

密閉系における乾燥剤シリカゲルの必要量

山口 信吉, 山本 辰美, 楊 健

Required Amount of Silica Gel as a Desiccant in Closed System

Shinkichi Yamaguchi, Tatsumi Yamamoto and Jian Yang

Estimation methods of required amount of silica gel as a desiccant for the dehumidification of the air and the drying of the solid product in closed systems were proposed. Based on the fact that the mass of dry air did not change during the dehumidification in the closed system, the required amounts of silica gel were investigated for the dehumidification. For drying of the solid product, by using the final moisture content of the silica gel which was equilibrated with the desired moisture content of the product, it was shown that the required amount of silica gel could be estimated.

Key words : silica gel, closed system, dehumidification, drying, equilibrium moisture content.

緒 言

シリカゲルを乾燥剤として使用する場合、通常、乾燥室は密閉系にしなければならない。密閉室に乾いたシリカゲルを入れると、室内は除湿（減湿）されて空気の湿度は低下する。室内に湿った固体があれば、固体の水分は気化して水蒸気となって空気中を移動し、シリカゲル表面に到達して吸着される。長時間後にはシリカゲルは周囲と平衡状態に達し含水率は不変となる。このような過程における除湿または乾燥に必要なシリカゲル量の推定法はいまだ十分に確立されていない。

空気の除湿の場合には空気の初期湿度と最終（目標）湿度が指定され、固体製品の乾燥の場合には製品の初期含水率と最終（目標）含水率が指定される。この最終状態においてシリカゲルが周囲と平衡状態に到達すると見なして、初期と最終の状態間で水分の収支をとれば乾燥剤シリカゲルの必要最小量（理論必要量）を推定することができる。

本研究では、まずシリカゲルの必要量を定量的に推定するための基礎的諸関係を明らかにする。次に、密閉室内における空気の除湿に必要なシリカゲル量、および密閉室内の固体製品の乾燥のために必要なシリカゲル量の必要最小量の推定法を提出する。

1. 湿り空気および湿り固体の状態

1. 1 湿り空気の状態

湿り空気は水蒸気（分子量 $M_v=18.0\text{kg/kmol}$ ）と乾き空気（分子量 $M_a=29.0\text{kg/kmol}$ ）との2成分からなる理想混合気体であるとみなす。したがって、湿り空気の状態を記述するには、温度、圧力および水分濃度の三つの量を指定しなければならない。工学計算では、全圧を1気圧とおいているので、空気の状態の記述には温度と絶対湿度の二つの量を指定するのが普通である。密閉室内の空気をシリカゲルで除湿するとき、一般に系を定圧（たとえば1気圧）とみなすことができないので計算は複雑になる。空気の状態変化より水分量変化を求めるには、湿度（以後、絶対湿度を単に湿度と記す）によらなければならない。ここでは、まず、湿度および湿り比容を表す関係式を示す。

湿り空気の温度を t 、全圧を p_r 、水蒸気分圧を p 、乾き空気の分圧を p_B ($p_B=p_r-p$)、飽和水蒸気分圧を p_s 、関係湿度を $\Psi=p/p_s$ とする。また、1気圧を p_n ($p_n=101.325\text{ kPa}$)と表す。すると、周知のようにこの空気の湿度 Y および湿り比容 v_H は次のように与えられる。

$$Y=0.621\{p/(p_r-p)\}=0.621(p/p_B) \quad [1]$$

$$v_H=(22.4)\{(273+t)/273\}(p_n/p_r)\{(1/29.0)+(Y/18.0)\} \quad [2]$$

飽和水蒸気圧 p_s は表1に示すように温度の関数である¹⁾。したがって、温度 t と関係湿度 Ψ が与えられれば、水蒸気分圧 p は、 $p=\Psi p_s$ より求められる。全圧を1気圧 p_n とかけば湿度 Y および湿り比容 v_H は式[1]および[2]より t と Ψ の関数となり、それぞれ図1および図2のように表される。

1. 2 湿り固体の状態

固体の含水率は湿量基準の含水率 x で表されることが多い。与えられた含水率より除去すべき水分量を計算するには、 x を次式で与えられる乾量基準の含水率 X に換算して使用しなければならない。

$$X = x/(1-x) \quad [3]$$

本研究では、 X を含水率と呼び、湿量基準含水率 x と区別する。

表1 蒸気表¹⁾ (飽和水蒸気圧 p_s [kPa])

