

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

遠赤外線加熱の付加による過熱水蒸気処理の伝熱速度 および熱効率の改善

伊佐垂希子, 羽倉義雄, 鈴木寛一[†]

広島大学大学院生物圏科学研究科

Enhancement of Heat Transfer Rate and Thermal Efficiency by Combining Far Infrared Heating with Superheated Steam Treatment

Akiko ISA, Yoshio HAGURA, and Kanichi SUZUKI[†]

Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-4, Higashihiroshima 739-8528, Japan

Enhancing effects of heat transfer rate and thermal efficiency of superheated steam treatment (SHS) combined with far infrared heating (FIH) were compared with those of superheated steam treatment only by using a semi-practical compact apparatus fabricated in this study. Heat transfer rate was calculated from the constant drying rate of samples wetted enough with water. The samples were treated at three superheated steam temperatures (120, 150, and 200°C) or at those temperatures combined with four far infrared heater temperatures (250, 300, 350 and 400°C). When only 1/5 of SHS heat flow was supplied in addition to the FIH heater, the heat transfer rate was increased 2 times or more compared with that for SHS only. Thermal efficiencies for the SHS heating process + 400°C FIH were about 2-4 times larger than those for SHS only, depending on the superheated steam temperature. When a low temperature (about 120°C) with a small amount of steam was combined with high temperature FIH (about 400°C), a highly enhanced effect on both heat transfer rate and thermal efficiency was obtained. Furthermore, the SHS + FIH process greatly reduced the heating up time of the apparatus and the heat flow to maintain a constant temperature in the heating chamber.

Keywords: Super heated steam, Far infrared heating, Heat transfer rate, Thermal efficiency

1. 緒 言

過熱水蒸気処理は、低酸素または無酸素下での加熱が可能であり、処理物に高温水が凝縮するため昇温速度が速く処理物の表面硬化が少ないなど食品の加熱に好適な処理特性を有する。さらに、過熱水蒸気中では放射加熱があるため、加熱空気処理にはない伝熱促進効果も期待できる。食品工業ではすでに粉粒体の殺菌や乾燥、パンや魚肉、畜肉の焼成、コーヒー豆の焙煎などに利用が試みられており [1]、近年の消費者の健康志向や環境問題への関心の高まりから、過熱水蒸気処理の特性を生かした高品質処理や水蒸気を利用した環境に優しい処理への関心も高まっている。

過熱水蒸気についての研究は、1950年代に Chu ら [2] が過熱水蒸気乾燥と空気乾燥の乾燥速度の比較検討を行い、1965年には、吉田、兵働らにより過熱水蒸気乾燥が空気乾燥より速くなる逆転点の存在が報告された [3]。その後、柴田らは、焼結ガラスビーズを用いて、過熱水蒸気による乾燥は空気乾燥より恒率乾燥期間が長く続き、乾燥速度論的に優れていることを示した [4]。食品を用いた研究では、ジャガイモスライスの乾燥 [5] や米粉の流動層乾燥 [6] などがあり、過熱水蒸気処理の乾燥特性と乾燥後の材料の品質評価も行われている。以上のように、過熱水蒸気は加熱空気と比較して乾燥速度が速く、処理後の材料の品質が良好であることも評価されている。しかし、過熱水蒸気処理には大量の蒸気の生成とそれに伴う熱量が必要である一方で、用いた蒸気の大部分を排蒸気として排気しているため熱効率が極めて低い。したがって、過熱水蒸気処理の実用化には、熱効率を改善するための省エネルギー

(受付 2006 年 5 月 22 日, 受理 2006 年 9 月 11 日)

〒739-8528 広島県東広島市鏡山 1-4-4

Fax: 082-424-7937, E-mail: suzukan@hiroshima-u.ac.jp

技術の開発, すなわち, 可能な限り供給蒸気量を少なくしながら伝熱速度を高める技術の開発が必要である。

過熱水蒸気生成に要する蒸気の供給を少なくする方法として, 加熱処理に用いた排蒸気を循環させて使用する方法や, 加熱材料から蒸発する蒸気を加熱する方法が検討されている [7]。しかし, 過熱水蒸気は低温部分に接触すると容易に凝縮して水になるため, これらの方法では連続型処理が難しいこと, 食品への利用では装置内に臭気物質が滞留するなどの問題点がある。そこで著者らは, 供給蒸気量を減らし, 伝熱速度を高める方法として, 既存の過熱水蒸気処理装置に遠赤外線発生装置を組み合わせた新処理装置を考案した [8]。既存の実用装置では, 加熱処理庫内を所定の温度まで立ち上げるために長時間を要し, 加熱処理庫内が所定の温度まで上昇した後の温度保持や加熱材料への伝熱速度を高めるために多量の過熱水蒸気の供給が必要であった。これに対して, 著者らが考案した方法では, 過熱水蒸気の投入量を必要最小限にして, 主な伝熱は伝熱効率のよい遠赤外線加熱に頼るため, 蒸気の供給を少なくして伝熱速度を高めることが可能である。過熱水蒸気のもつ放射伝熱の効果によって, 過熱水蒸気中での伝熱速度が加熱空気中での伝熱速度より高くなるのは, 約 180°C 付近に存在する逆転点温度以上であると報告されているが [9], 著者らが提案する方法では, 過熱水蒸気の温度を逆転点まで上昇させなくても, 任意の過熱水蒸気温度で遠赤外線加熱による放射伝熱を付加することが可能である。また, 遠赤外線加熱装置は, 加熱処理庫内に設置しているため熱効率も高い。遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では, 過熱水蒸気単独処理の場合と比較して装置の立ち上げや加熱処理時間の短縮, 温度制御性の向上, 調理・焙煎等における加熱の均一性の向上などが期待できる。また, 本研究を実施するにあたり, 遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理が材料性状に与える効果を確認するため, 実際の食品を用いて焼成や焙煎の予備試験を行ったところ, 加熱処理物の外観や香りは過熱水蒸気単独処理の特徴をよく保持したまま, 表面の焼き上がりがより均一でむらのない加熱が可能である結果を得た。そこで本研究では, 実用機を想定した小型の過熱水蒸気処理装置を試作し, 過熱水蒸気単独処理の場合と過熱水蒸気に遠赤外線加熱を併用した場合の伝熱速度を比較することにより, 遠赤外線加熱併用による伝熱促進効果および熱効率を検討することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 装置

