

畜肉加工品の相対湿度周期操作による乾燥特性の速度論的解析

塩原愛理、小西靖之

Kinetics Study of the Drying Process for Semi-dried Meat Products Using Periodic Variations Control of the Relative Humidity

Airi Shiobara, Yasuyuki Konishi

要 旨

畜肉加工品の乾燥は一般的に冷暗所で行なわれており乾燥期間が長期化する。通風乾燥を用いて、無理な乾燥時間の短縮化を行うと局部的な過剰乾燥や含水率分布の不均一が生じて品質が低下する。畜肉加工品の効率的で高品質な乾燥操作技術の開発を目的に、相対湿度に注目して、温度と相対湿度と風速が一定の乾燥、または相対湿度を周期変動する乾燥(相対湿度周期操作)について、速度論的に評価した。「相対湿度周期操作」では、脱水速度の増加により乾燥時間を短縮化できた。これは、乾燥試料内の含水率分布を小さくし、表面領域の著しい低含水率化を抑制できたことが影響していると考察した。

食品の加工工程では、食品の貯蔵性や輸送性の向上のために乾燥操作が用いられている。通風乾燥は装置の簡便さや操作が容易であることなどにより、水産物や農産物などの様々な食品素材の乾燥に多用されている。一方、畜肉加工品の乾燥は一般的に比較的低温の冷暗所で行なわれているが、乾燥期間が長期化するためその短縮化技術が求められている¹⁾²⁾。畜肉加工品の乾燥時間の短縮化には通風乾燥を用いることが有効であるが、乾燥材料の大きさが比較的大きく、無理な乾燥時間の短縮化は局部的な過剰乾燥や含水率分布の不均一化を引き起こし品質低下につながるため、乾燥時間と品質に関する様々な取り組みが行われている³⁾⁶⁾。

国内においては、畜肉ハムやソーセージの低温領域での乾燥条件は 20℃以下であることが食品衛生法で定められている。そのため、乾燥時間を短縮するために、極端に相対湿度を下げたり、

風速を上げたりすると、乾燥物の表面と内部の含水率に分布が生じ、製品品質を安定させることが難しい。我々は、畜肉加工品の通風乾燥において、相対湿度を周期的に変動する乾燥操作(以下、相対湿度周期操作と称する)を行うと、乾燥時間の短縮化と含水率分布の不均一化に起因する品質低下を防止できることを明らかにした⁷⁾。「相対湿度周期操作」とは、例えば乾燥温度を 20℃一定に保ちながら、「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」の 2 つの乾燥工程を周期的に繰り返す操作である。1 つ目の工程である低湿度・高風速工程では、積極的な乾燥を行う。2 つ目の工程である、高湿度・低風速工程では、比較的遅い乾燥を行う。相対湿度周期操作を用いた通風乾燥は、この 2 つの工程を交互に行うような設計である。この乾燥工程中の相対湿度周期操作方法を様々な食材に適応するためには、物理化学的効果や脱水特性のメカニズムの理解が必要である。乾燥工程中の脱

水特性のメカニズム評価には、乾燥材料中の含水率状態の速度論的な評価を行うことが有効である⁸⁾⁻¹¹⁾。

そこで、本研究では畜肉加工品の乾燥についてモデル物質を用い、低温度領域での「温度・湿度風速が一定の乾燥」および、「相対湿度周期操作」での脱水応答や乾燥特性を速度論的に評価した。

乾燥テスト試料には、一般的な生ハムに用いられる畜肉原料(豚ロース脂身付き生：100 g あたりエネルギー263 kcal、水分 60.4 %、タンパク質 19.3 g、脂質 16.8 g)に組成が類似する市販の畜肉加工品(エネルギー207 kcal、水分 62.6 %、タンパク質 18.0 g、脂質 13.8 g) をφ50 mm×L 120 mm の円柱状に成型して用いた。この試料の初期含水率(W_D)は 190 %-d.b.(乾量基準含水率)で、生ハム製品(図 1)を想定して 100 %-d.b.を乾燥終了とした。



図 1 生ハム製品の写真

乾燥テストには、乾燥空気の温度(T_D)、相対湿度(RH)、風速(V)を制御できるとともに、乾燥工程中の乾燥品の重量変化の測定が可能な評価用乾燥装置を用いた。乾燥試料の重量測定は、乾燥庫内にロードセル(LVS-500GA、(株)共和電業)を取り付け、乾燥試料を糸に吊り下げて、乾燥工程中に連続的に測定した。乾燥庫内の温度、相対湿度は、乾燥庫内に設置してある温湿度センサーで測定した。乾燥試料の重量および乾燥庫内の温湿度データは、出力値をデータロガー経由でパーソナルコンピュータに取り込んだ。

