

コンピュータによる木材乾燥 操作の自動化 (第2報)

- ロードセル式含水率センサの温度ドリフト対策 -

信 田 聡 奈 良 直 哉*

A Computer-Controlled System for Operation Kiln-Drying ()

- How to solve the problem of output drifts of load
cells caused by temperature changes -

Satoshi SHIDA Naoya NARA

The authors planned to use load cells as the moisture sensor in the kiln for a computer control system. In this system the output drifts of load cells caused by the changes of temperature in the kiln seems to be a serious problem.

To solve the problem they tried to develop a plan and designed a sensor made of a load cell and evaluated the performance. Efforts made are summarized as follows:

- 1) The natural output drift of load cells caused by temperature change without loaded has the tendency that the higher the temperature is, the lower the load cell output is.
- 2) The idea to minimize the output drift in load cells caused by temperature change is that the temperature of load cells is kept to be constant at a higher level than that of the air in the kiln by electric heaters and a thermostat, and the keeping of temperature uniformity in each part of the cell is achieved by covered the cell with the metal case and thermal insulations.
- 3) The load cell sensor which is heated constant and thermally insulated showed a good effect to decrease the output drifts caused by temperature change to 1/3 in comparison with a non-heated and non-thermally-insulated load cell.
- 4) The capability of the use of the load cell as a moisture sensor in the kiln is recognized.

実大乾燥室の含水率スケジュールによる乾燥操作の自動化システムを構築する上で高温タイプの圧縮型ロードセルを使用したサンプル材の含水率センサを考えた。この場合の問題点である乾燥室内の温度変化に伴うロードセル出力の温度ドリフトの軽減方法について検討した。その結果は次のとおりである。

- 1) 今回用いたロードセル出力の無加工状態・無負荷時の温度ドリフトは温度上昇とともに低下する傾向が認められた。
- 2) 温度ドリフトの軽減方法として、ロードセルを周囲温度よりも高温にて加熱・断熱してロードセル温度を一定かつ均一に保つことにより達成することを提案した。
- 3) 加熱・断熱により温度ドリフトは無加工のロードセルに比較して1/3に抑えることができた。
- 4) ロードセルの含水率センサとしての乾燥室内使用の可能性が確認できた。

1. はじめに

前報¹⁾において、乾燥操作の自動化システムを構築する場合の基本的方針について検討し、とくに含水率スケジュールに基づく制御方法を自動化する概念を示した。また連続変化型含水率スケジュールを使用した実験室規模の試作システムによる制御試験結果を報告した。その際のサンプル材の重量測定は電子天秤にて連続的に行い含水率をコンピュータで演算してこれを制御に使用したが、実際の乾燥室を考える時間問題となるのは、含水率を測定するセンサを何にするかということであろう。

本研究では、実際の乾燥室内におけるサンプル材の含水率測定値から含水率を推定し、これを基準にした制御を考えているが、含水率センサの実用性を考えると、1) 従来の電気式水分計を応用するセンサ、2) 重量測定から含水率を求めるロードセルを用いたセンサが考えられる。

1) の水分計の応用については、現在あるシステム²⁾において使用されている。水分計の場合の測定誤差要因は、温度、樹種の違いによる比重の差、材の厚さ及び水分傾斜の程度、センサ電極部の材との接触度の変化等であり、実用上これらがどの程度複合して影響するかはさだかではないが、総合的な精度面で筆者は不安を抱いている。

一方、2) のロードセルを用いた含水率測定センサについては、例えば、久田³⁾はサンプル材の重量測定及び棧積み台車全体の重量をロードセルで測定し、この重量から含水率を推定したが、結論としてセルが乾燥室内にあると、乾燥室内温度変化によるセル出力の温度ドリフト、長時間の負荷によるクリープなど高温高湿で長期使用に耐えるものが少ないとしている。ま

た、Stewart M. HolmesとDonald G. Arganbright⁴⁾は、乾燥室内の棧積み材の下にロードセルを設置しロットの全体重量を測定する方法で行ったが、久田と同様に、温度ドリフトの問題、及びロードセル、コネクターケーブルへの結露に起因する問題があるとされている。

