

(52) おがくずマトリックスの乾式コンポスト型トイレにおける乾燥特性

伊藤 竜生^{1*}・小川 真吾¹・船水 尚行¹

¹北海道大学大学院工学研究科環境創生工学専攻 (〒060-8628北海道札幌市北区北13条西8丁目)

* E-mail: ryuusei@eng.hokudai.ac.jp

おがくずをマトリックスとして用いる乾式コンポスト型トイレにおいて、おがくずとし尿の混合物の乾燥は最も重要な過程の一つである。なぜなら、混合物の含水率はその生分解過程において重要な因子であり、約65%に保たなければならないためである。トイレを安定して運転するためには、適切な設計と運転指針が必要だが、これにはおがくずマトリックスの乾燥特性が必要である。しかし、これまでこの乾燥特性に関する検討は行われていない。そこで本研究では、大きさの異なる2つの装置を用いておがくずの乾燥特性について検討を行ない、簡単な設計と運転指針の策定を乾燥の観点から行なった。その結果、おがくずの乾燥速度は乾燥モデルを用いて記述することができ、操作条件や周囲の温湿度からおがくず層表面の温度を補正することで求められることがわかった。また、実験室スケールの乾燥実験から、乾燥空気の流れを考慮することで実スケールのトイレの乾燥速度が得られる可能性があることがわかった。攪拌を行なうことにより乾燥を促進することができ、反応槽の温度が高くなるとその効果が大きくなった。これらの結果から、コンポスト型トイレの設計と運転指針の策定が可能となった。

Key Words : dry composting toilet, compensated vapor pressure, drying rate, sawdust matrix, mixing frequency

1. はじめに

乾式コンポスト型トイレはおがくずとし尿を加熱、混合するだけで、し尿をコンポスト化するトイレットである。この概要図を図-1に示す。便器の下に反応槽があり、反応槽を加熱するヒーター、反応槽内に充填されたおがくず攪拌羽根および換気機構を持つ。投入されたし尿はおがくずとよく混合、加熱され、高温に保たれる。これにより、し尿中の水分の蒸発や有機物の好気的な分解が行なわれる。ここで、おがくずは多孔質な粉体であるために、大きな比表面積による微生物の担持、水分の保持そして空気を含むことによる酸素の供給などのマトリックスとしての機能を持つ。またこのトイレは次に挙げる特徴を持つ。

1. 便器等を洗浄するための水以外を必要としない
2. 排水を出さないために水系への環境負荷が非常に小さい
3. し尿に含まれる非揮発性の栄養塩類を完全に回収できる
4. し尿を回収するための輸送管を必要としない
5. そのため、設置に要する工期が短い

このコンポスト化が行なわれるとき、含水率が最適値より高すぎる場合は、酸素の供給が行なわれなくなるために嫌気的な発酵が起こり、悪臭発生の原因となる¹⁾。逆に、含水率が低すぎる場合は、生分解反応の速度が遅くなる。このため、おがくずマトリックス内での含水率を

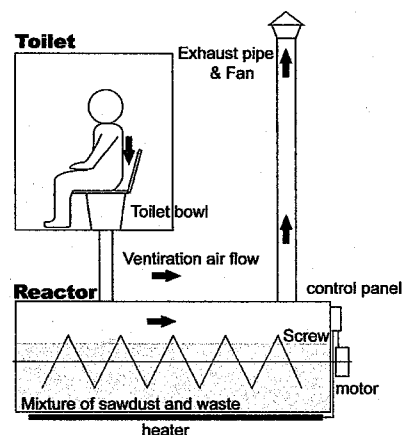


図-1 乾式コンポスト型トイレ概要図

50～65%に保つ必要がある²⁾。ここで含水率は反応槽における水分収支によって決定されるため、使用による水分の供給および水分の除去が重要な因子である。この供給については使用回数によって決定され、水分の除去は乾燥速度により決定されるが、おがくずマトリックスを用いた乾燥速度に関する検討は全く行なわれていない。

そこで、本研究では乾燥条件がおがくずマトリックスの乾燥速度に与える影響について、実験室スケールおよび実スケールとして一人用のコンポスト型トイレを用いて検討を行ない、おがくずマトリックスの乾燥の観点から反応槽の設計および運転指針の策定を行なった。

