

低温度かつ高速度乾燥プロセスの基礎と応用—減圧過熱水蒸気流動層乾燥—

Basics and Application of Low-Temperature Drying Process with High Drying Rate
— Superheated-Steam Fluidized Bed Drying under Reduced Pressure —

立元 雄治

Yuji TATEMOTO

静岡大学 准教授

Associate Professor, Shizuoka University

Abstract

Drying processes can often affect the quality of materials in the manufacture of dried products. This is particularly important in heat-sensitive materials such as food and agricultural and pharmaceutical products, which need to be kept at low temperatures during the drying process. It is therefore necessary to manufacture a dryer that can operate at low temperatures and high drying rate for drying heat-sensitive materials. This article demonstrates the outline of the drying method at low temperatures. As an example of the method at low temperature drying with high drying rate, a superheated-steam fluidized bed drying under reduced pressure was introduced.

1. はじめに

乾燥操作は、水や有機溶媒などの液体（本稿では液体として水を考える）で湿った材料に熱を加えて、液体を蒸発除去する操作である。乾燥するときの温度が高いほど短時間で乾燥が可能であるが、材料の特性によって乾燥操作条件は制限され、食品原料や医薬原料などの熱に弱い材料は、材料が熱変性しない比較的低い温度（本稿では60℃以下の温度での乾燥を低温度乾燥としている）で乾燥しなければならない。単に低温度で乾燥すると乾燥時間が長くなり、エネルギー消費量の増加や空気にさらされることによる酸化などの別の問題が生じる。そこで、低温度でありながらできるだけ高速度（短時間）で乾燥することが望まれる。本稿では、低温度でも高速度で乾燥する方法について解説する。

2. 低温度かつ高速度乾燥プロセスの基礎

乾燥操作では材料にいかにして熱を加えるかが重要である。伝熱の方式としては熱風などの流体の熱を材

料に伝える対流伝熱方式、材料が接している棚や乾燥機の壁などを熱媒体で加熱し、棚や壁などを通して材料を加熱する伝導伝熱方式さらには、赤外線ヒーターなどを使用して乾燥する放射伝熱方式がある。またその他の方式としてマイクロ波加熱などがある。

熱に弱い材料については材料温度を低く保ちつつ乾燥する必要があるが、このとき材料温度が乾燥時どのように変化するかについて知っておく必要がある。もっとも一般的な乾燥方式である熱風乾燥を例に乾燥過程をみる。図1に熱風乾燥時の材料温度と乾燥速度の経時変化を示す。乾燥初期には材料温度が上昇し、ある一定温度に達する。この期間は材料予熱期間であり、乾燥速度は低い。その後、材料温度および乾燥速度が一定となる。この期間では、材料表面が十分に湿っており、材料表面から流入した熱量（対流伝熱）と水分蒸発に使われた熱量（蒸発潜熱）がつり合っている。この期間の材料温度は熱風乾燥の場合には湿球温度となる。すなわち、この期間では加熱温度よりも材料温度が低く保たれる。乾燥が進行すると、材料温度が表面から順に上昇し、乾燥速度も低くなる。この期間では、材料表面が乾いた状態となり、材料に流入し

た熱量は材料温度上昇と材料内部の水分蒸発に使われる。最終的には材料温度は熱風温度と等しくなる。以上から、定率乾燥時には加熱温度が高くて材料温度が低く保たれるが、減率乾燥時に温度が上昇するため、材料の熱変性を防ぐためには減率乾燥時に加熱温度を下げなければならない。

