

間欠泉を人工的に再現してみよう！

茨城大学工学部機械工学科 神永・松村研究室

代表 後藤泰裕, 中里真吾

1. 間欠泉とは

地球上には、太平洋を取り巻く環太平洋火山帯をはじめ、数多くの火山帯が分布しています。そして、その火山帯の周囲には、必ずといっていいほど温泉の湧出が見られます。日本人にとって馴染み深い温泉ですが、私たちが注目したのは地上に激しく温水を噴出する間欠泉です。

間欠泉とは、一定周期で水蒸気や熱湯を噴出する温泉のことです。世界的にはアイスランド、アメリカ合衆国のイエローストーン国立公園内の間欠泉が有名です。イエローストーンには大小 200 以上の間欠泉が存在し、中でも最大のジャイアント間欠泉は 7 日から 12 日の周期を持ち、一回の噴出時間は 1 時間以上、高さは最大で 75m に達します。



図 1 ジャイアント間欠泉

2. 間欠泉の発生現象

間欠泉は工学的にはガイセリングと呼ばれ、その発生メカニズムの定性的な解析がすでに報告されています⁽¹⁾。その報告によると、図 2 のように垂直管内に高温状態の液体が存在する条件において、下部の熱源により液体が加熱されていくと、ある程度の過熱度を有した後に急激な沸騰が生じることがあります。この急激な沸騰により急速に蒸気泡が発生し、その気泡発生に伴って水頭(圧力)が下がる為、ますます蒸気泡が大きくなり成長し、その蒸気泡により管内の液体を噴き上げられ、液が蒸気を伴って液面から飛び出して来ます。その後、上から液体が自然流下し管内に再流入し、しばらくして再び沸騰が開始します。この過程が周期的に繰り返されます。このように気泡発泡点が少ない表面で起こりやすい液体の過熱による突沸や、自己蒸発現象による管内の急激な気泡成長が原因とされています。この現象は間欠泉に限らず、蒸気発生器を始めとする蒸発管系での運転性、安全性および制御性を左右する大きな問題としてとらえられており、日本においてもシステム上発生するガイセリング現象の研究が報告されています⁽²⁾。

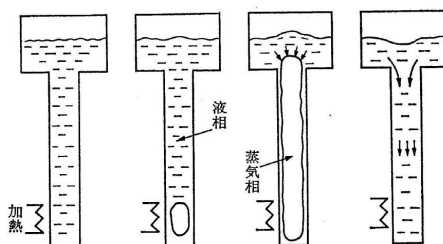


図 2 ガイセリングの模式図⁽³⁾

3.実験の目的

日本の観光地などでは間欠泉と称して、一定時間ごとにポンプを使用して噴射させ、発生時間や噴射量をコントロールしているものが見られますが、前項で示したようにこれは実際の間欠泉の物理的メカニズムとは全く異なるものです。そこで、**間欠泉の発生メカニズムを明らかにするため模擬実験装置を作製し、どのような条件が間欠泉の吹上げ高さや周期に影響するのかを実験的に解明すること**を目的としました。

