

常温低湿空気による農産物の乾燥および品質評価 (第1報)

— 固体吸着剤および冷却除湿方式に関する基礎実験 —

田原迫昭爾・守田和夫・魏 長楽

(農業機械学第二研究室)

平成元年8月10日 受理

Drying Characteristic of Agricultural Products under Dehumidified Air and Estimation of Its Quality (Part I)

— A Fundamental Drying Experiment for a Method to combine Solid
Moisture Adsorbent and Dehumidifier —

Shôji TAHARAZAKO, Kazuo MORITA and WEI Chang Le

(Laboratory of Agricultural Machinery II)

緒 言

低温・低湿空気による農・林・海産物の乾燥は、その品質の面からみると最もすぐれた乾燥法の一つといえる。古くからいわゆる「寒っ風」で乾燥した米、麦、ソバ実などの穀類をはじめ、食品加工用切干し大根、切干しコンニャク、甘藷およびつるし柿などの農産物、海草、干魚などの海産物、シイタケ、タケノコなどの林産物は良質な乾物として好まれてきた。

著者らは昭和58年からヒートポンプを内蔵した常温除湿乾燥機を試作し、常温でかつ40%～60%の低湿空気による実用的規模での米、麦^{3,4)}、ソバ実⁵⁾、切干し大根⁶⁾などの通気乾燥実験を行ってきた。しかし、対象物によってはさらに低い湿度の空気乾燥できれば、乾燥効率もより向上し、良質の製品が得られることを確認した。

こうした状況の中で、圧縮式ヒートポンプ単用による冷却除湿方式では、空気中の水蒸気がエバポレータフィン部に着霜するため、送風空気温度は約5℃以下に冷却するのは好ましくない。したがって送風空気の絶対湿度を0.005～0.0055 (kg/kg') 以下に下げることが難しい。この冷却飽和空気をコンデンサ部で再加熱して常温付近の温度 (例えば20℃) に上昇させたとしても、相対湿度は35%付近が限界で、このときの温度基準乾燥推進力¹⁾ Δt は8℃となる。もし、この冷却飽和空気を吸着剤により絶対

湿度0.002 (kg/kg') まで低下させ、さらに再加熱 (コンデンサおよび吸着剤の発生吸着熱) して20℃まで断熱昇温させたとすれば、乾燥推進力 Δt は12℃となり、吸着剤の使用による乾燥速度はヒートポンプ単用に比べ約5割増加すると推定される。なお、このときの空気のもつ乾燥推進力 ($\Delta t = 12^\circ\text{C}$) は、乾球温度20℃、相対湿度80%の外気を、さらに15℃加温した空気 (35℃, 35%) のもつ乾燥推進力に相当すると思われる。

以上の観点から、本研究では極低湿空気 (相対湿度10～20%) により各種農・林・海産物を通気乾燥した場合の乾燥特性および乾燥速度を求め、さらに乾燥製品の品質を検討する目的で、固体吸着剤およびヒートポンプ式除湿機を供試し、それぞれの除湿方式について、実用的範囲内での除湿効率、除湿量、除湿持続時間および吸着剤発生熱量に関する基礎実験を行ったものである。

実 験 方 法

1. 実 験 I

吸着剤による吸湿性能、吸着発生熱量および再生効率の測定を行うため、次の実験を行った。また、吸着剤としては、固体吸着剤 (シリカゲル、活性アルミナ、アドソールなど) と液体吸着剤 (塩化リチウム、トリエチレングリコールなど) があるが今回はシリカゲルを供試した。

本実験は吸着剤の吸湿実験と再生実験の二通り行

い、使用した実験装置の概要は Fig. 1 に示す。

吸湿実験の場合は、低温で相対湿度95%に設定した冷蔵倉庫①の空気を送風機②で吸引し、吸着剤充填塔⑤に送り込み吸湿させた。送風量はオリフィス③の前後の圧力を差圧伝送器⑧を通じてペンレコーダ⑨で記録した。充填塔⑤は乾燥したシリカゲルを充填したトレイ⑥を12段重ねたもので、その吸湿量は各充填トレイの重量変化で推定した。実験中の各部の空気温湿度は熱電対⑩および湿度センサ⑪で測定し、それぞれをペンレコーダーに記録した。

再生実験の場合は、冷蔵庫①を開放した常温状態にして吸着実験と同様に送風したが、ダクト途中に設けたヒータ④で加熱し、スライダック⑦で一定温度に調整した熱風を充填塔⑤に送り込んだ。充填塔内の吸着剤は十分に吸湿したものを使用した。

