スギの縦切削における巨視的な切屑型に現れる 微視的なき裂挙動^{*1}

腰塚実穂^{*2}, 大谷 忠^{*3}, 井上雅文^{*4}

Microscopic Cracking Behavior on Macroscopic Chip Type in Cutting Parallel to Grain of *Cryptomeria japonica*^{*1}

Miho KOSHIZUKA^{*2}, Tadashi OHTANI^{*3} and Masafumi INOUE^{*4}

The relationship between macroscopic chip type and microscopic crack behavior when cutting parallel to the grain in *Cryptomeria japonica* was investigated. The macroscopic chip type, when cut at a medium cutting angle with 50°, changed shape from flow type to split type as the depth of cut increased. The appearance of a “preceding crack” occurred in more than the fixed depth of cut. Cracks of the intercellular layer and the radial wall of the lumen on the microscopic level were observed in the early stage of macroscopic chip formation. Microscopic slant and vertical ruptures were also observed across several cells at the final stage of chip formation. From these results, it was concluded that the intercellular layer cracks in the microscopic crack behavior grew up mainly to the “preceding crack” when a split-type chip was cut at the medium-sized cutting angle.

Keywords: cutting, crack, fracture, chip, microscopic.

スギの縦切削における巨視的な切屑型と微視的なき裂挙動を検討した。スギを切削角が中位の加工条件（例えば、切削角が50°）において縦切削した時の巨視的な切屑型は、一定の切込み深さから、「先割れ」が現れ、切込み深さの増加に伴い、流れ型から折れ型に移行した。この時、微視的なき裂挙動を観察した結果、切屑が生成される段階では、刃先前方に位置する細胞間層や細胞内腔に面した放射壁にき裂が発生し、巨視的な曲げ破壊が生じる終期の段階では、複数の細胞にまたがって起こる破壊として、刃先の斜め前方に起こる傾斜破断と垂直方向に起こる垂直破断が現れた。これらの結果から、折れ型切屑が支配的な、切削角が中位の加工条件において、巨視的に観察できる「先割れ」の破壊現象は、主に微視的なき裂挙動における細胞間層のき裂が成長したものであることが考察された。

1. 緒 言

木材の表面仕上げのためにプレーナ加工を施す場合、木材の組織構造の特性が主因に挙げられる表面

性状の欠点として逆目ばれがあり、その要因には、逆目切削によって刃先前方に生じる顕著な先割れ破壊の影響が挙げられている¹⁾。

木材の破壊現象は、金属の破壊の力学²⁾に対比させて考えると、a) 木材の組織構造の破壊レベル(巨視的現象)、b) 細胞の分離や細胞壁のき裂レベル(微視的現象)、c) セルロース分子鎖等の共有結合の切断レベル、の3つに大別できる。さらに、より詳細に木材の破壊現象を分類した場合には、b)とc)の間に、細胞壁を構成する壁層およびラメラの破壊としてのマイクロフィブリルに起因するき裂レベルが存在することも報告されており³⁾、4つに分類することも考えられる。

木材の切削加工に関する既往の研究には、切削時

^{*1} Received October 20, 2010; accepted June 1, 2011.

^{*2} 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan

^{*3} 東京学芸大学自然科学系 Department of Natural Science, Tokyo Gakuji University, Tokyo 184-8501, Japan

^{*4} 東京大学アジア生物資源環境研究センター Asian Natural Environmental Science Center, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan

における破壊の巨視的現象に視点を当てた研究が報告されている⁴⁻¹¹⁾。それらの研究には、木材の二次元切削における切屑型を分類した研究^{4, 5)}を始めとして、その切屑型と切削力との関係について明らかにした研究⁶⁾や切削速度による切屑形成の影響について調べた研究⁷⁾、切屑形成を力学的に解析した研究⁸⁻¹⁰⁾等がある。特に、縦切削において現れる折れ型切屑に注目した研究では、その切屑形成において生じる「先割れ」破壊の発生機構について検討した内容等も報告されている¹¹⁾。さらに、細胞レベルで生じる破壊現象に視点を当て、横切削の切削面に現れる破壊現象の観察等を行った研究が報告されている^{12, 13)}。また、細胞壁やセルロース分子鎖レベルに生じる木材の破壊現象に視点を当てた研究には、単一仮道管の細胞壁に生じる破壊をフラクトグラフィー的に解析した研究¹⁴⁾等がある。

