

サーモサイホンにおけるガイゼリングの発生機構に関する研究

クンチヨロ, ヘル
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

岩橋, 謙一
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

饒, 燕飛
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

福田, 研二
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17358>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 16 (4), pp.415-419, 1995-03-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

サーモサイホンにおけるガイゼリングの 発生機構に関する研究

ヘル クンチョロ*・岩 橋 謙 一**

饒 燕 飛***・福 田 研 二***

(平成6年10月24日 受理)

Study on Geysering Mechanism in Closed Thermosyphon

H. KUNCORO, K. IWAHASHI, Y. F. RAO and K. HUKUDA

An experimental study with a closed thermosyphon to investigate into the mechanism of the geysering was carried out. The filling percentage of the evaporator was 100% and the working fluid was R113. The thermosyphon was operated at low pressure, low heat input to obtain periodical boiling and large superheat condition. The most typical feature of the geysering was rapid bubble expansion associated with spontaneous increase in system pressure. The mechanism of the geysering as seen from the temperature distribution of the working fluid along the evaporator and the pressure fluctuation were considered.

1. 緒 言

ボイラーをはじめとする沸騰二相流系でしばしば不安定流動が発生し、これが安全性、運転性、制御性を左右する大きな問題となることがある。本研究では不安定流動の一種であるガイゼリングに関する実験をガラス製サーモサイホンを用いて行い、熱流束と圧力の影響、ガイゼリング周期と凝縮部内部における圧力振幅の関係及び液体と管外壁の温度分布について調べた。

Boure ら¹⁾によって分類された静的不安定の一種であるガイゼリングは、下部が加熱されている一端の閉じた垂直管で観察される。これは次のような現象である。通常、熱流束が十分に大きい時は下部のみで沸騰し、大きな周期的振動は発生しない。しかし熱流束が低く、流路内の液体が比較的均等な温度分布を保ったまま飽和温度に近づくような場合、静圧の減少を伴う急激な気泡の成長や流路からの流体の噴出が起こる。次に噴出された液体は管内に戻りサブクールされた非沸騰状態に再び戻る。そして、この現象が繰返される。このガイゼリングと称される現象の典型例としては自

然界では間欠泉がよく知られている。

Chexal ら²⁾は Boure らの分類を参考にして、水及び Freon113 を作動流体として、単チャンネル自然環境ループで、実験的な研究を行い不安定領域を定義した。その中の1つの現象はガイゼリングと似ているが、下降管からの液体流入がある点が大きく異なる。この現象において気泡は加熱部最上部から発生し、管に沿って気泡発生領域がすばやく広がる。これが圧力 0.1MPa、熱流束 3kW~9kW の間で起こるとしている。

中西ら³⁾は、沸騰ループを用いてガイゼリングに関する実験を行い、その発生限界に及ばず流速、熱負荷、入口サブクール度、圧力、ライザ長、加熱長の効果及びそれらのガイゼリング周期や加熱部差圧振幅への影響等を調べた。その結果、ガイゼリングは流速が低いほど、また圧力が低いほど、あるいはライザ長が長いほど発生しやすいとしている。さらに周期は熱流束の増加とともに長くなり、流速の増加とともに短くなる。差圧振幅は熱流速の増加とともに大きくなり、流速の増加とともに小さくなる。また、ライザ長が長いほど振幅は大きくなると報告している。しかしこれも循環ループにおいて発生しており、ガイゼリングの定義ともかかわっているが基本的には密度波不安定現象にむ

*エネルギー変換工学専攻博士課程

**エネルギー変換工学専攻修士課程

***エネルギー変換工学専攻

しろ近いと思われる。

二相サーモサイホンにおいて Casarosa ら⁴⁾はガイゼリングの効果に関し、作動流体として水を用いて熱流束 $2\text{kW/m}^2 \sim 15\text{kW/m}^2$ 、圧力 $0.003\text{MPa} \sim 0.1\text{MPa}$ の範囲で実験を行った。その結果ガイゼリングが起こる時に Labuntsov⁵⁾の実験式よりも熱伝達が悪くなること、更に凝縮部圧力を一定して熱流束を増加させるとガイゼリングの効果は大きくなり、熱流束を一定にして圧力を増加させると温度振動振幅が減少することを見出した。

