

常温低湿空気による農産物の乾燥及び品質評価 (第2報)

—各種農産物の乾燥速度の比較—

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 II)

—Comparison of Drying Rate for Various Agricultural Products—

Shōji TAHARAZAKO, Kazuo MORITA and WEI Chang Le

(Laboratory of Agricultural Machinery II)

緒 言

農産物の乾燥は現在火力乾燥が主流であるが、品目によっては天日乾燥のものもある。しかし、これらの乾燥法は過乾燥や乾燥ムラといった技術的な問題とともに、品質劣下という重大な問題に直面している。

こうした問題に対処するため、筆者らはヒートポンプ方式による常温除湿乾燥システムの開発を行い³⁾、農産物の乾燥実験を行ってきた^{4,6,7,8)}。しかし、農産物の中には乾物製品のように、より高い品質を求め、より低い湿度の空気による乾燥法の開発が望まれている。

本研究は常温低湿空気発生装置の開発を目的に、第1報⁹⁾では固体吸着剤およびヒートポンプの除湿性能を、それぞれ単独で使用した場合について報告してきた。その結果、ヒートポンプによる冷却除湿方式は比較的高温でかつ高湿の空気条件の場合、乾燥効率から見て有効であった。固体吸着剤(シリカゲル)による除湿方式では、空気の絶対湿度が低い場合、プレーキ点時間²⁾が長く、かつ低湿度の空気が安定的に一定期間得られることを確認した。

本報では、第1報での実験結果を基に、まず外気をヒートポンプ方式により冷却除湿し、その空気をさらに固体吸着剤で再除湿する装置を試作した。そ

れぞれを単独で用いた場合、(1)固体吸着剤は低い露点の空気を得ることは容易であるが、高温かつ高湿の大量の空気を処理するには適さない。(2)ヒートポンプ方式は高温、高湿の空気を処理するには適しているが、低温、低湿の空気を処理するには適さず、あまり低い湿度は得られない。

こうした問題に対処するために、本装置は両方式を組み合わせた除湿システムであり、本実験ではこの除湿システムにより発生した常温付近で極めて低い湿度(10~20%)の空気を用いて、数種の農産物の通風乾燥を実験室的規模で行い、その乾燥速度について比較検討したものである。

実 験 方 法

1. 供 試 材 料

実験に供試した農産物はソバ実(宮崎大粒)、切干し大根(練馬青首)、甘藷(黄金千貫)、山芋(つくね種)、コンニャク芋(広島在来種)および生椎茸の六種類であり、それぞれの初期含水率、供試重量はTable 1に示す。なお、乾燥前後の供試材料の含水率の測定は100℃-24時間法で行った。

2. 実 験 装 置

今回用いた常温低湿空気発生装置の概要をFig. 1に示す。本装置は送風機、ヒートポンプのエバポレータ部、固体吸着剤(シリカゲル)充填塔、乾燥

Table 1. Drying condition of various agricultural products

Test No.	Material	Initial moisture content (%w.b)	Weight (g)	Average air flow (m ³ /h)
I	Buckwheat	22.7	300.0	90
	Radish	94.9	222.8	
	Mushroom	90.8	119.1	
II	Yam	83.1	197.6	108
	Konjac	82.8	83.0	
	Sweet potato	62.9	74.9	

チャンバおよびこれらを結ぶダクトから構成されている。変速モータ付送風機①より流入した外気は冷却ユニット②に入り、内蔵されたヒートポンプのエバポレータ③で冷却除湿され、ヒータ内蔵の温度調節部④（今回の実験には使用せず）を通過して、固体吸着剤充填塔⑤に入り再び除湿される。ヒートポンプのコンデンサ部⑥およびコンプレッサ部⑦は冷却ユニット外に設置され、そこで発生した熱は外部に放出される。また、冷却ユニット内の受皿に滴下した凝結水は導管を通じて外部に取り出し測定した。農産物の乾燥チャンバ⑧は吸着剤充填塔の上部に設置し、農産物はトレイに入れるかあるいは吊して乾燥した。送風量の測定はオリフィス⑨の前後の圧力を差圧伝送器⑩を通じて測定し、レコータ⑪に記録した。空気温度および湿度は熱電対⑫および湿度セ

