

木材の水分管理と品質安定に関する研究(第1報)

山之内清竜, 遠矢良太郎, 山角達也

Studies on Moisture Control and Quality Stabilization of Wood(I)

Kiyotatsu YAMANOUCHI, Ryotaro TOYA and Tatsuya YAMAZUMI

木材の水分管理と品質安定を図る方法として、木材乾燥最適化自動制御システムについて検討を行い、以下の成果を得た。

- (1) 今回検討する木材乾燥最適化自動制御システムでは、高含水率域(30%以上)の含水率を正確に測定する必要があるため、当システムはロードセルを利用した含水率測定装置を雰囲気温度で補正することで実用に供した。
- (2) サンプル材の材質や乾燥条件から被乾燥材全体の乾燥時の損傷および乾燥速度(含水率)を予測する手法を得た。この手法を利用して、現在広く使われている乾燥条件を損傷および乾燥速度の予測値から補正し、乾燥目的に応じた最適な乾燥条件を得る手法について検討した。
- (3) 木材乾燥作業が行っている経験的な予測や操作を規則化するとともに木材人工乾燥の工程を分析しモジュール化することにより、作業者の経験に左右されずに常に安定した人工乾燥を行える木材乾燥最適化自動制御プログラムを作成した。

1. はじめに

木材乾燥は、被乾燥材全体を代表する数枚のサンプル材の水分変化を測定することによって、予め決められた温湿度条件を変化させて行われている。このサンプル材の選出法には経験を必要とし、しかも数枚のサンプル材でばらつきのある被乾燥材全体の含水率を把握するには熟練を要する。このため、現在の木材人工乾燥では一連の乾燥操作マニュアルに従い乾燥を行うが、しかしそこにはある程度作業者の経験が必要とされる。本県の木材加工業はその企業形態の零細性から、木材乾燥専任の作業者は皆無に等しく、他部門との兼任となるのが現状であり、これが木材乾燥技術および作業者の経験の蓄積・育成を阻害する要因になっている。このため、効率的で安定した乾燥技術の開発による木製品の品質安定化に対する業界の要

望が強い。また、南九州産材の中には一般的に乾燥性の悪い樹種が多くみられる。これら乾燥性の悪い樹種の乾燥では、特に歩留りの向上という観点から安定した乾燥操作が求められる。

そこで本研究では、次の(1)(2)(3)について検討した。

- (1) 木材の乾燥中における水分測定技術の確立で、自動化システムで使用する木材含水率の自動測定法について検討を行った。
- (2) 南九州産材の乾燥性把握
現在広く使われている乾燥条件を損傷および乾燥速度の予測値から補正し、乾燥目的に応じた最適な乾燥条件を得る手法を検討した。
- (3) 木材乾燥の自動化・省力化技術の確立
(1)及び(2)の成果を利用して、企業で熟練度の高い木材乾燥技術者がいなくても木材乾燥の一定レベルの技術を提供できる木材乾燥最適化自

動制御システムについて検討を行った。

2. 実験方法

2.1 木材の乾燥中における水分測定技術の確立

2.1.1 重量測定装置(ロードセル)の精度試験

使用したロードセルは日本電気三栄社製9E01-L3-754-50K(容量50kgf):タイプ1と共和電業社製LC-1TFH(容量1tf):タイプ2のいずれも高温用である。

試験は常温及び加熱雰囲気での無負荷、負荷時の出力値ゼロバランスを測定し、その補正法について検討を行った。

2.1.2 電気抵抗オンライン含水率計の精度試験

使用した含水率計はCSAエレクトロニクス社製のMC-3型(測定範囲3~100%)である。

試験方法は、両木口をコーティングした厚さ18mmのイタジイに、長さ8mm(実効深さ6mm)と長さ14mm(実効深さ11mm)のセンサーを打ち込み、乾燥温度50℃一定で乾燥を行い、含水率センサーの深度別含水率値と全乾法含水率値との比較を行った。

2.2 南九州産材の乾燥性把握

木材人工乾燥の目的は、被乾燥材全体の含水率

を所定の含水率に均一に低下させることである。現在、木材人工乾燥法は目的の樹種と板厚の情報で決定される乾燥スケジュール(乾球温度と湿球温度の組合せ)をもとに行われている。しかしこの組合せ条件の設定は、被乾燥材全体から選び出した数枚のサンプル材の含水率経過に対応させているため、ばらつきのある被乾燥材全体の乾燥経過を主に経験的に予測して行っているのが現状である。そこで、作業者が任意に抽出したサンプル材の材質測定値から、サンプル材と被乾燥材全体との関係を考慮にいれた最適な乾燥スケジュールを作成する方法について検討を行った。

2.2.1 試験材の概要

試験材は径30~40cm、長さ1.4mの奄美大島産イタジイの丸太(20本)から板厚25mm、板幅120mm、長さ1mの寸法でだらびきした材を使用した。

2.2.2 測定項目

試験材は製材後、すぐに下記の乾燥前の各項目を測定後、片木口を銀ニスでコーティングし乾燥を行った。乾燥中は乾燥初期に木口割れと表面割れを観察し、全期間をとおして全試験材の重量(含水率)変化を測定した。また、乾燥終了後に下記の乾燥終了後の測定項目について測定を行った。

(a) 乾燥前及び乾燥中の測定項目

100℃乾燥スケジュール試験、さな割れ(数・長さ)、小試片比重、初期含水率、容積密度、樹心か

表1 イタジイ材の100℃乾燥スケジュール試験結果

木取り	初期含水率(%)	損傷の種類と段階			初期乾球温度(℃)	最終乾球温度(℃)	初期乾湿球温度差(℃)
		初期割れ	内部割れ	変形			
辺材柃目	107.0	1	5	8	45	70	2.5
辺材板目	114.0	4	5	8			

表2 実験で使用する乾燥スケジュール

初期乾球温度(℃)	初期乾湿球温度差(℃)	3.0	4.0	5.5
40		I		IV
45			II	
50		V		III

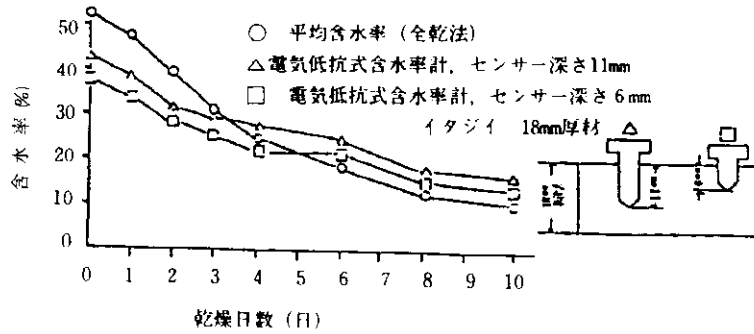


図1 電気抵抗式含水率計と全乾法含水率経過

らの距離, 乾燥中の測定項目, 各試験材の含水率(経過), 木口割れ, 表面割れ, 棧積み全体の含水率(経過), 乾球温度, 湿球温度, 風速

(b) 乾燥終了後の測定項目

辺材面積比, 辺材幅比, 狂い(幅ぞり・縦ぞり・ねじれ・波ぞり・重曲), 曲がり, 落ち込み量, 内部割れ, 木口割れ, 最終表面割れ, 繊維傾斜角, 節(数・長さ), 樹心の有無, 最終含水率, 平均年輪幅, 寸法変化, 木取り