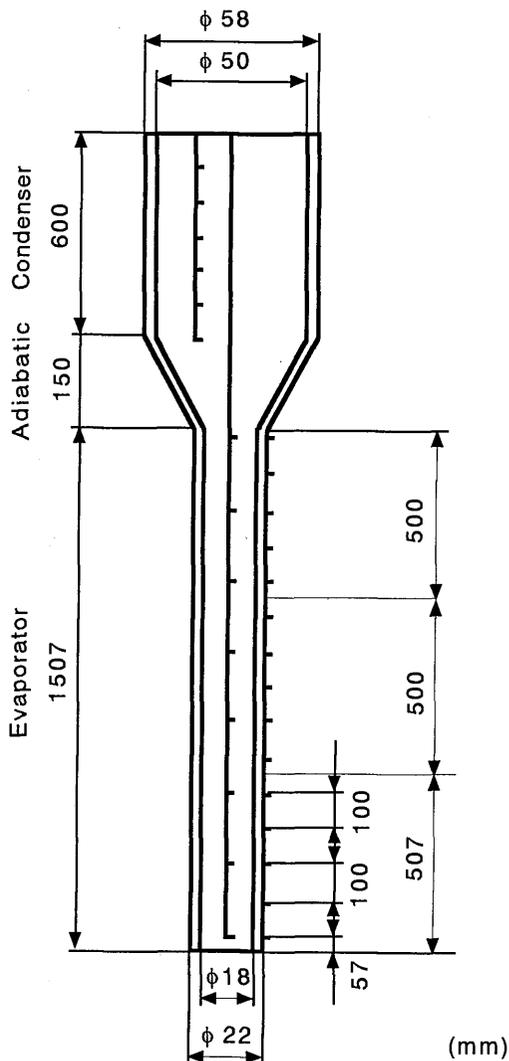
Hands⁶⁾は、垂直管を低熱流束で静かに加熱するとガイゼリングが起こるとしている。Hands によれば最初の気泡群は管壁にあるキャビティで発生する。この気泡が上昇し、そのまわりの壁付近の液体に影響し次の気泡の発生をうながすとした。

2. 実験装置及び実験方法

試験部は Fig 1 に示す様に、目視観察を主目的にしているため、実験装置は凝縮部、断熱部、加熱部ともすべてパイレックスガラスで作られている。凝縮部は、外径 58mm、内径 50mm、長さ 600mm であり、また断熱部は、加熱部と凝縮部の管径の違いから、上部は内径 50mm 下部は内径 18mm で、長さ 150mm の漏斗状になっている。加熱部は、外径 22mm、内径 18mm、長さは 1507mm であり、管外壁にピッチ 20mm で、らせん状に巻かれた主ヒータにより加熱される。ヒータは抵抗 $3.392\Omega/\text{m}$ の帯状のヒータ線を用いた。

温度測定には、C-A 熱電対を用いた。熱電対の取り付け位置を Fig 1 に示す。加熱部では管の外壁温度と内部作動流体温度を測定している。前者は加熱部下端 60mm の位置より 100mm 間隔で計 15 点、また後者は凝縮部上部のフランジより熱電対を挿入し加熱部下端 50mm の位置より 200mm 間隔で 8 点測定した。更に、凝縮部内部の温度は上部フランジより 60mm 間隔で 8 箇所位置で測定している。また、冷却ジャケットの出入口でそれぞれ冷却水の出入口温度を測定した。圧力については、凝縮部上部のフランジに取り付けられた動歪計式圧力変換器を用いて測定した。

実験において、冷却水温度は、テスト部圧力が設定値になるように、常温の水道水の注水量と投げ込みヒータの加熱量とを調整し設定した。作動流体には R113 を用いた。



— position of thermocouple

Fig. 1 Experimental apparatus

実験ではまず加熱量を設定し、次に凝縮部圧力を調整した後、各部の温度及び圧力のデータを集録すると共に、カメラ、ビデオを用いて作動流体の流動様式を観察記録した。データの取り込みは、マルチベンレコーダ、パーソナルコンピュータを用いて温度及び圧力を連続記録した。全ての実験は充填率 $(=L_c/L_b)$ 、 L_c : 充填する作動流体の液柱の高さ、 L_b : 加熱部長) を 100% として行った。また、凝縮部圧力は $0.046\text{MPa} \sim$

0.088MPa, 熱流速は 19W ($223\text{W}/\text{m}^2$) から 165W ($1936\text{W}/\text{m}^2$) までの範囲で実験を行った。なお、ガイゼリング時は圧力を一定に保てないため、設定圧力はガイゼリング沸騰開始直前の凝縮部の圧力とした。