ンサ⑬で測定し、同時に記録した。

なお、実験に使用した機材、機器の仕様は次のとおりである。

- (1) 冷却ユニット：ヒートポンプ E6A-08LB (三菱電気 K. K)
- (2) 送風機：ターボブロワ DB3, (三黄機械 K. K)
- (3) 吸着剤充填塔：300 (W) × 300 (D) × 300 (H)mm, 断熱厚さ45mm
- (4) トレイ：300 (W) × 300 (D) × 50 (H)mm, アルミ製, 底材ステンレス金網 (10メッシュ)
- (5) 乾燥チャンバ：300 (W) × 300 (D) × 600 (H)mm
- (6) 固体吸着剤：シリカゲル 粒径5~10mm

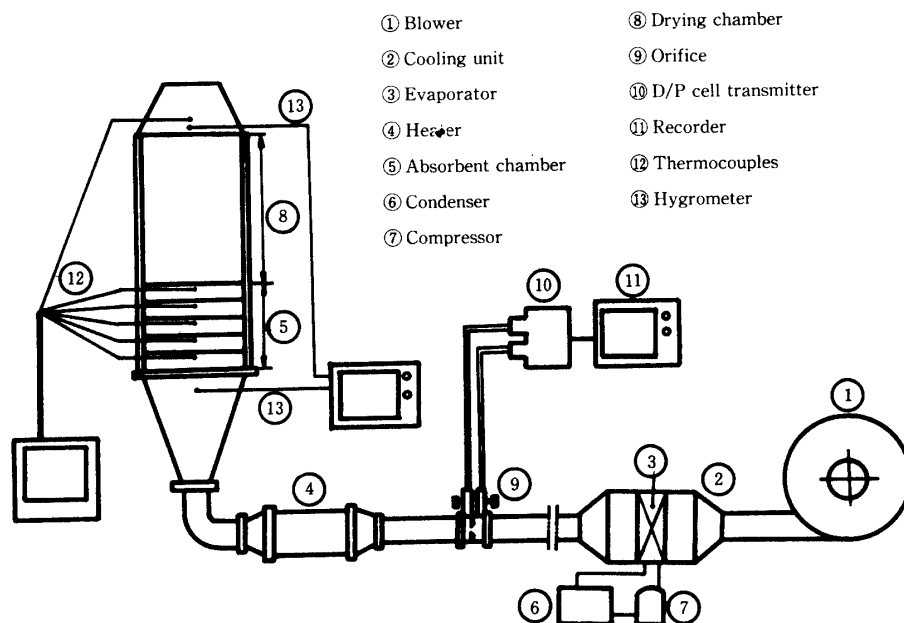


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- (7) 湿度計：アスマン通風湿度計および湿度センサX712-1B (テクノ・セブン)
- (8) 温度計：水銀温度計およびC-C熱電対
- (9) 風速および風量：オリフィスおよび熱線風速計

3. 乾燥方法

乾燥は外気条件、乾燥チャンバ内の試料充填方法の違いにより、二通りで行い、それぞれ実験Ⅰ、Ⅱとした。

実験Ⅰでは、供試材料にソバ実を用い、トレイ上に薄層状態で堆積して通風乾燥を行った。

実験Ⅱでは、供試材料に切干し大根、甘藷、山芋、コンニャク芋および生椎茸を用い、生椎茸以外は厚さ5mmにスライスした後、生椎茸はそのまま半分にした後、乾燥チャンバに吊した状態で通風乾燥を行った。乾燥中の毎時平均風量は Table 1 に示し、乾燥途中の含水率の変化は測定した重量変化より求めた。

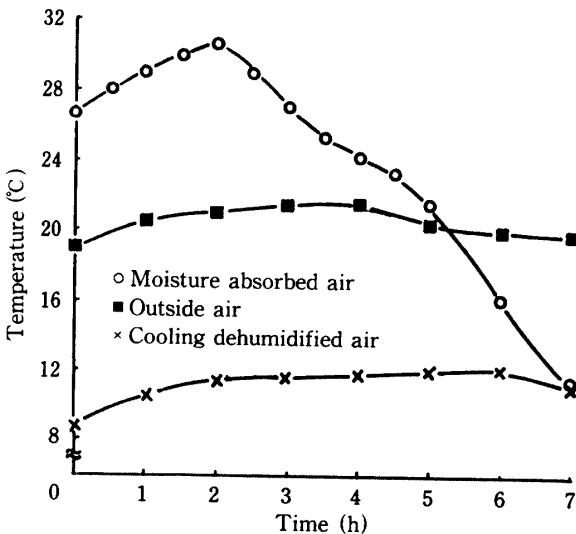
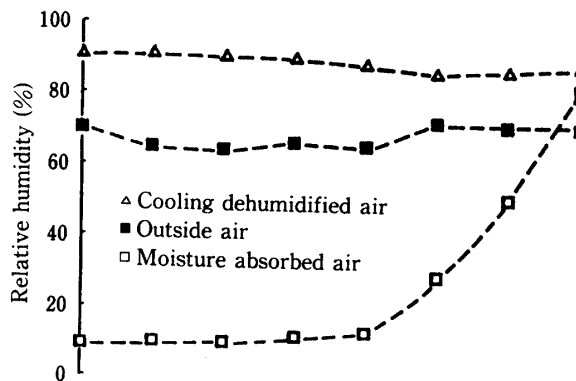