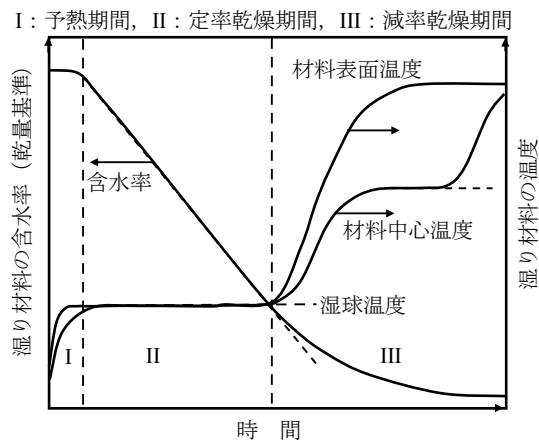


図1 乾燥時の湿り材料の含水率および温度の経時変化

熱風乾燥以外の他の乾燥方式でも湿った材料はその液体の沸点よりも高温になることはないため、湿り時の材料温度の最高値は液体の沸点となる。真空条件下では沸点が下がるため、材料温度を低温度に保つことができる。ただし熱風乾燥の場合と同様に材料が乾燥すると、材料温度は加熱温度にまで上昇する点に注意が必要である。

以上から、原理的に湿っている状態では高温で加熱し、材料表面が乾燥したところで加熱温度を下げるという方式が考えられるが、高温で加熱すると材料表面が短時間で乾燥し、乾いた部分の温度が上昇するため適切な乾燥温度の見極めが重要になる。

3. 各種低温度乾燥技術

低温度で乾燥する方式はいくつかあり、それぞれに長所と短所がある。ここでは各種低温度乾燥技術について紹介する。

3.1 低温度熱風乾燥

低温度での乾燥方式として単純に低温度熱風を当てて乾燥する方法が考えられる。この方式は装置構造が単純であり、また材料の温度は熱風の温度以下に保たれるため、熱風温度を材料の熱変性が起こらない温度

以下に設定すれば熱変性を確実に防ぐことができる。しかしながら低温度熱風を使用する際には、湿度の影響に注意する必要がある。図2に異なる加熱温度（熱風温度）における関係湿度と定率乾燥速度（材料表面における水分蒸発速度）および湿球温度の関係を示す¹⁾。関係湿度が増加するにつれて加熱温度によらず乾燥速度は低くなるが、水の沸点を超える温度（図で120℃）では、ある関係湿度から乾燥速度が一定となる。このとき材料温度は水の沸点100℃に達しており、熱風温度120℃と水の沸点100℃の温度差によって熱が材料に流入し、その熱量に応じて水分が蒸発している。一方で温度40℃および80℃では、関係湿度の増加にともない、最終的に乾燥速度が0となる。このことからわかるように低温度熱風を使用する際には湿度を低く保たなければならず、外気を加熱して使用する場合あるいは乾燥機の排熱風を循環する場合、途中に除湿装置を設置しなければならない。また、乾燥速度自体は非常に低い。

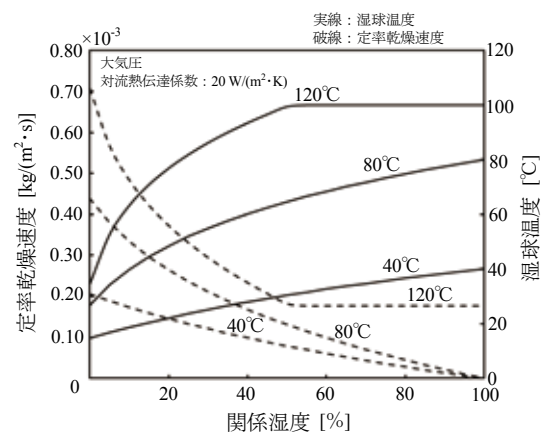


図2 関係湿度と定率乾燥速度、湿球温度（湿り材料温度）の関係

3.2 噴霧乾燥

図3に噴霧乾燥機の概略を示す。噴霧乾燥機は溶液あるいは微粒子懸濁液を微小液滴にして噴霧し、熱風と接触させて水分を除去し、乾燥微粒子を得る方法である。材料表面が十分に湿っているために、ほぼ定率乾燥にて乾燥が進む。このため熱風温度が比較的高くても材料温度を低く保つことができ、低温度乾燥操作となる。また、微小液滴とすることで蒸発面積が非常に大きくなるため短時間で乾燥が可能である。本方式は、液状あるいは懸濁物状材料に適用される。

