

木口円盤の収縮と割れの発生

加藤 弘之・佐道 健・松井 邦泰

近藤 健二郎・中戸 莞二

Shrinkage and crack-formation of cross-sectional tree-disks.

Hiroyuki KATO, Takeshi SADOH, Kuniyasu MATSUI,

Kenjiro KONDO and Kanji NAKATO

要 旨

木材の横断面における収縮異方性に基づいて、木口円盤の乾燥過程で発生するV型割れの実態を把握するために、アカマツおよびブナの生材木口円盤の乾燥過程における収縮と割れ発生の経時変化を観察、測定した。収縮率の測定には新しく考案したブリッジ型ひずみゲージを用いた。

円盤木口表面の細かい割れはほとんど収縮が認められない乾燥初期にすでに多数発生し、そのうちの数個が収縮率が急激に増大する時期にV型割れにまで発達する。しかし、収縮がほとんど停止する乾燥終期には、1～2個の大型のV型割れを残して、大部分の割れは閉鎖するか狭くなる。

1. 緒 言

木口円盤を乾燥するとき、含水率傾斜に基づいて木口表面に現われる木口割れの他に、特徴的な現象として外周から髄に向った大型のV字型の割れ（ここではV型割れと呼ぶ）が発生する。このV型割れは木材の横断面における収縮の異方性に基因するもので、木材の円周方向（接線方向）の収縮率が半径方向の収縮率よりも大きいため、乾燥時につねに円周方向の自由な収縮が拘束され、この方向に引張応力が、またこれに対応して半径方向に圧縮応力が発生し、このうち引張応力が木材の接線方向の引張強さよりも大きくなることによるものである。このV型割れは、とくに心持ち材の乾燥や工芸的に利用される木口円盤の乾燥の際にしばしば避けることのできない欠点として考えられている。しかし、その発生^{1)~4)}の機構、条件を明らかにするならばV型割れ防止の手段も考えられ、これに関していくつかの研究も既に報告されているが、未だ十分解明されているとはいえない。

本報告は、まず木口円盤の乾燥過程の実態を把握することによって、この問題を解明する手掛りを得ようとしたもので、木口円盤の乾燥過程における円盤各部の収縮率の経時変化を測定するとともに、これと平行して割れの発生とその消長を肉眼的および顕微鏡的に観察した結果である。ここで、横断面の収縮異方性に基づく収縮の拘束を除去するために、髄から外周に向けてあ

らかじめ切込みを入れた円盤の収縮率の経時変化の対比をも試みた。また、収縮率の測定にはかなり大変形のひずみが測定可能なブリッジ型ひずみゲージを考案し、その有効性を確めた。

2. 実験材料および方法

2.1 実験材料

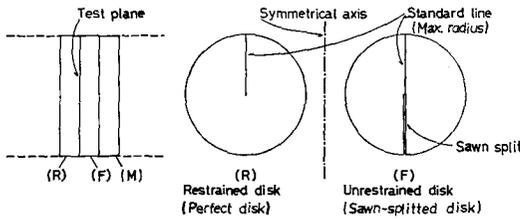


Fig. 1. Matched test disks. Restrained or perfect disk (R), unrestrained or splitted disk with a sawn split from pith to circumference (F), and disk for moisture content measurement (M).

わなないようにした自由収縮円盤 (F円盤), また3枚目は, 含水率測定用円盤 (M円盤) とした。相隣る1対のRおよびF円盤の共通木口面を測定面とし, 基準線を最長半径にとり, F円盤では切込みを基準線の髓を越えた延長半径上に入れた (Fig.1)。供試円盤は剥皮し, 乾燥実験開始まで水中に浸漬して生材状態を保った。

2.2 ひずみゲージの作製と円盤への取付け

収縮率測定用ひずみゲージは Fig. 2 に示すように, 板幅6mmのバネ鋼をブリッジ状に仕上げたものに, ストレインゲージ (共和KFC-2-C1-11) を上下面に接着して作製した。ゲージの固定端距離は2~2.5cmの範囲である。ストレインゲージのひずみ測定には静的ひずみ測定器 (共和電業SM-60B) を用いた。全てのブリッジ型ひずみゲージについて標点間距離の変化量とストレインゲージのひずみの関係から検量線 (Fig. 3) を作成し, 個々のゲ

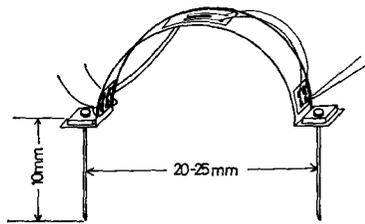


Fig. 2. Bridge-type strain gauge.