温度 t [°C]	圧力 p_s [kPa]								
0	0.6108	13	1.4965	26	3.3597	39	6.9908	52	13.613
1	0.6566	14	1.5973	27	3.5636	40	7.3750	53	14.293
2	0.7055	15	1.7039	28	3.7782	41	7.7773	54	15.002
3	0.7575	16	1.8168	29	4.0040	42	8.1985	55	16.511
4	0.8129	17	2.9362	30	4.2415	43	8.6391	56	16.511
5	0.8718	18	2.0624	31	4.4911	44	9.1001	57	17.313
6	0.9345	19	2.1957	32	4.7534	45	9.5820	58	18.147
7	0.0012	20	2.3366	33	5.0288	46	10.086	59	19.016
8	0.0720	21	2.4853	34	5.3180	47	10.612	60	19.920
9	0.1472	22	2.6422	35	5.6216	48	11.162	61	20.861
10	0.2270	23	2.8076	36	5.9400	49	11.736	62	21.383
11	0.3116	24	2.9821	37	6.2739	50	12.335	63	22.855
12	0.4014	25	3.1660	38	6.6240	51	12.961	64	23.912

2. 平衡関係；吸着等温線

2. 1 シリカゲルの吸着等温線

シリカゲルの常温（25℃付近）の吸着等温線に関するデータは散見されるが、データの出典は明確でない。製品別の吸着等温線を明らかにすべきであり、得られた吸着等温線を実験式で表すことが望ましい。

彦坂²⁾は温度20, 30および50℃における中国青島の海洋産のA, BおよびFNG形シリカゲルの吸着等温線を測定し、その実験式を得ている。次式はその一つである。

$$A \text{ 形；} 20^\circ\text{C；} \\ X_{Ge} = 0.4195p / (1 + 0.6208p) \quad [4]$$

上の関係は吸着過程で得られた平衡関係であり、吸着過程の吸着等温線と呼ばれる。通常、吸着等温線に履歴現象が認められており、脱着（乾燥）過程で得られる脱着過程の吸着等温線と上記の吸着過程の吸着等温線は一致しない。乾燥後の貯蔵過程を含めてシリカゲルの有効性を総合的に検討するためには、吸着および脱着の両過程の吸着等温線が必要である。

2. 2 固体製品（被乾燥物）の吸着等温線

シリカゲルを用いて固体製品を乾燥する場合、その固体製品の吸着等温線も必要となる。固体製品の吸着等温線についても、式 [4] のタイプの実験式による表現が望ましい。そのような実験式は、いくつかの穀物や食品について提出されているが、ここでは温度35℃における玄米の脱湿平衡に関する測定結果³⁾を例示する。

$$1 - (p/p_s) = \exp(-88.3X_{Pe}^{2.58}) \quad [5]$$

固体製品についても、温度の異なる条件下における吸着および脱着の両過程における吸着等温線の測定が必要である。

2. 3 シリカゲルと固体製品の混合状態における相互平衡含水率

乾いたシリカゲルと湿った固体製品を混合しておく、長時間後に両者は相互に平衡状態に到達する。この場合の両者の含水率は、そのときの空気条件（温度、関係湿度）における、吸着過程のシリ

