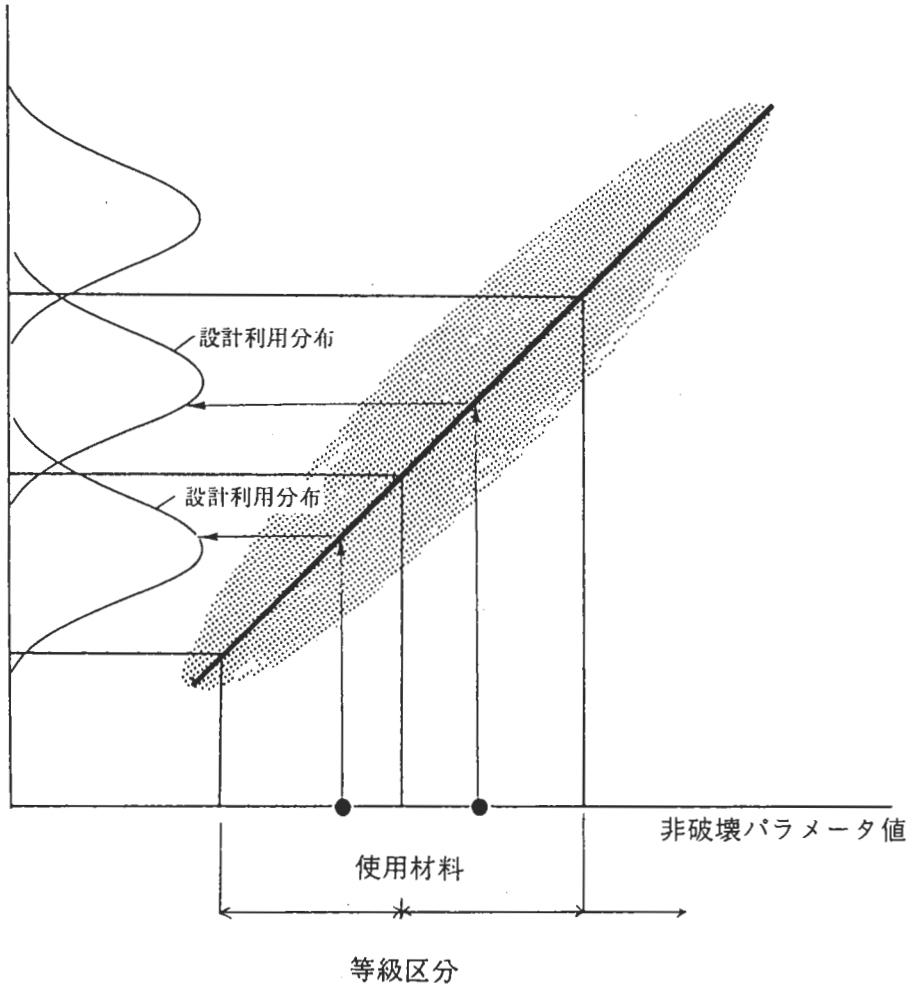


図4 MSRによる性能評価概念図

## 2. 破壊力学と今後の木質構造設計の接点

京都大学農学部 増田 稔

# 切欠きの強度低減算定を通して見た 木構造設計規準の世界的動向

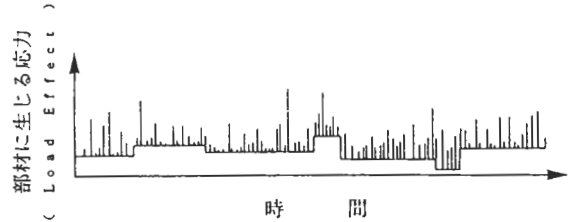
増田 稔\*

## はじめに

木構造設計規準は現在、世界的に見てRBD (Reliability Based Design, 信頼性に基づく設計) を導入する方向に向かっている。日本でも鋼構造に関してはRBDの考えに基づいて鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説<sup>1)</sup>が1990年2月に出されている。限界状態設計とはLimit State Design (LSD)の日本語訳であり、「部材の使用期間中において、荷重によって生じる応力 $S$ が材料強度 $R$ を越す確率( $R=S$ の状態を限界状態と呼んでいる)を計算し、それがある確率以下となるように設計しようというのが限界状態設計であり、その考え方の基礎がRBDである。USAではこれをLRFD (Load and Resistance Factor Design, 荷重・耐力係数設計法)と呼んでいる。すなわち、使用期間において破壊、すなわち $R < S$ となる確率 $P_f = \Phi(-\beta)$ (ここに $\beta$ を信頼性指標と呼んでいる。 $\beta$ が大きいかほど破壊の確率は小さい→安全である)をある値以下にしよう(例えば $\beta=2.5$ にしよう)とした場合、調整係数である耐力係数(Resistance Factor)をいくらにとればよいかを、従来の許容応力度設計(Allowable Stress Design, ASD)を参考にして決定する。LRFDとは、このように荷重・耐力係数を導入していることに由来する命名であり、本質的にLSDと同じRBDの考え方が基礎となっている(第1図および第2図参照)<sup>1-5)</sup>。

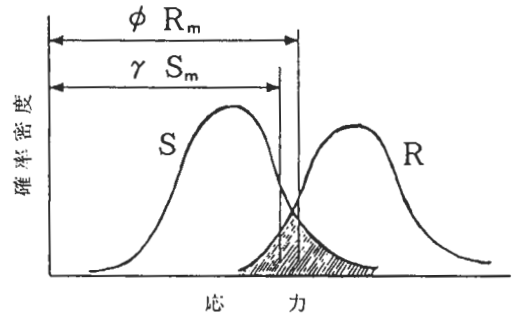
LSDもLRFDもRBDの考えを導入し、しかも従来のASDとの接点を残した形の過渡的なsoft conversion(軟改訂)と呼ばれている設計規準であり、本来のRBDに移行するには、材料強度のグレードとバラツキ、各種荷重状態(圧縮、曲げ、せ

\*京都大学農学部



第1図 自重および外力によって部材に生じる応力の時間変化の例

これに基づいて第2図の $S$ の曲線が得られる。



第2図 LRFDあるいはLSDの概念図

部材に生じる応力 $S$ が、その部材の強度 $R$ より大きくなると破壊が生じる(斜線部)。

$\phi$ は耐力係数、 $\gamma$ は荷重係数、 $m$ は平均を表わしており、 $\phi R_m > \gamma S_m$ を満たすように材料および寸法が選ばれ設計される。

$\gamma$ および $\phi$ は荷重の形態により異なり、その値は設計規準に決められている。

ん断およびこれらの混合)と応力計算式の確立(特に、壁や梁での接合)、使用条件(温湿度条件)および荷重継続時間と部材強度および変形、など今後とも多くの基礎データの収集が不可欠である。特に、破壊のみでなく、serviceability(使用性、使用感)、例えば床の歩行感などに基づく限界状態設計(LSD)を行おうとすると、今後かなりのアンケート調査<sup>6)</sup>が必要である。

以上のような信頼性理論に基づく設計規準の導

入が、現在の世界的な傾向であることを頭に置きながら、“端部に切欠きをもつ梁の設計”を例にして各国の設計規準の比較検討を行ってみることにする。

### 1. 端部に切欠きをもつ梁の各国の設計規準

はじめに断わっておきたいが、筆者は決して梁に切欠きを入れることを推奨しているのではない。切欠きは、特にそれが引張側にある場合、強度を極端に低下させるので、出来る限り避けるべきものである。「やむを得ず切欠きを行う場合は、“こんなに低い耐力しか設計規準では与えられない”ので避けるよう工夫して下さい」といった主旨でこの文を書いていることを認識していただきたい。ただ、木材の破壊力学を研究している者にとって、切欠き梁は木材の破壊条件を解明するよい研究材料であり、RILEM（国際建築材料・構造研究機関連合）に「木構造における破壊力学の応用」のための委員会 TC110-TFM が設けられ、切欠きをもつ梁の強度に関して活発な討議がなされるほどである。以下、各国の設計規準および現在検討中の案について述べることにする。紙数が限られているので概念を述べるにとどめるが、数式を見ただけで読む気の失せる方は、数式だけを飛ばして読んでいただければ幸いである。

#### 1.1 日本の設計規準<sup>7)</sup>

日本の木構造設計規準は現在、許容応力度による設計規準 (ASD) であり、日本建築学会の木構造計算規準・同解説によると、端部に切欠きをもつ曲げ材は、長方形断面の場合、次式を満たすものでなければならない。

$$V \leq \frac{2}{3} A_e f_a \quad (1)$$

ここに、

$V$  : せん断外力

$f_a$  : 梁に用いる材の許容せん断応力度

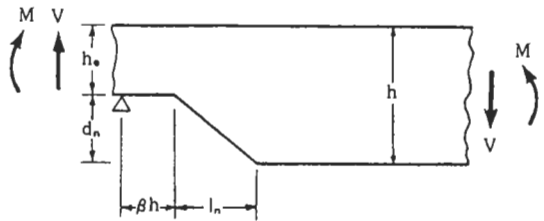
$A_e$  : 有効断面積

$A_e =$  全断面積  $A$  — 切欠きのない場合。

$A_e = (h_e/h) A$  — 圧縮側に切欠きのある場合。

$A_e = (h_e/h)^2 A$  — 引張側に切欠きのある場合。

ただし、引張側の切欠きは曲げ材のせいひの 1/3 以下に制限する。



第3図 端部に切欠きをもつ梁の各部の寸法

切欠きが90°のときは、 $l_n = 0$  である。

#### 1.2 カナダの設計規準<sup>3)</sup>

梁のせん断外力  $V_f$  (factored shear force) とせん断耐力  $V_r$  (factored shear resistance) の関係は次式を満たさなければならない。

$$V_f \leq V_r \quad (2)$$

$$V_r = \phi \frac{2A}{3} f_v K_D K_H K_{Sv} K_T K_{Zv} K_N \quad (3)$$

ここに、

$\phi = 0.9$  前述の耐力係数 (resistance factor)

$A = bh$ ,  $b$  : 梁の幅

$f_v$  : 用いる材の規定のせん断強度 (specified strength in shear)

$K_D$  : 荷重継続時間に対する係数

$K_H$  : システムファクタ (1本か複数かで異なる。複数で外力を分担支持する場合は、部材強度のバラツキの影響が小さくなることを表わす)

$K_{Sv}$  :  $K_s$  は使用条件係数であり、 $K_{Sv}$  は使用時の関係湿度条件に関する係数である。

$K_T$  : 処理係数 (防腐などの処理の有無に関する係数)

$K_{Zv}$  : せん断に対する寸法効果係数

$K_N$  : 切欠き係数

$K_N = 1.0$  切欠きのない場合

$K_N = h_e/h$  圧縮側に切欠きのある場合

$K_N = (h_e/h)^2$  引張側に切欠きのある場合

日本の規準とカナダの規準の違いの大きなところは RBD が導入されているかどうかの違いであり、カナダの規準には、システムファクタ  $K_H$ 、使用条件係数  $K_s$ 、寸法効果係数  $K_z$  などがきめ細かく決められている。切欠き係数  $K_N$  に相当する係数の決め方の考え方は、日本とカナダは同じであり、USA

も同じである。USA もいづれカナダと似た RBD に基づく規準を導入する予定であり、それを前述のように LRFD と呼んでいる。

### 1.3 オーストラリアの設計規準<sup>9)</sup>

オーストラリアの設計規準では、端部に切欠きをもつ曲げ材は次式を満たさなければならない。

$$f_b + 4f_s \leq g_{40} F_{Sj} \quad (4)$$

ここに、

$$f_b = \frac{6M}{bh_e^2} \quad (\text{みかけの最大曲げ応力}) \quad (5)$$

$$f_s = \frac{3V}{2bh_e} \quad (\text{みかけの最大せん断応力}) \quad (6)$$

$$F_{Sj} = k_1 k_4 k_5 k_6 k_{12} F'_s \quad (7)$$

$g_{40}$  : 切欠きの形と位置で定まる係数 (第1表参照)

第1表 梁端に切欠きをもつ場合の係数 $g_{40}$ の値(オーストラリア)

| 切欠き部の傾斜<br>$ln/dn$ | $g_{40}$               |                         |
|--------------------|------------------------|-------------------------|
|                    | $dn > 0.1h$            | $dn < 0.1h$             |
| 0 (90.0°)          | $9.0/h^{0.45}$ (0.865) | $3.2/dn^{0.45}$ (0.504) |
| 2 (26.6°)          | $9.0/h^{0.33}$ (1.616) | $4.2/dn^{0.33}$ (1.083) |
| 4 (14.0°)          | $9.0/h^{0.24}$ (2.581) | $5.2/dn^{0.24}$ (1.941) |

$h$ および $dn$ の単位はmm

$g_{40}$ のカッコ内の値は、 $h=182\text{mm}$ 、 $dn=60.7\text{mm}$ の場合の計算例を示す

- $k_1$  : 荷重継続時間に対する係数
- $k_4$  : 含水率 (乾燥の有無) に対する係数
- $k_5$  : 使用湿度条件に対する係数
- $k_6$  : 温度条件に対する係数
- $k_{12}$  : 座屈安定性に対する係数 (切欠きが梁の中央1/3にないときは考慮しなくてよい。)

なお、 $f_b$ が負 (切欠き側が圧縮) になるときは、 $f_b = 0$ として扱う。また、切欠き底から150mm以内に節などの欠点が存在してはいけない。

オーストラリアも RBD を導入する方向に進んでいるが、未だ draft の段階であり、ここに載せた1988年の設計規準は ASD である。しかし、この規準の特徴は、切欠き底での割れの発生がせん断応力のみにより発生するのではなく、曲げモーメントによって生じる繊維に直角方向の応力も関係していることを考慮した式になっていることである。これは破壊力学的な考え方がこの規準に反映されていることの表われであり、また、材料強度につい

ても既に、荷重継続時間、含水率、使用温湿度条件の影響を算定するための係数が設けられており、RBD が導入された場合には荷重および耐力係数等が加わった改訂がなされるものと考えられる。

### 1.4 ヨーロッパの設計規準(ユーロコードV)

未だ draft の段階にある規準案<sup>9,10)</sup>であるが、破壊力学、特にひずみエネルギー解放率  $g$  に基づく次のような案が提案されている。

$$V \leq \frac{2bh_e}{3} k_v f_{vd} \quad (8)$$

$$k_v = \frac{\gamma \sqrt{\frac{EW}{f_v^2 h}}}{\sqrt{0.6\alpha(1-\alpha)\frac{E}{G} + \beta \sqrt{6\left(\frac{1}{\alpha} - \alpha^2\right)}}} \quad (9)$$

$$k_v = \frac{5}{\sqrt{h}(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0.8\beta) \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}} \quad (10)$$

傾斜切欠きをもつ場合は、

$$k_v = \frac{5\left(1 + \frac{1.1i^{1.5}}{\sqrt{h}}\right)}{\sqrt{h}(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0.8\beta) \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}} \quad (11)$$

ここに、

$f_{vd}$  : 設計せん断強度、 $f_v$  : せん断強度

$\alpha = h_e/h$ 、 $\beta = s/h$ 、 $i = dn/ln$

$\gamma$  : 係数、理論的には1.5(ただし実験的にはこれより小さい値が得られており、多くの実験により決められるべきである。)

$E$  : 繊維方向弾性率

$G$  : せん断弾性率

$W$  : 繊維に沿った割れにおけるエネルギー解放率

ただし、式(10)および(11)での  $h$  の単位はmmである。

このようにユーロコード(Eurocode V)案では、破壊力学におけるひずみエネルギー解放率を導入し、理論と対応した設計規準を作成しようとする努力がみられ、しかも、出来る限りそれを簡素化した数式にするため、 $E$ 、 $W$ 、 $f_b$ の相互の比率が樹種の違いによってさほど変わらないことをうまく利用するなどの工夫が見られる。

## 2. 具体例による比較

上記の設計規準により得られる値を比較するため、具体例をあげて計算してみることにする。例えば、 $2 \times 8$  (38mm×184mm)のSPF(スプルース、パイン、ファー)上級構造材もしくはselect structuralの人工乾燥材を床根太として用い、材端部に90°の欠き込みが梁せいの1/3の深さまで曲げの引張側になされているとする。なお、根太は61cm以下の間隔で3本以上あり、これらには9.5cm厚以上の合板床板が釘打ち(2 in : common nail, 30cm以下の間隔)されている。また、支持部(の荷重中心)と欠き込み部との距離は梁せいの半分の長さとする。

(1) 日本建築学会の木構造計算規準によると、式(1)より、

$$V \leq \frac{2}{3} \left( \frac{2}{3} \right)^2 \times 3.8(\text{cm}) \times 18.4(\text{cm}) \times 7(\text{kgf/cm}^2)$$

$$V \leq 145(\text{kgf}) = 1.42(\text{kN}) \quad (\text{長期荷重に対し})$$

長期荷重に対して1.42kN, 短期荷重に対してはこの倍の2.84kNまで許容される。

(2) カナダの設計規準によると、式(2)および(3)より、

$$V_f \leq 0.9 \times \frac{2}{3} \times 0.038(\text{m}) \times 0.184(\text{m}) \times 1.00 \times 10^3(\text{kN/m}^2) \times 1.0 \times 1.4 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.2 \times \left( \frac{2}{3} \right)^2$$

$$V_f \leq 3.13(\text{kN})$$

ここで注目すべきことは、複数の根太が床板に接合されているため、根太の強度のバラツキの影響は小さくなるので、システムファクタ $K_H$ として1.4が与えられていることである。また寸法効果係数として、はり丈のもっと大きい材が基準であるため $K_{zv} = 1.2$ が与えられている。

(3) オーストラリアの設計規準によると、まず式(7)より、

$$F_{Sj} = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 1450(\text{kPa})$$

支持点での反力が $V$ であり、切欠きまでの距離がこの例の場合 $h/2$ であるから、 $M = Vh/2$ である。また $g_{40}$ は、 $l_n/d_n = 0$ ,  $d_n > 0.1h$ を第1表に適用すると、

$$g_{40} = 9.0/h^{0.45} = 0.861$$

したがって式(4)より

$$\frac{3 \times V \times 0.184}{0.038 \times (0.184 \times \frac{2}{3})^2 + \frac{3 \times V}{4 \times \frac{2 \times 0.038 \times 0.184 \times \frac{2}{3}}}} \leq 0.861 \times 1450$$

$$965V + 1287V \leq 1248$$

$$V \leq 0.554(\text{kN})$$

第1表の $g_{40}$ の値からもわかるように直角の欠き込みは非常に小さな耐力しか認められない。切欠きをもつ梁の終局破壊による設計というよりも、切欠きからクラックが発生し進展する荷重を設計耐力にしようとする規準であることがわかる。

(4) ユーロコード案によると、式(10)より、

$$k_v = \frac{5}{\sqrt{184} \left( \sqrt{\frac{2}{3}}, \frac{1}{3} + 0.8 \times \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2} - \left( \frac{2}{3} \right)^2} \right)} = 0.418$$

したがって式(8)より

$$V \leq \frac{2}{3} \times 38(\text{mm}) \times 184 \times \frac{2}{3}(\text{mm}) \times 0.418 \times f_{vd} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$V \leq 1.30 \times 10^3 \times f_{vd}(\text{N})$$

例えば $f_{vd} = 1.45(\text{N/mm}^2)$ とすると、

$$V \leq 1.88(\text{kN})$$

ユーロコード案は破壊力学に基づく理論と実大の実験結果との比較検討により導かれたものであるが、あくまでもまだdraftの段階である。

### おわりに

以上の具体的計算例には、各国のASD, LSDの違いによる各種の係数の違いを示す意味もあって規準に出来るだけ忠実に計算例を示した。しかし、これでは切欠きによる強度低減そのものの比較がちょっとむずかしいと思われる。そこで、切欠きのない場合と比べて、梁せいの1/3まで切欠きのある場合は、切欠きのない場合の何%位の強度になるかを示すと、

日本およびカナダでは — 29.6%

オーストラリアでは — 12.3%

ユーロコードでは — 18.6%

ということになる。

随分違っているなど見るか、1/3の切欠きに対してこの程度の差なら意外に似ていると捉えるか、

人により印象は異なるものと思われるが、この違いの大きな要因は、安全率あるいは信頼性をどの程度にとるかの違いがある。また、もうひとつは切欠きをもつ梁の理論解析が容易でなく、特にその結果に大きな影響を与える複合応力下での木材の破壊のクリテリオン (criterion) が確立していないことに起因している。このことは今回取上げなかったが、梁の中央部の引張側に切欠きのある場合の耐力に関する理論的予測においてさらに大きな問題となってくる。実大の切欠き梁の実験データが未だ十分でないことと合わせて今後の大きな課題である。

ここでは RBD について十分に述べられなかったが、LSD に基づく木構造設計規準の具体例の詳細を知りたい方には Keenan のテキスト<sup>4)</sup>を読まれることをお勧めしたい。また、RBD, LSD, LRFD の概要を知りたい方には、鋼構造荷重・耐力係数設計法試案<sup>2)</sup>が比較的好く説明されていることを紹介してこの解説の結びとしたい。

#### 文 献

- 1) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準 (案)・同解説 (1990)
- 2) 日本建築学会構造委員会鋼構造分科会：鋼構造荷重・耐力係数設計法試案 (1986)

- 3) Canadian Standards Association: Engineering Design in Wood (Limit States Design) CAN/CSA-O86.1-M89 (1989)
- 4) F.J. Keenan: Limit States Design of Wood Structures, Morrison Hershfield Limited (1986)
- 5) R.O. Foschi, B.R. Folz and F.Z. Yao: Reliability-Based Design of Wood Structures, Dept. of Civil Engineering, Univ. of British Columbia (1989)
- 6) D.M. Onysko: Deflection Serviceability Criteria for Residential Floors, Forintek Canada Corp. (1988)
- 7) 日本建築学会：木構造計算規準・同解説 (1988)
- 8) Standards Association of Australia: SAA Timber Structures Code Part1-Design Methods, AS1720.1 (1988)
- 9) P.J. Gustafsson: 1991 International Timber Engineering Conference London, I.66 (1991)
- 10) H.J. Larsen, H. Riberholt and P.J. Gustafsson: Note on EUROCODE 5-Design of notched beams, 私信 (1992)

(1992. 10. 5 受理)

### 3. 強度データ収集の現状

東京大学農学部 中村 昇

#### 1. はじめに

8年前、初めて全国より実大材の強度データが収集され、1988年3月に日本木材学会 木材強度・木質構造研究会編「構造用木材—強度データの収集と分析」という形でまとめられた。この強度データを基に、新JASが制定され、それにとまなう許容応力度が算定された。前回のデータ収集は、大きな役割を果たしたと考えられる。それから8年が経過し、新JASが施行され新たにデータが蓄積されたと考えられること、継続的な収集が必要であること、また次に挙げる主旨から再度強度データを収集すべきではないだろうか。

#### (1) 実大材の強度だけでなく、無欠点小試験体についても収集

実大材と無欠点小試験体の強度を結びつけて行きたい。

#### (2) 製材だけでなく、丸太、立木および集成材、LVL等のエンジニアリングウッドについても収集

このようなデータは収集されていない。また特に丸太から製材にいたるヤング係数についてのデータが多数収集されている可能性があり、新JAS同様、新たな「素材のJAS」が模索して行けるのではないか。

#### (3) 強度だけでなく、接着性能や加工性等も可能であれば収集

研究会の枠を超えているかも知れないが、国産材の利用、森林の活性化という観点から、是非必要なデータと考えられる。

さらに、今回収集したデータはデータベース化し、強度や材質に関連した文献の検索も可能にした木材情報ネットワークを構築し、自由にインプット、アウトプットができ、継続的にデータを収集することができるシステムにして行きたい。そして、将来的には誰でも自由に見れるようなシステムにして行ければと思います。

#### 2. これまでの経過

#### (1) 昨年8月秋田で開かれた、日本木材学会 木材強度・木質構造研究会秋期シンポジウムにおいて、研究会として強度データを全国より収集して行くことを提案

(東大演:中村)

#### (2) 製材の強度データだけでなく、無欠点小試験体、丸太、立木、エンジニアリングウッド(集成材、LVL等)、接着性能や加工性等、材質のデータを収集して行く

(秋田木研:小泉、東大演:中村)

- (3)材質データ収集に関し、アンケート調査実施(2月):付録A
- (4)学会(4月9日)において討論会を行う:付録B
- (5)研究会会員に材質データ収集の経過を報告(6月):付録C
- (6)材質データ収集WGにデータのフォーマットを提案(7月)
- (8)フォーマットを決定(9月):付録D

### 3. アンケートおよび討論会のまとめ

収集するデータの内容、データベース化、オープン化についての意見をまとめると、次のようになるのではないかと。

- (1)データ収集に関しては、肯定的、積極的な意見が多い。
- (2)収集した方がよいデータは、多岐にわたっている。
- (3)実用性の高い、将来につながって行けるようなデータベースを構築すべきである。
- (4)木材情報ネットワーク(オープン化)については、慎重に行うべきである。

また、実際にデータ収集を行ってゆく上で、

- (5)森総研や住木センターとの連携が重要である。

これらのことから一番感じるのは、木材についての情報が少ないのではないかとということ、各研究機関にあるデータをまとめる作業がなされていない(データベース化されていない)ということ、またデータをオンライン化して行く上での、学会の役割をどう考えるかということです。

### 4. データのフォーマット(付録D)

- (1)収集は試験体別に行う

無欠点小試験体、製材(ラミナも含む)、丸太、立木、集成材、LVL  
その他エンジニアリングウッド

- (2)収集方法

フォーマットにしたがい、Lotus 123、Multiplan、Excel等市販の表計算ソフトに入力して、それぞれファイルを作成して保存する。データの欠損があってもかまわない。

また、野帳でも可とする。

海外から木材製品が入り込み、林業のみならず、木材工業も空洞化が叫ばれる世の中となった。木材の生産者側である森林(林業)から、利用者側である都市(木材工業)への木材の流れを、総合的に考えて行かなければならない時代になったのではないのでしょうか。そのような意味でも、木材に関する情報を幅広く発信する必要があると思います。特に今回の材質データ収集における林木情報は、このような材質データを林木育種や林業の分野に提供して行くことにより、今後の林木育種や林業と木材工業との関わりの上で有意義な情報となると考えられる。

せっかく全国的に材質データを収集するのですから、できるだけ多くの項目について収集して行ければと思います。

## 5. おわりに

今回の材質データ収集に関し、各研究機関にお送りしたアンケートにある「誰でも見ることのできるオープン化」ということが、研究機関の方々に強烈な印象となった残ってしまったようです。このことについては謹んでお詫びを申し上げます。

今回の材質データ収集の目的は、木材に関する情報をまとめ、できるだけ多く世の中に送り出すことです。とは言うものの、どうしても、「どこどこ産のスギが強い、弱い」という話になってしまい、すべてを世の中に送り出すわけには行かないでしょう。それには時間がかかると思います。ですから、まずはデータを提供していただいた研究機関の同意が得られる項目だけを公表し、世の中が変わって(変えて)から多くのデータを公表して行くべきと思います。

また木材情報ネットワークを構築しておけば、今後様々な情報(接合部の強度、実大建築物の構造試験等)を収集する際、非常に容易になります。さらに、メディアとしてインターネットを用いれば、画像を利用したわが国の木材研究の現状を世界に発信したり、世界各国の木材研究機関とネットワークを組んで行こうとも考えています。

付録A  
材質データ収集アンケート

0. 申し訳ありませんが、所属とお名前をお書き下さい。

所属：

氏名：

1. 今回のデータ収集に賛同する。

する

しない

2. 管理しているデータの提供が可能である。

できる

できない

今回のデータ収集に賛同されない方、データの提供が可能でない方もお答え下さい。

3. 現在考えているのは、次の3種類ですが、収集した方がよいと思われる試験データを挙げて下さい。

強度試験(実大材、小試験体)、接着試験、加工試験

収集した方がよい試験データ( )