京都大学演習林上賀茂試験地産のアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) および同産生 演習林産のブナ (*Fagus crenata* Blume) の直径約10cmの樹体から, 生材状態で厚さ1.5cmの連続木口円盤を作製した。供試円盤は連続した3枚を1組として, 1枚目は, 異方性に基づいて半径および接線方向の収縮が相互に拘束し合う収縮拘束試験円盤 (R円盤), 2枚目は, 半径方向に樹皮から髓まで切込みを入れて, 両方向の収縮が拘束し合

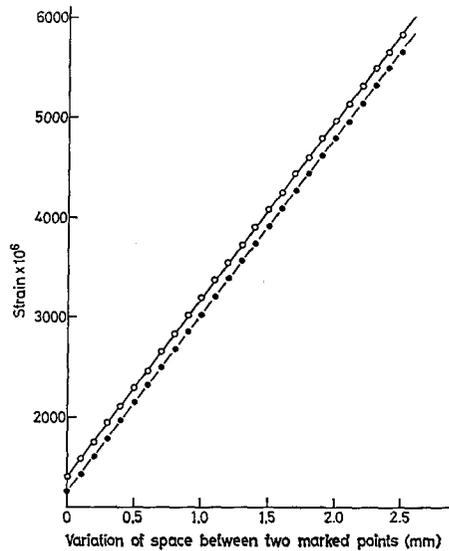


Fig. 3. Examples of calibration of bridge-type strain gauge.

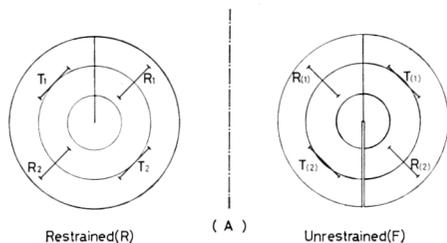


Fig. 4. Arrangement of gauges on test disks, pattern A.

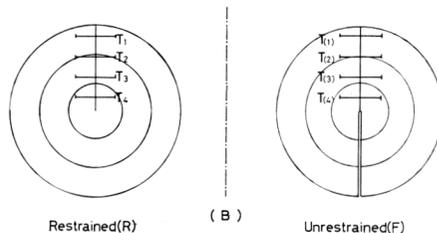


Fig. 5. Arrangement of gauges on test disks, pattern B.

ジについて検量線の直線性と再現性を確認し、測定可能範囲を明らかにした。

検量したゲージは木口面の Fig. 4 および 5 に示す位置および方向に配置し、円盤に固定した。これらの図に示した位置にゲージを取付けた円盤を用いた試験を、ここでは測定パターンAおよび測定パターンBと呼ぶ。図からわかるように測定パターンAは同一年輪帯での半径および接線方向の収縮率が、また測定パターンBは同一半径帯上での接線方向の収縮率が同時に測定できる。これらとは別に、F円盤の切込み部分の開裂度を測定するために、切込みをまたぐようにゲージを取付けた円盤（測定パターンC）をも作製した。

2.3 乾燥実験

あらかじめ60°Cの恒温水槽中に浸漬してあった供試円盤をファン付きの恒温乾燥器内で、温度60°Cで乾燥した。乾燥器内には2.1で記した3枚1組の円盤を同時に入れ、含水率が一定になるまで乾燥し、その間、ゲージを設置した位置における収縮率と平均含水率の径時変化を測定した。

これと平行して、M円盤についてマクロフォト撮影装置（オリンパス）および広視野型表面顕微鏡（ニコン）を用いて割れの観察を行った。

実験装置とその配置を Photo 1 に示す。

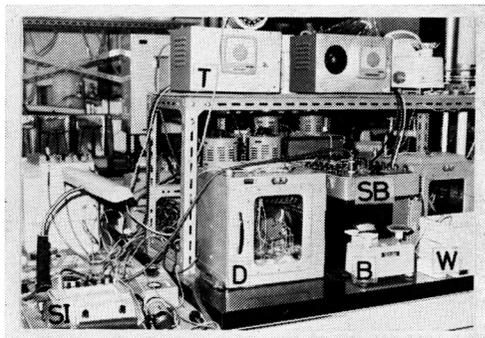


Photo 1. A set of apparatus for drying experiment. B: balance, D: drying kiln, SB: switch box, SI: strain indicator, T: temperature control unit, and W: water bath.