4.実験装置

間欠泉を再現するにあたり、以下のような装置を作成しました。

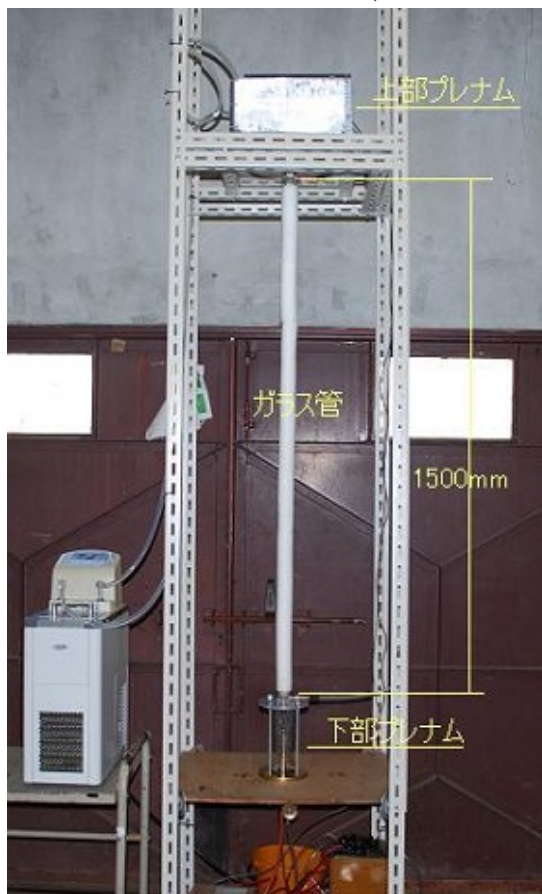


図3 実験装置全体図

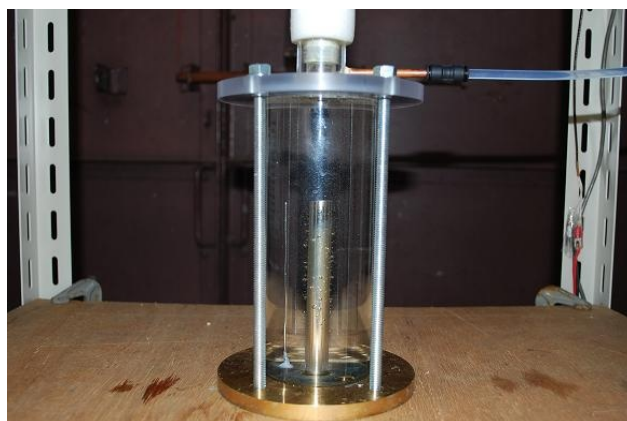


図4 下部プレナム(加熱部)

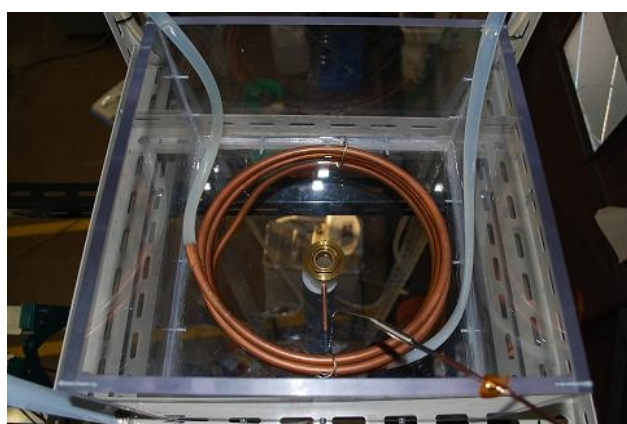


図5 上部プレナム

実験装置は長さ 1500mm のガラス管、加熱部である下部プレナム、水を蓄えるための上部プレナムで構成されています。

ガラス管には途中で温度が下がらないよう断熱材が巻いてあります(図3)。下部プレナム(図4)には、水の加熱量のコントロールを行うために八光製のヒータを用いています。上部プレナム(図5)には蓄水の温度を一定に保つために恒温槽から一定温度の水を銅パイプに流します。

計測装置として下部プレナムと上部プレナム内に水温を測定するために、それぞれ熱電対を取り付けました。また、ガラス管の上端部・下端部の圧力を測定するための差圧計を取り付けました。

5.再現できるかどうか実験してみる

実際に間欠泉の発生メカニズムを調べるため,作成した装置で,間欠泉を再現できるかどうか

実験を行いました.実験を行うにあたり,どのような条件で突沸が発生するのかを探るため,ガラス管内径 6mm,上部プレナムの蓄水位 20mm,水温 20℃に固定し,ヒータ出力がそれぞれ 100,200,300W での下部プレナム内の様子を 10 分間観察しました.

100,200W では水の沸騰が確認できず,ヒータの出力が足りないことがわかりました.次に 300W で実験を行いました.

