

古材のフラクトグラフィー

誌名	名古屋大学森林科学研究
ISSN	13442457
著者名	安藤,幸世 田北,梓 平嶋,義彦 佐々木,康寿
発行元	名古屋大学農学部附属演習林
巻/号	26号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1-7
発行年月	2007年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



古材のフラクトグラフィー

安藤幸世・田北 梓・平嶋義彦・佐々木康寿

構造用材料としての木材のリユース（再利用）が促進されないことの一因に、古材（建築解体木材）の強度的特性に不明な点が多く材料としての信頼性が得られていないことが挙げられる。本研究では、新材とは異なるであろう古材における変形・破壊メカニズムを推定することを目的として、仏教寺院で梁材として255年間使用されてきたケヤキと伐採後3年以内のケヤキの破壊様式の違いを目視によるフラクトグラフィー（破面解析）の結果を基に検討した。得られた主な知見は以下の通りである。

目視による破壊面の定量的な評価法として、“延性破壊度”を提案し、力学的パラメータとの相関を考察した。(1)引張では、新材において強度、ヤング率との間に正の相関が認められたが古材では認められなかった。このことの原因として、古材の場合、発現する強度とは殆ど関連性のない元々存在していた微小クラックの連結と成長が破壊形態に影響を及ぼしたことが挙げられた。

(2)衝撃曲げでは、新材、古材ともに衝撃曲げ吸収エネルギーとの間に正の相関が認められた。年輪幅との相関が古材では認められなかったことの原因として、古材化による孔圏外部の力学的機能の低下が指摘された。

キーワード：古材、リユース、破面解析、延性破壊、脆性破壊

1. 緒言

木材がエコマテリアルと言われて久しい。木材利用の場において再利用（リユース）や再生利用（リサイクル）の促進を図り資源の循環系を構築することは、循環型社会実現のために意義のあることである。しかし、潜在的にはエコマテリアルとなりうる特性を持っているにも関わらず、現在の日本で木材の有効利用がなされているとは言い難い。

我々が注目している有効利用とは、リユース、すなわち、古材（建築解体木材）そのままの形あるいは必要最小限の加工を施した利用である。最も効率よく資源を循環させて利用できるだけでなく、加工の際の環境負荷も極僅かである。しかしながら、古材のリユース例は現在のところ少ない。それも装飾用など非構造材としての利用が多い。その理由として、流通や法基準といった社会制度におよぶ問題と並んで、変形・破壊特性を含めた古材の強度特性に不明な点が多いことを第1に挙げることができる。我が国は永い伝統を誇る木造建築物を有し木の文化を享受しているが、それらの修理にあたって、従前の部材をリユースできるかどうかの判定が強度性能評価技術が不十分なためできずに、新しい材料に置き換えられている事例が多い。このように、伝統建築物を伝えていく上でその真正性を長く保持せねばならない場面においても、古材リユースに関する問題を抱えているのが現状である。

小原（小原 1955, 1958）は、ヒノキおよびケヤキ古材（経過年数 240～1300 年）の強度を新材と比較し、負荷方法や樹種の違いにより、年代の経過に伴う強度の増減の仕方が違うことなどを明らかにしている。平嶋らは、これまでの研究では考慮

されなかった新材と古材の密度分布の差を補正する手法（Monte Carlo simulation）を使い、新材と古材の強度特性を比較検討した。その結果、引張強さは古材の方が小さいが、アカマツ古材の圧縮強さは新材と比べて逆に大きい等の知見を得た（平嶋ら 2004a, 2004b, 2005）。また、例えば古材におけるケヤキの引張強さ減少率は 16.4%であったので、実用上問題がないと思われる。

我々が古材を構造材として利用する際、必ずしも静的な力学環境のみに限定されるとは限らない。クリープ環境下、あるいは、繰返し負荷による疲労環境下に置かれることも考えられる。温湿度の変化も想定する必要がある。それら様々な負荷条件によって強度特性がどのように変わっていくか考慮しなければならない。そのためには古材の変形時における内部の構造変化を知り、新材とは異なるであろう変形破壊特性を把握することが必要不可欠である。平嶋らは、古材においては引張試験後の試験体に現れる長手方向（繊維方向）亀裂長さが減少する傾向が認められたことから、新材との破壊機構の違いを示唆している（平嶋ら 2004a）。

