

シリカゲル薄層の吸湿特性と固定層のシミュレーション

村田 敏**・榎本敏夫**・宮内樹代史**

要 旨

シリカゲルの吸湿作用を利用した常温通風除湿乾燥装置の設計を目的として、シリカゲル薄層の吸湿特性の測定と解析を行い、次のことが明らかになった。

(1)シリカゲル薄層の吸湿過程は、減率第一段にある。(2)平衡含水率と相対湿度の関係は最小自乗法によって Chen-Clayton 式に精密にあてはめられた。(3)吸着等温線に Chen-Clayton 式を用い Clausius-Clapeyron 式によりシリカゲルの蒸発潜熱を直接計算した。(4)吸湿速度定数は Arrhenius 形の式に当てはめられた。以上の結果をもとに、シリカゲル粒子と通過空気に関する温度・物質量移動の非定常方程式を導いた。次に、これを数値解析することによってシリカゲル固定層を通過する空気の温度と湿度およびシリカゲル粒子の温度と含水率に関するシミュレーションを行いシリカゲルを用いた常温通風除湿乾燥装置の実用性を確認した。

〔キーワード〕 除湿器, 乾燥器, シリカゲル, 吸着, 穀物

Adsorption Characteristics of Thin Silica-Gel Layer and Simulation in the Fixed Layer*

Satoshi MURATA**, Toshio ENOMOTO**,
Kiyoshi MIYAUCHI**

Abstract

The purpose of this paper is to design dehumidifier for drying at ordinary temperatures.

The adsorption characteristics of thin silica-gel layer were measured and analyzed as follows :

(1)The adsorption process of silica-gel was in the first falling rate period. (2)The relation between equilibrium moisture content and the relative humidity was expressed well by the formula of Chen-Clayton obtained by the method of least squares. (3)The latent heat of vaporization of water in silica-gel was calculated precisely from the Clausius-Clapeyron's equation. (4)The relation between the equilibrium moisture content and the absolute humidity in the same temperatures could be adequately approximated by linear formula.

From the results of above (1) to (4), unsteady state equations for heat and mass transfer in silica-gel particles and air were formulated. Using these

equations the simulation of temperature and humidity of air through the fixed thick layer, and moisture adsorption and temperature in silica-gel

* 1991年4月第50回農業機械学会年次大会(京都大学)にて講演

** 九州大学農学部(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1 ☎092-641-1101) Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka, 812 Japan

particles, for the adsorption process was performed. The feasibility of the silica-gel dehumidifier for cereal grain dryer at ordinary temperatures was confirmed by the simulation.

[Keywords] dehumidifier, dryer, silica-gel, adsorption, cereal grain

I 緒 言

高温多湿の気候である日本においては、安定した穀物の乾燥法は欠くことの出来ない重要な技術の一つである。現在の日本においては農産物生産の重点が、生産性より質への転換が行われており、乾燥技術に対しても、食味の向上へつながる技術が求められている。そこで今回の研究では、シリカゲルの吸湿作用を利用した常温通風除湿乾燥装置の設計を目的として、その設計上の基礎となる、シリカゲル薄層の吸湿特性を解析した。また、任意の設計条件におけるシリカゲル固定層の吸湿特性を予想し、その結果をもとにシリカゲルを用いた常温通風除湿乾燥装置の実用性について考察を行った。

II 測定方法

1. 含水率測定法

シリカゲルの絶乾法については明確な規定が無いので、今回の研究では蓋付のシャーレを用い、10g-140°C-24時間-0.0175kg/kg' 炉乾法により絶乾重量を測定し、含水率を算出した¹¹⁾。この測定法は、シリカゲル10gをシャーレに採取し、140°Cに設定した恒温槽内に蓋をせずに入れ24時間乾燥した後、その状態で保存瓶(相互理化学硝子製作所 LABOWARE)内で冷却し、シャーレの蓋をして重量を測定する方法である。この方法は穀物乾燥における水分測定法を踏襲したものである。

2. 供試材料

測定に供試したシリカゲルは、市販のもの(6 MESH以上 大粒青 石津製薬)を使用した。供試材料の含水率を一定に保つため、測定前に恒温槽内で前記の方法により絶乾し、プラスチック容器に密閉して保存し、初期含水率を0%, d. b. に保つよう留意した。