Fig. 2. Drying air condition in experimental chamber (Test I).

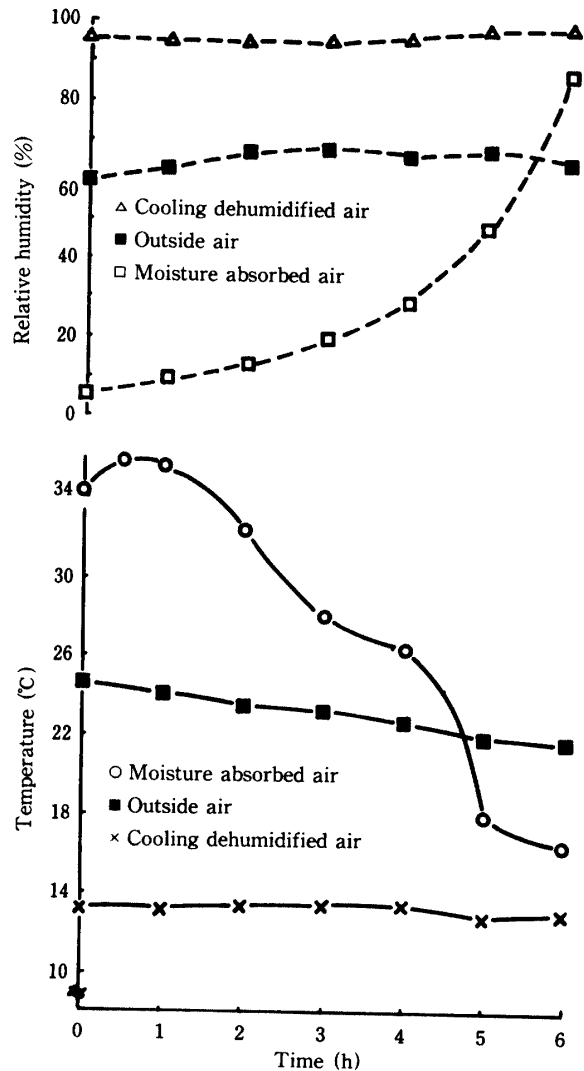


Fig. 3. Drying air condition in experimental chamber (Test II).

実験結果と考察

1. 除湿システム内の空気温度および湿度の推移

常温低湿空気発生装置内のエバポレータ通過後、吸着剤充填層通過後の空気および外気の乾球温度、相対湿度の経時変化を実験Ⅰについては Fig. 2 に、実験Ⅱについては Fig. 3 に示す。

実験Ⅰでは、乾燥7時間まで測定を行い、ブレーキ点時間は4時間であった。その間の乾球温度に関しては外気が19.0~21.5℃(平均21.0℃)と比較的安定していた。エバポレータ通過後は8.8~11.8℃(平均11.2℃)と一旦冷却されるが、吸着剤充填層通過後は24.2~30.6℃(平均28.0℃)と外気より高い値を示している。これは主にシリカゲルからの吸着熱などによるものと思われる。一方、相対湿度に

関しては外気が64.0~70.0% (平均67.0%) であるのに対し、エバポレータ通過後は冷却除湿されるが露点に達するため、88~90% (平均89.8%) と高くなっている。しかし、吸着剤充填層通過後は吸着による除湿とそれに伴い発生する吸着熱による温度上昇のため、9.9~10.2% (平均10.0%) と非常に低い湿度が得られた。