試作した実験装置を Fig. 1 に示す。蒸気発生には, 市販のボイラ (三浦工業社製, 型式 RV-60XE, 最高蒸

発速度 60 kg/h) を用い, ボイラから発生させた蒸気は IH (電磁誘導加熱) により 100°C 以上に加熱される。加熱処理庫内の拡大図を Fig. 1 に示しているが, 過熱水蒸気は加熱処理庫内の上部と下部に設置したノズルから加熱処理庫内に供給される仕組みになっている。加熱処理庫内の上面および下面に遠赤外線を照射する遠赤外線ヒータ (日本ヒーター製, クリーンヒーター IPR-20. 8-22, 容量 1.2 kW, 200 mm×200 mm) を取り付けた (以後, セラミックヒータと呼ぶ)。装置はバッチ式で, 試料を出し入れする蓋の開閉, 加熱処理時間, IH の温度 (0~300°C), 蒸気量 (7~60 kg/h), セラミックヒータに投入する電力量 (0~1.2 kW, 2 基) はコントロールボックスで設定, 制御, 操作が可能である。過熱水蒸気の温度は, IH の温度設定により決定し, 過熱水蒸気の加熱処理庫入口付近温度の蒸気温度とした。加熱処理庫のサイズは縦 0.405 m×横 0.415 m×高さ 0.19 m で (但し, 高さはメッシュベルトコンベアより上部の距離), 試料は, 蓋の自動開閉によりメッシュベルトコンベアに乗せた処理物が自動的に供給, 排出されるように構成されている。加熱処理庫内に供給する蒸気量は, 蒸気を流す管にアクチュエータ付のバルブの開口度で調節するが, このバルブの開口度は, コントロールボックスに設置した開口度目盛 (0~100) で制御した。加熱処理庫内の温度は, コンベアをはさんで上下のノズルの間の気体温度 3 箇所 (コンベア上部 60 mm, コンベア下部 30 mm, コンベア下部 60 mm) を K 型熱電対 (シーズ外形 1 mm) で測定し, その平均値とした。セラミックヒータ (上面, 下面) の表面温度は, ヒータ表面に K 型熱電対 (シーズ外形 1 mm) を接触させて固定して測定した。

2.2 伝熱速度測定

伝熱速度は, 十分に水に濡れた試料を所定の条件で乾燥し, 水蒸気凝縮期間以後の恒率乾燥速度から算出した。試料には, セルロース製のスポンジ状材料 (エフケイ株式会社, TF-KES-6, サイズ長径 114 mm×短径 95 mm×高さ 12 mm) をスポンジとほぼ同じ大きさのステンレス容器に入れ充分水に濡らしたものを用了。処理条件は, 過熱水蒸気温度は 120, 150, 200°C の 3 種類, セラミックヒータ温度は 250, 300, 350, 400°C, 蒸気開口度目盛は 25, 30 とした。蒸気量は開口度 25 の場合が 7.7 kg/h, 開口度が 30 の場合が 8.5 kg/h であった。この蒸気量は, 本法の特徴を活かすためにできるだけ少ない蒸気量で, かつ, 加熱処理庫内が過熱水蒸気で正圧になる条件として設定した。試料を所定の加熱温度に設定した加熱処理庫内に投入後, 一定時間ごとに加熱処理庫内から取り出し重量を測定した。過熱水蒸気温度, セラミックヒータの表面温度, 蒸気量の条件を変えて測定を行い, それぞれの条件での乾燥速