本報では、引張および曲げ試験後の破壊面の破面解析（フラクトグラフィー）を行い、古材に特異的と考えられる破壊特性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

本研究で用いた古材は長野県上田市の仏教寺院（長昌寺）本堂の解体の際入手したものである。樹種はケヤキ（*Zelkova ser-*

表 1. 供試材の物理的・力学的性質

試験体	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	引張強さ (MPa)	引張ヤング率 (GPa)	曲げ強さ (MPa)	曲げヤング率 (GPa)	AEI (kJ/m ²)
新材	614 (40)	12.5 (0.2)	103.4 (32.9)	11.76 (2.29)	114.0 (12.0)	10.9 (1.3)	60.8 (18.6)
古材	614 (27)	12.4 (0.3)	86.3 (17.2)	9.33 (1.19)	93.7 (8.6)	9.0 (0.7)	49.1 (18.5)

AEI, 衝撃曲げ吸収エネルギー; () 内の数字は標準偏差を表す

rata MAKINO)。255 年間、内陣と外陣の境界（結界）に使われていた梁材（300 × 220 × 3000 mm）から供した。比較対照のために用いた新材は同じ長野県産ケヤキで、伐採後 3 年以内のものである。

2.2 試験方法

無欠点小試験体による引張、静的曲げ、および衝撃曲げ試験を JIS Z 2101 (1994) に準拠して行った。試験体の寸法、材料試験方法は既報（平嶋ら 2004a, 2005）の通りであるが、静的曲げおよび衝撃曲げは共に柁目面荷重である。試験体の密度、含水率、および各種力学パラメータ値を表 1 に示す。

材料試験後の破断した試験体の破壊状況を観察し、目視によるフラクトグラフィーを行った。

2.3 破壊形態の分類

目視による破壊形態の分類は以下に従った。

(1) 引張破壊形態

図 1 に模式図（平井 1947, 1953）を示す。観察面は柁目面である。A: 破壊面が平滑でもろい型, B: 破壊面が鋸歯状を呈する型, C: 上記 B に縦裂線を伴う型, D: 鋸歯状破壊線と縦裂線にしたがって階段状を呈する型, E: 破壊面はやや平滑に近いが縦裂線を伴う型, F: 上記 A に縦裂線を伴い階段状を呈する型。

(2) 静的曲げ破壊形態

図 2 に模式図（Wangaard 1949）を示す。観察面は板目面である。A: 単純引張り破壊, B: 目切れ引張り破壊, C: そぎ割れ引張り破壊, D: 脆性引張り破壊, E: 圧縮破壊, F: せん断破壊。

(3) 衝撃曲げ破壊形態

図 3 に模式図（平井 1953）を示す。観察面は板目面である。A: チョーク状に平滑に折れる破壊型, B: 上記 A に縦裂線の入る破壊型, C: 目切れ材やらせん木理の材に見られる斜裂する破壊型, D: 破壊面が鋸歯状で縦裂線の入る破壊型, E: 破壊面が“ささら”状で縦裂線を混ざる破壊型, F: 破壊面が鋸歯状の破壊型。

3. 結果と考察

3.1 引張破壊の分類

図 4 には観察された引張破壊型の例を示す。図 5 には新材、古材それぞれにおいて分類された各破壊形態の比率を示す。古材では新材と比べて A の破壊型が多く、C や E の割合は小さく