3. 結果および考察

3.1 収縮量の経時変化

アカマツの測定パターンAについて、接線および半径方向の収縮率と含水率の経時変化の例をそれぞれ Fig. 6 および 7 に示す。円盤の平均含水率が繊維飽和点に達する前に、僅かながら収縮するのが測定された。この時期に膨張する個所のあることが測定されているが、これは含水率むらによって生ずる局所的な収縮に対する補償作用によるものかも知れない。また収縮開始点が測定位置によって異なるのは、含水率むらによるものであろう。本実験のように、乾燥に伴う繊維方向の水分傾斜が避けられない厚さの円盤では、水分傾斜のため収縮が平均含水率40%付近から徐々に始まるものと考えられる。すなわち、含水率の経時変化の曲線が含水率40%以下で減率

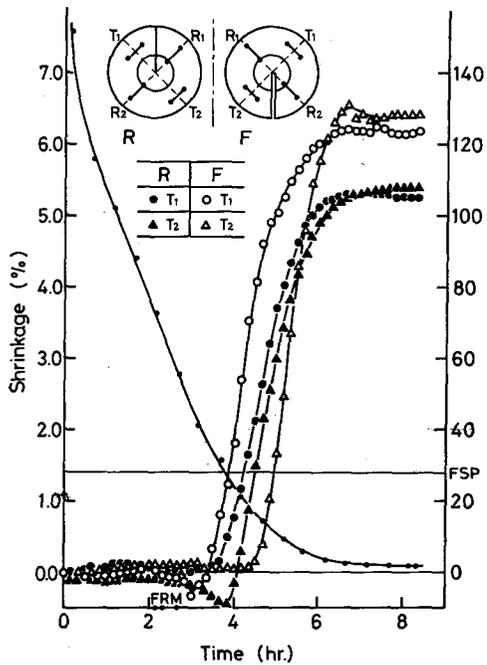


Fig. 6. Changes in tangential shrinkage and moisture content of Akamatsu test disk during drying, gauge arrangement pattern A.

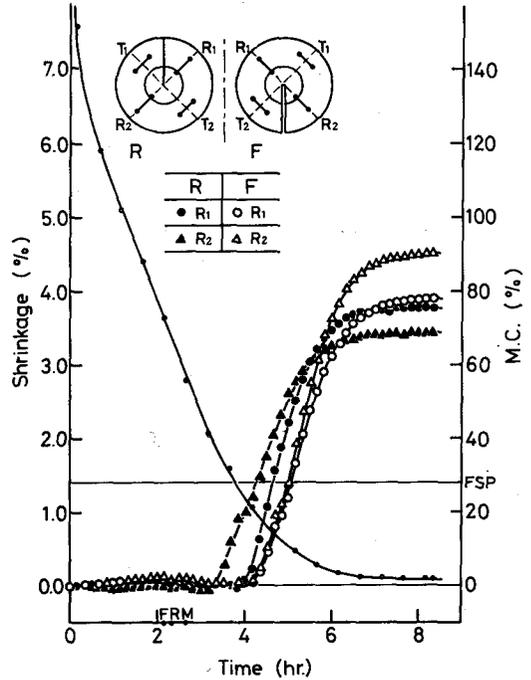


Fig. 7. Changes in radial shrinkage and moisture content of Akamatsu test disk during drying, gauge arrangement pattern A.

Table 1. Final shrinkages of test disks.

a) Gauge arrangement pattern A.

(unit: %)

Position		Tangential shrinkage				Radial shrinkage			
		T ₁		T ₂		R ₁		R ₂	
Disk*		R	F	R	F	R	F	R	F
Akamatsu	set No.								
	1	5.27	6.18	5.40	6.30	3.78	3.88	3.43	4.52
	2	4.66	5.59	6.55	6.63	4.13	4.32	4.21	3.89
	3	**	5.05	6.98	7.05	4.32	4.75	3.88	4.30
	4	**	**	6.99	7.14	3.75	4.00	**	4.03
	5	**	**	6.69	7.41	4.09	3.84	4.55	4.36
	6	**	**	**	5.77	**	5.33	3.63	4.61
	7	**	6.39	**	5.78	**	3.74	4.13	3.78
	8	**	5.47	**	6.17	**	3.90	4.35	3.96
mean	4.96	5.74	6.52	6.53	4.01	4.22	4.03	4.18	
Buna	set No.								
	1	6.33	7.01	**	8.76	**	4.00	4.26	4.01
	2	5.22	7.47	**	8.74	**	4.45	4.25	4.00
	3	5.14	7.26	**	9.18	**	3.93	3.44	3.62
mean	5.56	7.25	**	8.89	**	4.12	3.98	3.88	

b) Gauge arrangement pattern B.

(unit: %)

Position		Tangential shrinkage							
		T ₁		T ₂		T ₃		T ₄	
Disk*		R	F	R	F	R	F	R	F
Akamatsu	set No.								
	1	**	**	6.17	6.50	4.73	7.01	5.63	5.45
	2	**	6.00	**	6.25	4.56	5.47	5.22	5.10
	3	5.55	6.01	**	6.06	4.72	5.66	**	5.18
	mean	5.55	6.00	6.17	6.29	4.67	6.05	5.43	5.24

*see Fig. 1.