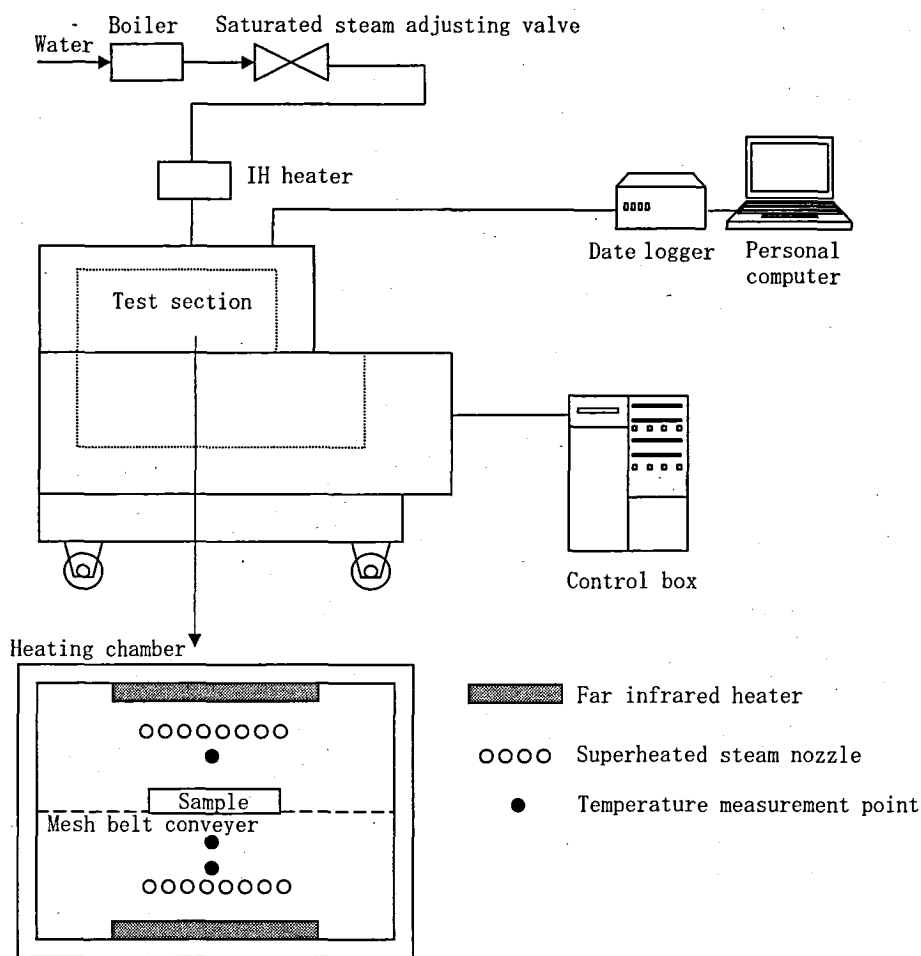


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus.

度を算出した。伝熱速度 H [kW] は以下の式で求めた。

$$H = R \cdot \lambda \cdot A \quad (1)$$

ここで、 R [kg/(m²·s)] は算出した試料単位面積あたりの乾燥速度、 λ [kJ/kg] は蒸発潜熱、 A は加熱処理庫床面積（本装置では、 $A=0.168$ m²）とした。試料はほぼ同形の容器に入っているため、水分蒸発は主に試料上面と側面から行われると考えられるが、Fig. 1 に示す装置構造では、試料は上面、下面および側面から加熱されるため、試料単位面積あたりの乾燥速度 R を求める際の面積は、試料全体の表面積とした。したがって、式(1)で求められる H は、本実験装置での伝熱速度を比較するための数値として用いている。

2.3 熱流（投入エネルギー速度）の算出

ボイラ入口水温 T_0 [°C] の水 M [kg] を時間 t [s] で蒸発し、温度 T [K] の過熱水蒸気を生成するために必要な理論的热量 Q [kJ] を以下のように算出した。

$$Q = M \cdot C_{pm} \cdot (373 - T_0) + M \cdot \lambda + M \cdot C_{pv} \cdot (T - 373) \quad (2)$$

ここで、 C_{pm} [kJ/(kg·K)] は水の比熱、 λ は水の蒸発潜熱 [kJ/kg]、蒸気の比熱 C_{pv} [kJ/(kg·K)]、である。

したがって、理論的热量 W [kW] は、次式で求められる。

$$W = Q/t \quad (3)$$

熱効率の算出は以下のように行った。

$$\text{熱効率 } \eta [\%] = H/W \times 100 \quad (4)$$

式(4)で求めた熱効率は、理論的热量に対する伝熱速度の比から求めた値であり、装置を所定の温度に立ち上げるための熱量や装置の熱損失などは考慮されていない。

3. 結果と考察

3.1 加熱処理庫内温度の測定

過熱水蒸気単独処理の場合と過熱水蒸気に遠赤外線を併用した場合で加熱処理庫内温度の立ち上がり状態を測定した結果の一例（蒸気開口度目盛 25 で加熱処理庫内温度を 160°C に設定した場合）を Fig. 2 に示す。過熱水蒸気単独処理の場合は、加熱処理庫内に過熱水蒸気を投入した直後は冷えている装置に熱が奪われ温度の上昇がみられないが、その後 100°C 付近まで一気に上昇するものの、凝縮水を蒸発させるために 100°C 付近で温度上昇は停滞し、その後緩やかに上昇している。一方、遠赤外線加熱を併用した場合は、装置立ち上げ直後か

ら温度が上昇し、過熱水蒸気単独処理の場合と比較して装置加熱や水の凝縮による温度の停滞時間は非常に短く、立ち上げ時間が短縮できた。このことは、過熱水蒸気と比較して遠赤外線加熱の伝熱速度が極めて高いため、装置加熱と加熱処理庫の内部に凝縮した水の蒸発が急速に行われたためと考えられた。