一方、近年のシミュレーション技術の発達によって、設計段階における加工条件の最適化が図られており¹⁵⁾、木材の表面仕上げにおいても、有限要素法を用いた応力分布の解析による最適加工条件の検討等が行われている¹⁶⁾。また、宮大工のかんな切削による木材の表面性状は、光沢や撥水性が優れていることが経験的にも知られているが、科学的に未知な部分は多い¹⁷⁾。以上のように、表面仕上げの最適化設計や伝統技術の現象解明を進める上で、破壊現象をより詳細に検討することが重要となるが、巨視的から微視的現象までを系統的に観察した研究例は見られない。

そこで、本研究では、まず木材のプレーナ加工において想定される縦切削を取り上げ、上記で分類した考え方を基にして、切削中の巨視的な破壊と切屑型を観察した。さらに、巨視的な切屑型に現れる微視的なき裂挙動について、個々の細胞の分離や細胞壁のき裂を観察し、両者の関係について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

供試材にはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) を用いた。平均密度は 0.35 g/cm^3 であり、含水率は11.0%、平均年輪幅は6.5 mmであった。供試材から4 mm(繊維方向)×4 mm(半径方向)×5 mm(接線方向)の切削試験片を作製し、まさ目面をあらかじめかみそりの刃を用いて、平滑にして観察面とした。なお、使用した切削試験片は、観察面に対して奥行き方向(接線方向に5 mmの長さ)に、90個程度の細胞が配列していた。

2.2 二次元切削実験装置

Fig. 1に本実験で用いた二次元切削実験装置の模式図を示す。本実験装置は、図中のX軸ステージ(中央精機製 ALS-604-E1P)上に試験片を固定し、ステージがX軸の矢印の方向に移動することによって、固定された工具が試験片上面を切削する方式とした。工具の切込み深さ d は、Z軸方向に動くステージ(中央精機製 LS-4041-S8-3)を用いて手で調整した。切削の様子は、試験片の側面から、デジタルカメラ顕微鏡(Union製 DZ2 レンズ(×1.5~15)、Nikon製 DS-2Mv)を用いて観察した。

2.3 切削実験と画像観察

切削実験は、木裏側の板目面を切削面とする試験片の早材部を縦切削し、巨視的現象として切屑型を、微視的現象として細胞や細胞間層に生じるき裂挙動をそれぞれ観察した。観察範囲はそれぞれ 0.997 mm (縦)× 1.332 mm (横)、 $380\sim690 \mu\text{m}$ (縦)× $510\sim920 \mu\text{m}$ (横)とした。加工条件をTable 1に示す。工具の研磨は、人造中砥石および人造仕上げ砥石によって、工具の先端曲率半径が約 $3 \mu\text{m}$ になるように仕上げた。

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup for orthogonal cutting.

Legend: $\rightleftarrows$, Moveable direction.

Table 1. Conditions in orthogonal cutting test.

Tool material	SKH3
Cutting angle ($^{\circ}$)	$\theta = 50$
Tool angle ($^{\circ}$)	$\beta = 40$
Clearance angle ($^{\circ}$)	$\alpha = 10$
Cutting speed (mm/s)	0.15
Depth of cut (μm)	$d = 50, 100, 200, 300$ and 400

切削実験では、繊維方向に沿って、4 mm の距離を縦切削した。この時、縦切削における巨視的な切屑形成は、切込み深さが400 μm において、切削時の先割れが最も大きな条件でも、切削初期から1 mm 以内に先割れが発生し、2 mm 以下の範囲において先割れの端部が進行した。その後、切削が進行し、試験片長さの半分を超えた後、繰り返し同様の先割れが発生し、その先割れが延長し、試験片の端部にまで至った。そこで、本実験における画像の観察は、切削初期から起こる先割れのみを対象とし、切屑型の観察は、工具の刃先が材料と接触する位置から切削を始め、切削距離 L が0.5 mm から2.0 mm の範囲で、0.5 mm 毎に撮影した画像を基に行った。