4. 現在考えている収集項目は以下に示す項目ですが、収集した方がよいと思われる項目を挙げて下さい。また、以下に示す項目で部分的にでもデータとしてある項目に○印を付けて下さい。(アンダーラインは前回収集した項目です)

(1)強度試験

(2)接着試験

(3)切削加工試験

以下に示す項目は案であり、完備している必要はありません。当然のことながら、記録している項目のみで結構です。

◎収集項目

(1)強度試験(曲げ、引張、圧縮：製材、集成材、LVL、丸太、立木)

林木情報 伐採地(産地)  
造林地/天然林  
齢級、樹種  
系統その他

断面寸法 材幅、材せい

木取り 心持ち/心去り

小試験体の場合：形成層年齢

含水率 測定方法

## 比重

欠点 節径比(最大節径比、最大集中節径比、節面積比、材縁部節面積比、断面欠損率)、平均年輪幅、繊維傾斜

JAS等級 旧JAS、新JAS、枠組みJAS

その他 荷重全スパン、荷重点間距離

MOE 全スパン、荷重点間、flatwise

測定方法：打撃音法(静的試験値との換算)、静的・死荷重載加(せん断を含むMOE、含まないMOE)

比例限度・MOR 測定方法

### (2)接着試験(特に未利用樹種)

樹種

比重

含水率

接着剤

接着強度 せん断、剥離

### (3)切削加工試験(特に未利用樹種)

樹種

比重

含水率

切削加工方法

切削抵抗

5. Lotus 123, Excel, Multiplan等市販の表計算ソフトを用い、テキストファイルで入力し、ディスクで収集しようと考えておりますが、どのような収集方法が適当でしょうか。

6. わが国には、ASTMのような実大材の試験についての標準的な試験方法がありません。これを機に標準的な試験方法をつくって行くべきと考えますが、いかがでしょうか。

必要

要らない

7. 研究で得られたデータは、なるべく多くの人の目に触れることが重要と思います。したがって既に公表したデータは、なるべくオープン化した方が良いでしょう。将来マルチメディアが発達し、いつでも自分の欲しい情報が得られる社会になるといわれています。林業や木材工業においても情報ネットワークが必要ではないでしょうか。例えば、得られている材質の情報をオープン化し、全国材質マップをつくったらどうでしょうか。あるいは、立木材質マップはどうでしょうか。どこそこの山にはこれくらいの材質を持った立木が、将来何百年にわたって、年間何万m<sup>3</sup>供給可能である。このような強度、ヤング係数、加工性、接着性、耐久性、あるいは森林資源、木材資源、供給可能量、材質のデータベースをつくり、ネットワークを構築する。大学であればインターネットを

用いて、インターネットのない施設ではパソコン通信を介してインターネットに接続し、誰でもがデータを見ることができるようにしたらどうでしょうか。

このような木材情報ネットワークをつくることに賛成ですか。

賛成する

賛成しない

8. 4/6～4/9に学会がありますが、今回は研究会のシンポジウムがありません。そこで、可能であれば集まりを持ち、本件について討論できればと考えております。学会の予定より可能な日時は4/9、13:00～15:00と思われれます。

学会時の討論会に参加が可能ですか。

参加できる

参加できない(他の日時に可能である場合は  
可能な日時をお書き下さい)

( )

9. 材質データ収集WGに参加されたい方がありましたら、所属とお名前、連絡先をお書き下さい。

10. その他、ご意見等何でも気づかれた点をお書き下さい。

ご協力どうもありがとうございました。

付録B  
討論会メモ

田中(森総研):前回(於秋田)のシンポジウムで、研究会として強度データを収集することが認められたというが、そのような議題がシンポジウムで出ることについての事前のアナウンスがなかったことは問題。

池田(熊本県):熊本は前回の強度データ収集では50本のデータを提出し、有効に使われたと思っている。データの蓄積は重要だと認識しているが、解析が問題で、公の利益になるものに限った方がよい。他県との比較をされては困る。

中村(東大演):他県との比較をするような使い方は間違いだ。

武田(信州大):強度に関与する因子は非常に多様なので、生データから地域の評価には結びつかないのではないかと。

田中:データの質を揃えることが難しい。

飯島(秋田木研):前はJAS制定などの関係で時間がなく、データの質では少し問題があった。質を揃えることが必要。使い方やデータの出し方(悪いデータを省くなどの取捨選択は困る)にも問題点がある。また、強度データ収集をどの段階でオーソライズするか(学会、研究会、WG、有志)、社会的な信用を得るためには、ある程度の権威付けが必要である。

田中:信頼性の点からは、パブリケーションされたデータを集めることになる。

飯島:データを出すかどうかは、各組織の判断に任せることになる。

池田:今回、アンケートに答えるにも場長の許可が必要だった。

芦原?(大分県林試):データの使われ方が決まってから、データを提供するかどうか決めたい。

平嶋(名古屋大):木材は建築材料として他材料と競合する生物材料である。材質のコントロールはできないので、平均値とバラツキを出しておくことが重要である。現状では地域に密着した使われ方をしているのでも、その意味でも各地域での統計値を出しておく必要がある。LSD(限界状態設計法)の検討が進んでいるが、設計法は今後多様化する方向(例えば地域ごとに設計法を認める)にある。地域ごとデータを用意するほかに、全体を見渡すことのできる基礎的なデータベースが必要である。

板垣(東北大工):建築側からすると木材強度のデータベースが必要である。

池田:データ収集の目的を樹種全体を見るために限るのであればよい。

中谷(富山県林):前回のデータ収集は非常に役立っている。

芦原?:データのアクセスはオープンにしないで管理してもらいたい。

飯島:今回の収集データの項目は、前回から発展してもらいたい。P- $\delta$ 曲線など。

武田:JAS改正などの基礎データとするなら、WGに森総研のスタッフが入るべきでは。

飯島:自由な研究目的と行政がらみの目的は違う。

平嶋:日本の構造設計は、許容応力による設計以外認められていないので、外国からの参入が難しい。現在は構造評定を短期化するなどで対応しているが、許容応力による設計はすたれる方向にある。今後LSDを取り入れるためには、他の材料と同じではなく木材独

自の抵抗係数や耐力係数を求める必要があり、その基礎としてデータ収集の意義は大きい。強度データベースは、会員規約を設けて会員制にしてはどうか。

小松(森総研):前回のようない簡単なデータ集ではなく、日本の木材データ集の決定版を出版して欲しい。

中村:まず、地域ごとにWG(人)のネットワークを作りたい。

飯島:樹種別にWGを作ってはどうか。

中島(建研):総プロでは、3年間でまとめたいので、それに間に合うようにしていただきたい。

全国をいくつかの地域に分け、それぞれの地域ごとにデータを収集していただくと考えています。つきましては、まことに勝手ではありますが、材質データ収集WG参加希望者を含め、地域ごとの代表者を以下のように決めてしまいました。下線は参加希望者です。

北海道:藤原、森泉(北林産試)、中村(東大演)

東北(青森、秋田、岩手、宮城、山形、福島):岡崎、小泉(秋田木研)、高橋(山形林試)

関東(栃木、群馬、埼玉、茨城、千葉、東京、山梨):林、長尾(森総研)、植本(東大)

北陸(新潟、富山、福井、石川):中谷(富山林技セ)

中部(静岡、長野、岐阜、愛知):池田(静岡林技セ)、武田(信州大農)

近畿(滋賀、三重、京都、大阪、奈良、和歌山):海本(奈良林試)、内迫(三重大生)

中国(鳥取、島根、岡山、広島、山口):小玉(岡山木加技セ)、

四国(香川、徳島、愛媛、高知):林(愛媛大農)、坂田(徳島林総技セ)

九州(福岡、佐賀、大分、熊本、宮崎、鹿児島、沖縄):高田(九大農)、岩下(池田)(熊本林研試)、福留(函師)(鹿児島工技セ)

付録C  
アンケートの集計

I. アンケート用紙回収率：49%

- (1) 国立・公立研究機関(41機関48科中)26科：54%  
(2) 大学(27大学41講座中)18講座：44%

II. 集計

|                 |      |       |     |
|-----------------|------|-------|-----|
| 材質データ収集に賛同する    | 100% | 賛同しない | 0%  |
| データを提供することができる  | 80%  | できない  | 20% |
| 標準的な試験方法の作成が必要  | 90%  | いらぬ   | 10% |
| 木材情報ネットワークに賛成する | 90%  | 賛成しない | 10% |

III. 意見

(1) 収集した方がよいデータ

- ・部分圧縮やせん断
- ・強度試験におけるS-S曲線とそれに付随する最大たわみ
- ・最大たわみ
- ・JAS等級は、全体等級か荷重点間等級か？
- ・JASにとらわれず、むしろJAS改定のデータとする方がよい
- ・集成材、LVLについてはラミナや単板あるいは原木段階でのデータ
- ・含水率の変化に伴うMORとMOEの値
- ・実大材の含水率の場合は、測定方法を確認
- ・産地、含水率、節径比、MOE等はなるべく詳細に収集した方がよい
- ・各機関のデータに計測方法等の統一性があるかが問題、データの洗い直しが必要
- ・乾燥や接合部など当該研究会があればそれと共催
- ・2x4材
- ・異樹種(特に雑木)の接着試験
- ・接着試験(試験方法の条件:治具、試験スピード・スパン等)
- ・単板の切削加工試験(特に雑木)
- ・木質接合部(形態、材の剛性・強度、履歴曲線)
- ・接合の強度
- ・接着や加工に比べはるかに重要な乾燥(樹種、容積重、生材含水率、心辺材の割合、100°C試験、収縮率比、狂い、乾燥時間、割れ易さ、木理、芯持ち等)
- ・乾燥、収縮、膨張(潤)などの物理試験
- ・成長応力
- ・耐腐朽性
- ・粘弾性

- ・面圧
- ・ファイバーボード、パーティクルボードなどの木質ボード類の強度データ
- ・素材、木質材料を問わず、エンジニアリングウッドと呼ばれるもの全般
- ・人為的に損傷を与えた材(インサイジング材など)の強度データ
- ・再構成材料における比重
- ・材としての利用方法の例
- ・何が集まるかについての2次調査が必要

#### (2)実大材の標準的な試験方法について

- ・製材を含めてエンジニアリングウッドの生産者側が試験を実施する社会的背景が存在するか。国・県等の試験機関と大学、建築関連機関との連絡調整で十分
- ・実大材の試験実績は曲げが圧倒的に多く、他は不十分。標準的な試験方法を作るだけのバックデータがない
- ・日本独自のものは必要ない
- ・急がず、時間をかけて、ISOの動向等を考慮しつつ進める必要

#### (3)収集の方法について

- ・統一したソフト
- ・基本フォーマット
- ・パソコン通信を利用
- ・パソコン通信、インターネットを積極的(強制的)に活用
- ・野帳でもOK
- ・FDだけでなく、試験条件、計測方法等についての記述(図、写真等を含む)も収集する

#### (4)木材情報ネットワークについて

- ・全体的な考え方には賛成
- ・データの独り歩きの防止、または関係者の合意形成が必要
- ・素材の材質は非常にバラツキが大きく、数値化することに困難を伴う。内容が公開されることにより、不利益を被る者があれば問題である。行政的には認められないのでは？
- ・営利目的の利用に歯止めをかけるべき。
- ・立木、原木買付けの商習慣を十分に調査した上で実施すべき
- ・林業関連の諸団体や研究機関と事前に十分話し合いをする必要
- ・誰がつくるのか(科研等を利用)
- ・誰が管理するのか
- ・膨大なデータを処理する時間的な余裕が大学の先生にあるのか？
- ・国産針葉樹については再構成材料として利用するのが一つの方向であり、異樹種複合集成材や集成材+LVL、LVL+製材品とした現行のJASにない材料を研究会のなかで、試験方法を統一してデータ蓄積して行ったらよい。

- ・電話回線から直接利用できる必要性
- ・要求内容は個人により多様、一旦システムをつくってしまうと変更が難しいので、多様な要求を十分調査した上でスタート

#### (5)その他

- ・実用性の高いデータベースを構築すべき
- ・WGのメンバーは日本各地に分散すべき
- ・WGに複数の県の試験担当者を加えて仕事を進めるべき
- ・研究者→(+)行政→(+)業界となる手順が大きな発展目標
- ・県の林業試験場の多大なバックアップが必要で、森総研からの依頼が重要な因子になる
- ・住木センターとの連携
- ・全国材質マップがあれば便利
- ・産地名を公表できない場合もある
- ・所属長の承認が必要なデータも存在
- ・現状では、データをオープン化し誰でもアクセスできるようにするには早急
- ・学会研究会できちんと管理してデータ集を刊行して行く方が適当
- ・データの一方向的な通行ではなく、何らかの形でフィードバックできるシステム
- ・日本の山林、林業の復興のための有効資源活用を考えた全国規模での取り組みに期待
- ・グラフや写真なども画像データとしても収集可能
- ・収縮率、材色、比重についてのデータを収集
- ・国産材に関して、含水率と強度の関係を表す補正式の整備
- ・丸太の場合、玉番または採材高のデータ
- ・節径の測定に際し、節の領域の定義をもう少しはっきりすべきで、どこからどこまでを測定すればよいか明確な基準を設けることが第一
- ・住宅構造部材や構造体そのもののデータ収集は？
- ・実大材の試験方法(材料、構造)の標準化
- ・特殊な試験方法についてもデータベース化
- ・前回の調査内容で問題となり、収集の対象から外れた項目等を知りたい
- ・総論ではデータ収集に賛成、しかし具体的な話になるとデータの取り扱い等難しい点があり、各方面の意見を十分調整して進めるべき

#### (6)研究会会員に材質データ収集の経過を報告後の意見

- ・地域間の争いや思惑がからんで余計なことはしたくないかも知れないが、外材や他材料とどう競合したり共存して行くのか、発想の転換が必要。
- ・弱いものは弱いなりにどう使うべきだとの提案を研究会だからこそ、示すべき。
- ・学会としてのスタンスでデータを整理。
- ・もっと積極的に、情報を外に発信してゆくべき。
- ・少数の研究者だけで、LSD(限界状態設計法)を検討するのではなく、みんなが共通

の土俵に入って思想統一を図り、何を整理して行くかを論議。

- ・地域の代表者を決めるのはよいが、結局利益代表的な色合いが強くなって、なにがどうまとめられて行くのか、疑問。

- ・研究全体が規格化対応に向きすぎていて、活動そのものも停滞しているようだ。研究会として、基本的な問題を徹底的に論議し、分担研究や共同研究を進めて行くことも検討して欲しい。

- ・これから構造材の等級はMSR。実大材について、年輪幅、比重、含水率、MOE、MORと諸欠点など明記したデータの収集があればよい。

- ・規格は全針葉樹を対象とした全国一律規格は無理。北米規格を基とした各地方の樹種についての規格で、MSR材に関連させたものがよい。木材規格の地方分権化。

- ・狭義の強度・構造関連資料とすべき。

- ・材質特性の地域別特性にはじめから重点をおくのは難しい。

- ・将来は世界のデータ(クリア、イングレード)が入手できるデータベース構築を望む。

- ・民間企業の場合、全データを無条件に公開するのは難しいが、基本的な材質データに関しては、オープンにしてもよい。

- ・データについて、一般的なオーソライズが足りない。

- ・材質データ収集の目的を設定し、その後の利用法を考えるべき。

- ・どのようなことに利用できるデータベースとするか、についてコンセンサスを得ることが重要。

- ・私的なグループの状態では、仕事をしていながら上司や周囲からも篤志家だけの集まりとしてしか認められない。

- ・住木センターを窓口にして、取りまとめ、報告書印刷のための予算的裏付けをした方が取り組み易い。

- ・一定の時期(論文としてまとめるなど)が経過した収集データは、“資料”として公開すべき。

- ・現在の行政は、大面積に植栽されたスギ人工林をかかえ、林業・林産業を含めた地域閉鎖型社会の形で守りの体制に入っており、材質評価のもととなり得るデータの流通には消極的であるように思われる。海外から様々な情報を以て外材を日本に売り込んでくる状況も考えられるので、日本の林業・林産業も情報のネットワークを構築し、力をつける必要があるのでは。

付録D  
データのフォーマット

I. 強度性能

(1) 無欠点小試験体

- a. 遺伝情報：樹種名、種子産地、品種、母親クローン名
- b. 系統：クローン／実生
- c. 造林（林齢、施業履歴）／天然（樹齢、林相）
- d. 林分：所在、標高、斜面方位・傾斜、土壌型
- e. 林木の個体番号（同一の林木から採取した試験体かどうか）
- f. 採材部位：高さ、形成層年齢あるいは髓から15年より内／外、辺材／心材
- g. 断面寸法：材幅、材せい
- h. 比重
- i. 平均年輪幅
- j. 含水率
- k. 曲げ試験：静的MOE、比例限度、MOR、最大たわみ
- l. 縦圧縮試験：縦圧縮強さ、縦圧縮比例限度、縦圧縮ヤング係数
- m. 横圧縮試験／部分圧縮試験：横圧縮比例限度／部分圧縮比例限度、辺長の5%部分圧縮強さ、横圧縮ヤング係数
- n. せん断試験：せん断強さ
- o. せん断剛性試験：方法、せん断弾性係数
- p. 硬さ：木口、柾目、板目
- q. 収縮率：方向

(2) 製材（ラミナも含む）

- a-iは無欠点小試験体と同
- j. 欠点：最大節径比、集中節径比、節面積比、その他
- k. 心持ち／心去り
- l. 規格：旧JAS／新JAS／枠組壁JAS、等級
- m. 含水率：電気抵抗／高周波／全乾法
- m. 曲げ試験：方法（スパン、荷重方法、変位の測定区間、縦づかい／平づかい）  
MOE、比例限度、MOR、最大たわみ、P- $\delta$  曲線
- o. 共振法によるヤング係数測定試験：打撃音／たわみ振動、ヤング係数
- o. 縦圧縮試験：縦圧縮強さ、座屈強さ
- q. 引張試験：縦引張強さ
- r. 振り剛性試験：せん断弾性係数
- s. 立木、丸太との関連：立木や丸太での試験を行っている場合にはその番号を記入

(3) 丸太

a-eは無欠点小試験体と同

d. 採材部位:高さ

e. 断面寸法:元口径、中央径、末口径

f. 比重

g. 平均年輪幅/年輪数

h. 欠点等

i. 素材規格の等級

j. 含水率:生材/気乾

k. 曲げ試験:方法(スパン、荷重方法、変位の測定区間、縦づかい/平づかい)

MOE、比例限度、MOR、最大たわみ、P- $\delta$ 曲線

l. 共振法によるヤング係数測定試験:打撃音/たわみ振動、ヤング係数

m. 捻り剛性試験:せん断弾性係数

n. 立木との関連:立木での試験を行っている場合にはその番号を記入

(4) 立木のヤング係数

a-dは無欠点小試験体と同

c. 測定方法:曲げ/伝播速度

d. 測定部位

e. 測定日時:季節等

f. 胸高直径

g. 樹高

(5) 集成材、L V L

a. ラミナの情報:同一ロットにおけるラミナの情報があれば、製材の番号を記入(例、82-169)

b. 規格:等級

c. 配置:ランダム/意図的

d. 曲げ試験:方法(スパン、荷重方法、変位の測定区間、縦づかい/平づかい)

MOE、比例限度、MOR、最大たわみ、P- $\delta$ 曲線

d. 共振法によるヤング係数測定試験:打撃音/たわみ振動、ヤング係数

f. 縦圧縮試験:縦圧縮強さ、座屈強さ

f. 引張試験:縦引張強さ

h. 振り剛性試験:せん断弾性係数

(6) その他エンジニアリングウッド

- a. 材料名
- b. 断面寸法:材幅、材せい
- c. 比重
- d. 含水率
- e. 曲げ試験:静的MOE、比例限度、MOR、最大たわみ
- f. 縦圧縮試験:縦圧縮強さ、縦圧縮比例限度、縦圧縮ヤング係数
- g. 横圧縮試験:横圧縮比例限度、横圧縮ヤング係数
- h. せん断試験:せん断強さ
- i. せん断剛性試験:方法、せん断弾性係数
- j. 硬さ:木口、柃目、板目
- k. 収縮率:方向

II. 接着性能

接着条件(試験体作成条件)

- a. 接着剤:種類、メーカー、性状、配合
- b. 比着材:樹種、比重、含水率、寸法(縦、横、高さ)
- c. 接着操作:塗布量、硬化温度、圧縮圧、圧縮時間

接着性能試験条件

- d. 試験方法:JIS、JAS、その他
- e. 試験片の形状:縦、横、高さ
- f. 試験条件:荷重負荷方法、負荷速度
- g. 暴露条件:常態、耐久処理(処理条件、規格)
- h. 接着性能試験結果:接着強さ、木部破断率
- i. その他特記事項

## 4. 非破壊的手法による木材の強度評価

-製材品の強度等級区分および生物劣化材の診断・残存強度評価のために-

農水省森林総合研究所 田中 俊成

### はじめに

「内外の木質材料の非破壊検査の現状」について話題提供を、との依頼を受けたが、浅学の身のこと、この課題では荷が重すぎますので、集成材やボード類等および接合部を除く“木材そのもの”についての、しかも、筆者らが実施している方法を主体とした、① 製材品の強度等級区分のための非破壊的強度推定・評価手法、および② 木材の生物劣化の診断と生物劣化を受けた木材（以下、生物劣化材）の残存強度評価のための非破壊的手法について述べることでご容赦いただきたい。また、木材・木質材料の非破壊試験全般に関する最新情報を入手する一助として、③ 非破壊試験に関する国際研究集会についても触れた。

### ① 製材品の強度等級区分のための非破壊的強度推定・評価手法

製材品の用途の大部分は建築材料、特に針葉樹の製材品のそれは構造用材であろう。ここで、ある樹種あるいは樹種群の、ある材種の構造用の製材品を、強度性能面から区分せずに一つのグループとして用いるとすれば、そのグループ内の強度性能のバラツキも大きく、また、一樹種・樹種群の一材種に対して、そのグループの統計的下限值に基づいた一つの許容応力度しか設定することはできない。その結果、一般的に、要求性能以上の、性能・品質が過剰な製材品を多く用いることになる。そこで、このような無駄を生じさせず、製材品を構造用材として、その性能・品質を信頼して利用してもらうためには、何らかの強度性能面の基準に基づいた区分（グレーディング）、すなわち「強度等級区分」を行うことが必要となる。強度等級区分によって、それぞれの等級内の製材品の強度性能のバラツキが小さくなるとともに、各等級ごとの統計的下限值をもとに許容応力度を設定することができる。その結果、構造用材としての製材品の性能・品質上の無駄を省き、その性能・品質に対する信頼性を向上させることができる。

製材品の強度等級区分を行うには、強度面の基準とするための何らかのパラメータ、および、そのパラメータによって、各製材品の強度を的確に、精度高く、しかも非破壊的に推定・評価する方法の確立が必要となる。

木材の強度等級区分法の分類の一例（飯島泰男）を図1に示す。

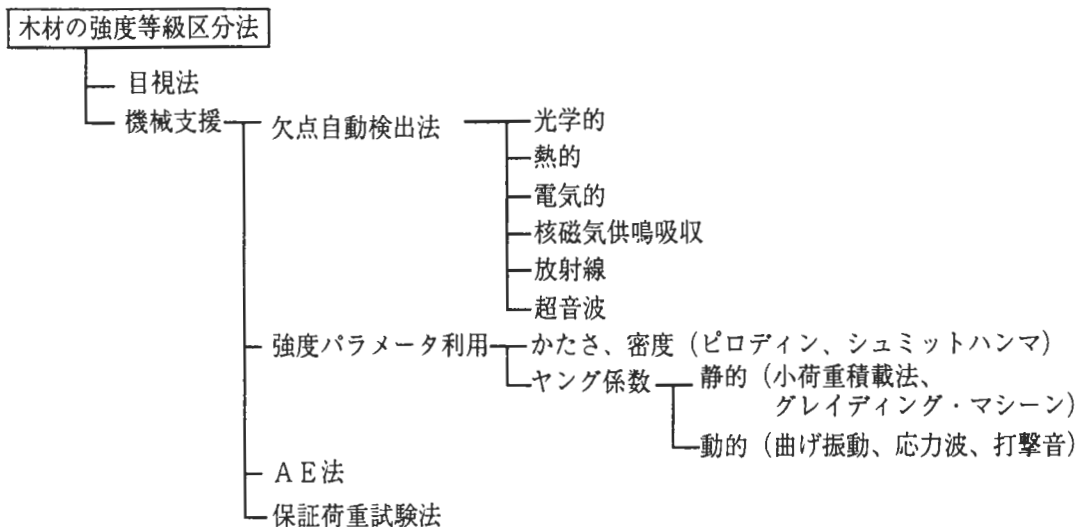


図1 木材の強度等級区分法の分類 11)

### (1) 密度による方法

無欠点材の場合は、その材の密度と強度との間に高い相関が認められるため、強度の推定に有効なことが知られているが、“欠点”を持つ製材品では、一般に、密度と強度との相関はあまり高くはなく、強度のパラメータとしては実用的ではない。

### (2) 目視による方法

従来から、製材品の強度等級区分を行うためのパラメータとして、節、丸身、割れ、平均年輪幅などの“欠点”の位置や程度が用いられてきた。しかし、製材品についての多くの実大強度試験の結果、これらの“欠点”が強度に及ぼす影響の度合、すなわち両者間の相関の大きさは、樹種や寸法の違いによって異なっていることが明らかになってきている。たとえば、節径比と曲げ強度との間の単相関係数には、樹種によって差があり、統計的には相関が認められても実用上は不十分な場合や、あるいは相関が認められない場合がある。正角の節径比と曲げ強度との間の単相関係数は、もちろんサンプル数にもよるが、アカマツやベイツガでは概ね0.65程度であったが、スギやヒノキでは概ね0.15～0.25程度であったという報告がある。

### (3) ヤング係数による方法

ヤング係数と強度との間には、一般的に、樹種や材種にかかわらず、高い相関が認められる。たとえば、7樹種の針葉樹材の正角の曲げヤング係数と曲げ強度との間には、いずれの樹種とも、概ね0.6～0.8程度の単相関係数が認められたとの報告がある。

このように、ヤング係数は、強度との間に高い相関をもつのみではなく、非破壊的に測定することができる。このため、ヤング係数をパラメータとして強度等級区分を行うことは、現時点では、最も合理的な方法であると考えられる。

ヤング係数の測定方法は、一般的に、図1にも記されているように、“静的方法”と

“動的方法”とに大別されるが、両者の境界はかならずしも明確ではない。それぞれを細分すれば、下記のように各種の方法がある。なお、これらの方法の分類・呼称は定まったものではない。

1) 静的方法

- (1) 重錘等小荷重載荷による方法
- (2) 材料試験機による方法
- (3) グレーディングマシンによる方法（連続たわみ試験機法）

2) 動的方法

- (1) 迅速曲げ試験法
- (2) 応力波伝播法
  - a. 超音波伝播法
  - b. 打撃による縦波（応力波）伝播法
- (3) 自由振動法
  - a. 横振動（たわみ振動）法
  - b. 縦振動法
- (4) 強制振動法

**重錘等小荷重載荷による方法** 支点間距離を定めた支点上に製材品を載せ、重錘等を用いて一定の死荷重を、一般的には支点間の中央に集中荷重として、載荷する。このときの荷重および製材品のたわみ量からヤング係数を求める。最も簡便な方法として重錘等の載荷を人力によって行う場合も多いが、かなりの労力を要するため、機械によって小荷重を載荷する簡易型の機械が試作されており（たとえば、“自動重錘載荷器”；千葉保人）、4点荷重方式による市販機もある（“Static Bending Tester”）。

