



Title	高湿度，中温排ガスを利用する蒸発装置の基礎的研究
Author(s)	上牧, 修; Uemaki, Osamu; 藤川, 昌久 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 105, 93-101
Issue Date	1981-07-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41690
Type	departmental bulletin paper
File Information	105_93-102.pdf



高湿度、中温排ガスを利用する蒸発装置の基礎的研究

上 牧 修* 藤 川 昌 久*
渡 辺 昇** 久 郷 昌 夫*

(昭和56年3月31日受理)

Evaporation Rates in Falling-Film and Climbing-Film Evaporators Heated with High Humid Waste Gas

Osamu UEMAKI, Masahisa FUJIKAWA,
Noboru WATANABE, Masao KUGO

(Received March 31, 1981)

Abstract

An application of high humid waste gas from a dryer was experimentally investigated as a possible heating media of a vertical liquid-film type evaporator. Highly humidified air of 0.5 (kg H₂O/kg dry air) and 120 °C were estimated for humidity and temperature of the exit gas for the dryer of filtrated stock. The evaporation rates of water were measured in two falling-film evaporators and a climbing-film evaporator. The temperature of the outlet gas was 59–64 °C corresponding to the boiling point of 55 °C of the evaporators controlled at 120 mm Hg abs. pressure. But in this experiment the inlet temperature of gas was somewhat lower than 120 °C by 40–45 °C, because the gas was expected to pass through a heat exchanger to heat other stock.

The results indicated that the evaporation rates were 8–12 (kg/m²·hr) as increased with feed rates of water up to 40 (kg/m³·hr) under the constant ratio of feed rate to air flow rate. It was concluded that the efficiency of the evaporation in the climbing-film evaporator was greater than that in the falling-film evaporators.

1. 緒 言

馬鈴薯や牧草などを処理する最近の農産品加工プロセスには製品の水分を調整するための乾燥工程と牧草汁液などから飼料蛋白を回収するための濃縮蒸発工程とが含まれている場合が多い。通常この乾燥工程には熱風式乾燥機が広く使用されており、乾燥機から排出される高湿度、中温の排ガスは高温の乾燥空気に匹敵するエンタルピーを有している。したがってこの排ガスを多量の熱を必要とする蒸発工程の熱源として利用する新しい技術を確立することは、熱エネルギーの有効利用の立場から極めて重要なことと考えられる。

本研究は農産品加工プロセスなどの乾燥機から排出される高湿度、中温空気の熱エネルギーを

* 応用化学科 第一講座

** 北斗工機研

同一プロセスの蒸発工程の熱源として有効に利用することによって、プロセス全体の熱経済性を高めることのできる新しい技術を確認しようとするものである。

前報¹⁾では高湿度 (0.5~0.8 kgH₂O/kg dry air)、中温 (120℃) の空気を加熱媒体とする並流式の液膜降下式蒸発装置²⁾を使用して清水及び馬鈴薯汁の蒸発実験をおこない、蒸発速度に及ぼす空気の湿度の影響などについて報告した。

本報告では工業化を目的とするプロセス中の乾燥工程の制約から加熱用空気の湿度を 0.5 (kg H₂O/kg dry air) の一定値に保ちながらおこなった3種類のカランドリヤによる実験結果をもとに、清水の蒸発速度に及ぼすカランドリヤの形式と操作条件 (加熱用空気流量, 原料液供給速度など) の影響を詳細に検討した。

なお本方式の蒸発装置は原料液の種類に関係なく多重効用缶の第1缶のみに適用されるので、順流式の場合には原料液は極めて薄いので基礎データの収集を目的とする本実験では、加熱管にスケールが生成するおそれのない清水を原料液として使用した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置および加熱器 (カランドリヤ)