Fig. 2 より、過熱水蒸気単独処理の場合は 160°C に達するまで約 45 分要するのに対し、遠赤外線加熱を併用した場合は十数分で同温度に加熱することが可能で

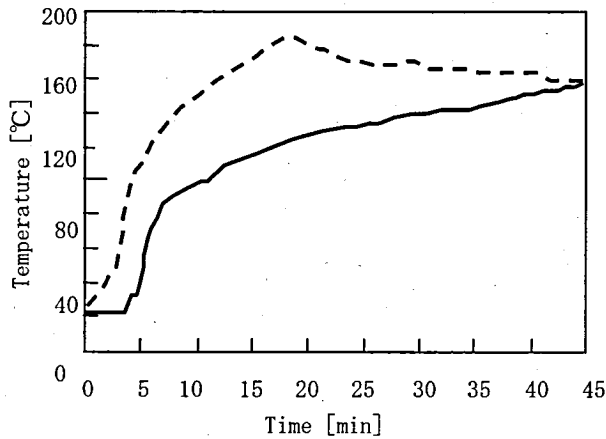


Fig. 2 Comparison of temperature change in the heating chamber by superheated steam alone with that by superheated steam + far infrared heater (setting temperature: 160°C). Solid line; by superheated steam treatment alone: IH temperature : 190°C, Far infrared heater : off. Broken line; by superheated steam + far infrared heater: IH temperature : 180°C (18 min) → 120°C, Energy flow in far infrared heater : 1.2 kW (18 min) → 0.3 kW, Far infrared heater temperature : 300°C (1.2 kW) → 225°C (0.3 kW). Flow rate of superheated steam : 7.7 kg/h.

あった。このとき、過熱水蒸気単独処理の場合、装置には 190°C の過熱水蒸気を投入したが 190°C の過熱水蒸気を作るのに必要な熱流は約 5.9 kW であった。遠赤外線加熱を併用した場合は、装置には 180°C の過熱水蒸気とセラミックヒータへ約 1.2 kW の電力を投入した。180°C の過熱水蒸気を生成するために必要な熱流は 190°C のときよりは若干低いもののほぼ同程度であった。装置立ち上げ時に投入する電力は遠赤外線加熱を併用した場合の方がセラミックヒータへの投入分だけ大きい。温度の立ち上げ時間は過熱水蒸気単独処理の場合の約 1/4 に短縮できた。加えて、遠赤外線加熱を併用した場合は、加熱処理庫内が所定の 160°C に達した以後は、温度保持のためにセラミックヒータに投入する電力は 0.3 kW に低下させることが可能であり、過熱水蒸気の温度も 180°C から 120°C に落とすことができたことから、装置の立ち上げ以後の加熱処理庫内の温度維持に必要な熱流は初期投入熱流より少なくすることが可能であることがわかった。また、過熱水蒸気単独処理の場合は加熱扉の開閉により過熱水蒸気が空气中に排出して温度低下が大きかったのに対し、遠赤外線加熱を併用した場合は温度の低下が小さく、装置の操作性も改善された。さらに、遠赤外線加熱を併用した場合は、加熱処理庫内の温度の変更に要する時間も過熱水蒸気単独処理の場合と比較して短縮することが可能であった。

3.2 伝熱促進効果

Fig. 3 に蒸気量別に乾燥速度の測定結果を示す。過熱水蒸気の温度を高くするほど、また併用するセラミックヒータの温度を高くするほど乾燥速度は大きくなっ

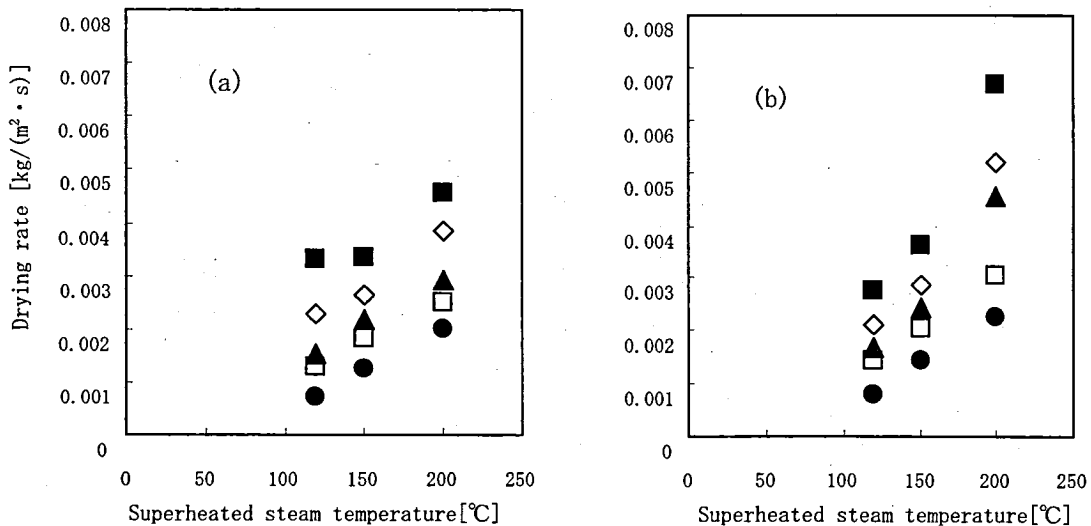


Fig. 3 Relationship between drying rate and superheated steam temperature, ● : SHS alone, □ : SHS+FIH250, ▲ : SHS+FIH300, ◇ : SHS+FIH350, ■ : SHS+FIH400, (a) 7.7 kg/h, (b) 8.5 kg/h.

