

乾燥中に生じる木材の乾燥応力等の特性について

松 田 健 一

On the Drying Stress of Woods During Kiln Drying.

Kenichi MATSUDA

I 緒 言

木材を熱気乾燥に処すると材に厚さがあるので熱の伝導によって水分の移動が生じる。即ち、一次毛管水の表面蒸発、二次毛管水の内部拡散現象が現われる。と同時に、材自身も物理的な動きを示しはじめるが、その動きは上の現象から、材の表層と内層との間に水分傾斜が生じている関係上、異っており材の収縮量も表面と内部では差がある。この時、乾燥で申すところの収縮差による圧縮応力と引張応力なる乾燥応力が発生する。この乾燥の際におこる応力が、更に過度になると表面硬化、内部割れ等の木材の損傷を招く原因となるが、木材の乾燥度の進行に伴って発生した応力が、どの様に変化してゆくかを従来の「Prong test piece Method.」で実験的にとらえ、かつ、その時に発生した応力がどの程度のものかをストレン・ゲージで数値的に把握して、これによって木材の損傷を防ぐ適正な人工乾燥スケジュールの作成を意図し、併せて、次の乾燥応力値を算出する実験への参考資料とするものである。

今回は、南九州産の3樹種クスノキ、イタジイ、イスノキを供試材とし Prong test piece Method に依って応力の発生、転換の状態、歪み→乾燥歪み、含水率、乾燥時間の諸条件から究明したので報告する。

II 実験方法

供試材は南九州特産樹と称される、イスノキ (*Distylium racemosum* Sie et Zucc. 生材比重 1.20, 気乾比重 0.85), クスノキ (*Cinnamomum Comphora* Sie. 生材比重 0.99, 気乾比重 0.55), イタジイ (*Shiia Shiebodi* MAKINO. 生材比重 1.08, 気乾比重 0.69) の高含水率材である。これらを 20×70×350mm の形状に柃目木取りして、櫛形による乾燥応力測定、収縮測定、含水率の移動測定、更にストレン・ゲージをセットした試験材に区分して、IF 型熱風循環式小型乾燥装置にセットした。実験は、恒温湿度乾燥法、変温湿度乾燥法の二法について行い、乾燥操作は Full time system とした。恒温湿度乾燥法では、乾球温度 (DBT) 50°C, 湿球温度 (WBT) 35°C, 乾湿球温度差 (DBT-WBT = Δt) 15°C の一定条件の定常乾燥下における三樹種の乾燥速度、収縮等の基本的な乾燥性について、変温湿度乾燥法では三樹種に適応した夫々の乾燥スケジュールを作成し、これに従って乾燥操作を実施して被乾材の乾燥速度、収縮率、及び含水率が 77%,

64%, 50%, 35%, 17%, 10%の6段階に達した時に Prong test piece から, Fig. 1 に示す様な一片を採り, これを繊維に沿つて4層に切断して変形による乾燥応力の推測, 乾燥歪量の測定, その時の水分傾斜の状態, 更にストレン・ゲージで乾燥の進行に伴う被乾材の表面の歪量を繊維方向, 接線方向について測定した。

測定器機 IF 型熱風循環式小型乾燥装置 (小川工作所製)
 Dial gage 付測長器 (精度 $\frac{1}{100}$ mm) (辻鉄工所製)
 静歪測定器 SM-60AT, Switching Balancing SS-12R) (共和電業製)