3. 通風吸湿試験の実験装置

図1に通風吸湿試験の装置の概略図を示す。タ

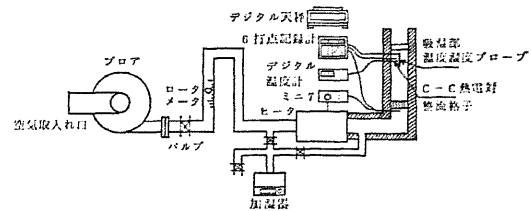


図1 測定装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

ーボプロアによって圧送した風量の調整は、プロアモータの回転数の制御およびスルースバルブの開閉により行った。また、吸湿部の下約60cmの位置にJIS規格(JIS B8330-1981)に基づく整流格子(格子幅10mm-10mm高さ30mm)を取り付けることにより吸湿部への風速の均一化を図った。加湿空気の湿度調整は、ターボプロアにより圧送された空気の一部を超音波加湿器(三菱EV-800)により加湿した空気と混合させることにより行った。この測定については村田らの文献⁷⁾を参照されたい。また、吸湿部直下に湿度・温度プローブ(VAISALA HMP115Y)を空気の流れと平行に取り付け、6打点記録計により吸湿部直下の相対湿度、温度を記録した。相対湿度の調整はこの表示を監視し、バルブを開閉することにより行った。次に温度の調整に関しては、ヒータによって目標の空気温度にセットし、Mini 7(CHINO PT-100Ω)で制御した。また、吸湿部直下、Mini 7のセンサーの2ヶ所にC-C熱電対(素線径0.3mm)を取り付け、各点の温度を6打点記録計により記録した。試料受けには、厚さ3mm、内直径300mm、高さ50mmの塩化ビニール製の円形パイプの一方の面に受け網を接着した容器を使用した。

4. 測定方法

1回の通風試験には、約200gの試料を用い、これを試料受けの上に薄層状態(層の厚さ15mm)にひろげ吸湿部に載せ、表1のような吸湿条件のもとに風量10000(l/h)で吸湿させた。測定は一

表1 通風空気条件
Table 1 Air condition of inlet air

	20°C	30°C	40°C
80%(, R.H.)	○	○	
70%(, R.H.)	○	○	
60%(, R.H.)	○	○	○
50%(, R.H.)	○	○	○
40%(, R.H.)	○	○	○
30%(, R.H.)			○

定時間毎に試料重量を測定し、試料重量の変化が0.01g以下になった時点をもって平衡に達したものとみなし、測定を終了した。なお、試料重量の測定には、短時間で測定可能な感量0.01gのデジタル天秤(Mettler PC2000)を用いてすばやく行った。

III 測定結果及び考察

1. 含水率の経時変化

測定データから含水率を算出し、縦軸に含水率(% , d. b.), 横軸に経過時間(h)をとって含水率の経時変化をプロットしたグラフが図2である。このグラフを見ると明らかなように、含水率の変化は測定開始後2時間は急激に増加し、平衡に近づくにつれて小さくなっている。

2. 吸湿シミュレーション

(1) 減率第一段乾燥方程式の導入

図2の結果から自由含水比を計算し、片対数グラフにプロットしたものが図3である。この図を

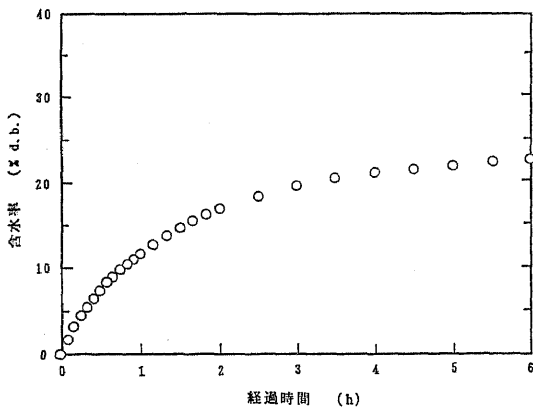


図2 シリカゲルの吸湿による含水率の経時変化 (通風空気温度30°C, 湿度50%)

Fig. 2 Moisture content of silica-gel plotted against times

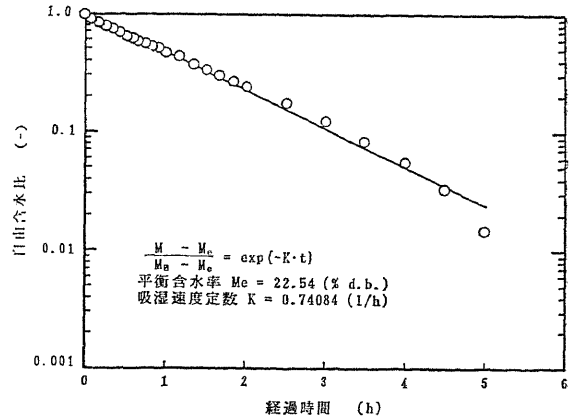


図3 シリカゲルの吸湿特性と最小自乗近似 (通風空気温度30°C, 湿度50%)