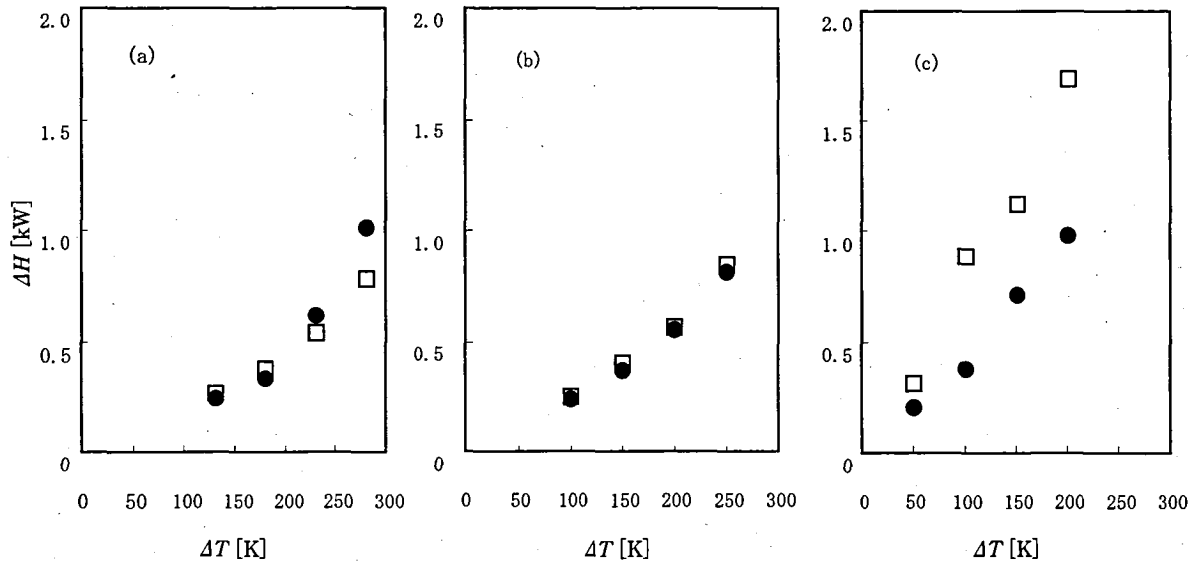


Fig. 4 Relationship between the temperature difference between far infrared heaters and superheated steam, ΔT , and the increase in heat transfer rate by combining far infrared heating with superheated steam, ΔH .

Superheated steam temperature, (a) 120°C, (b) 150°C, (c) 200°C. Flow rate of superheated steam, ●: 7.7 kg/h, □: 8.5 kg/h.

た. Fig. 4 に過熱水蒸気の温度別にセラミックヒータの温度と過熱水蒸気の温度との差 ΔT とセラミックヒータを付加することにより増加した伝熱速度の増加量 ΔH の関係を示す. 図より, 過熱水蒸気の温度に対してセラミックヒータの温度を高くするほど ΔH は大きくなることが示された. セラミックヒータによる放射伝熱量 Q_{CH} は, セラミックヒータの温度 T_{CH} と被加熱物の温度 T_m の 4 乗の差 ($T_{CH}^4 - T_m^4$) に比例する. そのため, セラミックヒータの温度を高くするほど放射伝熱量は急速に増加するといえ, 実験結果からもセラミックヒータの放射伝熱による伝熱促進効果が確認できた.

過熱水蒸気の温度が 120°C と 150°C の場合, 蒸気量を変化させても ΔH はほぼ同じであったが, 200°C で蒸気量が多い (8.5 kg/h) 場合は ΔH が大きくなった. これは, 蒸気量の増加に伴い過熱水蒸気による対流伝熱速度の増加に加えて放射伝熱の速度が増加したためと考えられる. 過熱水蒸気による放射伝熱効果は, 蒸気濃度と温度が高くなるほど高くなるため, 蒸気量が多い 200°C の過熱水蒸気処理では, 放射伝熱の影響が大きくなったと考えられる. また, 雨坪ら [10] によると, 過熱水蒸気に遠赤外線を付加した場合, 加熱処理庫に投入される過熱水蒸気による対流伝熱, セラミックヒータによる放射伝熱, 加熱処理庫壁からの放射伝熱に加え, セラミックヒータ付近に滞留してセラミックヒータにより加熱された過熱水蒸気からの放射伝熱を考慮すると測定値と良好に一致したと示されている. このことから, 200°C で蒸気が多い場合には, 加熱処理庫内の温度が良好に保たれ, セラミックヒータ付近の過熱水蒸気が 200°C 以上に加熱された結果, さらに放射伝熱が付加された可能性も考えられる. 過熱水蒸気処理に

遠赤外線加熱を併用する目的は, 過熱水蒸気の供給量を少なくして加熱処理に要する熱量を少なくすることである. よって, エネルギー収支の観点からいえば, 過熱水蒸気処理の特徴を活かしつつ最小限の過熱水蒸気量で高い伝熱促進効果が得られる遠赤外線加熱の条件を設定する必要がある.