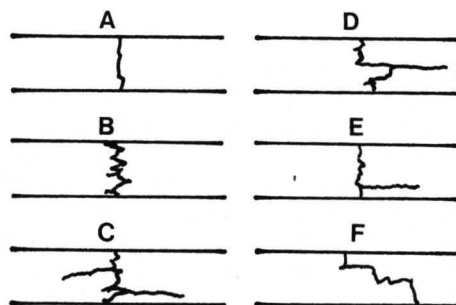


図 1. 縦引張り破壊型の分類（平井 1947, 1953）

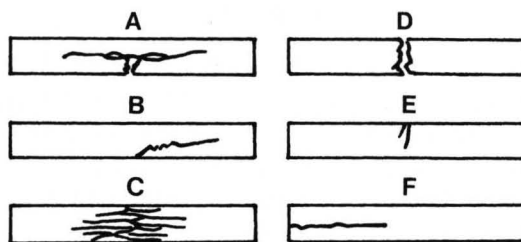


図 2. 静的曲げ破壊型の分類（Wangaard 1949）

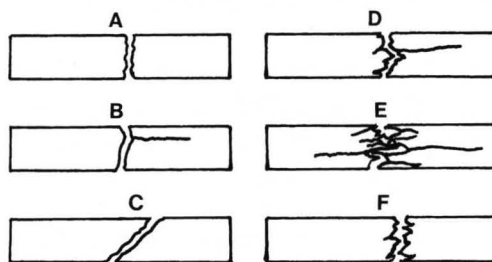


図 3. 衝撃曲げ破壊型の分類（平井 1953）

なっている。すなわち、古材の方がより脆性的破壊を示したと言える。一般に C および E の破壊型を示す試験体は A や B を示すものよりも強いと言われている（越島ら 1983）が、このことは、同じ密度で比較して古材は新材よりも強度が低かった前報の結果（平嶋ら 2004a）と整合性がある。