実験に使用した機材、機器の仕様は次のとおりである。

- (1) 冷蔵倉庫：長さ3.84m×巾3.54m×高さ2.20m
内設冷凍機 FVV4 型, 7.5 kw, HITACHI
- (2) 送風機：ターボブロワ DB.3 (三黄機械 K.K.) 圧力700 mmAq, 送風量 8 m³/min-3600 r.p.m, 入力2.2 kW

- (3) 充填塔：内寸300 (W)×300 (D)×900 (H)mm, 断熱壁厚さ45mm (内発泡スチロール25mm), 内部を12段に区分
- (4) トレイ：300 (W)×300 (D)×50 (H)mm, 枠材アルミ板, 底材ステンレス金網 (10メッシュ), 重量470 g
- (5) 加熱部：200W ニクロム線10本 (100V)
- (6) オリフィス：流量Q (m³/min) と差圧ΔP (mmAq) の関係, $Q = 0.0514 + 1.475 \Delta P$
- (7) 差圧伝送器：横河電気61-1010型
- (8) スライダック：MATSUNAGA. MFG. CO. LTD
- (9) 温度測定：C-C 熱電対と水銀温度計併用, 測定24点
- (10) 湿度測定：可変インピーダンス式湿度計およびアスマン通風乾湿計

なお、吸着剤として使用したシリカゲルは粒径6 up, 仮比重0.7, 真比重2.1~2.3, 平均重量610~640 (kg/m³), 平均有孔率50~65 (%) であった。また、それぞれの実験条件は Table 1 に示した。

2. 実験Ⅱ

ヒートポンプによる冷却除湿性能を調べるため、以下の実験を行った。

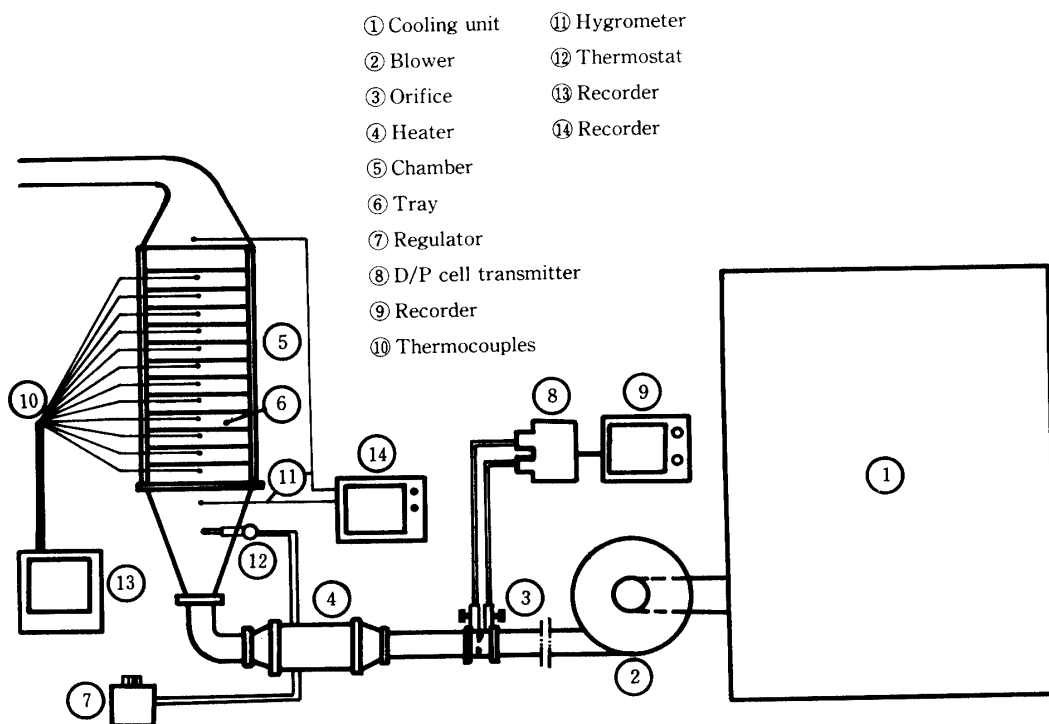


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Experimental condition of absorption and drying.