3.3 エネルギー収支

Fig. 5 に過熱水蒸気単独処理の場合の過熱水蒸気生成熱流と伝熱速度の関係を示す. プロットは伝熱速度が

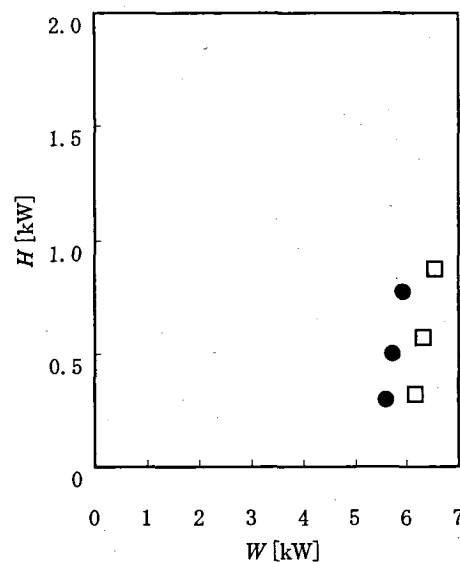


Fig. 5 Relationship between the heat transfer rate, H , and the theoretical energy necessary to generate superheated steam, W . Flow rate of superheated steam, ●: 7.7 kg/h, □: 8.5 kg/h.

小さい順に過熱水蒸気 120, 150, 200°C の場合の伝熱速度を示している。過熱水蒸気生成熱流が 5.5~6.5 kW で伝熱速度は約 0.2~0.8 kW であった。Fig. 6 は過熱水蒸気に遠赤外線加熱を付加し、それぞれ過熱水蒸気 120, 150, 200°C と組み合わせた場合の測定結果である。横軸と縦軸はそれぞれセラミックヒータに投入した熱流と遠赤外線加熱を付加した場合の伝熱速度の増加量である。プロットは伝熱速度が小さい順にセラミックヒータ 250, 300, 350, 400°C の場合の伝熱速度の増加量を示している。過熱水蒸気と遠赤外線加熱とを組み合わせた場合、伝熱速度 0.2~0.8 kW 得るためにセラミックヒータに付加した熱流はわずかに 0.5~1.2 kW であった。これは過熱水蒸気生成熱流の約 1/5 程度であり、セラミックヒータにはわずかなエネルギーを付加することで、過熱水蒸気単独処理の場合と比較して同程度かそれ以上の伝熱速度の増加分が得られたといえる (Figs. 5, 6)。

過熱水蒸気単独処理の場合、伝熱速度を高くするには蒸気量を増やして対流伝熱速度を高める必要がある。しかし、Fig. 5 より蒸気量を 0.8 kg/h 多くしても伝熱速度の増加は小さく 0.1 kW 以下であった。120~200°C の過熱水蒸気を生成する場合、過熱水蒸気生成熱流は、蒸気量が 0.8 kg/h 多いと約 0.6~1.0 kW 増加する。また、過熱水蒸気の温度が 120, 150°C の場合では、蒸気量の違いによる伝熱速度の差は非常に小さかった。これに対して、過熱水蒸気に遠赤外線加熱を併用した場合は、セラミックヒータに 0.6~1 kW の熱流を投入すると伝熱速度は約 0.2~1 kW 増加した。このことより、遠赤外線加熱を併用した場合は、過熱水蒸気単独処理の場合と同程度の熱流でも、伝熱速度を数倍に高めることが可能であるといえる。

式(2)で示した過熱水蒸気生成熱流 Q は、水温 T_0 の水から T の過熱水蒸気を生成するために必要な理論的な値である。著者が用いた実験装置でいえば、式(2)の右辺の第1項と第2項は T_0 から 373 K の蒸気に加熱するためにボイラにおいて必要な熱流で、第3項は任意の過熱水蒸気温度まで加熱するために IH ヒータにおいて必要な熱流である。しかし、実際にはボイラや IH ヒータでは熱損失があり、過熱水蒸気の生成には理論値以上の熱量が必要である。一方、セラミックヒータに投入した熱流は測定値であり、実際に投入したエネルギーを示した。このため、実際に同じ伝熱速度を得るために必要な過熱水蒸気生成熱流は、過熱水蒸気単独処理では遠赤外線併用の場合と比較して5倍以上であると考えられた。

3.4 熱効率

式(4)より算出した熱効率を Table 1 にまとめて示す。セラミックヒータは加熱処理庫内部に設置してあるため、過熱水蒸気単独処理の場合は、セラミックヒータの温度は加熱処理庫内温度、すなわち、過熱水蒸気と同じ温度とした。その結果、過熱水蒸気に 400°C の遠赤外線加熱を併用した場合、過熱水蒸気単独処理の場合と比較して熱効率は 2~4 倍高くなることが示された。実際の過熱水蒸気生成熱流は理論値より大きくなるため、過熱水蒸気単独処理の場合は Table 1 の値より低くなり、また、Table 1 の値は装置の立ち上げ待機時間や加熱処理時間などは考慮されていないので、実際の熱効率の差は 2~4 倍以上に大きくなると考えられる。Table 1 より、過熱水蒸気の温度が 120, 150, 200°C と高くなるにつれて熱効率が向上している。これは、過