実験装置のフローシートを Fig. 1 に示す。

本装置は原料液を沸点にまで加熱するための加熱器 (カランドリヤ) と加熱した溶液を蒸発させて蒸気と濃縮液とに分離する蒸発器 (エバポレータ) 及び発生蒸気を凝縮するためのバロメ

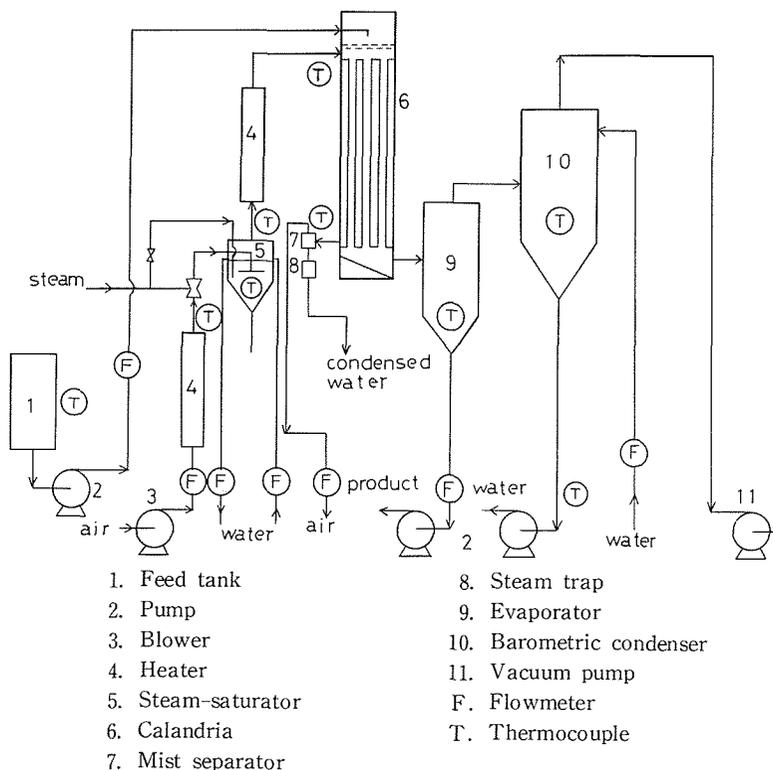


Fig. 1 Flowsheet of experimental equipment

リックコンデンサーなどから成っている。

本研究が目的とする農産品加工プロセスの水溶性蛋白の濃縮操作では、溶液の蒸発を低温でおこなう必要があり、さらに伝熱速度の点から溶液と加熱用媒体との温度差をできるだけ大きくするため、系を減圧にして蒸発をおこなった。本実験で採用した空気湿度 $0.5(\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg dry air})$ は蒸発工程に組み合わされる農産品を磨砕濾過した濾滓の乾燥機出口のガス湿度に相当する値である。

実験に使用したカランドリヤは内径 155 mm、高さ 1500 mm で、その内部に内径 16 mm、外径 19 mm、長さ 1000 mm の加熱管が 19 本、正三角形に配置されており、全伝熱面積は 1.0 m^2 である。なお加熱用の高湿度空気が流れる加熱管外側には数枚の邪魔板を取りつけ、空気側の伝熱係数の増大をはかった。

本実験には空気側の構造および流体の流れ方向の異なる下記の 3 種類のカランドリヤを使用した。

(1) カランドリヤ A

前報¹⁾のカランドリヤ(空気側邪魔板 3 枚設置)の空気側に直径 3 mm のステンレス針金を充てんして(充てん率 17.6%)、空気側の伝熱係数の増大をはかった。Fig. 1 に示されるようにカランドリヤ上部に供給された原料液は、孔数、孔径の異なる 2 枚の多孔液分散板によって各加熱管に均一に分配され、薄膜となって管内壁を流下する間に加熱される。カランドリヤ A では加熱用空気と原料液は下向きの並流を形成している。