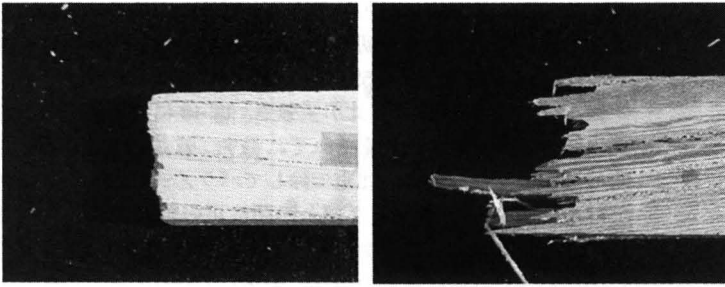


図4. 引張破壊形態の例

左：A（破壊面が平滑で脆い型）；右：B（破壊面が鋸歯状を呈する型）。

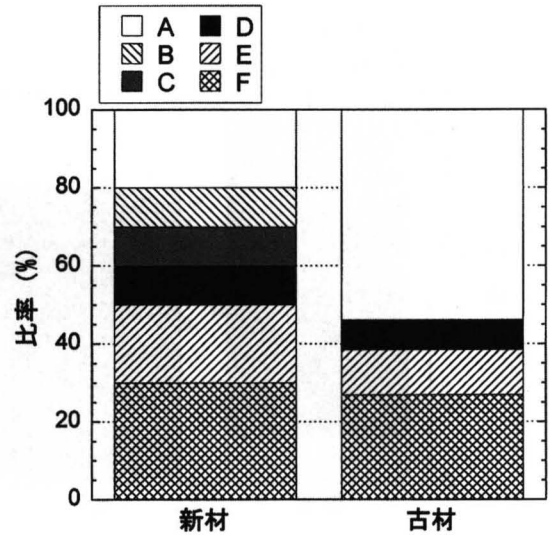


図5. 引張による各破壊形態の比率

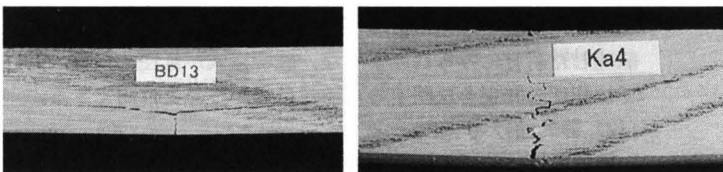


図6. 静的曲げ破壊形態の例

左：A（単純引張り破壊）；右：C（そぎ割れ引張り破壊）。

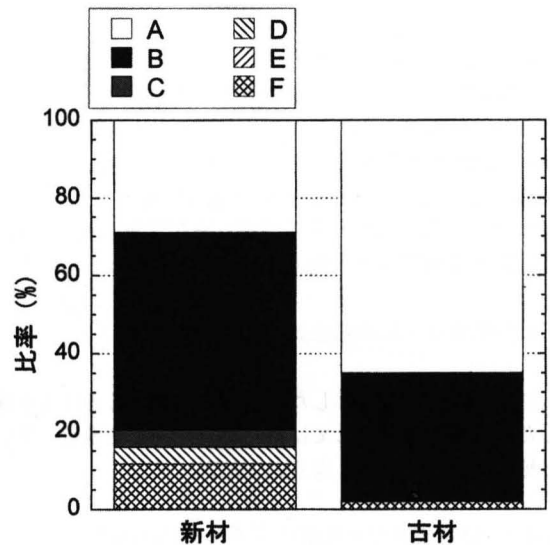


図7. 静的曲げによる各破壊形態の比率



図8. 衝撃曲げ破壊形態の例

左：D（鋸歯状で縦裂線を伴う型）；右：E（ささら状で縦裂線を混ざる型）。

3.2 静的曲げ破壊の分類

図6には観察された静的曲げ破壊型の例を示す。F(せん断破壊)は木口面の観察により確認できた。図7には新材, 古材それぞれにおいて分類された各破壊形態の比率を示す。両者ともB(目切れ引張り破壊)の割合が比較的大きいが, これは試験体の木取りに因るものと考えられる。古材の方がAの割合が大きいことと, 古材ではほとんど観察されなかったDやFの破壊型が新材では観察されたことが特徴である。

3.3 衝撃曲げ破壊の分類

図8には観察された衝撃曲げ破壊型の例を示す。図9には新材, 古材それぞれにおいて分類された各破壊形態の比率を示す。

す。AやBの破壊型は観察されなかった。大部分を占めるDとEの破壊型は新材と古材でほぼ等しい比率となっている。新材と古材の違いという観点でみると, 新材ではFの鋸歯状の破壊型が, 古材ではCの斜裂する破壊型がそれぞれ多くなっている。

3.4 定量的なフラクトグラフィー

フラクトグラフィーの結果を定量的に評価することができれば, 例えば力学的パラメータとの関連を定量的に論ずることができ便利である。本節では, 試験体表面に現れる亀裂線長さが材料の延性的な破壊しやすさを反映しているとする考えに基づき, 後に述べる“延性破壊度”を定義し, 延性破壊度と木材の

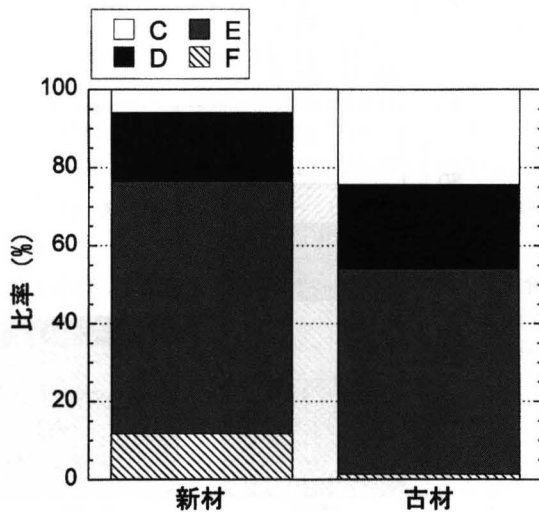


図9. 衝撃曲げによる各破壊形態の比率

強度あるいはヤング率との関係を調べることにする。

3.4.1 延性破壊度の算出法

引張試験体においては柁目面を、静的曲げと衝撃曲げ試験体においては板目面を、それぞれデジタルカメラで撮影した。得られた画像を画像解析ソフト (Sigma Scan Pro 5) で解析し、亀裂線全長を測定した。解析前の画像と解析後の画像の例を図10に示す。右写真に現れる黒線は亀裂線をなぞった線である。延性破壊度は次式(1)で定義した。