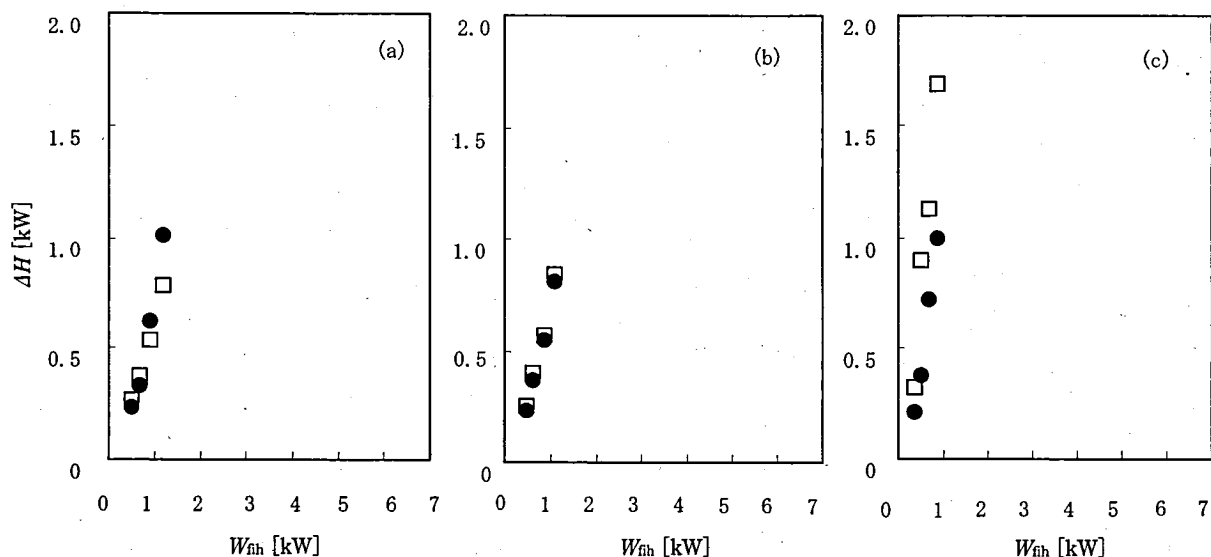


Fig. 6 Relationship between the increase in heat transfer rate, ΔH , and energy flow in far infrared heater, W_{fih} .

Superheated steam temperature, (a) 120°C, (b) 150°C, (c) 200°C. Flow rate of superheated steam, ●: 7.7 kg/h, □: 8.5 kg/h.

Table 1 Thermal efficiency for superheated steam treatment and the combined treatment of superheated steam with far infrared heating.

	Far infrared heater temperature [°C]	Thermal efficiency [%]	Thermal efficiency [%]
Flow rate of superheated steam [kg/h]		7.7	8.5
Superheated steam temperature 120°C	120*	4.8	4.7
	250	8.0	8.1
	300	9.3	9.4
	350	13.3	11.4
	400	18.6	14.3
Superheated steam temperature 150°C	150*	8.2	8.7
	250	11.1	11.5
	300	12.9	13.4
	350	15.1	15.2
	400	18.6	18.6
Superheated steam temperature 200°C	200*	12.6	13.0
	250	14.8	16.6
	300	17.2	24.4
	350	21.9	27.1
	400	25.3	34.0

* : Superheated steam alone. The far infrared heater temperature was postulated as equal to the superheated steam temperature because the heater was installed in the heating chamber.

熱水蒸気生成熱流に理論値を用いているためであり、蒸気量が同じ場合、式(2)の右辺の第1項と第2項は生成する過熱水蒸気の温度にかかわらず同じだけ必要である。そのため、120、150、200°Cの過熱水蒸気生成熱流の差は第3項の値の差である。120、150、200°Cの過熱水蒸気生成熱流のうち第3項が占める割合はそれぞれ1.5、3.7、7.2%であった。過熱水蒸気の温度が高くなるほど第3項の値は大きくなるが、計算では全体の数パーセントの熱流でしか考慮されていない。これに対して、過熱水蒸気の温度が高くなるほど伝熱速度は増加しており、過熱水蒸気温度が150°Cの場合は120°Cの場合の2.1倍、過熱水蒸気温度が200°Cの場合は120°Cの場合の2.5倍に増加した。実際は、過熱水蒸気の温度が高くなるほど蒸気を加熱する加熱装置からの熱損失は大きくなるので、過熱水蒸気生成熱流は増加して熱効率とは低くなるのが予想される。このことより、過熱水蒸気の温度の差による熱効率の差はTable 1の値より小さくなるといえる。

