粉粒体層の乾燥における限界含水率について

On the Critical Moisture Content for Drying of Granular Packed Bed

倉 前 正 志*
Masashi Kuramae

吉 岡 知 子*
Tomoko Yoshioka

田 中 達 夫*
Tatsuo Tanaka

1. 緒 言

多くの粉粒体材料の乾燥過程が恒率乾燥と減率乾燥の両期間に明確に区分できるという事実が古くから知られており、その限界点である限界含水率の値は乾燥装置の設計や最適操作条件の選定のための重要な基礎物性値となっている。したがってこの限界含水率の値を乾燥条件や材料の物性値などから簡単に予測できることがのぞましい。

粉粒体層（特に非吸着性粒子層）の乾燥機構は最近になってとみに明らかにされており、水分拡散係数を用いた限界含水率の推定に関する試みも進められている¹⁾。しかし、限界含水率と乾燥条件、粒子および粒子層の諸物性値などとの関係については未知な点が多く、なお問題が残されていると思われる。

本報は久保田らが誘導した無次元化キャピラリー・サクシヨンプレシャ（以下C. S. Pと略す）と含水率との関係²⁾を利用した限界含水率の推定法について検討するとともに湿ったガラスビーズ、カルサイトの粗粒子層についてその粒径、空隙率、層厚、初期含水率などを種々変えて乾燥速度曲線を測定し、これら諸因子の限界含水率におよぼす影響について考察を行なったので報告する。

2. 限界含水率の推定法

乾燥における限界含水率についてはその定義のし方、および規定条件についてそれぞれ異なった説があるが、本報では一応限界含水率を次のように定めることにする。

(1)限界含水率は恒率および減率乾燥の限界時における層全体の平均含水率を表わすものとする。したがって層厚を L とすれば限界含水率 S_{crit} は次式で与えられる。

$$S_{crit} = \frac{1}{L} \int_0^L S_x dx \quad \dots(1)$$

(2)限界点が表層の状態で規定されるということはほぼ通説となっているが、限界点における表面含水率 S_0 については $S_0 = S_p$ （懸垂含水率）³⁾ とする考え方と $S_0 = 0$ ⁴⁾ とする考え方とがあるが、本報では前者にしたがうものとする。

さて(1)式より限界含水率は限界時における層内の水分分布 S_x を知るにより求めることができる。乾燥過程における粒子層内の水分移動機構に関してはこれまでも種々の検討が行なわれておりその知見によれば一般に粒径数 10μ 以上の粗粒子層内に存在している水分は主として粒子層間隙の毛細管現象に基づくいわゆるキャピラリー水の形で保有されていて、この場合の液状水移動現象は含水率勾配を起動力にとって拡散法則を適用する取扱いよりも、粒子層のC.S.Pの概念を用いた取扱いによってその現象がよく説明できることが示されている⁵⁾。また層内を移動する液状水にはC.S.Pの他、重力および流動による摩擦抵抗の力が作用すると考えられるが、粗粒子層で通常の乾燥条件下では流動による摩擦抵抗の寄与は前二者に比べてきわめて小さく通常無視しうると考えられ、したがってC.S.Pが近似的に重力と平衡にあるとして取扱うことができる。さらにC.S.Pは含水率および温度の関数と考えられるが、恒率乾燥過程のように層内の温度がほぼ一定と見なされる場合にはC.S.Pは含水率の1価関数として取扱うことができるであろう。

以上より表面の液状水に作用するC.S.Pを p_0 とすれば、表面から距離 x の深さの位置におけるC.S.P、 p_x は

$$p_x = p_0 - \frac{\rho_w g x}{g_c} \quad \dots\dots(2)$$

となるので、 $S-p$ 曲線(Fig. 1)より p_x に対応する含水率を読めば位置 x における含水率を知ることができる。このようにして表面の含水率が規定され、かつ $S-p$ 曲

昭和50年9月5日受理

* 北海道大学工学部合成化学工学科（〒060 札幌市北区北13条西8丁目）TEL 011-711-2111

** 北海道大学工学部衛生工学科

Fig. 1 S - p 曲線に基づく水分分布算出法

線が与えられていれば層内の水分分布を算出することができるはずである*。

以下では限界含水率の推定法を検討するにあたり、先に久保田らが導いた無次元化 C.S.P. $P(=p\epsilon d_p/\sigma \cos \theta (1-\epsilon)\phi)$ と S との関係の実験式²⁾を利用することにする。それによれば

$$\left. \begin{aligned} S \leq 0.4 \quad & \text{のとき} \quad S = 120 \exp(-5.04P) \\ & + 0.085 \\ 0.97 \geq S \geq 0.4 \quad & \text{のとき} \quad S = 1.3P^{-7.1} \\ S \geq 0.97 \quad & \text{のとき} \quad S = 1.0 - 0.029P \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