3. 実験結果及び考察

サーモサイホンにおいては、加熱部の外壁より入力された熱は作動流体の相変化で生じた蒸気形で上部に移動し、凝縮部で凝縮されてそこで放出される。ところが、入力される熱が放出される熱よりも大きい時は、作動流体の内部エネルギーは増加しこの温度が上がる。さらに飽和温度になってもすぐには気泡は発生せず過熱状態になって始めて気泡が発生する。Niroら⁷⁾によると、一様な過熱流体が臨界過熱に達した時にキャビティで核生成が起こるとされた。また臨界過熱は圧力によって変わり、圧力が低いほど高い。本実験において、気泡が発生する直前の、液体の温度分布の一例を Fig 2 に示す。気泡の発生開始は、表面粗さや液体-壁面の温度差や液体の状態量などの要因によるであろう。表面粗さについてはガラスは滑らかであり、核生成は起こりにくいとされている¹⁾。また、フロン系液体は通常表面に対して濡れ性がよく、接触角がゼロに近いため核生成は高過熱状態で起こるとされている⁶⁾。凝縮部で冷却された液体が流下するので、加熱部最上部温度は飽和温度より低くなるが、それより下部では飽和温度より高く、その中でも加熱部下端の温度が最高となる。普通は気泡はこの付近のところから発生した。

Fig 3 にガイゼリング発生直前の流体温度を示す。特に低圧力、低加熱入力では気泡は過熱度が $4-5^\circ\text{C}$ にならないと発生が開始しないことが分かる。そして、Hands⁶⁾ が示した様に、ある点で発生した気泡は離脱後、加熱部の管中へ移動する傾向が見られる。更に熱流束を増加するとガイゼリング発生直前の過熱度は低下する傾向があることが分かる。熱流束と温度及び圧力の振動振幅の関係はこのことに起因している。さらに気泡の離脱後に気泡と液体の温度差は気泡の膨張速度にも影響するであろう。従って熱流速の低い場合のガイゼリングは突沸に近い現象になる。

熱流束 $702\text{W}/\text{m}^2$, 圧力 0.047MPa の時にマルチペンレコーダを用いて記録された液体温度と凝縮部圧力の振動を Fig. 4 (a) に示す。ガイゼリングが発生する前に加熱部下端より 460mm の位置での温度はゆっく

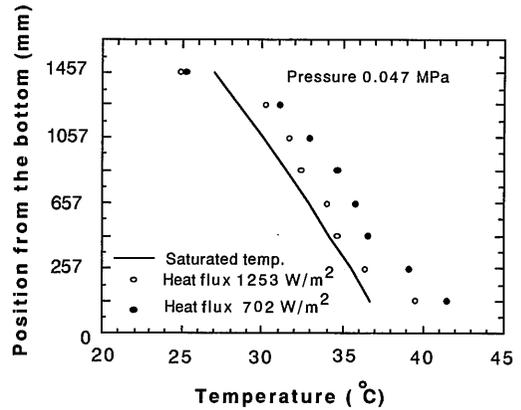


Fig. 2 Temperature distributions before geysering

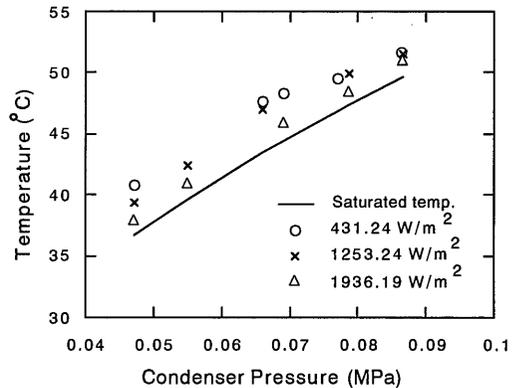


Fig. 3 Temperature of the lower part before geysering for various conditions

り上がるが、下部から気泡が発生した後一度ピークに達し下がる。同時に、上部の温度も上がるが、これに伴い圧力も上がる。更に温度の上昇幅は上部ほど大きい。これは、下部から気泡が発生し上昇するにつれ、下部の熱い液体が押し上げられるためである (Fig. 2)。しかし、気泡が熱電対を包み、あるいは沸騰が起こることにより温度は飽和温度まで下がる。なお、温度及び圧力振動振幅は熱流速が増加するほど、また圧力が高くなるほど減少することが分かる (Fig. 4 (b), 4 (c)) 著者ら。Fig. 2 に表わされる様に、下部の液体温度が上部より高い時、下部から気泡が発生すると熱い液体が押し上げられ上部の温度が上がる。しかし、気泡が熱電対を包むと測定温度が下がるがこれは Fig. 3 に示す様に液体は加熱状態であり、気泡の温度は液体より低いためである。熱電対の位置によらず最低の温度は飽和温度に近くなる。ガイゼリングにおけ