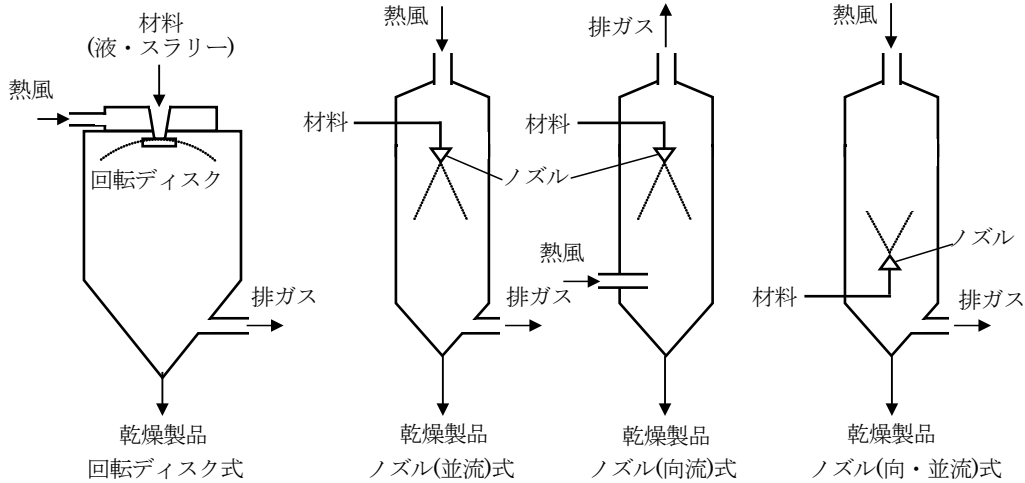


図3 噴霧乾燥機の概略

3.3 真空乾燥

水の沸点は圧力が低くなるにつれて低くなる（図4）。ここで、湿った材料の温度は水分を含んでいれば沸点以上に上がらないので、沸点が下がれば低温度での乾燥となる。また、真空条件下では乾燥速度も高くなる。真空乾燥では材料の加熱に工夫が必要であ

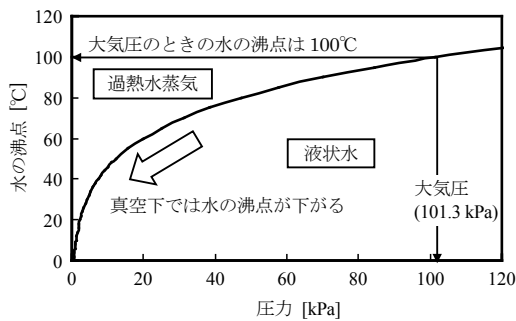


図4 圧力と水の沸点の関係

り、よく使用される方法は伝導伝熱方式である。伝導伝熱方式では材料と熱源（加熱面）とを良好に接触させることが重要であり、図5のようにフレーク状あるいは粉粒状の材料では攪拌によって材料と加熱面（乾燥室壁面）との接触を良好に保つことができる。塊状の材料では、伝導伝熱方式での加熱が困難であり、乾燥時間も長くなる。近年では熱源としてマイクロ波加熱を利用する方法も実用化されており、伝導伝熱で均一に加熱することが困難な材料に対して有効である²⁾。

3.4 真空凍結乾燥

凍結した材料を真空条件下で加熱し、氷の状態から水蒸気へと状態変化（昇華）させて取り除く操作が真空凍結乾燥である。図6に乾燥機の概略を示す。昇華した水蒸気を直ちに冷却装置にて氷に戻すことで乾燥機内を低圧に保つ。氷の部分がそのまま空隙として残るため、材料の収縮が小さく多孔質な製品が得られ