本研究では、 T_D は 20℃、RH は 60～80 %、 V は 0.5～1.5 m/s の所定の乾燥条件でテストを行った。テストに用いた乾燥条件は、表 1 に示した。「相対

湿度周期操作」は、 T_D を 20℃一定に保ちながら、低湿度・高風速工程を RH = 60 %と $V = 1.5$ m/s、高湿度・低風速工程を RH = 80 %と $V = 0.5$ m/s 条件で、それぞれ 6 h で交互に乾燥条件を繰り返した。

表 1 乾燥テストの条件

乾燥条件名	$T_D(^{\circ}\text{C})$	RH(%)	$V(\text{m/s})$	Int.(h)
低湿度・低風速	20	60	0.5	-
低湿度・高風速	20	60	1.5	-
高湿度・低風速	20	80	0.5	-
相対湿度周期操作 (6 hごとに繰り返す)	20	60	1.5	6
	20	80	0.5	6

乾燥速度論的な評価パラメーターとして含水率および脱水速度を用いた。含水率は無水固体(絶乾固体)の重量を基準とし、乾燥中の乾燥試料から減少した重量を全て水分量とみなして、 $W(\text{\%-d.b.}) = (\text{水分重量}) / (\text{絶乾固体重量}) \times 100$ より算出した。脱水速度は、単位時間・単位乾量あたりの脱水量として算出した。

畜肉加工品の通風乾燥工程の乾燥空気の相対湿度が脱水応答への影響を評価した。乾燥工程中の乾燥温度($T_D = 20^{\circ}\text{C}$)、乾燥空気風速($V = 0.5\text{m/s}$)を一定にし、相対湿度のみが異なる脱水応答挙動を比較して図 2 に示した。図中の△プロットで示した RH = 80 %は、乾燥試料の初期含水率 $W_D = 190\text{\%-d.b.}$ より乾燥が開始し、乾燥工程の進行に伴い W は徐々に低下し、 $W = 100\text{\%-d.b.}$ に到達する

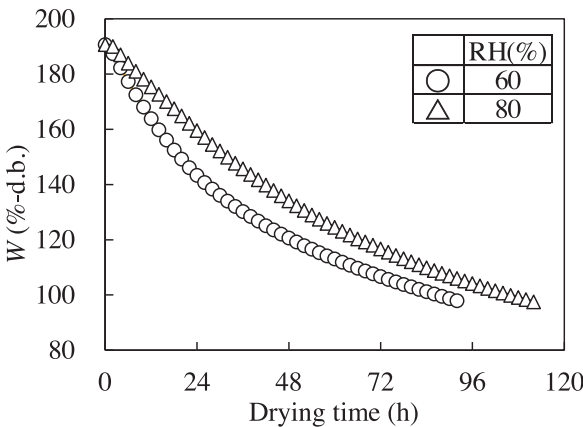


図 2 相対湿度が畜肉加工品の脱水応答への影響 ($T_D = 20^{\circ}\text{C}$ 、 $V = 0.5$ m/s)

までに必要な乾燥時間は、106 h であった。一方、図中の○プロットで示した $RH = 60\%$ では、乾燥試料の脱水速度が $RH = 80\%$ より明らかに速く、 $W = 100\% - d.b.$ に到達するまでに必要な乾燥時間は、88 h (乾燥時間が 83 % に短縮) であった。この結果から、畜肉加工品の乾燥には、 RH 値が強く影響することが分かる。

乾燥時間の更なる短縮化を目的に、乾燥空気の流れを増加した場合の乾燥特性を評価した。図 2 の○プロットで示した乾燥条件から、同じ温度・相対湿度で、乾燥空気速度のみを増加させた場合の脱水応答を図 3 の△プロットで示した。 $T_D = 20^\circ C$ の条件で「低湿度・高風速」、「高湿度・低風速」、「相対湿度周期操作」の 3 つの脱水応答を比較して示したのが図 3 である。

$T_D = 20^\circ C$ 、 $RH = 60\%$ の温湿度条件で、図 2 の○プロットは風速 $V = 0.5\text{ m/s}$ 、図 3 の△プロットは風速 $V = 1.5\text{ m/s}$ で乾燥した場合の脱水応答を示してある。乾燥試料の含水率が $W = 100\% - d.b.$ に到達するまでに必要な乾燥時間は、 $V = 0.5\text{ m/s}$ の場合は 88 h で、 $V = 1.5\text{ m/s}$ の場合は 76 h であり、この温湿度条件では乾燥空気の流れを増加させることが、乾燥時間の短縮化に寄与する。この高