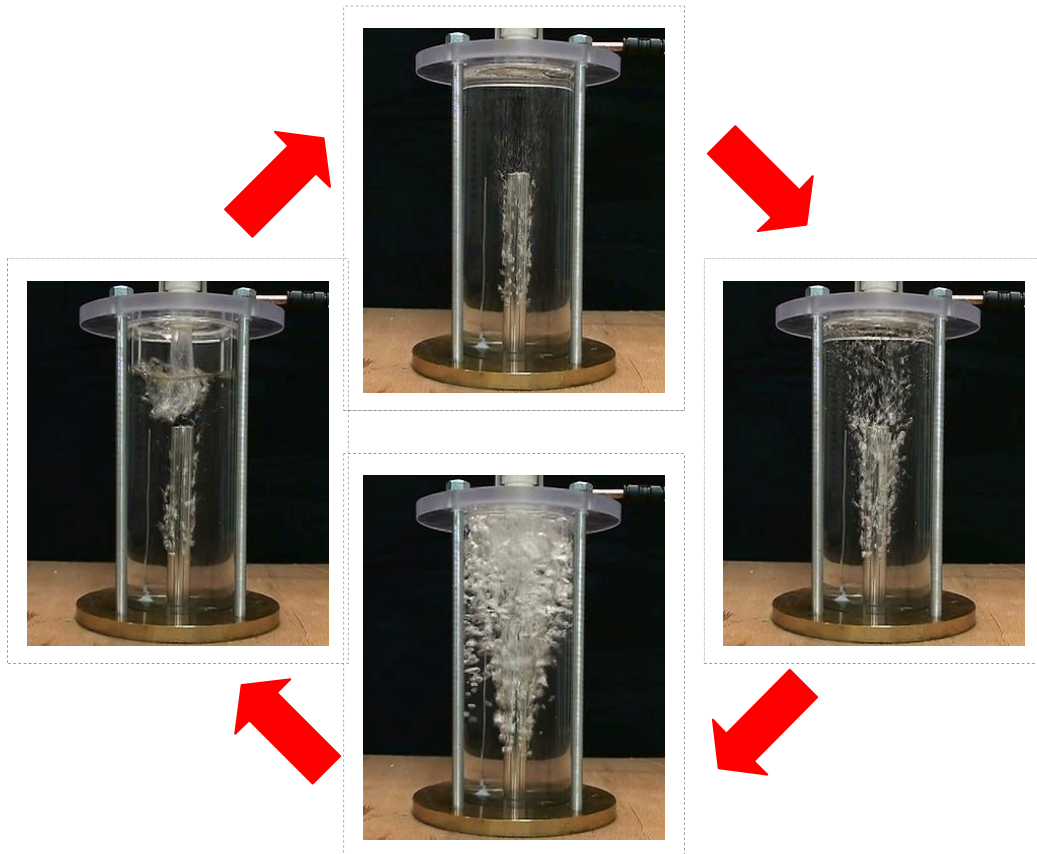


図 6 沸騰現象の様子(出力 300W)

図 6 は出力 300W を与えたときの下部プレナムの様子です.開始直後(上図)は気泡の大きさが小さいのですが,徐々に気泡が大きくなり始め(右図),急激に気泡の発生量が増え突沸が発生しました(下図). その際,下部プレナム内の液体の一部はガラス管に押し出され,上部プレナムにおいて間欠泉と同様な液体の吹き上げを観察できました.しばらく沸騰が続いた後,水が下部プレナムに逆流しました(左図).その後しばらくして再び沸騰が開始し,図 6 の過程が周期的に繰り返されました.

詳細については動画を参照してください.

(ファイル名: 沸騰現象の様子)



図8 突沸発生時の上部プレナムの様子
(管内径 6mm,蓄水位 20mm,水温 20℃)

上部プレナムでは突沸発生時にガラス管出口から熱湯が噴出する様子が観察できました。図8は10分間の測定のなかで噴出した高さが最も高いものを切り出した画像です。図をみると突沸により勢いよく噴出した熱湯が高さ 400mm 以上まで噴き上がっているのが観測できました。

それぞれの現象時における詳細については動画を参照してください。
(ファイル名：内径 6mm,蓄水位 20mm,水温 20℃)