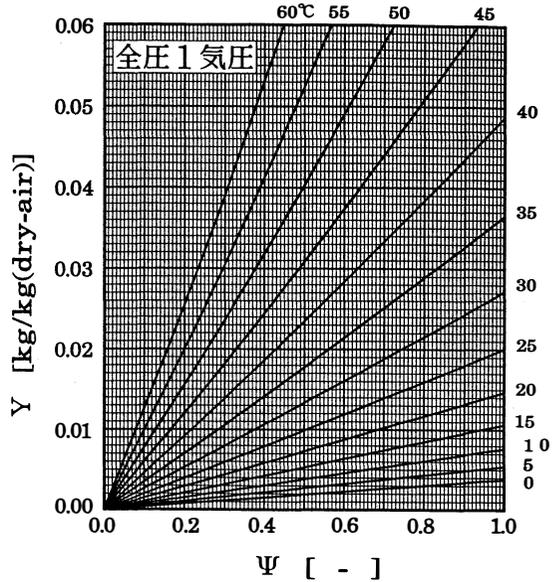


図1 絶対湿度 Y

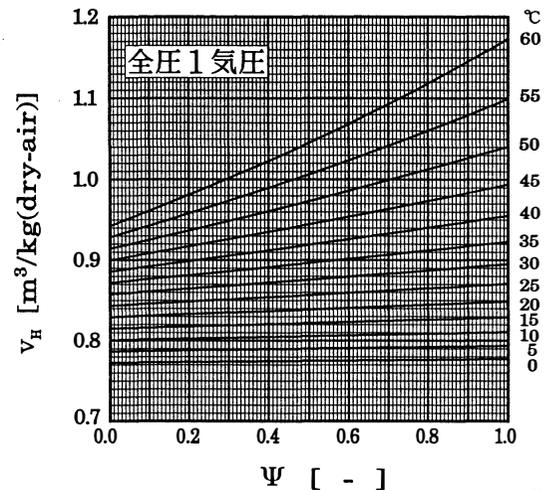


図2 湿り比容 v_H

カゲルの平衡含水率 X_{G_e} とそれと平衡にある脱着過程の固体製品の平衡含水率 X_{P_e} を表す。

著者らは粉の乾燥において、シリカゲルと粉の混合比を変えて X_{G_e} と X_{P_e} を測定し、両者の比 $R(=X_{G_e}/X_{P_e})$ と X_{P_e} との関係を表す次の実験式を得た⁴⁾。

$$R = 3.50 - 10X_{P_e} \quad [6]$$

上式の応用方法については後述する。

3. 密閉室内湿り空気の除湿

3. 1 シリカゲルによる密閉室内空気の除湿操作

空気中の水蒸気がシリカゲルに吸着されるとその水蒸気の体積はゼロになる。したがって、除湿がおこると密閉室容積が不変であれば系の圧力(全圧)は低下するし、また圧力を不変に保とうとすると系の容積は減少する。このような密閉系では、解放系の流通式におけるような定圧(1気圧)近似による水分量変化の計算は不正確となる。密閉室内の除湿過程では空気中の水蒸気量は減少するが、乾き空気的全質量は不変に保たれる。本研究では、この点に着目してシリカゲル必要量の計算法を提案する。

シリカゲルの初期含水率 X_{G_1} は既知であり、空気の初期の温度 t_1 、関係湿度 Ψ_1 、および全圧 p_{r_1} と最終の温度 t_2 および関係湿度 Ψ_2 は与えられているものとする。シリカゲルの最終含水率 X_{G_2} は最終条件の空気との平衡含水率に等しいとみなし、温度 t_2 におけるシリカゲルの吸着等温線より読みとる。密閉室の初期の容積を V_1 とし、初期に密閉室に入れるべき理論的シリカゲルの湿り質量を g_{G_1} と表せば、水分収支より、初期の密閉室 1 m^3 あたりに必要なシリカゲルの最小量(g_{G_1}/V_1) [$\text{kg(wet-solid)}/\text{m}^3$]は次式で与えられる。

$$(g_{G_1}/V_1) = \{(1 + X_{G_1})/v_{H_1}\} \{(Y_1 - Y_2)/(X_{G_2} - X_{G_1})\} \quad [7]$$

3. 2 容積不変の密閉室内空気の除湿に必要なシリカゲルの最小量推定法

除湿により容積不変の密閉室の圧力は低下する。この場合のシリカゲル必要量の計算手順は次の通りである。

- (1) 表1より、 t_1 および t_2 における飽和蒸気圧 p_{s_1} および p_{s_2} を読みとり、初期および最終空気中の水蒸気圧 $p_1 (= \Psi_1 p_{s_1})$ および $p_2 (= \Psi_2 p_{s_2})$ を算出する。
- (2) 式[1]および[2]より初期空気の湿度 Y_1 および湿り比容 v_{H_1} を求める。なお、この場合(容積不変)、湿り比容は一定に保たれ、 $v_{H_1} = v_{H_2}$ となる。
- (3) 系の乾き空気質量不変の条件より、最終空気の乾き空気分圧 p_{B_2} を次式で求める。