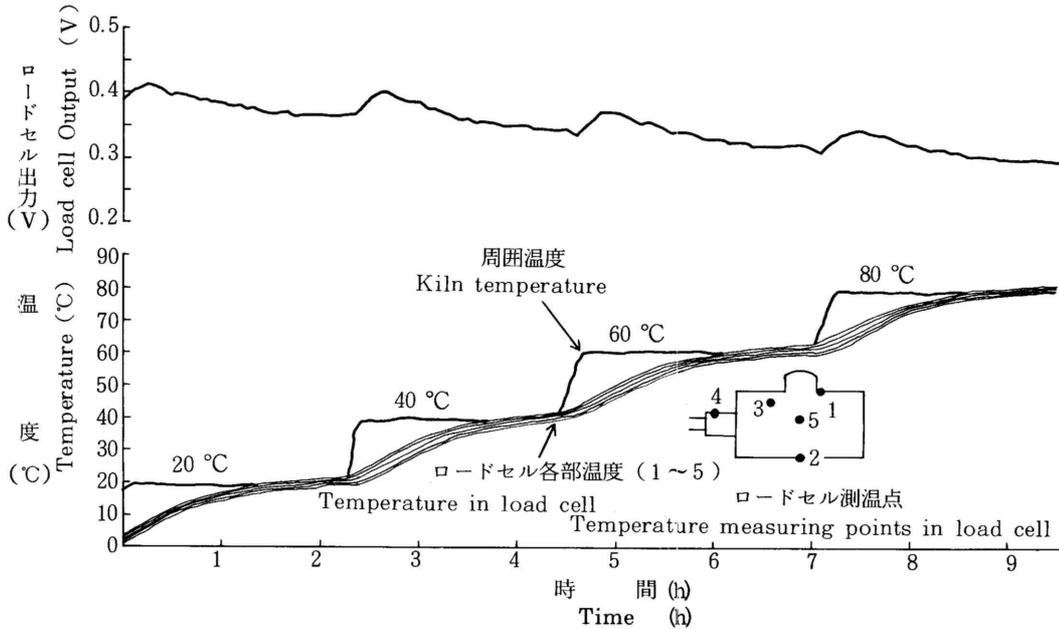
いずれにせよ、ロードセルを乾燥室内で使用することを前提にすると、温度ドリフトをいかに抑えるかが重要である。

本報告では、木材乾燥室内においてロードセルを使用した含水率センサを考え、温度ドリフトを抑え安定した出力を得るための方法について検討した。

2. ロードセルの温度ドリフト軽減の考え方

乾燥室内にロードセルを設置すると、乾燥室内の温度変化(初期には低温、末期には高温)に伴い、ロードセル自体の温度も変化し、出力の温度ドリフトが生じる。第1図は、周囲温度が変化する場合の無負荷時のロードセル出力変化の傾向を示した図である。すなわち、周囲温度が上昇するにつれて、出力が低下する傾向が認められる。さらに、この場合、温度が急激に変化する時には、一時的にロードセル本体内に温度の不均一が発生し、これに起因する歪の発生により一時的に出力が増加しピークを形成し出力が乱れる傾向も認められる。これらの変化を抑制するには、ロードセルが、周囲温度の変化に無関係に一定かつ均一な温度に保たれる必要がある。一定かつ均一な温度に保つには、

- ア) ロードセルの温度を周囲環境温度よりも低温で一定に保つこと
- イ) ロードセルの温度を周囲環境温度よりも高温で一定に保つこと



第1図 ロードセル出力の温度ドリフト
 Fig.1 Output drifts of load cells caused by the changes of temperature in the kiln.

条件：無負荷，無加熱，無断熱
 conditions: not-loaded, not-heated, not-thermal insulated.

が考えられる。

ア)の考えを具体化するには、ロードセルの周囲を冷却する設備が必要となる。冷媒及びそのための配管、コンプレッサー等であるが、センサの構造としては大型化するとともに、コストも高くなると思われる。また周囲温度よりも低い温度に保つ場合には、センサ周囲に結露が発生するため、その程度が激しい場合には、電気系統の短絡・漏電も問題となる⁴⁾。

一方、イ)の方法を具体化するには、ロードセルの周囲に電気ヒータを配して、これを温度センサと温度調節器にて制御し、周囲の温度よりも高温で一定に保つことがひとつの方法として考えられる。ア)の方式よりも小型化、ローコスト化が可能である。さらに結露に起因する問題も無くなる。

したがって、本報告では、イ)の方法により、センサを試作し、これを乾燥室内におけるサンプル材の重量測定、含水率センサとして利用することを試みた。

3. 含水率センサ試作

3.1 含水率センサの条件

本研究においては、以下に示す項目をロードセルを用いた含水率センサ開発の条件とした。

乾燥室内で連続的に使用する。

棧積み内に設置してサンプル材の重量測定を行う。

ローコスト化のためロードセル使用数は1センサにつき1個とする。

高温条件下で使用できるロードセルとする。

温度ドリフトを最小にする。

なるべく小型化・軽量化する。

3.2 ロードセル

3.1の条件を考慮し、ロードセルは高温仕様であることを第一として、さらに厚さが薄いこと、安価であること、容量がサンプル材重量測定にふさわしいことなどを条件にして市販のロードセルの中から選択した。すなわち、乾燥室内の温度条件は、高温スケジュールの適用を考え150 までの使用が可能なものを選択し