	Condition of desiccant silica gel				Condition of absorption and drying			
	Weight (kg)	Moisture content (%d. b.)		Testing time (h)	Air flow (m/s)	Temp. (°C)	Relative humidity (%)	
		Before testing	After testing					
			T. S. L.					B. S. L.
Absorption	1.5×2	Bone drying	4.3	36.9	3	0.6	5	95
	1.5×2	〃	2.3	33.6	3	0.8	5	95
	1.5×2	〃	3.0	35.6	3	1.0	5	95
	1.5×2	〃	3.7	34.2	3	1.2	5	95
	1.5×2	〃	37.2	39.7	3	1.5	5	95
Drying	1.5×2	40.8	3.0	2.7	8	0.4	40	30
	1.5×2	35.6	7.7	6.6	5	0.8	60	20
	2.0×2	43.1	11.2	8.8	6	1.2	12	12

T. S. L. : Top of sedimentary layer

B. S. L. : Bottom of sedimentary layer

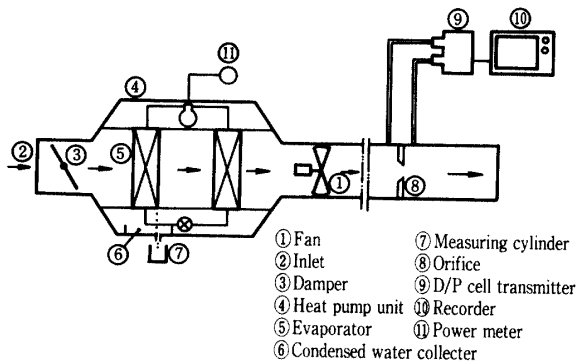


Fig. 2. Experimental apparatus for heat pump dehumidifier.

(1) 実験装置

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。送風機①によって吸引された外気は、外気吸引入口②から風量調節板③を通じてヒートポンプ④に内蔵されたエバポレータ⑤を通過する。この間、空気中に含まれる水蒸気はエバポレータフィンで冷却され、凝縮して水滴となり、下部にある凝結水集水器⑥に滴下する。滴下した凝結水は導水パイプを通じてメスシリンダ⑦で計測した。風量は実験Ⅰと同様に導管に設置したオリフィス⑧および接続した差圧伝送器⑨を通じてペンレコーダ⑩に記録した。また、ヒートポンプ作動に要した動力は積算電力計⑪で計測し、送風量の調節は風量調節板の開閉により行った。

(2) 冷却除湿における除湿量の算定式

(a) 流入した外気の乾球温度を T_1 °C, 露点温度を T_2 °C, エバポレータを通過し冷却された温度

を T_2 °C とすれば、エバポレータ負荷 Q は次式で表される。

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_p (T_1 - T_2) + C_w \Delta M$$

Q_1, Q_2 : 顕熱および潜熱負荷 (kcal/kg-air)

C_p : 定圧比熱 (kcal/kg-air°C)

C_w : 水の蒸発潜熱 (kcal/g-water)

ΔM : 除湿量 (g-water/kg-air)

(b) 乾球温度 $0^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ の範囲において、露点温度 T_D °C と湿り空気の絶対湿度 X (g-w/kg-a) の間には近似的に次式が適用できる³⁾。

$$X = \alpha + \beta T_D + \gamma T_D^2$$

$$\alpha : 3.85 \text{ g/kg}$$

$$\beta : 0.0215 \text{ g/kg}^\circ\text{C}$$

$$\gamma : 0.0165 \text{ g/kg}^\circ\text{C}^2$$

(c) エバポレータ通過後の冷却空気温度 T_2 °C および外気の露点温度 T_D °C と除湿量 ΔM (g-w/kg-a) との関係は次式で与えられる³⁾。

$$\Delta M = \beta (T_D - T_2) \left[1 + (T_D + T_2) \frac{\gamma}{\beta} \right]$$

以上の式から、エバポレータ部における除湿量は外気の露点温度とエバポレータ通過後の冷却空気温度を測定することにより、また、エバポレータ負荷は外気および冷却後の乾球温度と除湿量を測定することにより近似的に計算できる。

実験結果と考察

1. 吸着剤充填層の入口および出口における温度・湿度の推移

吸着剤充填層 (全12層, 体積高さ0.27 m, 乾重量

18.0kg) に風速1.5m/s の湿潤空気を通風した場合、出入口の温度および相対湿度の経時変化を Fig. 3 に示す。出口の相対湿度は280分まではほぼ一定で21～22%を示しているが、以後直線的に上昇し、660分経過後は約85%に達している。このことよりブレーキ点時間²⁾は約4.7時間と推定される。