2. 実験装置

(1) 実験室スケール

図-2に実験室スケールの実験装置の概略図を示す。0.3～236mmにふるい分けたおがくずを使用した。湿量基準で含水率70%に湿らせたおがくずを乾燥容器に入れ、ウォーターバスにて一定温度に保った。この乾燥容器での乾燥面積は91.5cm²であった。乾燥容器上部にある乾燥風洞内に、恒温恒湿槽により所定の温湿度に保たれる空気を層流(Re: 752)となるように連続して循環し、おがくず表面から蒸発した水蒸気を除去した。表面から2cm中の温度をおがくず表面の温度とした。表-1にまとめた実験条件で乾燥実験を行なった。実験中の乾燥速度は、ベッセルを取り出し、その重量の経時変化から計算した。

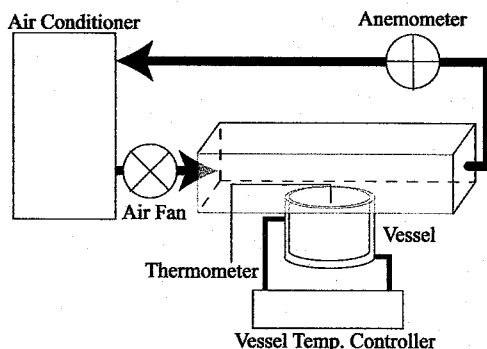


図-2 実験室スケールの乾燥実験装置

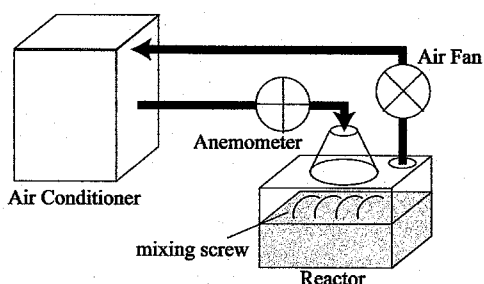


図-3 一人用トイレを用いた乾燥実験の概要図

(2) 一人用トイレ

図-3に一人用のコンポスト型トイレを用いた実験装置の概要図を示す。乾燥実験に使用したおがくずは前項で挙げたものと同等のものを使用した。トイレの反応槽における乾燥面積は1690cm²であった。反応槽の加熱には電熱線を利用し、ヒーターが所定の温度となるようコントロールを行なった。恒温恒湿槽にて所定の温湿度にした空気を、トイレの上面中心部に直径90cmの漏斗を用いて導入、循環し、乾燥実験を行なった。おがくず上面での循環空気のレイノルズ数はRe=1462であった。おがくず表面の温度には、表面から2cm中の温度を用いた。この実験条件を表-2に記す。また実際のコンポスト型トイレでは、反応槽が大きく、表面から乾燥が進み、おがくず層内に含水率の分布ができるため、見かけの乾燥速度は減少する。これを防ぐため、一定時間ごとに攪拌しおがくず層内の含水率を均一にする機構がついている。また、この攪拌動作によりおがくず層内の空隙にある空気がおがくず層上面の換気空気と交換されるため、攪拌時におがくず層内にある水蒸気が排出される。そこで、この攪拌の影響について、反応槽に設置されたスクリュ

表-1 実験室スケールの乾燥実験における操作条件

series	vessel temperature (K)	air temperature (K)	air relative humidity (%)
vessel temp.	293	333	20
	303		
	313		
	323		
	333		
air temp.	323	293	55
		303	
		313	
		323	
		333	
air humidity 1	323	298	50
			60
			70
			80
			90
air humidity 2	338	308	50
			60
			70
			80
			90

circulation-air velocity above sawdust: 3.21×10^{-1} m/s

一により攪拌を行なった。攪拌は、1rpmで、15分間攪拌し、その後逆方向に15分間攪拌した。表-3にまとめる条件について乾燥実験を行なった。乾燥速度はおがくずを全て取り出し、その重量変化から求めた。