2.2.3 乾燥スケジュール

今回の実験で用いる乾燥スケジュールを求めするため, 木材乾燥スケジュールの簡易決定法として知られている100℃乾燥スケジュール試験を行った結果を表1に示す。

この結果をもとに実験で使用する乾燥スケジュールを表2のとおり決定した。

2.3 木材乾燥の自動化, 省力化技術の確立

木材の人工乾燥は, 被乾燥材全体から数枚のサンプル材を選び出し, このサンプル材の乾燥経過を測定する。そして, ばらつきのある被乾燥材全体の乾燥経過を主に経験的に予測し, 乾球温度と湿球温度の階段状組合せ(乾燥スケジュール)を手動で設定して行われている。そこで, このような経験的な予測を規則化するとともに木材人工乾燥の工程を分析しモジュール化することにより, 作業者の経験に左右されずに常に安定した人工乾

燥を行える木材人工乾燥自動制御プログラムを検討した。

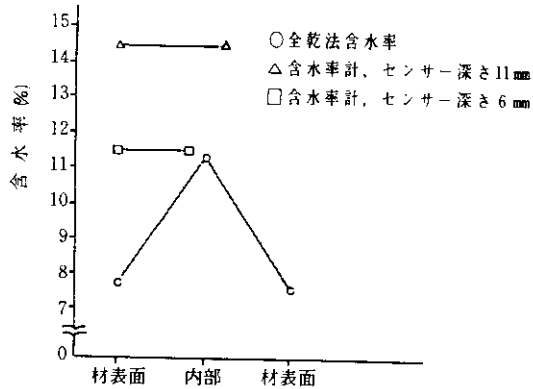


図2 含水率計と全乾法水分傾斜

3. 結果と考察

3.1 木材の乾燥中における水分測定技術の確立

今回検討した含水率測定装置はロードセルを利用したもの2機種と電気抵抗式のもの1機種の計3機種である。ロードセルタイプでは測定する周囲の温度変化により, ロードセルの出力値がドリフトすることが知られている。¹⁾ そこで, ロードセルの歪ゲージに近い部分のロードセル表面温度(40℃~80℃)とロードセル出力値のドリフト量(補正值)間で次の回帰式(補正式)を得た。この回

帰式(補正式)によりそれぞれのロードセルの出力値を補正するプログラムを作成した。

タイプ1 重量測定装置の補正式

$$WTt1 = -0.487014 + 0.0157101 \times DBT1 + WTd1 \dots\dots\dots(3.1)$$

ただし、

- WTt1: 補正したロードセル出力値(kgf)
- DBT1: ロードセルの表面温度(°C) (40~80°C)
- WTd1: 見かけのロードセル出力値(kgf)

タイプ2 重量測定装置の補正式

$$WTt2 = -3.91304 + 0.178318 \times DBT2 + WTd2 \dots\dots\dots(3.2)$$

ただし、

- WTt2: 補正したロードセル出力値(tf)
- DBT2: ロードセルの表面温度(°C) (40~80°C)
- WTd2: 見かけのロードセル出力値(tf)

電気抵抗式含水率計については、電気抵抗式含

水率計の含水率読み値と試験材全体の平均全乾法含水率の経過(図1)と板厚方向の全乾法含水率傾斜について比較した(図2)。

その結果、今回の試験では含水率30%以下では含水率計測定値は全乾法含水率とよく一致するが、30%以上では含水率計測定値が全乾法含水率に比べ、約10%程度低くなる傾向がみられた。

今回検討する木材乾燥自動化システムでは、高含水率域(30%以上)の含水率を正確に測定する必要があるため、当システムではロードセルを利用した含水率測定装置を利用することとした。

3.2 南九州産材の乾燥性把握

当実験ではまず、任意に抽出されたサンプル材の材質測定値からサンプル材と被乾燥材全体との関係を推定し、さらにこの推定値をもとにサンプル材と被乾燥材全体の乾燥損傷や乾燥速度を予測する方法について検討した。一方、各乾燥スケジュール間の乾燥条件と乾燥による損傷および乾燥速度の関係についても検討を加え、最終的には現在広く使われている乾燥条件を、求めた損傷およ

表3 測定項目の分類

木材の材質に関する要素群	挽肌、さな割れ(数・長さ)、小試片比重、初期含水率、容積密度、樹心からの距離、辺材面積比、辺材幅比、繊維傾斜角、節(数・長さ)、樹心の有無、最終含水率、平均年輪幅、木取り
乾燥による損傷に関する要素群	狂い(幅ぞり・縦ぞり・ねじれ・波ぞり・重曲)、曲がり、落ち込み量、内部割れ、木口割れ、表面割れ、寸法変化
乾燥速度に関する要素群	各試験材の含水率(経過)、棧積み全体の含水率(経過)
乾燥条件に関する要素群	乾球温度、湿球温度、風速

表4 重回帰分析に使用した説明変数と記号

変数名	記号	変数名	記号
初期含水率	MC0	最長さな割れ	SSW
平均年輪幅	HN	最大節長径	SF
節の数	FK	樹心の数	ZK
比重	HZ	サンプル材の木取り	KD
全乾重量	ZZ	容積密度	YM
板幅	IH	死に節長径和	SFW

表5 重回帰分析に使用した目的変数と記号

変数名	記号	変数名	記号
樹心からの距離	ZKY	板厚収縮率	AS
板幅収縮率	HS	落ち込み量	OKR
節部の最大割れ長さ	FWS	狂い	KI
乾燥速度*	KSI	内部割れの数	NW
木口割れの個数	KS	節割れ総長さ	FW
最終表面割れ個数	HY		

乾燥速度*:ここでは乾燥開始時から乾燥5日目までの間の速度(%/hr.)

び乾燥速度の予測値から補正して、乾燥目的に応じた最適な乾燥条件を得る手法について検討をした。ここでは乾燥スケジュールⅡおよびⅢによるイタジ材(丸太10本から採取した試験材190本)の乾燥試験結果から上記の手法について検討を行った経過について報告する。なお、その他の乾燥スケジュール内および乾燥スケジュール間の検討方法も同様に行った。

まず、試験材の各測定項目を表3のとおり木材の材質・乾燥による損傷・乾燥速度・乾燥条件の4要素群に分類した。

つぎに、木材の材質に関する要素群のうちのいくつかを説明変数として、乾燥による損傷および乾燥速度の各要素に関する重回帰式を求めた。今回の重回帰分析に用いた説明変数とその記号を表4に、目的変数とその記号を表5に示す。

また説明変数のうち初期含水率の累積百分率を表6(試験材190本)に示す。この材質に関する要素群の測定値累積百分率値は、任意に抽出したサンプル材と被乾燥材全体の関係を表している。

ここでは、得られた級番号が被乾燥材全体とサンプル材の関係を表すことになる。

得られた回帰式から適当と思われるものの一部を次に示す。

$$KSI = 0.539 + 0.002 \times MC0 - 0.605 \times YM + 0.002 \times KD \dots (3.3)$$

(R=0.84)

表6 初期含水率(MC0)の累積百分率(測定値)

乾燥スケジュールⅡ+Ⅲ				
級番号	級境界値(%)	度数	相対度数(%)	累積百分率(%)
1	47.0 ≤ MC0 < 55.0	2	1.1	1.1
2	55.0 ≤ MC0 < 63.0	1	0.5	1.6
3	63.0 ≤ MC0 < 71.0	1	0.5	2.1
4	71.0 ≤ MC0 < 79.0	6	3.2	5.3
5	79.0 ≤ MC0 < 87.0	15	7.9	18.2
6	87.0 ≤ MC0 < 95.0	32	16.8	30.0
7	95.0 ≤ MC0 < 103.0	42	22.1	52.1
8	103.0 ≤ MC0 < 111.0	38	20.0	72.1
9	111.0 ≤ MC0 < 119.0	51	26.8	98.9
10	119.0 ≤ MC0 < 127.0	2	1.1	100.0