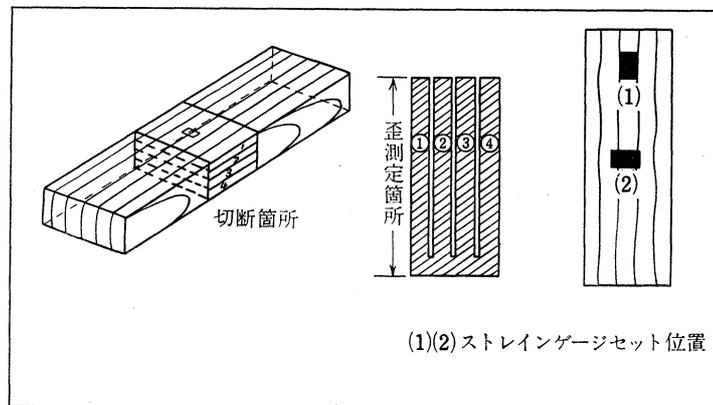


Fig. 1. Prong test piece

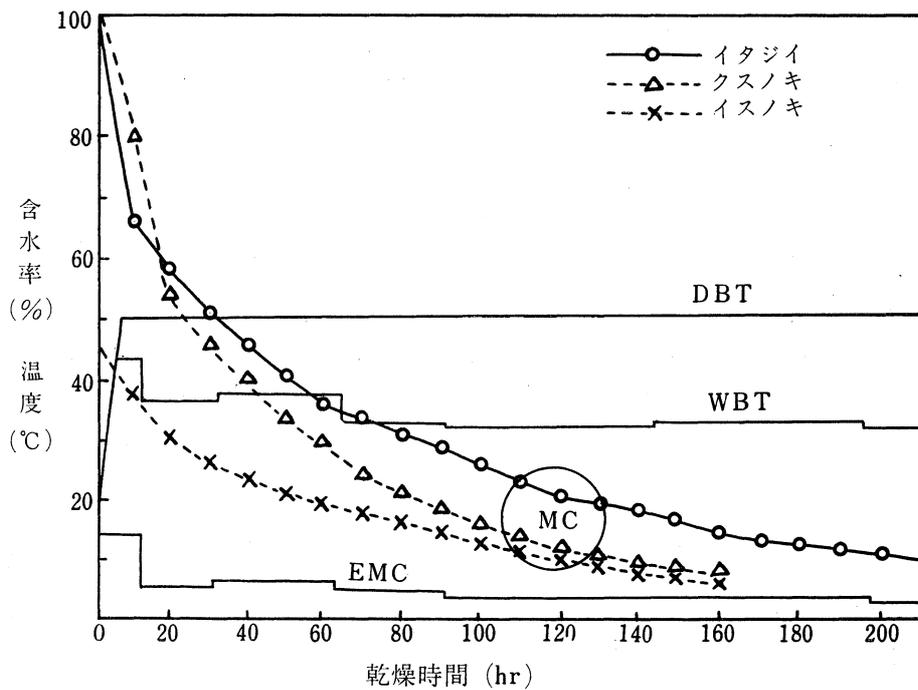


Fig. 2. 三樹種の恒温処理による乾燥経過

III 実験結果

1 乾燥経過

(i) 恒温湿度乾燥法による三樹種の水分移動, 乾燥経過状態は Fig. 2 と Table 1 に示す通りであるが, これからみると, イスノキは初期含水率が45%と低いにも拘らず, 最終含水率に達するまで160時間余の乾燥時間を費している。又, イタジイとクスノキは初期含水率が100%前後であるが乾燥時間はイタジイで210時間, クスノキが160時間を要している。これから, イタジイ, イスノキに比してクスノキが乾燥容易な樹種であることを知り得る。

(ii) 変温湿度乾燥法(乾燥スケジュール適用)に従った三樹種の乾燥経過, 及び, 乾燥応力の経時変化について, Fig. 3, 4, 5 と Table 1 に示した。乾燥経過については, (DBT) が被乾材の水分減少に伴って上昇する乾燥スケジュール法に従った場合, 三樹種の乾燥では温湿度の設定条件は異なるが最終温度を60~70°Cに上げる事によって乾燥時間は短縮され, とくに, 繊維飽和点から最終含水率間における平均乾燥速度は(i)の場合の2倍近くスピードアップされた。そして材の損傷がイスノキにも生じなかった。