であり、これを用いると S_{crit} は次のようになる

$$\left. \begin{aligned} P_0 - X \geq 1.18 \quad & \text{のとき} \quad \left(X = \frac{\rho_w g \epsilon d_p L}{\sigma \cos \theta (1-\epsilon) \phi} \right) \\ S_{crit} = \frac{1}{X} [23.81 e^{-5.04P_0} (e^{5.04X} - 1) + 0.085X] \\ 1.18 \geq P_0 - X \geq 1.04 \quad & \text{のとき} \\ S_{crit} = \frac{1}{X} [0.2131(P_0 - X)^{-6.1} + 0.085P_0 \\ & - 23.81 e^{-5.04P_0} - 0.1157] \\ 0 \leq P_0 - X \leq 1.04 \quad & \text{のとき} \\ S_{crit} = \frac{1}{X} [-23.81 e^{-5.04P_0} - 0.915P_0 + 1.0X \\ & + 0.0145(P_0 - X)^2 + 1.0763] \\ P_0 - X \leq 0 \quad & \text{のとき} \\ S_{crit} = \frac{1}{X} [-23.81 e^{-5.04P_0} - 0.915P_0 + 1.0X \\ & + 1.0763] \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

すなわち、これらの関係から限界点における P_0 が規定

* このような考え方から限界含水率を求める方法については、すでに桐柴⁷⁾が明らかにしている。

Fig. 2 実験装置

されれば限界含水率は無次元数 $X[\rho_w g \epsilon d_p L / \sigma \cos \theta (1-\epsilon)\phi]$ の関数として整理できることがわかる。

3. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig. 2 に示す。送風機により装置内に吸引された空気はヒーターによって一定温度に加熱された後測定部に入る。測定部の本体は幅11.5cm, 高さ8.5cmの断面をもち、流入空気による乱流を防ぐために十分な距離をとった。また、装置は桐柴⁸⁾にならない流入空気のダクト通過中の温度降下およびダクト内の温度不均一をふせぐために熱伝導性の悪い木製とした。そして測定部の下部に幅6.2cm, 高さ12.0cm, 長さ28.0cmの箱をとりつけ、その中に乾燥速度測定用の試料容器を挿入できるようにした。また箱の上部には試料容器の断面積と容器の壁の厚さを加えた大きさの窓を作り、そこに測定部の下部と粒子層表面とが同じ高さになるように容器の上端を入れ、下には木製の台を置いて高さを調節し試料の出し入れが簡単になるようにした。試料容器は塩化ビニル製でその容積, 断面積, 重量などはあらかじめ精密に測定したものを使用した。

試料には篩分けによって粒径をそろえたガラスビーズおよびカルサイトを用いた。その性質は Table 1 に示す。

Table 1 粒子層の物性値

粒 子	篩 メッシュ	平均粒径	形状係数	密 度
ガラスビーズ	テラー篩 16~20	912 μ	6	2.51[g/cm ³]
	20~24	767	〃	〃
	28~32	542	〃	〃
	42~48	323	〃	〃
	100~115	135	〃	〃
カルサイト	工業篩 12~16	1369	18.0	2.715
	16~20	1022	16.2	〃
	20~26	755	15.0	〃
	30~35	507	13.8	〃
	40~50	358	12.6	〃
	70~80	214	10.8	〃
	100~120	141	9.6	〃