表7 乾燥速度(KSI)の累積百分率(予測値)

乾燥スケジュールⅢ				
級番号	級境界値(%/hr.)	度数	累積度数	累積百分率(%)
1	0.22 ≤ KSI < 0.24	3	3.0	3.0
2	0.24 ≤ KSI < 0.26	4	4.0	7.0
3	0.26 ≤ KSI < 0.28	7	7.0	14.0
4	0.28 ≤ KSI < 0.3	8	8.0	22.0
5	0.30 ≤ KSI < 0.32	16	16.0	38.0
6	0.32 ≤ KSI < 0.34	15	15.0	53.0
7	0.34 ≤ KSI < 0.36	16	16.0	69.0
8	0.36 ≤ KSI < 0.38	15	15.0	84.0
9	0.38 ≤ KSI < 0.40	15	15.0	99.0
10	0.40 ≤ KSI < 0.42	1	1.0	100.0

表8 最終表面割れ個数(HY)の累積百分率(予測値)

乾燥スケジュールⅢ				
級番号	級境界値(個)	度数	累積度数	累積百分率(%)
1	HY < 1.2	47	47.0	47.0
2	1.2 ≤ HY < 3.4	29	29.0	76.0
3	3.4 ≤ HY < 5.6	9	9.0	85.0
4	5.6 ≤ HY < 7.8	4	4.0	89.0
5	7.8 ≤ HY < 10.0	2	2.0	91.0
6	10.0 ≤ HY < 12.2	2	2.0	93.0
7	12.2 ≤ HY < 14.4	2	2.0	95.0
8	14.4 ≤ HY < 16.6	3	3.0	98.0
9	16.6 ≤ HY < 18.8	1	1.0	99.0
10	18.8 ≤ HY < 21.0	1	1.0	100.0

$$HY=1.659+0.598 \times FK+0.003 \times SFW+4.089 \times ZK-1.341 \times KD \cdots (3.4)$$

$$(R=0.79)$$

ただし、R：重相関係数

さらに、サンプル材の材質に関する要素からそれぞれサンプル材の乾燥による損傷および乾燥速度を推定するため、各回帰式から予測される値の累積百分率を求めた。(表7、8)

このように、サンプル材の材質値からサンプル材の損傷程度と乾燥速度を各回帰式から予測し、予測値の累積百分率を求める。

求められた予測値の累積百分率値は、全材に対するサンプル材の乾燥による損傷程度(位置)や乾燥速度(位置)を推定する値となる。

次に、乾燥スケジュールⅡと乾燥スケジュールⅢの乾燥試験で用いた試験材の各測定項目の測定値を表9に示す。

スケジュールⅡで用いた試験材(以後Ⅱ)とスケジュールⅢで用いた試験材(以後Ⅲ)の材質を比較すると、ⅢはⅡに比べさな割れや節が多い傾向がみられる。また、全乾比重はわずかであるがⅡに比べⅢが大きく、容積密度や平均年輪幅はその平均値の差に有意差はみられない。

ⅡとⅢの乾燥による損傷の程度をみると、狂いと曲がりの平均値はⅡとⅢで5%有意が認められるが、その差はわずかで実際はほぼ同等と見なすべきであると思われる。表面割れ個数(乾燥初期)、最終表面割れ個数、1節当りの割れの個数、木口割れの個数と程度、内部割れの個数の平均値はⅡに比べⅢが有意差1%で大きく、厚収縮についてもⅡに比べⅢが大きい傾向がみられる。乾燥速度(乾燥初期)をみるとⅢはⅡより約1.5倍程度、乾燥が速い。

以上の結果から、ⅢはⅡに比べさな割れや節が多いが、材質的にはほぼ差がないと思われる。乾

燥損傷の程度は、全般的にⅡに比べⅢが大きい傾向がみられ、乾燥速度(乾燥初期)はⅢがⅡに比べ乾燥が速い。このように、ほぼ同等の材質のⅡとⅢで乾燥損傷程度と乾燥速度が異なるのは乾燥条件の違いにあると思われる。そこで、今回の試験結果とこれまで定性、定量的に知られている乾燥条件と乾燥の損傷並びに乾燥速度の関係を、ⅡとⅢの間で有意差が認められた各項目について表10のとおり0~1の範囲で重みづけをした。

表10は、例えば表面割れの個数は乾燥条件のうち初期乾湿球温度差に重み1.0で影響を受け、初期乾球温度に重み0.5の影響を受け、最終乾球温度には影響を受けないということを意味している。

以上の試験結果を利用して、乾燥条件の補正值を得る方法は以下の通りである。

乾燥条件の補正值の求め方

(1)サンプル材の材質値(初期入力)からサンプル材の乾燥損傷程度と乾燥速度を重回帰式で予測し、求めた予測値からサンプル材と被乾燥材全体の関係値(予測値の累積百分率に対応する級番号)を求める。

(例) 予測値累積百分率に対応する級番号

表面割れ個数：6 木口割れ個数：7
内部割れ個数：2 板厚収縮率：5
乾燥速度：9

(2)サンプル材と被乾燥材全体の関係値に、それぞれその項目が乾燥条件と関連する度合を重みとした数値(表10)を乗じた総和を重みの総和で除した、加重平均値を求めることで補正值を決定する。この場合、乾燥損傷と乾燥速度は別々に計算する。

(例)

初期乾球温度の場合

乾燥損傷補正值：

$$(6 \times 0.5 + 7 \times 0.5 + 2 \times 0.5 + 5 \times 1.0) / (0.5 + 0.5 + 0.5 + 1.0) = 5.0$$

乾燥速度補正值： $(6 \times 1.0 + 7 \times 1.0 + 2 \times 0.1 + 5 \times 0.1) / (1.0 + 1.0 + 0.1 + 0.1) = 6.227$

初期乾湿球温度差の場合

乾燥速度補正值：

乾燥損傷補正值： $(9 \times 0.5) / 0.5 = 9.0$

表9 試験材の各測定項目の測定値

	乾燥スケジュールⅡの試験材			乾燥スケジュールⅢの試験材			平均値の差の検定
	平均値	変動係数	標準偏差	平均値	変動係数	標準偏差	
さな割れ個数(個)	0.54	2.07	0.15	0.84	4.70	0.22	1%有意
さな割れ最大長さ(cm)	49.1	17534.8	13.95	100.5	56371.5	23.74	1%有意
さな割れ平均長さ(cm)	31.6	6519.4	8.51	66.9	34972.2	18.70	1%有意
節の個数(個)	1.60	3.88	0.21	2.28	10.36	0.32	1%有意
節の最大長径(mm)	30.3	1638.2	4.27	41.38	2980.9	5.46	1%有意
節の長径和(mm)	45.7	5507.4	7.82	109.2	38690.8	19.67	1%有意
節の短径和(mm)	15.6	541.5	2.45	28.98	1736.2	4.17	1%有意
全乾比重	0.720	0.022	0.050	0.766	0.051	0.071	1%有意
平均年輪幅(mm)	3.52	0.47	0.073	3.57	0.47	0.069	有意差無
生材時の板厚(mm)	24.88	0.46	0.071	25.29	0.21	0.046	1%有意
容積密度	0.58	0.015	0.040	0.594	0.021	0.045	有意差無
狂い(mm)	10.44	50.33	0.75	10.33	32.75	0.57	5%有意
曲がり(mm)	3.07	1.46	0.13	2.79	0.95	0.10	5%有意
落込み量(mm)	2.54	2.07	0.15	2.72	2.33	0.15	有意差無
表面割れ個数(個)	1.08	4.48	0.22	1.72	10.10	0.32	1%有意
表面割れの最大長さ(mm)	44.06	6846.57	8.72	29.94	5730.6	7.57	有意差無
最終表面割れ個数(個)	0.86	2.91	0.18	2.93	30.93	0.56	1%有意
節割れの個数(個)	0.91	2.64	0.17	2.12	35.32	0.50	1%有意
節割れの最大長さ(mm)	23.83	1500.5	4.08	39.3	6222.3	7.89	1%有意
1節当りの割れ個数(個)	0.56	—	—	0.92	—	—	—
木口割れの個数(個)	0.06	0.05	0.02	24.97	458.23	2.14	1%有意
木口割れの最大長さ(mm)	1.29	38.30	0.65	17.34	74.55	0.86	1%有意
内部割れの個数(個)	0.47	2.86	0.18	1.21	6.39	0.25	1%有意
板厚収縮率(%)	13.32	26.24	0.54	14.39	39.39	0.63	10%有意
板幅収縮率(%)	6.47	1.34	0.12	6.91	1.24	0.11	有意差無
乾燥速度(%/hr.)	0.2121	0.087	0.031	0.3318	0.024	0.049	1%有意
初期乾球温度(℃)		45.0			50.0		—
最終乾球温度(℃)		70.0			70.0		—
初期乾湿球温度差(℃)		4.0			5.5		—