2 乾燥歪みと水分分布

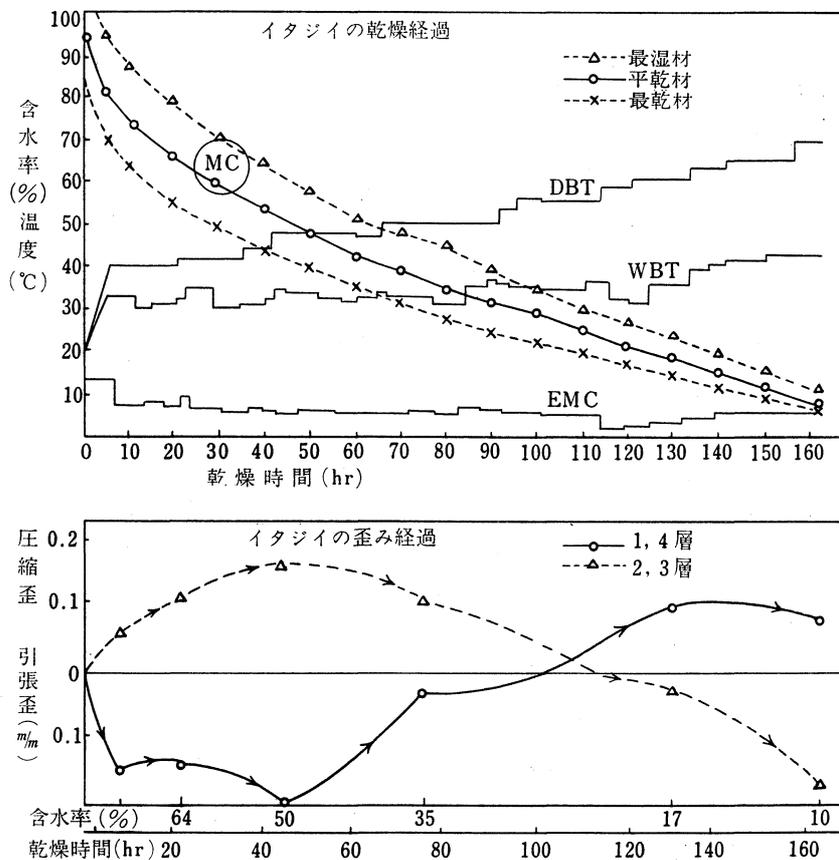


Fig. 3. 変温湿度処理による乾燥経過

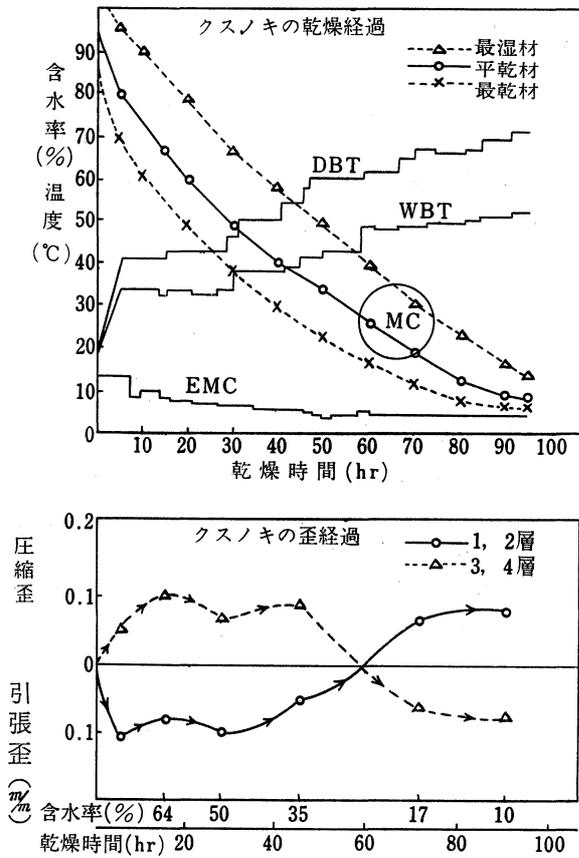


Fig. 4. 変温湿度処理による乾燥経過

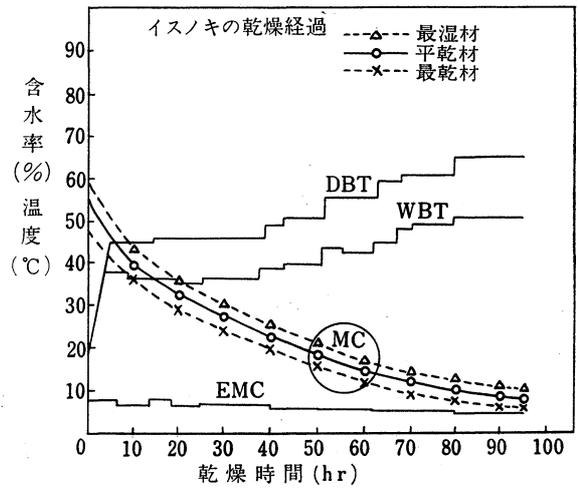


Fig. 5. 変温湿度処理による乾燥経過

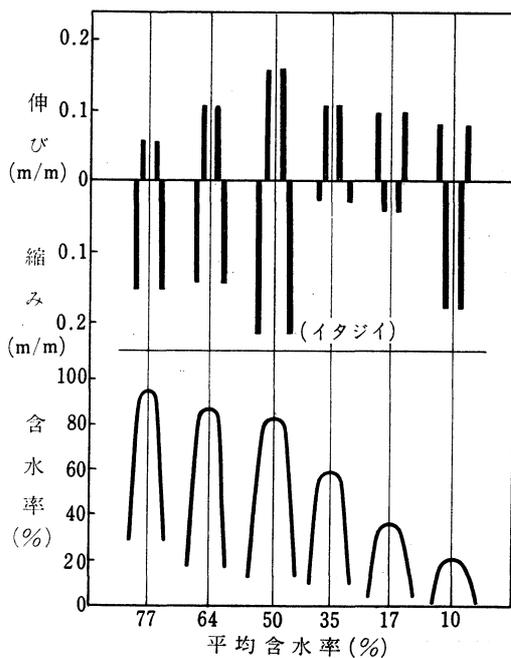


Fig. 6. 乾燥中の断面の歪みと水分分布
ある。

Fig. 6, 7, 8 は被乾材の平均含水率が各々 6 段階に達したときの水分分布を、更に、材の表層と内層部の収縮量の差も生じて乾燥応力の発生状態を Prong test piece から測定したときの模式図であり、変形、圧縮歪み、引張歪みの三点から検討し、応力の発生、応力の転換の時期を含水率の経過から示したものである。Fig. 3, 4, 5 の下図の曲線は、これらの関係を乾燥経過と照合したものである。