実験Ⅱでは、乾燥6時間まで測定を行っているが、実験Ⅰに比べ、外気温度が高く、しかも送風量を多くしたためブレーキ点時間は約3時間と短く推定された。このブレーキ点時間までの乾球温度は外気で23.2~24.6℃ (平均23.8℃)、エバポレータ通過後で13.2~13.4℃ (平均13.3℃)、吸着剤充填層通過後で28.0~34.8℃ (平均33.3℃) となった。一方、相対湿度は外気、エバポレータおよび吸着剤充填層通過後でそれぞれ60~68% (平均65%)、95%、10~20% (平均14%) であった。このとき、エバポレータ通過後の湿度が高いので吸着熱などによる温度上昇は、ダクトからの吸収熱を含めて最高31.6℃に達した。

以上、実験Ⅰ、Ⅱの結果から、温度に関しては冷却除湿後の露点温度が高く、かつ送風量が多い場

合、吸着剤充填層での吸着熱は初期に急激かつ多量に発生し、送風空気温度は一時的に高くなる。したがって、ブレーキ点時間も短くなっている。今回は乾燥チャンバへの送風空気を常温付近に保つため、コンデンサ部を外部に取り出して実験を行ったが、エバポレータとコンデンサを併用した実験では、吸着剤充填層の入口温度は外気温度より2~3℃高くなると予測される³⁾。実験Ⅱの場合で見ると、乾燥チャンバへの送風空気温度は50℃以上になると推定される。また、相対湿度に関しては、乾燥チャンバへの送風空気は外気温度が多少異なっても平均で10~14%まで低下しており、常温付近としては農産物の乾燥に有効な極めて低温の空気が、安定的に一定時間得られることが判明した。

2. 空気中からの除湿量の推移

常温低温空気発生装置の除湿効率を調べるため、エバポレータ通過後、吸着剤充填層通過後の空気および外気の絶対湿度の経時変化と累積での冷却除湿

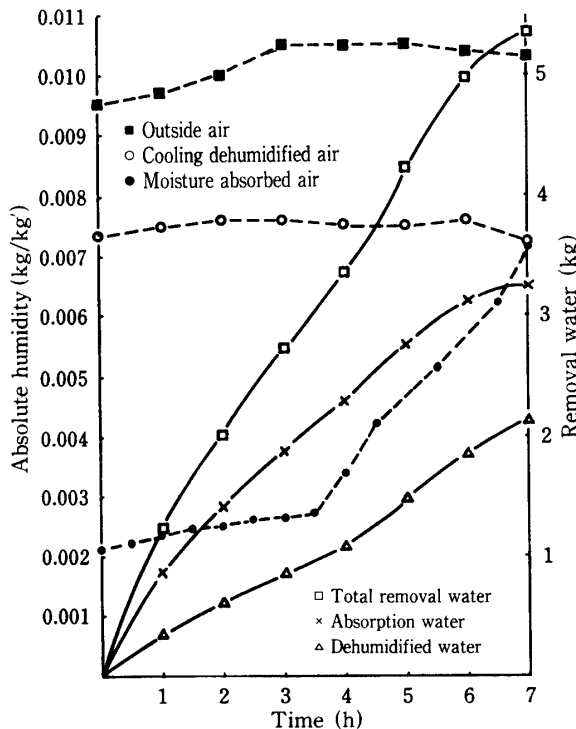


Fig. 4. Changes of absolute humidity and accumulated removal water (Test I).