Table 2 限界含水率測定データ

Run No.	材 料	平均粒径 [μ]	乾燥速度 [g/hr·cm ²]	初期含水率 [-]	空隙率 [-]	層厚 [cm]	X [-]	限界含水率 [-]
* 1	カルサイト	141	0.206	1.00	0.444	2.75	0.0435	0.16
* 2		214	0.166	1.00	0.465	1.76	0.0409	0.12
* 3		214	0.089	1.00	0.490	4.16	0.1069	0.16
4		358	0.160	1.00	0.474	1.96	0.0677	0.11
5		358	0.094	1.00	0.483	3.99	0.1419	0.12
6		358	0.112	1.00	0.496	6.22	0.2348	0.15
7		507	0.131	1.00	0.487	1.96	0.0923	0.10
8		507	0.095	1.00	0.527	4.16	0.2332	0.13
9		507	0.149	1.00	0.512	5.95	0.3096	0.13
10		755	0.171	1.00	0.508	1.96	0.1375	0.11
11		755	0.158	1.00	0.520	3.96	0.2915	0.13
12		755	0.156	1.00	0.473	5.95	0.3628	0.15
13		1022	0.186	1.00	0.454	1.76	0.1246	0.13
14		1022	0.100	1.00	0.453	2.75	0.1939	0.11
15		1022	0.207	1.00	0.495	3.96	0.3187	0.16
16	ガラスビーズ	1369	0.203	1.00	0.519	3.96	0.4386	0.17
17		1369	0.204	1.00	0.492	1.96	0.1949	0.12
* 18		135	0.194	1.00	0.400	1.96	0.0397	0.09
* 19		135	0.181	1.00	0.390	3.96	0.0769	0.14
* 20		135	0.156	1.00	0.410	6.22	0.1255	0.17
21		323	0.153	1.00	0.410	1.96	0.099	0.08
22		323	0.156	1.00	0.428	6.22	0.3382	0.12
23		542	0.131	1.00	0.410	1.76	0.1492	0.11
24		542	0.120	1.00	0.415	5.95	0.5147	0.20
25		767	0.150	1.00	0.405	1.76	0.2067	0.11
26		767	0.132	1.00	0.414	3.96	0.4828	0.14
27		912	0.158	1.00	0.401	1.96	0.2692	0.11
28		912	0.145	1.00	0.372	2.75	0.3342	0.15
29		912	0.143	1.00	0.439	4.16	0.5679	0.23
30		323	0.215	0.70	0.464	1.96	0.1235	0.08
31		323	0.199	0.70	0.446	3.96	0.2321	0.09
32		323	0.186	0.70	0.449	6.22	0.3683	0.10
33		542	0.158	0.70	0.447	1.96	0.1932	0.09
34		542	0.146	0.70	0.443	3.96	0.3840	0.10
35		542	0.123	0.70	0.445	6.22	0.6081	0.18
36		767	0.129	0.70	0.447	1.96	0.2733	0.06
37		767	0.124	0.70	0.442	3.96	0.5412	0.13
38		912	0.074	0.70	0.440	1.96	0.3154	0.09
39		912	0.139	0.70	0.450	1.96	0.3290	0.10
40		912	0.067	0.70	0.443	3.96	0.6462	0.15
41		912	0.142	0.70	0.445	3.96	0.6515	0.13
42		135	0.121	0.50	0.450	1.96	0.0487	0.07
43		135	0.112	0.50	0.456	3.96	0.1008	0.09
44		135	0.114	0.50	0.460	6.22	0.1609	0.14
45		323	0.178	0.50	0.444	1.96	0.1138	0.07
46		323	0.120	0.50	0.460	3.96	0.3850	0.09
47		542	0.171	0.50	0.423	1.76	0.1573	0.11
48		542	0.136	0.50	0.440	1.96	0.1840	0.09
49		542	0.133	0.50	0.436	5.95	0.5609	0.12

実験はそれぞれの試料について一定の空隙率，含水率を形成させて乾燥を行ない，一定時間毎に取り出して減少重量を測定し乾燥速度曲線を求めた。試料の層厚，粒径，初期含水率，乾燥速度などを変え，種々の条件で測定を行なった。

4. 実験結果と考察

測定結果を Table 2 に示す。またその乾燥速度曲線の一例を Fig. 3 に示してある。

限界含水率に及ぼす恒率乾燥速度の影響について考えると，Table 2 より Run No. 5, 10においては乾燥速度の遅いNo. 5の方が限界含水率が小さく，また Run No. 14, 17 ではその逆に乾燥速度の速い No. 14の方が限界含水率は小さい。理論的には2.でも述べたようにこの実験で用いたような粗粒子層では内部液状水移動抵抗は極めて小さいと考えられるから層内の水分分布は蒸発速度には依存しないはずである。したがって，この程度の限界含水率の差は実験誤差によるものと思われる。

Fig. 3 乾燥速度曲線の例

また、一般に同一粒子層であっても初期含水率の小さい実験における限界含水率の値は小さい。これは乾燥初期から粒子層の空隙内に入りこんだ空気が限界時における層内の水分分布に影響をおよぼすためであると考えられる。