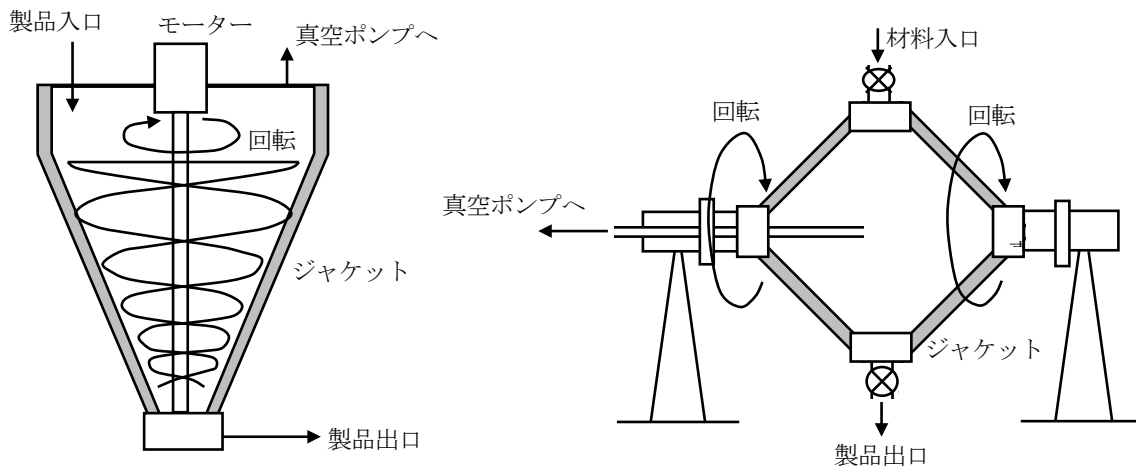


図5 攪拌型真空乾燥機の例

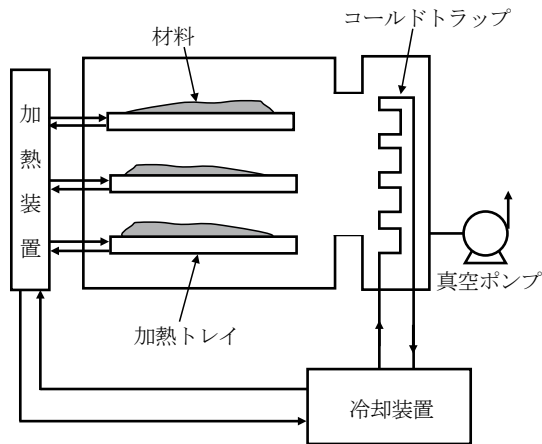


図6 真空凍結乾燥機の概略

る。また揮発性物質（アロマ成分など）が材料中に残りやすいという利点がある。乾燥速度は非常に低く、また氷から水蒸気、再び氷という形で状態変化し、そのたびに熱量を消費するため、使用エネルギー量が多い。製品品質面での利点を追求した乾燥方式である。

4. 減圧過熱水蒸気流動層乾燥

低温度かつ高速度で乾燥する方法として、筆者らの行っている減圧過熱水蒸気流動層乾燥方式を紹介する。減圧過熱水蒸気流動層乾燥法は3つの乾燥方式の組み合わせからなる。真空乾燥、流動層乾燥および過熱水蒸気乾燥である。

4.1 減圧過熱水蒸気流動層乾燥装置の概要

図7に減圧過熱水蒸気流動層乾燥方式の概要を示す³⁾。乾燥機本体は流動層乾燥機になっている。流動層を形成させるために、層の下部から過熱水蒸気を流

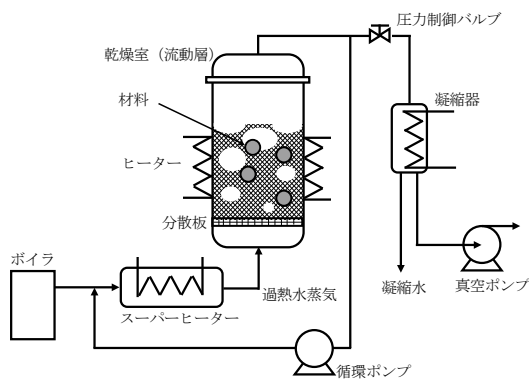


図7 減圧過熱水蒸気流動層乾燥方式の概略

入する。また、乾燥容器内を減圧とするためにガスの出口側に真空ポンプを設置する。真空乾燥の場合には熱の供給方法が問題となるが、本方式では、流動層と併用することで多量の熱を均一に材料に与えることができる。