例えばイタジイについてみると、乾燥開始後 10 時間経過すると、被乾材の平均含水率は 77% を示し、材の外層に大きな引張歪みの発生がみられ、さらに、50 時間後には、これが最大値に達しているのを測定した。そのときの平均含水率 50% 材の水分蒸発、水分傾斜は、非常に急である。

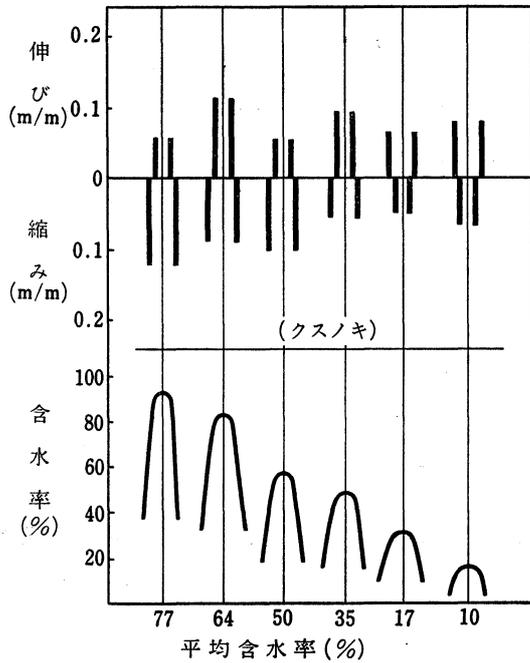


Fig. 7. 乾燥中の断面の歪みと水分分布

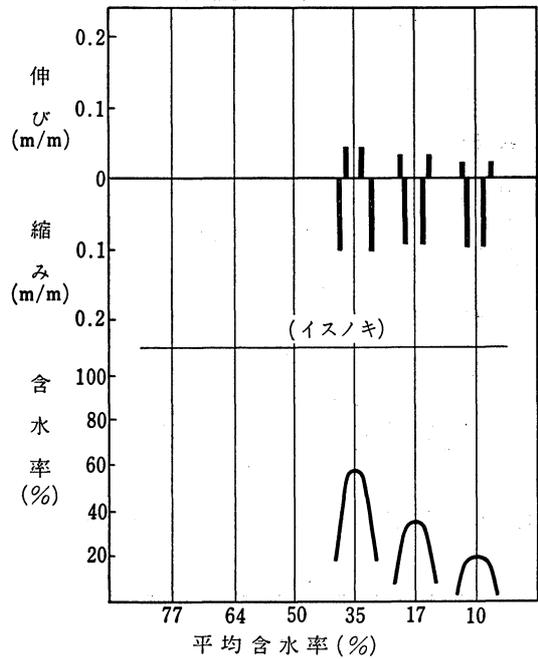


Fig. 8. 乾燥中の断面の歪みと水分分布

Table 1.

含水率 (%)	速度 乾燥法 樹種	平均乾燥速度(%/h)					
		恒温湿度乾燥			変温湿度乾燥		
		イタジイ	クスノキ	イスノキ	イタジイ	クスノキ	イスノキ
生材~10%		0.38	0.58	0.21	0.50	0.91	0.48
生材~FSP(%)		0.74	1.26	0.76	0.66	1.20	0.71
FSP~10(%)		0.15	0.19	0.14	0.32	0.53	0.31

ところが平均含水率 35% 付近になると、外層の引張歪みが減少をはじめ、さらに進行して含水率 17% で完全に反転して、圧縮歪みが材の外層部に、内層部に引張歪みが生じてきたのが認められる。これらの現象は、他の 2 樹種についても同様の結果がみとめられた。

3 乾燥速度

1 の (i), (ii) の実験で行った三樹種の乾燥経過を平均乾燥速度で表わす事にして、乾燥経過を 3 段階に区分し、その間の含水率の変動量と乾燥時間との比を平均乾燥速度として表わしたのが、Table 1 である。

恒温湿度乾燥法での乾燥経過を平均乾燥速度の面からみると、全含水率領域（生材～最終含水率 10%）ではイスノキが 0.21%/h、イタジイ 0.38%/h、クスノキ 0.58%/h の速さを測定した。この領域を更に細分化して、一次毛管水の蒸発作用とみなされる生材から繊維飽和点間の速さは、夫々、0.76, 0.74, 1.26%/h の値を示し、二次毛管水の拡散作用が主たる水分消失現象となる繊維飽和点から最終含水率 10% 以内の速度は、0.14, 0.15, 0.19 %/h と近似値を算出した。