(2) カランドリヤ B

加熱管の本数、配置法及び伝熱面積はカランドリヤ A と同じであるが、空気流通側に 97 mm 間隔に 9 枚の邪魔板を設置して伝熱係数の増大をはかった。なお原料液の加熱管への分配は液分散板を使用しないオーバーフロー型に改め、常温での実験により流量の均一化を確認した。カランドリヤ B では気液は下向きの並流を形成している。

(3) カランドリヤ C

カランドリヤ C ではカランドリヤ B をそのまま使用し、原料液の流れ方向のみを上向き流れとする気液向流方式に変更した。原料液の入口部にあたるカランドリヤ下部には直径 30 mm の磁製球を充てんしてここでの原料液の滞留時間を短くした。

2. 2 実験方法

Fig. 1 に示されるように加熱媒体の空気は予熱器で所定の温度(水蒸気飽和器の温度に等しくさせる)にまで加熱され、エゼクター部でボイラーからの水蒸気と混合される。この空気-水蒸気の混合ガスはさらに $78^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ の水蒸気飽和器内の温水中に吹き込まれ、ここでその湿度が 0.5 の一定値に調節される。空気湿度はボイラーで計量した空気への吹き込み水蒸気量から飽和器での溢流水量を差し引いて求めた。したがって飽和器では空気中の過剰の水蒸気が凝縮していることになる。飽和器を出た一定温度の空気はさらに過熱器で 120°C にまで加熱されてカランドリヤ上部へ送りこまれ、環状部を流下したのち生成凝縮水とともにカランドリヤ底部より系外へ排出される。水蒸気からの凝縮水はトラップ及びミストセパレータに集められ、計量される。

一方 45°C に予熱された原料液の清水は所定の真空度に保たれているカランドリヤに供給され、高湿度空気によって加熱される。加熱された原料水は次いで蒸発器(内径 350 mm、高さ 1200 mm)に入り、ここで蒸発して気液が分離され、液体は底部からポンプによって計量されながら系外へ排出される。蒸発器頂部からの蒸気はバロメトリックコンデンサー(直径 300 mm、高さ 1050

mm) で冷却，凝縮し，コンデンサー底部から排出される。

原料水の蒸発量，高湿度空気からの凝縮水量，各部の温度，圧力などは操作条件が一定になってから測定され，それらのデータから物質収支，蒸発速度などを求めた。

主な実験条件は次に示す通りである。

○ 空気の水蒸気含有率	0.5 [kg H ₂ O/kg dry air]
○ 原料水供給速度	20~45 [kg/m ² ·hr]
○ 空気流量	1800~2500 [kg dry air/m ² ·hr]
○ カランドリヤ圧力	120~130 [mm Hg abs.]
○ 蒸発器温度	55 [°C]

3. 実験結果および解析

本実験ではこの蒸発工程に組み合わされる乾燥工程の操作条件から加熱媒体空気の湿度を 0.5 [kg H₂O/kg dry air] の一定値に保ち，原料液と空気流量とを変化させて，蒸発速度に及ぼす操作条件の影響を明らかにするとともに，実験に使用した3種類のカランドリヤにおける蒸発速度の比較，検討も試みた。

Fig. 2 はスケールアップを目的とするプロセスの操作条件から要求される原料水供給速度対空気流量比が一定 (1.03) の条件下でのカランドリヤ A 及び B の蒸発速度と原料水供給速度の関係を示したものである。

この図から明らかなように，空気側に針金を充てんしたカランドリヤ A 及び邪魔板 9 枚を設置したカランドリヤ B とほぼ 8~12 [kg/m²·hr] の同じ値の蒸発速度が得られている。またカランドリヤ A 及び B において原料水供給速度の増加とともに蒸発速度が増加することが認められるが，これは本実験条件下ではカランドリヤの加熱管一本当りの流下液量が 22~32 [g/min] と少量であるため，液流量の増大とともに液の加熱管との接触面積が増大するためと考えられる。原料水処理量に対する蒸発水量の割合，すなわち蒸発率は原料水供給速度に依存せず 32~34% とほぼ一定であった。

