

[Short Note]

含水多孔質を用いた過熱水蒸気の急速生成

森 昌司[†] 奥山 邦人[†]Rapid Generation of Superheated Steam
Using a Water-containing Porous MaterialShoji MORI[†] and Kunito OKUYAMA[†]

Abstract

Heat treatment by superheated steam has been utilized in several industrial fields including sterilization, desiccation, and cooking. In particular, cooking by superheated steam is receiving increased attention because it has advantages of reducing the salt and fat contents in foods as well as suppressing the oxidation of vitamin C and fat. In this application, quick startup and cut-off responses are required. Most electrically energized steam generators require a relatively long time to generate superheated steam due to the large heat capacities of the water in container and of the heater. Zhao and Liao (2002) introduced a novel process for rapid vaporization of subcooled liquid, in which a low-thermal-conductivity porous wick containing water is heated by a downward-facing grooved heating block in contact with the upper surface of the wick structure. They showed that saturated steam is generated within approximately 30 seconds from room-temperature water at a heat flux 41.2 kW/m². In order to quickly generate superheated steam of approximately 300°C, which is required for cooking, the heat capacity of the heater should be as small as possible and the imposed heat flux should be so high enough that the porous wick is able to dry out in the vicinity of the contact with the heater and that the resulting heater temperature becomes much higher than the saturation temperature.

The present paper proposes a simple structured generator to quickly produce superheated steam. Only a fine wire heater is contacted spirally on the inside wall in a hollow porous material. The start-up, cut-off responses and the rate of energy conversion for input power are investigated experimentally. Superheated steam of 300°C is produced in approximately 19 seconds from room-temperature water for an input power of 300 W. The maximum rate of energy conversion in the steady state is approximately 0.9.

Key Words: Steam generator, Superheated steam, Rapid vaporization, Porous wick

記号

c_{pl}	: $(T_{sat} + T_{in})/2$ における水の定圧比熱	[J/(kg · K)]	T_v	: 多孔質中空部出口より 30mm 下流における温度	[K]
c_{pv}	: $(T_{sat} + T_v)/2$ における水蒸気の定圧比熱	[J/(kg · K)]	V	: 電圧	[V]
h_{fg}	: 蒸発潜熱	[J/kg]	1 緒言		
I	: 電流	[A]	最近の健康に対する関心の高まりから、脱油、減塩、ビタミン C の破壊抑制、油脂の酸化抑制効果のある過熱水蒸気が注目され、それを用いた調理器が開発されている[1,2]。現状の電気加熱による過熱水蒸気生成法には、投込式ヒータによる加熱、高周波誘導加熱、マイクロ波加熱などがある。しかしなが		
\dot{m}	: 蒸気の質量流量	[kg/s]			
T_{in}	: 多孔質体下面部の温度	[K]			
T_{out}	: 凝縮器出口の温度	[K]			
T_{sat}	: 飽和温度	[K]			

受付日: 2006年11月9日, 担当エディター: 門出 政則

[†] 横浜国立大学大学院 工学研究院 機能の創生部門 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

ら、これらの方法では、家庭用調理器として要求される過熱水蒸気の迅速な生成、停止は、水槽中の水およびヒータの大きな熱容量のため困難である。加えて、水を供給するためにポンプが必要な点や高周波誘導加熱やマイクロ波加熱を用いる場合には製品コストが高くなるという問題もある。