また特に限界含水率の値は層厚および平均粒子径により顕著に変化している。一般に層厚が大なる程また粒径が大なる程限界含水率は増加するが、これらの傾向は2.の考察からも当然予想される結果である。ただし粒径 135μ のガラスビーズおよび $141, 214\mu$ のカルサイト (Table 2 * 印) では小粒径にもかかわらずかなり大きな限界含水率を示しているが、これは小粒径ではウェッジ水もしくは付着水が増加するものと考えれば説明がつくと思われる。

さらに、粒子形状の異なるガラスビーズとカルサイトの結果を比較すると、限界含水率の値そのものについては両者に顕著な相違は見られなかった。ただカルサイトの測定においてはしばしば恒率乾燥速度が一定でなく、含水率の減少に伴って漸次減少していくような現象が見られた。また乾燥初期において蒸発速度が一時減少するということが多かったが、これらの現象はおそらく粒子のまわりに付着しているカルサイトの微粉が液状水とともに表面へ移動して水分の蒸発をさまたげるためであると推察した。

さて、次に2.で誘導した無次元パラメータ X と S_{crit} との関係について検討する。初期含水率 $S_{int}=1.0$ の場合について推定値と実測値との関係を整理すると Fig. 4 のようになる。なお推定値は P_0 の与え方により異なるためそのいくつかの値について示した。また $S_{int}<1$ の場合の実測値についてはその理論的根拠は厳密には若干問題があるが、一応

$$S_{crit}|_{S_{int}<1} = S_{int} \times S_{crit}|_{S_{int}=1} \quad \dots\dots(5)$$

Fig. 4 S_{crit} と X との関係 ($S_{int}=1.0$ の場合)

Fig. 5 S_{crit} と X との関係 ($S_{int}=0.7$ の場合)

Fig. 6 S_{crit} と X との関係 ($S_{int}=0.5$ の場合)

と仮定して算出された推定値とともに Fig. 5, 6 に示した。いずれも、推定値と実測値の傾向は比較的良く一致しているようである。ただし、先に述べた小粒径 (Table 2 * 印) のデータは問題があるので点綴を省いた。

また限界点に達するまでに要する時間 T_{crit} について

Fig. 7 T_{crit} の推定値と実測値との関係

は恒率乾燥速度を W とすれば物質収支から簡単に次のように導かれる。

$$T_{crit} = (S_{int} - S_{crit}) \times (L \cdot \varepsilon \cdot \rho_w) / W \quad \dots\dots(6)$$

記

号

d_p : 粒子径	[cm]
g : 重力加速度	[cm/sec ²]
L : 層厚	[cm]
p : キャピラリーサクシ ョンプレシャ	[Kg/cm ²]
P : 無次元化キャピラリーサクシ ョンプレシャ	[-]
S : 含水率 (液飽和度)	[-]
T : 時間	[sec]
W : 恒率乾燥速度	[g/cm ² hr]
x : 深さ方向の距離	[cm]
X : 無次元パラメータ $= \left(\frac{w g \varepsilon d_p L}{\phi \sigma (1 - \varepsilon)} \right)$	[-]

ε : 空隙率	[-]
θ : 接触角	[-]
ρ_w : 水の密度	[g/cm ³]
σ : 水の表面張力	[g/cm·sec]
ϕ : 粒子の形状係数	[-]
添 字	
crit : 限界点	
int : 初期値	
0 : 層表面における値	
x : 距離 x における値	

引 用 文 献

- 鈴木 睦ら：化学工学協会北海道大会講演要旨集，p. 2 (1975)
- 久保田，河上，大谷：化学工学，**32**，822 (1968)
- 関，福迫，田中，中岡：第10回日本伝熱シンポジウム講演論文集，p. 389 (1973)
- 鈴木，前田：第3回日本伝熱シンポジウム講演論文集，p. 161 (1966)
- 大谷，鈴木，前田：化学工学，**30**，1130 (1966)
- 桐栄良三ら：化学工学，**28**，458 (1964)
- 桐栄良三：評論化学工学Ⅱ，p. 593 (朝倉)

先の考察より S_{crit} は X をパラメータにして決定されるので T_{crit} は X ， S_{int} ， $\tau (= L \varepsilon \rho_w / W)$ の関数として決定されることになる。このようにして算出された T_{crit} の推定値と実験に要した時間との相関を Fig. 7 に示した。なお $P_0 = 1.70$ と仮定した。Fig. 7 より両者はかなり良く相関され T_{crit} の推定が可能であることがわかる。