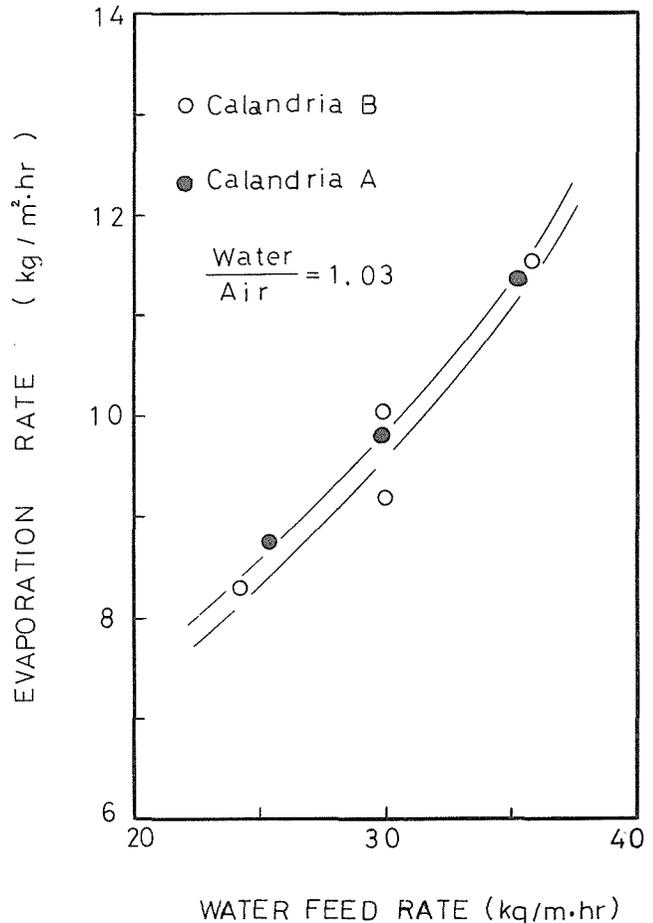


Fig 2 Effect of water feed rate on evaporation rate (1)
(Calandria A, B)

なお空気側に3枚の邪魔板を設置した前報¹⁾のカランドリヤの実験結果と Fig. 2 の結果とを比較すると、カランドリヤ A 及び B での蒸発速度は前報の値の約2倍に増大しており、実験条件の差異を考慮に入れても、本実験に使用したカランドリヤの蒸気能力の増加が認められ、カランドリヤの改造の効果が明らかとなった。

Fig. 3 には加熱媒体の高湿度空気(カランドリヤ入口温度 120℃)のカランドリヤ出口部における温度を示した。原料水(カランドリヤ入口における温度 45℃, 同出口における温度 55℃)と空気とがカランドリヤ内を並流で流れる本方式では、空気のカランドリヤ出口温度は原料水供給速度に依存せず約 64℃ とほぼ一定であり、原料水対空気比 1.03 の条件下ではこれ以上空気の温度を低下させて、空気中の水分の凝縮熱をさらに有効に利用することは困難であることが認められた。

次にカランドリヤ B を用いて空気量を一定に保ち、原料水供給速度を増大した場合、すなわち原料水対空気比を変化させた場合(原料水-空気比=0.89~1.55)の蒸発実験の結果を Fig. 4 に示した。

図から空気流量が 29 [kg/hr] の場合、原料水供給速度が 40 [kg/m·hr] まではその蒸発速度は増大するが、それ以上では逆に減少することが認められる。これは本実験条件下では原料水処理量が 40 [kg/m·hr] を越えると、原料水温度(45℃)と蒸発温度(55℃)との差が 10℃ と大きく、原料水の加熱に消費される熱量が、蒸発に消費される熱量に対して負の効果としてはたらく冷却効果が現われはじめるためと考えられる。空気流量が 33.8[kg/hr] の場合は、全体に蒸発速度が大きいことは当然であるが、この場合、実験操作上空気の湿度が基準値の 0.5 よりやや小さかったために全般的に低目の結果がでたものと考えられる。