ところで、含水多孔質体に高温物体を近づけるとその表面で急激な蒸発が起き、多孔質体表面の水が蒸発によりなくなれば、毛管力により液体が蒸発面へ自動的に供給され、その表面の液は枯れにくいことはよく知られている。この原理を応用した宇宙用熱制御素子として Capillary Pumped Loop (CPL) および Loop Heat Pipe (LHP) がある。これらは、通常のヒートパイプと違い、ウィックを受熱器にのみ、設置すればよいので、細孔径の小さいウィックを設置でき、結果として熱輸送量が大きいという特長を有する。Zhao and Liao[3]は、この CPL の蒸発器の構造に着目し、蒸気を迅速に生成させることを目的として、蒸気の排出流路となる溝を持つ加熱ブロックを含水多孔質に押しつけ、ブロック背面から電気ヒータで加熱することにより常温の水から約 30 秒で飽和水蒸気を生成できることを示した。しかしながら、この加熱体の熱容量は大きいので、蒸気発生に要する時間が長く、また与えられる熱流束は最大でも 42 kW/m² と小さいので十分高温の過熱水蒸気を得ることは困難と考えられる。加えて、実用化する場合に重要な定常状態におけるエネルギー変換効率（加熱量に対する流体のエンタルピー増加の割合）については触れていない。

以上を踏まえ、著者らは含水多孔質に接触するヒータの熱容量を極力小さくし、小電力で高熱流束が得られるようにヒータおよび設置構造を改良することで、常温の水から短時間で過熱水蒸気を発生させる手法を考案した[4]。本報では、本装置の起動、停止性能、およびエネルギー変換効率について得られた結果について報告する。

2 実験装置

図 1 に示すように、幅 50 mm、高さ 50 mm、長さ 120 mm の市販の耐熱断熱レンガ（型式 B5、イソラ

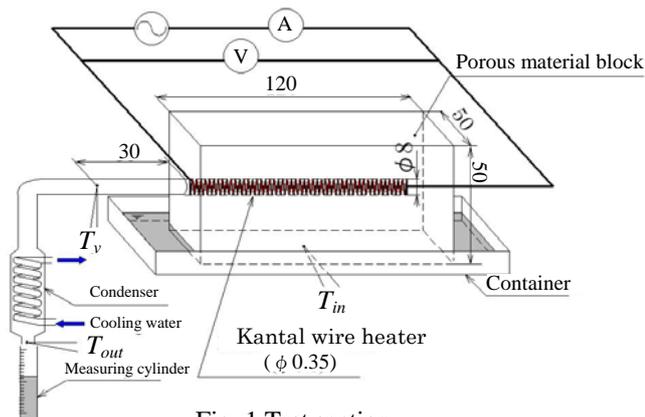


Fig. 1 Test section.

イト社製、主成分：SiO₂ 55 %、Al₂O₃ 41 %、有効熱伝導率：0.33 W/(m・K) の 50 mm×50 mm 面の中心に直径 8 mm の中空部を設け、直径 0.35 mm、長さ 1.1 m のカンタル線をらせん状に、なるべく内壁面上に密着するように設置後（ピッチ間隔：約 2.5 mm、巻数：約 40 巻）、片端をシリコンゴム栓により閉じた。その多孔質体の下面を水槽中の水深約 3 mm の蒸留水に浸し含水させ、カンタル線に交流電流を印加することで加熱した。

図 2 は、本実験で用いた多孔質体の累積細孔容積分布（左縦軸）、対数微分細孔容積分布（右縦軸）をそれぞれ示し、これらは水銀圧入法（表面張力：484.0 mN/m、接触角：130.0 度）により得られたものである（平均細孔径：9 μm、モード径：90.6 μm、空隙率：62.3 %）。ここで、累積細孔容積分布とは、細孔径の大きい細孔容積から積算した値で、対数微分細孔容積分布とは、差分細孔容積 dV を細孔径の対数差分値 $d(\log D)$ で除した値のことである。本実験で用いた多孔質体の細孔分布のばらつきは、図に示すように大きい。今後細孔径の比較的均一な多孔質体を用いて、その影響について詳細に検討する予定である。またヒータからの放射の影響が小さいことを確認の上、多孔質中空部出口より下流に 30 mm の位置に素線径 0.08 mm（時定数：0.2 s）の K 型熱電対を設置し、多孔質体の下面および凝縮器出口部に直径 1 mm の K 型シース熱電対を設置した。凝縮器出口温度 T_{out} が飽和温度以下であることを確認し、20 分間の凝縮水量をメスシリンダで計測し、これより質量流量 \dot{m} を算定した。