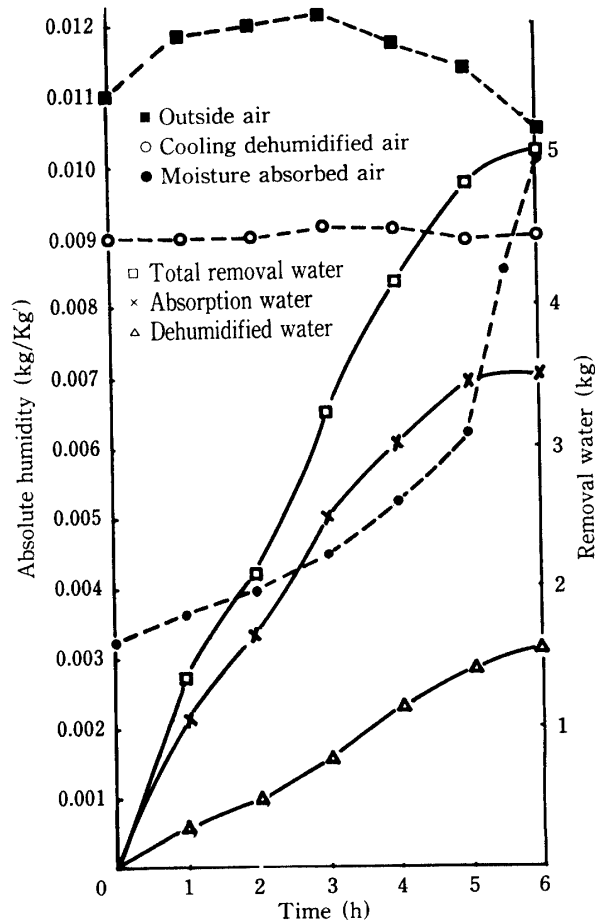


Fig. 5. Changes of absolute humidity and accumulated removal water (Test II).

量, 吸着剤の除湿量および総除湿量の推移を求め, 実験Ⅰについては Fig. 4 に, 実験Ⅱについては Fig. 5 に示した. 実験Ⅰ, Ⅱとも冷却除湿後の空気の絶対湿度は, 外気の湿度が変化しているにもかかわらずほぼ一定の値を示し, 実験Ⅰの場合では 0.0073 (kg/kg'), 実験Ⅱの場合では 0.0090 (kg/kg') の値を実験期間中持続した. エバポレータで冷却除湿された空気は外気により絶対湿度は低くなっているが, 冷却による温度低下のため相対湿度は高くなった. しかし, 吸着剤充填層を通過した空気は除湿効果と吸着熱による温度上昇により, ブレーキ点時間までは相対湿度が極めて低くなっている. このとき, 除湿効果については空気温度に影響されない絶対湿度が, 実験Ⅰで平均 0.0025 (kg/kg'), 実験Ⅱで平均 0.0037 (kg/kg') と低いことから, 除湿が活発に行われているのがわかる. すなわち, 吸着剤充填層での除湿効率は絶対湿度から見ると, 空気 1 kg 当り約 0.005 kg 前後の水蒸気が吸着されたことになる. しかし, ブレーキ点時間を過ぎると吸着能力は直線的に減少する. このため乾燥チャンバへの送風空気の絶対湿度は上昇し, 外気湿度に漸近してしまう.

本実験におけるブレーキ点時間までの冷却除湿お

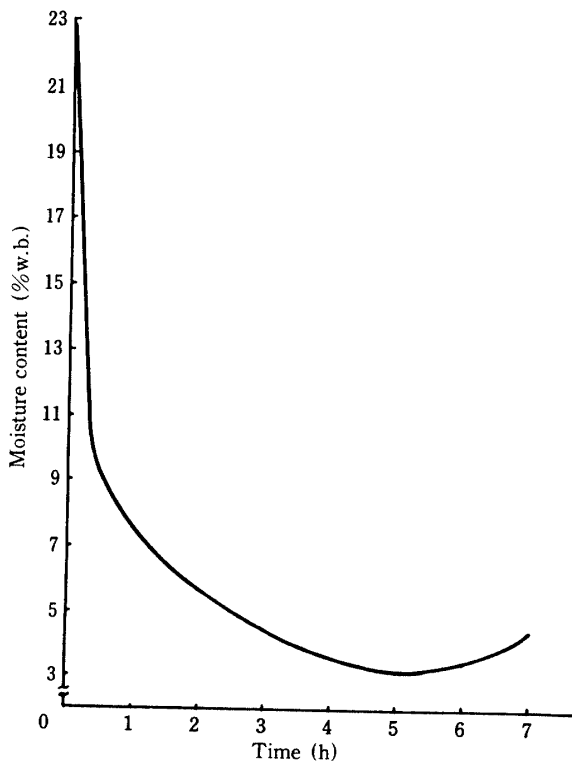


Fig. 6. Change of moisture content (w.b.) of buckwheat.