$$p_{B_2} = p_{B_1} \{(273 + t_2)/(273 + t_1)\} \quad [8]$$

- (4) 最終空気の全圧 $p_{r_2} (= p_2 + p_{B_2})$ および湿度 $Y_2 (= 0.621(p_2/p_{B_2}))$ を求める。
- (5) 吸着等温線より最終空気(t_2, Ψ_2)と平衡にあるシリカゲルの含水率 X_{G_2} を読みとる。
- (6) 式[7]より、湿りシリカゲルの最小必要量(g_{G_1}/V_1)を算出する。

3. 3 圧力不変（容積縮小）の密閉室内空気の除湿に必要なシリカゲルの最小量推定法

プラスチックフィルムのような柔軟な材料で囲った密閉室を全圧 p_r の大気中におく。密閉室内へ乾いたシリカゲルを入れると、圧力は p_r を保ちながら、密閉室の容積は吸湿された水蒸気分だけ収縮する。密閉室の初期容積を V_1 、最終容積を V_2 と表すと、シリカゲル必要量の計算手順は次のようになる。

- (1) この場合も表1より、 t_1 および t_2 における飽和蒸気圧 p_{s1} および p_{s2} を読みとり、初期および最終空気中の水蒸気圧 $p_1 (= \Psi_1 p_{s1})$ および $p_2 (= \Psi_2 p_{s2})$ を算出する。
- (2) 初期および最終の乾き空気分圧 $p_{B1} (= p_r - p_1)$ および $p_{B2} (= p_r - p_2)$ を求め、湿度 Y_1, Y_2 および湿り比容 v_{H1}, v_{H2} を式 [1] および [2] で計算する。
- (3) この場合も吸着等温線より、最終空気と平衡にあるシリカゲルの含水率 X_{G2} を読みとる。
- (4) 式 [7] よりシリカゲルの最小必要量(g_{G1}/V_1)を求める。
- (5) なお、初期と最終の密閉室の容積比 V_2/V_1 は次のようになる。

$$V_2/V_1 = v_{H2}/v_{H1} = \{(273+t_2)/(273+t_1)\}(p_{B1}/p_{B2}) \quad [9]$$

3. 4 密閉室内全圧を1気圧とみなす近似計算法

空間の水蒸気量の変化に伴う圧力変化あるいは容積変化を無視し、系は終始1気圧 ($p_n = 101.325$ kPa) に保たれるとみなす。

- (1) この場合も表1より、 t_1 および t_2 における飽和蒸気圧 p_{s1} および p_{s2} を読みとり、初期および最終空気中の水蒸気圧 $p_1 (= \Psi_1 p_{s1})$ および $p_2 (= \Psi_2 p_{s2})$ を算出する。
- (2) 式 [1] および [2] より、 Y_1, Y_2 および v_{H1} を計算する（図1および図2を利用してもよい）。
- (3) この場合も吸着等温線より、最終空気と平衡にあるシリカゲルの含水率 X_{G2} を読みとる。
- (4) 式 [7] よりシリカゲルの最小必要量(g_{G1}/V_1)を求める。

なお、ここに述べた近似計算法によると、シリカゲル必要量は一般的に安全側（正確な計算によるよりも必要量が多く見積もられる）に予測される。ただし、 $t_1 < t_2$ の場合はこの限りではなく、初期と最終の温度差が大きいと近似による誤差は大きくなる。また、操作温度が高くなると水蒸気圧変化が大きくなり誤差も大きくなる恐れがある。

3. 5 計算例

初期における容積 V_1 、全圧1気圧 ($p_{r1} = p_n$) の密閉室で温度30℃、関係湿度70%の初期空気を、温度20℃、関係湿度30%の状態に除湿するに必要なシリカゲルの最小量を計算する。ただし、初期含水率ゼロ ($X_{G1} = 0$) の中国青島海洋産のA形シリカゲルを用いるものとする。