Fig. 4 から空気流量一定の条件下では加熱管 1 本当りの原料水供給速度を増加させると蒸発

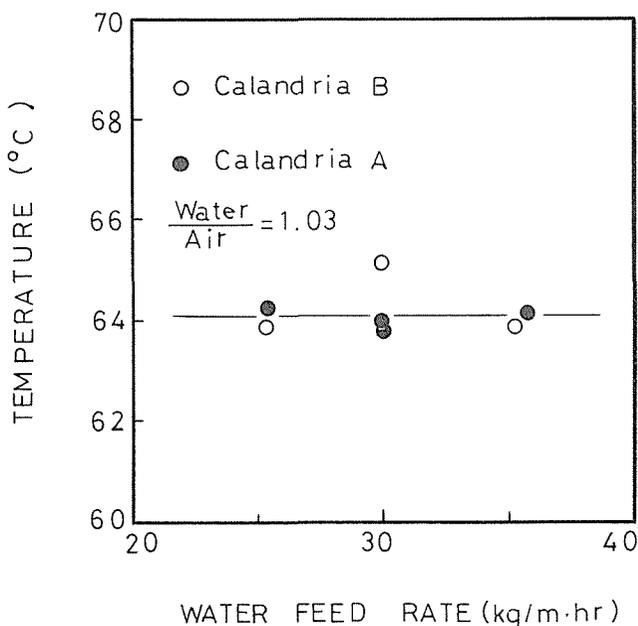


Fig. 3 Relationship between air temperature at outlet of calandria and water feed rate (Calandria A, B)

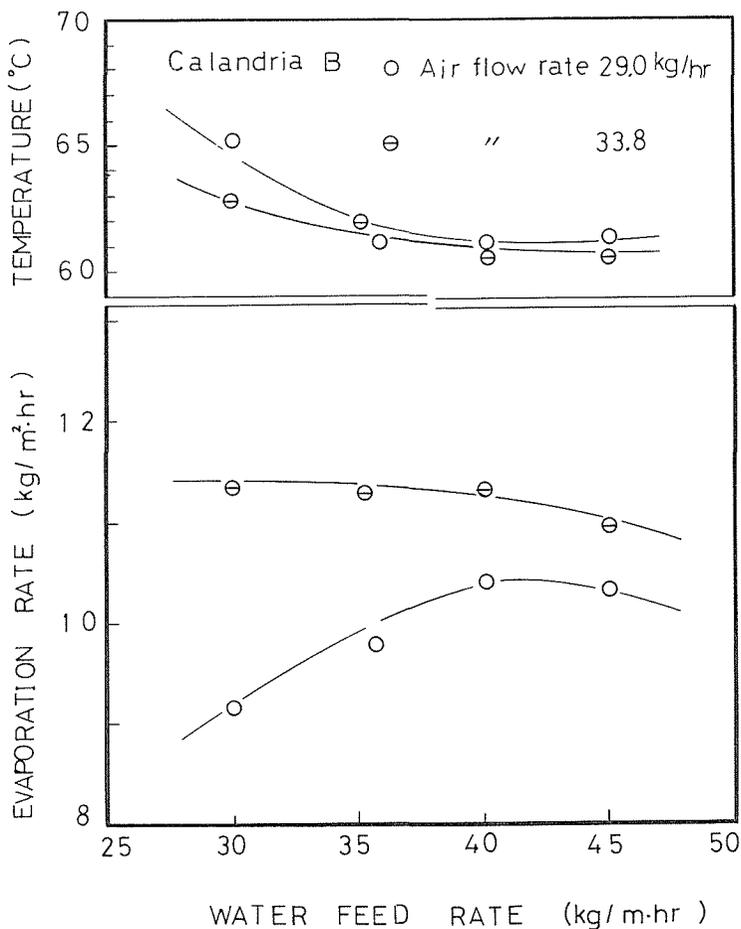


Fig. 4 Effect of water feed rate on evaporation rate (2)
(Calandria B)