**グレーディングマシンによる方法** 製材品を一定速度で送りながら、短いスパンにおける曲げたわみを与え、一定の荷重を負荷したときのたわみ量、あるいは一定のたわみ量を生じさせるために要する荷重を、連続的・自動的に測定し、曲げヤング係数を求める。海外では、枠組壁工法構造用製材品のヤング係数を自動測定・表示する商業用のグレーディングマシンが稼働している（迅速さを重視した“CLT-Continuous Lumber Tester”、“Finograder”、など）。また、迅速さよりも、経済性と精度向上を目指したものもある（“E-Grader”）。しかし、日本では、正角や平角のような断面寸法が大きな製材品が多く使用されているため、この様な材種にも適用できるグレーディングマシンが開発され、すでに工場で実際に使われているものもある（“簡易型強度等級区分機”；中井孝ら、“グレーディングマシン”；橋爪丈夫ら、“自動応力測定装置”；千葉保人、など）。

森林総合研究所材料性能研究室においても、断面が大きな日本の製材品にも適し、しかも、簡便・迅速で測定精度や測定の再現性が良い、ヤング係数測定方法の確立を目指して、各種の非破壊的方法の適用性の検討を行っているが、ここでは、その中の4種類のヤング係数測定方法を取りあげ、それらの手順と特徴、および各方法を用いた木材用

の機器の例を記す。

**超音波伝播法** 製材品の両木口面に密着させた発信—受信1対の探触子間の超音波の伝播時間を、超音波測定器によって測定し、これと製材品の密度から、その製材品のヤング係数を求める。この方法は、簡便ではあるが、伝播時のエネルギー損失が大きい長大な製材品や、高含水率状態の生材では測定が不可能な場合がある。また、探触子の形状によっては、これらを木口面に密着させることが実務上困難な場合がある。

探触子の形状が工夫され、超音波伝播時間のほか寸法等をキーインすることによってヤング係数をも測定し、強度の推定値を表示する計測器が市販されている（“SYLVA-TEST”；J. L. SANDOSら）。

**打撃による縦波（応力波）伝播法** 製材品の一方の木口面を加速度変換器付きのハンマで打撃して発生させた縦波が、他方の木口面に密着させた他の加速度変換器に到達する伝播時間を、エレクトリック・カウンタで測定する。この時間と製材品の密度から、その製材品のヤング係数を求める。この方法も簡便であり、また、打撃によって大きなエネルギーを与えられるため、長大な製材品にも適用可能である。一方、加速度変換器を木口面に密着させることは実務上困難な場合がある。

加速度変換器付きのハンマを用いる方式の計測器（“Stress Wave Timer”）や、釘にとりつけた加速度変換器を材に打ち込むように工夫したもの（“FAKOPP”；F. DIVOSら）が市販されている。

**横振動（たわみ振動）法** 製材品等を、一方にロードセルを設置し支点間距離を定めた1対の支点上に載せる。支点間の中央位置を軽く打撃して生じさせた横（材軸と直交）方向のたわみ振動をロードセルで感知し、FFT周波数アナライザ等で固有振動周波数を測定する。この周波数と製材品の断面寸法および密度から、その製材品のヤング係数を求める。この方法では、測定は簡便・迅速で、測定精度や測定の再現性にも優れており、高含水率状態の生材にも適用できるが、製材品をセンサに接触させ、特定の支点間距離を設定することが必要となる。

この横振動法を利用し、断面寸法の大きな材やボード類のヤング係数の測定も可能な計測器（“Transverse Vibration E-Computer”；R. F. Pellerinら）が市販されている。

**縦振動法** 製材品の一方の木口面をハンマで打撃して発生させた縦（材軸）方向の振動の振動音をマイクロフォンでとらえ、FFT周波数アナライザ等で固有振動周波数を測定する。この周波数と製材品の密度から、その製材品のヤング係数を求める。製材品を、打撃時に自由振動させるためにクッション材上に載せるなどの工夫をした方が測定精度が良い。また、長大な丸太や梁などについては、自由振動させ、かつ同時に密度の算出に必要な重量を測定するために、ロードセルを介したクレーンで吊り下げる等の方法をとる場合もある。この方法は、センサ等を製材品に接触させたり、特定の支点間距離を設定する必要がないなど、測定が簡便で、かつ迅速である。測定精度や測定の再現性にも優れている。また、高含水率状態の生材にも適用できる。一方、騒音が大きい環境下では、打撃音の周波数の測定時に騒音の影響を受けやすいため、適していない。

縦振動法を利用して、振動音の周波数と重量を同時に測定してポケットコンピューターやFFT周波数アナライザで制御・測定するヤング係数計測器が開発され、市販されてい

る（“ダイナミック・ポータブル・グレーダー”（“ポケットEテスタ”）；祖父江信夫ら、“グレーディングマシン”；池田元吉ら）。

これらの各方法で求めたヤング係数を“機械による強度等級区分”のためのパラメータとして用いるにためには、最終的には、各方法で求めたヤング係数による各種強度の推定・評価の精度、すなわち、各ヤング係数と各種強度との間の相関の大きさが問題となる。ヤング係数を測定する各方法には、上記のようにそれぞれ特徴があるものの、実験によって、いずれの方法によって求めたヤング係数とも、曲げ・縦引張り・縦圧縮強度との間には高い相関関係が認められ、しかも相関の大きさにはほとんど差は見られない、という結果が得られている。簡便さ・迅速さ、測定精度や測定の再現性などの実用的観点からみれば、ヤング係数の測定方法としては、現在のところ、縦振動法が最適ではないかと思われる。

#### **(4) その他の方法**

これらのほかに、木材の強度を評価する方法として、多少“破壊的”ではあるが、ピンの打ち込み量（“PILODYN Wood Tester”；適用について、たとえば田中俊成ら）、あるいはネジの引き抜き力（たとえば“Portable Screw Withdrawal Force Meter”；F. Divosら）を測定する方法がある。これらの測定は局部的であり、また、測定値は基本的には密度を表しており、一般的に製材品（健全材）の強度との相関は低いが、他のパラメータと併用することによって強度評価の精度向上に寄与すると考えられる。また、AEによる強度評価についても詳しく検討されている（佐藤敬一ら、ほか）。

ヤング係数の測定方法も含め、より良い「強度等級区分法」の確立が望まれる。

## **② 木材の生物劣化の診断と生物劣化材の残存強度評価のための非破壊的手法**

木造建築物にとって、言うまでもなく、構造安全性は最も重要な性能のひとつである。木造建築物の構造安全性を確保するためには、木造建築物を構成する木質構造部材（以後、構造部材）の強度性能を担保する必要がある。そのためには、構造部材の、初期（建設時）の強度性能を評価し、保証するのみではなく、建築後の使用期間中における、最大の劣化要因である腐朽・蟻害等の生物劣化による構造部材の強度性能の低減を回避し、初期の強度性能を保持することが重要となる。しかし、現実的には、木造建築物の構造部材の腐朽・蟻害などを完全に防御することは困難な場合も多い。

そこで、既存の木造建築物の構造安全性を保持するためには、建物を構成する各材料・部材の劣化程度を診断（劣化診断）し、使用条件下での生物劣化による強度低減、換言すれば残存強度を把握・評価し、これらの情報に基づいて、材料・部材の更新（補修・交換）も含めた建築物の維持・管理を行なうことが必要となる。すなわち、劣化診断法とは、既存建築物の劣化実態調査時において、各材料・部材の、残存強度をも含む劣化

発生を測定あるいは評価し、その結果によって、補修や交換を実施するための方法である。

木造建築物の構成部材・材料の劣化診断は、通常、1次、2次、3次診断からなっており、この順に判断の客観性・精度とともに必要とされる専門知識の程度が向上する。必ずしも、1次から3次までの診断を順次行う必要はなく、どの診断方法が必要かは、建物の状況や診断者の専門知識の程度等によって定まる。通常、主として、1次診断は、目視観察等によって建物を構成する部材・材料である木材の劣化程度を判定する方法、2次診断は、目視や簡単な工具・計測器を用いて劣化程度を判定する方法、3次診断は、建物の一部を解体することなどを含め、劣化程度・性能低減を直接診断する方法であるとされている。

より高次の診断を行う箇所決定のための劣化部位の検出も、広い意味で1次（、2次）診断に含まれよう。一般に、生物劣化を受ける箇所は、その建築物の立地条件、設計・施工法等によるが、特定の部材に発生し、また、一部材のなかでも局在する場合も多い。そして、局部的な劣化ではあっても、その部材の残存強度に大きな影響を及ぼす場合が多い。したがって、既存建築物の1次（、2次）劣化診断では、劣化実態調査時における各部材・材料の劣化発生を測定・評価し、劣化状況を概括的に把握するばかりではなく、状況によっては、ある部材の残存強度を把握・評価する手法を適用するための予備的診断としても必要となる。従って、これらのための1次（、2次）劣化診断手法は、非破壊的であることは勿論、実用的なものでなければならず、マクロ的・面的に劣化箇所の検出ができ、非接触的であることが望ましい。さらに、3次診断の一部とも位置づけられる残存強度の把握・評価手法も、でき得るだけ非破壊的であり、安全性・簡便性等の点から実用的であることが求められる。

現実的には、構造物・部材への非破壊的診断方法の適用は、主としてコンクリート構造物について行われており、木材が不均質で空隙の多い材料であるためか、木造建築物・木材については、定量的な診断方法および適用例とも限られている。

木造建築物の耐久計画における被害量・耐久診断法（神山幸弘）によると、木材の劣化すなわち腐朽・蟻害の診断法として、目視、打診、触診、顕微鏡による検視、培養、組成成分分析、穿孔、重量、強度、X線、超音波、釘、水分による方法があげられている（　は、ほぼ非破壊的方法）。また、建設省「総プロ」“建築物の耐久性向上技術の開発”およびアメリカ合衆国農商務省の“木造橋の劣化診断と維持管理”のテキストによると、劣化診断法として、目視、嗅覚、触診、小片のはぎ取り、コア採取、顕微鏡による検視、打診、ハンマー打音、打音周波数の分析、超音波、X線CTスキャン、穿孔、ピン打ち込み、健全部の厚さ測定、水分計による水分測定に基づく方法が記されている。

以下に、非破壊的手法による生物劣化の診断方法、すなわち生物劣化部位や程度の検知・定量化（?）、および生物劣化材の残存強度評価の具体的方法について述べる。これらの分類・呼称も定まったものではない。各非破壊的手法の手順と特徴は、前記の「① 製材品の強度等級区分のための非破壊的強度推定・評価手法」の項に記したこととほぼ同一であり、同項に記した木材用の機器の多くも、生物劣化の診断、特に、非破

壊的手法による生物劣化材の残存強度評価にも適用できるものである。

## (1) 木材の表面近傍の劣化に対して

**サーモグラフィ法** 木材の生物劣化箇所の検出を行うため、実用的観点から、非破壊的・非接触的・面的な測定が可能であり、簡便であることなどの諸条件を満たす方法の一つとして、サーモグラフィ法（赤外線映像解析法）の適用が試みられている（たとえば、田中俊成ら）。これは、生物劣化がある程度進行した木材には間隙や空洞が生じ、木材の健全な部分と生物劣化を受けた部分とでは、それぞれの熱特性に差異が生じることが想定されたため、被測定物に人為的に熱流を生じさせた際の、各部分の熱特性すなわち表面温度の差異の経時変化を“サーモグラフ”（高感度赤外放射温度計）を用いて検知しようとするものである。

**目視による方法** 木材が表面に現れている場合、目視は最も簡便で、かつ最も重要な診断方法とされる。目視による劣化診断のパラメーターは、腐朽の場合、材の変色・割れ、子実体の発生、材面の落ち込み等であり、虫害の場合は、穿孔、木粉等である。材色や苔・ほこり等によって、劣化の可能性が高い高含水率の部位を検知することができる場合もある。

目視による劣化程度の判定の基準の一つに、下記の、森林総合研究所防腐研究室による材表面の“腐朽程度の4段階分類評価方法”（雨宮昭二）がある。そして、腐朽程度の各段階を示す数字（腐朽係数）と被評価材の全面積から“腐朽度”を算出する。

| 目視観察による腐朽程度           | 腐朽係数    |
|-----------------------|---------|
| 健全部分または変色部分           | ----- 0 |
| 表面のみがわずかに腐朽           | ----- 1 |
| 表面からわずかに内部に侵入している腐朽   | ----- 2 |
| 表面に亀裂が入り内部に深く侵入している腐朽 | ----- 3 |

**触診法** 木材の腐朽部分は健全部分に比較して一般に軟らかく脆いため、やや破壊的な方法ではあるが、スクリュー・ドライバ、きり等を押し込み、腐朽部位・腐朽程度を検知するとともに、木材表面を少しはぎ取り、目視での判定を行う。この方法による腐朽程度の判定には熟練を要する。

**ピン打ち込み法、等** 多少破壊的ではあるが、上記のように、一定のエネルギー量をもつバネで一定の径のピンを被測定木材の各部位に打ち込み、打ち込み量（深さ）を測定し、その値から劣化程度を判定・評価する方法（“PILODYN Wood Tester”；適用について、たとえば田中ら）がある。この計器は元来、木柱について、経験？等（1次診断？）から判断した劣化の恐れのある部位とない部位との打ち込み深さの比に基づいて腐朽を検査するために用いられているものである。この計器は、建築物に組み込まれた部材についても測定可能である。実験によって、腐朽材、蟻害をうけた材において、“PILODYN Wood Tester”のピン打ち込み深さと曲げ強度との間に高い相関があることが認められており、ピン打ち込み深さによって残存強度（曲げ強度）をある程度評価で

きると考えられる。ただし、局部的な、かつピン長の深までの測定しかできない。どの部位へ打ち込むか等の判断が必要となる。

また、やはり局部的で材表面のみについての測定方法であるが、前記の、ネジの引き抜き力（たとえば“Portable Screw Withdrawal Force Meter”）を測定する方法もある。

## **(2) 木材の内部までのあるいは内部の劣化に対して**

木材は、いわば“空隙”によって成り立っており、特に軽度の生物劣化の場合、非破壊的な手法で内部までに至るあるいは内部に存在する劣化を検出するには、多くの問題が残されている。ここでは主に、実大材の残存強度を推定・評価するいくつかの方法について述べる。

**静的曲げ試験法** 材料試験機等を用いて、静的曲げ試験を行い、荷重とたわみ量から曲げヤング係数を求める方法である。腐朽材、蟻害・虫害をうけた材について、曲げヤング係数と曲げ強度との間には、統計的に有意な関係が得られているため、この方法によって残存曲げ強度を評価できると考えられる。しかし、実際の建築物に組み込まれている部材に曲げたわみを与えることは困難であり、現場での適用には問題があろう。

**超音波伝播法** 超音波伝播を用いた木材の腐朽部の検出（角谷和男ら）や、木造住宅の老朽度診断（神山幸弘ら）、超音波による木柱の内部腐朽の検出方法の開発（有田紀史雄ら）などが行われており、この方法によって木材内部の劣化を含めた劣化診断を行うことが可能であると考えられる。

また、残存強度評価等のための、超音波伝播法によるヤング係数の測定方法は前述の通りである。腐朽材、蟻害・虫害をうけた材について、両木口面間の超音波伝播時間とその材の見かけの密度から求めたヤング係数のほか、超音波伝播時間そのものと曲げ強度との間にも相関が認められ、この方法によって残存曲げ強度を評価できると考えられる。特に劣化材の場合、探触子と材面とを密着させることが困難な場合が予想されるため、探触子の形状を工夫した計測器（“SYLVA-TEST”）は有用と思われる。

**打撃による縦波（応力波）伝播法** ヤング係数の測定方法は前述の通りである。腐朽材、蟻害・虫害をうけた材について、両木口面間の縦波伝播時間とその材の見かけの密度から求めたヤング係数のほか、縦波伝播時間そのものと曲げ強度との間にも相関が認められ、この方法によっても残存曲げ強度を評価できると考えられる。加速度変換器等と劣化材面とを密着させることや、部材の対面間の測定が困難な場合が予想されるため、釘にとりつけた加速度変換器を材に打ち込むように工夫した計測器（“FAKOPP”）や、釘を側面に打ち込んで加速度変換器付きのハンマで打撃する方法（中村昇ら）は有用と思われる。

**横振動（たわみ振動）法** ヤング係数の測定方法は前述の通りである。腐朽材、蟻害・虫害をうけた材について、たわみ振動の固有振動周波数とその材の見かけの密度等から求めたヤング係数と曲げ強度との間に相関が認められ、この方法によっても残存曲げ強度を評価できると考えられるが、実際の建築物に組み込まれた部材・材料についての適用は、実用上不可能であろうと思われる。

**縦振動法** ヤング係数の測定方法は前述の通りである。腐朽材、蟻害・虫害をうけた材について、縦振動の固有振動周波数とその材の見かけの密度から求めたヤング係

数と曲げ強度との間に相関が認められ、この方法によっても残存曲げ強度を評価できると考えられる。しかし、たわみ振動法と同様に、実際の建築物に組み込まれた部材・材料についての適用は、実用上不可能であろうと考えられる。

**打音法** 木材そのものの劣化診断ではないが、木造住宅のモルタル塗り外壁のモルタル面をハンマーで打撃したとき発生する打撃音の振動波形を分析・分類することによって、モルタル塗り外壁内部の下地の木材の劣化にともなうモルタル剥離等の診断を行う方法が開発されている（有馬孝禮ら、ほか）。

**ドリル貫入抵抗法** 全くの非破壊的手法とはいえないが、木材の内部までの、あるいは内部の生物劣化を診断することができる。製材品や丸太について、細いドリルを機械的にねじ込み、その抵抗の変化を記録することによって、劣化程度を連続的かつやや定量的に測定できる計測器が市販されている（たとえば、“RESISTOGRAPH”；F. RINNら）。建築物に組み込まれた部材についても測定可能であるが、劣化材の残存強度の評価への適用については不詳である。

**AE法** 木質材料の欠陥検出へのアコースティック・エミッション（AE）の適用の一つとして、ローラー型 AE センサと AE 解析装置を用いて AE 計数率を測定することによって合板の接着不良を検出する試験機が試作されている（“合板用 AE 試験機”；佐藤敬一ら）。このような機器が、木材の生物劣化の診断にも応用できるかもしれない。

荷重レベルと AE の発生との関係から初期腐朽を検出する試みがなされている（野口昌巳ら、今村祐嗣ら、ほか）。また、シロアリ等の木材加害昆虫による食害活動時に発生する AE の特徴や事象率等を AE センサと AE 計測装置で測定することによって食害のモニタリングを行う可搬型装置の試作がなされている（“シロアリ食害検出器（食害 AE 計測・収集装置）”；今村祐嗣ら）。

**その他の方法** X線 CT 法やガンマ線法等による木材の内部腐朽の検出がかなり試みられ、一部その実用化の可能性も示されているとのことである。また、たとえば、蟻害材の残存曲げ強度と X 線透過線量との間には相関が認められた（田中俊成ら）。一方、これらの放射線の安全性、装置の経済性や現場での適用性等を考慮すると、木造建築物のような開放系の場所での劣化診断法としての実用性にはやはり問題があろう。

### ③ 木材・木質材料の非破壊試験に関する国際研究集会

すでに紹介されている（佐藤敬一、田中俊成、野口昌巳）が、非破壊的手法による木材・木質材料の性質・性能の解明と評価等に関して、基礎研究から応用技術までの幅広い研究発表が行われる国際研究集会として「木材の非破壊試験に関する国際シンポジウム（International Symposium on Nondestructive Testing of Wood）」がある。このシンポジウムは、基本的には隔年に、アメリカ合衆国内で開催されている。前回（第9回）は、アメリカ合衆国マジソン市において、1993年9月に開催された。アメリカを始め18カ国から約70名の参加があった。シンポジウムの内容については、参加報告（野口昌巳：木

材保存、19-6、36-38 (1993) ) を参照いただくとして、最新情報とは言えないが、第9回シンポジウムでの各セッションにおける研究発表(全部で32)の発表課題名を原文のまま次に記す。筆者は、第8回、第9回シンポジウムに参加したが、木材・木質材料等の非破壊試験・非破壊的評価全般に関して、先進的な発表が熱心に行われていた。

#### セッション I (アコースティック・エミッション)

- ・ R. L. LEMASTER : Particle and Flake Classification Using Acoustic Emission
- ・ S. CRAMER : Within-Board Lumber Density Variations from Digital X-Ray Images
- ・ M. A. HAMSTAD : Experimental Far-Field Wideband Acoustic Waves in Wooden Rods and Plates
- ・ M. PERSTORPER : Dynamic Modal Tests of Timber — Evaluation According to Euler and Timoshenko Theory
- ・ G. E. PHILLIPS : An Update on Acousto-Ultrasonics Applied to Fingerjoints
- ・ S. KAWAMOTO : Attenuation of AE Waves During the Drying of Wood

#### セッション II (劣化木材の検知)

- ・ L. P. PEREZ : Use of Ultrasonic Waves for the Detection of Timber Decay in Old Buildings
- ・ T. TANAKA : Thermographic Detection of Deteriorated Location and Nondestructive Evaluation of Strength of Biodeteriorated Wood
- ・ R. L. LEMASTER : The Feasibility of Using Acousto-Ultrasonics to Detect Decay in Utility Poles
- ・ D. HELMS : New Applications of the Drill Resistance Method for Quality Evaluation of Wood and Wood Products
- ・ J. L. SANDOZ : Valorization of Forest Products as Building Materials Using NDE

#### セッション III (ボード類の非破壊検査・非破壊的評価)

- ・ K. SHYAMASUNDAR : Nondestructive Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Rigidity of Plywood by Sonic Method
- ・ S. BOZHANG : NDE of Full SZE Particle Boards with Vibration Technique
- ・ R. L. LEMASTER : The Use of Sensors to Measure Surface Roughness in Wood-Based Composites
- ・ J. A. MCKEIVEY : A Microwave Method for the Nondestructive Detection of Voids in Wood Samples
- ・ B. MADSEN : Radiological Density Scanning — A Portable Gamma Camera Based on Back Scatter

#### セッション IV (製材品・立木等の非破壊検査・非破壊的評価)

- ・ D. W. GREEN : Production of Hardwood MSR Lumber
- ・ M. SAMSON : Effect of Twist on the Accuracy of Stress — Grading Machines for Lumber
- ・ L. BOSTROM : A Comparison between Four Different Timber Strength Grading Machines
- ・ K. BETHGE : VTA : Visual Tree Defect Assessment
- ・ D. SCHMOLDT : Application of Ultrasound NDE for Grading Pallet Parts

#### ポスター発表

- ・ Z. WANG : A Comparison of NDE Techniques for Determining the Modulus of Elasticity of Lumber
- ・ P. NIEMZ : Application of the Acoustic Emission Analysis to Evaluate the Fracture Behavior of Wood and Wood Based Materials

- ・ P. NIEMZ : Applying NIR-Spectroscopy for Evaluation of the Resin Content in Chip Mixtures
- ・ A. LABEDA : In-Line Monitoring of Sawn Wood Surface Roughness
- ・ D. A.BENDER : NDE of Structural Fingerjoints
- ・ M. NOGUCHI : Thermographic Detection of Starved Joints of Wood
- ・ K. A. FLYNN : Using Acousto-Ultrasonics for In-Field Detection of Degradation in Wood Structures
- ・ F. DIVOS : Wood Strength Prediction by Nearly NDT Methods
- ・ K. SHYAMASUNDAR : Sonic NDT Equipment — Elasto Sonic
- ・ J. COOPER : In-Place Evaluation of FRT Lumber
- ・ R. J. ROOS : Pulse-Echo Analysis — Tool for NDE of Decay in Poles

また、昨年9月に、「第1回ヨーロッパ木材の非破壊的評価に関する国際シンポジウム (First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood)」が、ハンガリー国ショプロン市で開催された。20カ国から約100名が参加したとのことである。このシンポジウムには筆者は参加しておらず、内容の紹介は省略するが、プログラムによると、特種手法、放射線あるいは超音波による手法、弾性率および強度、都市および森林における樹木の非破壊的評価の4セッションにおいて、それぞれ13、15、15、7もの、多数の研究発表が行われた。

次回の「第10回木材の非破壊試験に関する国際シンポジウム」は、「第2回ヨーロッパ木材の非破壊的評価に関する国際シンポジウム」と合同で、1996年9月に、スイス国ローザンヌ市で開催される。

さらに、国際林業研究機関連合 (IUFRO) 第5 (林産) 部会に、今年8月にフィンランド国で開催された「第20回 IUFRO 世界大会」より、“ワーキング・パーティー S-5.02-01 木材の非破壊的評価”が設置された。

これらの諸国際研究集会は、木材・木質材料等の非破壊試験・非破壊的評価に関する研究と技術についての先端的情報を入手するうえで、極めて有用であろう。他の国際研究集会についての情報をお持ちの皆様はどうぞご教示下さるようお願い申し上げます。

## 謝辞、引用・参考文献

この拙文を書くのに際し、筆者 (ら) の報告はさておき、下記の諸文献 (発表年順) ほかの一部を引用させて、あるいは参考にさせていただいた。特に、「② 木材の生物劣化の診断と生物劣化材の残存強度評価のための非破壊的手法」の項に関しては、下記17) “森林資源有効活用促進調査事業報告書”の第4章を大幅に参考にさせていただいた。また、ハンガリー国ショプロン大学 (現在 森林総合研究所 STAフェロー) DIDOS Ferenc 博士に多くの新しい情報の提供をいただいた。各位に心から感謝致します。

- 1) 雨宮昭二：林業試験場研究報告、No. 150、143-156 (1963)
- 2) 神山幸弘：建築士、28-8、21-25 (1979) [ “森林資源有効活用促進調査事

業報告書（大規模木造建築物の管理・メンテナンス上の課題と対策に関する調査）”、  
（財）日本住宅・木材技術センター、1994 ]

- 3) 中戸莞二編著：“新編木材工学”、養賢堂、1985、pp. 447-450
- 4) （社）日本木材保存協会編著：“木材保存学”、文教出版、1982、p. 52、  
pp. 58-61
- 5) 建設省建築研究所編：建築研究成果撰 あらか、No. 3、213-228、1985
- 6) 有田紀史雄ら：木材工業、41-8、14-19（1986）
- 7) 田中俊成：木材工業、43-2、20-25（1988）
- 8) 大熊幹章ら：“科学研究費補助金研究成果報告書 木材の非破壊検査方法の検討と強度等級区分システムの確立に関する研究”、1990
- 9) 千葉保人：第40回日本木材学会大会研究発表要旨集、389（1990）
- 10) 中井孝ら：非破壊生体計測研究連絡会ニューズレター、No. 12、49-52（1990）
- 11) TANAKA, T. ; et al. : PROCEEDINGS OF THE 1990 INTERNATIONAL  
TIMBER ENGINEERING CONFERENCE (1990, Tokyo)、3、673-680 (1990)
- 12) 日本木材学会「自動計測の基礎と応用」分科会：“日本木材学会研究分科会  
報告書（1991） 木材の科学と利用技術 II - 1. 自動計測の基礎と応用 -”、日本木  
材学会、1991
- 13) 祖父江信夫ら：“科学研究費補助金研究成果報告書 タッピング法を用いた  
実大木材のダイナミック・ポータブル・グレーダーの開発”、1991
- 14) TANAKA, T. : DOCUMENT OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP  
ON WOOD PRESERVATION (1991, Kyoto)、IRG/WP/2371、1-14 (1991)
- 15) 田中俊成：木材保存、19-2、10-17 (1993)
- 16) 今村祐嗣ら：“科学研究費補助金研究成果報告書 AEによる木材加害昆虫の  
食害行動の解析”、1994
- 17) “森林資源有効活用促進調査事業報告書（大規模木造建築物の管理・メン  
テナンス上の課題と対策に関する調査）”、（財）日本住宅・木材技術センター、1994
- 18) 森林サイエンス研究会編：“森林サイエンスの現状と今後の展望 -21世紀へ  
のアプローチ-”、（社）全国林業改良普及協会、1994、p. 236-239
- 19) TANAKA, T. : PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM  
ON THE NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD (1993, Madison)、78-83 (1994)
- 20) TANAKA, T. : CONFERENCE PROCEEDINGS OF THE PACIFIC TIMBER  
ENGINEERING CONFERENCE 94 (1994, Gold Coast)、1、422-430 (1994)
- 22) 日本木材学会レオロジー研究会編：“木材および木質材料のレオロジー - 最  
近の進展 -”、日本木材学会、1995
- 23) 田中俊成ら：“新しい木質建材”、第1章 製材、日刊木材新聞社、1995、  
p. 23-37（所収）
- 24) 田中俊成：研究成果（農林水産技術会議事務局編）、No. 296、90-102、1995
- 25) “エンジニアリング・ウッド性能評価事業報告書”、（財）日本住宅・木材  
技術センター、1995