4. 結 論

過熱水蒸気処理に遠赤外線加熱を併用した場合、セラミックヒータに加える電力は、過熱水蒸気単独処理の場合の過熱水蒸気生成熱流の約1/5で過熱水蒸気単独処理の場合と同程度以上の伝熱速度が得られ、400°Cの遠赤外線加熱を併用した場合、熱効率は約2~4倍に向上した。本研究で比較に用いた過熱水蒸気生成熱流は理論値であり、実際の熱効率は2~4倍以上になることが推察され、遠赤外線加熱の併用による伝熱促進効果が明らかとなった。遠赤外線加熱による伝熱速度の

促進効果は、エネルギー収支の観点からいうと、セラミックヒータの温度を高くするほど急速に高くなり、低い温度の過熱水蒸気と高い温度の遠赤外線加熱を併用することで、少ない熱流で高い伝熱速度が得られることを示した。過熱水蒸気と遠赤外線加熱とを組み合わせた場合、過熱水蒸気の温度が低温(120~150°C)の温度帯では、過熱水蒸気の温度を低くして蒸気量を少なくしても伝熱速度の差はみられず、遠赤外線加熱による伝熱促進効果が高いことが確認できた。過熱水蒸気の温度が高い温度帯(200°C)では、伝熱速度は低い温度帯と比較して高くなったが、実際の過熱水蒸気生成装置では、過熱水蒸気の温度を高くするほど装置からの熱損失が大きくなるので熱的には効率的ではないと考えられる。また、過熱水蒸気生成装置を食品に用いる場合、焦げなど食品表面の変化を嫌う場合が多いため、高温での加熱処理を必要とする場合は少ない。過熱水蒸気に遠赤外線加熱を併用した場合では、加熱処理に必要な伝熱速度を必要な量だけ容易に制御することが可能で、また遠赤外線加熱は材料の表面の均一加熱や適度な焦げ目をつけることにも適している。さらに、過熱水蒸気と遠赤外線を併用した場合は、過熱水蒸気単独処理の場合と比較して、加熱処理庫内の温度上昇に要する待機時間の短縮、加熱処理庫内の温度維持効果、加熱処理庫扉の開閉に伴う排出蒸気の減少など、伝熱促進効果に加えて操作性も向上した。

引用文献

- [1] 保坂秀明; 常圧過熱水蒸気の食品への利用, 食品工業, **42**(16), 46-55 (1999).
- [2] J. C. Chu, S. Finelt, W. Hoerrner, M. Lin; Drying with Superheated Steam-Air Mixtures, *Ind. Eng. Chem.*, **51**, 275-280 (1959).
- [3] T. Yoshida, T. Hyodo; Evaporation of water in air, humid air, and superheated steam, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **9**, 207-214 (1970).
- [4] H. Shibata, J. Mada, H. Shinohara; Drying mechanism of sintered spheres of glass beads in superheated steam, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 2353-2362 (1988).
- [5] H. Iyota, N. Nishimura, T. Onuma; Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air, *Drying Technol.*, **19**, 1411-1424 (2001).
- [6] C. Taechapiroj, I. Dhuchakallaya, S. Soponronarit, S. Wetchacama, S. Prachayawarakorn; Superheated steam fluidized bed paddy drying, *J. Food Eng.*, **58**, 67-73 (2003).
- [7] 柴田正人, 杉村康浩, 中村正秋, 坂東芳行: 特許 (特願 2002-82782), 過熱水蒸気を用いた多重効用的乾燥方法. (2002).
- [8] 吉田哲夫, 伊佐亜希子, 鈴木寛一: 特許 (特願 2003-51984), 有機物の加熱処理方法. (2003).
- [9] H. Iyota, N. Nishimura, T. Nomura; Characteristics of combined heat transfer of superheated steam drying: Numerical study of coupled convection and gas radiation heat transfer, *Heat Transfer Asian Research*, **29**, 385-399 (2000).
- [10] T. Amatsubo, Y. Hagura, K. Suzuki; Heat transfer characteristics of superheated steam combined with far infrared heating, *Food Sci. Technol. Res.*, **11**, 363-368 (2006).

和文要旨

遠赤外線加熱を付加した小型の過熱水蒸気処理試験装置を試作し、過熱水蒸気に遠赤外線加熱を併用した場合の伝熱促進効果および熱効率を過熱水蒸気単独処理の場合と比較した。3種類の過熱水蒸気温度 120, 150, 200°C に遠赤外線ヒータ 250, 300, 350, 400°C を組み合わせて加熱処理し、水で十分に濡れた試料を用いた恒率乾燥速度から伝熱速度を求めた。

過熱水蒸気処理に遠赤外線を付加した場合、遠赤外線ヒータに加える熱流が過熱水蒸気生成熱流の 1/5 程度で伝熱速度は過熱水蒸気単独処理の 2 倍以上となった。過熱水蒸気の温度によっては、400°C の遠赤外線加熱を併用した場合の熱効率は、過熱水蒸気単独処理の約 2~4 倍以上になった。蒸気量の少ない低温 (120°C 程度) の過熱水蒸気に高温の遠赤外線加熱 (400°C 程度) を併用すれば、少ない熱流で遠赤外線加熱の付加による高い伝熱促進効果が得られ熱効率も向上した。さらに、遠赤外線加熱を併用した過熱水蒸気処理では、装置立ち上げ時間の大幅な短縮や低熱流での加熱処理庫内温度の維持が可能であった。