**not obtained because of disconnection or breakage of gauge caused by check formation at or between setting points.

乾燥であることを示していることから、この時点で円盤表面が繊維飽和点に達し、収縮が始まると考えてよいであろう。

引続いて急速な収縮が始まり、平均含水率がほぼ一定になるにいたって、収縮もまた平衡に達する。最終平衡時においてR円盤とF円盤の収縮率の差は接線方向で明らかに認められ、その差をF円盤の収縮率に対する百分比で示すと、平均8.5%であった(Table 1)。一方、半径方向ではR円盤とF円盤の間で収縮率に明確な差は認められなかった。収縮が始まり、V型割れが発生するまでの間は、R円盤の接線方向に引張力が作用した状態で乾燥が進行するので、ドラインセットの生ずることが考えられ

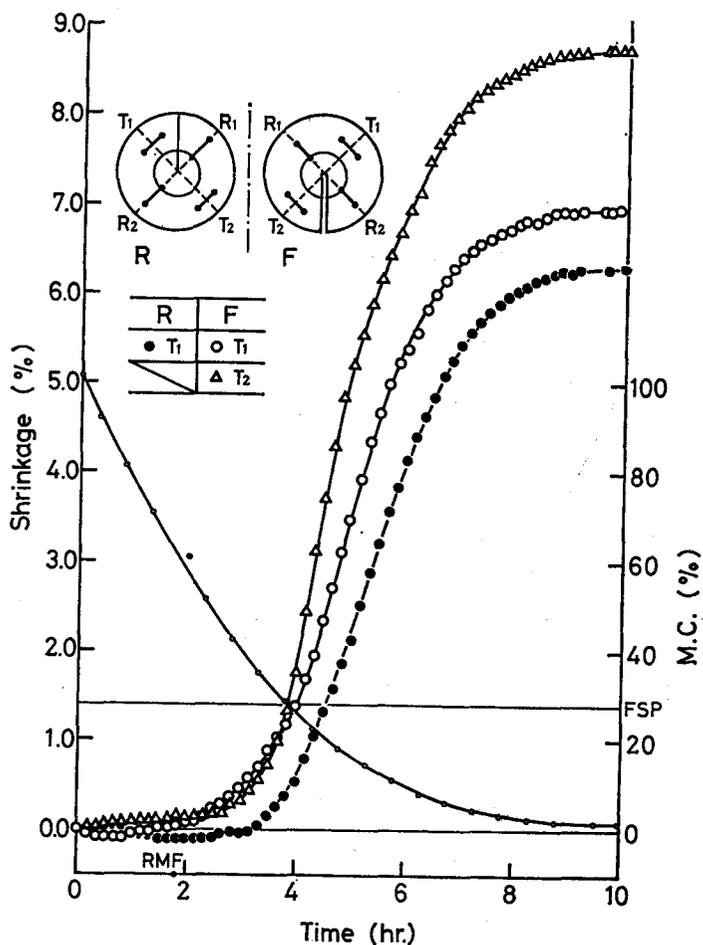


Fig. 8. Changes in tangential shrinkage and moisture content of Buna test disk during drying, gauge arrangement pattern A.

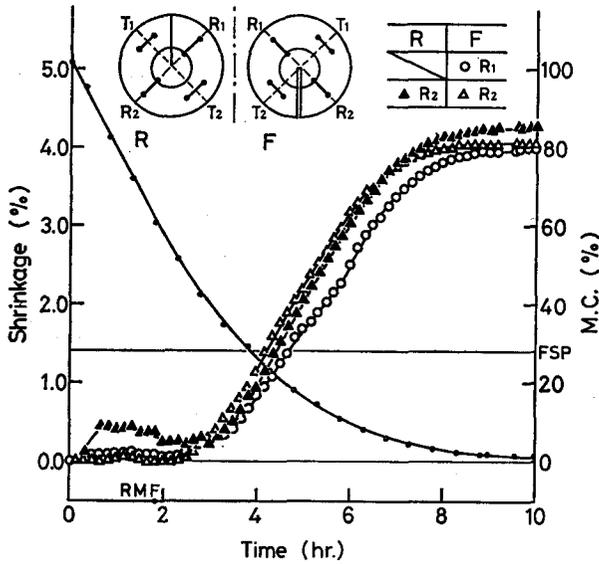


Fig. 9 Changes in radial shrinkage and moisture content of Buna test disk during drying, gauge arrangement pattern A.