Fig. 3 Adsorping characteristics of silica gel and a least square fitting

見ると吸湿過程は切片1を通る直線で示され、明らかに減率第一段である次式で示されることがわかる²⁾。

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-K \cdot t) \quad (1)$$

すなわち,

$$\frac{dM}{dt} = -K \cdot (M - M_e) \quad (2)$$

初期条件 $M = M_e(t=0)$

となる。

(2) 吸湿特性曲線の方程式の決定

シリカゲルの吸湿特性曲線は式(1)の形になるが、この式の中の未知数すなわち、平衡含水率、吸湿速度定数を求める必要がある。ここで、

$$M = (M_0 - M_e) \cdot \exp(-K \cdot t) + M_e \quad (3)$$

式(3)へのデータのあてはめは、最小自乗法により行いが、この式は非線形であるため、デミング法によって各値を算出した²⁾。その計算結果を表2に示す。吸湿速度定数に関しては、相対湿度との関係には明確な傾向は観られないが、温度とともに増加する。平衡含水率に関しては、相対湿度とともに増加し、温度が増加すると減少する。

(3) 吸湿曲線のデミング法による当てはめ

図3に吸湿データとデミング法によって式(1)に当てはめた結果を示す。図のように自由含水比の対数は、直線的に減少し、実測値と最小自乗近似の結果は良く一致している。したがって、この結果算出される平衡含水率及び吸湿速度定数は精度の高い値が得られた。

表 2 シリカゲルの吸湿特性値

Table 2 Values of adsorbing characteristics of silica-gel

温度 (°C)	相対湿度 (%)	吸湿速度定数 (1/h)	平衡含水率 (% d. b.)
20	40	0.886467	17.58
	50	0.702084	22.63
	60	0.613746	29.02
	70	0.551938	35.00
	80	0.595654	37.72
30	40	1.10221	18.47
	50	0.740836	18.47
	60	0.820559	27.52
	70	0.707689	32.87
	80	0.777545	38.69
40	30	1.65022	12.16
	40	1.60386	17.39
	50	1.24052	19.88
	60	1.54746	27.34

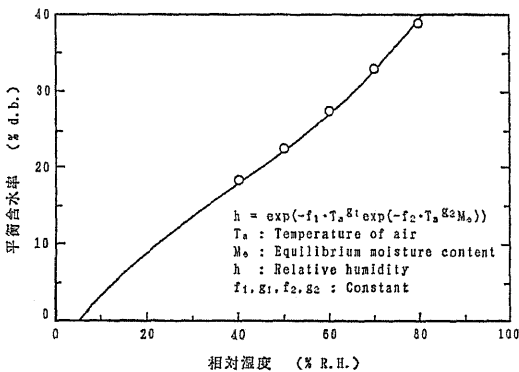


図 4 Chen-Clayton の式による平衡含水率の近似曲線 (Ta=30°C)

Fig. 4 Fitting of equilibrium moisture content by the formula of Chen-Clayton

3. Chen-Clayton 式による平衡含水率のあてはめと Arrhenius 式による吸湿速度定数のあてはめ

平衡含水率を予測する式は種々あるが、今回の研究では次式で表される Chen-Clayton 式を用いて解析した⁵⁾。

$$h = \exp(-m \cdot \exp(-n \cdot M_e)) \quad (4)$$

ここで、h は相対湿度 (decimal) で、

$$m = f_1 \cdot T_a^{g_1}, \quad n = f_2 \cdot T_a^{g_2}$$

図 4 は 30°C における平衡含水率と相対湿度の関係を示した図である。実線は Chen-Clayton 式の適用結果である。式(4)の各係数及び相対湿度の標準偏差の値はそれぞれ、

$$f_1 = 7.69924911 \times 10^8, \quad g_1 = -3.396092$$

$$f_2 = 1.38190711 \times 10^4, \quad g_2 = -1.34375$$

$$\text{標準偏差 S. D.} = 0.022093 \text{ (decimal)}$$

となった。過去の研究例によると、穀物の平衡含水率と相対湿度の関係は Chen-Clayton 式によく当てはまることが知られているが、シリカゲルについても同様な結果が得られ、平衡含水率を予測することは可能である。吸湿速度定数については、温度については Arrhenius 式を仮定し、その係数を相対湿度の関数とし、最小自乗近似を行った。式とパラメータ及び係数は次の通りである。

$$K = \exp\left(\frac{A_5 + A_1 + A_2 \cdot h + A_3 \cdot h^2 + A_4 \cdot h^3}{T}\right) \quad (5)$$