起動・停止特性の実験を行う場合には、多孔質体および水槽中の水温が、室温（約 25 °C）になっていることを確認の上、行った。また、エネルギー変換効率 η は、以下の式(1)で定義した。 η を得る実験の場合には、加熱開始後十分定常状態になった後、計測し、式(1)~(3)を用いて算定した。

$$\eta = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

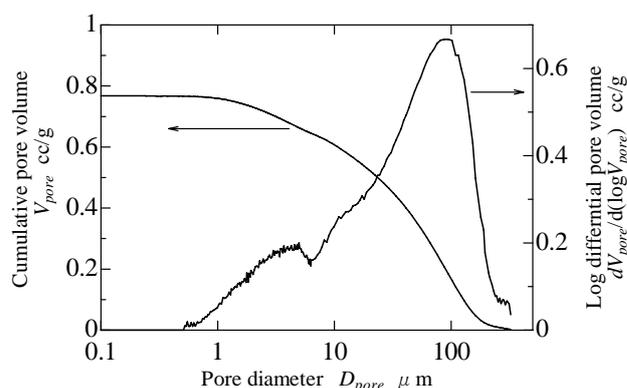


Fig. 2 Pore diameter distribution of test porous material.

$$Q = \dot{m}c_{pl}(T_{sat} - T_{in}) + \dot{m}h_{fg} + \dot{m}c_{pv}(T_v - T_{sat}) \quad (2)$$

$$P = I \cdot V \quad (3)$$

3 実験結果および考察

図3は、100 W、200 W および 300 W でステップ状にヒータを通電加熱した場合における、 T_v の時間変化を示す。図中の”OFF”は、加熱を停止した時刻である。この図より加熱量が大きいほど温度が短時間で急上昇し（例えば 300 W の場合、100 °Cまで約 5 秒、300 °Cまで約 19 秒）、加熱停止と同時に温度が急降下しており加熱の ON, OFF に対する応答性に優れていること、さらにこの時の温度変化は 100 °Cに急上昇後、その温度を一時保持し、蒸気はその後、急速に過熱されていること、加熱量を 100 W と小さくすれば、飽和蒸気を継続的に生成できることなどがわかる。また加熱停止後、温度が室温まで下がっていないのは、過熱水蒸気により配管が加熱された影響を受けているためである。加熱開始後、蒸気が発生しても、温度測定部までの配管壁面上で、最初は凝縮が起こるので、測温部に蒸気が到達するまでには時間遅れがあり、実際の蒸気発生に要する時間は本実験結果より短い。なお過熱水蒸気の定常状態における温度は加熱量が大きくなるほど高くなった。

このように常温の含水多孔質体から加熱開始後、短時間で過熱水蒸気が発生し、加熱中止と同時に過熱水蒸気の発生が急減する過程は以下のように考えられる。図4は多孔質体の流路方向の断面図で、その下図は、ヒータ直下近傍で起こる現象の概念図を示している。

- ① 加熱開始後、ヒータの熱容量が小さいため、短時間でヒータ温度が 100 °C 以上になる（300 W の場合、ヒータの温度が 25 °C から 100 °C になるまで約 0.1 秒）。

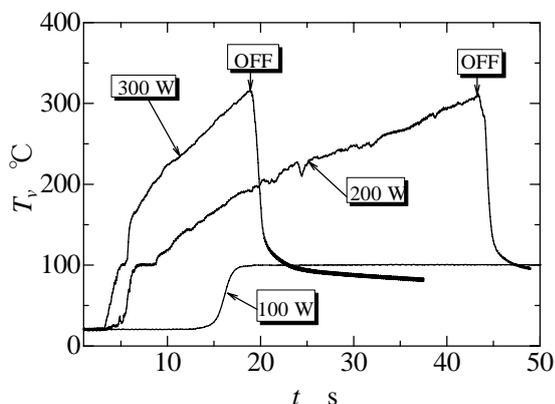


Fig. 3 Time change of T_v during stepwise heat input.