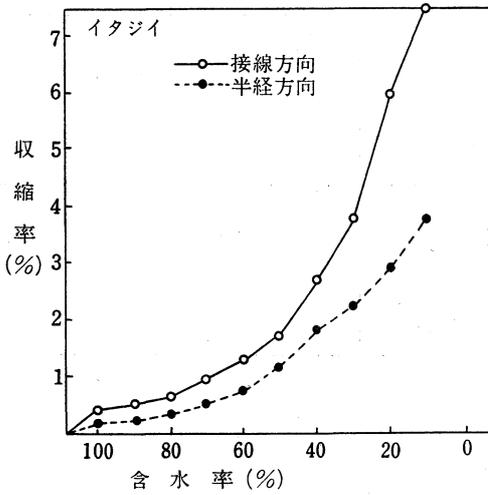


Fig. 9. 変温乾燥による含水率と収縮率との関係

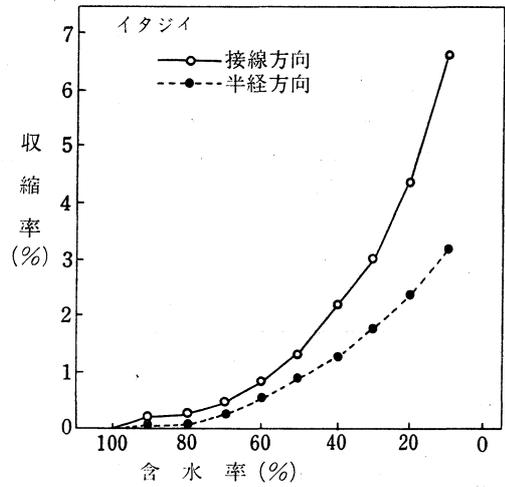


Fig. 10. 恒温乾燥による含水率と収縮率との関係

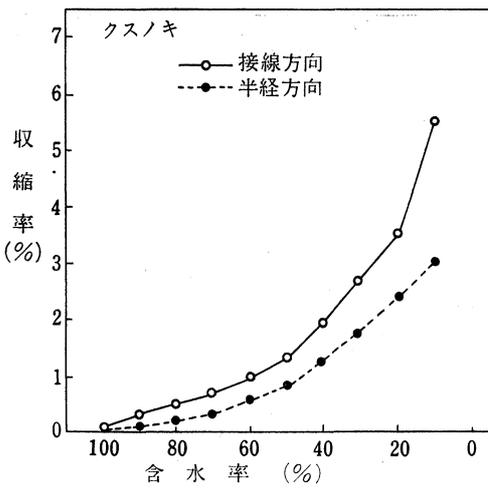


Fig. 11. 変温乾燥による含水率と収縮率との関係

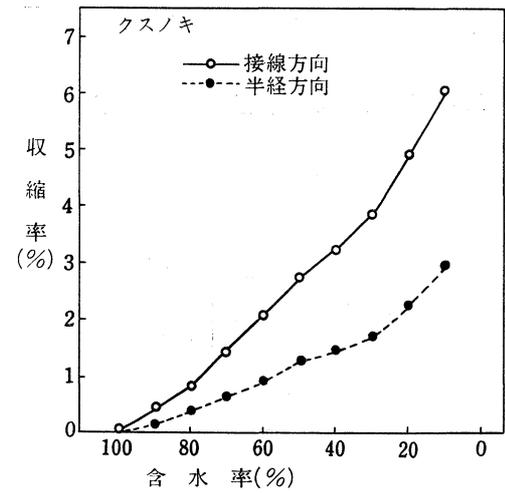


Fig. 12. 恒温乾燥による含水率と収縮率との関係

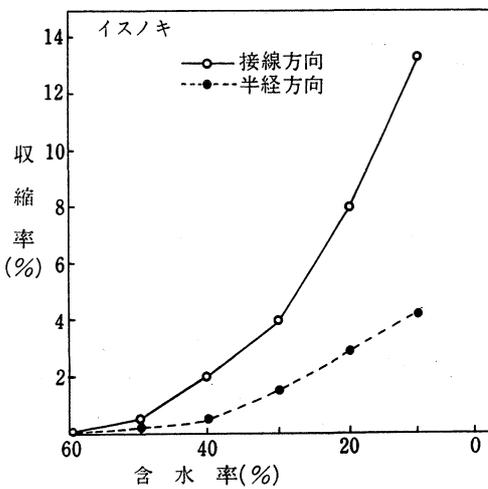


Fig. 13. 変温乾燥による含水率と収縮率との関係

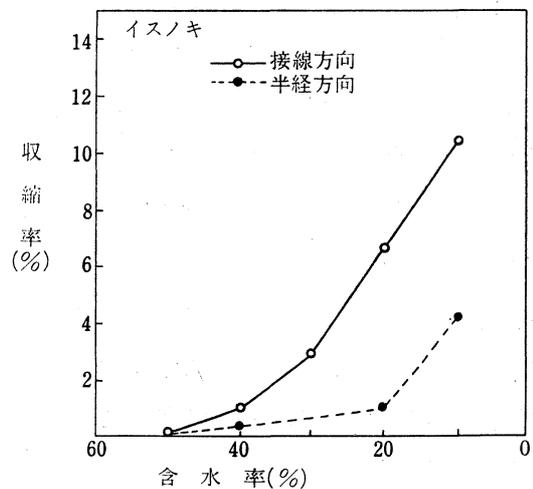


Fig. 14. 恒温乾燥による含水率と収縮率との関係

Table 2.