この時の各係数の値は、

$$A_1 = -3044.74, \quad A_2 = 693.454$$

$$A_3 = -2454.75, \quad A_4 = 1800.30$$

$$A_5 = 10.1407$$

4. シリカゲルの蒸発潜熱の算出

(1) 蒸発潜熱の計算理論

シリカゲルに含まれる水分の蒸発潜熱は、穀物と同様に自由水の蒸発潜熱より大きく、含水率が低くなるにつれて増大する。この蒸発潜熱の測定法には、熱量計を用いた直接測定法と吸着等温線式から熱力学関数である Clausius-Clapeyron 式によって直接計算する方法がある。今回の研究では後者の方法により、吸着等温線式には、Chen-Clayton 式を用いて蒸発潜熱を算出した^{7,8)}。

Clausius-Clapeyron

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{q}{T(V_g - V_l)} \quad (6)$$

式(6)を変形して、

$$q = (V_g - V_l)T \left(\frac{\partial P_{st}}{\partial T} \right) \quad (7)$$

式(7)により直接蒸発潜熱を計算する。この右辺の計算で問題になるのは P_{st} であり、これは次式

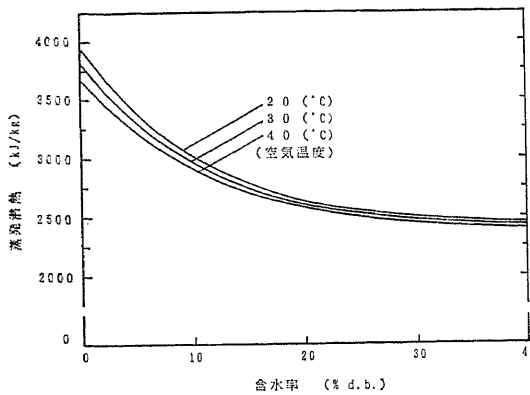


図5 シリカゲルの蒸発潜熱(計算値)

Fig. 5 Latent heat of vaporization of the moisture in silica-gel by the eq.(6)

によって計算出来る。

$$P_{st} = h \cdot P_s \quad (8)$$

式(8)のhの計算には前記の現在最も適合性の高いと考えられるChen-Clayton式を用いる。また、 P_s, V_g, V_l は実用国際状態式から計算することが出来る。式(7)の P_{st} の微分は式(8)の両辺をTで微分することにより得られる。

$$\frac{\partial P_{st}}{\partial T} = \frac{\partial h}{\partial T} P_s + \frac{\partial P_s}{\partial T} h \quad (9)$$

ここで、式(4)より

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial T} = & -h \cdot \exp(-f_2 T^{\sigma_2} M_{ed}) \\ & \times (f_{1g} T^{(\sigma_1-1)} - f_{1f} f_{2g} T^{(\sigma_1+\sigma_2-1)} M_{ed}) \end{aligned} \quad (10)$$

である。式(9)の右辺の P_s の微分は実用国際状態式における P_s をTで微分することにより計算することが出来る。平衡含水率のデータをもとにして、Chen-Clayton式により整理し、前記の計算理論によってシリカゲルの蒸発潜熱を計算した。その結果を図5に示す。縦軸に蒸発潜熱(kJ/kg)、横軸に含水率(% d.b.)をとり、シリカゲルの蒸発潜熱に関する等温線を示してある。図のようにシリカゲルの蒸発潜熱は低含水率の場合において、その値は自由水の蒸発潜熱の値よりも大きい値が得られた。また、含水率の増加に伴って蒸発潜熱は減少し、40(% d.b.)以上の高含水率においては、穀物の場合と同様にシリカゲルの蒸発潜熱は自由水の蒸発潜熱とほぼ等しい値となった。

5. シリカゲル固定層吸湿特性のシミュレーション

今回の研究では、シリカゲル薄層の吸湿特性について解析を行ったが、実際の乾燥装置ではシリカゲルは厚層で用いる。そのため、シリカゲル厚層の吸湿特性の計算法が必要とされる。ここでは、以下の基礎方程式を解き、離散化を行うことにより、シミュレーションを行った⁴⁾⁵⁾。

(1) 基礎方程式

シリカゲル薄層の吸湿特性の測定結果から、吸湿方程式は、式(2)を用いる。

シリカゲル粒子の温度の変化は、熱伝達と吸湿による発熱を考慮して、

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_p}{\partial t} = & \left(\frac{h_a}{C_{ps} \cdot \rho_p} \right) \cdot (T_a - T_s) \\ & - \left(\frac{K \cdot q}{C_{ps}} \right) \cdot \frac{M - M_e}{100} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。ここで、吸湿速度定数Kは、式(5)の値を用いた。また、シリカゲルの比熱 C_{ps} は次式で表される。

$$C_{ps} = 0.921 + 0.0366 \times M_d / (1 - M_d) \quad (12)$$

空気の水分収支は、

$$\frac{\partial X}{\partial y} = -K_2 (M - M_2) / 100 \quad (13)$$

$$K_2 = \rho_s \cdot K / G \quad (14)$$

エンタルピー収支は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial y} = & (\sigma K_2) \cdot (M - M_e) \\ & - (h_a / G) \cdot (T_a - T_s) \end{aligned} \quad (15)$$