3. 5. 1 容積不変の密閉室内空気の除湿に必要なシリカゲルの最小量の計算

- (1) 表1より、 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ より $p_{s1} = 4.2415$ kPa、 $t_2 = 20^\circ\text{C}$ より $p_{s2} = 2.3366$ kPa が得られ、 $\Psi_1 = 0.70$ および $\Psi_2 = 0.30$ より、 $p_1 = (4.2415)(0.70) = 2.97$ kPaおよび $p_2 = (2.3366)(0.30) = 0.70$ kPaとなる。
- (2) 初期全圧が1気圧であるので初期空気に図1および図2が使用できて、 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ 、 $\Psi_1 = 0.70$ における図1の縦軸の高さより $Y_1 = 0.0187$ kg(H_2O)/kg(dry-air) が得られ、図2の縦軸の高さより $v_{H1} = 0.883$ m³ (humid-air)/kg(dry-air)が得られる（式[1], [2]を用いて計算してもよい）。
- (3) $p_{B1} = p_n - p_1 = 98.365$ kPaであるから、式 [8] より、 $p_{B2} = (98.365)(293/303) = 95.12$ kPa

となる。

- (4) $p_{r2} = 0.70 + 95.12 = 95.82$ となる。また、式 [1] より $Y_2 = (0.621)(0.70/95.12) = 0.00457 \text{ kg (H}_2\text{O) / kg(dry-air)}$ と求められる。
- (5) 最終空気 ($t_2 = 20^\circ\text{C}$, $p_2 = 0.70 \text{ kPa}$) と平衡にあるシリカゲルの最終の含水率 X_{G2} は式 [4] より、 $X_{G2} = (0.4195)(0.70) / \{1 + (0.6208)(0.70)\} = 0.205 \text{ kg(H}_2\text{O) / kg(dry-air)}$ となる。
- (6) 式 [7] より、 $(g_{G1}/V) = \{(1+0)/0.883\} \{(0.0187-0.00457)/(0.205-0)\} = 0.0781$ となる。

3. 5. 2 全圧不変の密閉室内空気の除湿に必要なシリカゲルの最小量の計算

- (1) 表 1 より、 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ より $p_{s1} = 4.2415 \text{ kPa}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$ より $p_{s2} = 2.3366 \text{ kPa}$ が得られ、 $\Psi_1 = 0.70$ および $\Psi_2 = 0.30$ より、 $p_1 = (4.2415)(0.70) = 2.97 \text{ kPa}$ および $p_2 = (2.3366)(0.30) = 0.70 \text{ kPa}$ となる。
- (2) 全圧 1 気圧 (不変) より、 $p_{B1} = p_n - p_1 = 101.325 - 2.97 = 98.355 \text{ kPa}$, $p_{B2} = p_n - p_2 = 101.325 - 0.70 = 100.625 \text{ kPa}$ となる。また、図 1 および図 2 より、 $Y_1 = 0.0187 \text{ kg(H}_2\text{O) / kg (dry-air)}$, $Y_2 = 0.00432 \text{ kg(H}_2\text{O) / kg(dry-air)}$ および $v_{H1} = 0.883 \text{ m}^3(\text{humid-air) / kg(dry-air)}$, $v_{H2} = 0.835 \text{ m}^3(\text{humid-air) / kg(dry-air)}$ が得られる (式 [1], [2] で計算してもよい)。
- (3) 最終空気 ($t_2 = 20^\circ\text{C}$, $p_2 = 0.70 \text{ kPa}$) と平衡にあるシリカゲルの最終の含水率 X_{G2} は式 [4] より、 $X_{G2} = (0.4195)(0.70) / \{1 + (0.6208)(0.70)\} = 0.205 \text{ kg(H}_2\text{O) / kg(dry-air)}$ となる。
- (4) 式 [7] より、 $(g_{G1}/V_1) = \{(0.0187-0.00432)/(0.883)\} / (0.205-0) = 0.0794$ となる。
- (5) 容積比は式 [9] より、 $V_2/V_1 = v_{H2}/v_{H1} = 0.835/0.883 = 0.946$ となる。

3. 5. 3 密閉室容積不変、全圧を 1 気圧とみなす近似計算法 このでの計算の条件は、系の全圧が 1 気圧 (不変) であるので、シリカゲル必要量の計算手順および計算結果は前小節 (3. 5. 2) と一致し、 $(g_{G1}/V_1) = 0.0794$ となる。ただし、近似計算法では系の容積変化を求めることはできない。