## 5. ヤング率による立木・丸太・製材

### ・木質材料のグレーディング

静岡大学農学部 祖父江 信夫

#### 1. はじめに

木材の強度的利用分野においてヤング率による立木・丸太・製材・木質材料のグレーディングを行う目的には、大きく分けて二つある。一つはヤング率そのものが意味を持つ場合、たとえば弾性設計でたわみや変位などの変形を重視する場合。もう一つは、材料強度の非破壊予測因子として用いる場合である。近年、ヤング率に基づくグレーディングが実施されているのは、主として後者の木材強度の非破壊予測としての利用を目的としている。その他にもヤング率によるグレーディングは、木材の加工条件・特性の判断や、特殊な用途として楽器用木材の選別にも応用されている。また、木質資源のグレーディングは木材製品の品質や安全性の保証の面からばかりでなく、環境・資源問題への対応として木質資源の有効利用の観点からも推進されるべきである。

ここでは、実大構造材料のヤング率測定法、実用測定機器（ストレスグレーディングマシン）、およびヤング率によるグレーディングの実例について概説する。

#### 2. ヤング率の測定法

材料に力が作用するとき変形に対して材料が示す抵抗をヤング率とよんでいる。ヤング率は、静的な方法と動的な方法いずれによっても決定することができる。ここではヤング率の計測法のうち実大材の測定に適した方法について述べる。

##### 2. 1 静的な方法

静的な方法では曲げ試験法が適用しやすい。針葉樹構造用製材に関する日本農林規格では、中央集中荷重法によってヤング率を計測する方法が曲げ性能試験の基準となっている。

梁に横荷重が作用するとき、荷重  $P$  とたわみ  $\delta$  の間には線形関係が成り立つ。たとえば、中央集中荷重法では次式によってヤング率が求められる。

$$E = \frac{\Delta P l^3}{4 b h^3 \delta} \quad (1) \quad E: \text{曲げヤング係数}$$

$l$ : スパン     $b$ : 木口の長辺     $h$ : 木口の短辺

$\Delta P$ : 初期荷重と最終荷重の差     $\delta$ :  $\Delta P$  に対応するたわみ

ヤング率が大きいほど、一定荷重に対するたわみが小さいことがわかる。

## 2. 2 動的な方法

静的方法が荷重とたわみとの線形関係を利用するのに対して、動的な方法では質量  $m$  (または密度  $\rho$ ) と固有振動数  $f_r$  (または振動の伝播速度  $v$ ) の二つの物理定数を利用してヤング率を計測する。

木材は大型材でも軽い打撃で容易に発音するので、タッピング法は簡単な装置で弾性率の測定ができる。タッピングの仕方によって、縦振動、ねじり振動、たわみ振動、およびこれらの複合振動が励起され、上手に解析すると複数の弾性係数を同時に決定できる。

棒の振動の固有振動数  $f_r$  は、次式となる。

$$f_r = k\sqrt{G/\rho} \quad (2)$$

ここで、 $k$  は振動モード (伸縮、ねじり、たわみ) と振動次数および境界条件によって定まる定数、 $G$  は弾性係数、 $\rho$  は密度である。

### 2. 2. 1 棒の縦 (伸縮) 振動

実用的に利用できるのは両端自由条件で、次の関係式が適用される。

$$k = n/(2l), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$f_r = k\sqrt{E/\rho} \quad (4)$$

ここで、 $n$  は振動次数、 $l$  は長さ、 $E$  はヤング率である。

したがって、ヤング率  $E$  は次式で表される。

$$E = 4 l^2 \rho f_r^2 / n^2 \quad (5)$$

### 2. 2. 2 棒のたわみ振動

たわみ振動では次の関係式が適用される。

$$k = i m_s^2 / (2\pi l^2), \quad i^2 = I/A = h^2/12 \quad (6)$$

$$f_r = k\sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

ここで、 $m$  の添え字  $s$  は振動次数である。また、定数  $m_s$  は境界条件によって異なり代表的な条件では次のようになる。

① 両端自由または固定条件

$$m_1 = 4.730, \quad m_2 = 7.854, \quad m_3 = 10.996 \quad (8)$$

② 一端固定・他端自由条件 (片持はり)

$$m_1 = 1.875, \quad m_2 = 4.694, \quad m_3 = 7.855 \quad (9)$$

ヤング率  $E$  は次式で表される。

$$E = i^2 m_s^4 / (4\pi^2 l^4) \rho f_r^2 \quad (10)$$

長さに対して背の高い梁はチモシェンコ梁と呼ばれ、曲げ変形におけるせん断応力の影響を無視できない。振動現象では、高次モードの振動や短い梁の場合に問題となる。この理論を適用するとヤング率とせん断弾性係数を同時に求めることができる。

### 2. 2. 3 直交異方性板のたわみ振動

木材の平板や合板などのような2次元直交異方性体の固有弾性定数は4つ存在し、 $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{yx}(\nu_{xy})$ 、固有振動数 $f(i, j)$ は次式で示される。

$$f(i, j) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\rho}h} \sqrt{\left\{ D_{11} \frac{\gamma_1(i, j)}{a^4} + D_{22} \frac{\gamma_2(i, j)}{b^4} + 2D_{12} \frac{\gamma_3(i, j)}{a^2 b^2} + 4D_{66} \frac{\gamma_4(i, j)}{a^2 b^2} \right\}} \quad (11)$$

$$D_{11} = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})}, \quad D_{22} = \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \quad (12)$$

$$D_{12} = D_{11}\nu_{yx} = D_{22}\nu_{xy}, \quad D_{66} = G_{xy} h^3 / 12$$

ここで、 $D_{ij}$ は板の曲げ剛性、 $h$ は板厚である。 $\gamma_m(i, j)$ は振動次数 $(i, j)$ と境界条件によって決まる定数で、実用上有用な全辺自由条件、一辺単純支持・三辺自由条件の値は、文献を参照されたい。<sup>1, 2)</sup>

### 2. 2. 4 応力波または超音波伝播法

応力波も超音波もいずれも弾性波で、数10kHz以下の比較的周波数の低いものを応力波、数100kHz以上の可聴音域以上のものを超音波に分類している。超音波伝播法の場合、一般に1MHzあるいは10MHz程度のものがよく用いられる。

弾性波の伝播速度を $v$ すると、十分に長い棒の中を伝播する一次元の波の場合、 $v$ は密度 $\rho$ 、ヤング率 $E$ との間に次の関係式が成り立つ。

$$v = \sqrt{E/\rho} \quad (13)$$

または、

$$E = \rho v^2 \quad (14)$$

伝播速度を求めるには、直線上の2点に振動センサを配置して、2点間を伝播する波の通過時間をタイマで計測し、センサ間の距離を通過時間で除する。

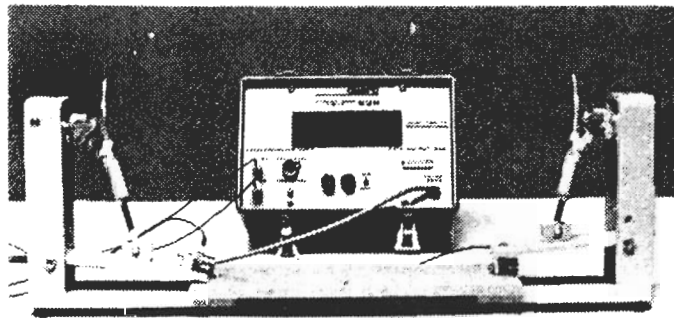


図1 超音波タイマの例

特に繊維飽和点(FSP)以上における水分の影響

応力波や超音波伝播法を用いて高含水率材の弾性波の伝播速度を計測するときには、特別の注意が必要である。

弾性波の伝播速度は繊維飽和点以上で徐々に減少する。一方、木材のヤング率は繊維飽和点以上ではほぼ一定値を示す。ところが、(14)式からヤング率を計算すると図2のように繊維飽和点以上でヤング率は急激に増加する。これは、 $E = \rho v^2$ から

わかるように、密度 $\rho$ を過大に評価しているためである。すなわち、高速の振動に追従できない細胞孔内の自由水が存在するためであり、これを補正しなければならない<sup>4)</sup>。

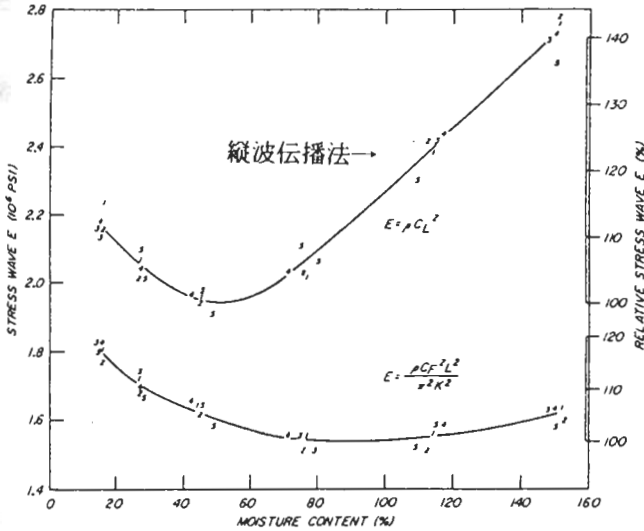


図2 応力波伝播法によるヤング率と含水率の関係<sup>3)</sup>

### 3. ヤング率に基づく木材のストレスグレーディングの原理

ヤング率に基づく木材のストレスグレーディングは、機械的等級区分の方法として現在のところ最も現実的で有効な方法と考えられる。ヤング率を強度の非破壊予測因子として利用しようというアイデアは比較的古くからある。ヤング率に基づくストレスグレーディングの原理は、ヤング率と破壊強度との間に統計的に有為な相関関係が得られるという実験事実に基づいている。一般にヤング率と曲げ強さとの間には0.5~0.8程度の相関係数が得られ、目視法の0.3~0.6に比べて強さの推定精度は良い。

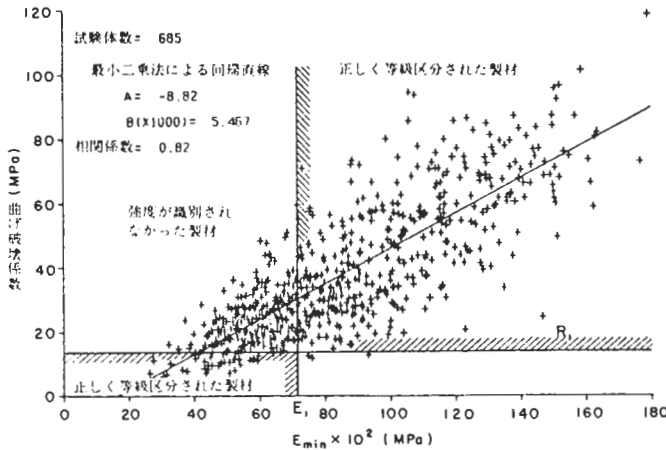
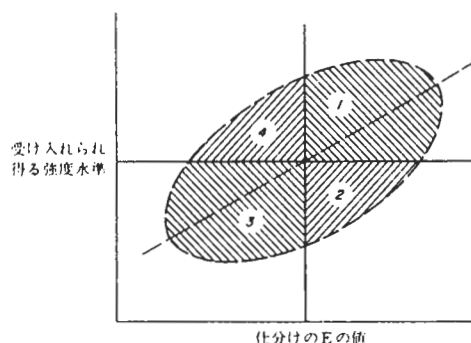


図3 曲げ強さMORとヤング率との関係の例<sup>5)</sup>

図3に、ヤング率（材長にわたる最小値）と曲げ強さの関係の例を示す。ヤング率と強さとの間に高い相関関係が認められるが、データが回帰直線の上に分布していることからわかるように、ヤング率は強度予測のための完全な非破壊パラメータではない。したがって、回帰直線を基にグレーディングを行うと不都合なことが起こってくる。

たとえば、図4のようにヤング率によって試験体が二者択一的に（合格、不合格）仕分けられたとすると、仕分けられた試験体は次の4つのグループに整理される。



- G 1 : ヤング率によって正しく、"合格"と判断されたもの。
- G 2 : 十分な強度がないのに、誤って"合格"と判断されたもの。
- G 3 : ヤング率によって正しく、"不合格"と判断されたもの。
- G 4 : 十分な強度が有るのに、誤って"不合格"と判断されたもの。

図4 ヤング率による仕分けの原理

ここで問題となるのは、G 2に属する「十分な強度がないのに、誤って"合格"と判断されたもの」をどのように排除するかという点である。なぜなら、G 1とG 3に属するものは正しく評価されている。G 4に属するものは性能が十分に評価されていないという点を除けば、安全上別段問題はないからである。G 2に属するものは、G 1の正しく仕分けられたものと無差別に混ざり合ってしまうことが問題である。

この点を解決するため、通常は回帰直線を用いないで統計学でいう下限信頼限界線を予測モデルに用いている。

ヤング率に基づく木材の機械的等級区分のシステムには大きく分けて二つある。一つは英国などで用いられている「マシンコントロール方式」とよばれるもので、もう一つは米国などで用いられている「アウトプットコントロール方式」とよばれるものである。

マシンコントロール方式は、検査に供される木材のヤング率と強度との関係をあらかじめ実測データに基づいて想定し、機械によって計測されたヤング率を基にして等級区分する方法である。わが国の針葉樹の構造用製材の新JASがこれに相当する。新JASによる等級区分とそれに基づく許容応力度の概要を以下に概説する。機械等級区分は曲げヤング率（ $MOE$ ）と曲げ強さ（ $MOR$ ）の直線回帰を利用して材料強度を定めるもので、中央集中荷重方式による曲げヤング率が基準になって

いる。表1のようにMOEが $40(x10^3 \text{kgf/cm}^2)$ 以上の6区分からなっており、MOEを $20(x10^3 \text{kgf/cm}^2)$ ごとの中間値で表示する。また、利用上支障となる欠陥（丸身、貫通割れ、目まわり、腐朽、曲りなど）を排除するために補助的に目視検査を併用する。

表1 機械等級区分製材の等級区分

| 等級    | 曲げヤング係数 ( $10^3 \text{kgf/cm}^2$ ) |
|-------|------------------------------------|
| E 50  | 40以上 60未満                          |
| E 70  | 60以上 80未満                          |
| E 90  | 80以上 100未満                         |
| E 110 | 100以上 120未満                        |
| E 130 | 120以上 140未満                        |
| E 150 | 140以上                              |

建築基準法施行令では、材料強度（第95条）および許容応力度（第89条）はいずれも「強度試験の結果に基づいて定める場合のほか」として別途に数値で与える形になっている。新JASによって等級区分された製材に対する長期許容応力度は、建築省建築指導課長通達によって表2のように与えられている。

表2 機械区分による針葉樹の構造用製材の長期許容応力度

| 等級   | 樹種区分            |    |     |          |     |     |     |     |     |
|------|-----------------|----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | べいまつ、べいつがソ連からまつ |    |     | からまつ、ひのき |     |     | すぎ  |     |     |
|      | 圧縮              | 引張 | 曲げ  | 圧縮       | 引張  | 曲げ  | 圧縮  | 引張  | 曲げ  |
| E 50 | -               | -  | -   | 35       | 25  | 45  | 60  | 45  | 75  |
| E 70 | 30              | 20 | 35  | 55       | 40  | 70  | 75  | 55  | 95  |
| E 90 | 55              | 40 | 70  | 80       | 60  | 100 | 90  | 70  | 115 |
| E110 | 80              | 60 | 100 | 100      | 75  | 130 | 105 | 80  | 135 |
| E130 | 105             | 80 | 130 | 125      | 95  | 155 | 120 | 90  | 155 |
| E150 | 130             | 95 | 165 | 145      | 110 | 185 | 140 | 105 | 175 |

等級：数値はヤング係数を示し、単位は $10^3 \text{kgf/cm}^2$ 。

長期許容応力度の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ 。

強度試験の結果に基づいて許容応力度を与えるには次のような手続きが可能である。

— 木構造計算規準（日本建築学会）：103・5 —

『曲げヤング係数など非破壊検査によって得られるパラメータと、各強度の間に、

実用的に十分な統計的關係が認められる場合には、その結果を用いて許容応力度を誘導することができる。・・・』

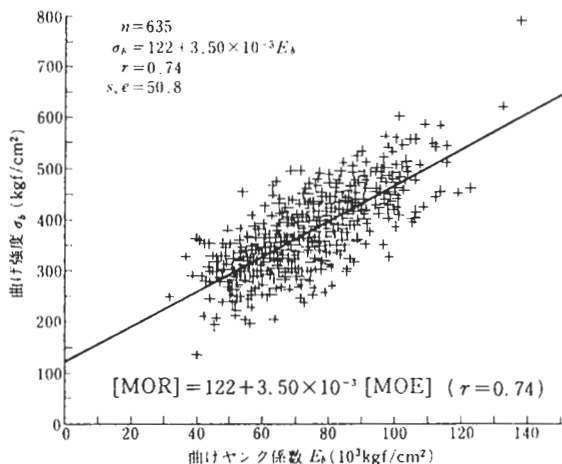


図5 すぎ正角の曲げヤング係数と曲げ強度との関係<sup>6)</sup>

例として図5のようなスギ正角材の実大曲げ試験の結果を利用すると、曲げ強さ  $MOR$  と曲げヤング率  $MOE$  との回帰直線は次式となる。

$$[MOR] = 122 + 3.50 \times 10^{-3} [MOE] \quad \text{kgf/cm}^3 \quad (15)$$

危険率5%の信頼限界値をとると、

$$[MOR] = 106 + 3.29 \times 10^{-3} [MOE] \quad \text{kgf/cm}^3 \quad (16)$$

また、 $MOR$  の下側5%の値  $[MOR_{LL}]$  は、次式となる。

$$[MOR_{LL}] = 22 + 3.29 \times 10^{-3} [MOE] \quad \text{kgf/cm}^3 \quad (17)$$

ここで、曲げの長期許容応力度  ${}_L f_b$  は、次式で与えられる。

$${}_L f_b = [MOR_{LL}] / 3 \quad \text{kgf/cm}^3 \quad (18)$$

上式の分母“3”は、許容応力度を誘導する際の「荷重-変形曲線の比例限度」 $2/3$ と「長期荷重に対する荷重係数」 $1/2$ の積  $2/3 \times 1/2 = 1/3$  から得られる。

引っ張りおよび圧縮の許容応力度は、曲げの許容応力度から誘導される。曲げの許容応力度を規準として、引っ張りおよび圧縮の許容応力度にはそれぞれ0.6および0.8の低減係数が与えられている。この考え方は、表2の機械区分による針葉樹の構造用製材の長期許容応力度でも同様に適用されている。

引っ張りの許容応力度  ${}_L f_t$  は、

$${}_L f_t = 0.6 \quad {}_L f_b \quad (19)$$

また、圧縮の許容応力度  ${}_L f_c$  は、

$${}_L f_c = 0.8 \quad {}_L f_b \quad (20)$$

で与えられる。

アウトプットコントロール方式は、北米などで採用されているもので、MSRを実施する機関ごとに製品のヤング率と許容応力度のランクを設定し、規準を満足す

るように予測モデルを修正しながらシステムを維持する方法である。

等級は、曲げの推奨許容応力度 $F_b$ とヤング率 $E$ によって“ $2,400f-2.0E$ ”のように表され、曲げ許容応力度 $F_b$ 、 $2,400 \text{ psi}$ でヤング率 $2.0 \times 10^6 \text{ psi}$ を意味している。各等級に対する許容ヤング率は各クラスの中央点で、許容応力度はその等級の最低のヤング率によって予測される $MOR$ から算出される。

図6にある工場における例を示す。許容応力度算出のための係数2.1は荷重継続時間と安全率に関する調整係数である。

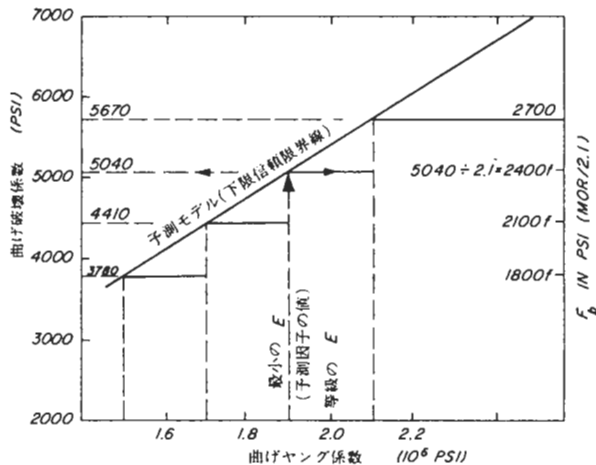


図6 アメリカにおけるMSR製材のための典型的な $F_b$ - $E$ 値の例（波線は、各々の $F_b$ - $E$ 区分を求める最小の $E$ と、それらの $E$ によって予測される曲げ強度）<sup>6)</sup>

この方法では、強度予測モデルの信頼性を点検するために毎日各工場では保証荷重試験（プルーフロードテスト）が実施される。グレーディングマシンを通るMSRランバーに定められた保証荷重を負荷し、サンプルの95%以上が破壊しないかどうか確かめられる。規準を満足しない場合は、強度予測モデルに修正を加える操作がなされる。

#### 4. 実用機器（ストレスグレーディングマシン）

##### 4. 1 静的マシン

先発国でいろいろな機種が市販されている。高速タイプのものでは、毎分300m程度の処理速度のものもある。わが国でも新JAS制定以後、全国木材組合連合会が新JASに基づくストレスグレーディングマシンの機種認定を行っており、静的マシンとして現在3機種が認定されている。この他にも、数機種が市販または試作されている。

わが国のグレーディングマシンの特徴は、欧米のディメンジョンランバーより大型な在来工法の梁材なども計測対象としている点である。いずれも、3点荷重または4点荷重法によってヤング率を測定するものである。

##### 4. 1. 1 小荷重積載型マシン

曲げ試験方式のマシンである。質量の決まった小荷重を段階的に負荷して対応す

るたわみを逐次測定し、荷重－たわみの関係式からヤング率を算定する。

#### 4. 1. 2 連続型マシン

複数配置されたローラーの間を試験体が通過する間に横荷重を負荷し、荷重－たわみの関係式からヤング率を算定する。

負荷方式は、変位一定方式と荷重一定方式の両タイプがある。負荷面は一般にフラットワイズ（広幅面）で、一方向曲げ方式と二方向曲げ方式の両タイプがある。測定間隔が短スパン（10～15cm間隔）で長さ方向に連続的にヤング率を測定する方式と全区間のヤング率を測定する方式がある。特に、在来工法用製材などのように断面の大きな材料では後者の方式を採用するケースが多い。

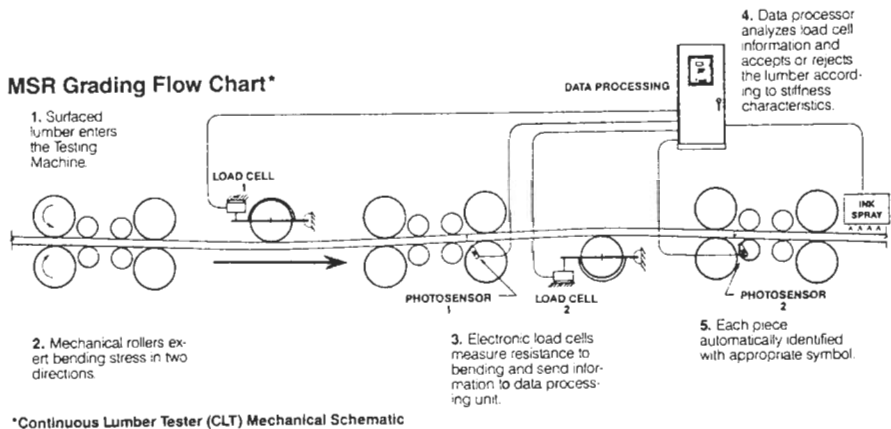


図7 高速連続型マシンの原理

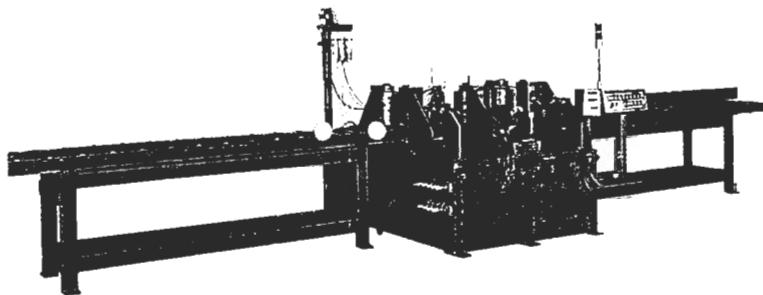


図8 連続型マシンの例

#### 4. 2 動的マシン

##### 4. 2. 1 縦振動法

縦振動を用いる方法はわが国で独自に発展し、いろいろなタイプのマシンが試作されている。FFTスペクトラムアナライザを用いたタイプの1機種が現在機種認定されている。生産現場では、在来木造建築メーカーでコンピュータ制御による測定が加工ラインに組み込まれた例や<sup>7)</sup>、大手製材メーカーで導入中の例がある。

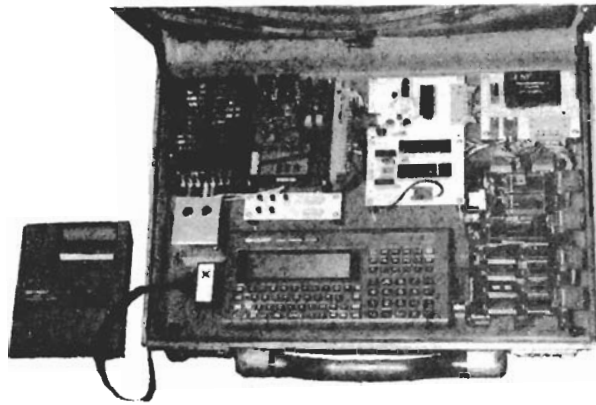


図9 ポータブル型マシン (PG-758) の例<sup>\*)</sup>

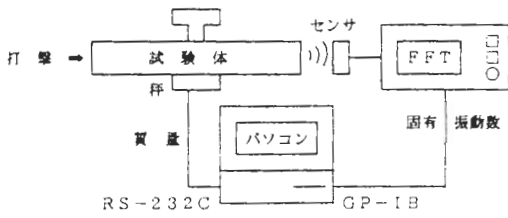
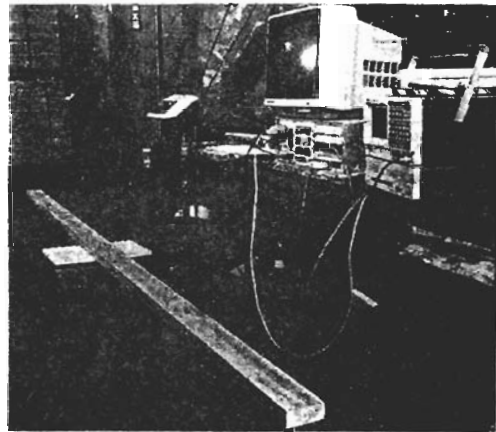


図10 FFTアナライザを用いたマシン<sup>\*)</sup>



#### 4. 2. 2 たわみ振動法

たわみ振動法によるグレーディングマシンは、動的方法では比較的早い時期に北米で実用化された。この機種の特徴は、ヤング率の他に振動の減衰率 ( $\tan \delta$ ) を木材強度の予測因子として用いている点である。