った。また最終平衡時の接線方向の収縮率が半径方向の値の約2倍であり、接線方向の収縮率が同一年輪帯上であっても位置によってかなりの差が認められた。すなわち最小半径側 (T₂) の

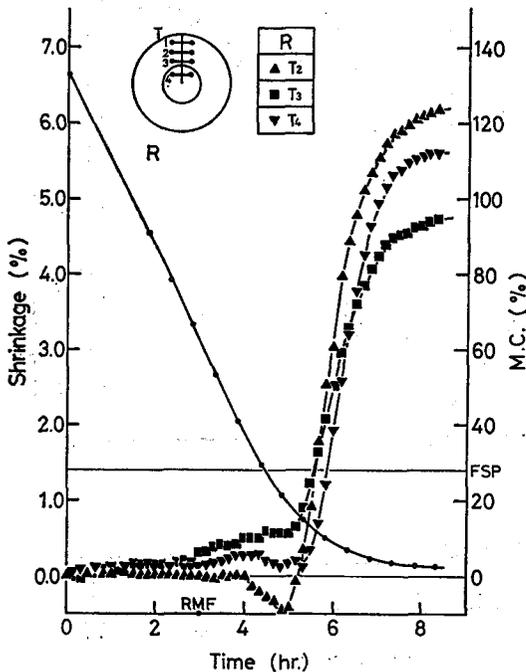


Fig. 10. Changes in tangential shrinkage and moisture content of Akamatsu test disk during drying, gauge arrangement pattern B. (R-disk)

る。また、この方向の収縮の拘束はV型割れの発生によって解かれるので、最終平衡時には弾性ひずみはほとんど残っていないと推定できるから、上述の接線方向でみられたR円盤とF円盤の収縮率の差はセット量の程度を表わしていると考えられる。

Fig. 8および9はブナの接線および半径方向の収縮率と含水率の経時変化の1例を示したものである。ブナの場合にはTable 1に示すように最終平衡時においてR円盤とF円盤で接線方向の収縮率の差がアカマツの場合よりも大きく現われ、その差をF円盤の収縮率に対する百分比で示すと、平均23%であ

った。また最終平衡時の接線方向の収縮率が半径方向の値の約2倍であり、接線方向の収縮率が同一年輪帯上であっても位置によってかなりの差が認められた。すなわち最小半径側 (T₂) の収縮率が最大半径側 (T₁) の収縮率よりも大きい値を示した。このことは円盤面上での収縮率が部位によって異なることを示しており、アカマツでもこのような傾向が僅かに見られたが、5%水準で有意差はなかった。ブナの場合には円盤の偏心度の大きいことが影響したものと考えられる。

そこで次に、アカマツの測定パターンBのR円盤とF円盤について得られた結果をFig.10および11に示す。F円盤については周辺部から髄に向かって収縮率は減少するが、R円盤では必ずしもそうとはいえず、収縮の拘束が複雑に影響している。セット量 (最終平衡時におけるR円盤とF円盤の収縮率の差のF円盤の収縮率に対する百分比) の平均値は周辺部から髄に向かって T₁ : 7.6%, T₂ : 5.1%, T₃ : 21.9% であった。

なお、収縮測定の間には標点間に発生

した大型のV型割れによるゲージの破損や、標点（ゲージ固定部）位置に発生した割れによるゲージの脱落によって測定が不能になる場合があった（Table 1参照）。

3.2 割れの発生とその消長

アカマツのR円盤について、割れの発生とその進行を示したものが Photo 2である。また、これらの写真および肉眼的観察から木口円盤に発生する割れの消長、接線収縮率および平均含水率の3者の経時変化と相互の対応を模式的に示したのが Fig.12, その間の円盤の外周（辺材外層）、辺材内層および心材の各位置での平均含水率の変化を示したのがTable 2である。

生材円盤を乾燥するとき、最初の木口割れは平均含水率が約60%という極めて早い時期に発生する。これは表面付近の著しい水分傾斜によるもので、その時期には内部の未収縮部分が多いので収縮はほとんど検出できない。恒率乾燥から減率乾燥に移行する時期、すなわち円盤表層が繊維飽和点に達すると、収縮経過曲線が小刻みに変動し、収縮が緩やかに始まる。この時期に既に小さい木口割れが円盤の最外周の生長輪に発生する。この最初の木口割れが発生する時点は Fig. 6～11の横軸上に示してある。すなわち、横軸上のR, F, MはそれぞれR円盤, F円盤, M円盤において最初の木口割れが発生した時点を目指す。この割れは円盤外周部にほぼ等間隔に発生する（Fig.12—①）。この木口割れの一部分が内部に向かって発達し、さらに新しい木口割れが円盤外周に生じる頃に収縮は急激に進行し始める（Fig. 12—②）。急激に収縮が進行する間に木口割れの