乾 燥 法	測定方向		半径方向(%)			接線方向(%)		
	測定位置	樹種	イタジイ	クスノキ	イスノキ	イタジイ	クスノキ	イスノキ
恒 温	中 央 部	木 口 部	2.716	3.113	5.122	3.952	5.623	10.555
			3.743	3.442	5.084	6.953	6.999	11.390
変 温	中 央 部	木 口 部	3.571	3.107	3.617	6.675	4.844	11.952
			5.032	3.593	4.127	7.998	5.905	13.998
平 均	中 央 部	木 口 部	3.429	3.111	4.027	5.586	5.233	11.553
			4.516	3.417	4.401	7.580	6.452	13.253

変温湿度乾燥法では、上記と同様の傾向をたどっているが、この場合、被乾材の含水率の変動に伴って処理温度を上昇させ、かつ dt を大きくしているので、全含水率領域で約2倍、一次毛管水の移動領域で変わらず、二次毛管水の移動領域でも2倍近くの速さを示した。

4 収 縮 性

三樹種の熱気乾燥法によって起る収縮性は被乾材が最も大きい動きを示す箇所、即ち、木口面付近の半径方向、接線方向の2方向について測定したが、その結果は Table 2, Fig. 9~14 の通りである。

但し、このデータは最終含水率を10%と設定したので高含水率から含水率10%に至るまでの収縮に関する数値で、全乾時に達するまでの動きでないことを断っておく。

5 被乾材表層部歪量

今回の実験では、ストレンゲージの設定法、供試材の採取木取りの方法についての不備もあり、初期の目的を達成することができなかったが、一応、材表面の繊維方向、半径方向の乾燥経過に伴った動きを歪量でとらえ、これを三樹種の曲げヤング係数（日本の木材から引用）を用いて応力換算して、材表面が収縮等で動くとき、どの程度の応力が作用するかを検討してみたが、その結果を、参考に Fig. 15~17 に付記しておく。

乾燥スケジュール表

(この度の実験に際して編成した3樹種の乾燥スケジュールを Table 3, 4, 5 に記しておく)