一方、き裂挙動の観察は、 L が0.1 mm から0.8 mm の範囲において、0.1 mm 毎に撮影した画像を基に行った。なお、本実験に用いたスギは、切削時に工具刃先が試験片に接触する部分、すなわち観察面から試験片の奥行き方向（接線方向）に配列している細胞はあまり整列していない。そこで、このような条件における画像の情報は、奥行き方向に細胞が連続的に連なった構造において、連なった細胞が互いに関与しながら破壊に至ったと仮定し、この時の奥行き方向に垂直な一任意の断面を観察したものと解釈した。ただし、接線方向に連続的に連なった細胞は、極力同一の形状や壁厚の細胞が連なった早材部において切削実験を行うため、本実験では早材から晩材へ移行する境界領域の細胞を除いた条件において切削した。また、上記の一任意の断面となる観察面において、き裂挙動を観察するため、Fig. 2 に示すように、所定の切込み深さに近い条件において、細胞間層に刃先が進行する条件（Fig. 2(a)）と細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先が進行する条件（Fig. 2(b)）に刃先位置をセットし、切削実験を行った。これらの切削実験は、各切込み深さの条件において、それぞれ10回行った。

Fig. 2. Experimental condition of cutting tool in tangential surface orthogonal cutting parallel to grain.

Note: (a) Cut in intercellular layer; (b) Cut in radial wall of lumen.

2.4 切削画像の解析方法

Fig. 3 に、切削画像を用いた微視的なき裂挙動の解析方法を示す。Fig. 3(a) はき裂が発生した時のき裂進展距離 (r) の解析方法であり、Fig. 3(b) はき裂進展角度 (ϕ) の解析方法である。個々の細胞に発生するき裂は、刃先の前方に発生したき裂が、同じ細胞を連続的に進行する距離を r_1 と、そのき裂の方向と切削方向のなす角度 ϕ_1 を測定した。さらに、刃先前方にき裂が発生した場合には、き裂の進展の方向が変わり新たな方向に進行した距離をそれぞれ r_2 および r_3 のように測定し、この時のき裂が進行した方向と切削方向のなす角度 ϕ_2 および ϕ_3 を求めた。 r と ϕ は、10回の切削試験における平均値で求めた。

3. 結果および考察

3.1 縦切削における巨視的な切屑型

異なる切込み深さ d において、縦切削した時の巨視的な切屑型を観察した。Fig. 4 は早材部分に $L = 0.5$ mm 毎工具を進行させた時に生成する切屑型の代表例を示す。 $d = 50$ μm では L が増加するにつれて、工具のすくい面に沿って、切屑が流れるように生成する流れ型の切屑が観察できる。一方、 $d = 200$ μm の条件では、 $L = 1.5$ mm において、小さく折れ曲がるように不連続な切屑が生成している。さらに、 $L = 2.0$ mm においては、刃先前方の切削方向にき裂が発生している。 $d = 400$ μm の条件では、 $L = 0.5$ mm から、刃先前方に大きなき裂が発生し、片持ち梁のような切屑が生成している。すなわち、 d が大きいほど、刃先前方に先割れの破壊が発生し、折れ曲がる間隔が大きな切屑が生成する傾向にある。

Fig. 3. Method for analysis of microscopic crack.

Note: (a) Crack propagation length; (b) Crack propagation angle.

The crack propagation length r_1 was measured in the first linear propagation continuously from the tool tip, and the angle ϕ_1 was between the cracked and cutting directions. The next crack lengths r_2 and r_3 were also measured in the propagation of the new and different direction, and ϕ_2 and ϕ_3 were as referred to in ϕ_1 , respectively.

Fig. 4. Relationship between cutting condition and macroscopic chip type in tangential surface orthogonal cutting parallel to grain.

木材の縦切削における切屑型は, Franz⁴⁾ や Walker ら⁵⁾ による切屑型の分類を起源として, 木材の切屑型の分類を基に考えることができる。これらの切屑型の分類によれば, 上記の折れ曲がるような切屑は, Franz⁴⁾ によって Type I の切屑型に分類され, Walker ら⁵⁾ によって Rivin Type として分類されている。さらに, 木材の縦切削における切屑の生成形態には, 折れ曲がるような切屑を折れ型とし, その他にも流れ型や縮み型の切屑に分類でき, 折れ型切屑は切削角および切込み深さともに, 中位の加工条件 (例えば切削角が 50° および $d=200\ \mu\text{m}$) において現れることが知られている¹⁾。ところが, 青山の報告¹⁸⁾ によれば, 中位の加工条件に相当する切削角でスギを切削した時, d が小さい場合には, 流れ型や折れ型, 縮み型の切屑が生成する領域が隣接していると考えられる。本実験における切込み深さの条件においても折れ型から流れ型切屑に移行する切屑生成の特徴を持つことが観察される。そこで次に, 流れ型切屑との境界領域を含む, 折れ型切屑が巨視的に観察される加工条件において, 微視的なき裂挙動を観察した。