6.実験結果の解析を行う

上記の現象が起こった時の上部プレナムの温度,ガラス管の上下端部の差圧について解析しました。

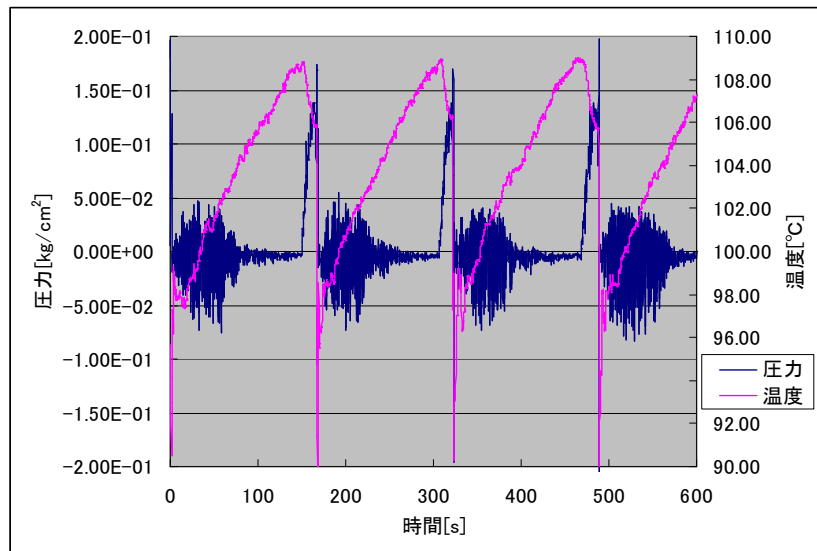


図8 蓄水位 20mm,水温 20℃の解析結果

図8は10分間測定したときの上部プレナムの温度,ガラス管の上下端部での差圧のグラフです。温度に関してみると,上部からの水圧がかかっているため100℃以上になり,約109℃付近で突沸が発生しました。突沸後,温度が徐々に下がり始め水が逆流することで急激に下降しています。これは突沸により管内の水が噴出し上部からの水圧が下がることで,温度が下がり突沸が維持できなくなったため水が逆流するのだと考えられます。

圧力に関してみると、振動している区間は下部プレナム全体が十分に温まっていないため、ヒータ部から離脱した気泡が冷やされて消えてしまうこと（サブクール沸騰）が原因と考えられます。

その後を見ると、十分に温まり振動が安定した後、突沸発生により圧力が急激に上昇しています。突沸がおさまり逆流するときに、圧力が上下に激しく振れました。これは水が流れている配管を急に締め切ったときに、水流の慣性で管内に衝撃・振動水圧が発生する現象である水撃作用（ウォーターハンマー）によるものだと考えられます。