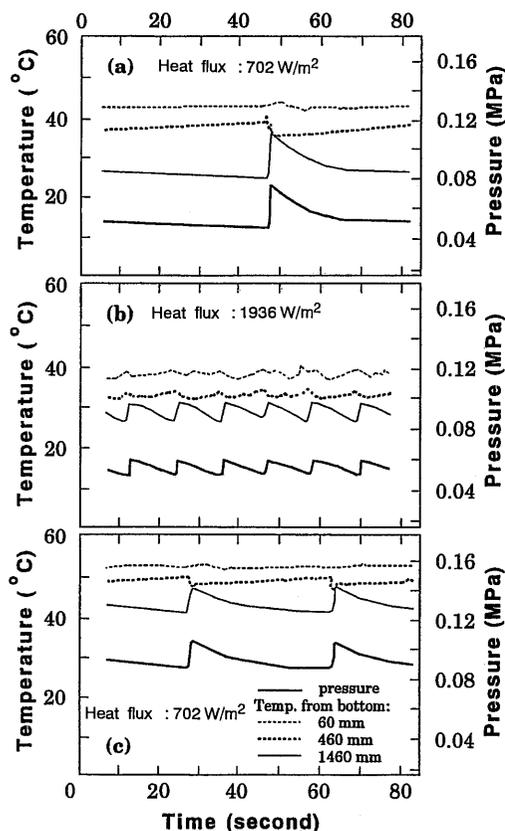


Fig. 4 Liquid temperature and pressure fluctuations

る吹き上げ現象が発生する前は温度が上昇しつつあるが、吹き上げが開始すると温度が下降する。Hands⁶⁾によれば下部で気泡が一個発生しその上昇が周りの液体に影響し、新しい気泡の発生がうながされる。つぎにこの新しい気泡群は合体し大きな気泡になるとされた。しかし本研究ではそのような現象は発生しなかった。むしろ気泡の移動によるよりも膨張により上部にまで気泡が到達した。

Fig. 5 に観測結果より推定したガイゼリングの発生機構を図示する。気泡が加熱部下部から一個発生し、上昇するに伴い静圧が低下することにより更に膨張する。この気泡の膨張と上昇により、気泡上部の液体は上部に強く押し上げられる。その後、凝縮部で蒸気は凝縮した押し上げられた液体も冷却され、それが再び加熱部に流下し、温度及び内部圧力は共に低下し、再び静かな状態に戻る。気泡の膨張に際しては、液体

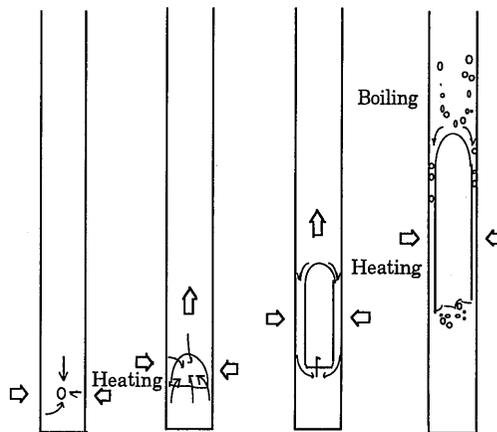


Fig. 5 Sketch of geysering process

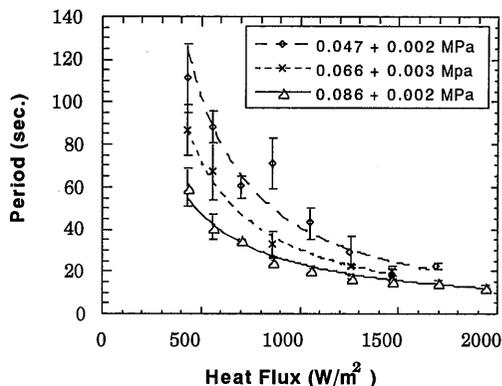


Fig. 6 Geysering Period

温度が飽和温度より高いため気泡表面で相変化が起こる。また膨張が進むほど表面積が増大するので、膨張は一層加速される。気泡はスラグ気泡となり、その上昇によって上部の液体は押し上げられるが、一部の液体は流下する。そして、スラグまわりの液膜は非常に薄いので、壁からの伝熱も増大する。以上の相乗効果により気泡の膨張速度は速く、気泡上部の液体は凝縮部まで強く押し上げられ圧力も急上昇する。ガイゼリングが始まる前にいったん圧力が上昇するが、これはそのためである。