- ② 発生した熱は、主にヒータと含水多孔質体の接触部から伝わり、図4の拡大図(a)に示すように多孔質体表面の細孔部に形成されるメニスカスの液膜部で、直ちに蒸発が起きる。なお、多孔質材質の熱伝導率は低い方が、多孔質内部へ向かっての放熱が抑えられるので、蒸気発生に要する時間は短くなる[3]。
- ③ ヒータと接触している多孔質体近傍の細孔内部に蒸気層ができると（拡大図(b)）、ヒータ温度が急上昇し、発生した蒸気はヒータからの放射および対流伝熱により、中空部内を過熱されながら流れ、出口より流出する。なお、含水多孔質とヒータの接触面積を仮にヒータ表面積の 1/5 とし、すべての熱がこの接触部を介して伝わると仮定すると、300 W の場合には、熱流束は約 1.3 MW/m² と試算され、比較的 low 加熱量であるにも関わらず、市販のカートリッジヒータを用いた場合に比して非常に高熱流束になっていることがわかる。特に Zhao and Liao[3] のカートリッジヒータを埋め込んだ銅ブロックにより多孔質体を加熱する方法では、熱流束は最大でも 42 kW/m² 程度と小さいため、ヒータと含水多孔質の接触部で蒸気層領域が拡がりやすく、十分高温の過熱水蒸気を得ることは困難であろう。
- ④ 加熱を停止すると、ヒータの熱容量が小さいため、短時間で温度が急降下し、発生蒸気量が急減する。

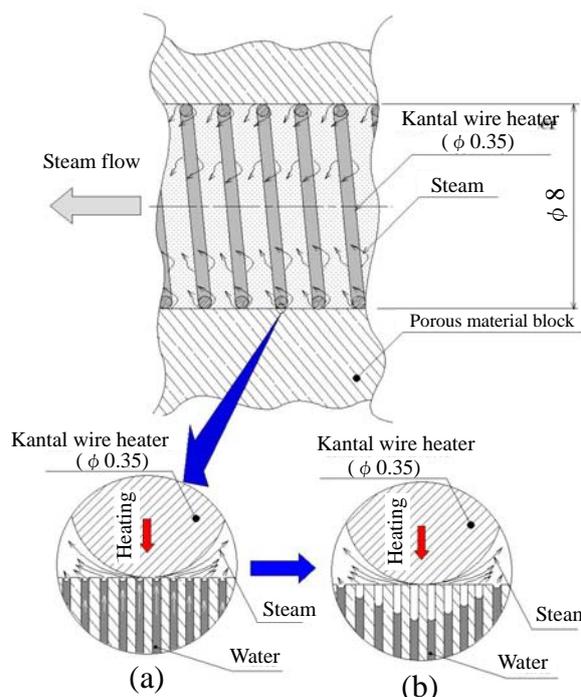


Fig. 4 Schematic view of evaporation on the porous wick in the vicinity of the wire heater.

図5は、各加熱量に対する、式(1)で定義したエネルギー変換効率 η および多孔質体の底面温度 T_{in} を示している。加熱量の増加と共に η が大となること(最大で0.89)、さらに加熱量を増大しているにもかかわらず多孔質体底面温度 T_{in} は低下するという興味深い傾向を示している。これは、図6の多孔質体横断面図の概念図に示すように、熱伝導による放熱の方向と毛管力による蒸発面への液体供給方向が逆になっていること(熱伝導で多孔質内部へ伝わっていく熱の一部が、蒸発面に向かう液体の予熱に使われる)に起因している。つまり、加熱量が大きくなるに従って蒸発面へ流入していく液体の流量が大となるため、外部に向かう熱伝導による効果より、毛管力で蒸発面へ供給される液体による顕熱輸送の効果が