3. 実験結果と考察

(1) 実験室スケールの装置における乾燥速度

図-4に様々な湿度におけるおがくずの乾燥特性曲線を示す。含水率が高い時には乾燥速度は一定で恒率乾燥速度であり、含水率が低いときには含水率の減少とともに減少する減率乾燥速度であった。また、別に行なった実験から恒率乾燥速度は循環空気湿度の減少および容器温度や循環空気温度の増加に伴い増加した。これは、乾燥速度が空気中の水蒸気の移動速度で決まり、乾燥面における水蒸気圧と循環空気と水蒸気圧(VP_A)(Pa)との差に比例するためである³⁾。そこで、蒸気圧差が乾燥速度に与える影響を図-5に示す。恒率乾燥では、おがくず内部からの水分供給が十分にあるため、乾燥表面での水蒸気圧は飽和蒸気圧(VP_S)(Pa)になっており、おがくず温度の増加に伴い飽和蒸気圧が大きくなる。恒率乾燥速度(DR)($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)と蒸気圧差($VP_S - VP_A$)に直線関係があるが、実験系列ごとに速度の傾向が異なる。これは環境条件により、おがくず表面の温度が真の温度と異なっていたためと考えられる。乾燥速度に影響の大きい循環空気の相対湿度(Ha)(%)に着目した結果、それぞれの切片は異なっているが、湿度が異なっても傾きは変わらなかった。このことは、空気温度や容器温度が異なっているにもかかわらず層表面の温度を湿度により補正できる可能性があることを示している。そこで、次式によるおがくず表面での蒸気圧補正の可能性を検討した。

$$DR = k_y (VP_S' - VP_A), \quad VP_S' = VP_S + f(Ha) \quad (1)$$

ここで、 k_y は物質移動係数(sm)、 VP_S' は補正したおがくず層表面での蒸気圧(Pa)、そして $f(Ha)$ は相対湿度の関数である蒸気圧の補正值(Pa)である。図-6に全ての実験条件から得られた相対湿度と $f(Ha)$ の関係を、図-7に補正した蒸気圧差と乾燥速度の関係を示す。乾燥速度は蒸気圧差に比例し、式(1)で表されることがわかった。よって、実験室スケールの乾燥実験装置において、操作条件からそれぞれの蒸気圧を算出し、補正することで乾燥速度を求めることができる。

(2) 一人用トイレにおける乾燥速度

図-8に一人用トイレにおける反応槽温度と乾燥速度の関係を示す。実験室スケールの実験と同様に、反応槽温度の増加と循環空気の相対湿度の減少に伴い速度が増大

表-2 実スケール乾燥実験の操作条件

reactor temperature (K)	313, 323, 333
air temperature (K)	297
air relative humidity (%)	45, 55, 80

circulation-air velocity above sawdust: $2.34 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

表-3 攪拌の効果に関する実スケール実験の操作条件

reactor temperature (K)	313, 323, 333
air temperature (K)	297
air relative humidity (%)	55
mixing frequency (time/day)	3, 4, 6, 12, 24

circulation-air velocity above sawdust: $2.34 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