で表される。空気温度 T_a はエンタルピーの定義から、

$$T_a = (I - \sigma \cdot X) / (C_{pa} + C_{pw} \cdot X) (K) \quad (16)$$

で計算される。シリカゲル固定層通過後の相対湿度は、飽和蒸気圧 P_s を実用国際状態式から算出し、次式により求められる。

$$p = P \cdot X / (0.622 + X) (kPa) \quad (17)$$

$$P = 101.325 (kPa) \quad (18)$$

$$h = p / p_s(T) (\text{decimal}) \quad (19)$$

$$p_s : \text{国際状態式(1968)による計算値} \quad (20)$$

平衡含水率は、前述した式(4)のパラメータとして最小自乗法によって求められる。この計算式の M_e に関する標準偏差は1.2%であった。式(2)および式(11)~式(15)の計算に必要な物性値は次式で与

えられる。

$$G = v \cdot \rho_a (\text{kg/m}^2) \tag{21}$$

$$\rho_a = 353.3/T (\text{kg/m}^3) \tag{22}$$

$$\rho_s = 837 (\text{kg/m}^3) \tag{23}$$

$$\sigma = 2500.78 (\text{kJ/kg}) \tag{24}$$

$$h_a = 53.6 \cdot G^{0.676} (\text{kJ/min} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K of silica-gel}) \tag{25}$$

($j_h = 0.903 \text{Re}^{-0.324}$ より¹⁾)

吸着水の発熱量 q は

$$q = (V_g - V_l) \cdot T \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) (\text{kJ/kg}) \tag{26}$$

となり、このとき、

$$(V_g - V_l) = R_w \cdot T/p - 0.001 \tag{27}$$

$$R_w = 0.461917 \text{ kJ/kg} \tag{28}$$

$$\frac{\partial p}{\partial T} = -\frac{\partial h}{\partial T} P_s + \frac{\partial p_s}{\partial T} h \tag{29}$$

$$\frac{\partial h}{\partial T} = -h \cdot \exp(-f_2 \cdot T^{g_2} M) \times \{ f_1 \cdot g_1 \cdot T^{(g_1-1)} - f_1 \cdot f_2 \cdot g_2 \cdot T^{(g_1+g_2-1)} M \} \tag{30}$$

である。

(2) 離化

図6に層の分割モデルと番号を示す。風に関する式(1)と式(4)は、絶対湿度(kg-H₂O/kg-dry air)について、

$$X_{i+1,j} = X_{i,j} + K_2(M_{i,j} - M_{e,i,j}) \cdot \Delta L \tag{31}$$

エンタルピ(kJ/kg-dry air)について、

$$I_{i+1,j} = I_{i,j} + (\sigma K_2) \cdot (M_{i,j} - M_{e,i,j}) \cdot \Delta L - (h_a/G) \cdot (T_{a,i,j} - T_{s,i,j}) \cdot \Delta L \tag{32}$$