次にヒータ出力を 300W で固定し、上部プレナムの水温を 40,60,80℃にしたときの結果は次のようになりました。

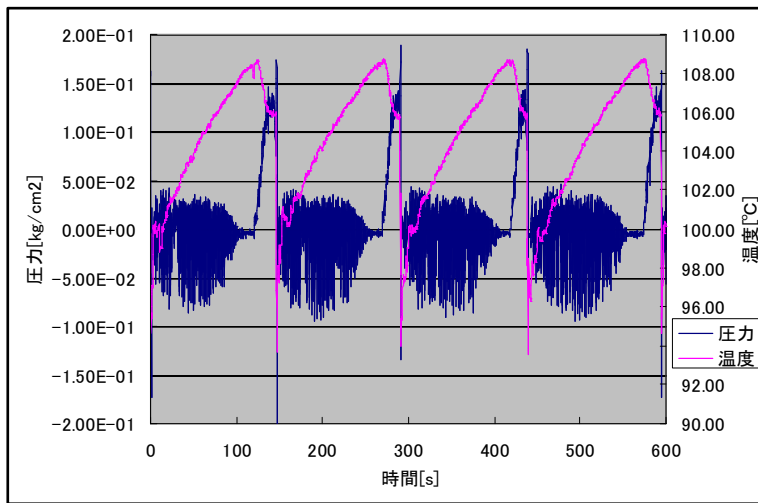


図 9 蓄水位 20mm,水温 40℃の解析結果

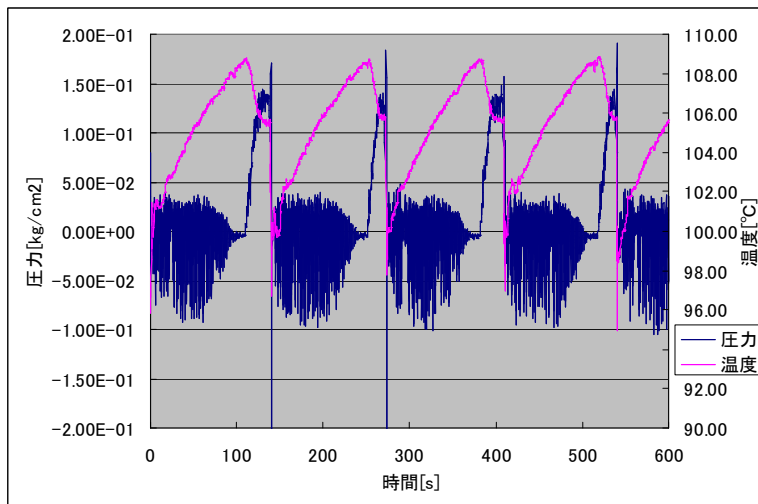


図 10 蓄水位 20mm,水温 60℃の解析結果

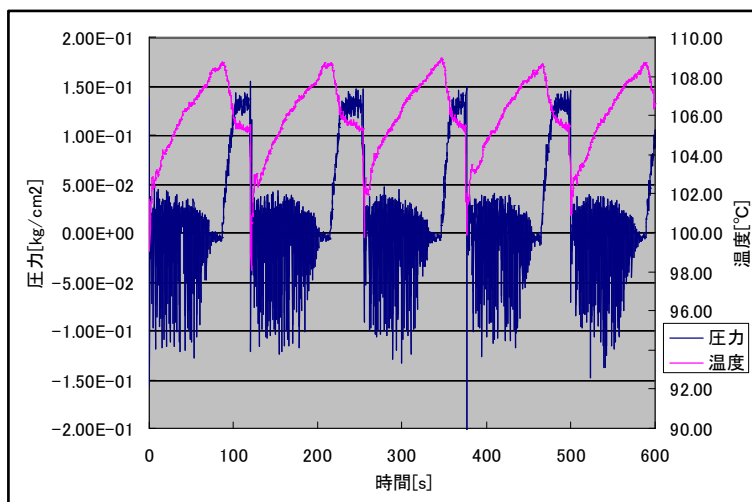


図 11 蓄水位 20mm,水温 80℃の解析結果

図 8～11 を比較すると,突沸が発生する温度や圧力の大きさにあまり違いが見られませんが,水温が上昇するにつれて突沸周期が短くなっているのがわかりました.これは水温の高いほうが再充填する時の下部プレナムの温度があまり下がらず,再び突沸に達するまでの時間が短くなるためであると考えられます.

噴出する高さは 40,60℃の時ともに 400mm 以上まであがっています.80℃のときは 300mm 付近まであがっているのが観測できました.そのときの圧力データをみると,どの条件でもほぼ同じ値を示しています.現時点で噴出する高さや圧力の関係は読み取ることができませんでした.

7.人工間欠泉として最も良い条件を探す

これまでの実験より,間欠泉を人工的に再現できるということがわかりました.
次にどのような条件で最も高く噴出するのか以下の条件で実験を行いました.

表 1 条件設定

ガラス管内径	6,11.6mm
上部プレナムの蓄水位	20,50,80mm
上部プレナムの水溫	20,40,60,80℃

計 24 回の実験を行った結果を 10 分間測定中で最も噴出した高さ,突沸周期,噴出したときの見た目の三項目で評価し,表 2,3 のようにまとめました.

表 2 内径 6mm の時の評価結果

	20℃	40℃	60℃	80℃
20mm	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 以上 約 153 秒 高くきれいに噴出する 	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 以上 約 146 秒 真上に高く噴出する.20℃とほぼ変わらない 	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 約 132 秒 水滴の一部が高く噴出するが,全体的に噴出しない 	<ul style="list-style-type: none"> 300mm 付近 約 133 秒 あまり高く噴出せず,横にはじけ飛ぶような噴出をする
50mm	<ul style="list-style-type: none"> 380mm 約 171 秒 水滴が飛ぶだけで,まとまったもの200mmしか噴出しない 	<ul style="list-style-type: none"> 240mm 約 152 秒 全体的に 200mm 以下のものが多く,あまり迫力がない 	<ul style="list-style-type: none"> 320mm 約 130 秒 一度高く噴出したが,それ以外は水面から少し飛ぶ程度 	<ul style="list-style-type: none"> 240mm 約 121 秒 水面より少し高く噴出する程度.最大は水滴が飛んだもの
80mm	<ul style="list-style-type: none"> 180mm 約 182 秒 噴き出すというより水面が盛り上がる程度 	<ul style="list-style-type: none"> 185mm 約 153 秒 20℃の場合と同じように水面が盛り上がる程度 	<ul style="list-style-type: none"> 160mm 約 128 秒 真上ではなく斜めに噴出している 	<ul style="list-style-type: none"> 170mm 約 125 秒 噴き出すというより水面が盛り上がる程度