表10 損傷程度・乾燥速度と乾燥条件の関連する度合(重み0~1)

項目	初期乾球温度	最終乾球温度	初期乾湿球温度差	項目	初期乾球温度	最終乾球温度	初期乾湿球温度差
表面割れ個数(個)	0.5	0	1.0	内部割れ個数(個)	0.5	1.0	0.1
最終表面割れ個数(個)	0.8	0.8	0.5	板厚収縮率(%)	1.0	1.0	0.1
1節当りの割れ個数(個)	0.8	0.8	0.5	乾燥速度(%/hr.)	1.0	1.0	0.5
木口割れ個数(個)	0.5	0.1	1.0				

表11 樹種・板厚別の基本乾球温度区分及び基本乾湿球温度差区分²⁾⁴⁾

樹種名	板厚 2.5cm		板厚 5.0cm	
	基本乾球温度区分	基本乾湿球温度差区分	基本乾球温度区分	基本乾湿球温度差区分
アカガシ	T 3	2	T 2	1
ミズナラ	T 4	2	T 3	1
シイノキ	T 3	4	T 2	3
イスノキ	T 3	1	—	—
ケヤキ	T 8	3,4	T 5	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表12(a) 基本乾球温度区別の乾球温度²⁾⁴⁾

段階	含水率の範囲 (%)	基本乾球温度区分 (°C)						
		T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7
1	30	40	40	45	45	50	50	55
2	30 ~ 25	40	45	50	50	55	55	60
3	25 ~ 20	40	50	55	55	60	60	65
4	20 ~ 15	45	55	60	60	65	65	70
5	15 ~	50	65	70	80	70	80	70

表12(b) 基本乾球温度区別の乾球温度²⁾⁴⁾

段階	含水率の範囲 (%)	基本乾球温度区分 (°C)						
		T 8	T 9	T 10	T 11	T 12	T 13	T 14
1	~ 30	55	60	60	65	70	75	80
2	30 ~ 25	60	65	65	70	75	80	90
3	25 ~ 20	65	70	70	70	75	80	90
4	20 ~ 15	70	70	75	75	80	90	95
5	15 ~	80	70	80	80	80	90	95

表13(a) 区別の乾球温度

段階	含水率の範囲 (%)	乾球温度区分 (°C)						
		T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7
1	~ 30	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo
2	30 ~ 25	Ydo	Ydo×1.125	Ydo×1.111	Ydo×1.111	Ydo×1.1	Ydo×1.067	Ydo×1.091
3	25 ~ 20	Ydo	Ydo×1.25	Ydo×1.222	Ydo×1.222	Ydo×1.2	Ydo×1.067	Ydo×1.182
4	20 ~ 15	Ydo×1.125	Ydo×1.375	Ydo×1.333	Ydo×1.333	Ydo×1.3	Ydo×1.2	Ydo×1.273
5	15 ~	Ydo×1.25	Ydo×1.625	Ydo×1.556	Ydo×1.778	Ydo×1.4	Ydo×1.2	Ydo×1.273

表13(b) 区別の乾球温度

段階	含水率の範囲 (%)	乾球温度区分 (°C)						
		T 8	T 9	T 10	T 11	T 12	T 13	T 14
1	~ 30	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo	Ydo
2	30 ~ 25	Ydo×1.091	Ydo×1.083	Ydo×1.083	Ydo×1.077	Ydo×1.071	Ydo×1.067	Ydo×1.125
3	25 ~ 20	Ydo×1.182	Ydo×1.167	Ydo×1.167	Ydo×1.077	Ydo×1.071	Ydo×1.067	Ydo×1.125
4	20 ~ 15	Ydo×1.273	Ydo×1.167	Ydo×1.25	Ydo×1.154	Ydo×1.143	Ydo×1.2	Ydo×1.188
5	15 ~	Ydo×1.455	Ydo×1.167	Ydo×1.333	Ydo×1.231	Ydo×1.143	Ydo×1.2	Ydo×1.188

表14 基本乾湿球温度差区分別の乾湿球温度差²⁾⁴⁾

段階	基本乾湿球温度差区分(℃)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.5	2.0	3.0	4.0	5.5	8.5	11	14
2	2.0	3.0	4.0	5.5	8.0	11	17	20
3	3.0	4.5	6.0	8.5	11	17	22	28
4	5.5	8.0	11	14	20	28	28	28
5	14	17	20	22	28	28	28	28
6	28	28	28	28	28	28	28	28

表15 区分別の乾湿球温度

段階階	乾湿球温度区分(℃)			
	1	2	3	4
1	Ydwo	Ydwo	Ydwo	Ydwo
2	Ydwo×1.333	Ydwo×1.5	Ydwo×1.333	Ydwo×1.375
3	Ydwo×2.333	Ydwo×2.25	Ydwo×2.0	Ydwo×2.125
4	Ydwo×3.667	Ydwo×4.0	Ydwo×2.833	Ydwo×2.75
5	Ydwo×5.667	Ydwo×5.5	Ydwo×3.667	Ydwo×3.5
6	Ydwo×7.333	Ydwo×7.0	Ydwo×4.667	Ydwo×4.25
7	Ydwo×9.333	Ydwo×8.5	Ydwo×5.667	Ydwo×5.0
8	Ydwo×11.33	Ydwo×10.0	Ydwo×6.667	Ydwo×5.0
9	Ydwo×13.33	Ydwo×10.0	Ydwo×6.667	Ydwo×5.0
10	Ydwo×18.67	Ydwo×14.0	Ydwo×9.333	Ydwo×7.0

段階	乾湿球温度区分(℃)			
	5	6	7	8
1	Ydwo	Ydwo	Ydwo	Ydwo
2	Ydwo×1.4	Ydwo×1.3	Ydwo×1.273	Ydwo×1.214
3	Ydwo×2.0	Ydwo×1.6	Ydwo×1.545	Ydwo×1.429
4	Ydwo×2.5	Ydwo×2.0	Ydwo×1.818	Ydwo×1.429
5	Ydwo×3.1	Ydwo×2.4	Ydwo×1.818	Ydwo×1.429
6	Ydwo×3.6	Ydwo×2.4	Ydwo×1.818	Ydwo×1.429
7	Ydwo×3.6	Ydwo×2.4	Ydwo×1.818	Ydwo×1.429
8	Ydwo×3.6	Ydwo×2.4	Ydwo×1.818	Ydwo×1.429
9	Ydwo×3.6	Ydwo×2.4	Ydwo×1.818	Ydwo×1.429
10	Ydwo×5.1	Ydwo×3.3	Ydwo×2.545	Ydwo×2.0