速度が増加することが認められることから、同一伝熱面積のカランドリヤを使用する場合、加熱管の本数を増加するより、管長を増大する方が蒸発速度の増大に有効であることが示される。

また Fig. 4 に示されるカランドリヤ出口の空気温度対原料水供給速度の関係より原料水対空気比が増大するとカランドリヤ出口空気温度も低下するが、原料水対空気比が 1.2 以上では空気温度は約 61°C の一定値になることが認められ、本方式の並流操作では空气中水分の凝縮熱の回収はこの温度が限度と考えられる。

次に加熱用高湿度空気の流れをそのまま下向きとし、原料水の流れを上向きに変更した気液向流方式のカランドリヤ C での実験結果について検討する。

これまで使用してきた気液並流下向き流れのカランドリヤでは原料液の各加熱管への均等分配には特別の注意が必要であるうえ、空気はカランドリヤ出口部で 55°C の原料液と接触するため、その温度は約 64°C (原料水対空気比 1.03) にまでしかさがらず、空気中の水分凝縮熱の利用度が低いという欠点が認められた。これに対して原料水が上向き流れ、加熱空気が下向き流れの向流方式を採用すれば、原料水の加熱管への分配は自然と均等になるうえ、空気はカランドリヤ出口

で45℃の原料水と接触するため、空気温度は並流方式の場合よりさらに低下し、その分だけ加熱空気中の水分の凝縮熱をより有効に利用することが可能となる。

Fig. 5にはカランドリヤCでの原料水対空気比一定条件下での原料水供給速度対蒸発速度及びカランドリヤ出口空気温度の関係を示した。この図から原料水対空気比を一定に保ちながら原料水供給速度を増加させていけば、蒸発速度が増大することが認められる。ここで注目すべきことはFig. 4に示される並流式の場合と異なり、向流式のカランドリヤCでは原料水対空気比の小さい場合ほど蒸発速度が大きいことである。これは加熱媒体の空気量が一定の場合、原料水処理量の少ない程、蒸発速度が大きいという一般的な結果と一致している。

なおさきの原料水流下式のカランドリヤでは水の管壁との濡れ面積の関係で、水量の増加とともに蒸発速度が増加したが、カランドリヤCではその影響は全くないという予想通りの結果が得られた。

さらにFig. 5には原料水対空気比が1.03の場合について、向流式と並流式のカランドリヤでの蒸発速度を比較して示したが、向流式の方が約10%ほど大きいことが認められた。Fig. 5の上部にはカランドリヤCにおける空気のカランドリヤ出口温度を示したが、並流式カランドリヤの場合より3～4℃低い温度となっており、向流式では加熱空気中の水分の凝縮熱をより有効に利