$$\text{延性破壊度} = \text{亀裂線全長} / \text{観察面の幅} \quad (1)$$

(1)式は観察(測定)した面の幅で除することにより無次元化した。破壊の状態としては割れが長く、その本数も多いものほど延性破壊度は大きくなる。

3.4.2 延性破壊度と力学パラメータとの関係

(1) 引張

引張において延性破壊度の平均値は、新材で4.51、古材で3.88であった。すなわち、古材の方がより脆弱であったと言え

る。このことは、木材は古材化すると材そのものの性質が脆性化し、年代経過とともに靱性が減少し、脆く割れやすくなるという小原の見解 (小原 1952) と一致する。

図11には延性破壊度と比引張強さ、図12には延性破壊度と比引張ヤング率との関係をそれぞれ示す。強さやヤング率は比重の影響を受けるので、比重で除してパラメータとした。新材では引張強さや引張ヤング率との間に正の相関が認められたが、古材では認められなかった。新材と古材における強度との相関性の違いは破壊様式の相違に影響していると考えられる。一般に材料の延性(粘り)が高い場合、最終破断に至るまでに亀裂の生成および成長等によって弾性エネルギー解放が促進され、高い強度を発現することになる。新材はこのメカニズムを主因として破壊に至ったと考えられる。一方、建築物の構造材料としての役目を長年担ってきた古材では、強度に影響を与えないレベルの内部微小クラックが多数存在していることが推測され (Ando *et al.* 2006)、また、その分布の仕方や数も試験体によって様々であったと考えられる。従って、この微小クラック同士の接続の連鎖が破壊形態の現れ方に大きく影響を与え、前述した新材にみられたような、破壊様式が延性的性質、引いては強度の発現を反映する可能性は低かったと推測できる。

(2) 静的曲げ

静的曲げにおいて延性破壊度の平均値は、新材で2.24、古材で2.46であった。差は僅かであるが引張とは逆の結果となった。

図13には延性破壊度と比曲げ強さ、図14には延性破壊度と比曲げヤング率との関係をそれぞれ示す。曲げ強さとの間には関係が認められなかったが、静的曲げの場合、最大荷重に達した後でも亀裂は進行するので、必ずしも最大荷重時の形態を観察(計測)したものではないことから説明がつく。一方、ヤング率の間には新材、古材ともに負の相関があった。静的曲げでは一旦荷重方向(繊維直角方向)に進展した亀裂が即座に荷重直角方向(繊維方向)に向きを変えたまま破壊に至るケースが多い。この際、繊維方向亀裂線の長い(延性破壊度が大きい)材ほど変形しやすい(ヤング率が小さい)ので、負の相関が得られたと考えられる。延性破壊度との関連において新材と古材との間に差はみられなかった。

(3) 衝撃曲げ

衝撃曲げにおいて延性破壊度の平均値は、新材で7.54、古材

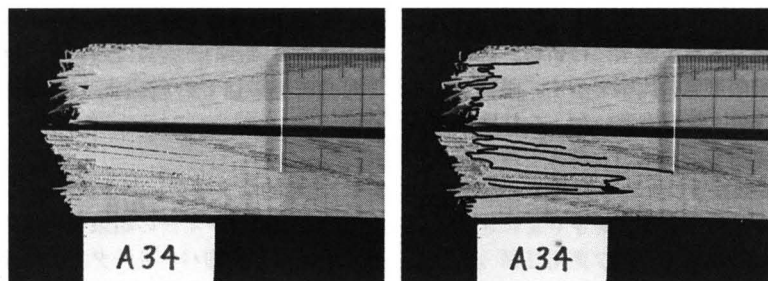


図10. 亀裂全長の測定用の画像

左: 解析前; 右: 解析後.

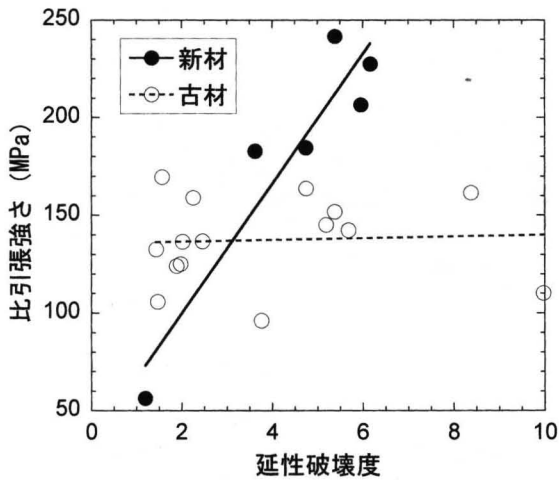


図 11. 延性破壊度と比引張強さとの関係

新材: $y = 33.2x + 33.5$, $r = 0.935^{**}$; 古材: $y = 0.424x + 136$, $r = 0.051$; **: 1%で有意.