表16 (初期含水率×2/3) : Sによる含水率区分の基準

区分	初期含水率×2/3 : S (%)
T	$S \leq 20$
A	$20 < S \leq 35$
B	$35 < S \leq 40$
C	$40 < S \leq 50$
D	$50 < S \leq 60$
E	$60 < S \leq 70$
F	$70 < S \leq 80$
G	$80 < S$

但し, U : 初期含水率, S : 初期含水率×2/3

表17 区分T時の含水率範囲

段階	初期含水率区分(%)
	T
1	U+15~U+10
1.5	U+10~U+5
2	U+5~U
2.5	U~U-5
3	U-5~U-10
4	U-10~U-15
5	U-15~U-20
6	U-20~

このように求められた補正値の意味は、次のとおりである。

全ての補正値が0.5の場合はサンプル材は被乾燥材の平均的な乾燥性を示す材と見なされるため、乾燥条件の補正は行わないことになる。また、乾燥損傷の補正値が0.5より小さければ、サンプル材は被乾燥材の平均より乾燥損傷が小さいとみなされ、乾燥条件は厳しい方向に補正される。また乾燥損傷の補正値が0.5より大きければ、サンプル材は被乾燥材の平均より乾燥損傷が大きいと見なされ、乾燥条件は緩やかな方向に補正される。

一方、乾燥速度の補正値が0.5より小さければ、サンプル材は被乾燥材の平均より乾燥速度が小さいと見なされ、乾燥条件は厳しい方向に補正される。また、乾燥速度の補正値が0.5より大きければ、サンプル材は被乾燥材の平均より乾燥速度が大きいと見なされ、乾燥条件は緩やかな方向に補正される。

この乾燥損傷と乾燥速度の補正値は通常反比例

するものと考えられるが、どちらに近い補正値を採用するかは乾燥オペレーターの判断(乾燥目的)に委ねられる。そこで、求めた乾燥損傷の補正値と乾燥速度の補正値の間隔を10分割し、乾燥の速さより乾燥歩留りの向上に重点をおく場合は乾燥損傷の補正値に近い値を選択し、乾燥歩留りの向上より乾燥速度を早めたい場合は乾燥速度の補正値に近い値を採用する。その中庸の場合は、その中央値付近の値を選択することになる。

以上の補正値を求める方法は、コントローラ内のアスキーユニットにbasic言語を使用して、操作性を重視しプログラムした。

3.3 木材乾燥の自動化、省力化技術の確立

3.3.1 木材乾燥自動制御装置の概要

今回構築した木材乾燥制御装置の構成図を図3(a)に、制御の流れを図3(b)に示す。

3.3.2 木材乾燥自動制御プログラム

木材乾燥工程の基本制御則を修正して作成した木材乾燥自動制御プログラムのフロー図を図4に、

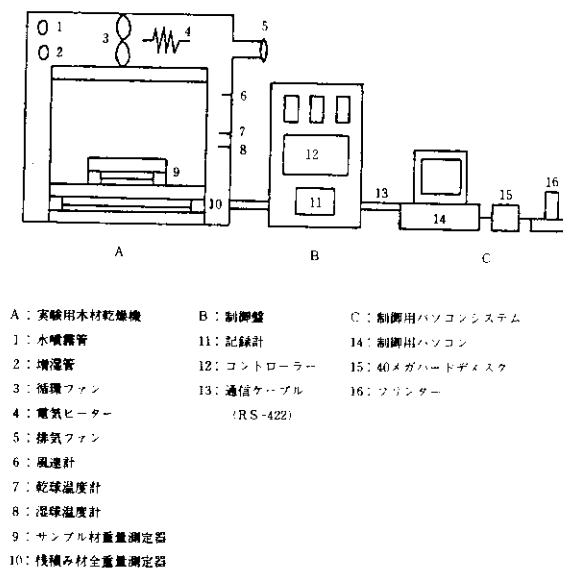


図3(a) 木材乾燥制御装置の構成

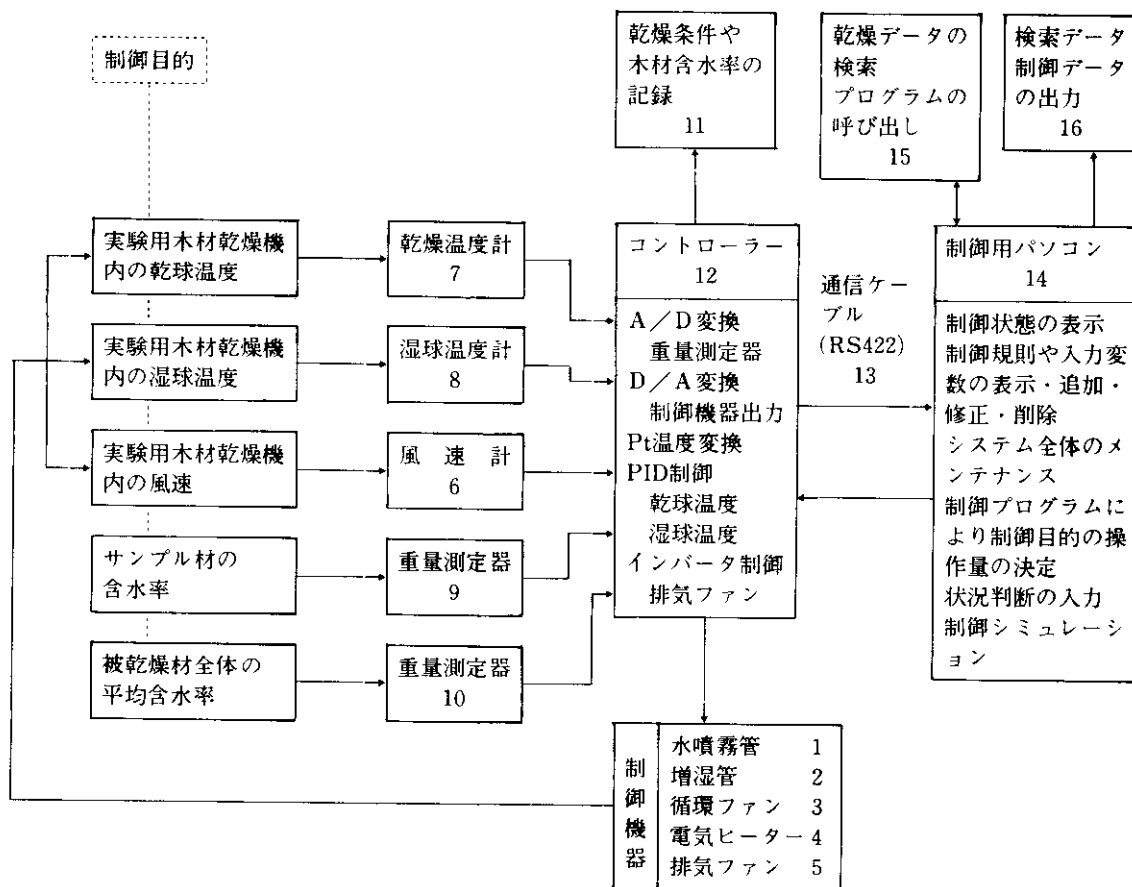


図3(b) 制御の流れ

木材乾燥工程の模式図を図5に示す。図4, 図5をもとにして作成した制御全体のプログラムは、コントローラ内のメモリーにラダーを使用して入力した。作成したプログラムの一部を図6に示す。