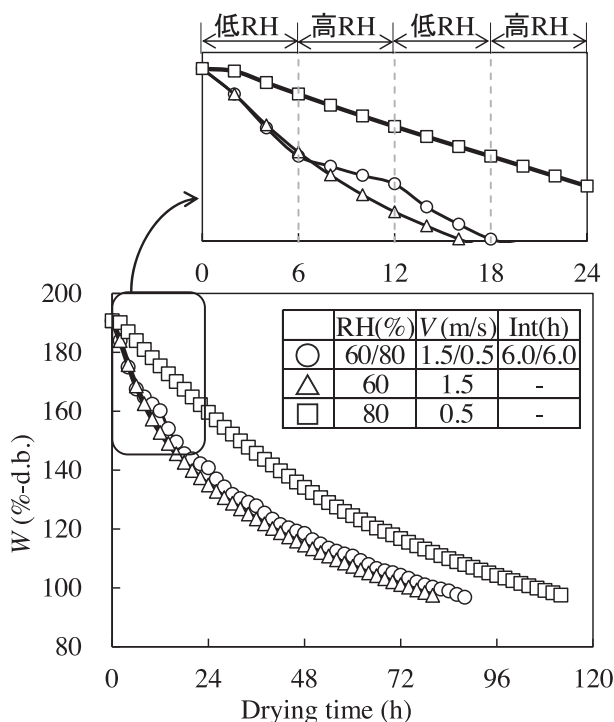


図 3 「相対湿度周期操作」の脱水応答特性-「低湿度・高風速」及び「高湿度・低風速」条件との比較

風速条件($V = 1.5\text{ m/s}$)で、生ハム加工品などの乾燥操作を行った場合には、乾燥時間の短縮化や脱水速度の増加に伴い表面と内部の含水率分布が大きくなる。特に乾燥品の表面領域の著しい含水率低下に起因し、乾燥品の表面の色変わりや硬さの増加などが生じる。

この対応として、先に述べた「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」の 2 つの乾燥工程を周期的に交互に繰り返す「相対湿度周期操作」が、乾燥時間の短縮化と製品色や表面部分の硬さの増加防止に有効である⁷⁾。

まず「高湿度・低風速」と「低湿度・高風速」一定条件での乾燥時の脱水応答をそれぞれ図 3 の□と△のプロットで示した。脱水応答曲線から分かるように、□のプロットの「高湿度・低風速」条件では、比較的ゆっくりと乾燥が進行し、△の「低湿度・高風速」条件では速やかに乾燥が進行する。乾燥試料の含水率が $W = 100\% - d.b.$ までの乾燥時間は、それぞれ 106 h と 76 h で乾燥時間は 1.4 倍異なる。乾燥工程中の RH と V は脱水応答に強く影響する。

「相対湿度周期操作」は、「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」を 6 h ごとに交互に行った乾燥操作である。このときの乾燥空気の流れ T_D および RH を図 4 に示した。 T_D はわずかに変動があるが $20^\circ C$ 一定条件で RH は 60% と 80% を 6 h ごとに変化している。図 3 の脱水応答から分かるように「相対湿度周期操作」は最初の 6 h は速い W 値の減少挙動を、その後の 6 h はゆっくりとした W 値

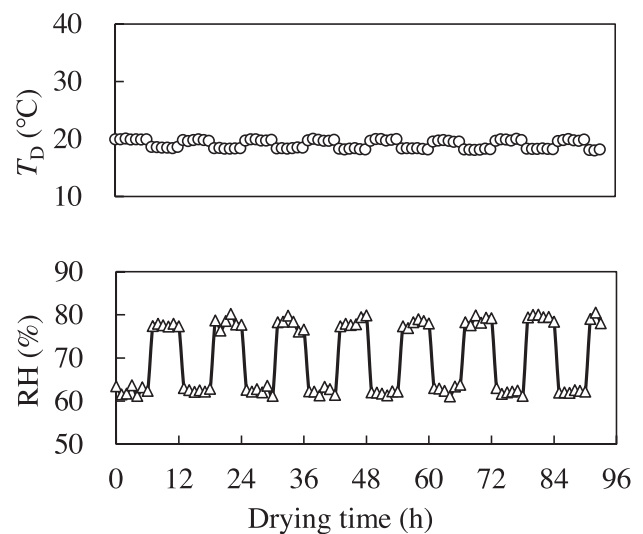


図 4 「相対湿度周期操作」の乾燥庫内の温度と湿度

の減少挙動を示し、この2つの W 値減少挙動を交互に繰り返すが、乾燥期間全体を見ると比較的「低湿度・高風速」に類似した脱水応答となる。

「相対湿度周期操作」時の乾燥特性をより明確に把握するために、脱水応答データより脱水速度 (D_r) を計算し、 W 値に対して整理した。図5に「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」の一定の乾燥条件と、2つの乾燥工程を周期的に交互に繰り返す「相対湿度周期操作」の乾燥条件の D_r 値を W 値に対して比較表示した。