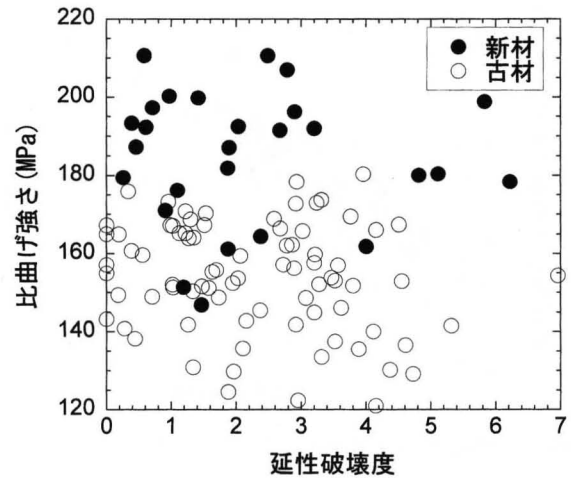


図 13. 延性破壊度と比曲げ強さとの関係

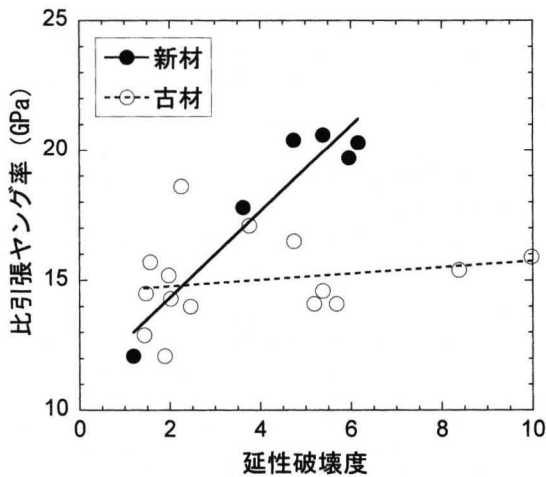


図 12. 延性破壊度と比引張ヤング率との関係

新材: $y = 1.65x + 11.0$, $r = 0.938^{**}$; 古材: $y = 0.121x + 14.5$, $r = 0.197$.

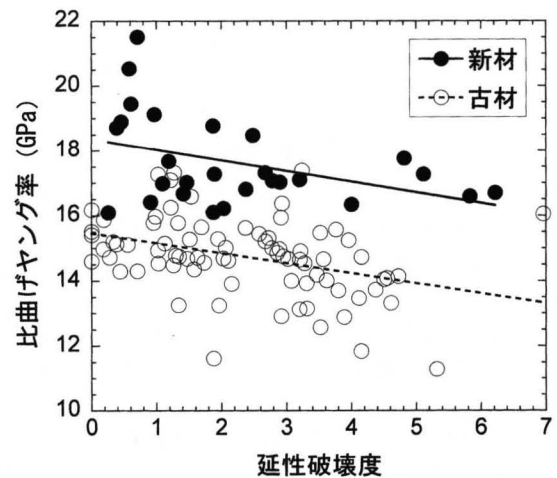


図 14. 延性破壊度と比曲げヤング率との関係

新材: $y = -0.033x + 1.84$, $r = -0.403^{*}$; 古材: $y = -0.031x + 1.55$, $r = -0.379^{**}$; *: 5%で有意, **: 1%で有意.