第1表 ロードセル仕様⁵⁾
Table.1 Specifications of load cells

項目 Item	仕様 Specifications
名称 Types	歪ゲージ式圧縮型荷重変換器 Straingage type load cells
型式 Models	LC-50 KFH (150℃)
容量 Rated Load	50 kg
形状 Shape	外径68 mm, 厚さ44 mm Diameter 68mm, Height 44mm
定格出力 Rated Output	1.5m V/V(3000×10 ⁻⁶ Strain)
非直線性 Nonlinearity	0.2 %RO
ヒステリシス Hysteresis	0.1 %RO

た。その結果、第1表に示す仕様のロードセルを使用した。

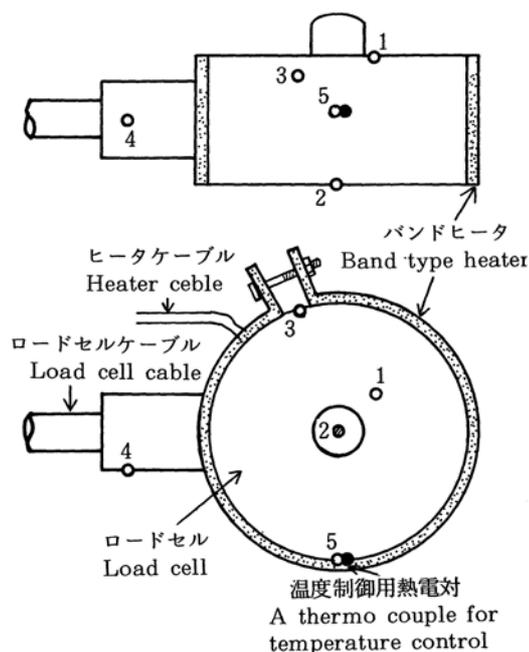
今回は市販のロードセルの中で、特に高温仕様を念頭において選択したため、その他の条件について多少食い違う面もでた。すなわち、選択したロードセルは圧縮型の容量50kg、厚さ44mmのものとなった。サンプル材のみの重量測定にしては容量が大きいこと、センサとしての小型化を目指す場合には、厚さがさらに薄いことが望ましいこと、などである。さらにロードセル1個のみで荷重を受ける構造とする場合には、中空円筒受感形の圧縮型セルよりもせん断受感形のビーム型セルが荷重点が偏位による測定誤差を少なくできる点では適していること、及び精度（非直線性）も圧縮型よりも優れていること、などの問題もあった。

したがって、ロードセルの使用温度範囲についての制限を緩和して選択すれば、ビーム型のセルの使用が今後有望である。

3.3 ロードセルの温度ドリフト軽減方法

ア) バンドヒータをロードセル側面に巻く場合

第2図に示すようにロードセルの本体側面に、電気ヒータ（日本電熱計器（株）製、バンドヒータ、AC 100V, 100W, φ70mm）1枚を巻き、ヒータとロードセルの間に表面張りつけタイプの熱電対（株式会社チノー製、K熱電対、シートカップル）を挿入接着し



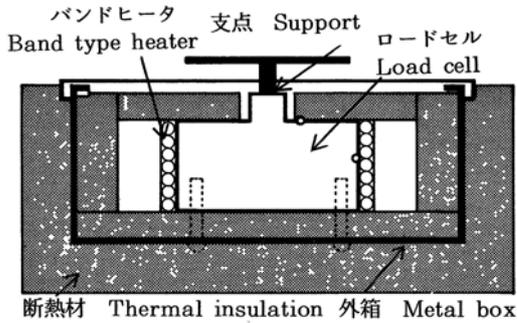
第2図 ハンドヒータによるロードセルの加熱方法
Fig.2 Heating method of Load cells by a band type heater.

1～5：測温用熱電対貼付位置
1～5：Temperature measuring points by thermo couples.