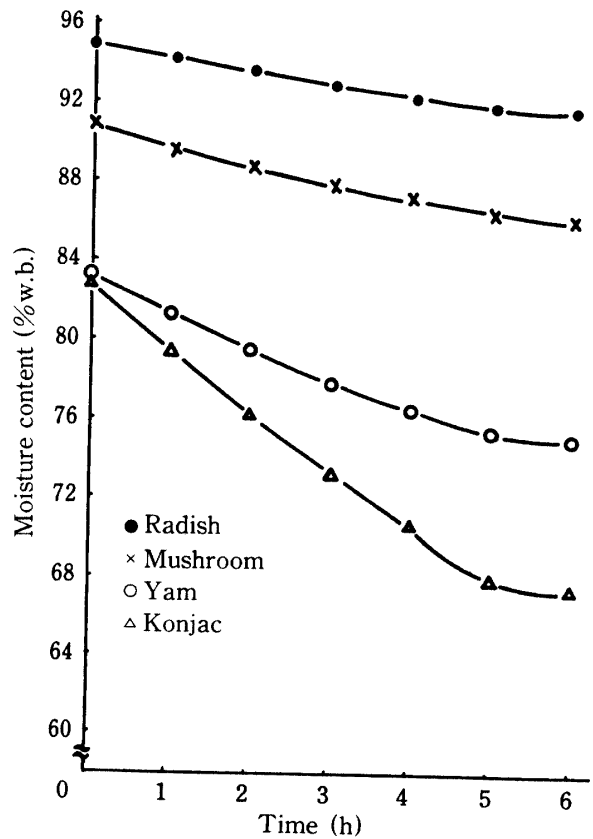


Fig. 7. Changes of moisture content (w.b.) of various agricultural products.

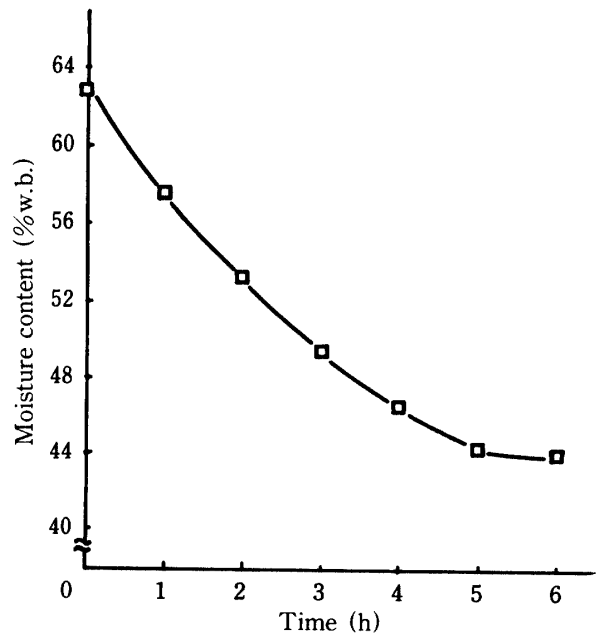


Fig. 8. Change of moisture content (w.b.) of sweet potato.

よび吸着剤の除湿量を比較すると、0.75kWのヒートポンプと絶乾シリカゲル10kgを組み合わせた除湿装置では、全除湿量の前者が約40%、後者が約60%の割合で除湿が行われていた。

3. 農産物の乾燥速度の比較

発生した常温低湿空気を乾燥チャンバに送り込み、農産物の乾燥を行った。実験Ⅰ、Ⅱの湿量基準での含水率の経時変化をソバ実については Fig. 6, 大根、コンニャク芋、山芋および椎茸については Fig. 7, 甘藷については Fig. 8 に示した。ソバ実、甘藷のように初期含水率の比較的低いものについては、経時的に乾燥が進んでいるのが傾向として現れているが、大根、椎茸などの初期含水率の高いものは、実際には活発に乾燥が行われているのに、傾向としては見られない。そこでこれらを乾量基準での含水率に変換し、ソバ実については Fig. 9, その他の農産物については Fig. 10 に示した。

Fig. 9 および Fig. 10 でブレーキ点時間までの乾燥経過を見ると、ソバ実以外の農産物の含水率はなめらかにほぼ直線的に減少している。したがって、この期間はこれらの農産物とも恒率乾燥期間と見なすことができ、初期乾量基準水比をA、乾燥時間を θ (h) とすれば、 θ 時間後の乾量基準含水比Wは、

$$W = A - \alpha\theta$$

となる³⁾。この係数 α を恒率乾燥速度係数とすれば、

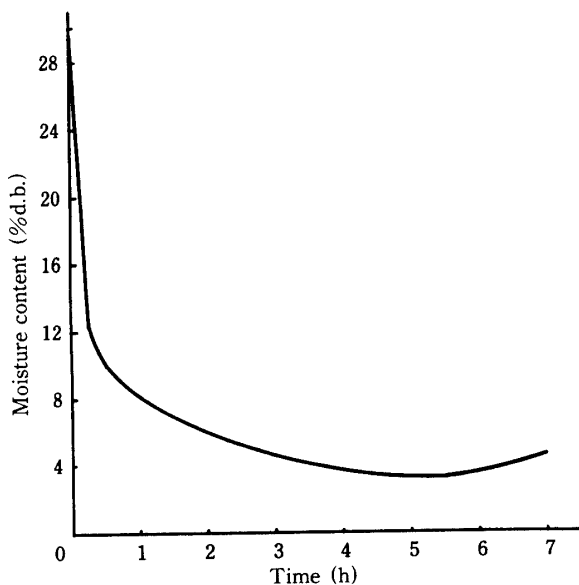


Fig. 9. Change of moisture content (d.b.) of buckwheat.