ここでブレーキ点時間とは減湿操作を開始してから、吸着効率が一定である最後の点、すなわち、ブレーキ点 (Break Point) に達する時間であり、本実験の場合ではシリカゲルの平均含水率が27.5% (d. b.) 付近に達したときであると推定される。

一方、出口温度については、通気開始時は24℃ ($\Delta t=19^\circ\text{C}$) であったものが、280分経過後は15℃ ($\Delta t=10^\circ\text{C}$) とほぼ直線的に下降しており、それ以後は漸降し、660分後には7℃ ($\Delta t=2^\circ\text{C}$) となった。なお、供試シリカゲル吸着剤は長期間5℃の冷蔵庫に密閉保存したもので、それ自体からの発熱は吸着熱だけと考えられる。また、側壁などからの熱貫流による温度上昇は1℃であった。

2. 各堆積層ごとの吸湿量の推移

Fig. 4 は塔内風速約1.5 (m/s) でのそれぞれの堆積層ごとの吸湿量の推移を材料の乾量基準含水率で示したものである。各層の初期絶乾材料の重量は1.5kgで堆積厚さは平均22.5mmである。供試したシリカゲルは含水率35%-d. b. 以上になると吸湿能力が極端に低下している。したがって使用限界を35%-d. b. とし、それまでの時間 T (h) と n 番目の層 X_n との関係の求めると、近似的に次の関係が認められた。

$$T=0.75+0.725X_n$$

すなわち、最下層のシリカゲルの含水率が30%増加するのに約1.4時間であるのに比べ、最上層 (12層目) は9.5時間を要した。この実験の場合、ブレーキ点時間は約4.7時間と推定されるので、最上層のシリカゲルが吸湿能力を失う時間はブレーキ点時間の約2倍となっている。

3. 堆積厚さと吸湿量との関係

Fig. 5 は前記吸湿実験条件下で、堆積高さを異にした場合の各層の平均含水率 (d. b.) の経時変化を示したものである。堆積高さが増加するにつれて初期の層平均含水率の増加速度は減少するが吸湿水分量は増加している。また、吸湿開始から1時間経過したときの吸湿量と各堆積高さの関係を Fig. 6 に示した。すなわち、シリカゲルの堆積高さ22.5mm (材

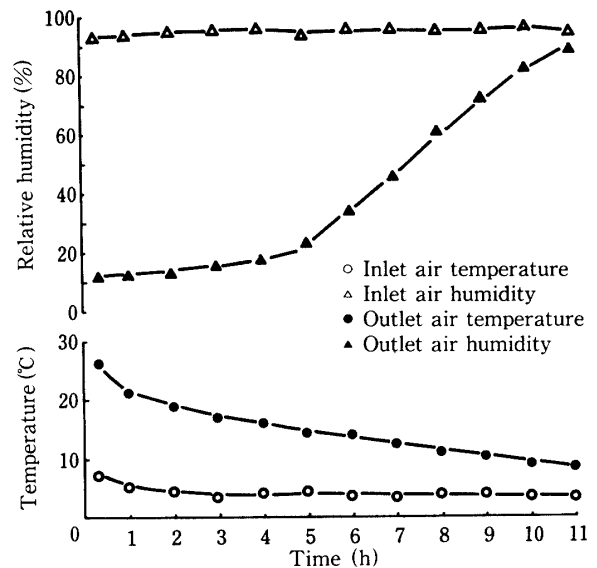


Fig. 3. Changes of temperature and humidity of inlet and outlet air at experimental chamber.

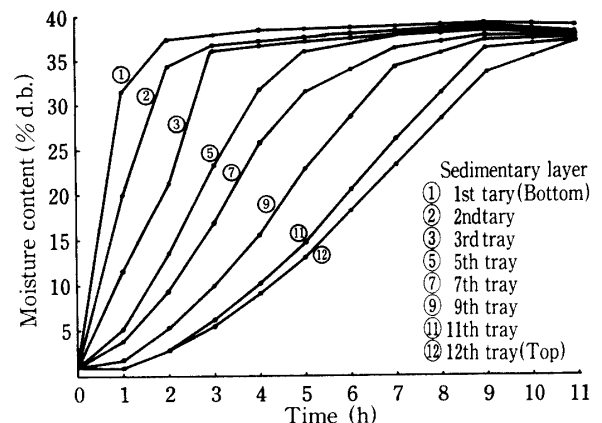


Fig. 4. Changes of moisture content of desiccant silica gel at each sedimentary layer.