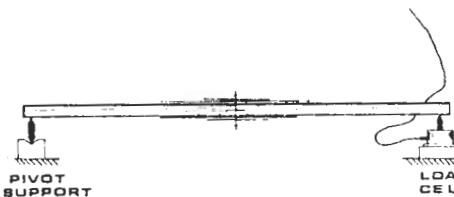
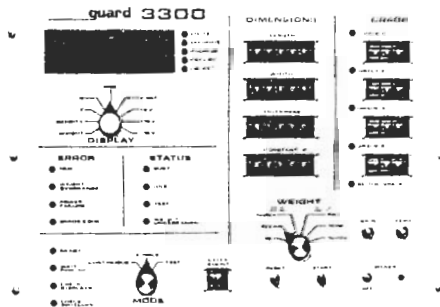


図11 たわみ振動方式によるマシン



#### 4. 2. 3 応力波または超音波伝播法

このタイプの測定機で木材用グレーディングマシンとして機種認定されたものはまだないが、木材用、金属やセラミックス用の弾性波の速度計測器として国外・内

でいろいろな機種が市販されている。また、パーソナルコンピュータを用いたポータブル型の立木ヤング率測定機（図12）も開発されている<sup>9)</sup>。

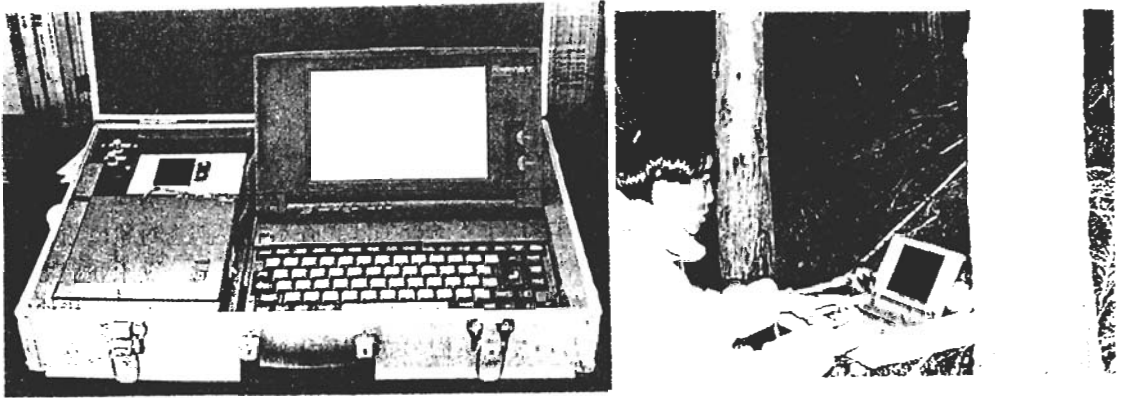


図12 ポータブル型の立木ヤング率測定機

5. ヤング率によるグレーディングの実施例

5. 1 立木

立木のヤング率測定は、主として育種、育林技術との関係で行われている。生産された木材を性能に応じて区分する考え方から一歩踏み込んで、目的に合った木材を生産する考え方への転換、最終用途における木材材質からみた森林の質の評価因子としての活用を道を開く技術として期待されている。

ヤング率の測定には静的な方法と動的な方法とがある。静的な方法は、てこを利用して人の体重で立木に曲げモーメントを与え、そのときのたわみからヤング率を計算している。人の体重で負荷するため、小径木に限られ、測定中の風の影響が大きく、計測に時間がかかる。動的な方法は超音波や応力波が利用され、縦波伝播法と表面波（横波）伝播法が用いられている。動的な方法によって立木のヤング率を計測する際には、立木の密度を非破壊的に測定することが問題となる。

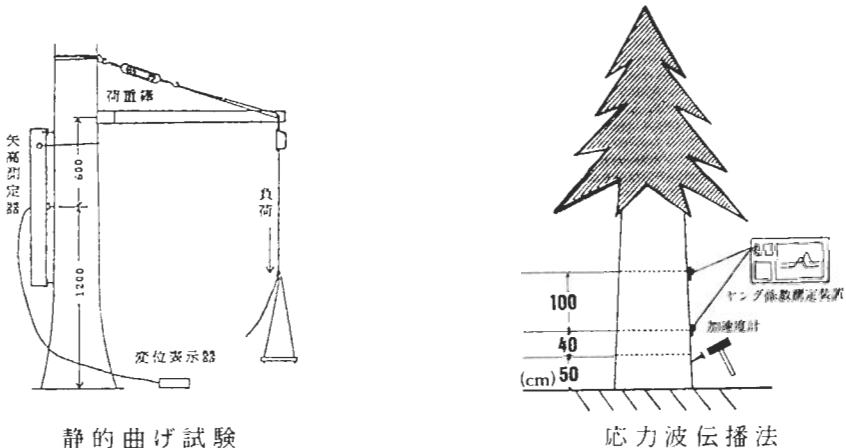


図13 立木のヤング率測定の場合

これらの手法を用いて、カラマツ<sup>10)</sup>やスギ<sup>11, 12)</sup>の立木の材質試験が行われている。

名波らは<sup>11)</sup>応力波の伝播速度と各林分の見かけの立木密度を用いて計算した見かけのヤング率を材質指標として、林分間の相対的な比較ができることを明かにした。また同一林分内では、応力波の伝播速度が個別立木の材質の指標となることも明かにした。図14は林齢の異なる林分の各立木のヤング率を示す。

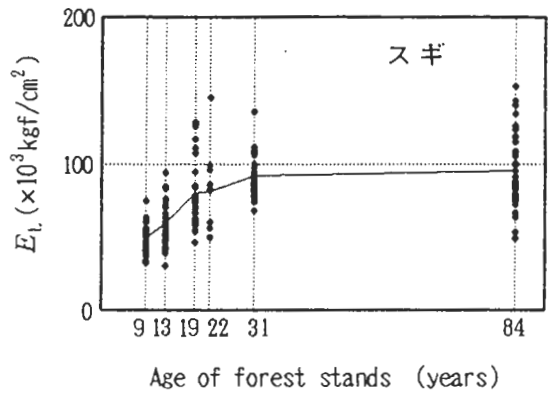


図14 林齢と立木の縦方向ヤング率<sup>11)</sup>

池田らは、静岡県に植栽されているスギ精英樹の非破壊材質評価に弾性波伝播速度法によるヤング率計測を利用している<sup>12)</sup>。応力波伝播の計測区間を1mとし、野外計測用に開発された専用ポータブル測定機を利用している。次代検定林の20年生精英樹8クローン、合計82本の立木状態のヤング率を図15に示す。クローン間には危険率1%で統計的な有意差が認められた。また、図16に立木中の応力波伝播速度と丸太の状態のヤング率（縦固有振動法による）との関係を示す。

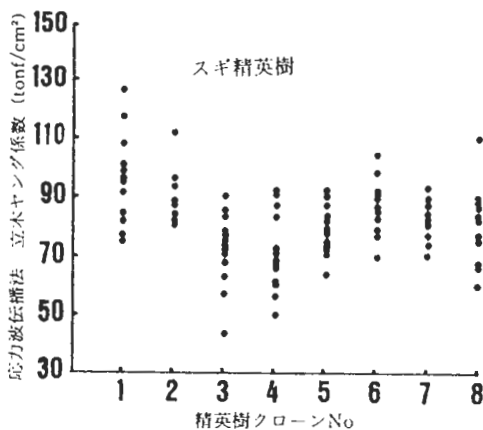


図15 クローン別の立木ヤング係数<sup>12)</sup>

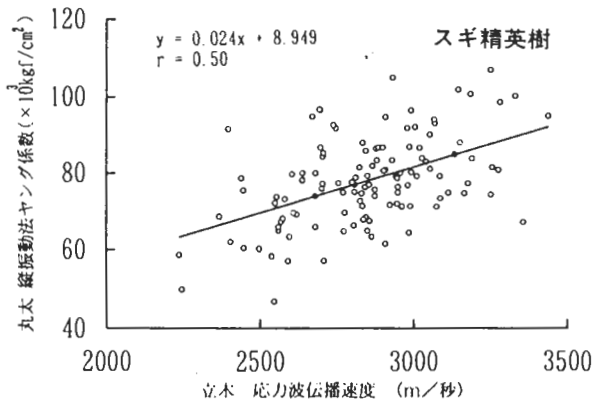


図16 立木の応力波伝播速度と縦振動法による丸太のヤング係数との関係<sup>12)</sup>

最近、フランスでも同様の研究がCNRF（国立林業研究センター）のJ-M. Lebanらによって始められ、Bucurが手掛けた表面波（横波）の伝播法<sup>13)</sup>を用いている。

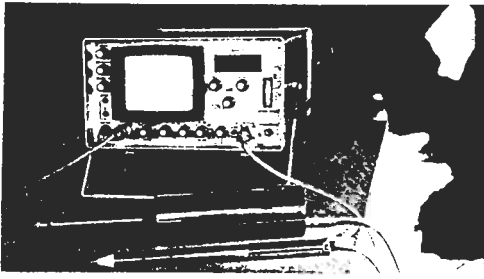


図 1 7 表面波伝播法による測定

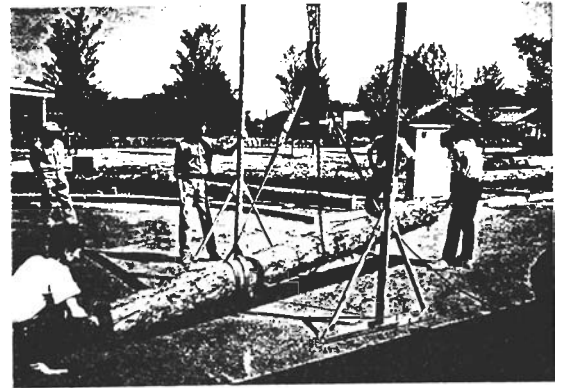


図 1 8 丸太のタッピングの様子

## 5. 2 丸太

丸太の段階におけるグレーディングの有用性は、最近の研究でいろいろな応用例について確かめられている。丸太のヤング率測定には、ほとんどの場合木口面のタッピングによる方法が用いられている。図 1 8 に丸太のタッピングの様子を示す。中央をホイストで吊り下げ、ホイストに直結されたロードセルで丸太の質量を測定する<sup>14)</sup>。

### 5. 2. 1 丸太のヤング率とそれから得られるラミナ，製材のヤング率の関係を 利用したグレーディング

丸太のヤング率と丸太を製材して得られる挽き板のヤング率の間には、図 1 9 に示すように高い相関関係がえられる。

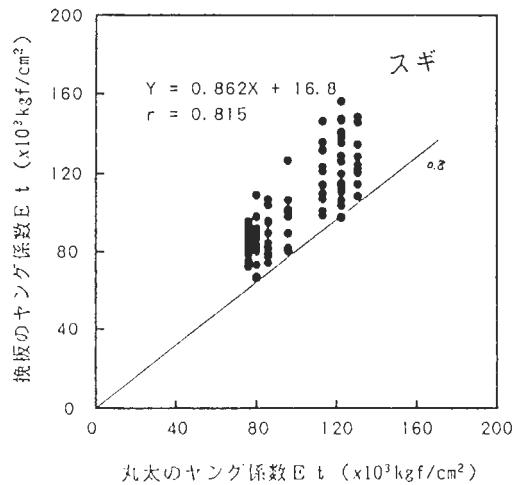
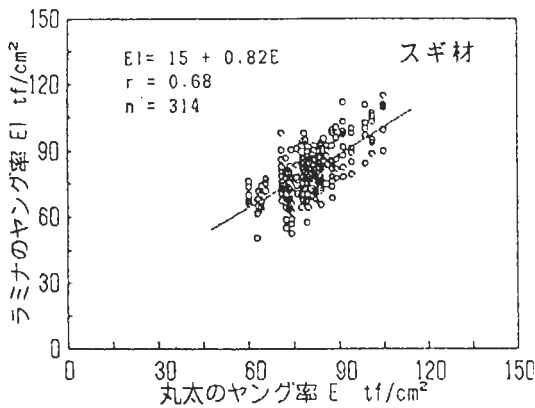


図 1 9 丸太のヤング率とそのラミナ<sup>15)</sup>，挽き板<sup>16)</sup>のヤング率の関係

このような考え方を実際に応用して、構造用大断面集成材を効率的に製造しようという研究が最近行われている。

### 5. 2. 2 はえ積み（山積み）状態での計測

土場で丸太がはえ積み（山積み）状態になっているままで、一本いっぽんの丸太の固有振動数が正確に計測できればそのメリットは大きい。原理的には、山積み状態では丸太が相互に自由振動を拘束するように作用する可能性がある。1次や2次の振動の場合は、振動の節以外のところで支持すると自由振動の拘束が起こって本来の固有振動数より大きく計測される。しかし、3次や4次の高次振動の固有振動数を利用すれば実用上その影響は無視できることが明らかにされている<sup>17)</sup>。このような現象が、棧積みした製材でも同様に扱えることが確かめられている。<sup>18)</sup>

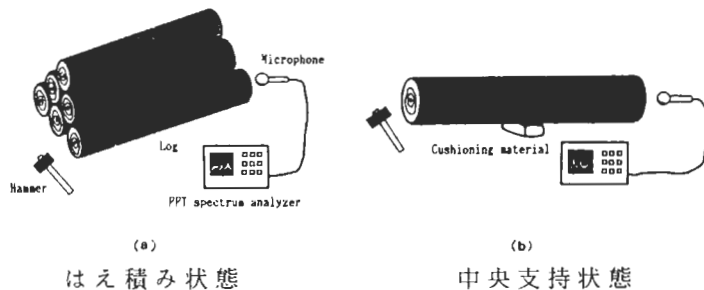


図 20 土場における丸太計測の実際

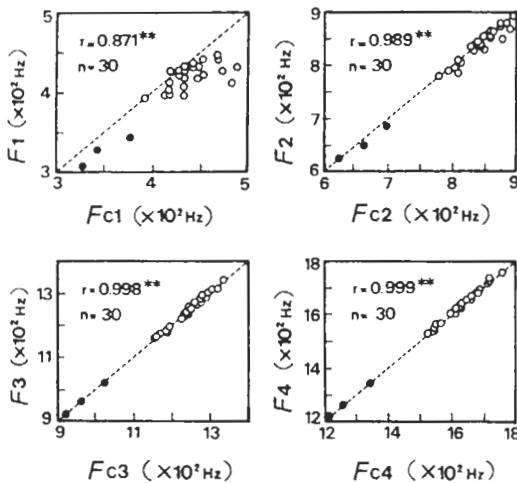


図 21 中央支持 ( $F_c$ ) とはえ積み状態 ( $F$ ) における固有振動数の比較<sup>17)</sup>

注:  $F_{(c)N}$  は、 $N$  次の固有振動数  
○: タカオカ, ●: クシマ

### 5. 2. 3 質量計測を省略する簡易法

丸太のように大型材料の質量計測を人力に頼る場合は結構やっかいである。質量計測を省略した固有振動数のみによる簡易なグレーディングが可能であることが確かめられている。<sup>8, 17)</sup>

固有振動数のみによる簡易なグレーディングは、面倒な質量計測を省略できるメリットばかりでなく、木材の構造の点からも興味深い事柄である<sup>19)</sup>。(4)式から、固有振動数は $\sqrt{E/\rho}$ に比例することがわかる。また、 $E/\rho$ は木材の細胞構造から考

えると細胞壁実質のヤング率  $E_w$  に比例する物理量である。

$$v^2 = \frac{E}{\rho} = \frac{E_w}{\rho_w}$$

なぜなら、細胞壁の密度  $\rho_w$  は樹種に依存しないではぼ一定値であるから。すなわち、固有振動数によって細胞壁実質のヤング率、つまり細胞壁自身の弾性的性能を評価していることになる。

#### 5. 2. 4 丸太の細りの影響

丸太は長さ方向に断面形状や寸法が変化する材料で、このような梁を変断面梁とよんでいる。丸太に細りがあると固有振動数は低減する。表3は、固有振動数の低減率を伝達マトリックス法を用いて数値的に求めた結果である<sup>20)</sup>。

表3 丸太の細りによる固有振動数の低減 (3 m材の場合)

| 平均丸太直径<br>(cm) | 丸太直径の細り比 (cm/100cm) |       |       |       |       |       | 梁せい比<br>l/h |
|----------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|                | 0.5                 | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   |             |
| 10             | 0.997               | 0.988 | 0.973 | 0.951 | 0.923 | 0.887 | 30.0        |
| 15             | 0.999               | 0.995 | 0.988 | 0.979 | 0.966 | 0.951 | 20.0        |
| 20             | 0.999               | 0.997 | 0.993 | 0.988 | 0.981 | 0.973 | 15.0        |
| 25             | 1.000               | 0.998 | 0.996 | 0.992 | 0.988 | 0.983 | 12.0        |
| 30             | 1.000               | 0.999 | 0.997 | 0.995 | 0.992 | 0.988 | 10.0        |
| 35             | 1.000               | 0.999 | 0.998 | 0.996 | 0.994 | 0.991 | 8.6         |
| 40             | 1.000               | 0.999 | 0.998 | 0.997 | 0.995 | 0.993 | 7.5         |

細りの影響はわずかであるが、小径木で細りが著しい場合は補正を必要とする。

#### 5. 3 製材

ヤング率による製材のグレーディングに関しては、最近多くの研究や実用例があり、有用性が確かめられている。

曲げ強さ  $MOR$  と曲げヤング率  $E_s$

縦ヤング率  $E_t$

曲げ強さと曲げヤング率との関係は、現行の機械的等級区分の基礎となるもので、ここでは更に詳しくはふれない。図22は、国産、外国産針葉樹について既存のデータを木材強度・木質構造研究会の作業部会で小松が<sup>21)</sup>まとめたものである。心持ちのスギ材は他の樹種と異なって、低いヤング率の材で比較的大きな曲げ強度を示している。

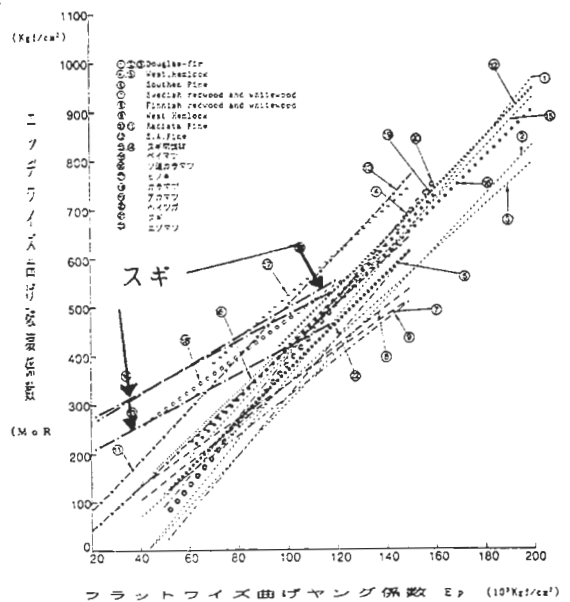


図22 曲げ強さと曲げヤング率の関係

図23にベイマツ平角材(12cm×24cm×400cm)の動的縦ヤング率と曲げ強さの関係を示す<sup>22)</sup>。かなりよい相関関係( $R^2=0.709$ )が得られている。平角材のように断面寸法の大きな材に曲げ試験法を適用すると大型の測定機を必要となる。このような場合には、簡単なタッピング法の適用が有効である。

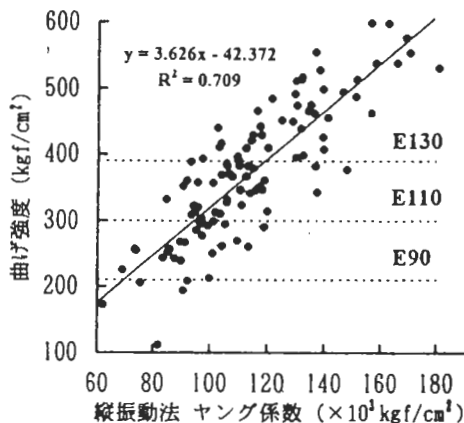


図23 動的縦ヤング率と曲げ強さの関係 (ベイマツ平角材)<sup>22)</sup>

引っ張り強さ $\sigma_t$ と縦ヤング率 $E_t$

引っ張り強さとヤング率の研究は、曲げに比べて少ない。図24は、カラマツ正角材(12cm×12cm)の結果を示す<sup>23)</sup>、相関係数は0.61。図25は、アカマツのラミナの結果を示す<sup>24)</sup>、相関係数は0.57。いずれも、引っ張り強さと縦(動的)ヤング率との相関関係が認められる。

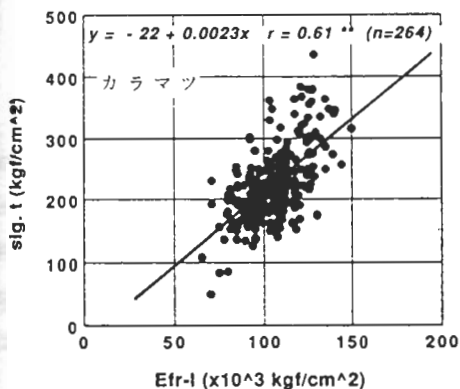


図24 カラマツ正角材の引っ張り強さと縦ヤング率の関係<sup>23)</sup>

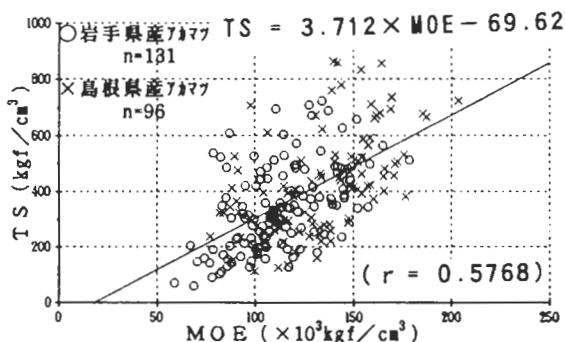


図25 アカマツラミナの引っ張り強さと縦ヤング率の関係<sup>24)</sup>

最近、構造用集成材ラミナのように、縦継ぎ(例えばFJ)材の引っ張り強度が重要となるような木材の利用が増えてきている。図26は、スギのFJラミナの引っ張り強さと縦(動的)ヤング率の関係を示す<sup>25)</sup>。両者の間に、FJ部の破壊で0.70の相関係数、材破壊部で0.69の相関関係が認められる。図27は、ベイツガのFJラミナの結果を示す<sup>26)</sup>。相関係数は、0.83でかなり高い。図28は、アカマツのFJラミナの結果を示す<sup>24)</sup>。相関係数は、0.58~0.63でやや低い。

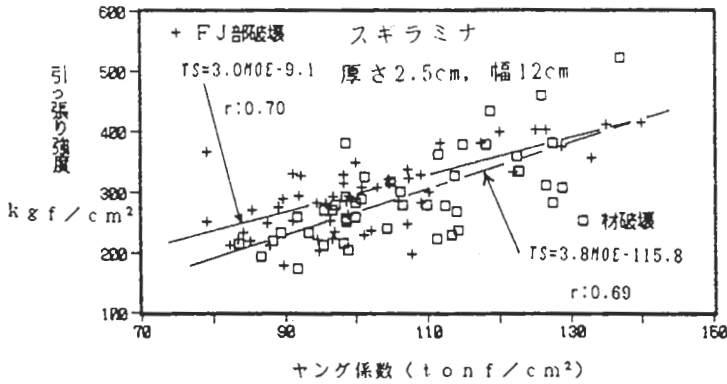


図 26 スギの F J ラミナの引っ張り強さと縦（動的）ヤング率の関係<sup>26)</sup>

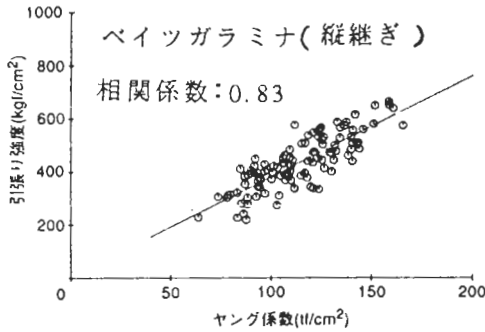


図 27 ベイツガの F J ラミナの引っ張り強さと縦ヤング率の関係<sup>26)</sup>

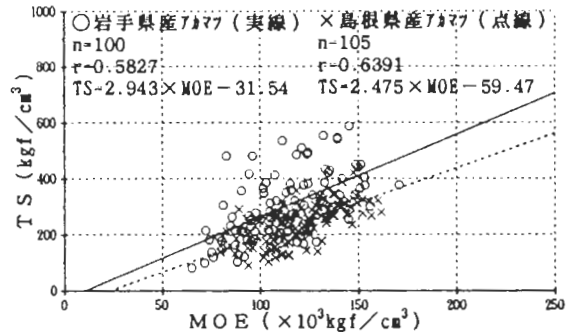


図 28 ベイツガの F J ラミナの引っ張り強さと縦ヤング率の関係<sup>24)</sup>

ヤング率と対数減衰率の併用

Pellerinはヤング率および対数減衰率と MOR との関係について検討し<sup>27)</sup>、ヤン

表 3 曲げ強さの非破壊予測因子の比較

| Experiment* | Material Description |          | Number of Specimens  | Vibrational Parameter | Correlation Coefficient (r) |
|-------------|----------------------|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
|             | Size                 | M.C. %   |                      |                       |                             |
| A           | 2"x6"x92"            | 6        | 11                   | 1/δ                   | 0.66                        |
|             | E <sub>d</sub>       |          |                      | 0.67                  |                             |
|             |                      |          | E <sub>d</sub> × 1/δ | 0.86                  |                             |
| B           | 2"x8"x16'            | 6        | 26                   | 1/δ                   | 0.73                        |
|             | 2"x10"x16'           |          |                      | E <sub>d</sub>        | 0.93                        |
|             | 2"x12"x16'           |          |                      | E <sub>d</sub> × 1/δ  | 0.89                        |
| C           | 2"x8"x12'            | Variable | 15                   | 1/δ                   | 0.46                        |
|             | E <sub>d</sub>       |          |                      | 0.76                  |                             |
|             | E <sub>d</sub> × 1/δ | 0.68     |                      |                       |                             |
| D           | 2"x8"x14'            | Variable | 22                   | 1/δ                   | 0.57                        |
|             | E <sub>d</sub>       |          |                      | 0.84                  |                             |
|             | E <sub>d</sub> × 1/δ | 0.78     |                      |                       |                             |
| D           | 2"x8"x14'            | 6        | 24                   | 1/δ                   | 0.82                        |
|             | E <sub>d</sub>       |          |                      | 0.89                  |                             |
|             | E <sub>d</sub> × 1/δ | 0.91     |                      |                       |                             |
| D           | 2"x8"x14'            | 9        | 20                   | 1/δ                   | 0.88                        |
|             | E <sub>d</sub>       |          |                      | 0.90                  |                             |
|             | E <sub>d</sub> × 1/δ | 0.92     |                      |                       |                             |

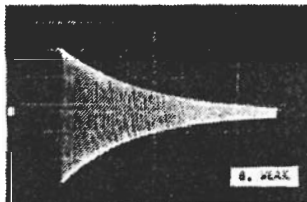
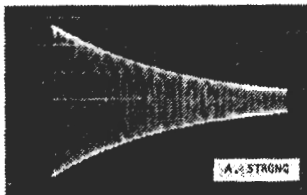