従来の木材乾燥は樹種・板厚・初期含水率から決定される乾球温度及び乾湿球温度差条件を、木材含水率に応じて階段状に設定して行われている。

しかし、設定条件は本来はなめらかな曲線になるような変化のさせ方が望ましく、各条件の設定に式(3.5), (3.6)の曲線がよく当てはまるとされている。²⁾

乾球温度関数

$$D = \exp(a - b \cdot u) \dots \dots (3.5)$$

乾湿球温度差関数

$$DW = \exp(c - d \cdot u) \dots \dots (3.6)$$

ただし、

- D : 乾球温度 (°C)
- DW : 乾湿球温度差 (°C)
- u : 含水率 (%)

a, b, c, d: 樹種, 含水率などによって決まる定数

久田³⁾は、乾燥スケジュールと木材の物理的性質等との相関性を検討し、木材の物理的性質等から予測される式(3.5), (3.6)の定数a, b, c, dの適合性について解析を行なっている。

今回は、まず前節で求めた乾燥スケジュールの

含水率測定装置により自動計測されたサンプル材の含水率（サンプル材の材質から推定される被乾燥材全体の含水率を考慮した値）をもとに乾球温度と乾湿球温度差をフィードバック制御する。また、データベースに蓄積された実験データの中からサンプル材の乾燥速度（自動計測値）に近似したデータを選択し、サンプル材の乾燥経過予測と被乾燥全材との関係を表示する。

初期乾湿球温度差を変化させるタイミングは原則として含水率が初期含水率の2/3になった時期とする。

ただし、表層部の引張り応力が減少する時期が前後する既知の樹種については、その時期に応じて予めプログラムしておく。また、この間作業者の目視により材の割れ等が観察された場合は、割れの程度(大, 中, 小等)を手入力することにより初期条件及び乾湿球温度差を変化させるタイミングを自動的に変える。

初期乾球温度は基本的に含水率が35%程度になるまでは変化させない。

乾湿球温度は含水率を変数とする乾湿球温度差関数で制御する。

乾球温度は含水率を変数とする乾球温度関数で制御する。

含水率が目的含水率になったら乾湿球温度差を目的含水率より2%低い平衡含水率になる値に設定。

含水率が目的含水率より2%低くなったら乾湿球温度差を目的含水率より2%高い平衡含水率になる値に設定。

含水率が目的含水率になれば終了。

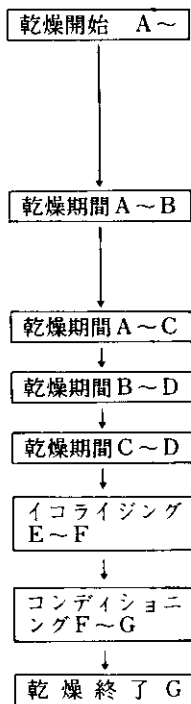


図4 制御規則(木材乾燥自動制御プログラム)のフロー図

補正值をもとに式(5), (6)の定数a, b, c, d の最適値を求める手法について検討し、その結果をフロー図で図7に示す。図7をもとに作成した制御に必要な設定値を求めるプログラムは、コントローラ内のアスキーユニットにbasic 言語でコーディングした。

式(3.5), (3.6)の定数a, b, c, d の最適値を求める手法を図7に従って以下説明する。

(1)初期値の入力

乾燥開始前にコントローラに手入力する。

(2)樹種別の基本乾球温度区分及び基本乾湿球温度差区分の決定

現在は、被乾燥材の樹種と板厚の情報をもとに、表11²⁾⁴⁾の基本乾球温度区分(乾球温度条件)と基本乾湿球温度差区分(乾湿球温度差条件)から各区分が決定される。

今回も従来利用されている基本初期乾球温度区

分と基本乾湿球温度差区分をまず利用してそれぞれの区分値を決定する。

(3)初期乾球温度の補正

現在は、表13より得た基本乾球温度区分値をもとに表12(a), 表12(b)より段階別(含水率範囲別)の乾球温度条件が決まる²⁾⁴⁾。

今回は、まず表11の基本乾球温度区分値別に下式で初期乾球温度(段階1の乾球温度)を補正する。

$$Y_{do} = 42.5 + spn - 5Xd \dots \dots (3.7)$$

ただし、

基本乾球温度区分が

T1, T2の場合 spn=0	T11の場合 spn=25
T3, T4の場合 spn=5	T12の場合 spn=30
T5, T6の場合 spn=10	T13の場合 spn=35
T7, T8の場合 spn=15	T14の場合 spn=40