となり、シリカゲル粒子に関する式(1)と式(2)は、含水率(%、d.b.)について、

$$M_{i,j+1} = M_{i,j} - K(M_{i,j} - M_{e,i,j}) \cdot \Delta t \tag{33}$$

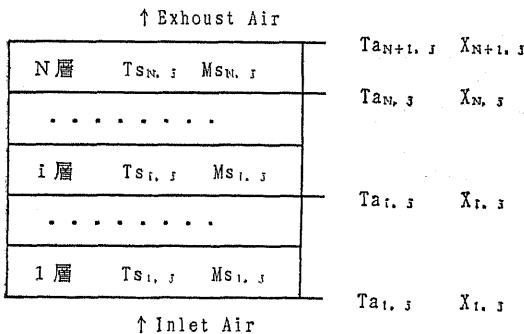


図6 層の分割

Fig. 6 Finite difference scheme

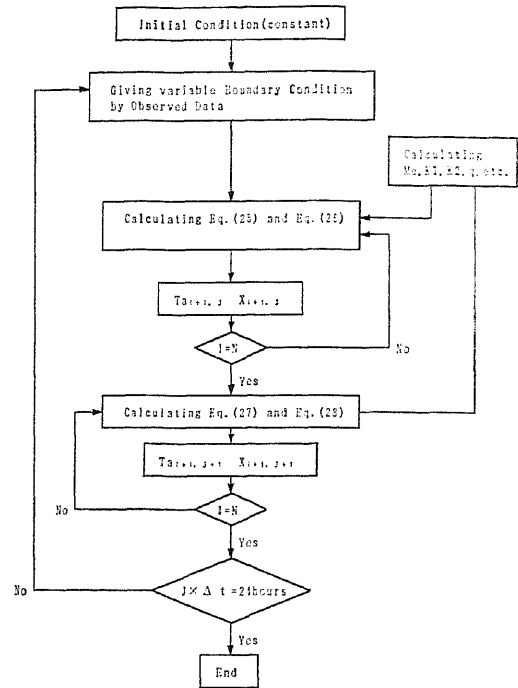


図7 計算手順のフローチャート

Fig. 7 Flow chart of calculating procedure

温度(K)について、

$$T_{s,i,j+1} = T_{s,i,j} + (h_a/C_{ps} \cdot \rho) \cdot (T_{a,i,j} - T_{s,i,j}) \cdot \Delta t - (K \cdot q/C_{ps}) \cdot (M_{i,j} - M_{e,i,j}) \cdot \Delta t \tag{34}$$

となる。ここで、

ΔL : シリカゲル層の分割幅 0.005m(5mm)

Δt : 計算時間間隔 600s

これらの式に次の条件をあてはめ、解析を行った。図7に具体的な計算のフローチャートを示す。

初期条件 $T_{s,i,0} = 20(^{\circ}\text{C})$,

$M_{s,i,0} = 0$ (decimal d, b,)

$i = 1, 2, 3, \dots, N$

境界条件 $T_{a,i,j}$ = データとして与えられる
入気温度 ($^{\circ}\text{C}$)

$X_{a,i,j}$ = データとして与えられる
入気絶対湿度 (decimal)

境界条件として、一日の外気の温湿度変化を10分毎に測定した結果を与え、シミュレーションを行った結果を図8に示す。このようにシリカゲル

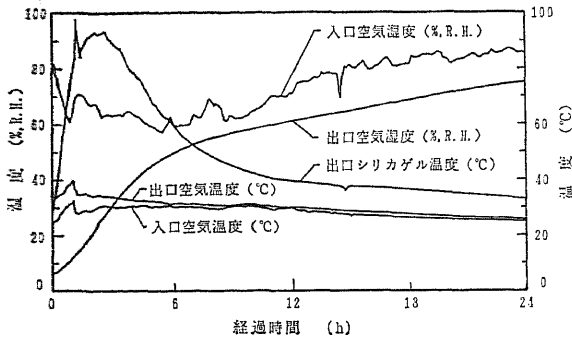


図8 シリカゲル層を通過した空気のと相対湿度の経時変化のシミュレーション (入気条件変化の場合, $v=1.15\text{m/s}$, $L=0.1\text{m}$)

Fig. 8 Simulation of temperature and relative humidity variation of air through silica-gel layer (Variable conditions, $v=0.15\text{m/s}$, $L=0.1\text{m}$)

層を通過後の空気のと相対湿度は入口空気にと比べて非常に低くなっており、通風開始後24時間においてもその状態は変化しないと予想される。

また、夜間や雨天の場合、相対湿度が上昇することがあるが、通風空気温度 25°C、相対湿度 80%、R. H. 一定に制御した10分毎の測定値を用いて、解析した結果を図9に示す。図10にこのときの入口空気のと湿度と出口空気温度の測定値を示す。

この結果を基に簡単な設計を行ってみる。例え

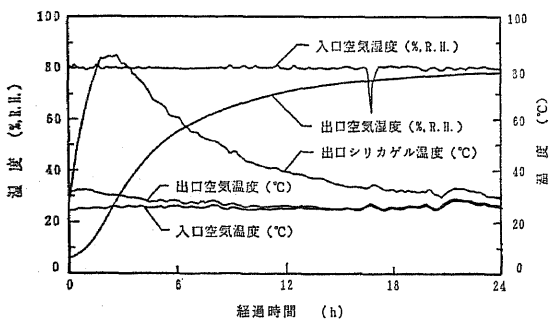


図9 シリカゲル層を通過した空気のと相対湿度の経時変化のシミュレーション (入気温度25°C, 湿度80%, R. H., $v=0.15\text{m/s}$, $L=0.1\text{m}$)

Fig. 9 Simulation of temperature and relative humidity variation of air through silica-gel layer (Temp. 25°C, 80%, R. H., $v=0.15\text{m/s}$, $L=0.1\text{m}$)

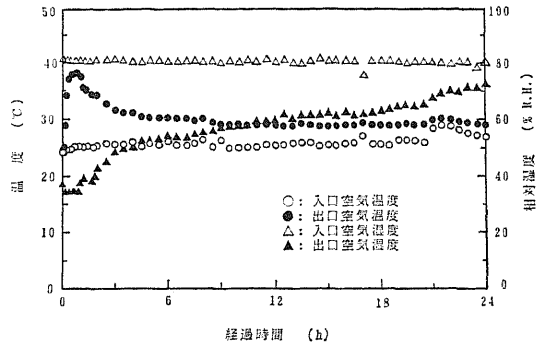


図10 シリカゲル層通過前後の空気温度 (入口空気温度20°C, 湿度80%, R. H.)