Photo 2. Check and crack formation of Akamatsu test disk. →

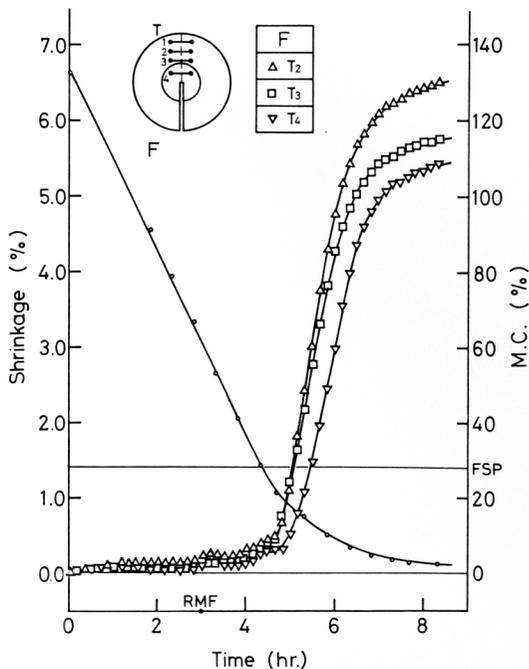
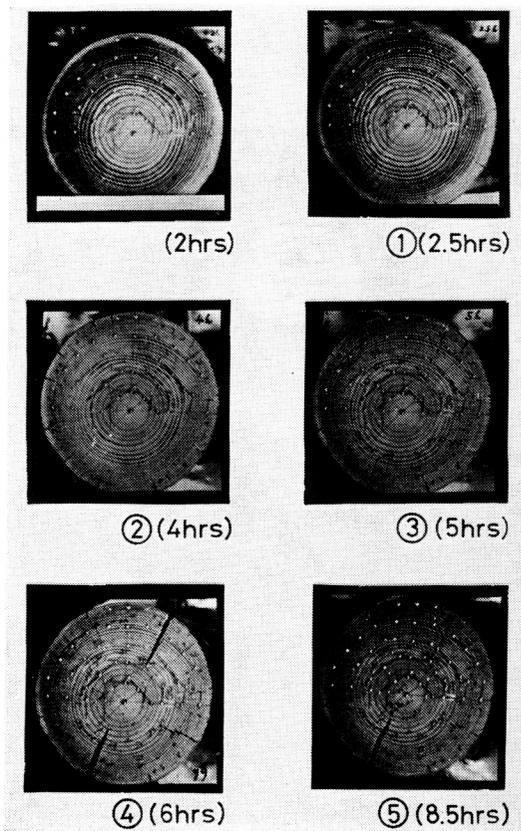


Fig. 11. Changes in tangential shrinkage and moisture content of Akamatsu test disk during drying, arrangement pattern B. (F-disk)



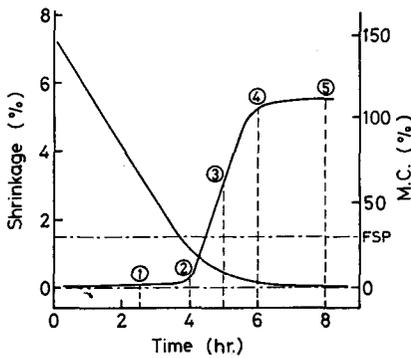
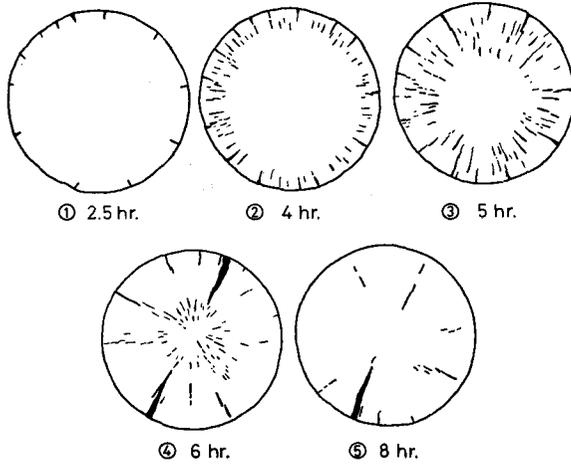


Fig. 12. Schematic shows of check and crack formation in relation with with shrinkage and moisture content changes of Akamatsu test disk.

Table 2. Changes in moisture content of Akamatsu disk.