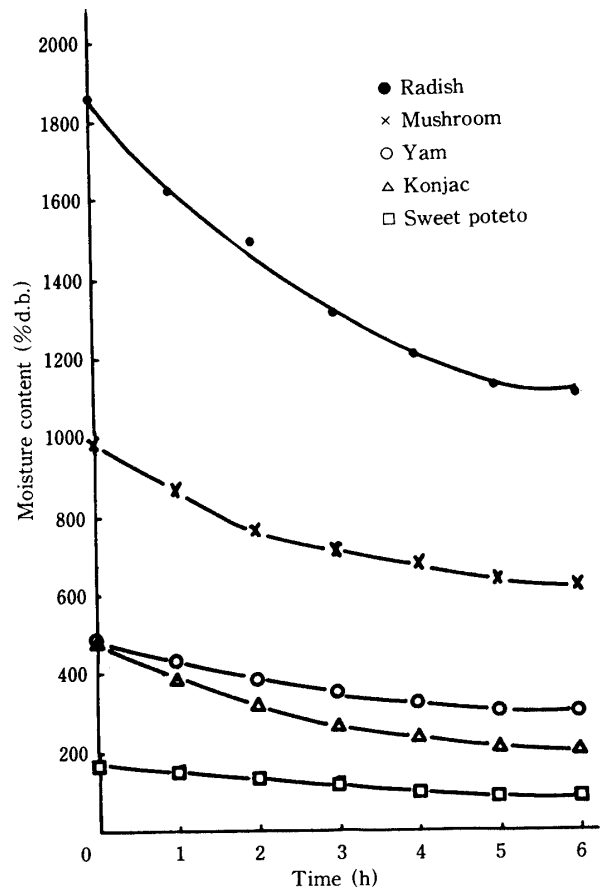


Fig. 10. Changes of moisture content (w.b.) of various agricultural products.

α はその農産物の恒率および減率乾燥期間を通じて乾燥速度の指標となる¹⁾。送風空気の平均温度が33℃、平均相対湿度が15%の場合の恒率乾燥速度係数 α を比較すれば次のようになる。

切干し大根 (初期含水率94.9% w.b.)	: $\alpha = 1.67$
椎茸 (〃 90.8% w.b.)	: $\alpha = 0.93$
コンニャク (〃 82.8% w.b.)	: $\alpha = 0.73$
山芋 (〃 83.1% w.b.)	: $\alpha = 0.43$
甘藷 (〃 62.9% w.b.)	: $\alpha = 0.20$

一方、ソバ実については外殻と子実から構成されているので、乾燥初期は主として外殻からの水分蒸発が多く行われる⁵⁾。また、常温付近で50~60%の湿度の空気により乾燥を行った場合、ソバ実の含水率が14% (w.b.) を過ぎると乾燥速度は極端に遅くなる⁴⁾。しかし、本実験では乾燥30分で21.9% (w.b.) の初期含水率のソバ実が9.9% (w.b.) まで減少した (Fig. 6)。これを乾量基準含水率に換算すると、それぞれ29.3% (d.b.)、10.0% (d.b.) となる (Fig. 9)。乾燥が30分経過した後からはいわゆる減

率乾燥期間に入り、ブレイキ点時間(4時間)までの乾燥経過時間 θ (h)と乾量基準含水率 W (%d.b.)との間には次の関係が認められた。

$$\theta = 8.49 - 3.54 \ln W \quad (4 \leq W \leq 10)$$

しかし、このブレイキ点時間を過ぎると乾燥は行われず、6時間以降からは逆に吸湿状態となっている。

以上の結果より、常温付近でも空気相対湿度が、10~15%と低ければ、ブレイキ点時間までは乾燥速度も大きく、乾燥はかなり促進されることが明らかとなった。高温で化学変化や成分変化を起こし易い農産物や除湿乾燥では困難な、より低い含水率までの乾燥を必要とする農産物に対しては有効な手段であることが判明した。