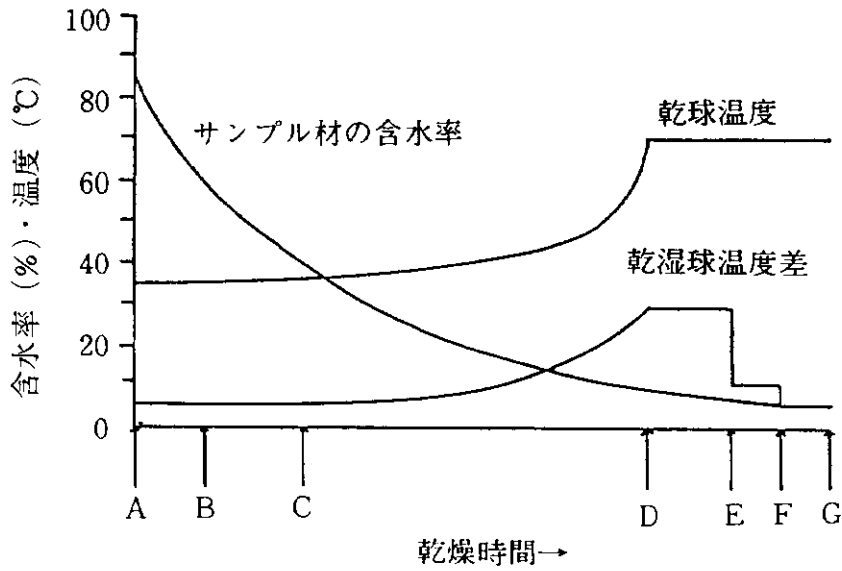


図5 木材乾燥工程の模式図

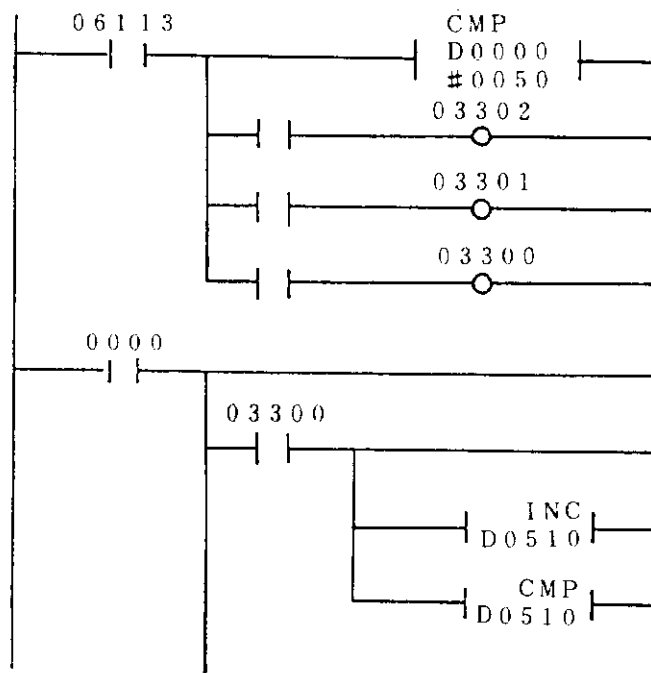


図6 木材乾燥自動制御プログラム (ラダー図)の一部

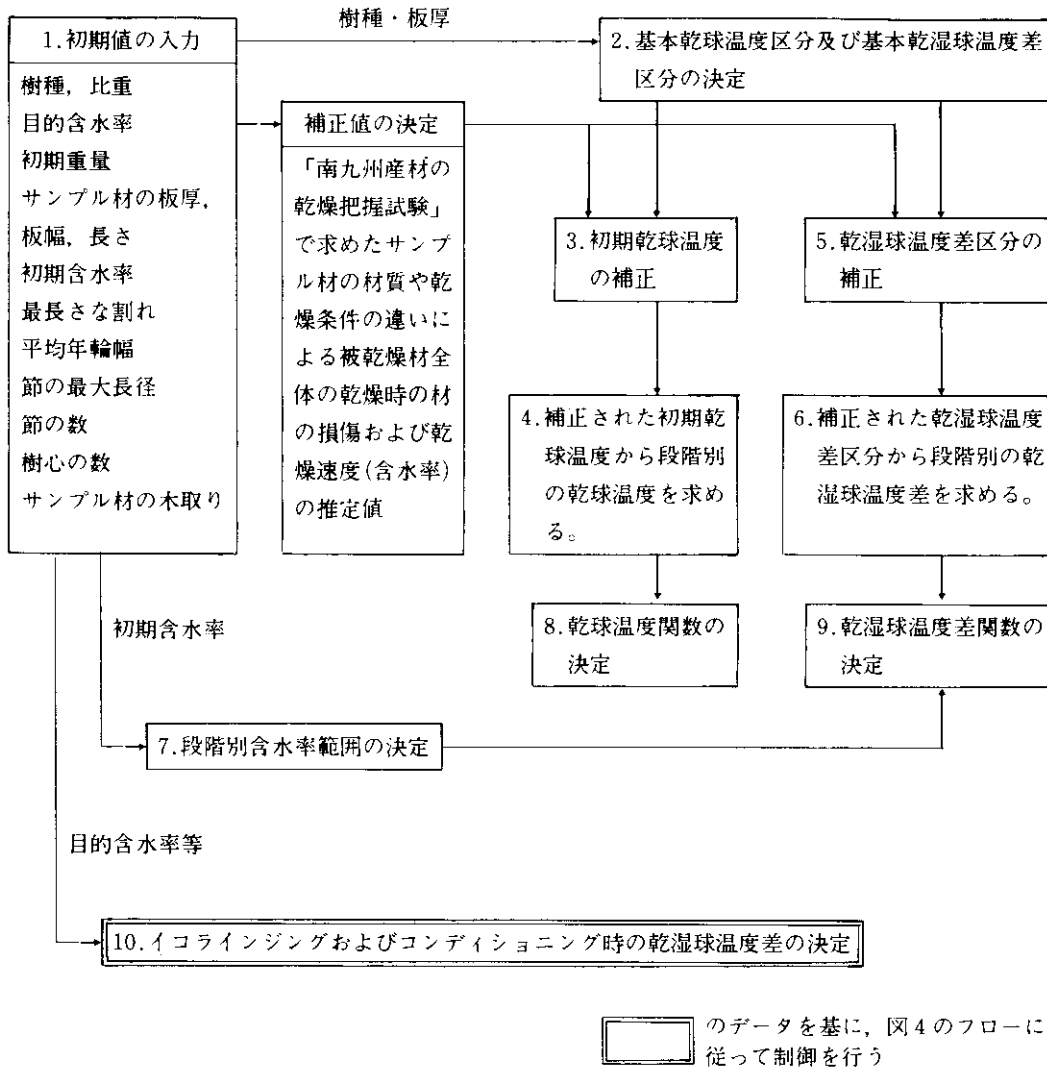


図7 制御規則(木材乾燥自動制御プログラム)のフロー図

T9, T10の場合spn=20

Ydo : 補正された初期乾球温度(℃)

Xd : 補正值(0 ≤ Xd ≤ 1)

(4)補正された初期乾球温度から段階別の設定乾球温度を求める方法

次に、式(3.7)で補正した初期乾球温度(Ydo)を表13(a), 表13(b)に代入して段階別の設定乾球温度を求める。

(5)乾湿球温度差区分の補正

表14に示すように、現在の乾湿球温度差条件は、

基本乾湿球温度差区分別に樹種と板厚に対応した8パターンがあり、この中から選択されている。今回は、次式により従来の乾湿球温度差区分値を8つの定数(n)でなく、0.5 ≤ Ydw 0 ≤ 8.5の変数とした。

$$Ydw 0 = n + 0.5 - Xdw \dots \dots (3.8)$$

ただし、

Ydw 0 : 補正された乾湿球温度差区分

表18 含水率区分および段階

段階	含水率区分 (%)						
	A	B	C	D	E	F	G
1	U ~ S	U ~ S	U ~ S	U ~ S	U ~ S	U ~ S	U ~ S
2	S ~ S-5	S ~ S-5	S ~ S-5	S ~ S-10	S ~ S-10	S ~ S-10	S ~ S-10
3	S-5 ~ S-10	S-5 ~ S-10	S-5 ~ S-10	S-10 ~ S-15	S-10 ~ S-20	S-10 ~ S-20	S-10 ~ S-20
4	S-10 ~ S-20	S-10 ~ S-20	S-10 ~ S-20	S-15 ~ S-25	S-20 ~ S-25	S-20 ~ S-30	S-20 ~ S-30
5	S-20 ~ S-25	S-20 ~ S-25	S-20 ~ S-25	S-25 ~ S-30	S-25 ~ S-30	S-30 ~ S-35	S-30 ~ S-40
6	S-25 ~	S-25 ~	S-25 ~ S	S-30 ~	S-30 ~	S-35	S-40 ~

但し、U：初期含水率，S：初期含水率×2/3

X_{dw} : 補正值 (0 ≤ X_{dw} ≤ 1)

n : 基本乾湿球温度差区分
(n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

(6)補正された乾湿球温度差区分値から段階別の乾湿球温度差を求める方法

次に、式 (3.8) で補正した初期乾湿球温度差 (Y_{dw0}) を表15に代入して段階別の設定乾湿球温度差を求める。

(7)乾湿球温度差条件の段階別含水率範囲の決定
まず、「初期値の入力」の項目で入力された初期含水率値(U)に2/3を乗じた値(S)が、表16の含水率区分表において、どの区分に入るか調べる。

次に、選択された含水率区分に従って表17から段階別の含水率範囲が決定される。ただし、区分がTの場合は表18の含水率区分とする。

(8)~(9)乾球温度関数の決定および乾湿球温度差関数の決定

(2), (3), (4)の手順で得られた段階別 (含水率範囲別) の設定乾球温度から作成した段階状折れ線グラフ (X軸に含水率, Y軸に乾球温度にとった片対数方眼紙上) と, (2), (5), (6), (7)の手順で得られた段階別 (含水率範囲別) の設定乾湿球温度差から作成した階段状折れ線グラフ (X軸に含水率, Y軸に乾湿球温度差をとった片対数方眼紙上) を図8に示す。