4.2 組み合わせられた乾燥技術の詳細

真空乾燥は、上述のように圧力を下げることで水の沸点が下がるために低温度での乾燥が可能となる方式である。これに流動層乾燥と過熱水蒸気乾燥を併用する。

流動層乾燥は、粉粒状の材料の層を形成させてその下部から流体（空気など）を流して材料を浮遊運動（流動化）させる装置である。一般的な流動層乾燥では、乾燥する材料は流動化可能な比較的低含水率の粉粒状材料である。流動層乾燥のもっとも重要な利点は、乾燥速度が極めて高いことである。しかしながら、適用できる材料の形状が限られる。そこで、さまざまな形状の材料にも適用ができるように流動化が容易な比較的小さな粒子（流動化粒子）の流動層を形成させ、そこに湿り材料を投入して乾燥する方法としている。この方法により、流動層乾燥の適用範囲が広がり、比較的大きな材料の流動層乾燥が可能となる。流動層乾燥では、流動層内の粒子が良好に流動化することが重要である。そこで、真空条件下での最小流動化速度を調べた。表1に最小流動化速度と圧力の関係をまとめた³⁾。減圧下では、気体の膨張により、線速度（体積速度）は増加するが、質量速度で考えると逆に低くなっており、例えば表1の条件では、10kPaで流動化に必要なガス量は、大気圧に比べて8分の1程度である。

表1 減圧流動層の最小流動化速度（ガラスビーズ、径0.12 mm）

圧力 [kPa]	最小流動化質量速度 [kg/(m ² ・s)]	最小流動化速度 [m/s]
熱風 (150℃)		
101	0.0074	0.0096
70	0.0053	0.0100
50	0.0037	0.0102
20	0.0017	0.0113
10	0.0010	0.0132
過熱水蒸気 (150℃)		
101	0.0082	0.0162
70	0.0065	0.0185
50	0.0048	0.0191
20	0.0021	0.0209
10	0.0011	0.0219

過熱水蒸気は、水蒸気を沸点よりも高い温度にまで過熱したものである。真空（減圧）下では、水の沸点が下がるため、低い温度の過熱水蒸気（例えば10kPaでは沸点が約46℃のため50℃の過熱水蒸気も存在する）を作ることができる。したがってこのような過熱水蒸気を低温度過熱水蒸気とよぶことがある⁴⁾。過熱水蒸気乾燥の利点としては、食品原料などでは酸化防止など製品品質面ですぐれること、排気過熱水蒸気の循環使用による省エネルギーが挙げられるが、真空乾燥と流動層乾燥との組み合わせでは、真空ポンプの手前で水蒸気を凝縮除去できるために熱風の場合に比べてポンプへの排気量を大幅に減らすことができることが特に大きな利点といえる。

4.3 乾燥試験結果の一例

図8に乾燥試験結果の一例を示す³⁾。図は、横軸を乾燥時間、縦軸を被乾燥試料の中心温度としている。試料には径20mmのB2レンガ球（イソライト工業製）を使用し、乾燥温度を150℃とした。

乾燥開始直後に急激に試料中心温度が上昇し、水の沸点に達する。その後、一定温度を保ったのちに乾燥が終了すると、雰囲気温度（150℃）にまで試料中心温度が上昇する。雰囲気温度と試料中心温度が一致した点を乾燥終了時間と考える。流動層（流動媒体粒子：径0.12mmガラスビーズ）内に試料を挿入した場合と、容器内の粒子を除去して空塔内で乾燥した場合を比較すると、空塔かつ大気圧では、約80分の乾燥時間を要したものが、減圧（20kPa）とすることで40分程度に短縮される。またこの時の乾燥時の試料中心温度はそれぞれの圧力の水の沸点に等しい。一方で流動層を使用すると、大気圧であっても10分程度と乾燥時間が短く、減圧では、8分程度にまで短縮される。減