これと温度調節器（立石電気（株）製、計装用、omron E5C2-R-20K, ON-OFF式）とによりロードセルの温度を一定高温で制御する構造をとり温度変化を抑えてロードセルの出力安定化を図った。さらにこれらの周囲に断熱材を回らせ断熱構造とする（第3図）。第4図は、このセンサを無負荷で恒温恒湿装置内に置き、ヒータ温度を90℃に設定した状態で、装置内の温度を段階的に上昇させた場合の出力変化ならびにロードセル本体内の温度のむら測定したものである。

これを見ると、周囲温度が段階的に上昇すると、ロードセル出力もそれに呼応して増加する傾向がある。本来のロードセルの温度によるドリフトの基本的傾向は、第1図に示したように、温度上昇に伴い出力は低下するものと思われるが、これと比較すると全く逆の傾向である。しかも同一の温度変化幅に対するドリフトの大きさは、かえってヒータにより加熱した方が大きく

なっている。この傾向が意味するものは、ロードセルの単なる加熱だけではドリフトは防げないことを示すものであり、ドリフトを防ぐには、ロードセル本体内の温度の不均一をなくすことが非常に重要であることを暗示している。すなわち、ロードセル側面に巻いた



第3図 ロードセルのバンドヒータ、断熱材による加熱・断熱化

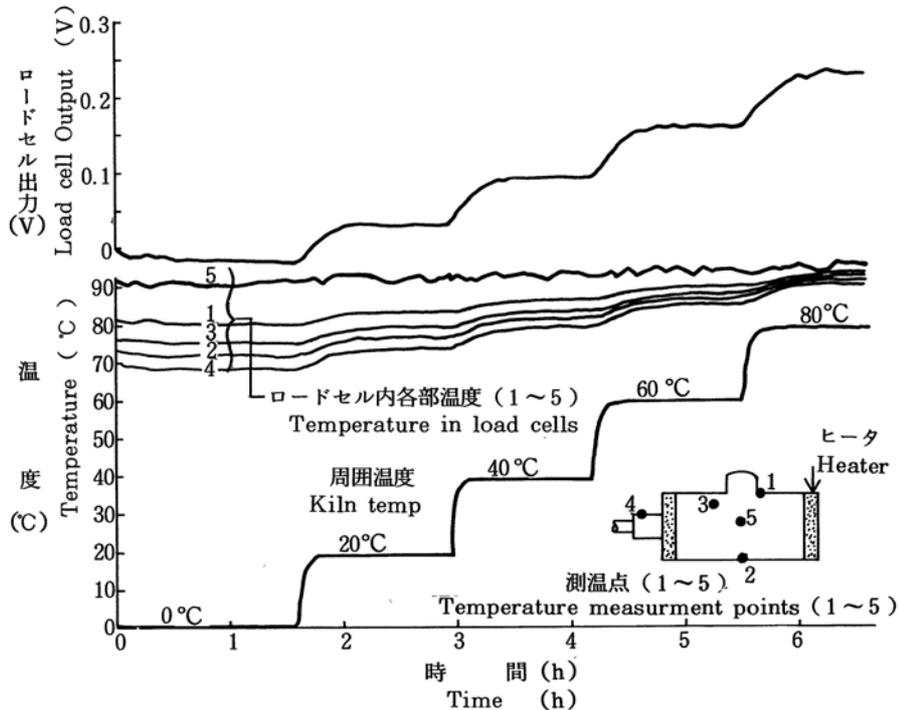
Fig. 3 Load cells which is heated and thermally insulated by a band type heater and thermal insulation.

バンドヒータ（第2図）は側面全体を均一に加熱できていないこと及びロードセルの断熱が不足しているため周囲温度とヒータ温度との差が大きい場合（周囲温度が低い）には、第4図のロードセル各部の温度が示すように、周囲温度に影響されロードセル各部の温度むら（例えば、ヒータの接触面とヒータが巻いてない面の温度差）が大きくなり、出力（歪み）はこの不均一な温度分布に比例して変化し、周囲温度とヒータ制御温度が接近するほど、言い換えれば周囲温度が高くなればロードセル内各部の温度むらが取れて出力は本来の値を示すようになる。その傾向が見掛け上、温度上昇につれて、出力が増加するものとしてあらわれている。

周囲温度の変化の影響を防ぐためには加熱の均一化及び断熱を強化する必要がある。

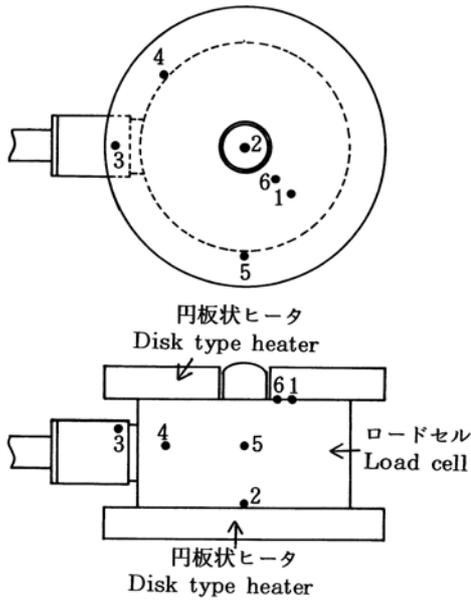
イ) ロードセル上下面に2個の円板状ヒータを配した場合

ア) の方法では、ロードセルの加熱状態が、不均一



第4図 バンドヒータで加熱した場合のロードセルの温度ドリフト
Fig. 4 Output drifts of load cells caused by the changes of kiln temperature when the cells are heated by a band heater.