表 3 内径 11.6mm の時の評価結果

	20℃	40℃	60℃	80℃
20mm	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 以上 約 187 秒 水柱のように真っ直ぐきれいに噴出する.毎回高く噴出する. 	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 以上 約 138 秒 爆発するように噴出し,迫力がある 	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 以上 約 124 秒 20,40℃の時より高さは低いが,横にも広がり迫力がある. 	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 以上 約 93 秒 激しく噴出し,高さもある.噴き出している時間が長い(図 12)
50mm	<ul style="list-style-type: none"> 380mm 約 220 秒 噴出するときとしないときがある 	<ul style="list-style-type: none"> 400mm 約 162 秒 一度だけ高く噴出して,その他はほとんど噴出しない 	<ul style="list-style-type: none"> 350mm 約 147 秒 全体的にあまり噴出しない 	<ul style="list-style-type: none"> 390mm 約 96 秒 迫力はあるが,高さが低い
80mm	<ul style="list-style-type: none"> 350mm 約 219 秒 一度は高く噴出したが,その他は低い 	<ul style="list-style-type: none"> 240mm 約 194 秒 ほとんど噴出はなく迫力がない 	<ul style="list-style-type: none"> 330mm 約 136 秒 200mm 以下しか噴出せず,迫力がない 	<ul style="list-style-type: none"> 250mm 約 106 秒 突沸が起きる周期は短い,ほとんど高さが低い

表 2,3 の周期,蓄水位,水温,噴出高さの関係を管径ごとに図 12~15 に示しました.