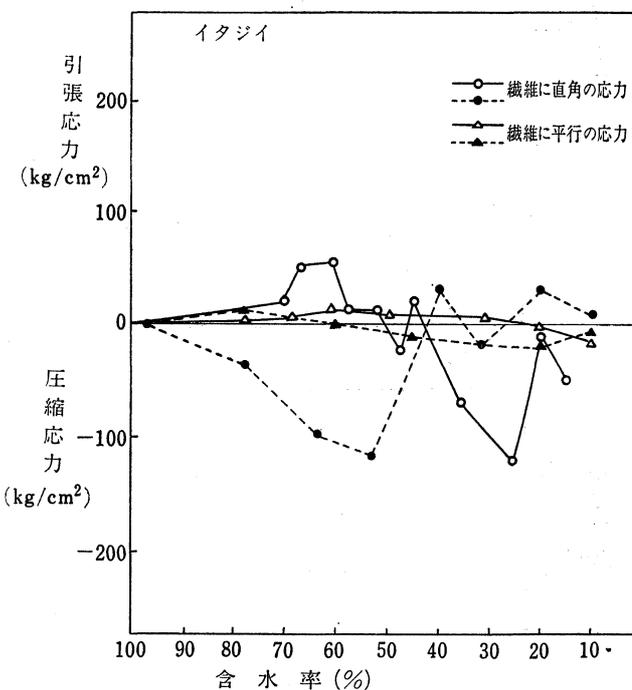


Fig. 15. 変温乾燥中に生ずる応力値

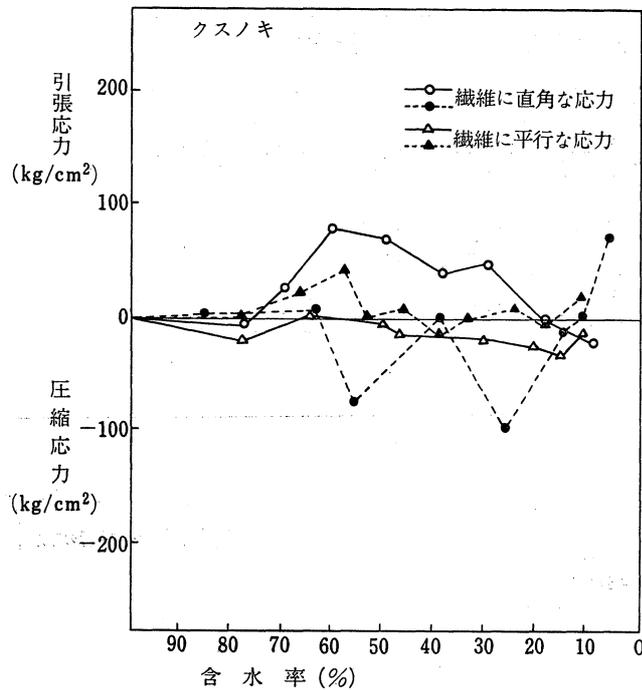


Fig. 16. 変温乾燥中に生ずる応力値
クスノキ

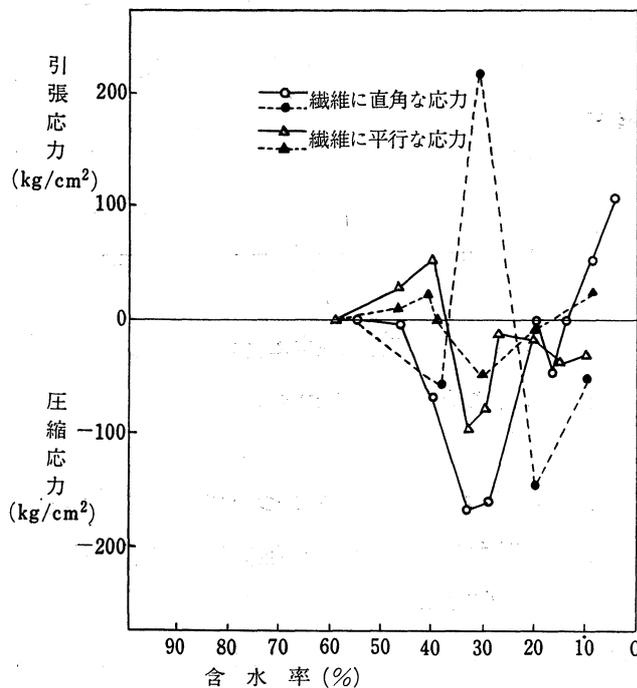


Fig. 17. 変温乾燥中に生ずる応力値

VI 考察及び結論

前記の結果を総合的に検討考察すると、先ず乾燥について

木材の熱気乾燥では、被乾材の比重が水分の移動、材質の変化等の乾燥法に影響を与える事は既知の通りであるが、これを乾燥速度の点から考察すると、被乾材の全含水率領域及び、一次毛管水の蒸発作用の領域内においては、平均乾燥速度は樹種間の比重の影響が大きく、その速さは比重に反比例の現象を呈した。

ところが、繊維飽和点 (FSP) 以下の二次毛管水の拡散作用の領域に入ると、速さは樹種間における比重の差が認められなくなり、お互いに近似値を示す傾向がみられる。

しかし、材質的な変化は含有水分が F.S.P 以下になると、何れの樹種にも生じてくるが、殊に比重の高い材ほど顕著に現われた。

イスノキを DBT=50°C, WBT=35°C で定常乾燥した場合の材質的变化を観察するとすでに乾燥初期の時点で、木口割れ、表面割れが認められた。これは乾燥初期の水分傾斜、乾燥応力の過剰発生で温湿度の不当処置から生じたものである。

これに対して、変温湿度乾燥法では、最終温度を 65°C に上げ、乾燥速度が 2 倍近く上昇して、大きな収縮 (接線方向で 13.3%) を示しているにも拘らず、材に損傷がみられなかった。この事は、乾燥の初期に低温から始

っているのが、表面蒸発、内部拡散による水分の移動が、人為的にスムーズに行われ、過度の水分傾斜を抑制し、乾燥応力を最少限にとどめているためであり、樹種間に適合した乾燥スケジュールが如何に重要であることを認識する資料ともなった。

Table 3. イタジイの乾燥スケジュール表

MC (%)	DBT (C°)	WBT (C°)	Δt (C°)	RH (%)
生材~70	40	38	2	88
70~60	42	40	2	88
60~55	45	43	2	88
55~50	48	46	2	89
50~45	48	45	3	84
45~40	50	46	4	79
40~36	50	45	5	74
36~33	54	48	6	71
33~30	56	48	8	64
30~28	58	50	8	64
28~25	58	48	10	57
25~23	60	50	10	57
23~20	60	48	12	51
20~18	63	50	13	49
18~15	65	50	15	44
15~10	67	50	17	40