3.2 縦切削における微視的なき裂の観察

Fig. 5 に異なる加工条件において縦切削した時の微視的なき裂の観察画像を示す。細胞間層に刃先を進行させた場合, Fig. 5(a) に示すように, 刃先前方の細胞間層に沿ってき裂が生じている。 d が大きくなるにつれて, Fig. 5(b) に示すように, より大きな

Fig. 5. Fracture appearance in tangential surface orthogonal cutting parallel to grain.

Note: (a) Crack in intercellular layer ($d=200\ \mu\text{m}$, Cut in intercellular layer), (b) Crack in intercellular layer ($d=400\ \mu\text{m}$, Cut in intercellular layer), (c) Crack in radial wall of lumen ($d=200\ \mu\text{m}$, Cut in radial wall of lumen), (d) Crack in intercellular layer ($d=200\ \mu\text{m}$, Cut in radial wall of lumen), (e) Slant rupture ($d=400\ \mu\text{m}$, Cut in intercellular layer), (f) Vertical rupture ($d=400\ \mu\text{m}$, Cut in intercellular layer), (g) Crack in intercellular layer across the ray ($d=200\ \mu\text{m}$, Cut in intercellular layer) and (h) Vertical rupture in front of the ray ($d=400\ \mu\text{m}$, Cut in radial wall of lumen).

----: Extension line of tool tip position.

き裂が発生している。すなわち, 細胞間層に刃先を進行させた場合には, 破壊力学におけるモード I の開口型のき裂が細胞間層に観察できる。一方, 細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先を進行させた場合には, d の大小に因らず, 最初, 細胞内腔に面した放射壁に傾斜したき裂が発生し (Fig. 5(c)), その後, き裂は方向を変えて細胞間層に進展している (Fig. 5(d))。すなわち, 細胞内腔に面した放射壁に現れるき裂から, 細胞間層のき裂へと移行している。

刃先前方の細胞に大きなき裂が生じた後の挙動に関して, Fig. 5(e) および (f) に示すように, $d=200$

−400 μm の条件において、細胞の上部に向かって、不連続なき裂が発生している。Fig. 5(e)では、細胞間層にき裂が進行した後、細胞内腔に面した放射壁や細胞間層を通過しながら、斜め前方に複数の細胞に渡って傾斜したき裂が発生している。また、Fig. 5(f)では、細胞間層にき裂が進行した後、切削方向とは垂直に方向を変え、細胞の長軸を横切るようにき裂が進行している。すなわち、刃先が前方に進行し、細胞間層にき裂が現れた後、複数の細胞にまたがって、斜めや垂直に進行するき裂が観察できる。このようなき裂の形態については、佐伯による報告³⁾において、繊維に斜めにき裂が進み、壁を切断している破断を傾斜破断、斜め破断としているので、ここでは、Fig. 5(e)における破断形態を「傾斜破断」と呼ぶことにする。また、繊維にほぼ垂直なき裂が細胞壁を横切るように進展するものを直交破断、横破断、繊維垂直破断等と報告しているので、ここでは、Fig. 5(f)における繊維に垂直な破断形態を「垂直破断」と呼ぶことにする。

また、刃先前方に放射組織が現れる場合には、Fig. 5(g)のように、放射組織を横切って、細胞間層にき裂が発生する場合や、Fig. 5(h)のように、き裂の進展する方向を変え、放射組織の手前で、垂直方向にき裂が進行する様子が観察できる。

3.3 切削の進行に伴う微視的なき裂挙動の変化

Fig. 6に異なる d における r と L の関係を示す。Fig. 6(I-a)に示すように、 $d=50\text{ }\mu\text{m}$ において、細胞間層に刃先が進行した場合には、微小なき裂が細胞間層に進展し、 L が増加しても、常にそのき裂が発生している。