で6.49であった。引張と同様に古材の方が脆弱であった。

図 15 には延性破壊度と比衝撃曲げ吸収エネルギーとの関係を示す。新材、古材ともに衝撃曲げ吸収エネルギーとの間に正の相関が認められた。延性破壊度が衝撃曲げ吸収エネルギーに依存することは、新材、古材ともに同様であった。

延性破壊度の発現に新材と古材で違いが認められたのは図 16 に示す年輪幅との関係においてである。新材では年輪幅との間に正の相関がみられるが、古材には相関がみられない。ケヤキのような環孔材は直径の大きい道管が年輪界に沿って配列する孔圏部と小径の道管が散在する孔圏外部とが同心円状に積

層した年輪構造を有している。新材の場合、年輪幅が狭い（＝孔圏部の幅は変わらず孔圏外部の幅が狭い）ほど孔圏部と孔圏外部との界面に沿った亀裂進展を示すことが予想できるので延性破壊度は小さくなり、結果として延性破壊度との間に正の相関が認められたと考えられる。一方、古材の場合は何故に年輪幅との間に相関が認められないのであろうか？ 我々は、年輪界に存在すべき孔圏部と孔圏外部との性質の差が古材化することにより減少することが原因ではないかと推測する。孔圏外部が木材に強さを付与している一方で、孔圏部は変形しやすい（エネルギー吸収能）の役割を果たしているが、新材において

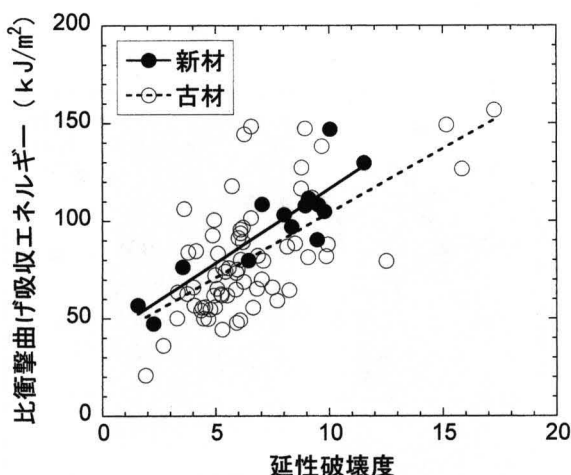


図 15. 延性破壊度と比衝撃曲げ吸収エネルギーとの関係

$$\text{新材: } y = 7.59x + 40.5, \quad r = 0.877^{**}; \quad \text{古材: } y = 6.59x + 38.2, \quad r = 0.636^{**}.$$

孔圏外部が担ってきた力学的役割は古材化すると徐々に果たせなくなる（脆弱化？）のではないかということである。孔圏部および孔圏外部の機能の発現の仕方はケヤキ古材の変形・破壊特性に最も影響を与える因子の一つと考えられるので、今後詳細な検討が必要である。

4. 結 論

仏教寺院の本堂で梁材として 255 年間使用されてきたケヤキと伐採後 3 年以内のケヤキの破壊様式の違いを目視によるフラクトグラフィー（破面解析）から推測した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 目視による破壊形態の分類において、引張では、新材より古材の方が脆性的破壊型が多かった。静的曲げでは新材と古材で明瞭な違いはなかった。衝撃曲げでは新材、古材ともに最脆弱型の破壊形態（繊維直角方向に平滑に折れる型）は観察されなかったが、古材の方が斜裂する破壊型が多くなる傾向があった。

(2) 目視による破壊面の定量的な評価法として、“延性破壊度”を提案し、力学的パラメータとの相関を検討した。引張では、新材において強度、ヤング率との間に正の相関が認められたが古材では認められなかったことの原因として、古材の場合、発現する強度とは殆ど関連性のない元々存在していたと推測される微小クラックの連結と成長が破壊形態に影響を及ぼしたことが挙げられた。静的曲げでは、延性破壊度との関係において新材と古材とで差がみられなかった。衝撃曲げでは、新材、古材ともに衝撃曲げ吸収エネルギーとの間に正の相関が認められた。また年輪幅との相関が古材では認められなかったことの原因として、古材化による孔圏外部の力学的機能の低下が指摘された。