が大となり、結果として、多孔質体の底面温度が低く、 η の値が大きくなったと考えられる。なお、 \dot{m} は、加熱量の増加と共に単調に増加しており(100 Wの場合:0.027 g/s, 200 Wの場合:0.066 g/s, 300 Wの場合:0.098 g/s)、加熱量が300 Wの条件であっても毛管力による液供給の限界に達していないものと思われる。300 W以上の高加熱量領域での熱利用効率は、熱伝導による放熱の効果が支配的となり低下することも考えられるので、今後さらに検討を行っていく必要がある。

4 結論

含水多孔質中空部の内壁面上に熱容量の小さなヒータをコイル状に設置するという、極めてシンプル、小型、安価な過熱水蒸気生成装置を提案した。これにより、過熱水蒸気を迅速に、エネルギー変換効率良く生成させることができる。本装置は、液体供給に毛管力を利用するためポンプは不要で、蒸発により蒸気を発生させるので、沸騰特有の騒音は、発生しにくい。なお、蒸発面におけるスケール対策にはイオン交換樹脂などを用いればよいであろう。また、従来のように過熱水蒸気生成に、蒸気発生器と過熱器の2段式ではなく、本装置1つで飽和および過熱水蒸気を容易に発生させることができる。

今後、細孔径、空隙率、穴径、コイルピッチ、多孔質体の熱伝導率などの影響を検討し、瞬時に、高いエネルギー変換効率で過熱蒸気を生成させる装置に改良していく予定である。

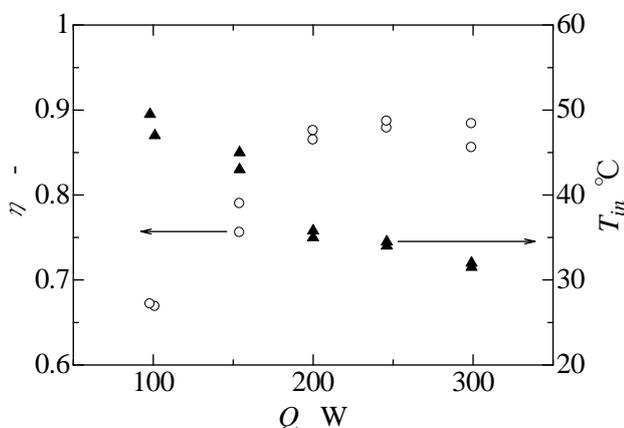


Fig. 5 Relation between rate of energy conversion η , inlet temperature T_{in} , and input power Q .

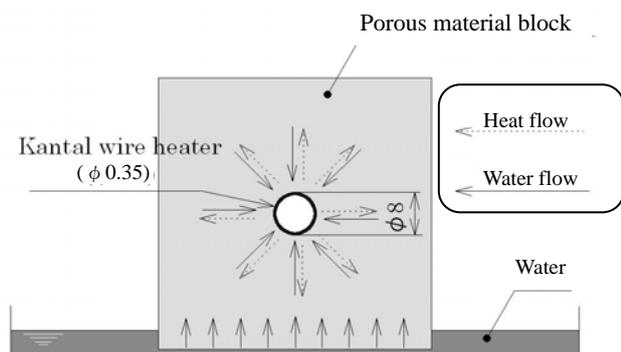


Fig. 6 Schematic view of heat flow and water flow in porous material block.

参考文献

- [1] 鈴木寛一 他 25 名, 過熱水蒸気技術集成 (その特性と広がる最新利用および装置開発の現状), NTS (2005).
- [2] 門馬哲也, 岸本卓士, 田中源基, 高見星司, “過熱水蒸気による健康調理技術の開発”, シャープ技報, 91(2005), 40-44.
- [3] Zhao, T.S. and Liao, Q., “Rapid vaporization of subcooled liquid in a capillary structure”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (2002), 165-172.
- [4] 奥山邦人, 森昌司, 水蒸気発生装置及び水蒸気発生方法, 特願 2006-037299.