また、Fig. 6(II-a)に示すように、 $d=200\text{ }\mu\text{m}$ では、細胞間層に刃先が進行する場合には、 $L=0.1\text{ mm}$ から細胞間層のき裂が現れ、 L が増加すると傾斜破断が観察できる。ところが、Fig. 6(II-b)のように、細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先が進行する場合には、細胞間層のき裂および傾斜破断に加え、切削初期から細胞内腔に面した放射壁のき裂が発生している。

Fig. 6(III-a)および(III-b)では、細胞間層および細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先が進行した時には、両者ともに、細胞間層に現れる r は、 L の増加に伴い、急激に大きくなっている。さらに、 $d=400\text{ }\mu\text{m}$ では、このような細胞間層におけるき裂が成長するとともに、複数の細胞にまたがって起こる傾斜破断に加え、垂直破断が発生している。

以上の結果から、縦切削においては、初期段階において、細胞間層や細胞内腔に面した放射壁にき裂

Fig. 6. Relation between crack propagation length and cutting distance under different depths of cut.

Note: (I-a), (II-a), (III-a): Cut in intercellular layer. (II-b), (III-b): Cut in radial wall of lumen. Symbols and error bars indicate average value and standard deviation, respectively, in ten repetitions of cutting tests.

が現れ、切削が進んだ段階において、傾斜破断や垂直破断に至るき裂挙動が現れることがわかる。

3.4 巨視的な切屑型と微視的なき裂挙動の関係

Fig. 7は縦切削において現れたき裂挙動を詳細に解析するため、切削中に現れたすべての r と d との関係について再整理した結果を示す。Fig. 7(a)において、細胞間層に刃先を進行させた場合には、 d が増加するに従って、細胞間層に現れる r は大きくなっている。また、刃先を細胞内腔に面した放射壁中央部に進行させた場合には、 $d=200\text{ }\mu\text{m}$ 以上で細胞間層にき裂が発生し、同様に、 d が増加するほど、その程度が増大している。すなわち、本実験範囲に

Fig. 7. Relation between crack propagation length and depth of cut.

Note: Symbols and error bars indicate average value and standard deviation, respectively, of the crack propagation length at the measurement point of each cutting distance as referred to in Fig. 6.

おける加工条件では、細胞間層におけるき裂が現れ、切込み深さが増大するほどそのき裂の大きさも顕著となる。一方、Fig. 7(b)において、細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先を進行させた場合では、細胞内腔に面した放射壁での $r = \text{約} 200 \mu\text{m}$ 以下の微小なき裂にとどまっている。また、Fig. 7(c)および(d)の結果においては、細胞間層および細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先を進行させた場合、 $d = 200 \mu\text{m}$ 以上において、複数の細胞にまたがって傾斜破断や垂直破断が発生している。そこで、き裂の情報をさらに詳しく調べるため、き裂が発生する方向について解析した。

Fig. 8は、 ϕ と d の関係を示す。Fig. 8(a)の細胞間層に現れるき裂は、 d に因らず ϕ は小さく、細胞

Fig. 8. Relation between crack propagation angle and depth of cut.

Note: Symbols and error bars indicate average value and standard deviation, respectively, of the crack propagation angle at the measurement point of each cutting distance as referred to in Fig. 6.

の配向にほぼ平行にき裂が進展している。これに対して、Fig. 8(b)では、細胞内腔に面した放射壁中央部に刃先を進行した場合にのみ、 $\phi = 20^\circ$ 前後において細胞内腔に面した放射壁にき裂が現れる傾向にある。さらに、Fig. 8(c)では、 $d = 200 \mu\text{m}$ 以上において、 $\phi = 30^\circ$ 前後における傾斜破断が現れ、Fig. 8(d)では、 $d = 300 \mu\text{m}$ 以上において、 $\phi = 90^\circ$ 前後における垂直破断が現れている。

以上の結果を踏まえ、縦切削における巨視的な切屑型と微視的なき裂挙動との関係について議論する。Fig. 4の結果から、 d が小さい場合には、流れ型の切屑が現れ、 d が大きくなると、折れ型の切屑

が観察できた。このような切屑型の変化は、刃先前方に「先割れ」を伴いながら、流れ型から折れ型へと移行した。そこで、微視的なき裂挙動の情報から、縦切削に現れる「先割れ」の発生機構を考えた場合、細胞間層にモードⅠの開口型の大きなき裂が現れ始める条件 ($d=200\text{ }\mu\text{m}$ 以上) において、先割れが観察できる。すなわち、折れ型切屑が支配的な、切削角が中位な加工条件において、巨視的に観察できる「先割れ」の破壊現象は、微視的レベルで観察すると、細胞間層のき裂が主要因であると考えることができる。