「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」の一定条件の乾燥では、乾燥初期の $W = 190\% \text{-d.b.}$ にそれぞれ最も大きな D_r 値を与え、乾燥の進行に伴う W 値の低下により D_r 値は徐々に小さくなる。乾燥初期の最大の D_r は「低湿度・高風速」では、 $D_r = 0.047 \text{ g/(g} \cdot \text{h)}$ であるが、「高湿度・低風速」では $D_r = 0.015 \text{ g/(g} \cdot \text{h)}$ であり、RH と V の違いにより D_r 値は3倍以上異なることが分かる。この両者の D_r の差は、乾燥の進行に伴う W 値の低下に伴い徐々に小さくなり、 $W = 130\% \text{-d.b.}$ 以下でほぼ同じ D_r 値となる。

「相対湿度周期操作」では、「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」の2つの条件を交互に繰り返すため、乾燥開始時は「低湿度・高湿度」条件の乾燥と同じ D_r 曲線となるが、その後、「高湿度・低風速」条件に切り替わった場合は、「高湿度・低風速」の一定条件の乾燥よりも小さな D_r 値となる。これは、「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」

一定条件の乾燥と「相対湿度周期操作」での乾燥時の試料内部の含水率分布に違いがあるためであると考えることができる。

乾燥工程中の脱水速度曲線と乾燥試料内の含水率分布イメージ図を対比して示したのが図6である。脱水速度曲線は図5の乾燥初期データを示してある。図6中(A)及び(B)は「低湿度・高風速」一定条件、(C)及び(D)は「高湿度・低風速」一定条件、(E)は「相対湿度周期操作」での分布を示している。「相対湿度周期操作」に注目すると、乾燥条件は(工程1:「低湿度・高風速」条件) → (工程2:「高湿度・低風速」条件) → (工程3:「低湿度・高風速」条件) と変化する。

このとき、同じ含水率であっても乾燥条件により乾燥試料内の含水率分布は異なる。例えば $W = 165\% \text{-d.b.}$ では、脱水速度の速い条件の(A)では乾燥試料内の含水率が大きな分布となるが、脱水速度の遅い(C)では乾燥試料内の含水率が小さな分布となる。この乾燥試料内の含水率分布は $W = 160\% \text{-d.b.}$ でも同じような傾向となる((B)と(D)の比較)。一方、「相対湿度周期操作」の乾燥試料では両者の乾燥条件の中間的な含水率分布を与え、 $W = 160\% \text{-d.b.}$ では(E)のような分布を形成していると予想される。含水率分布に注目すると、「相対湿度周期操作」の含水率分布(E)は、「低湿度・高風速」一定条件の(B)より