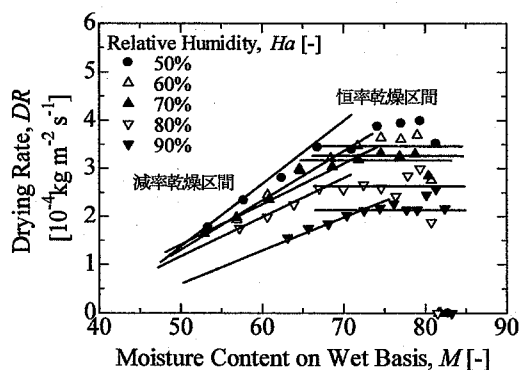


図-4 様々な湿度におけるおがくずの乾燥特性曲線

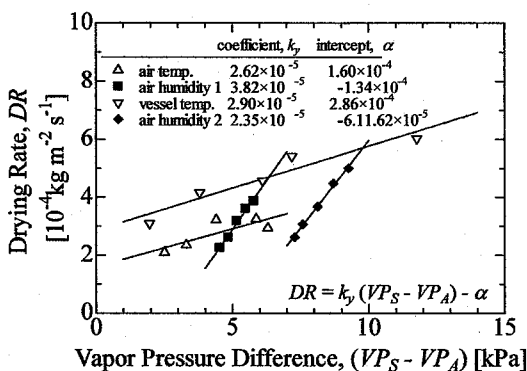


図-5 実験室スケール乾燥実験装置における水蒸気圧差と乾燥速度の関係

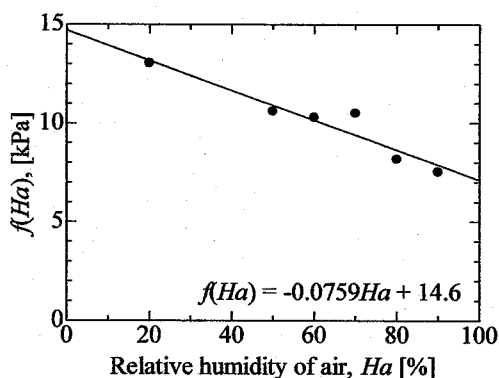


図6 実験室スケール乾燥実験装置において循環空気中の相対湿度が補正值に与える影響

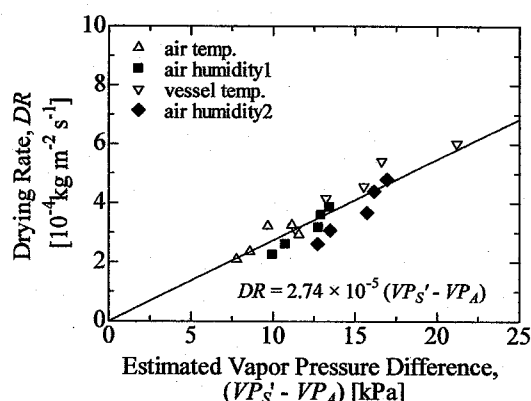


図7 実験室スケール乾燥実験装置における補正蒸気圧差と乾燥速度の関係

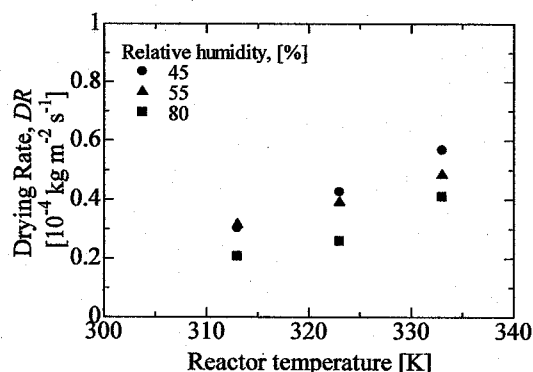


図8 異なる循環空気湿度における乾燥速度と反応槽温度の関係

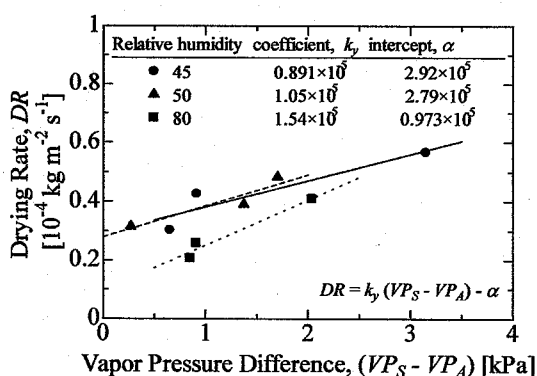


図9 様々な反応槽温度における蒸気圧差と乾燥速度の関係

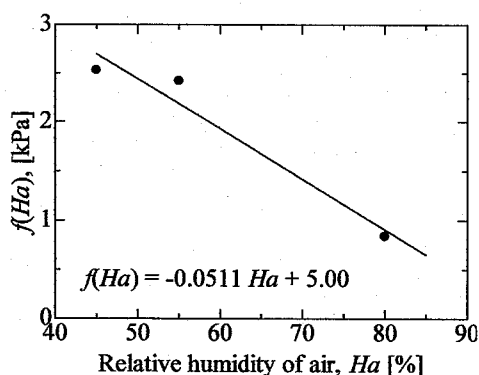


図10 実スケール乾燥実験装置における補正值と循環空気湿度の関係

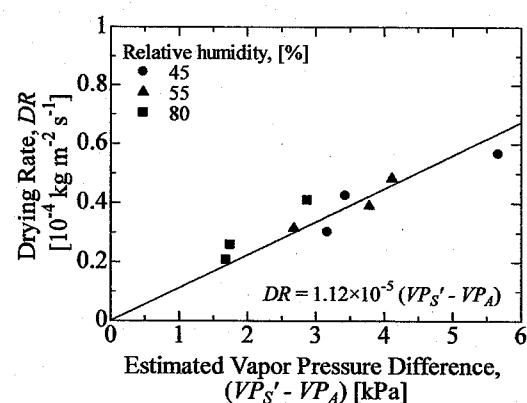


図11 実スケール乾燥実験装置における補正蒸気圧差と乾燥速度の関係

した。そこで、おがくず表面における蒸気圧と循環空気の蒸気圧差が乾燥速度に与える影響を図9に示す。前項の実験と同じように、乾燥速度と蒸気圧差は原点を通る比例関係になく、直線関係にあるため、測定した表面温度が真の温度と異なると考えられた。そのため、この実

験系列についても式(1)を用いておがくず表面の蒸気圧の補正を行なった。相対湿度と $f(Ha)$ の関係および補正蒸気圧差と乾燥速度の関係をそれぞれ図10および図11に示す。その結果、一人用トイレにおいても乾燥速度は式(1)で記述され、操作条件から求められることがわ

かった。

(3) 実験室スケールと実スケールの比較