また、刃先前方に「先割れ」が生じる折れ型切屑が生成される条件では、細胞間層や細胞内腔に面した放射壁に微視的なき裂が進行した後、傾斜破断や垂直破断のような、複数の細胞にまたがって起こるき裂が観察できた。これらのことから、傾斜破断や垂直破断のような微視的なき裂挙動は、一節の切屑が生成する終盤において、先割れ基部の曲げ破壊の部分に起こるき裂挙動と捉えることができる。

また、今回観察された細胞内腔に面した放射壁に現れる微視的なき裂は、「先割れ」に結びつくような大きなき裂には成長しなかった。このような細胞内腔に面した放射壁に現れる微視的なき裂は、佐伯による破壊の分類³⁾でも指摘されているように、壁層境界やラメラの境界に沿って生じるような細胞の構造に起因する破壊の可能性があり、今後さらなる検討が必要になる。

4. 結 論

スギの縦切削における巨視的な切屑型と微視的なき裂挙動を観察し、両者の関係について検討した結果、以下の結論を得た。

1. 切削角が中位の縦切削における巨視的な切屑型は、切込み深さの増加に伴い、流れ型から折れ型切屑に移行した。
2. 縦切削において観察された微視的なき裂挙動は、刃先前方に発生する細胞間層や細胞内腔に面した放射壁のき裂と、複数の細胞にまたがって起こる傾斜したき裂（傾斜破断）と垂直方向に起こるき裂（垂直破断）であった。
3. 2の結果において分類された微視的なき裂挙動では、細胞間層や細胞内腔に面した放射壁にき裂が現れ、一節の切屑が生成する終盤における曲げ破壊の段階において、傾斜破断や垂直破断のき裂挙動が現れることがわかった。
4. 以上の結果から、本加工条件の折れ型切屑において発生する「先割れ」は、主に微視的なき裂挙動における細胞間層のき裂が成長したものであることが考察された。

文 献

- 1) 枝松信之, 森 稔: “製材と木工”, 森北出版, 東京, 1976, pp. 189-201.
- 2) テテルマン, A. S., マッケビリー, A. J.: “構造材料の強度と破壊 1—破壊の巨視的様相と微視的様相—”, 宮本 博訳, 培風館, 東京, 1970, pp. 36-42.
- 3) 佐伯 浩: 材料 37(416), 529-534 (1988).
- 4) Franz, N. C.: *Forest Prod. J.* 5(10), 332-336 (1955).
- 5) Walker, K. J. S., Goodchild, R.: *Forest Prod. Res. Special Report* 14, 1-25 (1960).
- 6) Stewart, H. A.: *Wood Sci.* 3(4), 193-203 (1971).
- 7) Inoue, H., Mori, M.: *Mokuzai Gakkaishi* 25, 22-29 (1979).
- 8) Triboulot, P., Asano, I., Ohta, M.: *Mokuzai Gakkaishi* 29, 111-117 (1983).
- 9) Tochigi, T., Tadokoro, C.: *Mokuzai Gakkaishi* 31, 880-887 (1985).
- 10) Atkins, A. G.: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 218(10), 1181-1194 (2004).
- 11) 加藤幸一, 浅野猪久夫: 群馬大学教育学部紀要 芸術・技術・体育・生活科学編 18, 9-22 (1982).
- 12) 林大九郎, 栃木紀郎, 井上裕之, 小笠原和彦: 木材工業 30(12), 544-548 (1975).
- 13) 大林宏也, 桃井尊央, 栃木紀郎, 小林 純: 木材学会誌 53, 262-268 (2007).
- 14) 古川郁夫, 佐伯 浩, 原田 浩: 材料 24(264), 855-861 (1975).
- 15) 稲村豊四郎: “生産加工の原理”, 日本機械学会編, 日刊工業新聞社, 東京, 1998, p. 321.
- 16) 木下敍幸: 木材学会誌 29, 877-883 (1983).
- 17) 西岡常一: “木のいのち木のころ (天)”, 新潮社, 東京, 2003, pp. 62-67.
- 18) 青山経雄: 第64回日本林学会大会講演集, 東京, 1955, pp. 347-348.