ヒータ制御温度：90℃，(Heaters are controlled at 90℃)



第5図 2枚の円板状ヒータによるロードセル加熱方法

Fig.5 Heating method of load cells by two of disk type electric heaters.
1~5 : 温度測定点 Temperature measuring points
6 : 温度制御用熱電対 Thermo couple for temperature control

であったため、これを改善するために、第5図のように円板状のスペースヒータ (100W) をロードセルの上下面に、各々1枚ずつ配して加熱時のロードセルの各部の温度の均一化を図った。またロードセルとこれらのヒータを金属製容器で包むことにより、さらに均一化を図り (写真1)、さらにこの外周に断熱材を取り付けた。

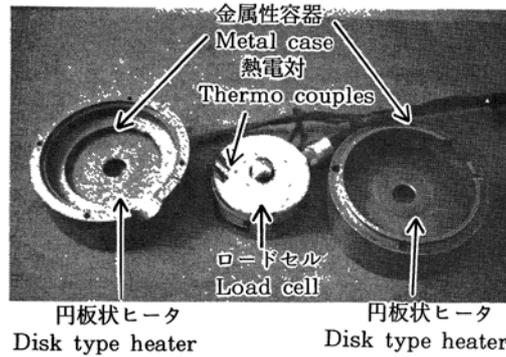
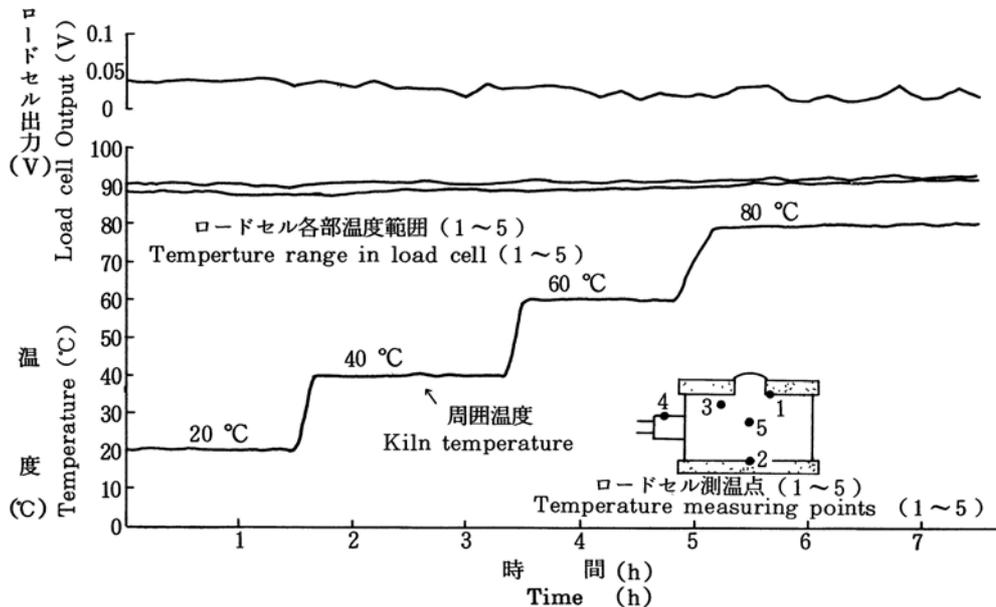


写真1 ロードセルとヒータを被覆する金属性容器
Photo.1 Metal case for enclosing load cell and two of disk type heaters.