4. 密閉室内の固体製品の乾燥

4. 1 シリカゲルによる密閉室内固体製品の乾燥操作

密閉室内の湿り固体製品をシリカゲルで乾燥する場合、一般に室内空間に存在する空気の除湿のための水分量は固体の乾燥のための水分量に比べて極めて小さい。ここではこの空気の除湿のための水分を無視するが、それが無視できない場合には前章の計算法を参考にすればよい。

固体製品の初期の湿り質量 g_{P1} [kg(wet-solid)] と含水率 X_{P1} , 最終 (目標) の含水率 X_{P2} , およびシリカゲルの初期含水率 X_{G1} , は与えられているものとする。また、シリカゲルと製品の吸着等温線は既知であるか、またはシリカゲルと製品の相互平衡含水率は既知とする。

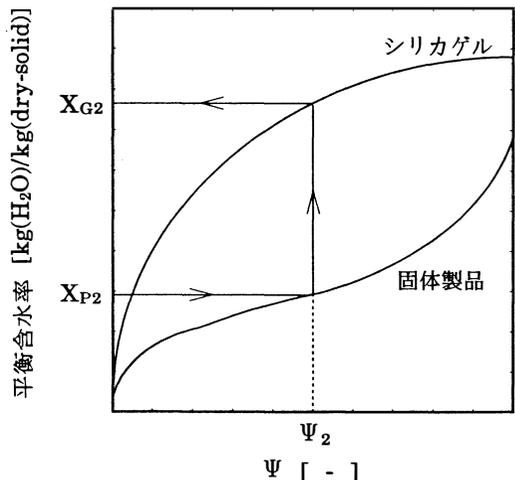


図 3 吸着等温線

4. 2 吸着平衡とシリカゲルの最終含水率

製品の最終含水率 X_{P2} が指定されれば、それと平衡にあるシリカゲルの含水率を推定してそれをシリカゲルの最終含水率 X_{G2} とみなす。シリカゲルの吸着過程の吸着等温線および固体製品の脱着過程の吸着等温線が図3のように与えられているとすれば、図の X_{P2} からの矢印に沿って X_{G2} を見いだすことができる。すなわち、 X_{P2} と平衡にある空気の関係湿度 Ψ_2 を求めて、この Ψ_2 との平衡状態のシリカゲル含水率を X_{G2} と見なすことになる。

図3において、製品含水率 X_P をさまざまに変えて、 X_P と平衡にあるシリカゲルの含水率 X_G を読みとり、相互に平衡する含水率同士の比 $R = X_G / X_P$ と X_P との関係を一次式で表せば式[6]と類似の式が得られる。このような式があれば、 X_{P2} より R_2 を求め、 $X_{G2} = R_2 X_{P2}$ より X_{G2} が算出される。

4. 3 密閉室内固体製品の乾燥に必要なシリカゲルの最小量

初期シリカゲルの湿り質量を g_{G1} [kg(wet-solid)]とおくと、水分収支より、初期の単位湿り固体当たりに必要な湿りシリカゲルの最小質量(g_{G1} / g_{P1})は次式で与えられる。

$$(g_{G1} / g_{P1}) = \{(1 + X_{G1}) / (1 + X_{P1})\} \{(X_{P1} - X_{P2}) / (X_{G2} - X_{G1})\} \quad [10]$$

4. 4 計算例

密閉室内においてシリカゲルで粉末を乾燥するものとし、ここでは乾燥方法や乾燥速度は別の問題として、理論的に必要なシリカゲル量(必要最小量)を求める。密閉室におけるシリカゲルと粉末の相互平衡含水率の比 $R = X_{Ge} / X_{Pe}$ と粉末の平衡含水率 X_{Pe} との関係は式[6]で表されている。わが国では、製品の粉に要求される含水率 X_{P2} は0.17 kg(H₂O)/kg(dry-solid)である。これを式[6]に代入すると $R_2 = 1.80$ となり、シリカゲルの最終含水率 X_{G2} は、 $X_{G2} = R_2 X_{P2} = 0.306$ kg(H₂O)/kg(dry-solid)となる。これより、式[10]は次のように表される。

$$(g_{G1} / g_{P1}) = \{(1 + X_{G1}) / (1 + X_{P1})\} \{(X_{P1} - 0.17) / (0.306 - X_{G1})\} \quad [11]$$