図-6および図-10から、 $f(Ha)$ の傾きと切片はそれぞれ実験室スケールでは-0.0759、14.6、実スケールでは-0.0511、5.00であった。両者の傾きは大きく異なっていないが、切片は異なっていた。また、湿度が低いほど $f(Ha)$ が高くなった。 $f(Ha)$ がおがくず表面での水蒸気圧の実測値と真の値との差を表していることから、循環空気の湿度が低いほど蒸気圧を低く見積もっていると考えられる。これは、湿度が低い方が表面の乾燥が速く進行し、含水率の分布ができる。乾燥したおがくずは熱伝導度が小さいため、ヒーターからのおがくず層を通じた熱移動速度が小さくなる。おがくずはヒーターにより加熱されているため、おがくず層内部の温度は高くなっているが、おがくず層表面では内部からの熱移動速度が小さいためにその温度が気温に近づき、低い温度として観測されたと考えられる。また実験室スケールの実験では、実スケールの実験に比べ乾燥速度が大きく、この含水率分布がより発達したため、 $f(Ha)$ の値が大きくなったと考えられる。

それぞれの装置における物質移動係数は、図-7および図-11から、 2.74×10^5 および $1.12 \times 10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ と求められた。この違いは、循環空気の流速が異なるためと考えられる。そこで、空気の流れ方に影響される物質拡散係数と物質の拡散係数の比を表すシャーウッド数、 Sh 、を平板上を流れる空気のモデルとして次式を用いて求めた⁹⁾。

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 Sc はシュミット数である。その結果、シャーウッド数は、実験室スケールで20、実スケールで66となった。これらの比は約3で、実験から求められた物質拡散係数比の24と近い値になった。よって、循環空気の流れを考慮することにより、実験室スケールの実験から実スケールの乾燥特性を推測できることがわかった。

(4) 撹拌頻度の乾燥速度に与える影響

図-12に撹拌頻度と乾燥速度の関係を示す。乾燥速度は撹拌頻度に対し直線的に増加した。これは、おがくず粒子間にある空隙に含まれている水蒸気が、撹拌されることによりおがくず層表面へと移動し、循環空気中へと排出されるためと考えられる。またこの傾きは、反応槽温度の上昇とともに増大した。これは、おがくず層の温度が高くなることでより多くの水蒸気が空隙中に蓄えられ、それが排出されるためと考えられる。この撹拌頻度と乾燥速度の関係を次式でフィッティングし、得られた