Table 4. クスノキの乾燥スケジュール表

MC (%)	DBT (C°)	WBT (C°)	Δt (C°)	RH (%)
生材~70	40	38	2	88
70~60	42	40	2	88
60~55	42	39	3	82
55~50	45	42	3	83
50~45	50	51	4	79
45~40	54	48	6	71
40~35	57	49	8	64
35~30	60	50	10	57
30~25	62	50	12	52
25~20	64	52	12	53
20~18	64	51	13	50
18~15	66	51	15	45
15~13	68	52	16	43
13~12	68	51	17	40
12~10	70	52	18	39

Table 5. イスノキの乾燥スケジュール表

MC (%)	DBT (C°)	WBT (C°)	Δt (C°)	RH (%)
生材~30	45	43	2	88
30~27	45	42	3	83
27~24	48	45	3	84
24~20	50	46	4	79
20~18	55	49	6	71
18~15	58	50	8	61
15~13	60	47	13	48
13~11	65	49	16	41
11~	65	48	17	40

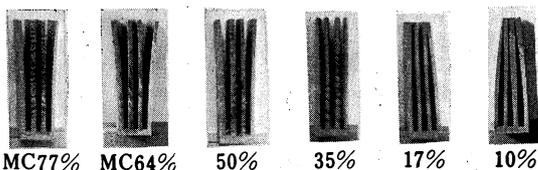


Photo 1. Prong test piece による含水率別の形態的变化 (イタジイ)

乾燥応力について

Prong test piece で乾燥応力を追跡した結果は、Fig. 6, 7, 8, 形態的变化は、Photo 1 に示したが、これによって乾燥の経過、含水率の低下に伴って生じる応力の発生、転換の現象が解明されたと思う。

それは、各被乾材の初期含水率には、それぞれ大きな差があるが、いずれも乾燥開始後30~50時間で平均含水率50%に達しており、ここで外層に生じた引張応力は最大となっている。このときの水分傾斜は非常に急である。この際、内部に発生した圧縮応力も最高の値を示した。一般にこの時期は永久変形の時期であり、かつ、この時の乾燥応力が、木材繊維の結合力をオーバーした場合、繊維に直角方向に対し応力は発生して木口割れ、表面割れを招く事になる。

よって、この応力を除去する処置をとらねばならぬが、更に発生した応力を Prong test piece の引張歪み、圧縮歪みの量と形態的变化からのみ推測するのではなく、数値的に算出する実験方法を考案する必要がある。そして更に乾燥が進行して、FSP 付近になると水分傾斜は比較的ゆるやかになり、正常の収縮活動を被乾材が起そうとする結果、材の外内層に応力の転位が生じて、外層に圧縮応力が、内層に引張応力と変じて、3樹種とも含水率10%あたりで最大値を示して明らかに現われている。但し、応力の転換がおこる含水率領域の区分が、35%→17%と間隔を開きすぎたので、どの点で転位したかを追跡できずに終わった。さらに、この区間を細分化して明らかにしておく

ことが望しいであろう。

この応力の転位の時期は、樹種に関係なく、被乾材の含水率が繊維飽和点から17%の間で行われるものと考えられる。

実験条件は異なるが、これは各氏の研究報告とも比較して、南九州産樹木においても、同様の傾向を示したものである。

今回は、木材の熱気乾燥による乾燥応力等の特性に関する実験資料をえたので、次はProng test pieceの平均圧縮歪み、引張歪み等から推定していた応力を数値的にとらえる実験を実施する計画である。

尚、本実験の遂行に際して、昼夜を問わず協力していただいた学生の吉鶴福三君に対して、厚く謝意を表する所である。

参 考 文 献

- 1) 梶田 茂：木材工学，養賢堂
- 2) 満久崇磨：木材の乾燥，森北出版
- 3) “ ”：木材工業ハンドブック
- 4) 貴島恒夫他：原色木材大図鑑，保育社
- 5) 津村利光他：応力の測定法 朝倉書店
- 6) 共和電業：歪ゲージによる歪測定（基礎編）
- 7) 寺沢真，佐藤庄一：日本産主要樹種の性質・乾燥性 I・II 林業試験場研究報告 153 (1963)，163 (1964)
- 8) 寺沢真，佐藤庄一：南洋材の性質（乾燥）林業試験場研究報告 218 (1968)
- 9) 松田健一：奄美大島産板椎の乾燥，鹿木試業務報告（S43）
- 10) 松田健一：南九州産広葉樹の乾燥性について，日本産業技術学会誌，13号（1971）

Summary

This report is on the drying stress of hard woods grown in South Kyushu district during Kiln Drying.

The drying stress occurred from difference of the shrinkage on woods, when the moisture content was changed.

Process of the drying stress in surface layer changed from tension side to compression side obtained by drying tests are summarized in Fig 2-8.