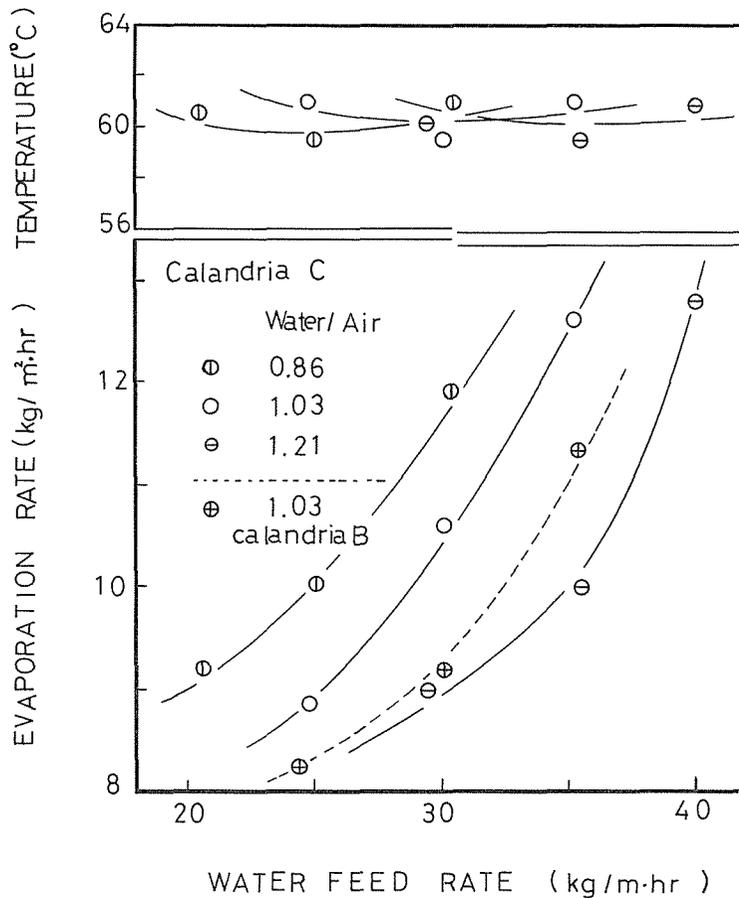


Fig. 5 Effect of water feed rate on evaporation rate (3)
(Calandria C)

用できることが確認された。

このように原料水の前熱温度が蒸発温度より低い場合では、高湿度の空気を蒸発の熱源とするカランドリヤでは並流流下方式に比べ、向流上昇式が蒸発速度及び凝縮熱の回収率の面で有利と考えられる。なお本方式のカランドリヤでは原料水対空気比約 1.0 において、10~12[kg/m²・hr]の清水蒸発速度が得られることを認めた。

最後に実験に使用したカランドリヤの伝熱係数について若干の検討を試みる。液膜式蒸発装置の伝熱現象に関してはいくつかの論文が報告されているが³⁻⁹⁾、使用する装置によって気、液の流動、沸騰状態、さらに伝熱面の温度分布などが著しく異なるため、一般的な解析法は確立されておらず、個々の装置について伝熱係数が実測されているのが現状である。特に非凝縮性ガスの空気が存在する高湿度空気を熱源とする本実験では、空気側の温度分布を推定することは非常に困難であり、気体側と液側との温度勾配を伝熱量に対して直線的とする通常の方法によって総括伝熱係数を算出することは大きな誤差をひき起す。

そこで本実験装置に適用可能な次の実験式を用いて本蒸発装置の総括伝熱係数の推定を試みた。新川⁸⁾は管内径 13.5 mm、管長さ 1.2 m の流下式液膜蒸発装置を使用して水及び水-メタノール系の蒸発実験をおこない、液側の伝熱係数 (h_L) と加熱媒体飽和水蒸気側の伝熱係数 (h_S) を次式のように求めている。

$$\frac{h_L d}{k} = (0.82) \left(\frac{4V}{\pi d \mu_f} \right)^{0.46} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$Re_f = \frac{4V}{\pi d \mu_f} = 2750 \sim 28000$$

$$h_S \left(\frac{\mu_f^2}{\rho_f^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} = (0.0115) k_f \left(\frac{4\Gamma}{\mu_f} \right)^{0.4} \quad (2)$$

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu_f} = 200 \sim 1500$$

また内田⁷⁾は管内径 11.9~25.5 mm、管長さ 2.5 m の上昇薄膜式蒸発装置を用いて飽和水蒸気による水及び水-メタノール混合液の蒸発実験をおこない、総括伝熱係数 (U) を与える次式を報告している。

$$\frac{U}{k_f} = (30.4) \left(\frac{4\Gamma}{\mu_f} \right)^{0.56} \left(\frac{V}{F} \right)^{0.37} \left(\frac{C_p \mu}{k_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu_f} = 400 \sim 5000$$