図 29 振動減衰波形  
上：強い材，下：弱い材

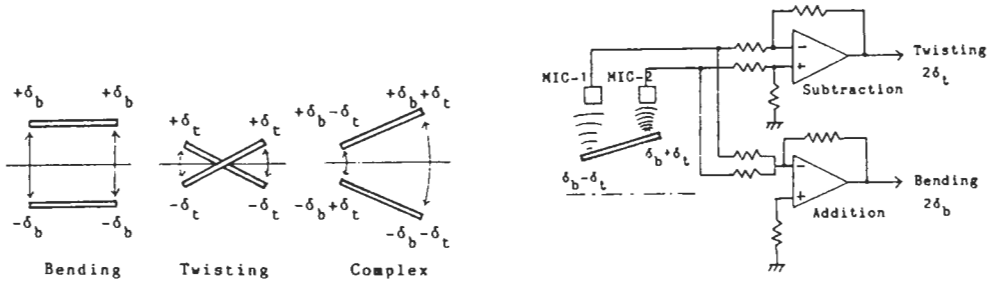
グ率単独より対数減衰率を併用したほうが *MOR* の推定精度がよいことを報告している。このことが、Metriguard社のE-Computerの基本設計となっている。

### 生産現場におけるタッピング法の利用

工場における生産管理では、必ずしもJASのようなオープンな形のグレーディングを行う必要はない。在来工法の木造建築メーカーでは、打撃による縦振動法を用いて大型梁材のヤング率を測定するシステムを、加工ラインに組み込んだ例もある<sup>7)</sup>。

### たわみ-ねじり複合振動の応用<sup>28)</sup>

棒状材料の端を中心線から偏心して打撃すると、たわみとねじりの複合振動が励起され、曲げヤング率とせん断弾性係数が同時に得られる。図30のようにセンサを二つ配置して差出力と和出力を2チャンネルのFFTアナライザに入力する。



複合振動の様子

電気的方法による振動波形の分離

図30 偏心打撃によるたわみ-ねじり複合振動の利用

センサが一つの場合は、先ず図31-aのように偏心した位置を打撃したときのスペクトルを求め、次に中心線上を叩いて純粋な曲げ振動のスペクトル(図31-b)を差し引くと、ねじり振動のスペクトルが得られる。

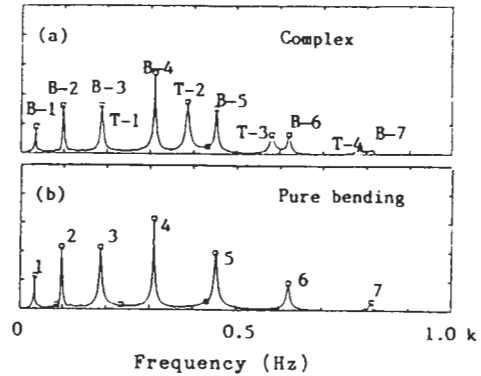


図31 複合振動と純曲げ振動の波形

## 5. 4 木質材料

近年、合板やパーティクルボードのような従来の材料に加えて、MDFやWB, OSB, LVL, LVBなどの木質ボード類を構造部材として利用するケースが増えてきている。これらの材料は、耐力壁などとしてそのまま利用したり、切断してI-ビームやボックスビームなどのウェブ材として、LVLなどではフランジ材としても利用している。木質耐力壁の強度設計やI-ビームのような木質複合部材の

設計や製造では、これらボード類のヤング率や強度を制御する必要性がある。

### 5. 4. 1 合板

板振動のスペクトルは複雑であるが、弾性定数や密度のおおよその値がわかっている場合には、複数の弾性係数（少なくとも3個）を同時に自動決定できる<sup>2)</sup>。

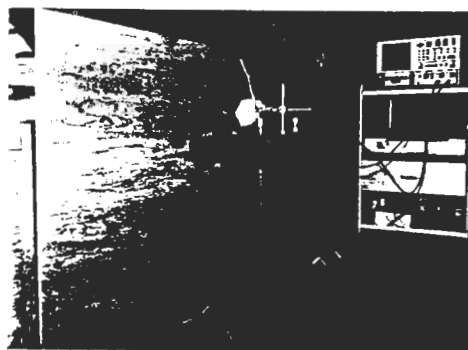


図 3 2 合板の支持方法

図 3 2 のように合板を鉛直に立てかけ、コーナーをタッピングする。

一度の打撃で図 3 3 のように多くの振動モードが励起される。図 3 4 に F F T アナライザで解析された波形を示す。このままでは、各ピークの帰属はわからないが、適当な方法で帰属を決定す

れば、これらのピークの情報から縦方向ヤング率、直交方向ヤング率、およびせん断弾性係数を同時に決定することができる。

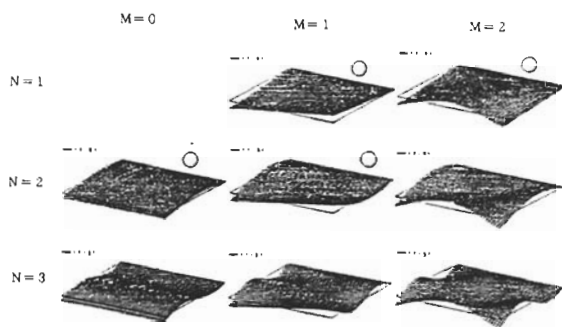


図 3 3 各板振動モードの波形

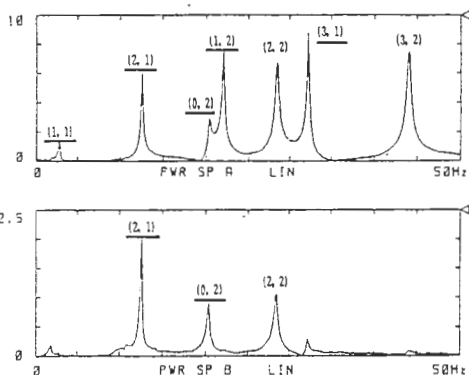


図 3 4 周波数スペクトル

上：端センサ，下：中央センサ

### 5. 4. 2 ボード類

パーティクルボードや繊維板の機械的性質は製造条件と密接な関係がある。製造されたボードでは、図 3 5 に示すように、OSB や WB でもヤング率と強さの間に木材と同様に高い相関関係が認められる<sup>29)</sup>。

製造段階の工程管理では、弾性や強度と相関が高い密度が制御因子として用いられることが多いが、構造用 L V L の製造では単板段階におけるヤング率に基づいて材料が選別され、目的の性能を持つ製品が製造されている。構造用 L V L を製造する T J 社では、図 3 6 に示すように、超音波伝播法により単板のヤング率をオンラ

インで計測している。

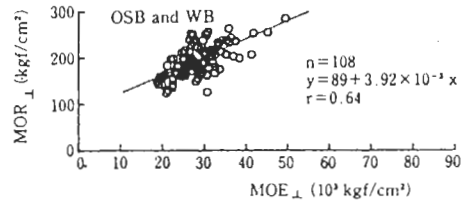
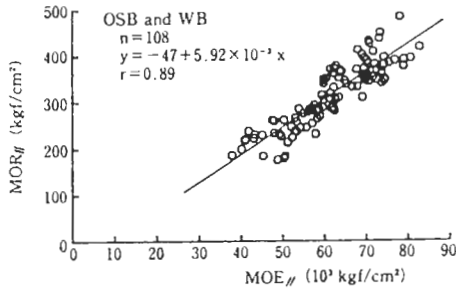


図 3 5 O S B + W B の 曲 げ 強 さ と 曲 げ ヤ ン グ 係 数 の 関 係 <sup>29)</sup>

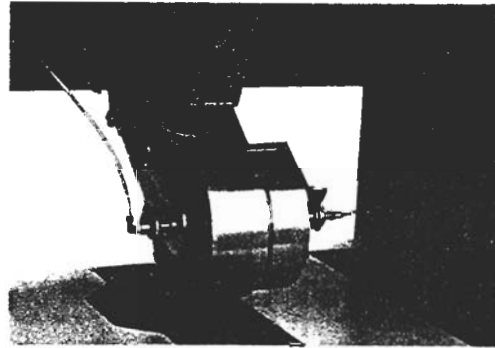
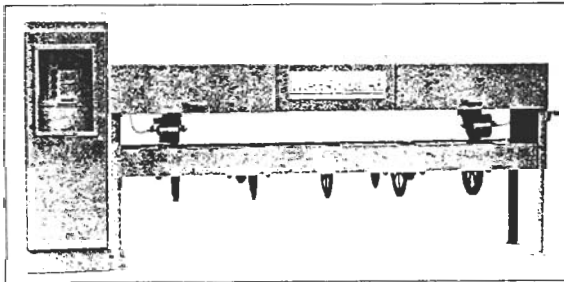


図 3 6 ベニヤテストの例  
右：ローラー型超音波センサ

## 6. おわりに

現在各国で採用されているストレスグレーディングはヤング率を木材強度の非破壊予測因子とする方法で、ヤング率と強度の間の統計的な関係に基づいているが、必ずしも完全な強度予測システムとはなっていない。木材の破壊が、目切れや節などの木材の組織構造的な特徴とのかかわりが深いことはまぎれもない事実であるが、ヤング率（あるいは剛性）と破壊機構の間の因果関係はまだ明らかになっていないのが現状である。グレーディングの精度を向上させる現実的な対応としては、目視であれ自動計測であれ、これらの方法によって得られる節などの木材の構造的な特徴に関する情報とヤング率との併用が考えられ、最近、ニューラルネットワークを用いた強度予測が試みられているが<sup>30)</sup>、推定精度の飛躍的な向上を見るには至っていない。節などの欠陥を持った実大木材の破壊現象そのものの研究、より根本的な解決策を模索することが一方で重要である。

もう一つのヤング率に基づくグレーディングの発展の方向は、わが国で最近研究が進められている丸太あるいは立木の段階におけるグレーディングの活用があろう。製材やラミナの段階になってからのグレーディングは、一方でグレーディングから

はずれる製品や、目的としない材質の製品を生み出すことであり、資源の有効利用に観点からは無駄が出ることであり、リジェクトされる製品のグレーディングコストも製品価格に上積みされることになる。原料から出発して一番効果的な段階でグレーディングを行うことが大切である。

国産材利用の特徴は立木または丸太を原料として出発するところである。このことは、造材コスト、人件費、輸送コストの面で、輸入木材とのコスト競争で非常に不利な要因となっているが、海外からの製品輸入と異なった面もある。すなわち、立木あるいは丸太の段階からの材質制御や選別ができることを意味しており、たとえば、丸太の段階で材料を用途選別できることであり、はりや柱材などの製品を取った後の背板をグレーディングによって新たな構造材料として活用できる特典を手中にしていることである。このような、林業と木材工業を結び付ける分野におけるヤング率に基づく木材のグレーディングの活用にも期待したい。

## 文 献

- 1) Sobue, N., Kitazumi, M.: Mokuzaï Gakkaishi, 37(1), 9-15 (1991).
- 2) Sobue, N., Katoh, A.: Mokuzaï Gakkaishi, 38(10), 895-902 (1992).
- 3) Gerhards, C. C.: For. Prod. J., 25(4), 51-57 (1975).
- 4) 祖父江信夫: 木材学会誌, 39(3), 271-276 (1993).
- 5) Bendtsen, B. A., Young, R. L.: Machine Stress Rating of Wood: An Overview, XVII IUFRO World Congress Report, p. 21-34 (1981).
- 6) 日本建築学会編: 木構造計算基準・同解説, 丸善(株), p. 82 (1988).
- 7) 古沢信, 平野茂: 木材加工技術協会第10回年次大会要旨集(1992), p. 49-50.
- 8) 祖父江信夫: 平成2年度科研費報告書(試験研究), タッピング法を用いた実大木材のダイナミック・ポータブル・グレーダの開発.
- 9) 木野直樹ほか: 静岡工業技術センター研究報告, No. 38, 1-6 (1993).
- 10) 小泉章夫: 日本木材学会木材強度・木質構造研究会 1989年度秋期シンポジウム講演集「Theからまつ」, p. 25-36 (1989).
- 11) 名波直道ほか: 木材学会誌, 39(8), 903-909 (1993).
- 12) 池田潔彦: 木材工業, 50(1), 22-25 (1995).
- 13) Bucur, V.: Ultrasonics, Nov., 269-275 (1985).
- 14) 祖父江信夫: (財)日本住宅・木材技術センター編・木構造設計資料“ポータブルグレーダ法による構造材のヤング係数測定”.
- 15) 中谷浩ら: 第44回日本木材学会大会研究発表要旨集, p. 197 (1994).
- 16) 丸山則義ら: 平成元年度科学研究費補助金報告書(代表者: 有馬孝禮) 課題番号 63860021, p. 32.
- 17) 有馬孝禮ほか: 材料, 39(444), 44-50 (1990).

- 18) 荒武志朗ほか：木材学会誌, 38(11), 995-1001 (1992).
- 19) 祖父江信夫ほか：材料, 42(2), 121-125 (1993).
- 20) Sobue, N. :Mokuzai Gakkaishi, 36(9), 760-764 (1990).
- 21) 小松幸平：日本木材学会木材強度・木質構造研究会 作業部会編集資料集「スギ材の構造的利用の方向と問題」, p.16-17 (1988).
- 22) 池田潔彦ら：第12回日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集, p.49-50(1994).
- 23) 田中俊成ら：第42回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.149 (1992).
- 24) 千葉一弘ほか：第45回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.133 (1995).
- 25) 祖父江信夫ら：第43回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.319 (1993).
- 26) 平嶋義彦ら：第44回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.195 (1994).
- 27) Pellerin, :For Prod J, 15(3), 93 (1965).
- 28) Sobue, N. :Mokuzai Gakkaishi, 34(8), 652-657 (1988).
- 29) 海老原徹：木材工業, 42(12), 566-569 (1987).
- 30) 田中俊成ら：日本木材学会40周年記念大会要旨集, p.136 (1995).

## 6. AEによる木材・木質材料の非破壊検査

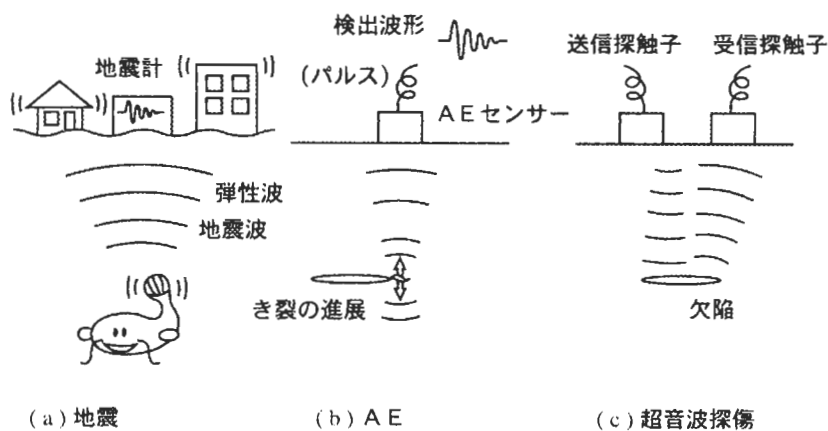
東京農工大学農学部 佐藤 敬一

### 1. アコースティック・エミッションとは

アコースティック・エミッション (acoustic emission, AE) は、材料の亀裂の発生や進展などの破壊に伴って発生する弾性波(振動、音波)で、地震も地球規模のAEと考えることができる。木材が折れる時の「ポキッ」という音もAEであるが、この音が聞こえる前から超音波領域(周波数20kHz以上)でのAEが発生することが知られていた。近年の超音波技法の進歩に伴いAEを用いて破壊の情報を知ろうとする計測の技術が確立された。AEは材料内の応力集中に敏感に反応するので、欠陥検出や強度推定などの材料評価に、また、破壊の進展過程をモニタリングできるので稼働中の建造物の保守検査に、新しい非破壊検査法として実用化されている。さらに、亀裂などの欠陥を有する材料評価のために近年発展した破壊力学のパラメータである応力拡大係数やエネルギー解放率と対応づけることができるので、材料の破壊機構を調べる基礎的な研究にも広く用いられている。

AEの実用例を挙げるとFRPの保証検査、ガスタンクなどの圧力容器の保証検査や保守検査、発電タービンの軸受けの摩耗状態の監視、地崩れの予知、また、航空機に応用することで従来の煩雑な検査工程を大幅に短縮することが報告されている。

超音波の非破壊検査法にはAE法のほかに超音波探傷法があるが、これは送信した超音波が欠陥により反射された信号を解析する方法である。超音波探傷法を駆逐艦がソナーを用いて潜水艦を捜索することに例えると、AE法は潜水艦がスクリー音を聞いて艦船の



種類や所在を確認することに例えられる。また、超音波探傷法は医者への打診に、AE法は聴診に例えられる。

図1 地震、AE、超音波探傷の概念図

## 2. AE計測の原理

材料の破壊時のAEは一般にパルス状に発生し、これを感度の良い圧電物質(PZT, ジルコン酸チタン酸鉛など)のセンサーで電気信号に変換し、増幅し、事象数(パルスの数)、振幅(パルスの大きさ)、発生源の位置標定(2個以上のセンサーのパルス到達時間差から計算する)などを測定する。このとき、環境雑音を除去するために、振幅弁別(一定の振幅以上のパルスのみ計測)、周波数フィルター、空間フィルター(設定した空間からのAEのみを計測)などの処理がなされる。また、地震計の揺れから地震源の機構を算出する原理を用いて、AE検出波形から破壊の規模や速さを求める源波形解析も行われている。

## 3. AE用語

アコースティック・エミッション(acoustic emission: AE)

固体が変形あるいは破壊する際に、それまで貯えられていたひずみエネルギーが解放されて弾性波の生じる現象。AEと略称される。

アコースティック・エミッション試験(Acoustic emission testing)

固体が変形あるいは破壊する際に、それまで貯えられていたひずみエネルギーが解放されて弾性波の生じる現象を利用して行う非破壊試験。単にAE法ということもある。略記号AET。

AE源(AE source)

AEが生じた場所。

AE波(AE wave)

AEにより生じる弾性波。

AE変換子(AE sensor: AE transducer)

AE波を受けて電気信号に変える変換器。AEセンサともいう。

AE信号(AE signal)

AE波の受信によってAE変換子により変換された電気信号。

突発型AE(burst emission)

時間的に分離して観測できるAE信号。

連続型AE(continuous emission)

時間的に分離しては観測されないAE信号。

AEしきい値(threshold voltage)

AE信号を識別するために設けられる電圧レベル。しきい値電圧ともいう。

AE計数(AE counts)

AE信号の振幅がAEしきい値を超える回数。

累積AE計数(cumulative AE count)

時間、圧力などの試験パラメータについて集計されたAE計数。AE計数総数ともいう。

AE計数率(AE count rate)

単位時間当たりのAE数。

AE事象数(AE event counts)

計測装置で検出される突発型AEの数。

累積AE事象率(cumulative AE event count)

時間、圧力などの試験パラメータについて集計されたAE事象数。AE事象総数ともいう。

AE事象率(AE event count rate)

単位時間当たりのAE事象数。

AEせん頭値(AE peak amplitude)

AE信号の包絡線の絶対値の最大値。

AE実効値(AE root mean square value)

AE信号の実効値。

到達時間差(arrival time interval)

複数のAE変換子にAE波が到達する相互の時間差。

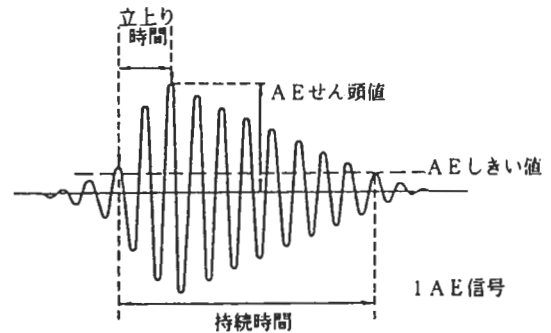


図2 AE信号の特性パラメータ

#### 4. 木材とAE

Kaiser<sup>1)</sup>は1953年に木材を含む23の試験片(鋼、銅、アルミニウム、木材、岩石等)について、応力によって発生する超音波を測定し、予め受けた荷重の大きさが推測できるというカイザー効果として現在知られている現象を報告した。この報告がAEに関する最初の研究とされてきたが、これより以前の1934年に東京帝国大学地震学教室の岸上により、レコード針をセンサーとして用いて木材の破壊時に「ピシピシ」という可聴音の他に人間の耳には聞こえない振動(超音波)が発生していることを報告しており<sup>2)</sup>、これがAEを電気的にとらえた最初の研究として見直されている<sup>3)</sup>。

最初のAEの研究が木材についてであったのにも関わらず、木材のAEの研究は金属等の他材料に比べ大きく遅れをとっているが、木材素材の節などの欠陥検出や強度評価、合板や集成材などの木材接着の保証検査、木材乾燥の監視、木材切削機械の刃の摩耗状態の監視などにAEが期待されている。

## 5. 木材の評価

木材を信頼性の高い材料として供給するためには、その品質管理のための非破壊検査の確立が必要である。特に木材は、ヤング率、破壊強度のばらつきが大きいので、強度評価のための全数検査が必要である。現在、行われているストレス・グレーディングは、ヤング率が破壊強度と高い相関性を示すことに基づき、ヤング率によってある程度の等級区分を行おうとするものである。しかしながら、ヤング率は材料の平均的な材質指標であるので、材料内の局所的な欠陥の検出と評価には期待できない。そこで、何らかの方法で欠陥の評価を行うことが必要である。

## 6. その他の超音波による木材の非破壊検査法

AE以外の超音波の技法として超音波探傷法や超音波透過法(アコースティック・トランスミッションまたはアコースト・ウルトラソニック、後者はAUと略される)がある。AEは負荷などにより欠陥で破壊が進行するときに発生する弾性波を検出するのに対し、他の方法は1対のバルサ一とセンサーを用いて材面を走査する。超音波探傷法はバルサ一で発生させた弾性波のパルスによって材料内の欠陥で生じた反射波をセンサー(バルサ一と同一の場合が多い)で捕らえ欠陥の存在を知る方法で材料内の空洞部分を検出することができる。超音波透過法には、バルサ一からセンサーまでパルスが伝播に要する時間、または、音波減衰を測定する方法で、材料内のヤング率や密度の変動を調べ、欠陥を検出する方法である。音波減衰の利用などはX線を用いた場合と類似した結果を得ることができ、放射線被曝のような人体への悪影響がなく安全である。超音波の問題点は、走査する変換子と被試験体(または固定した変換子と移動する被試験体)との間で音波減衰を小さくするための接触方法である。この解決策として水中で測定する方法がある。水中の木材橋くいの腐朽や虫くいなどを調べるにはCTスキャンによる断面の観察は有力な方法である。また、水中に固定したセンサーとバルサ一の間を製材を通し、音速の変化を調べ、節などの欠陥の検出に有効であることが報告されている<sup>4)</sup>。しかし、乾燥後の木材の表面を水に浸すことは避けるべきだと思われる。現在、この点に関してはローラー型の変換子やウェーブガイドを用いる方法が研究されている。超音波透過による方法では木材の節、割れ、腐朽、あて材などの検出が可能であるとの研究結果が数多く報告<sup>5,6,7,8)</sup>されているが、木材の横方向における音波特性の異方性(接線方向と半径方向)や機種の違い、個体間のばらつきなどその応用に対し複雑にしている因子が多いので、基礎的なデータの蓄積が必要である。このほか、センサー付きのハンマーによって材面をたたき反射波の周波数特性を測定し木材内部の腐朽の状態を調べる方法、繊維方向の弾性波パルスの速度からヤング率を測定しグレーディングに利用する方法などがある。

## 7. 木材の材料評価へのAEの応用

現在、広く研究されているメカニカルグレーディングは、ヤング率が破壊強度と高い相

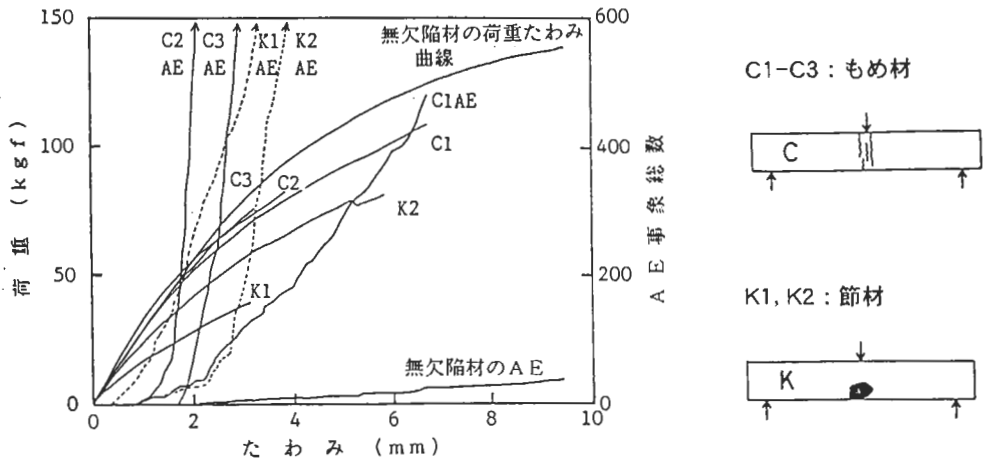


図3 節、もめ等の欠陥を含むエゾマツの曲げ強度試験における A.Eの発生と荷重-たわみ曲線

関性を示すことに基づき、節などを含む木材の評価にはある程度効果があるが、ヤング率に影響しないもめなどの欠陥には無力である。図3には節と風害により生じたもめを含んだエゾマツの曲げ強度試験(20×20×320mm試験片、スパン280mm、中央集中荷重)時に発生したAEと荷重-たわみ曲線を示す<sup>9)</sup>。ヤング率(荷重-たわみ曲線の傾き)は節材で明らかに低い。もめ材と無欠陥材の差は一見られない。ところが、AEについては欠陥材については発生数が著しく多い。このことから素材の欠陥検出にAEが優れていることが分かる。特にもめは引張強度を半分以下に低下させるが、肉眼では検出することが困難な欠陥である。

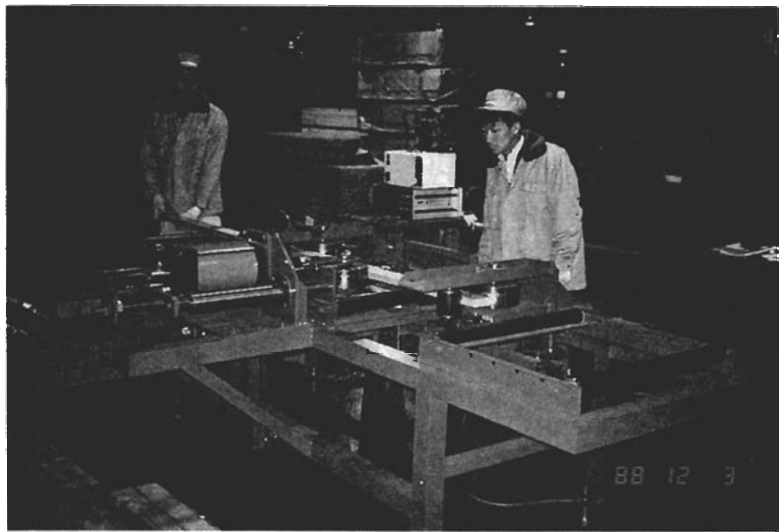


図4-1 木材用AEグレーダー



図4-2 AEグレーダーの3点曲げ部分

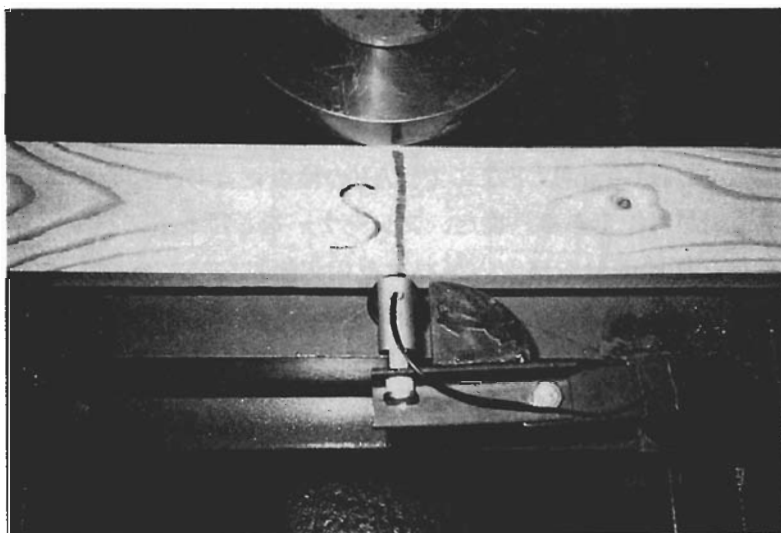


図4-3 中央加圧ローラー（上）とAEローラーセンサー（下）

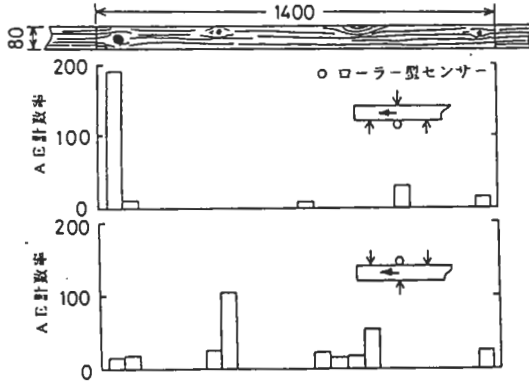


図5 木材内の欠陥の位置とAE計数率  
(0.2秒間のAE計数)