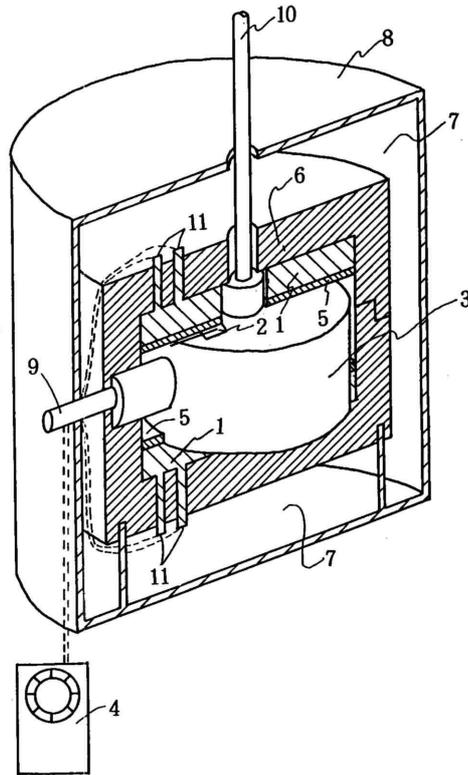
第6図 円板状ヒータ2枚で加熱した場合のロードセルの温度ドリフト
Fig.6 Output drifts of load cells caused by the changes of kiln temperature when the cells are heated by two of electric heaters.
ヒータ制御温度 : 90°C (Heaters are controlled at 90°C)

第6図に、ア)と同じ手順によりこのセンサの温度ドリフトを測定した結果を示す。ア)に比べて断熱化と温度の均一化が促進されたためロードセル内の温度むらが各周囲温度レベルにおいてもあまり差がなくなっている。したがって、出力の温度ドリフトもア)に比較してかなり少ない。この場合のロードセル出力の温度ドリフトの傾向はア)とは逆の傾向で温度上昇とともに、出力は低下する傾向があるが、第1図に示した全くヒータで加熱していない自然のままのロードセルの場合の結果と同じ傾向である。さらに、その場合よりもドリフトは改善されている。この結果からロードセル上下から加熱することがロードセル内の温度の不均一を減少させることに効果があることがわかった。その上さらに断熱を強化すればさらに周囲温度の変化にともなうロードセル出力の温度ドリフトは小さくなることがうかがえる。

第7図はこの考えを具体化したロードセルの加熱・断熱による含水率センサ例であるが、このようにすることによって、ロードセルを乾燥室内で使用してサンプル材重量の測定ならびに含水率推定を良好に行うことが可能である。

3.4 ロードセルの架台について

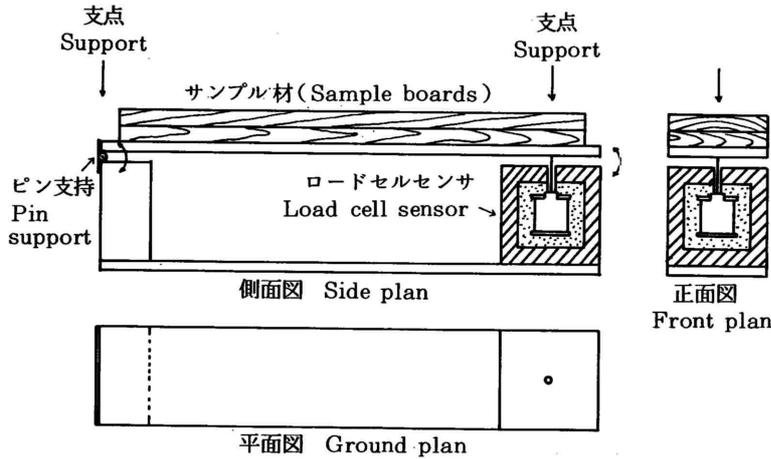
サンプル材の重量を測定するためには、第7図に示したセンサを取り付ける架台(含水率センサ)を作成する必要がある。その架台は支点を3点としてそれぞれの下にロードセルを置くことが一般的である。しかし、含水率センサの条件としてローコスト化を考慮し使用するロードセルの数を1個とすることにした。この場合には、例として、第8図に示すような構造が得られる。これは、サンプル材を載せた時、その荷重を、材の長さ方向の両端付近の点と線で受けるものである。すなわち、一方はピン支持である蝶番が線的に荷重を受ける。また一方では、荷重棒を通してロードセルのヘッドで点的に荷重を受けるものである。この構造では、測定しようとするサンプル材の重量は分割されて支持されるため、ロードセルには、サンプル材の全重量はかからず、それよりも軽い荷重がかかることになる。しかし、重量そのものの絶対的測定が主眼ではな



第7図 ロードセルを用いた含水率センサ例
Fig.7 A example of the load cell for the moisture sensor.