Fig. 10 Temperature of air at inlet and outlet of the silica-gel layer

ば、図9の深さ0.1m、直径0.3mの円筒層を考えると、シリカゲルを充填した場合、5.92kgの容量となる。風速0.15m/secの風量比を計算すると、0.1073m³/min/kg of silica-gelに相当する。荷受けコンテナ⁹⁾を例にとると、その風量は9.6m³/minであるから、同じ条件ではシリカゲルの必要量は90kgとなるが、シリカゲルの装着で風量が半分になるとみて30kgと推定する。図9に見るように、この条件で、80%、R. H.の空気を60%、R. H.以下に約10時間にわたって除湿し続けることが出来る。荷受けコンテナによる常温通風乾燥の結果によれば、福岡市周辺では籾収穫期の乾燥不能な高湿度期間は全乾燥期間を通じて1日であった。30kgのシリカゲルは直径0.3mで高さ0.5m強に相当し、荷受けコンテナのファン部に充分装着可能である。荷受けコンテナを例にとったが、他の乾燥装置においても利用可能であろう。この程度のシリカゲルは家庭用電子レンジによっても再生可能である。

IV 摘 要

シリカゲル薄層を種々の吸湿条件(温度・相対湿度)のもとで通風吸湿試験を行い、そのデータからシリカゲルの諸特性の中で吸湿特性について測定、解析を行った。また、その結果に基づいてシリカゲル固定層吸湿特性のシミュレーションを行い、以下のことが明らかになった。

1) シリカゲルの吸湿過程は減率第一段にあり、測定値と計算値は実用上十分なレベルで一致し

た。

2) 平衡含水率を予測する式として Chen-Clayton 式を採用し、解析した結果、測定値と計算値は非常に良く一致した。

3) 吸着等温線式に Chen-Clayton 式を用い、Clausius-Clapeyron 式によりシリカゲルの蒸発潜熱を算出した。その結果、シリカゲルの蒸発潜熱は低含水率ほど大きく、40(% d. b.) 以上になると、自由水の蒸発潜熱とほぼ等しい値が得られた。

4) シリカゲル薄層の吸湿特性の解析結果から、シリカゲル固定層の粒子と空気に関する熱・物質両移動方程式を導き、数値解析することによって、固定層中の任意の位置と時間における粒子の温度と含水率および通過空気の温度と湿度のシミュレーションを行うことが出来た。また、この結果を利用して、シリカゲルを用いた常温通風除湿乾燥装置の可能性を確認することができた。

V 記号

- M : 含水率 (Moisture content, % d. b.)
 M₀ : 初期含水率 (Initial moisture content, % d. b.)
 M_e : 平衡含水率 (Equilibrium moisture content, % d. b.)
 M_{ein} : 入口空気に対応する平衡含水率 (Equilibrium moisture content corresponding inlet air, % d. b.)
 t : 時間 (Time, h)
 K : 吸湿速度定数 (Adsorption rate, 1/h)
 h : 相対湿度 (Relative humidity, decimal)
 T_a : 絶対温度 (Absolute temperature, K)
 M_{ed} : 平衡含水率 (Equilibrium moisture content, d. b. decimal)
 f₁, f₂, g₁, g₂ : 式(4)及び(2)の係数 (Coefficient in eq. (4) and eq. (2))
 P_s : 飽和蒸気圧 (Saturated vapor pressure kPa)
 P_{st} : シリカゲル内水分の水蒸気分圧 (Vapor pressure in silica-gel, kPa)
 V_g : 温度Tにおける水蒸気の比容積 (Specific volume of vapor at T, m³/kg)