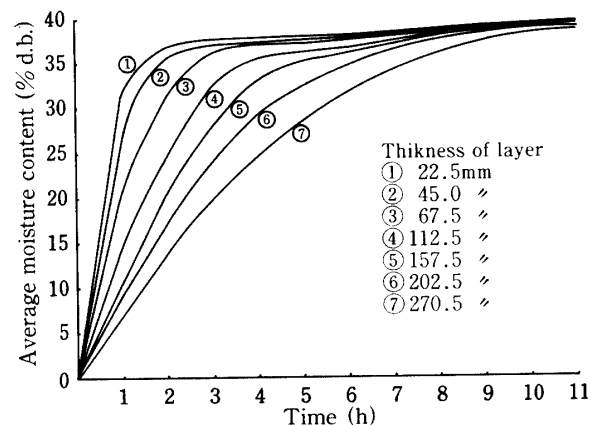


Fig. 5. Changes of average moisture content of desiccant silica gel at various sorts of thickness of sedimentary layer.

料重量1.5kg)で吸湿量は0.465kg/hr, 67.5mm (4.5kg)で0.945kg/hr, 112.5mm (7.5kg)で1.08kg/hr, 202.5mm (13.5kg)で1.23kg/hr, 270.0mm (18.0kg)で1.26kg/hrとなり, 堆積高さとともに吸

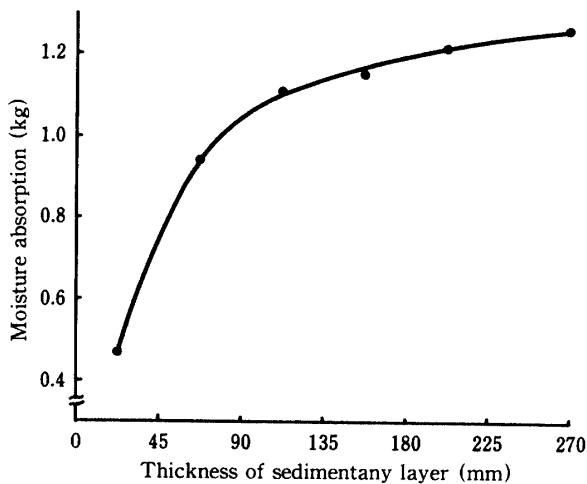


Fig. 6. Relation between moisture absorption and thickness of sedimentary layer at lapse time of 1 hour.

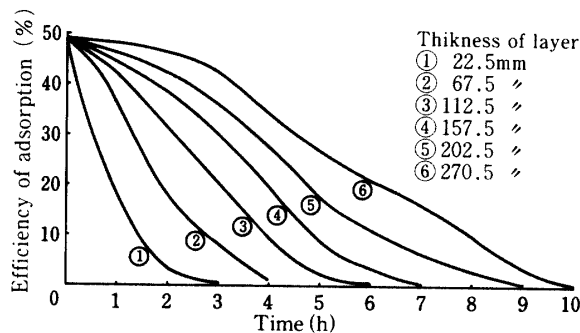


Fig. 7. Relation between efficiency of absorption and thickness of sedimentary layer.

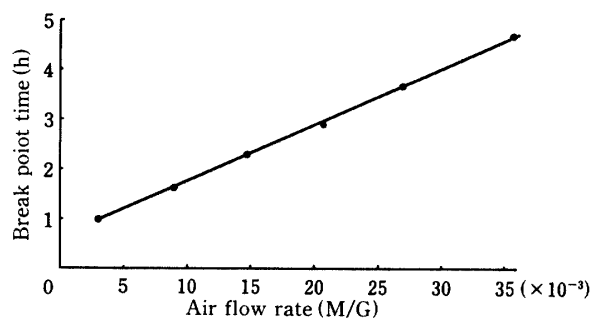


Fig. 8. Relation between break point time and air flow rate (M/G).