- 1 : 電気ヒータ Electric heater
- 2 : 熱電対 Thermo couple
- 3 : ロードセル Load cell
- 4 : 温度調節器 Thermostat
- 5 : 固定用リング Fix ring
- 6 : 金属性容器 Metal case
- 7 : 断熱材 Thermal insulations
- 8 : 外箱 Outer box
- 9 : ロードセルケーブル Load cell cables
- 10 : 荷重棒 Loaded ber
- 11 : ヒータ端子 Heater terminals

いので、このような状況であっても測定重量値から含水率に換算することは可能である。すなわち、初めに材を載せた時のロードセルの出力をあらかじめ測定しておいたサンプル材の重量として初期設定の時点でコンピュータによりフィットさせておき、さらに初期含水率と初期重量の値から全乾重量を計算しておき、あらかじめ含水率1%に対応する出力変化値を計算しておくことにより、以後のロードセル出力値から含水率を計算できる。また欠点としては、サンプル材をこの



第8図 ロードセルを用いたサンプル材含水率センサ例
Fig. 8 A example of the load cell sensor for measuring moisture content of sample boards.

4. 温度ドリフト試験

4.1 含水率センサ

含水率センサは前項までの検討の結果から第8図で示したものとし、ロードセルについては、加熱のみを行う場合、加熱と断熱を行う場合、全く裸の状態の場合の3状態で試験を行った。

4.2 周囲温度・時間条件

含水率センサ周囲の温度条件を、0, 20, 40, 60, 80 とした。これら

の温度の継続時間は、3~4時間である。

4.3 試験方法

含水率センサを恒温恒湿装置(タバイ(株)製, P R - 4 GT型, 150 仕様)内に置き、ロードセル出力を装置外部に設置した計装用増幅器(共和電業(株)製, WGA - 100)により増幅し、直流電圧値として、デジタル多点式温度(電圧)計(アドバンテスト(株)製, TR2724)にて記録し、同時にペンレコーダー(日置電気(株)製, マイクロハイコーダー-8202型)にて軌跡を記録した。

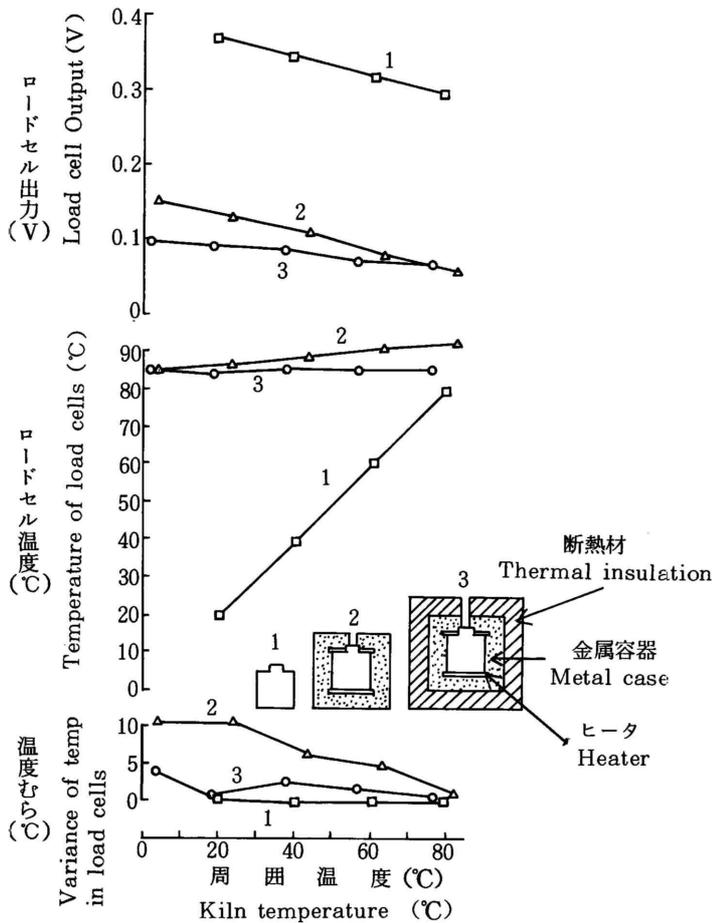
4.4 結果・考察

第8図は、含水率センサの加熱、断熱の程度を変えた場合の無負荷時における周囲温度変化に対する出力の温度ドリフトの傾向を調べた結果である。すなわち、1) ロードセルをそのまま使用した場合、2) ロードセル上下面にヒータを附属させ温度制御し、その外側を金属性の容器で包んだ場合、及び3) ロードセルを加熱した上さらに金属性容器で包み、さらに断熱材を周囲に施した場合の結果である。ロードセルの出力の温度影響を見ると1, 2, 3いずれもロードセル出力は温度が高くなると低下する傾向がある。そして、その傾きが温度ドリフトの大きさを示すが、1) が4mV/ の大きさである。これに対して2) では1.1mV/ , 3) では0.4mV/ であっ