5. 結 言

非吸着性の粗粒子層の乾燥における限界含水率について検討した。一般に乾燥過程における層内の液状水に作用する C.S.P と重力との平衡を仮定することにより S_{crit} は表面含水率と無次元パラメータ $(\rho_w g \varepsilon d_p L / \phi \sigma (1 - \varepsilon))$ を基にして決定されることを示した。またガラスビーズおよびカルサイトの粒子層について乾燥実験を行ない，推定値との関係を調べて限界含水率に及ぼす諸物性値，乾燥条件などとの関係を検討した。その結果，推定値と実測値の傾向は比較的良く一致しており，このような粗粒子層については限界含水率の推定が可能であると思われる。

Authors' Abstract

On the critical moisture content for drying of granular packed bed by

Masashi KURAMAE, Tomoko YOSHIOKA and Tatsuo TANAKA

(Faculty of Engineering, Hokkaido University)

The critical moisture content of drying is an essential characteristic for the design of drying equipment or the selection of optimum drying condition: nevertheless the method of predicting its value from the drying conditions and the natures of material has never been established.

This paper dealt with the method of predicting the critical moisture content by assuming the equilibrium condition between the capillary suction pressure and the gravitational force acting on the liquid moisture in the nonhygroscopic coarse granular packed beds, and by making use of the relationship between the dimensionless capillary suction pressure and the moisture saturation, which was introduced by Kubota et al.

As the results it was pointed out that if the condition of surface at critical point was determined, the critical moisture content was predictable from a dimensionless parameter $X(\rho_w g \varepsilon d_p L / \sigma \cos \theta (1 - \varepsilon) \phi)$ depending upon the characteristics of material etc.

Drying experiments were performed for the coarse granular materials of glass beads and calcites by varying the depth of bed, average particle diameter and initial moisture content etc. The experimental values of critical moisture content were compared with the predicted ones and the agreement proved to be satisfactory.

List of Figures and Tables

Fig. 1 Graphical calculative method of the moisture distribution by the S-P curve

Fig. 2 Experimental apparatus

Fig. 3 Example of the drying characteristic curve

Fig. 4 Relationship between S_{crit} and parameter X ($S_{int}=1.0$)

Fig. 5 Relationship between S_{crit} and parameter

X ($S_{int}=0.7$)

Fig. 6 Relationship between S_{crit} and parameter X ($S_{int}=0.5$)

Fig. 7 Relationship between predicted values and experimental ones of T_{crit}

Table 1 Nature of the granular packed beds

Table 2 Experimental data of critical moisture content

(327ページよりつづく)

41) York, J. L., Stubbs, H. E.: *Trans. A.S. M. E.* 74, 1157 (1952)

42) 広安, 角田: 第3回液体の微粒化に関する講演会予講集p. 47 (昭和49)

43) Seger, G., Sinsel, F.: *Staub Reinh. Luft*, 30, 471 (1970)

44) Allen, J. B., Tanner, R. F., Meadows, D. M., Boggs, L. M.: PB Report (PB206950) (1971-10)

45) 金川: *J. Res. Assoc. Powder Tech.*, 11, 141 (1974)

46) 金川: *化学工学*, 32, 1156 (1968)

47) Bol, J., Gebhart, J., Heinze, W., Petersen, W. D., Wurzbacher, G.: *Staub Reinh. Luft*, 30, 475 (1970)

48) Sinclair, D.: *J.A.P.C.A.*, 17, 102 (1967)

49) 横地, 金川: *化学工学*, 34, 997 (1970)

50) 金川: *化学工学*, 34, 521 (1970)

51) Liou, P. J., Rimberg, D., Haughey, F. J.: *J. Aerosol Sci.*, 6, 183 (1975)

52) Vermeulen, T., Williams, M., Langlois, G. E.: *Chem. Eng. Prog.* 51, 85-F (1955)

53) Geist, J. M., York, J. L., Brown, G. G.: *Ind. Eng. Chem.*, 43, 1371 (1951)

54) Medeck, H., Magnas, D. E.: Preprint of A.P.C.A. (# 75-24.1) (1975)

55) 下浦, 金川, 筒井: *化学工学*, 35, 577 (1971)

56) Stöber, W., Zessack, U.: *Staub Reinh. Luft*, 24, 295 (1964)

57) Passen, C. A. A.: *Int. J. Mass Transfer*, 17, 1527 (1974)