Drying time (hr)	Moisture content (%)		
	Sapwood		Heartwood
	outer zone	inner zone	
2.5	13.2	25.7	32.0
3.5	8.0	25.0	30.5
4.0	5.5	22.0	26.5
5.5	4.0	6.5	17.9
6.5	4.0	6.0	10.0
7.5	4.0	5.0	9.0

発生が辺材内層にまで拡大する (Fig. 12—③)。この時期に内部にまで発達した外周部の木口割れの一部がV型割れの初期の様相を示す。さらに乾燥が進行すると共に木口割れは心材部にも生じ、ついに髓付近にまで達するが、この頃円盤外周の木口割れは閉じ始め、一方、大型で内部まで達しているV型割れの裂開度は最大になる。また、この時期には収縮速度は減少し始める (Fig.12—④)。乾燥の終期、収縮率の変化がほぼ無くなる頃には、1～2個のV型割れを残して木口割れは

ほとんど閉鎖する (Fig.12—⑤)。アカマツの円盤で木口割れが円盤外周から髓へ向って移行するように見えるのは、辺材が心材に比較して乾燥速度が大きいため、Table 2に示されるように辺材部の乾燥が先行することによるものと思われる。

ブナのR円盤についても、Photo 3に示すように、アカマツの場合と同様の割れの発生と進行がみられる。特にブナでは木口割れやこの割れのV型割れへの発達が広放射組織に沿って起こることが肉眼でも顕著に認められる。

顕微鏡的観察によれば、アカマツ円盤では最初の木口割れは最外生長輪の晩材部の仮道管と放射組織の接合部、あるいは放射組織付近の仮道管相互の間に生じる。この初期の木口割れは既述のように円盤の最外生長輪全周にわたってほぼ等間隔に発生し髓の方向に向かって進行するが、一部がV型割れに発達する以外は最外層から数年輪で停留する。

乾燥が円盤表面から内部に進行して内部もまた収縮することにより、また内部にまで進行した割れの拡大に伴う接線方向の応力の緩和によって、木口割れの大部分は縮小、閉鎖する。

木口割れからV型割れへの発達は、最初の割れから髓に向って連続して拡張するとは限らない。Photo 4に見られるように、接近して発生し内部にまで発達した2個の割れの間が、新しい割れによって結ばれて拡大することがある。

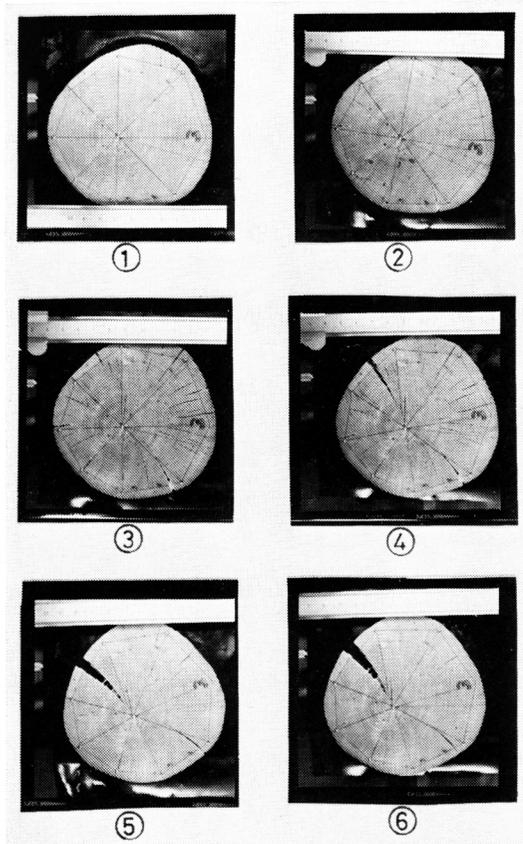


Photo 3. Check and crack formation of Buna test disk.

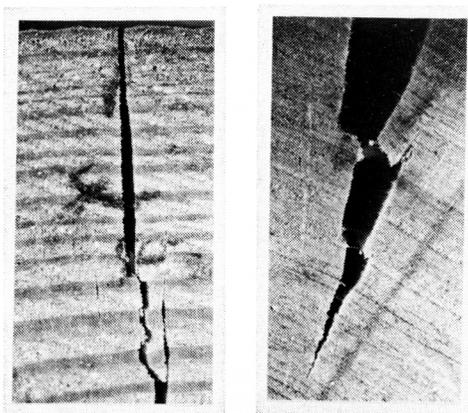


Photo 4. Development of V-shaped crack.
a: Akamatsu, b: Buna.