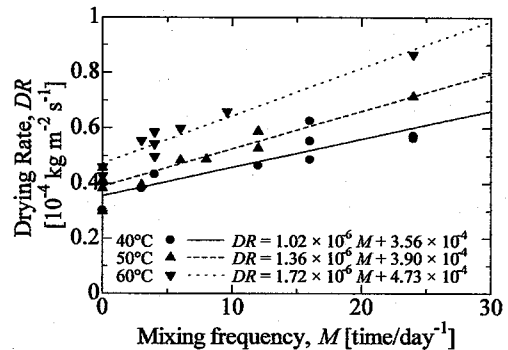


図-12 実スケール乾燥実験装置における撹拌回数と乾燥速度の関係

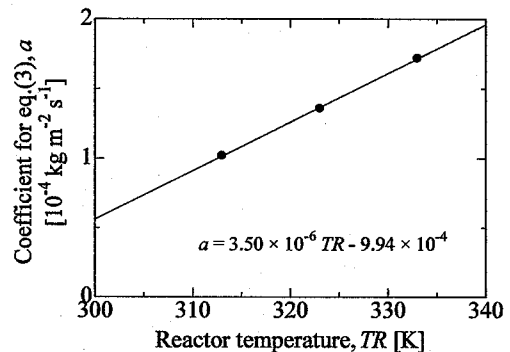


図-13 反応槽温度が式(3)の傾きに与える影響

結果から反応槽温度の傾きに与える影響を図-13に示す。

$$DR = aM + DR_0 \quad (3)$$

ただし、 a は係数、 M は1日あたりの撹拌回数、 DR_0 は撹拌をしないときの乾燥速度である。

したがって、操作条件から式(1)を用いて DR_0 を求め、撹拌頻度と反応槽温度から式(3)を用いて、撹拌があるときの乾燥速度を得ることができる。

(5) コンポスト型トイレの設計と運転指針

大人一人は1日に12リットルの尿を排せつするといわれている⁹⁾。すなわち、このトイレットシステムは、糞便からの水分を無視すると、1日に12kgの水を蒸発することで、継続的な使用が可能となる。例として、撹拌せずにこの水分量を蒸発させるために必要な乾燥面積は次のように求められる。反応槽の温度を60°Cに設定し、周囲の空気温湿度をそれぞれ25°C、45%とすると、乾燥速度は $5.5 \times 10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となる。12リットルの水分を24時間で蒸発させるためには、 0.25 m^2 の乾燥面積が必要となる。また、同様の条件で撹拌頻度を12回/dayにすると、乾燥速度は $7.5 \times 10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となるため、 0.18 m^2 の乾燥面積が必要となる。

4. 結論

乾式コンポスト型トイレの設計と運転条件の指針を策定するためにおがくずマトリックスの乾燥特性について検討を行なった。その結果、乾燥速度は乾燥モデルを用いて記述することができ、操作条件からおがくず層表面の温度を補正することで求められることがわかった。また、実験室スケールの乾燥実験から、乾燥空気の流れを考慮することで実スケールのトイレの乾燥速度が得られる可能性があることがわかった。さらに、攪拌を行なうことにより乾燥を促進することができ、反応槽の温度が高くなるとその効果が大きくなった。これらの結果から、コンポスト型トイレの設計と運転指針の策定が可能となった。

参考文献

- 1) Lopez Z.M.A., Funamizu N. and Takakuwa T.: Temperature effect on aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix. *Water Research*, Vol. 38, pp. 2406-2416, 2004.
- 2) Horisawa S, Tamei Y, Sakuma Y, Doi S and Terazawa M.: Effect of moisture content of a wood matrix on a small scale biodegradation system for organic solid waste. *J Wood Sci*, Vol. 46, pp. 317-321, 2000.
- 3) 化学工学会：化学工学便覧第2版, pp. 539-541, 1958.
- 4) Robert E.T.: Mass transfer operations 2nd edn, McGraw-Hill, New York, pp.54-55, 1968.
- 5) Almeida MC, Butler D, Friedler E.: At-source domestic wastewater quality. *Urban Water*, Vol. 1, pp. 49-55, 1999.

(2006.5.26受付)

Drying characteristics of sawdust matrix in the dry composting toilet

Ryusei Ito¹, Shingo Ogawa¹ and Naoyuki Funamizu¹

¹Division of Built Environment, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Drying of the mixture of human waste and sawdust is an essential process for the dry composting toilet system, because moisture content, that is an important factor for biodegradation process, should be kept around 65%. The drying rate is required for design of the system and planning an operation policy with stable operation, but the rate for the system has never been studied. So, we investigated the effect of operational conditions on the drying rate using two devices of different size, lab-scale equipment and full-scale toilet for one personal use. As a result, the drying rate is described by a drying kinetic model with adequacy calibration of water-vapor pressure at the drying surface for each device. The coefficient of full-scale toilet is estimated from the result of lab scale equipment considering the circulation air flow. Then, the drying rate could be estimated from operational conditions for simple design and planning an operation policy of the composting toilet system from the view point of drying.