着量も漸増している。

そこで, 各堆積高さごとの吸着効率²⁾を調べ, その経時変化を Fig. 7 に示す. 吸着効率とは装置へ入る空気中の水蒸気量と吸着した水分の量との比であり, 実験中の装置への流入空気量は平均504kg/hr, 実験開始後5時間目までの空気平均絶対湿度は0.0052kg/kg, 流入空気に含まれる水蒸気量は2.62kg/hrであった。

4. ブレーキ点時間と重量風量比との関係

吸着剤堆積層中を湿潤空気が通過する場合, その堆積量 M (kg) と通過風量 G (kg/hr) の比が同じであれば, 同一モデルについては一般的に相似関係が成立する¹⁾。

Fig. 8 に重量風量比 (M/G) とブレーキ点に達する時間との関係を示す. この結果, ブレーキ点時間 T (h) と重量風量比 M/G との間には次の関係が認められた。

$$T = 0.558 + 115.87 \frac{M}{G}$$

すなわち, ブレーキ点時間は重量風量比 (M/G) に比例し, 同一風量であれば堆積重量に比例することがわかる。

5. 吸着熱量の経時変化

乾燥シリカゲル18kg (堆積高さ0.27m, 容積0.0243m³) の充填層に毎時506kg (405m³) の湿潤空気 (温度5℃, 湿度95%) を通過した場合, 充填層出口と入口の温度較差の経時変化を Fig. 9 に示す。

ブレーキ点時間 (4.7時間) までの出口, 入口温度の較差は最高19℃, 最低9.7℃で平均14.0℃であった. したがって, その間の吸着による発生熱量は総計8,027kcal で, 乾燥シリカゲル1kg当たり, 446kcal の熱量を発生したことになる。

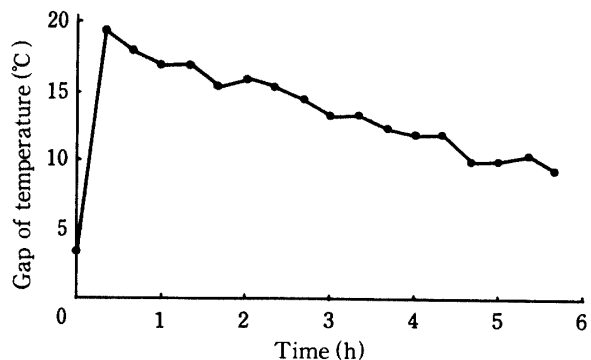


Fig. 9. Change of gap of temperature among inlet and outlet air.

6. 熱風通気による吸着剤の再生

Fig. 10 は吸湿したシリカゲルの堆積層に熱風を通過させ、その乾燥の経時変化を調べたものである。乾燥は塔内風速0.4m/s, 毎時送風量130m³ (141kg), 熱風温度41±2℃, 相対湿度40±2%の条件で行い、吸湿シリカゲルの含水率は40.8% (d. b.), 1段

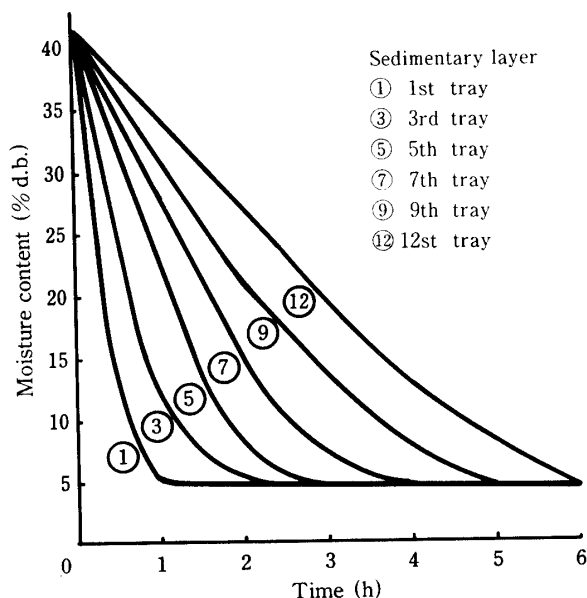


Fig. 10. Changes of moisture content of desiccant silica gel.

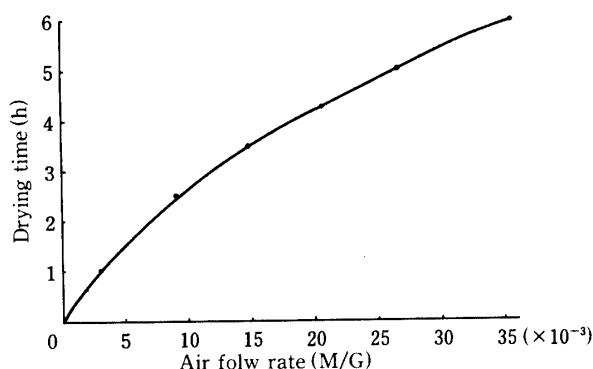


Fig. 11. Relation between drying time and air flow rate.