以上のように、古材は新材とは異なる破壊メカニズムを持つことが予想された。

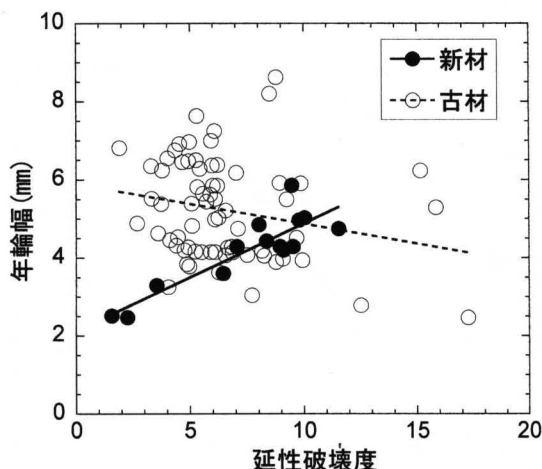


図 16. 衝撃曲げにおける延性破壊度と年輪幅との関係

$$\text{新材: } y = 0.275x + 2.13, \quad r = 0.882^{**}; \quad \text{古材: } y = -0.102x + 5.89, \quad r = -0.222.$$

引用文献

- Ando K., Hirashima Y., Sugihara M., Hirao S. and Sasaki Y. (2006) Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique. *Journal of Wood Science* 52: 483-489.
- 平井信二 (1947) 秩父演習林産アサダの材質研究. 東京大学演習林報告 35: 67-90.
- 平井信二 (1953) 富士演習林植栽カラマツの材質. 東京大学演習林報告 44: 139-151.
- 平嶋義彦・杉原未奈・佐々木康寿・安藤幸世・山崎真理子 (2004a) 古材の強度特性 (第 1 報) ケヤキおよびアカマツの引張強度特性. 木材学会誌 50: 301-309.
- 平嶋義彦・杉原未奈・佐々木康寿・安藤幸世・山崎真理子 (2004b) 古材の強度特性 (第 2 報) ケヤキおよびアカマツの圧縮強度特性, セン断強さおよび硬さ. 木材学会誌 50: 368-375.
- 平嶋義彦・杉原未奈・佐々木康寿・安藤幸世・山崎真理子 (2005) 古材の強度特性 (第 3 報) ケヤキおよびアカマツの静的曲げ強度特性および衝撃曲げ強さ. 木材学会誌 51: 146-152.
- 小原二郎 (1952) 木材の老化に関する研究 (第 1 報) 法隆寺建築古材の機械的性質. 西京大学学術報告 農学 2: 116-131.
- 小原二郎 (1955) 木材の老化に関する研究 (第 15 報) ケヤキ材の組成成分の変化. 木材学会誌 1: 21-24.
- 小原二郎 (1958) 古材に関する研究. 千葉大学工学部研究報告 9: 1-65.
- 越島哲夫・杉原彦一・浜田良三・福山萬治郎・布施五郎 (1983) 木材の強さ. 改訂基礎木材工学. pp. 124-144. 文教出版, 大阪.
- Wangaard FF. (1949) Failures in beams. In: *The mechanical properties of wood*. pp. 48-52. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Fractography of old wood

Kosei ANDO, Azusa TAKITA, Yoshihiko HIRASHIMA, Yasutoshi SASAKI

In making a green sustainable society a reality, it is quite impor-

tant to establish the reuse system of wood. However, in spite of the fact that wood has the potential of being an eco-material, we cannot really say that wood is used effectively today. The main reason for this is that the strength characteristics of old wood remain unclear in many respects.

This study examined the fracture mechanism, which seems to be peculiar to old wood, by observing the fracture surfaces of the old and new woods. The species of wood used in this study was Japanese zelkova. The old wood had been used as a beam in a building for 255 years. The main results obtained were as follows:

1. We proposed the new index, that is, the degree of ductile fracture (*DDF*), which represented the ratio of the ductile fracture to the whole fracture surface.
2. In the case of tensile fracture, the positive correlation was observed between *DDF* and strength or Young's modulus in the new

wood. On the other hand, such a correlation was not observed in the old wood. We supposed that the extension and connection of micro cracks in the old wood, which were considered to be not related to the strength of material, mainly affected the fractographical features of fracture surface.

3. In the case of static bending fracture, there were not differences between the new wood and the old wood in relation to *DDF*.
4. In the case of impact bending fracture, the positive correlations were observed between *DDF* and absorbed energy in impact bending for both new and old woods. Non-relation between *DDF* and width of annual ring in the old wood was supposed to be due to the reduction of mechanical function of the outside zone of pore zone.

Keywords: old wood, reuse, fractography, ductile fracture, brittle fracture