- V_l : 温度Tにおける液状水の比容積 (Specific volume of liquid water at T, m³/kg)
 Q_{st} : シリカゲル内水分の蒸発潜熱 (Latent heat of moisture vaporization in silica-gel, kJ/kg)
 q : 吸着水の発熱量 (Heat of adsorbed water, kJ/kg)
 G : 質量風速 (Mass velocity, kg/m²·h)
 v : 風速 (Velocity, m/h)
 X : 絶対湿度 (Absolute humidity, kg/kg')
 y : 厚さ (Thickness, m)
 I : エンタルピー (Enthalpy, kJ/kg)
 T_{in} : 入口空気温度 (Inlet air temperature, K)
 T_s : シリカゲル粒子の温度 (Temperature of silica-gel particle, K)
 C_{pa} : 乾き空気の比熱 (Specific heat of dry air, kJ/kg·K)
 C_{ps} : シリカゲルの比熱 (Specific heat of Silica-gel, kJ/kg·K)
 C_{pw} : 水蒸気の比熱 (Specific heat of wet air, kJ/kg·K)
 h_a : シリカゲル層の熱伝達率 (Heat transfer coefficient of silica-gel layer, kJ/min·m²·K)
 Greek
 ρ_a : 空気の比重量 (Specific weight of air, kg/m³)
 ρ_s : シリカゲルのみかけの密度 (Bulk density of silica-gel, kg/m³)
 φ : 相対湿度 (Relative humidity, %)
 σ : シリカゲル内水分の蒸発潜熱 (Latent heat of moisture vaporization in silica-gel, kJ/kg)

参考文献

- 1) Barker, J. J. : Heat Transfer of Beds. Industrial and Engineering Chemistry. 57(4), 43-51, 1965
- 2) 中馬豊, 村田敏, 岩元睦夫 : 穀類の乾燥に関する基礎的実験 (水分拡散係数の測定), 農機誌, 31(3), 243, 250-255, 1969
- 3) Farouk, S. M. Brusewitz, G. H. : Moisture Sorption Characteristics of Dust Contaminated Silica Gel. J. agric. Eng Res. 25(2), 209-216, 1980
- 4) 村田敏 : 集合農産物の冷却計算法 (堆積層と流動層),

- 冷凍, 50(568), 26-36, 1975
- 5) 村田敏, 松岡孝尚: 籾の流動層乾燥に関する簡易解析解, 農機誌, 43(1), 89-85, 1981
- 6) 村田敏: 穀物の特性と乾燥速度の予測, 農機誌, 44(3), 517-520, 1982
- 7) 村田敏, 田川彰男, 石橋貞人: 穀物水分蒸発潜熱の計算式について, 農機誌, 50(3), 85-93, 1988
- 8) 村田敏, 河野俊夫, 小出章二, 田川彰男: ソバの乾燥特性の測定, 農機誌, 52(3), 61-67, 1990
- 9) 村田敏, 宮内樹代史, 堀善昭: 荷受けコンテナによる籾の乾燥, 農機誌, 53(1), 91-95, 1991
- 10) 渡辺鉄四郎, 通風乾燥機の使い方, 63, 新農林社, 1962
- 11) 柳井弘, 加納久雄訳 (C.L. Mantell 著): 吸着および吸着剤, 技報堂, 1969
(原稿受理平成3年9月3日・質問期限平成5年7月31日)

＜新しい出版物＞

シンポジウム「農業機械の知能化をめざして」(第3回)

“ロボット化への道”

編集・発行 農業機械学会・平成4年7月14日
造 本 B5版 79頁
定 価 2,000円(送料込)

厳しい労働力不足や高齢化が進むなかで農業の発展を図るには、農業機械を知能化し、機械に判断力を与えて、作業への負荷を減らすことが必要である。また農産物自由化に対応するための品質向上やコスト低減を図るには機械利用の最適化が必要であり、最適条件を機械が自ら選んで動くような知能化もまた将来期待されることである。

このような趣旨から、農業機械学会は、「農業機械の知能化をめざして」シンポジウムをシリーズで行ってきた。第1回は知能化の基礎としての「センシング技術」をとりあげ、第2回には「自動化から知能化へ」を副題として、自動機械の知能化技術を論じた。今回は、「ロボット化への道」をテーマに第3回の知能化シンポジウムを企画し、将来に向けて、より高度な知能化技術をとりあげ、議論を深めることを意図した。

内 容

I 基調講演

農業機械の今後と知能化の進め方	東京大学農学部	岡本嗣男……………1
ロボットの運動機構研究の現状	機械技術研究所	谷 和男……………11
ハンドアイシステム	東京大学工学部	稲葉雅幸……………21

II 事例報告

国立試験場におけるロボット化研究の実状	生研機構	北村 誠……………27
生研機構における知能化研究の実状	生研機構	長木 司……………33
乾燥調製施設における穀物検査の自動化	井関農機㈱	相澤 博……………39
ファジー制御によるイ草ハーベスタの方向制御	㈱クボタ	岸田 博……………46
水田作業管理機の自動化	三菱農機㈱	山崎弘章……………52
スピードスプレーヤ(SS)の自動化	ヤンマー農機㈱	水倉泰治……………57

III 見学会資料(生研機構)……………63~79

自律走行システム, 果菜類接木装置, 穀物用サンプル調製機, 穀物用サンプル採取機, カンキツ用無人栽培作業車, 高精度けん引作業車, ダイナモメーターカー, 圃場作業計測装置