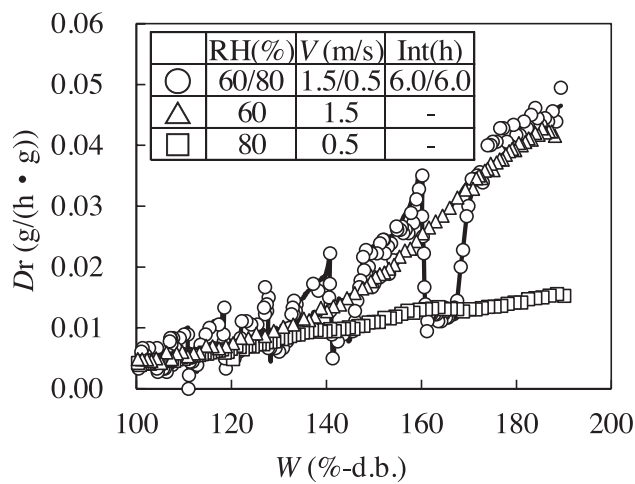


図5 相対湿度周期操作と相対湿度一定条件での脱水速度比較

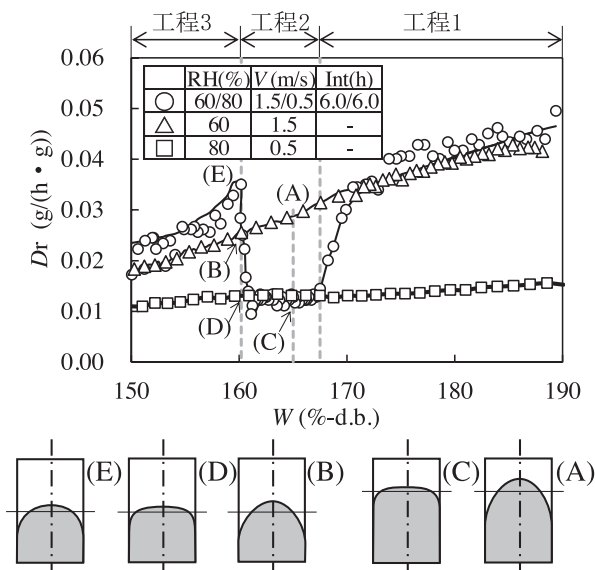


図6 乾燥工程中の脱水速度曲線と乾燥試料内の含水率分布イメージ

表面領域の含水率は高くなる。このことに起因して、工程 3 区間での「相対湿度周期操作」の初期の脱水速度は大きくなる。このように「相対湿度周期操作」では、乾燥試料内の含水率分布を小さくし表面領域の著しい低含水率化を抑制しながら、乾燥速度の増加と乾燥時間の短縮をはかることができる。

本研究では、畜肉加工品の効率的で高品質な乾燥操作技術の開発を目的に、モデル試料を用いて、乾燥温度(T_D)は 20 °C、相対湿度(RH)は 60 %および 80 %、乾燥空気風速(V)は 0.5 m/s と 1.5 m/s の条件で乾燥評価テスト(初期含水率 190 %-d.b→乾燥終了含水率 100 %-d.b.)を行い、以下の結果を得た。

(1)乾燥空気の RH は乾燥時間に影響し、 $T_D = 20$ °C、 $V = 0.5$ m/s の条件で RH = 80 %と RH = 60 %を比較すると、乾燥時間はそれぞれ 106 h と 88 h となり、RH 値を下げることにより乾燥時間は約 17 %短縮した。

(2)乾燥空気の V も乾燥時間に影響し、 $T_D = 20$ °C、RH = 60 %の条件で、 $V = 0.5$ m/s と $V = 1.5$ m/s を比較すると、乾燥時間はそれぞれ 88 h と 76 h となり、 V を増加させることにより、乾燥時間は約 14 %短縮した。

(3)「低湿度・高風速」と「高湿度・低風速」の 2 つの乾燥工程を周期的に交互に繰り返す「相対湿度周期操作」では乾燥時間を短縮化でき、乾燥試料内の含水率分布が脱水速度に影響していると考えた。

参考文献

- 1) Kim DH., Kim Y., Shin DM., Lee J.H., Han S.G.: *Food Sci. Anim. Resour.*, 43(3), (2022), pp.411-425
- 2) Gustavo G.F., Paulo S., Luiz A.: *Trends in Applied Sciences Research*, Vol 1 (5), (2006), pp.504-510
- 3) Chmiel M., Adamczak L., Pietrzak D., Florowski T., Florowska A.: *Foods*, 11, (2022), pp.811-821
- 4) Alvarez A., Alvarez A., Hamill R. Mullen A. M., O'Neill E.: *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 20, (2021), pp.5370-5392
- 5) Aykin-Dincer E., Erbas M.: *Meat Science*, 145, (2018), pp.114-120
- 6) Ikonc P, Petrovic L, Tasic T., Jokanovic M., Ikonc B., Dzinic N.: *Chem. Ind. and Chem. Eng. Quarterly*, 18(2), (2012), pp.163-169
- 7) 小西靖之, 塩原愛理, *Fooma Japan 2021 アカデミックプラザ発表要旨集*, Vol.28, (2021), pp.36-37
- 8) Konishi Y., Kobayashi M.: *Noble Int. J. Sci. Res.*, Vol.4(6), (2020), pp.51-65
- 9) Konishi Y., Kobayashi M.: *Noble Noble Int. J. Agr. Food Technol.*, Vol.02(4), (2020), pp.25-32
- 10) 小西靖之, 塩原愛理, 小林正義, *ケミカルエンジニアリング*, Vol.65(7), (2020), pp.439-446
- 11) Konishi Y., Kobayashi M.: *Drying Technology*, Vol.34, (2016), pp.883-891