摘 要

ヒートポンプによる冷却除湿方式と固体吸着剤による除湿方式を組み合わせ、常温で極めて低湿の空気発生装置の開発を行った。この除湿システムにより、数種の農産物の乾燥を実験室的規模で行い、その乾燥速度について比較検討し、以下の結果を得た。

1. 常温低湿空気発生装置により、相対湿度65%付近の外気から相対湿度15%前後の極めて低い湿度の空気に常温で安定的に一定期間発生させることを可能にした。

2. 今回の実験条件下で発生した常温低湿空気のブレイキ点時間は、実験Ⅰで4時間、実験Ⅱで3時間と推定された。

3. ブレイキ点時間までに発生した常温低湿空気の平均絶対湿度は、実験Ⅰで0.0025 (kg/kg'), 実験Ⅱで0.0037 (kg/kg')であり、吸着剤の除湿能力は空気1kg当り、実験Ⅰ, Ⅱとも0.005 (kg/kg')前後であった。

4. ブレイキ点時間までの除湿割合は、冷却除湿

が40%、吸着剤による除湿が60%であった。

5. 発生した常温低湿空気により農産物の乾燥を行い、乾量基準含水率による乾燥速度をそれぞれの農産物(ソバ実以外)について求めた。

6. ブレイキ点時間までの乾燥速度係数を比較すると、切干し大根、生椎茸、コンニャク芋、山芋、甘藷の順に小さくなった。

7. 初期含水率の低いソバ実についても急速な乾燥が行われ、実験開始後30分で21.9%から9.9%(w.b.)まで乾燥が進んだ。

謝辞 本研究を進めるにあたり、御校閲を頂いた本学農学部小島 新教授に深く謝意を表します。

文 献

- 1) 藤田重文ほか：化学工学, III, 乾燥, 東京化学同人, 301-348 (1979)
- 2) 化学工業協会編：特集熱工学, 横書店, 69-96 (1963)
- 3) 田原迫昭爾・繆 治煉：ヒートポンプ除湿機の除湿性能および穀類乾燥への利用, 鹿大農学術報告, No. 37, 261-269 (1987)
- 4) 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)
- 5) 田原迫昭爾・魏 長楽・李 振邦・守田和夫・仲川政市・林 純男：熱風乾燥によるソバ実の乾燥特性, 農機九州支部誌, No. 37, 53-57 (1988)
- 6) 田原迫昭爾・繆 治煉・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)
- 7) 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)
- 8) 田原迫昭爾・魏 長楽・李 振邦・守田和夫・田中俊一郎：割干し大根の乾燥および貯蔵特性に関する研究, 鹿大農学術報告, No. 39, 263-272 (1989)
- 9) 田原迫昭爾・守田和夫・魏 長楽：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), 鹿大農学術報告, No. 40, 235-242 (1990)

Summary

By means of combining solid moisture absorbent and heat pump dehumidifier, air dehumidifying system was designed, and it enabled us to generate normal temperature and lower humidity air under experimental application. Drying of various agricultural products were carried out under the system, and drying rates were investigated. The results obtained can be summarized as follows:

1. Relative humidity of ventilated air could approximately be reduced from 65% up to 15% under the system and the dehumidified air could be stably generated during a fixed time under the condition of normal temperature.
2. Break point time of the generated air in the system was 4 and 3 hours in the test I and II, respectively.
3. Average absolute humidity of the generated air until break point time was 0.0025 (kg/kg') in the test I and 0.0037 (kg/kg') in the test II. Moreover, dehumidifying capacity of solid moisture absorbent was 0.0050 (kg/kg') in term of absolute humidity.
4. Dehumidifying ratio of generated air in the system was about 40% by heat pump dehumidifier and about 60% by solid moisture absorbent.
5. Drying rates of various agricultural products except for buckwheat were measured in the test II.
6. Coefficients of drying rate until break point time were calculated and these values were fixed respectively to be 1.67 for radish, 0.93 for mushroom, 0.73 for konjac, 0.43 for yam and 0.20 for sweet potato when air temperature was 33°C and relative humidity was 15%.
7. Adding to these low initial moisture content, buckwheat was rapidly dried by the dehumidified air in the system. Moisture content of buckwheat was reduced approximately from 21.9% to 9.9% (w.b.) during initial 30 minutes.