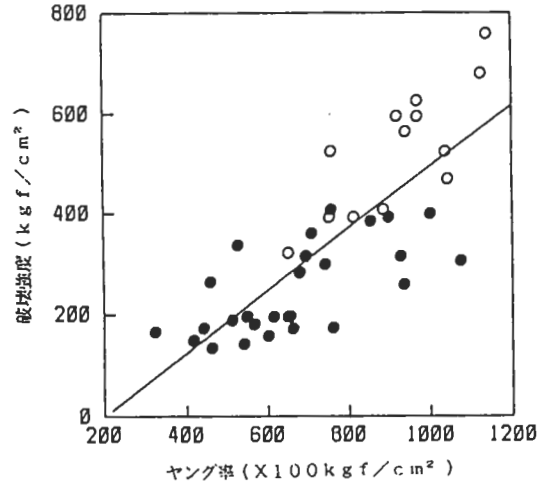


図6 ベイマツの曲げヤング率と破壊強度の関係  
およびAE計数率による強度の評価  
○：AE計数率<120  
●：AE計数率≥120

## 8. 木材のAEグレーダー

図4のようなローラー型AEセンサーを用いた自動送り木材グレーダーを試作し<sup>10)</sup>、30×80×2800mmのベイマツ材の中央1400mmの部分をも3点曲げ駆動加圧ローラーに28cm/sの速度で通した。このとき、加えた荷重は131kgfで健全材の破壊強度の1/5以下で、小さな節程度の特に問題とならない欠陥に対しては十分に小さな荷重である。AEをスパン中央引張側に設置したローラー型センサーにより検出すると、図5に示すように節や節による目切れの部分でAEの発生が認められた。

さらに、40本のベイマツ材について曲げ強度試験を行い、破壊強度を測定した。図6にヤング率と破壊強度の関係を示す。この相関係数は0.793と高く、ヤング率によりある程度破壊強度を推定することが可能であるが、図6の●で示したようにAE計数率が120以上の試験体の強度は400kgf/cm<sup>2</sup>以下なので、AEの検査により、節や目切れなどを含む強度の低い木材の検出が可能である。また、プレーナーをかける前のベイマツについて同様の結果が得られた。腐朽部分や材中の割れなどの欠陥についても検出することが可能であった。したがって、AEによる木材の欠陥検出や欠陥の強度評価とヤング率による等級区分を併用すれば木材を相当信頼性の高い材料とすることが可能である。

## 9. 木材接着部へのAEの応用

木材ラミナの縦継ぎのためのフィンガージョイント、さらに、そのラミナを積層接着した集成材、木材単板を積層した合板などの木質材料の製造にあたっては接着不良などの欠陥が起きる場合があるが、現状では製品検査は目視検査に頼っており、決め手となる自動

検査方法がまだ無い。また、建築基準法の改正にともない集成材等を使用したドームなどの大規模な木質構造物の建造が可能になったが、日本では道路が狭いために集成材の縦継ぎ、ラチス梁の接着などの現場での接着施工が有利である。しかしながら、現場接着工法はその強度保証試験法が無いため社会的に認められていない。木材の接着部については、供用前に許容応力度の負荷を与え破壊しないことを確認するブルーフ・ローディング試験が行われることがあるが、これは基準の破壊強度を保証するものではなく、負荷により決定的な破壊が進行することも起こりうる。AEはFRPの繊維とマトリックス間の接着の保証試験に有効に利用されており、木材接着部の検査にも応用が期待できる。

図7に木材構造用接着剤として広く用いられているレゾルシノール・フェノール共縮合接着剤によるマカンパ接着の引張せん断試験におけるAEの発生を示す<sup>11)</sup>。硬化剤（標準では主剤に対し15%添加）を少なくして接着不良を起こさせた試験片では標準材の破壊強度の1/2（およそ200kgf）程度でAE事象率が多くなり、接着の良否の判定が可能である。また、図8には12mm厚さ5プライの合板を450×40mmに切り出しスパン280mmの4点曲げ試験時のAEの発生を示す<sup>12)</sup>。この時接着不良として、スパン中央圧縮側の表層単板と第2層単板の間に10、20、30、50、100mm幅のテフロンシート(0.05mm厚)を挿入した。また、第2層単板に10mm程度の不連続を造り、いわゆるトンネルを起こさせた。10mm幅シートを除く欠陥材ではAEの発生率が高いので、曲げにより任意のたわみを与えることにより、合板の圧縮側にある欠陥をAEによって検出できることが分かる。ただし、単板はベニヤレスにより裏割れが生じていて、内層の繊維が横方向に配向している単板ではAE源になりやすい細かな欠陥が多く存在しているので、300kHzのハイパスフィルターを介して裏割れからのAEを取り除いている。

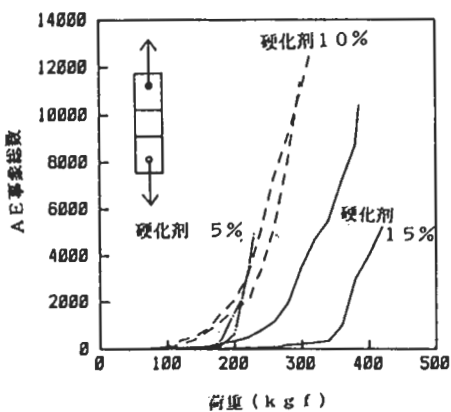


図7 硬化剤量の違いによるレゾルシノール・フェノール接着剤の引張せん断試験のAE事象総数と荷重の関係

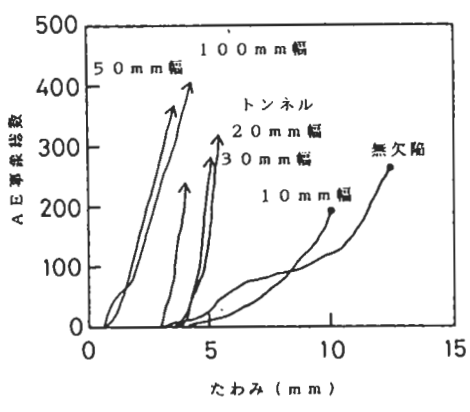


図8 欠陥（テフロンシート挿入とトンネル）を含む12mm厚合板の曲げ試験におけるAE事象総数とたわみの関係

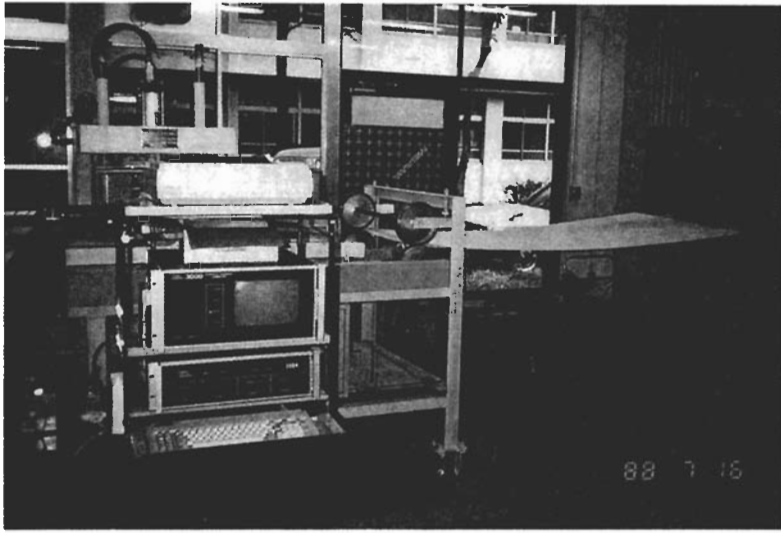


図9-1 910×1820合板用AE試験機

## 10. 合板の接着不良の検出

1インチ径のローラー型AEセンサーを用いて、図9に示すような910×1820mm合板用の検査装置を試作した。合板の送り速度は12cm/sとした。接着層の2ヶ所に400×400mmのテフロンシート(0.05mm厚)を挿入して接着不良を起こさせた5.5mm厚3プライ合板のAE試験結果を図10に示す。接着不良部がローラー型AEセンサーを通過する際に顕著なAE発生が認められ、接着不良の検出が可能であることがわかった。

さらに、合板のフローリング製品(300×1800mm、5プライ、オーバーレイ合板)の接着不良を検出するためのAE合板試験機を試作した<sup>13)</sup>(図11)。5インチ径のローラー型AEセンサーを使用し、合板の送り速度は30cm/sとした。製造工程内で発生した接着不良(パンク)を含む合板製品のAE試験結果を図12に示す。接着不良部で多量のAE発生が認められ、製品の検査にもAEが有効であることがわかる。また、AE発生は接着力や木破率との間に相関関係が認められた。以上のことから、パンクのような致命的な欠陥の検出と接着力低下部分の評価などの合板製品の工場ライン内における品質管理がAEによって可能であることがわかった。

そこで、現在は、図13のような厚さ8～15mmの910×1820mm合板用の実用機(幅1800mm、挿入および取出コンベアを含む長さ5760mm、送り速度60～80m/min)を作製し、パンクおよび弱体接着の評価、判定について検討している。

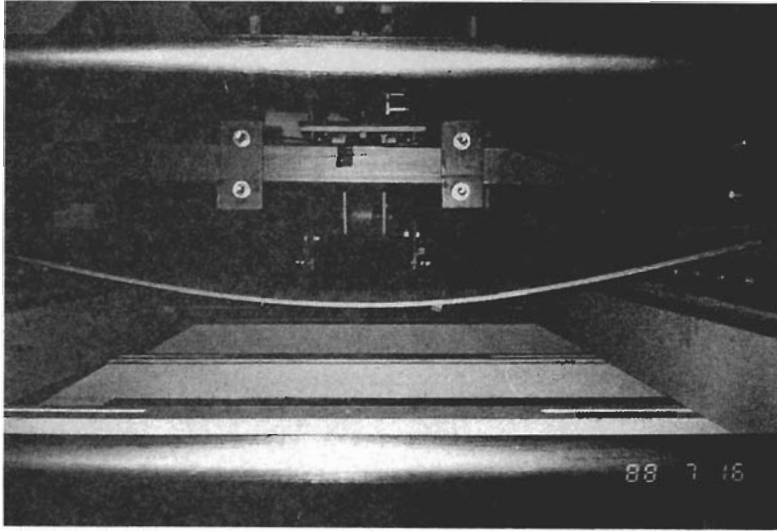


図9-2 1インチのAEローラーセンサーと加圧ローラー

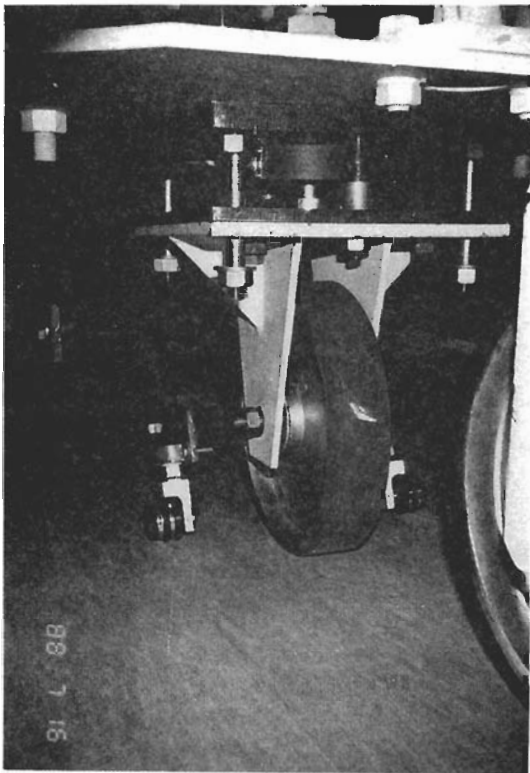


図9-3 1インチのAEローラーセンサーと加圧ローラー

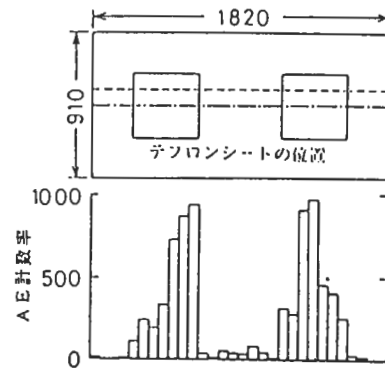


図10 合板に挿入したテフロンシートの位置とAE計数率  
(0.5秒間のAE計数)  
ローラー型センサーの通過位置  
荷重ローラーの通過位置

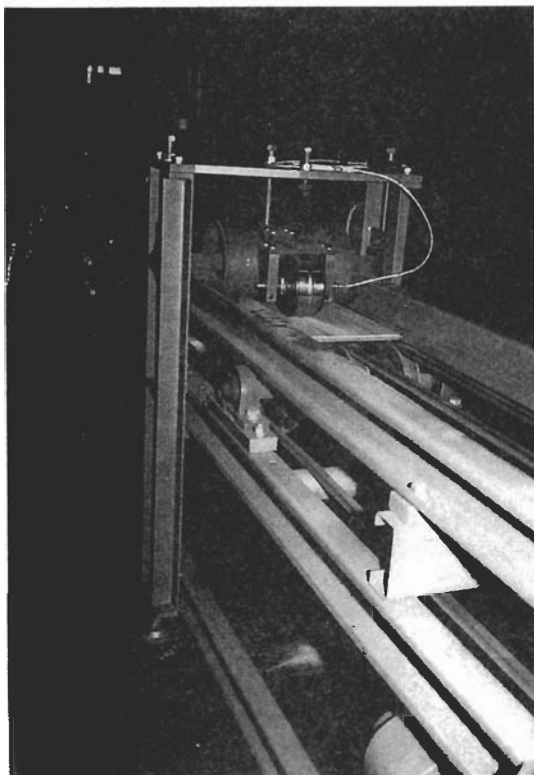


図11-1 フローリング合板用AE試験機

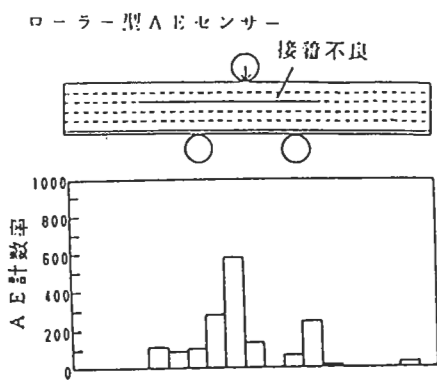


図12 接着不良の位置とAE計数率

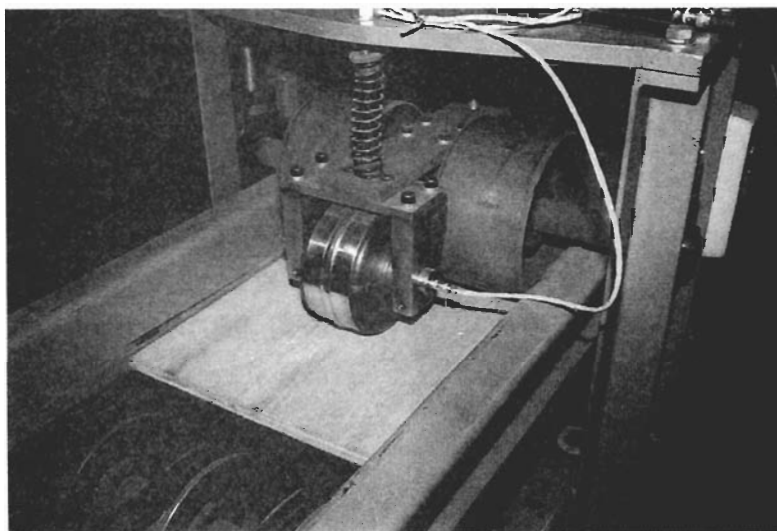


図11-2 5インチAEローラーセンサーと加圧ローラー

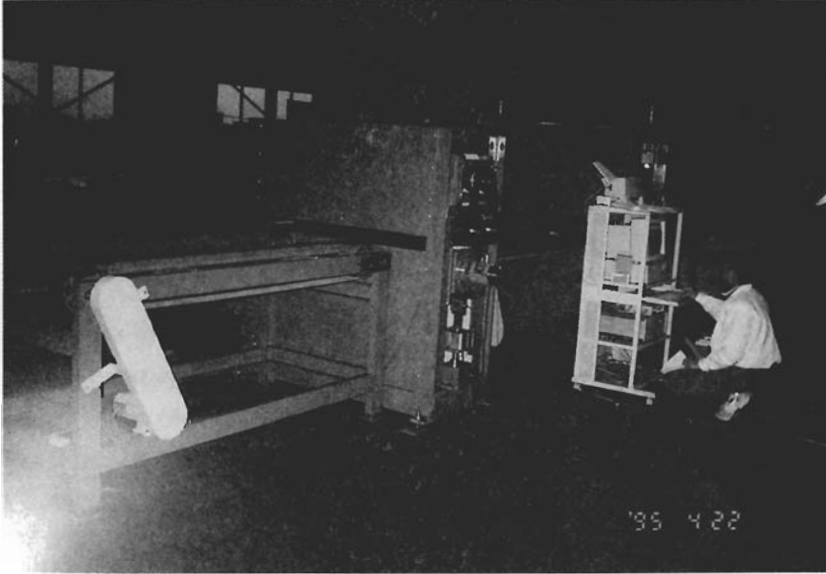


図13-1 A E合板接着不良検出の実用機

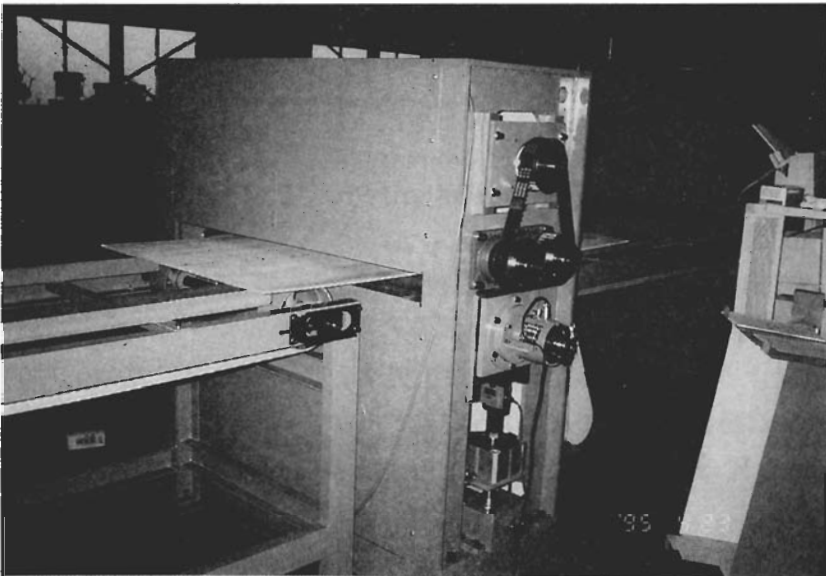


図13-2 A E合板接着不良検出の実用機

## 11. おわりに

AE法は材料に荷重をかけた時の破壊音を聞く方法であるから、非破壊ではなく破壊検査である、と言われることがある。AEを製品検査に応用する場合は、健全な製品を破壊しない荷重レベルに設定して始めて非破壊といえる。木材の場合、金属等の他材料の欠陥に比べて、節などの欠陥は大きいので、荷重レベルの設定がしやすく、AEによる欠陥検出が容易である。また、欠陥部の応力集中に対応してAEが発生するので、その欠陥が材料として致命的なものかどうかを評価することも可能である。したがって、AE研究の中でも木材分野への応用は注目されている。

## 参考文献

- 1) J. Kaiser: Archiv fur das Eisenhüttenwesen, 24(1/2), 43-45 (1953).
- 2) 岸上冬彦: 地震, 6(1), 25-31 (1934).
- 3) T. F. Drouillard: Journal of Acoustic Emission, 9(3), 155-176 (1990).
- 4) K. A. McDonald: FPL FS USDA Research Paper FPL 331, (1978).
- 5) F. C. Beall: Proc. 6th Symp. on Nondestructive Testing of Wood, Pullman, pp.3-28, (1987).
- 6) E. A. Hamm, F. Lam: Proc. 6th Symp. on Nondestructive Testing of Wood, Pullman, pp.137-165, (1987).
- 7) M. Patton-Mallory, K. D. Anderson, De Groot: Proc. 6th Symp. on Nondestructive Testing of Wood, Pullman, pp.167-189, (1987).
- 8) S. L. Quarles, R. L. Lemaster: Nondestructive Evaluation for Manufacturing and Construction, ed. Dos Reis, H. L. M. Hemisphere Publishing Corp., New York, pp.177-188, (1990).
- 9) K. Sato, T Okano, I. Asano, M. Fushitani: Proc. 2nd Inter. Conference on AE, Lake Tahoe, pp.240-243, (1985).
- 10) K. Sato, H. Takeuchi, K. Yamaguchi, N. Ando, M. Fushitani: Journal of Acoustic Emission, 9(3), 209-213 (1990).
- 11) 佐藤敬一, 森 潤, 伏谷賢美: 東京農工大学演習林報告, 28, 23-29, (1991).
- 12) 佐藤敬一, 山口勝也, 安藤直人, 伏谷賢美: 木材工業, 44(5), 214-218, (1989).
- 13) M. Ishibashi, K. Sato, M. Fushitani: Progress in Acoustic Emission V, JSNDI, 174-180, (1990).

## 7. 木質構造の耐震診断

農水省森林総合研究所 神谷 文夫

### 1. はじめに

今回の兵庫県南部沖地震以後、耐震診断がマスコミや雑誌で取りあげられた。耐震診断の重要性・必要性がそれだけ社会的に認識されているという証左であろう。耐震診断法には、建物の間取りなどの情報だけで行うものと、壁の内外装の一部をめくって内部がどのようなになっているか、すなわち、筋違いなのか面材張りなのかなどのより詳細な情報を基礎とするものがある。また、まだ研究段階ではあるが、建物の固有周期や減衰性などの振動特性を直接測定してそれを基礎とするものがある。ここでは、それらの概略について述べる。

### 2. 耐震診断のレベル

耐震診断をその診断方法のレベルにより1次、2次、3次の診断に区分して考える。この区分は、建設省総プロ「建築物の耐久性向上技術の開発」で提案された劣化診断の区分の考え方に沿ったものである。

1次診断は、主として目視観察などを中心とし、基本的に建物には手を加えないで診断する方法である。

2次診断は、目視観察を中心とはするが、壁の内部などを調べるために器具を用いたり、仕上材の一部を剥すなど場合によっては部分的な破壊をとまなう診断法である。将来的には、壁の内部などを調べるために、マイクロスコープや超音波の反射など物理的現象を利用した専用器具を開発することも考えられる。

3次診断は、常時微動測定や何らかの方法で変形を加えて振動させる自由振動、小型起振器による強制振動などから固有周期や減衰定数等を測定し、それらの情報を基に診断を行う方法である。1次診断と2次診断の方法が間接的方法であるのに対して、3次診断は直接的方法であると云える。

### 3. 素人用の耐震診断法（1次診断）

（財）日本建築防災協会と（社）日本建築士会連合会による「わが家の耐震診断と補強方法」（表1）は素人用の耐震診断法である。これは①地盤・基礎、②建物の形、③壁の配置、④筋かいの有無、⑤壁の割合、⑥腐朽度の6項目について採点し、それぞれの評点を掛け合わせた総合評点を基に、①安全、②一応安全、③やや危険、④倒壊または大破壊の危険がある、の4段階の判定を行う方式になっている。設計基準では特に配慮していない建物の形が項目の中に取り入れられている点が注目される。

各項目の評点は1.0が基準であるが、項目によって点数の幅が変えてあり、結果的に重み



## 2 診断表の記入

次のA～Fの6項目の説明を読み、「わが家の耐震診断表」に評点を記入して下さい。

### A 地盤・基礎

(地盤)

■非常に悪い地盤：30mよりも深い沖積層(軟弱層)、海・川・池・沼・水田等の埋立地および丘陵地の盛土地で小規模な造成工事によるもの、液状化の可能性があるところ

■やや悪い地盤：30mよりも浅い沖積層、埋立地および盛土地で大規模な造成工事(転圧・地盤改良)によるもの

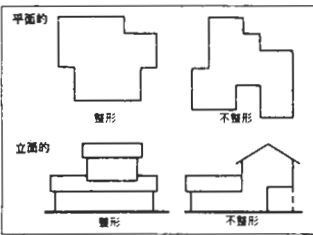
■良い・普通の地盤：洪積台地または同等以上の地盤(上記以外のもの)

(基礎)

■鉄筋コンクリート造布基礎とは、22頁の図の図に示されているような基礎のことです。鉄筋の有無を確認できない時は、無筋コンクリート造とみなします。

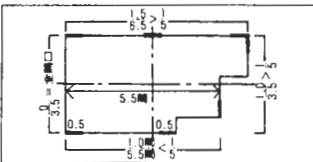
### B 建物の形

整形・不整形は、下図を参考にして判定します。



### C 壁の配置

外壁の一面に壁がどれだけあるかは、下図のように、建物の平面で中心から手前側にある立面について判定します。4面のうち、評点が最も低い面の値をとります。この例では、左側の立面が全開口ですので、その評点の0.7をとります。



### D 筋かい

筋かいは、22頁の図に示されているような材料のことです。なお、この診断法では、窓などの上下にあるものは含まれません。

現状では、筋かいの有無がわかりにくいかと思いますが、工事中に確認したとか、あるいは建物のどこかに筋かひがあれば「あり」とし、そうでなければ「なし」とします。

## わが家の耐震診断表

| 診 断 項 目 |  | 評 点 (後1) |       |      |       |
|---------|--|----------|-------|------|-------|
| A       | 基礎   | 地盤       | 良い・普通 | やや悪い | 非常に悪い |
|         | 鉄筋コンクリート造布基礎   |          | 1.0   | 0.8  | 0.7   |
| B       | 建物の形   |          |       |      |       |
|         | 整形   |          | 1.0   |      |       |
|         | 平面的に不整形  |          | 0.9   |      |       |
| C       | 壁の配置   |          |       |      |       |
|         | 立面的に不整形  |          | 0.8   |      |       |
|         | つりあいのよい配置(外壁の1面に壁が1/5以上)   |          | 1.0   |      |       |
| D       | 筋かい  |          |       |      |       |
|         | 外壁の一面に壁が1/5未満  |          | 0.9   |      |       |
|         | 外壁の一面に壁がない(全開口)  |          | 0.7   |      |       |
| E       | 筋かい  |          |       |      |       |
|         | 筋かいあり  |          | 1.5   |      |       |
|         | 筋かいなし  |          | 1.0   |      |       |
|         | 壁の割合   |          |       |      |       |
|         | 1.8～   |          | 1.5   |      |       |
| F       | 老朽度  |          |       |      |       |
|         | 1.2～1.8  |          | 1.2   |      |       |
|         | 0.8～1.2  |          | 1.0   |      |       |
|         | 0.5～0.8  |          | 0.7   |      |       |
| 総合評点    | 0.3～0.5  |          | 0.5   |      |       |
|         | ～0.3   |          | 0.3   |      |       |
|         | 健全   |          | 1.0   |      |       |
| 総合評点    | 老朽化している  |          | 0.9   |      |       |
|         | 腐ったり、シロアリに喰われている   |          | 0.8   |      |       |
|         | $\boxed{A} \times \boxed{B} \times \boxed{C} \times \boxed{D} \times \boxed{E} \times \boxed{F} =$ |          |       |      |       |