のトレイに充填されたシリカゲルの重量は1.5kgで、全12段の総重量は18kgであった。この状態でシリカゲルの含水率を40.8% (d. b.) から5% (d. b.) まで乾燥し、重量風量比 (M/G) と乾燥時間 T (h) の関係をプロットした結果、Fig. 11 を得た。

この結果より乾燥時間と重量風量比との間には近似的に次の関係が認められた。

$$T = 0.475 \left(\frac{M}{G} \right)^{0.726}$$

7. ヒートポンプによる冷却除湿性能

高温高湿の外気条件下におけるエバポレータ部の除湿量を測定し、その結果を Table 2 に示す。エバポレータを通過した外気風量は12~14m³/min の範囲で、温度降下は6.5~8.5℃であった。除湿量は毎時換算2.09~2.77kgで、コンプレッサ動力1kw 当たり毎時1.60~2.04kgの水分を空気中から除湿している。これを絶対湿度で表せば、 $2.175 \times 10^{-3} \sim 3.179 \times 10^{-3}$ (kg-w/kg-a) 減少したことになる。Fig. 12 は外気温度をパラメータとして、冷却除湿

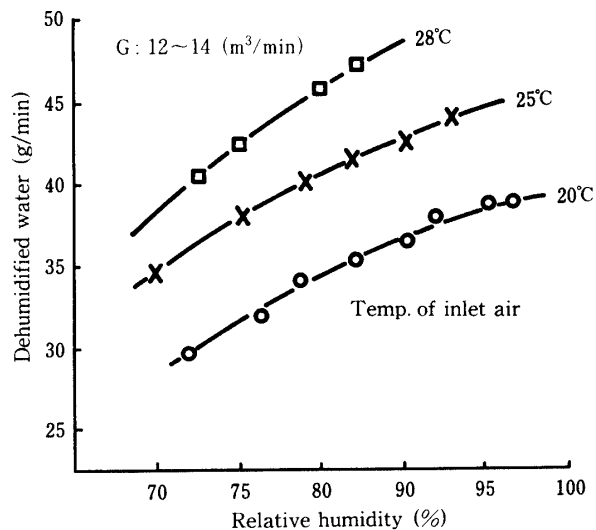


Fig. 12. Relation between dehumidified water and relative humidity.

Table 2. Quantity of dehumidified water and air temperature variation

T ₁ (℃)	R ₁ (%)	T ₀ (℃)	T ₂ (℃)	T ₁ -T ₂	G (m ³ /min)	M (g/min)	W (Kwh)	M/W
24.8	70.0	19.1	16.3	8.5	13.9	34.8	1.34	26.0
25.1	81.0	21.9	18.3	6.8	12.2	41.5	1.34	31.0
25.3	86.0	23.3	18.8	6.5	12.2	44.5	1.32	33.7
28.3	75.0	23.5	20.7	7.6	13.1	42.2	1.44	29.3
27.6	80.0	24.2	20.9	6.7	13.1	46.2	1.36	34.0

量と外気湿度の関係を示したものである。同一温度でも外気湿度が高ければ除湿量は増加し、また、同一湿度でも温度が高ければ除湿量が増加している。

要 約

本研究は常温付近でかつ極めて低い湿度の空気による農産物の乾燥能率を検討するため、それに使用する装置の開発に必要な基礎実験を行ったものである。すなわち、固体吸着剤と冷却除湿方式を組合わせて低湿空気を発生させる場合、それぞれの除湿方式について、実用的範囲内での除湿効率、除湿量について検討し、以下の結果を得た。

1. 供試した粒状シリカゲルに高湿度空気を強制通気した場合、含水率35% (d. b.) を越えると吸湿能力は極端に劣えた (Fig. 4)。

2. 各堆積層ごとの吸湿量の推移を分析した結果、各層ごとのシリカゲルが使用可能限界に達する時間 T (h) と層位置 X_n との間には次の関係が認められた。

$$T = 0.75 + 0.725X_n$$

3. 堆積高さを異にした場合のシリカゲルの経時的吸湿量を求め、それより実用的な吸湿効率を明らかにした (Fig. 7)。

4. シリカゲル層を通過した空気の状態からブレーキ点を推定し、そのブレーキ点におけるシリカゲルの平均含水率は約27.5% (d. b.) 付近であった。また、シリカゲル重量 M (絶乾kg)、通気風量 G (kg/h) とブレーキ点時間 T との間には次の実験式が認められた。