すなわち、湿り粉末1kgを目標含水率(0.17)に乾燥するために必要なシリカゲルの最小量(g_{G1} / g_{P1})は、上式のようにシリカゲルおよび粉末の初期含水率 X_{G1} および X_{P1} の関数になり、その関係は図4のように表される。

結 言

密閉室においてシリカゲルを乾燥剤として使用し、空気の除湿および固体の乾燥を行う場合のシリカゲル必要量の推定法を提出した。空気の除湿の過程では、除湿に伴う気体量の減少によって全圧が低下し、系の状態変化は複雑になる。本研究では、密閉系において乾き空気量が不変であることに着目し、厳密な解法を示した後、比較的単純な近似解法を提示した。固体の乾燥では、固体製

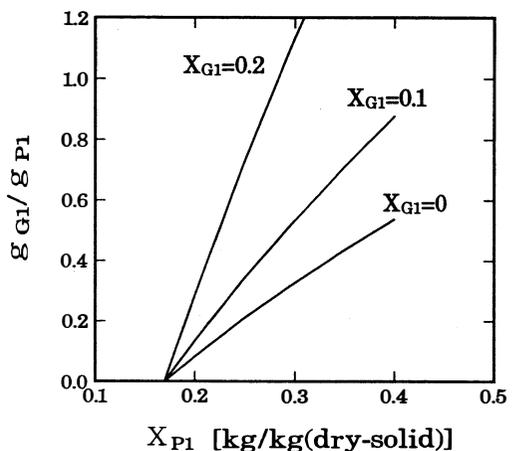


図4 粉末乾燥に必要なシリカゲル量

品の目標含水率が指定されたとき、それと平衡にあるシリカゲルの含水率の求めなければならない。本研究では、籾米の乾燥を例示して、提案されたシリカゲル必要量の推定法を解説した。

使用記号

g_G : 湿りシリカゲルの質量	[kg(wet-solid)]
g_P : 湿り固体製品の質量	[kg(wet-solid)]
M_a : 空気(乾き空気)の分子量=29.0	[kg/kmol]
M_v : 水蒸気の分子量=18.0	[kg/kmol]
p : 水蒸気圧	[kPa]
p_B : 空気(乾き空気)の分圧	[kPa]
p_s : 飽和水蒸気圧	[kPa]
p_r : 全圧(大気圧)	[kPa]
p_n : 1気圧=101.325 kPa	[kPa]
R : シリカゲルと固体製品の相互平衡含水率比= X_{G_e}/X_{P_e}	[-]
t : 温度	[°C]
V : 密閉室(乾燥室)の容積	[m ³]
v_H : 湿り比容	[m ³ /kg(dry-air)]
x : 湿量基準含水率	[kg(H ₂ O)/kg(wet-solid)]
X_G : シリカゲルの含水率	[kg(H ₂ O)/kg(dry-solid)]
X_{G_e} : シリカゲルの平衡含水率	[kg(H ₂ O)/kg(dry-solid)]
X_P : 固体製品の含水率	[kg(H ₂ O)/kg(dry-solid)]
X_{P_e} : 固体製品の平衡含水率	[kg(H ₂ O)/kg(dry-solid)]
Y : 湿度(絶対湿度)	[kg(H ₂ O)/kg(dry-air)]
Ψ : 関係湿度= p/p_s	[-]

〈Subscripts〉

- 1 : 初期
- 2 : 最終(平衡)

引用文献

- 1) 日本機械学会編：“蒸気表”，日本機械学会，(1980)，p.10
- 2) 彦坂道治：シリカゲルの物性値とその応用，富山大学修士論文，(1995)，p.24
- 3) 山口賢一：玄米粒の熱的性質，富山大学修士論文，(1991)，p.33
- 4) S. Yamaguchi and H. Kawasaki: Basic research for rice drying with silica gel, DRYING TECHNOLOGY, Vol.12, No.5, (1994), pp.1053-1067