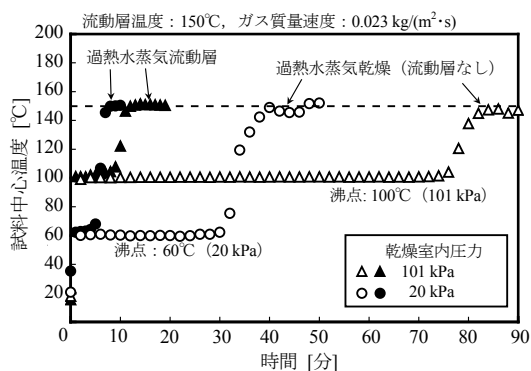


図8 減圧過熱水蒸気（流動層）乾燥時の試料中心温度の経時変化（B2レンガ球、径20mm）

圧とすることで乾燥時の試料中心温度が下がり乾燥時間も短縮されるが、乾燥時間短縮については流動層の適用が極めて効果的であることがわかる。

以上は、レンガ球を用いたモデル実験であるが、このような乾燥方式の対象として食品原料が有力である。そこで、円盤状（高さ10mm、径15mm）に切り出したニンジン（乾燥した例を示す⁵⁾）。図9は、無次元含水率（乾燥時の含水率/初期含水率）の経時変化を示している。流動化ガスには熱風および過熱水蒸気を使用しており、装置内圧力を12kPa、温度を60℃とした。流動層乾燥を併用しない場合に比べて流動層を併用した場合には乾燥時間が半分程度にまで短縮される。また、同一乾燥条件（流動層併用）では、熱風の方が過熱水蒸気よりも乾燥時間が短い。ただしその差は小さく、過熱水蒸気とした場合には真空ポンプの負荷を軽減できるという利点がある。結果として、減圧過熱水蒸気流動層乾燥によって低温度でありながら短時間乾燥が可能であることが確認できた。

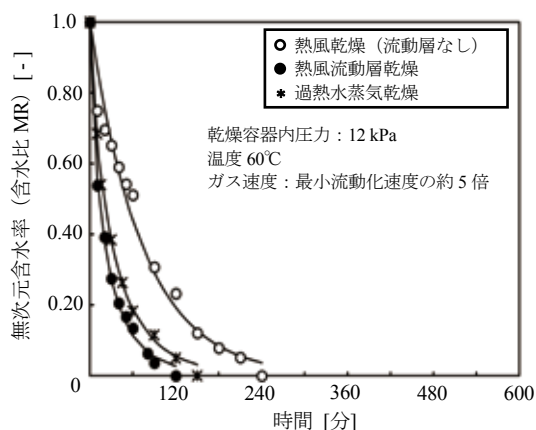


図9 ニンジン（円盤状、高さ10mm、径15mm）の無次元含水率の経時変化

4.4 今後の進展

ニンジンの乾燥では、高速度乾燥といっても小片の乾燥に2時間程度を要しており、さらなる乾燥速度向上が求められる。流動層乾燥では、流動媒体粒子として使用する粒子の特性も重要である。ひとつには、乾燥速度を向上させるために吸湿性の粒子を使用することであり、これによって乾燥時間の短縮が可能である⁶⁻⁸⁾。また、食品原料に関しては、流動媒体粒子の残留が問題となる。このため、流動媒体粒子には、人体に無害な粒子の使用が求められている。当研究室での一部の実験では、米粉粉末やニンジン粉末を

使用した乾燥試験を実施しており、上述のガラスビーズの場合と同等の乾燥速度を得ている⁵⁾。

省エネルギーという観点では、過熱水蒸気の循環使用が重要であるが、図7のような循環の場合には配管の断熱あるいは予熱など、凝縮に対する注意が必要である。過熱水蒸気を密閉容器内で循環使用する方式（エアレスドライヤ）が提案されている⁹⁾。図10に装置の概要を示す。乾燥容器内のファンによって過熱水蒸気を循環し、蒸発分の水蒸気を真空ポンプによって排出する。図は流動層乾燥になっていないが、流動層乾燥であっても同様の方式が適用可能である。