$$T = 0.558 + 115.87 \left(\frac{M}{G} \right)$$

5. 吸湿過程に発生するシリカゲルの吸着熱を経時的に測定し、ブレーキ点時間内においては、乾燥シリカゲル 1 kg から約450kcal の吸着熱が発生して

いることが判明した。

6. 吸湿したシリカゲルの再生のため、熱風通気乾燥を行い、その乾燥能率を調べ、乾燥時間 T (h) と M/G との間に次の関係実験式を導いた。

$$T = 0.475 \left(\frac{M}{G} \right)^{0.726}$$

7. ヒートポンプのエバポレータ部における冷却除湿の性能について実験を行い、比較的高温で高湿な外気を実用的規模で送った場合、コンプレッサ動力 1 kw 当たり毎時1.6~2.0kg の水分を空気中から除湿できた。これは絶対湿度で $2.175 \times 10^{-3} \sim 3.179 \times 10^{-3}$ (kg-w/kg-a) に相当した。

8. 外気温度をパラメータとして考えた場合、冷却除湿効率は外気の相対、絶対湿度により変化し、高温、高湿空気からの除湿にはヒートポンプが敵していることが判明した。

謝辞 本研究にあたり、御校閲を頂いた本農学部小島新助教授、装置試作に御協力を頂いた豊国工業 K. K. の林純男氏に深く感謝します。また、取りまとめに際し、御協力頂いた町田俊子技官、大学院生堅田郁君に謝意を表する。

文 献

- 1) 藤田重文編：化学工学Ⅲ，乾燥，東京化学同人，301-348 (1979)
- 2) 化学工学協会編：特集熱工学，横書店，69-96 (1963)
- 3) 田原迫昭爾・繆 治練・林 純男・吉原国彦・朝隈寛治：常温除湿空気による穀類の通気乾燥，農業施設，18 (3)，23-33 (1988)
- 4) 田原迫昭爾・魏 長楽・田中俊一郎・守田和夫・仲川政市・朝隈寛治：早期米の乾燥システムの開発，鹿大農学術報告，No. 39，251-261 (1989)
- 5) 田原迫昭爾・魏 長楽・李 振邦・守田和夫・仲川政市・林 純男：低温除湿乾燥によるソバ実の乾燥と基礎物性，農機九州支部誌，No. 37，46-52 (1988)
- 6) 田原迫昭爾・魏 長楽・李 振邦・守田和夫・田中俊一郎：割干し大根の乾燥及び貯蔵特性に関する研究，鹿大農学術報告，No. 39，263-272 (1989)

Summary

In order to develop a high efficient drying system for agricultural products, some fundamental experiments for generating air at normal temperature and under lower humidity were performed. Considerations were paid about a practical combination of solid absorbent and heat pump dehumidifying methods. The efficiency of absorption and the moisture absorption for each method were investigated under practical applications. The results obtained can be summarized as follows:

1. In case of air ventilation with high humidity, the efficiency of absorption of desiccant silica gel decreased rapidly at more than 35% (d. b.) moisture content.

2. Judging from the analysis of absorption water of desiccant silica gel, relationship between limit absorption time T (h) and thickness of sedimentary layer X_n (n : tray number) was shown as follows.

$$T=0.75+0.725X_n$$

3. Change of absorption water of desiccant silica gel was observed at various sorts of the thickness of sedimentary layer (Fig. 7). The efficiency of absorption was investigated under practical applications.

4. A break point was estimated from air condition through desiccant silica gel. Average moisture content of desiccant silica gel was about 27.5% (d. b.) at the break point. Relationship between the break point time T (h) and ratio of silica gel weight M (kg) to air flow G (kg/h) was shown as follows.

$$T=0.558+115.87\left(\frac{M}{G}\right)$$

5. Calorific value of absorbent of desiccant silica gel was measured at absorption process. The value of dried silica gel 1 kg was estimated at 450 kcal within the break point time.

6. In order to investigate the drying efficiency fitness for refreshment of desiccant silica gel, heat ventilation drying was carried out by using high moisture content silica gel. Relationship between refreshment time T (h) and M/G was shown as follows.

$$T=0.475\left(\frac{M}{G}\right)^{0.726}$$

7. The performance of heat pump dehumidifying was investigated. In case of using air with high temperature and humidity under practical applications, removal moisture in the air could be estimated 1.6~2.0 kg/h by 1 kw compressor power in heat pump dehumidifier.

8. As heat pump dehumidifying efficiency changed with absolute and/or relative humidity, it was considered to be suitable for heat pump dehumidifier to have moisture removed from the high temperature and humidity air.