Fig. 6 にガイゼリング周期を示す。ガイゼリングの振動周期は圧力の振動周期より決定した。熱流速が増加すると周期は短くなる傾向がある。これはFig. 3 示

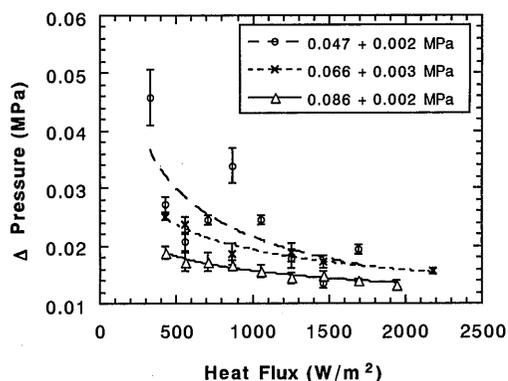


Fig. 7 Amplitude of pressure fluctuations

した様に熱流束が高いほど気泡が発生しやすいためであると考えられる。Hands および Griffith⁸⁾ によれば周期 τ は $\tau = \tau_w + \tau_g$ で表わされる。ここで、 τ_w 、 τ_g はそれぞれ、気泡が発生するまでの時間(待ち時間)と気泡の成長時間である。 τ_g は短く、0.2秒のオーダーであるのに対し τ_w は数分のオーダーになることから、気泡の成長時間は考慮しなくてもよいことが分かる。

圧力の振動振幅の様子を Fig. 7 に示す。図に示す様に熱流束あるいは圧力が増加すると振幅は減少する傾向がある。ところで振幅に影響する要因として気泡の容積が考えられる。すなわち気泡の生成に伴いピストンと同じ様に上部の液体を押し上げ凝縮部中の流体を圧縮する。従って気泡の容積が大きいほど振幅が大きくなる。更に、生成気泡の振幅は過熱度が大きいほど大きいと考えられる。

また、振幅は膨張時間にも関係する。液体は過熱状態のときに沸騰を開始し、液体温度が飽和温度まで減少すると気泡の膨張は終了する。この際、核生成が広範囲にわたって同時に起こると気泡の生長は急激であ

り圧力も急上昇する。

4. 結 論

ガラス管サーモサイホンについて、作動流体として R113 を用いガイゼリングに関する実験を行い、次の結論を得た。

1) サーモサイホンにおいてガイゼリングは低圧力、低熱流束の条件で起こる。ガイゼリングは静かな状態で内部エネルギーが上昇し、ある程度の過熱度で気泡が発生し急激に膨張することで起こる。その際、気泡の膨張に伴い気泡上部の液体は押し上げられ、押し上げられた液体は上部で蒸発する。凝縮部で凝縮された蒸気量が多くなると、温度及び圧力が減少しガイゼリングが収まる。

2) 気泡は離脱後密度差により上昇し、それに伴う静圧の減少により膨張する。さらに表面積の増大による蒸発量の増加で、膨張が加速される。

3) 気泡の膨張は熱流速と圧力に依存する。熱流速が低いほどまた圧力が低いほど気泡発生時の過熱度が高いため気泡は大きく膨張する。

参 考 文 献

- 1) Boure, J. A., Bergles, A. E., and Tong, L. S., Nuclear Engineering And Design, **25** (1973) 165-192.
- 2) Chexal, V. K., Bergles, A. E., Heat Transfer, AIChE Symposium Series, 69 No. 131, 37-45.
- 3) 中西ら, 日本機械学会論文集, **44** (1978) 4252-4262.
- 4) Casarosa, C., Latrofa, E., and Shelginski, A., Int. J. Heat Mass Transfer, **26** (1983) 933-941.
- 5) Labunstov, D. A., Teploenergetika, **19** (1972) 14-19.
- 6) Hands, B. A., Cryogenics, **28** (1988), 823-829.
- 7) Niro, A., and Baretta, G. P., Int. J. Heat Mass Transfer (UK), **33** (1990) 2099-2110.
- 8) Han, C., and Griffith, P., Int. J. Heat Mass Transfer, **8** (1965) 887-904.