これらの実験式 Eq. (1)~Eq. (3) に本実験条件の数値を代入してそれぞれの伝熱係数を求め、さらに加熱媒体の高湿度空気側の伝熱係数に対して非凝縮性ガスの空気の影響を補正すると⁹⁾、本実験のカランドリヤ A 及び B の液側伝熱係数は $h_L = 650 \sim 750$ [kcal/m²・hr・°C]、空気側の伝熱係数は $h_S = 150 \sim 200$ [kcal/m²・hr・°C] となる。したがってカランドリヤ A 及び B の総括伝熱係数は $U = 130 \sim 160$ [kcal/m²・hr・°C] となり、また同様の手法によって求めたカランドリヤ C の総括伝熱係数もほぼ同じ値となった。

しかしさききのべたようにカランドリヤ内で起こる現象の複雑さにより、その総括伝熱係数は加熱管の長さ、熱媒体と原料液との温度差などにも依存することが報告されており⁴⁾、伝熱現象を精度よく解析するためには、カランドリヤ内の温度分布を正確に測定するなど、より詳細な実験

データの収集を必要とするものと思われる。

4. 総 括

本研究では農産品加工プロセスなどの乾燥機から排出される高湿度、中温空気の熱エネルギーを同一プロセスに含まれる蒸発工程の熱源として有効に利用することによって、プロセス全体の熱経済性を高めることを目的として、3種類のカランドリヤによる清水の蒸発実験をおこない、蒸発速度に及ぼす操作条件とカランドリヤの形式の影響を実験的にしらべ、さらに本装置の伝熱係数についても検討した。その結果高湿度、中温空気を加熱媒体とする蒸発装置の特性が明らかとなり、排ガス中に存在する水分の凝縮熱の回収率向上の面から液膜上昇方式の気・液向流カランドリヤがより有効との結論を得た。

使 用 記 号

C_p	: 流体の比熱	[kcal/kg·°C]
d	: 加熱管内径	[m]
F	: 原料液供給速度	[kg/hr]
h_L	: 液膜側伝熱係数	[kcal/m ² ·hr·°C]
h_s	: 凝縮飽和水蒸気の伝熱係数	[kcal/m ² ·hr·°C]
k	: 流体の熱伝導度	[kcal/m·hr·°C]
Re	: レイノルズ数	[-]
U	: 総括伝熱係数	[kcal/m ² ·hr·°C]
V	: 蒸発による蒸気の生成速度	[kg/hr]
Γ	: 原料液流量	[kg/m·hr]
μ	: 流体の粘度	[kg/m·hr]
ρ	: 流体の密度	[kg/m ³]
添字		
f	: 液膜	

Literature cited

- 1) 上牧 修, 藤川昌久, 渡辺 昇, 久郷昌夫; 北大工学部研究報告, 89号 (1978) p. 107
- 2) 本荘好雄; ケミカルエンジニアリング, 5 (1960) 12, p. 18
- 3) C. L. Tang; Can. J. Chem. Eng., 58 (1980) p. 425
- 4) 戸沢 滋, 小松芳雄; 化学工学, 24 (1960) 5, p. 298
- 5) J. F. Keville; Chem. Eng. Progr., 54 (1958) 10, p. 83
- 6) C. E. Dengler, J. N. Addoms; Chem. Eng. Progr., Symp. Ser., 52 (1956) 18, p. 95
- 7) 内田俊一, 西川新三, 新川 正; 化学機械 15 (1951) 7, p. 305
- 8) 新川 正; 化学工学論文集, 6 (1980) 5, p. 481
- 9) 杉山幸男; “化学工業工学” (1969) p. 196, 地球出版