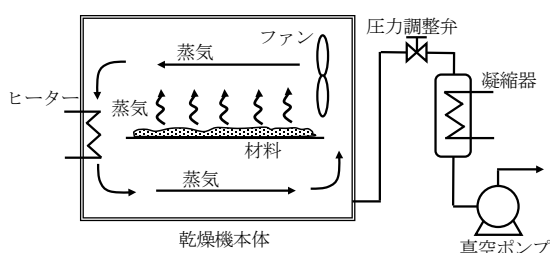


図10 エアレスドライヤの概略

5. まとめ

本稿では、低温度でありながら短時間で乾燥する方法について基本事項および既存の乾燥技術の解説をおこなった後に、筆者らの行っている減圧過熱水蒸気流動層乾燥方式について紹介した。低温度での乾燥は、一般に製品品質面ですぐれるが、乾燥時間が長くなる。この乾燥時間をいかに短縮できるかが課題である。

引用文献

- 1) 中村正秋, 立元雄治「第2版 初歩から学ぶ乾燥技術－基礎と実践」, 丸善出版, pp.7 (2013).
- 2) Kudra T. and A. S. Mujumdar, Advanced Drying Technology, second edition (Marcel Dekker, Inc.), p.363-370 (2009).
- 3) Tatemoto, Y., K. Sugita, S. Yano, Y. Mawatari, K. Noda and N. Komatsu; "Drying Characteristics of Porous Materials in Superheated Steam Fluidized Bed under Reduced Pressure," Journal of Chemical Engineering of Japan, 38(12), 983-989 (2005).
- 4) Suvarnakuta, P., S. Devahastin, A. S. Mujumdar: A mathematical model for low-pressure

superheated steam drying of a biomaterial", Chemical Engineering and Processing, 46, 675-683 (2007).

- 5) Tatemoto, Y. and T. Michikoshi; "Drying Characteristics of Carrot Immersed in a Fluidized Bed of Fluidizing Particles Under Reduced Pressure," Drying Technology, 32(9), 1082-1090 (2014).
- 6) Tatemoto, Y., S. Yano, T. Takeshita, K. Noda and N. Komatsu; "Effect of Fluidizing Particle on Drying Characteristics of Porous Materials in Superheated Steam Fluidized Bed under Reduced Pressure," Drying Technology, 26(2), 168-175 (2008).
- 7) Tatemoto, Y., M. Tsunekawa, S. Yano, T. Takeshita and K. Noda; "Drying Characteristics of Porous Material Immersed in a Bed of Hygroscopic Porous Particles Fluidized under Reduced Pressure," Chemical Engineering Science, 62(8), 2187-2197 (2007).
- 8) Tatemoto, Y., M. Tsunekawa, Y. Mawatari, Y. Shiota, and K. Noda; "Drying Characteristics of Porous Materials in a Fluidized Bed of Hygroscopic Porous Particles," Journal of Chemical Engineering of Japan, 38(12), 976-982 (2005).
- 9) 柴田正人「新しい真空（低圧）乾燥の提案」, 食品加工技術, 日本食品・機械研究会誌, Vol.31(3), p.51-56 (2011).

Captions

- Fig. 1 Changes in moisture content and material temperature with time
- Fig. 2 Relations of relative humidity, constant drying rate and wet-bulb temperature
- Fig. 3 Outline of spray dryer
- Fig. 4 Relationship between pressure and boiling point of water
- Fig. 5 Examples of vacuum agitating dryer
- Fig. 6 Outline of freeze vacuum dryer
- Fig. 7 Outline of superheated-steam fluidized bed dryer under reduced pressure
- Fig. 8 Change in temperature of material center (B2 brick ball, 20 mm in diameter) with

time in superheated steam

Fig. 9 Change in moisture ratio of carrot (disklike, 10 mm in height, 15 mm in diameter) with time

Fig. 10 Outline of airless dryer

Table 1 Minimum fluidization velocity of fluidized bed (glass bead: 0.12 mm in diameter) for different pressures