それぞれの階段状折れ線グラフから次の要領で各関数を求める。まずそれぞれの階段状折れ線グ

ラフ上に○印点(立ち上がり点)と●印点(設定点)をプロット(座標計算)する。次にこの2点のY軸上(温度)での中点(×点)をプロット(座標計算)する。そして、それぞれのプロット(座標値)から最小2乗法で○印点の回帰式 fd1(x)および fdw1(x), ●印点の回帰式 fd2(x)および fdw2(x), ×点の回帰式 fd3(x)および fdw3(x)を求める。求められた回帰式は下記の意味をもつ乾球温度関数および乾湿球温度差関数となる。

fd1(x)：○印点の回帰式 —— 緩やかな乾球温度条件, 設定条件の下限リミッター

fd2(x)：●印点の回帰式 —— 厳しい乾球温度条件, 設定条件の上限リミッター

fd3(x)：×点の回帰式 —— 標準的な乾球温度条件

fdw1(x)：○印点の回帰式 —— 緩やかな乾湿球温度差条件, 設定条件の下限リミッター

fdw2(x)：●印点の回帰式 —— 厳しい乾湿球温度差条件, 設定条件の上限リミッター

fdw3(x)：×点の回帰式 —— 標準的な乾湿球温度差条件

(10)イコライジングおよびコンディショニング時の乾湿球温度差の決定

イコライジング時の乾湿球温度差は目的含水率

表19 最終乾球温度(乾球温度区分)別のA, Bの値

乾球温度区分	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7
A	22.7257	20.9624	20.4263	19.3367	20.4263	19.3367	20.4263
B	6.20916	5.40099	5.19472	4.83367	5.19472	4.83367	5.19472

乾球温度区分	T 8	T 9	T10	T11	T12	T13	T14
A	19.3367	20.4263	19.3367	19.3367	19.3367	18.3752	17.9993
B	4.83367	5.19472	4.83367	4.83367	4.83367	4.54111	4.43184

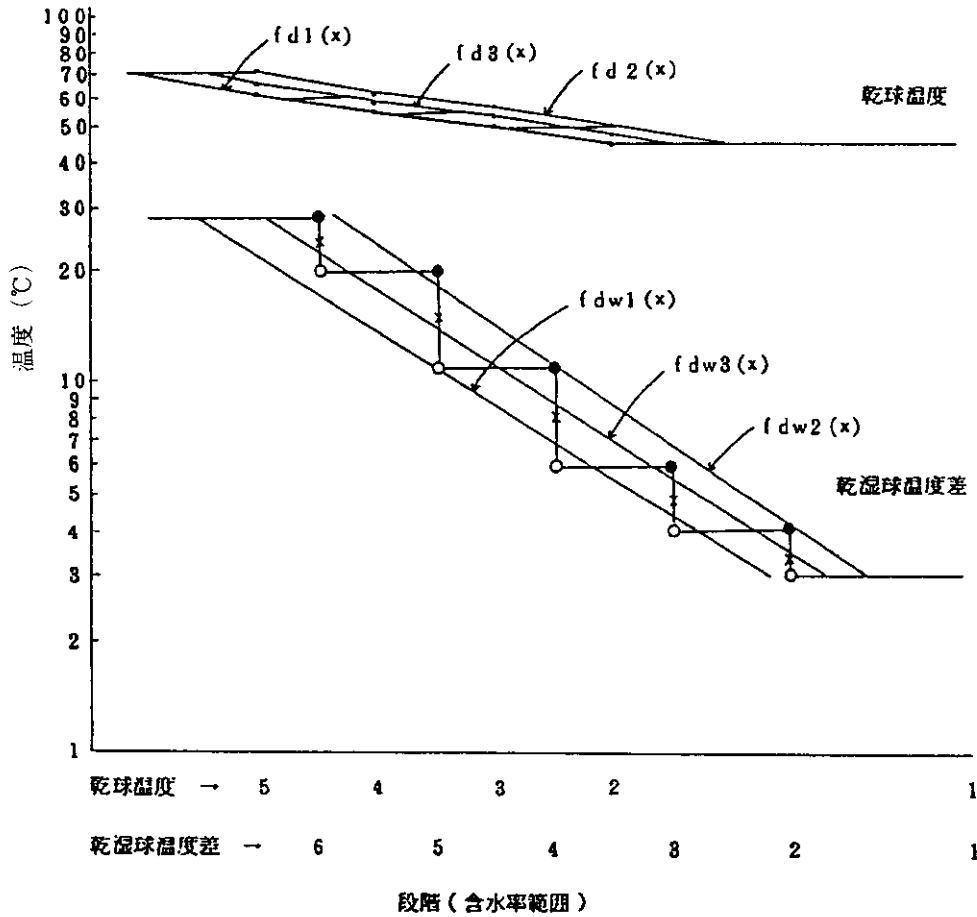


図8 乾球温度, 乾湿球温度差と段階の階段状折れ線グラフ

より2%低い平衡含水率になるように, またコン
 ディショニング時の乾湿球温度差は目的含水率よ
 り2%高い平衡含水率になるように設定するため²⁾,
 それぞれ表19を参照し次式で求める。

イコライジング時の乾湿球温度差

$$Y_w = e^{(A-(EMC-2))/B} \dots \dots \dots (3.9)^{5)6)}$$

コンディショニング時の乾湿球温度差

$$Y_w = e^{(A-(EMC+2))/B} \dots \dots \dots (3.10)^{5)6)}$$

ただし、

A, B : 最終乾球温度（乾球温度区分）によって決まる定数

Yw : 乾湿球温度差

EMC : 目的含水率

e : 自然対数の底数

4. おわりに

木材乾燥最適化自動システムについて検討を行い、以下の成果を得た。

(1)今回検討する木材乾燥最適化自動システムでは、高含水率域(30%以上)の含水率を正確に測定する必要があるため、当システムはロードセルを利用した含水率測定装置を雰囲気温度で補正することで実用に供した。

(2)サンプル材の材質や乾燥条件から被乾燥材全体の乾燥時の損傷および乾燥速度(含水率)を予測する手法を得た。この手法を利用して、現在広く使われている乾燥条件を損傷および乾燥速度の予測値から補正し、乾燥目的に応じた最適な乾燥条件を得る手法について検討した。

(3)乾燥操作の経験的な予測を規則化するとともに木材人工乾燥の工程を分析しモジュール化することにより、作業者の経験に左右されずに常に安定した人工乾燥を行える木材人工乾燥自動制御プログラムを作成した。

(4)操作性の向上を図るため、対象樹種別に制御に必要とされるデータをROM化し、このROMカートリッジの交換により、制御目的の樹種等を選択する方法を用いた。

(5)制御はコントローラレベルとし、コントローラ内の制御ユニットの数を必要最小限に抑えた。

(6)既設の乾燥機に対しても今回開発したシステムを付加できる構成にした。

謝 辞

本研究は、昭和63年度技術開発研究費補助金事業に基づき、指定課題「製品・部材の設計並びに品質安定と性能評価に関する研究」の分担研究として静岡市産業工芸センター、鳥取県工業試験場と共同で実施したものであり、研究の遂行にあたり適切なお指導とご助言をいただいた、製品科学研究所の主任研究官 吉田均氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 信田 聡, 他: 北海道林産試月報, No.415, 1~11(1986)
- 2) 林業試験場編: 木材工業ハンドブック, 305~312(1982)
- 3) 久田卓興, 他: 木材学会誌, Vol.22, No.9, 498~504(1976)
- 4) E.F.Rasmusson: Dry kiln Operator's Manual, Agriculture Handbook, No.188, For. Serv., U.S.D.A.(1961)
- 5) R. Keylwerth: Holz Rof-u. Werkstoff, 28, 215(1970)
- 6) R. Keylwerth: Holz Rof-u. Werkstoff, 22, 29(1964)