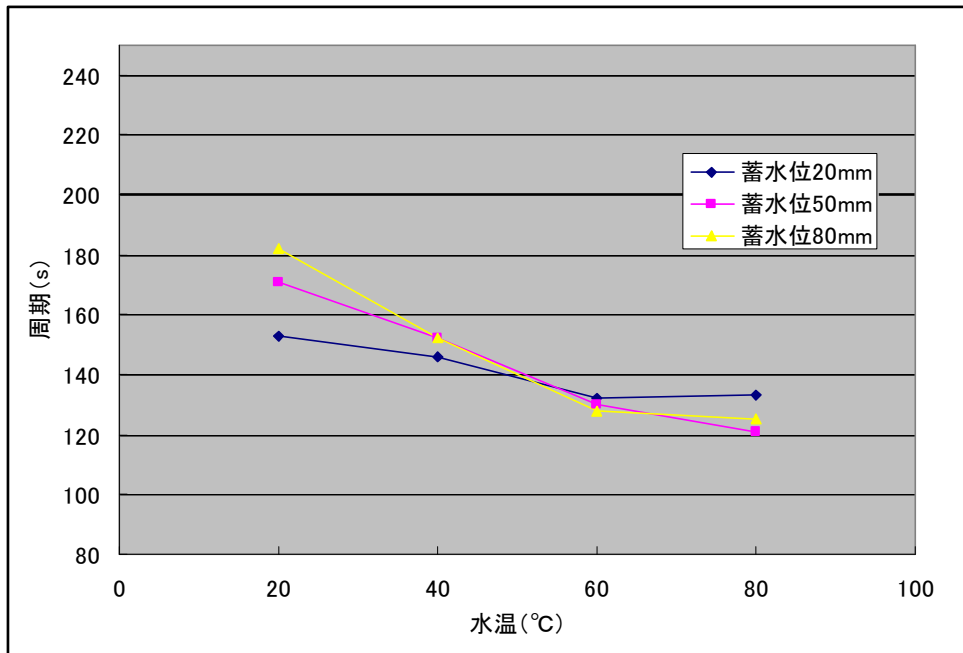


図 12 管径 6mm のにおける周期,水温,蓄水位の関係

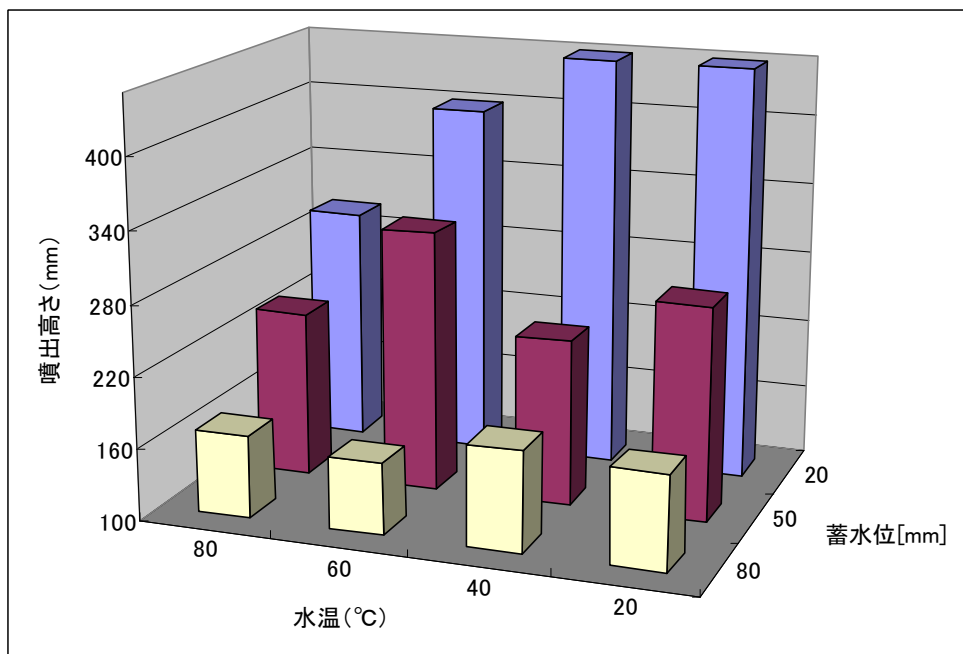


図 13 管径 6mm のにおける噴出高さ,水温,蓄水位の関係

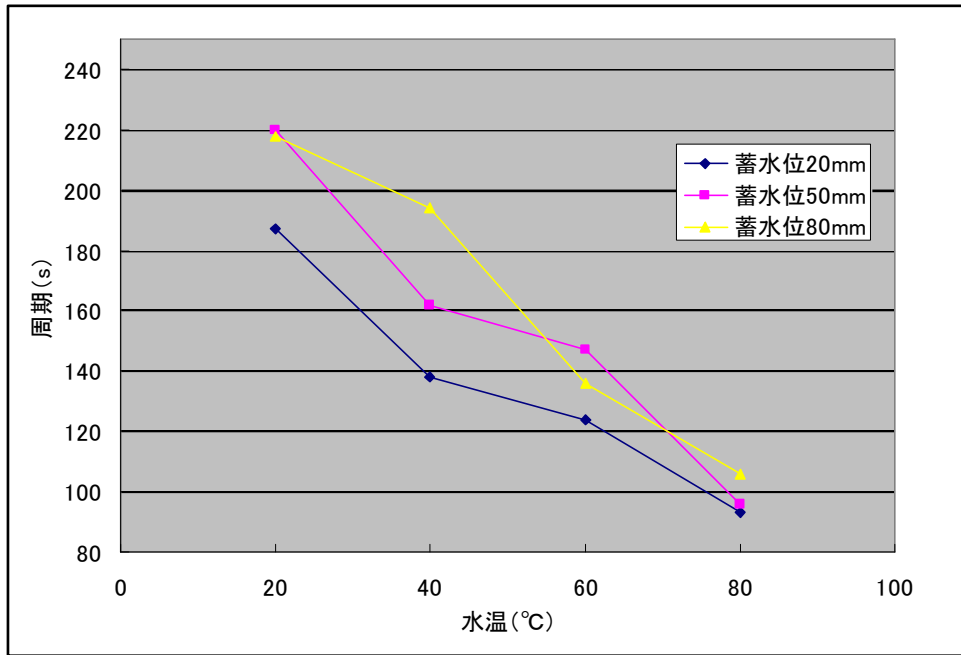


図 14 管径 11.6mm のにおける周期,水温,蓄水位の関係

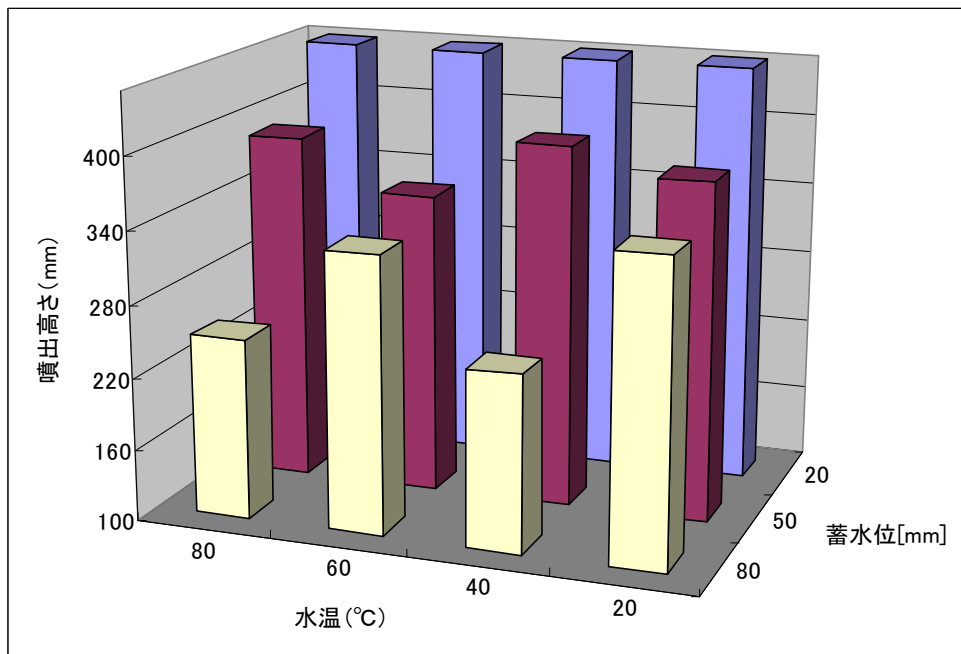


図 15 管径 11.6mm のにおける噴出高さ,水温,蓄水位の関係

図 12,14 をみると,6mm 管,11.6mm 管ともに蓄水位に関して周期に定量的な変化があまり見られなかったが,水温が高くなるにつれて,突沸がおきるまでの周期が短くなることがわかりました。

図 13,15 をみると,周期とは逆に水温に関して定量的な変化がみられなかったが,蓄水位が高くなるにつれて噴出する高さが低くなるのが観測できました。

噴出したときの見た目について動画を一つ一つ丁寧に調べた結果,条件は管径 11.6mm,蓄水位 20mm,水温 20℃のときに最も派手に突沸している様子が観測できました.



図 12 管径 11.6mm,蓄水位 20mm,水温 20℃での突沸の様子

この時の突沸の様子は動画を参照してください.

(ファイル名: 内径 11.6mm,蓄水位 20mm,水温 20℃)

また,他の条件での突沸の様子も動画がありますので,参照して比較してみてください.

8.結論

間欠泉の発生メカニズムに添って作製した模擬実験装置で,間欠泉を人工的に再現することができた.ガラス管の管径や上部プレナムの蓄水位,水温の各パラメータが吹上げ高さ
と周期に及ぼす影響について解明することができた.

今回の実験した結果の中でデモンストレーション用の条件としては,周期が短く,噴出が激しかった管径 11.6mm,蓄水位 20mm,水温 80℃が最も優れていることがわかりました.

この実験装置を用いて来年度の工学祭で公開しようと考えていますので興味のある方はぜひ茨城大学日立キャンパスまでお越しください.熱湯が噴き出すのでビニール傘をお忘れなく.

参考文献

- (1) Griffith, P. ASME Paper, No.62-HT-39 (1962).
- (2) 中西重康, 日本機械学会論文集, Vol.44(1978), pp.4252-4262.
- (3) 日本機械学会編, 気液二相技術ハンドブック, コロナ社(1989)