架台上で置く位置を一定しておかなければ、置き変える都度に重心の移動が起こり、荷重点への荷重の分配が異なり、ロードセルにかかる荷重が変化することである。したがって、この架台の場合、サンプル材を載せる位置は変化させないことが重要な条件となる。

このような架台形状は、圧縮型ロードセルを1個だけ使用することを考えた場合のものである。測定精度上の問題点があることは否めないが、実用上使用可能である。

一方、ロードセル1個を使用する秤の機構としては、てこを組み合わせたいわゆるロパレベル(Roverval)の機構を取り入れた台秤を製作することが最良である。この機構を用いれば、荷重は、つねに鉛直方向に作用して、偏った荷重を受ける危険が無くなる。しかし、架台自体をあまり複雑にすることもコスト高、センサの大型化、取り扱いの不便につながる。したがって、ロードセルを1個で済まそうとすると、圧縮型(中空円筒受感型)のロードセルではなくいわゆるビーム型(せん断受感型)のロードセルを用いて台秤とすることが、多少の荷重の偏心には影響されないため現在では有望であろう。最終的にはこのタイプを検討することを考えている。



第9図 含水率センサの温度ドリフト

Fig.9 Output drifts of load cells caused by the changes of kiln temperature.

- 1: 無加熱, 無断熱 Not-heated, not-thermal insulation.
- 2: 加熱のみ Only heated in metal box.
- 3: 加熱と断熱 Heated and thermal insulation.

た。すなわち、ロードセルを何の加工もせず使用する1)に比較し、加熱・断熱加工を施した3)では出力の温度ドリフトが1/3に抑えられている。これは、重量に換算すると1)は4.0g/、3)は1.3g/となる。さらにこれらは、おのおの0.008%R0/、0.002%R0/に相当する。R0は定格出力である。通常の熱気乾燥の温度範囲は40 から80 であるため温度変化幅は40 程度になる。その場合の温度ドリフトによる重量の変化は、1)では160g、3)では、52g程度になる。このように、ロードセル出力は、ロードセルの温度変化の程度により異なる

るとともに、ロードセル内の温度の不均一がもたらす歪みの発生状態により異なるため、加熱・断熱により均一かつ一定の温度を保つことにより安定した出力が、周囲温度の変化に関係なく得られることが予想され、こうすることにより温度ドリフトは減少できる。

5. 今後の課題

温度ドリフトを軽減し、ロードセルを含水率センサとして乾燥室内にて使用する可能性は認められたが、さらに今後改善すべきことがある。すなわち、

- 1) ロードセル形状の小
型化・ローコスト化
圧縮型の中空円筒受感型セルからビーム型のせん断受感型セルへの変更。
- 2) 測定精度の向上
ビーム型セルを使用するための断熱・加熱構造及び架台の検討。

6. まとめ

ロードセルを乾燥室内に設置してサンプル材重量測定を行い含水率センサとして応用し、含水率スケジュールによる乾燥操作の自動化システムを完成するために必要なロードセルの温度ドリフト軽減について検討してきたが、これらの検討結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 今回用いたロードセル出力の無加工・無負荷状態の温度ドリフトは温度上昇とともに低下する傾向が認められた。
- 2) 周囲温度変化に起因するロードセルの温度ドリフトは温度上昇とともに低下する傾向が認められた。

フトの軽減を図る方法としては、ロードセルを周囲温度よりも高温で一定かつ均一に加熱・保温することが提案できた。

3) ロードセルの加熱・断熱の実施により温度ドリフトは全く加工しないロードセルと比較して1/3に抑えることができた。

4) ロードセル式含水率センサの乾燥室内での使用の可能性が確認できた。

本報告の一部は昭和62年4月に行われた第37回日本木材学会大会（京都）において発表した。

1 (1986)

- 2) ヒルデブランド（株）：フルオートマチックコントロールシステムHD4004V型の資料
- 3) 久田卓興：コンピュータシステムを導入した木材乾燥装置，木工機械，No. 93，5-8（1979）
- 4) Stewart M. Holmes ; Donald G. Arganbright : Drying tests with a weight-actuated lumber-drying control system, F. P. J., Vol 26, No. 11, 31-39 (1976)
- 5) 共和電業（株）：製品カタログより

文 献

- 1) 信田 聡ほか2名；コンピュータによる木材乾燥操作の自動化（第1報），林産試月報，415，

—木材部 乾燥科—
（現東京大学農学部）
—*木材部 乾燥科—
（原稿受理 62. 7. 20）