(注1) 2階建の場合は、1階部分だけで診断します。同じ項目内に該当するものが2つ以上ある場合は、評価の最も低いものを選びます。  
(注2) 診断適用外になる場合は、専門家の精密診断を受けて下さい。

## 耐震判定表

| 総合評点        | 判 定              | 今後の対策                |
|-------------|------------------|----------------------|
| 1.5以上～      | 安全です             | —                    |
| 1.0以上～1.5未満 | 一応安全です           | 専門家の精密診断を受ければ、なお安心です |
| 0.7以上～1.0未満 | やや危険です           | 専門家の精密診断を受けて下さい      |
| 0.7未満       | 倒壊または大破壊の危険があります | ぜひ専門家と補強について相談して下さい  |

### E 壁の割合

■④(20頁)で求めた値から評点を求めます。

### F 老朽度

老朽化している：建築後年月を経過し、屋根の棟の線や軒先の線が波打っていたり、あるいは柱に傾きがあり、建具のたてつけが悪くなっているなどの場合です。

腐ったり、シロアリに喰われている：土台をドライバーで突いてみて、ガサガサになっているかどうかで調べます。建物の北側と風呂場まわりは念入りに調べます。シロアリは、梅雨期に羽アリが集団で飛び立ったかどうかでも判断の材料になります。

## 3 総合評点の求め方

診断表のA～Fの各評点を全てかけ合わせると総合評点が求められます。なお、A項で評点が「診断適用外」となる場合は、本耐震診断の適用範囲外となります。

## 4 診断結果の判定

総合評点を、耐震判定表にあてはめて下さい。あなたの家は、「安全です」という判定が得られましたか。その他の場合(診断適用も含む)には、ぜひ今後の対策を御検討下さい。

表1. (続き)

が付くようになっている。例えば、建物の形や老朽度は1.0～0.8で評点の幅は小さいが、筋違いの有無（あり1.5、なし1.0）や壁の割合（1.5～0.3）は評点の幅が大きく、判定結果を左右する度合いが大きい。

兵庫県南部地震の被害調査では、昭和56年以後のいわゆる新耐震基準で建てながら被害が見られた建物について詳細調査が行われた。ここで云う詳細調査とは、建物の外観だけの調査ではなく、建物内に入って間取り図を作製したり、可能な場合は壁の内部の構成（筋違いや補強金物の有無など）を調べる調査である。平面図が入手できれば随分助かるが、入手できたとしても、図面に耐力壁の種類や金物補強の方法等が示されていることはまれで、実際に建物を調べることが必要である。また、仕上材の一部が破損して筋違いが入っていることが確認できても、筋違いが無開口部分の全面に入っているか、間仕切壁にも入っているかなどは判断できない。この診断法の弱点は、耐力壁の種類や配置、補強金物の有無などを推定せざるを得ないところにある。

上記の詳細調査では、耐力壁の種類と配置が確認できなかった建物については、外壁は全て倍率2（いわゆる三ツ割筋違い1.5+ラス下地0.5）とし間仕切壁は全て倍率0.5とする仮定、および、外壁と間仕切壁は全て倍率1.0とする仮定の下で壁量の充足度が計算されたが、耐力壁の種類と配置が特定できた場合も含めて、いずれも「壁量が不足」という結果が得られている。したがって、耐力壁の種類と配置などが明確ではなくても、現実的にはかなりの精度で診断が可能であると考えられる。

#### 4. 精密診断（2次診断）

「わが家の耐震診断と補強方法」では「やや危険です」と判定された建物については専門家の精密診断を勧めている。精密診断は建築基準に適合しているか否かを見るもので、仕上材の一部を剥して内部を調べるなど、局部的に破壊することも必要である。

建築基準に適合していることが、現実的にどの程度の耐震性を有しているかについては、実際の地震被害と照合（キャリブレーション）させて評価するしかない。今回の地震では、昭和56年（新耐震）以後建てられながら被害を受けた建物は殆ど基準を守っておらず、耐力壁は必要壁量に対して20～30%不足していた。地震波は個々に卓越周期や強さが異なるが、兵庫県南部地震に限って言えば、現在の基準を守ったものについては無被害か軽微な被害、耐力壁が20～30%不足した場合は、最大1階部分に大きな亀裂が入る程度の損傷ということになる。

#### 5. 振動特性を直接測定する診断（3次診断）

##### （1）加振・測定の方法

##### 1）常時微動測定法

地盤は交通機関・工場・工事などの動力源などによって常に振動しており、この地盤の振動によって建物は常に振動している。この建物の微動を測定し、フーリエ解析などの統計・確立論的手法を用いて建物の固有周期や減衰定数等を推定することができる。

常時微動測定法の長所は、起振器などの装置を必要とせず測定が容易であることであるが、短所としては次が挙げられる。

①振幅レベルは極小（ $\mu\text{m}$ のオーダー）である。

②入力（地盤の振動など）の影響がそのまま含まれる。

③振動モードが総合された形で測定されるため、その評価と分離が困難な場合がある。

④解析装置が必要である。

以上の内、③と④についてはFFTの性能が向上し、最近ではコンピュータを含む装置の一式がトラックに組み込まれた専用の機器も販売されるなど大幅に改善されている。また、上記の②については地盤表面あるいは建物基礎での測定を行い、入力の影響を推定することが可能である。したがって残る問題は①の振幅が小さいことだけである。これについては、建物が比較的弾性的変形挙動をなすRC造・S造のビルなどでは、相対的に大きな振幅を与えた起振器による振動測定と大きな差がないことが報告されている（建築学会：建築構造物の振動実験）。しかし、木質構造ではどうであろうか？

## 2) 自由振動測定

建物に何らかの方法で力と変形を加え、この力を瞬時に開放して生じる自由振動を測定する方法である。但し、減衰定数が大きな建物には適用できない。与える変形の大きさによって振動性状が影響を受ける建物の場合は、瞬時に変形を解放することが必要である。例えばスチールロッドをアセチレンで焼き切る方法では、ロッドが切れる寸前に伸びるので正確さに欠くきらいがある。

そのような変形の精度を問わない場合は、何人かの人間が揃って建物の壁に向かって突進したり、建物にかけたロープをしゃくするようなリズムで励振させるなどの簡易な人力加振の方法がある。

自由振動では、一般に常時微動測定の場合より振幅が大きいため、スペクトル解析などを行う必要はない。

## 3) 起振器による強制振動

起振器にはいくつかの原理がある。最もポピュラーなものは不平衡質量形と云われるもので、質量が偏心した板や棒を互いに逆回転させて、一方向の遠心力のみを取り出し、直交する方向の力はキャンセルさせる方式である。この形の起振能力は偏心モーメント ( $\text{kg}\cdot\text{cm}$ ) で表される。手で運べる程度の重量のものは数  $\text{kg}\cdot\text{cm}$  であるが、数  $100\text{kg}\cdot\text{cm}$  のものとなると2トン近くの重さがある。周波数は20Hz程度までである。

2番目にポピュラーなものとして電磁石形がある。電磁石形は建物の床などの部位の振動モードなどの測定に良く用いられ、音響レベルまでの高い周波数の加振が可能である。一般に起振能力は小さくその応答は常時微動測定装置で測定されるレベルである。地震関係の研究用に開発されたものは小型の不平衡質量形起振器程度の起振力を持っている。

起振器による強制振動の波形はサイン波である。試験の方法は連続的あるいは逐次周波数を変えるスイープ試験が中心で、これから、低次の共振曲線を得て固有振動数や減衰定数を求める。

## (2) これ迄に実施された振動実験

これ迄に実施された振動実験の報告を巻末に示す。それをみると、不平衡質量形起振器を用いた振動実験が多く、1次共振時の建物の変位は1mm以下、一般的には0.1~0.01mmが多い。

これらの研究から得られている知見の主なものをまとめると次のようになる。

- ①建物のタイプ毎の固有振動数をかなり乱暴にまとめると表2のようになり、昔の在来構法は低いが、最近では枠組壁構法と同じ値に近づいている。
- ②骨組み～内装～外装の各建設段階を追うに従って6Hzから8Hzへと順次増加する。
- ③モルタルなど外装材の影響は大きい。
- ④研究用枠組壁構法3階建て建物の実験では、常時微動測定で求めた固有振動数は起振器（3～100kg・cm）で求めた固有振動数とほぼ一致している。ただし起振モーメントが増加するにつれて固有振動数は低下する傾向にある。また、静加力試験で耐力壁を破壊させた後では固有振動数は大幅に低下した。
- ⑤今回の地震に遭遇した3階建て在来構法（軽微～筋違い踏み外し程度の被害）の地震後の固有振動数は、5Hzを下回るものが多く、地震を受けていないモデルハウスの値より低かった。

表2. 住宅の固有振動数

| タイプ                            |           | 固有振動数 (Hz) | 備考        |
|--------------------------------|-----------|------------|-----------|
| 在<br>来<br>構<br>法<br><br>(2階建て) | 戦前・戦争直後   | 約2         |           |
|                                | 戦後～昭和35年頃 | 3～4        |           |
|                                | 昭和35年以後   | 4～8        | 最近のものほど高い |
| 枠<br>組<br>壁<br>構<br>法          | 2階建て      | 6～8        |           |
|                                | 3階建て      | 5～6        | モデルハウス    |

### (3) これからの課題

いずれの加振方法を用いるにしろ、最大の課題は、図1に示すように建物の小振幅の振動特性から、地震のような大変形時の力学的挙動が推定できるかという問題につきる。

この問題は2つの側面を持っている。1つは木質構造は一般に非線形の荷重-変形関係を持っていることである。

図2は、ある荷重-変形ループのモデルを用いた起振器によるスイープ加振の理論解析から得られた振幅と固有振動数との関係を示したものである。モデルに用いた耐力壁の荷重-変形関係を図3、4に示す。図2は、振幅が大きくなる（みかけの剛性が減少する）につれ、固有振動数は減少することを示している。また、この解析からは、荷重-変形関係が非線形であっても、その固有振動数はみかけのバネ定数（最大変形時の点と原点を結ぶ直線の傾き）から、線形の振動方程式を使って求められる固有振動数とほぼ等しいことが分かった。このことはいくつかの実験でも確認されている。

荷重-変形関係は非線形であっても、構法やディテールによらずそれが相似形（無次元化すれば同じになる）であれば大きな問題はないが、一般論ではそうではない。

もう一つの側面は、真の耐力はなくても初期剛性が高い造作部材などが、構造部材と同等の耐力要素として見積もられる可能性があることである。

いずれにしろ理屈では、極く初期の剛性からその力学的性質の全貌を知ることは不可能である。しかしながら、これ迄に行われた振動実験を眺めると、固有振動数が高い建物は、

1次・2次診断的な壁量などの観点からも耐震性が高いと推定される建物であった。また、固有振動数の低い建物は明らかに壁量の少ない建物である。さらに、この方法で求められる固有振動数は、建物の剛性だけでなく質量の影響を含んだ形で現れるが、これは壁量を主とする1次・2次診断にはない利点である。したがって、振動特性を直接測定する診断法は、わからない部分が未だ相当あるが、実用化の可能性のある診断法と云えよう。少なくとも1次診断あるいは2次診断と併用すればかなりのことが分かるように思われる。これからも、既存の建物および研究用の実験建物について測定を行い、データを蓄積することが必要であろう。

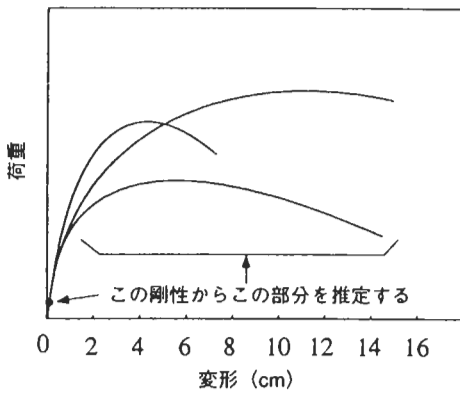


図1. 荷重-変形関係に見る微小振動特性を基礎とする耐震診断

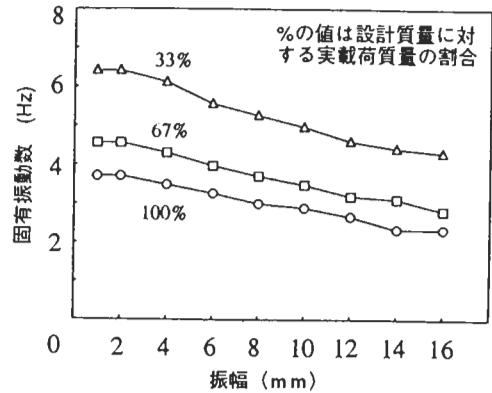


図2. 振幅と固有振動数との関係 (理論解析結果の一例)

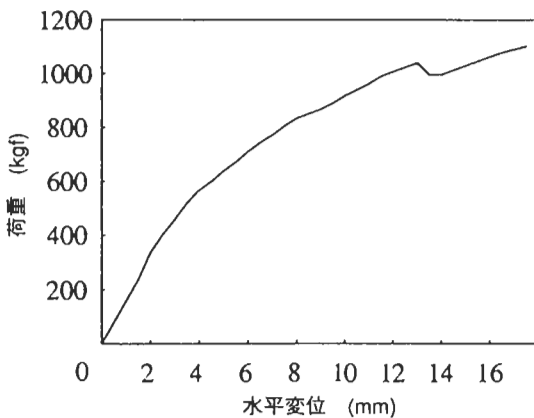


図3. 理論解析に用いた耐力壁の荷重-変形関係 (処女変形部分)

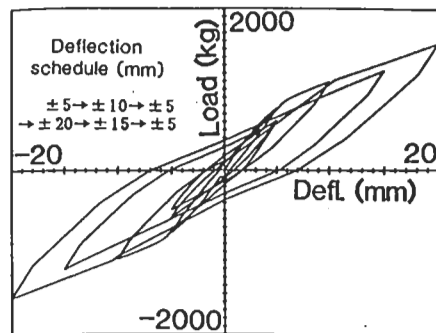


図4. 理論解析に用いた荷重-変形ループのモデル

## 文献

以下の文献は、主としてこれ迄に実施された振動実験の報告です。必ずしも全てを網羅していませんので御注意下さい。本来は報告された結果をまとめるべきではありませんが、なかなか容易ではありません。早い内にまとめたいたは考えておりますが、もし、まとめてやろうという気概のある方は、遠慮なくチャレンジして下さい。

- ・梅村魁他、木造建物の耐震性能実態調査、東京都防災会議、S45.53
- ・建築学大系11 地震・振動学（旧版）
- ・中原清雄・近沢清隆・山嶋好泉、昭和50年建設省総プロ”建築構造物の破壊機構の解析”
- ・有馬孝禮・佐野弘他、木造住宅在来工法合理化促進開発業務報告書、住・木センター
- ・室田達郎・有馬孝禮・岡田恒・佐藤雅俊他、在来軸組工法木造住宅の地震挙動に関する実大静的繰返し水平加力試験、建築研究資料No.88
- ・川島謙一他、木造構造物の耐震性、建築技術No.347、97-110、1980
- ・有馬孝禮・丸山則義・篤海四郎他、住宅部材安全性能向上事業報告書、住・木センター、1987
- ・木造学校建物規格試作並びに実験報告、文部省管理局教育施設部
- ・木造学校建物規格試作並びに実験報告、日本学術振興第14小委員会報告1号、60-76、1934
- ・木造学校建物規格試作並びに実験報告、東大地震研究所彙報第45号第2冊、473-488
- ・木造建物の耐震性能実態調査、東京都防災会議、昭和45
- ・昭和50年建設省総プロ「小規模住宅の新施工法の開発」、1976
- ・川島謙一・斉藤元司、木造平家建住宅の水平加力試験（その1. 試験の概要ならびに試験結果の検討）、昭和53年度建大、1989-1990、1978
- ・川島謙一・斉藤元司、木造平家建住宅の水平加力試験（その2. 地震荷重に対する安全性の検討）、1991-1992、1978
- ・佐野弘・伊藤友一、間伐材を利用した試作住宅に関する実大実験、昭和53年度建大、1993-1994、1978
- ・有馬孝禮・佐藤雅俊・益田恵吾・佐野弘、在来軸組工法住宅の構造耐力に及ぼす内外装材の影響、昭和54年度建大、1787-1788、1979
- ・2' × 4' 工法による小屋裏部屋付二階建試作連続住宅－構造耐力試験報告書－、建研
- ・住宅公団・日本ツーバイフォー建築協会、1979
- ・平嶋義彦・畑山謙男・金谷紀行・神谷文夫、既存木造住宅の振動試験（速報）（横浜市営住宅の振動試験）、林業試験場木材部資料55-3、1980
- ・岡田恒、木造住宅の固有周期とせん断耐力の関係、昭和56年度建大、2263-2264、1981
- ・平嶋義彦・金谷紀行・畑山謙男・神谷文夫・有馬孝禮、木造住宅の振動実験、第31回木材学会大会研究発表要旨集、p123、1981
- ・川島謙一、木質系プレハブ構造ユニットの耐震性について、昭和58年度建大、2245-2246、1981

- ・平嶋義彦・金谷紀行・畑山謙男・神谷文夫、既存木造住宅の振動試験（中間報告）（元立川米軍基地庁舎の振動試験）、林業試験場木材利用部資料55-4、1981
- ・平嶋義彦・神谷文夫・畑山謙男・金谷紀行、木質パネル構造に関する研究（第2報）間伐材利用実大建物の加力試験、林試研報No315、39-65、1981
- ・平嶋義彦・畑山謙男、既存枠組壁工法住宅の振動実験、昭和57年建大、2093-2094、1982
- ・岡田恒・斉藤元司・山口修由・宮村雅史、壁配置の不均衡な在来木造建物の水平せん断力と変形の関係、昭和58年度建大、2239-2240、1983
- ・平嶋義彦・金谷紀行・畑山謙男・神谷文夫・佐藤雅俊、木造住宅の振動実験（Ⅱ）－耐久性の見地からの検討、第33回木材学会大会発表要旨集、p98、1983
- ・平嶋義彦・金谷紀行・神谷文夫、枠組壁工法住宅の振動実験とその解析、昭和58年度日本建築学会関東支部研究報告集、57-60、1983
- ・坂本功・河合直人・山下伸夫・大橋好光・安達文男、伝統的木造住宅の水平加力ならびに振動実験（その1）建物概要と実験の目的方法、昭和60年建大、1227-1228、1985
- ・河合直人・山下伸夫・坂本功・大橋好光、伝統的木造住宅の水平加力ならびに振動実験（その2）水平加力試験、昭和60年建大、1229-1230、1985
- ・山下伸夫・河合直人・坂本功、伝統的木造住宅の水平加力ならびに振動実験（その3）強制振動実験、昭和60年建大、1231-1232、1985
- ・安田雄三・鈴木有、ある在来構法木造建物の建設過程における振動特性の変化、昭和60年度建大、1233-1234、1985
- ・有馬孝禮・丸山則義、振動特性と耐力壁の配置と耐力要素との関係、昭和60年度建大、1235-1236、1985
- ・大橋好光・坂本功、木造住宅の地震応答解析（その2）荷重－変形曲線をトレースする復元力モデルによる解析、昭和60年度建大、1237-1238、1985
- ・山口修由・坂本功、床の内面せん断剛性を考慮した建築物のねじれ振動について－静的な解析、昭和60年度建大、1239-1240、1985
- ・鈴木有・安田雄三、長野県玉滝村における在来構法木造住宅の耐震性能に関する調査－（その2）耐震性能の検討－、昭和61年度建大、1181-1182、1986
- ・大橋好光・坂本功、木造住宅の地震応答解析 その3－いくつかの地震波を入力して－昭和61年度建大、1185-1186、1986
- ・坂本功、木造住宅の非線形性と等価的な固有周期、昭和61年度建大、1187-1188、1986
- ・平嶋義彦・金谷紀行、木造軸組構造の地震応答波形の観測とその解析、昭和62年度建大、1387-1388、1987
- ・坂本功・杉山英男・野口弘行・平嶋義彦・石坂明・平田俊次、木質パネル構造3階建の実大水平加力実験（3の2）、昭和62年度建大、1339-1340、1987
- ・有馬孝禮・岡部実・丸山則義、柱・梁からなる基本軸組に耐力壁パネルを組込んだ構造耐力に関する研究（第2報）振動特性に及ぼす耐力壁とその配置の影響、木材学会誌34(10)、813-819、1988
- ・河合直人・中村寛、民家の強制振動実験、昭和63年度建大、13-14、1988
- ・神谷文夫、合板釘打ち耐力壁の仮動的応答実験とその履歴モデル、昭和63年度建大、27

-28、1988

- ・鈴木秀三・平尾英生・前川英幸、木質耐力壁の仮動的応答実験の試み、昭和63年度建大、29-30、1988
- ・総3階建2×4住宅実大構造実験 共同研究報告書、建研・日本ツーバイフォー建築協会、1988
- ・五十田博・坂本功・大橋好光・安藤文男、枠組壁工法住宅の免震構法に関する実験、昭和64年度建大、29-30、1989
- ・後藤正美・浦憲親・鈴木有、実在木造住宅の水平加力及び自由振動実験、昭和64年度建大、31-32、1989
- ・中村昇・有馬孝禮・市川淳一郎、八角形平面をもつ建物の振動実験、昭和64年度建大、33-34、1989
- ・前川秀幸・河合直人、民家の振動特性に関する研究 その1 根太天井の振動特性に及ぼす影響、昭和64年度建大、35-36、1989
- ・河合直人・前川秀幸、民家の振動特性に関する研究 その2 平面型振動モデルの適用、昭和64年度建大、37-38、1989
- ・有馬孝禮・中村昇・丸山則義・岡部実、木質構造における力の伝達と振動性状に及ぼす水平構面と耐力壁偏在の影響、平成元年度建大、39-40、1989
- ・有馬孝禮、木質構造住宅の実大振動試験による耐力評価と力の伝達機構に関する研究、1989
- ・中島史郎・有馬孝禮・中村昇、木質構造の振動機構に関する研究 (1)仕口の部分を考慮した軸組工法壁体の振動解析、平成2年度建大、179-180、1990
- ・前川秀幸・河合直人、貫構造の振動特性に関する研究、平成2年度建大、181-182、1990
- ・宮沢健二、枠組壁構法の構造特性に関する研究、平成2年度建大、189-190、1990
- ・宮内一生・比後寿・加村隆志、在来工法木造住宅の増改築における耐震性に関する調査研究、平成2年度建大、199-200、1990
- ・松岡輝記・笹川明・田守伸一郎・宇野智、多雪地域における在来構法木造住宅の振動特性に関する調査研究、平成2年度建大、201-202、1990
- ・後藤正美・鈴木有、実在木造住宅の水平加力及び自由振動実験 - (その3) 大変形領域における動的剛性の検討 -、平成2年度建大、203-204、1990
- ・坂本功・大橋好光、枠組壁工法住宅の免震工法に関する地震観測、平成2年度建大、205-206、1990
- ・前川秀幸・河合直人、貫構造の振動特性に関する研究 その2 貫壁と筋かい壁の強制振動実験、平成3年度建大、83-84、1991
- ・中島史郎・有馬孝禮・中村昇、木質構造の振動機構に関する研究 (2)半剛節ラーメンモデルによる軸組工法壁の振動解析、平成3年度建大、85-86、1991
- ・中村昇・中島史郎、模型における水平構面の剛性が躯体の振動性状に及ぼす影響、平成3年度建大、87-88、1991
- ・後藤正美・鈴木有、実在木造住宅の水平加力及び自由振動実験 - (その4) 水平耐力の比較による安全性とねばり強さ -、平成3年度建大、89-90、1991

- ・河合直人、古代木造建築の柱傾斜復元力に関する模型実験、平成3年度建大、91-92、1991
- ・宮沢健二、桝組壁構法の構造特性に関する研究、平成3年度建大、93-94、1991
- ・中島史郎、木質構造の振動機構に関する研究(3)木造躯体の振動性状に及ぼす水平構面の寄与並びにその解析、平成4年度建大、121-122、1992
- ・富田裕之・宮沢健二、桝組壁構法の構造特性に関する研究(その6、履歴特性について)、平成4年度建大、125-126、1992
- ・宮沢健二、桝組壁構法の構造特性に関する研究(その7、2階建て部分構造の仮動的応答実験について)、平成4年度建大、127-128、1992
- ・水野弘輝・加村隆史・比後寿、東京近郊における木造住宅の耐震性に関する調査研究、平成4年度建大、129-130、1992
- ・山本浩之・林勝朗・西川忠、木造住宅の振動特性に関する研究(常時微動測定による固有周期)、平成4年度建大、131-132、1992
- ・河合直人・前川秀幸、民家の振動特性に関する研究 その3. 土壁施工後の強制振動実験と常時微動測定、平成4年度建大、133-134、1992
- ・後藤正美・鈴木有、在来構法の木造骨組模型を用いた静的及び動的力学特性の実験的検討-(その2)加振波の特性と応答波の卓越振動数の関係-、平成4年度建大、135-136、1992
- ・高橋芳毅・宮沢健二、桝組壁構法の構造特性に関する研究(その9. 釘間幅と枳材断面積の影響とブレース置換応力解析法の検討)、平成6年度建大、75-76、1994
- ・富田裕之・宮沢健二、桝組壁構法の構造特性に関する研究(その10. 履歴特性と仮動的応答実験、平成6年度建大、77-78、1994
- ・前川秀幸、木造住宅の振動特性に関する研究 その1. 実波形振動制御装置を用いたモデル加振実験、109-110、1994
- ・井上康子・前川秀幸・河合直人・谷卓郎、民家の振動特性に関する研究 その6. 一列型古民家の常時微動実験、平成6年度建大、111-112、1994
- ・滋賀県内に建つ木造在来構法による住宅の耐震診断、平成6年度建大、117-118、1994
- ・井上尚子・杉山英男、江戸時代民家における土間部分の鉛直荷重伝達機構(第1報 西日本の民家について)、平成6年度建大、121-122、1994
- ・福田仁美・杉山英男、江戸時代民家における壁配置の見掛け偏心率、平成6年度建大、115-116、1994
- ・鈴木祥之・東樋口護・中治弘行・標智仁・北山宏貴、芦屋市における木造建物の常時微動計測による振動特性、平成7年度建大、9-10、1995
- ・尾内俊夫・太田外気晴・竹原崇夫、兵庫県南部地震における住宅被害と壁配置および常時微動特性、平成7年度建大、11-12、1995
- ・神谷文夫・杉本健一、合板、石膏ボード張り耐力壁の仮動的応答実験による耐力評価、平成7年度建大、29-30、1995
- ・鈴木秀三・藤野栄一・河合誠、実大木質系建物の実験モード解析の結果について、平成7年度建大、51-52、1995
- ・井上康子・前川秀幸・河合直人・谷卓郎、民家の振動特性に関する研究 その7. くと・

漏斗造の古民家の常時微動実験、平成7年度建大、53-54、1995

・河合直人・内田昭人・前川秀幸、伝統的木造建築物の振動特性 その1. 平城宮跡復元建築物の常時微動測定、7年度建大、55-56、1995

・五十田博・笹川明・磯崎浩・大橋好光・稲山正弘、木質ラーメン構造の常時微動測定、平成7年度建大、139-140、1995