期は収縮率の増大がほぼ停止したときで、切込みが閉じてゆく期間には収縮はほとんど進行しない。乾燥開始後約10時間で、開裂幅の最も大きい最外周に近いE₁でも最大値の $\frac{1}{2}$ 以下にまで減少し、辺心材の境界付近のE₄ではほとんど乾燥前の状態まで閉じる。この原因を明らかにするためには、さらに詳細な円盤上での収縮率の分布、および円盤内の含水率分布の経時変化を知る必要があるであろう。

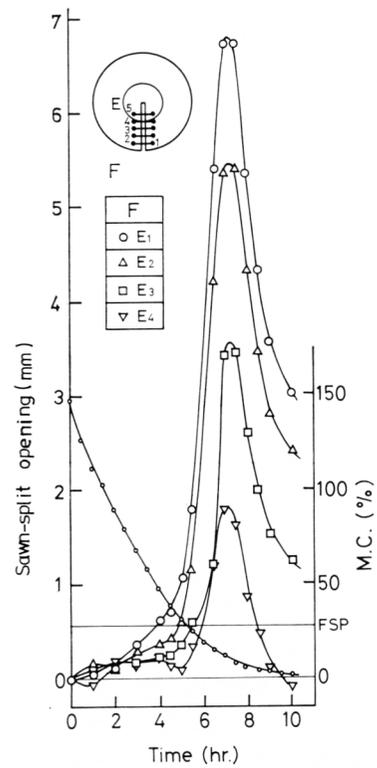


Fig. 13. Changes in sawn-split opening and moisture content of Akamatsu test disk during drying.

V型割れは Photo 2 および 3 に見られるように数箇所が発生するが、乾燥に伴って複雑に開閉し、おおむね 1, 2 個の大きい V 型割れを残して他は閉鎖する。この原因の 1 つは、一部の割れが内部にまで発達、拡大することによって接線方向の収縮の拘束が解かれ、乾燥応力が消滅することによるが、なお他に未知の原因が存在する。すなわち、測定パターン C のアカマツ F 円盤の切込みの開裂幅の乾燥過程における変化をみると、Fig. 13 に示すように、乾燥開始後 4 ~ 7 時間の収縮が急速に進行している間 (Fig. 12 参照) に開裂幅は増大し、最大値に達したのち減少し始める。この最大値に達する時

4. 総 括

本研究の結果から、木口円盤に発生するV型割れの研究を行うに当って今後検討すべきいくつかの問題が明らかになった。

本研究では「V型割れの発生および発達の機構、条件を知るためには円盤中の含水率および乾燥ひずみ（自由に収縮したときの収縮率と拘束されて収縮したときの収縮率の差）の分布が乾燥経過にしたがってどのように変化するかを知る必要がある」との立場に立ち、まず乾燥過程での円盤上の種々の部位における収縮率の経時変化を正確に測定することが必要であると考えた。そこで収縮率測定法としてブリッジ型ひずみゲージを考案し、その有効性を確かめた。

このゲージの精度は極めて高く、測定部位の平均収縮率の経時変化を正確に測定できるものであったが、なお次のようないくつかの問題点が見出された。

- 1) 標点間隔が20~25mmで、かなり広い。
- 2) 円盤上のゲージ取付け個数が限られる。
- 3) ある位置における接線、半径両方向の収縮が同時に測定できない。
- 4) 標点間に大きいV型割れが発生したとき、ゲージが破損する場合がある。
- 5) ゲージ取付け部付近の乾燥条件が、ゲージの存在で多少影響を受ける。

また、本研究で得られた結果は、円盤上の収縮率の分布が極めて複雑であることを示している。とくにV型割れの発生する個所が予測できないので、この発生条件を知るためには円盤全面にわたって収縮率分布を求めるのに適した方法が要求される他、同一円盤についての含水率分布を同時に測定できることが望ましい。

本研究を行うに当り、試料を提供して頂いた本学農学部付属演習林、ならびに試料円盤作製に協力して頂いた林産機械学研究室、さらに助言を頂いた各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 藤田晋輔：木材の乾燥割れの発生機構に関する研究，京都大学学位論文（1974）
- 2) 金森勝義・河原田洋三・千野昭：林産試験場月報，1973（11），1（1973）
- 3) H. KUBLER: For. Prod. J., 24(7), 33 (1974)
- 4) H. KUBLER: Wood Sci., 7(3), 173 (1975)

Résumé

The restrained shrinkages of cross sectional disks from Akamatsu (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) and Buna (*Fagus crenata* Blume) of about 10 cm in diameter and 15 mm in thickness were determined in relation to the V-shaped crack formation caused by the transverse anisotropic shrinkage of wood during drying. Bridge-type strain gauges newly devised and calibrated were fixed on the disks for measurement of the radial and tangential shrinkages. The shrinkage measurement and the observation of check and crack formation were carried out during drying test at 60°C.

Many fine checks develop on the disk surfaces at early stage of drying. Some of the checks transfer V-shape cracks during a period when the shrinkage of disk ceases, then the most of cracks and checks disappear or reduce, leaving one or two large V-shape cracks.