

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
千葉工業大学	助教	三浦 正義

研究テーマ

バイオマスエネルギー有効利用のための高性能熱輸送デバイスの開発

研究報告

1. 研究の背景と目的

化石燃料枯渇・地球温暖化問題から、再生可能エネルギーが注目されている。そのなかで、バイオマスは気候による変動が小さいという特長を有しており、重要な再生可能エネルギー源としての役割を期待されている。そのなかで、バイオマスブリケットはバイオマス発電のみならず、石炭コークス代替燃料、暖房燃料などへの活用も期待されている。このバイオマスブリケットについて、燃焼挙動の詳細が報告者らにより明らかにされた(伊東ら, 2019; Ito *et al.*, 2020)が、バイオマスブリケットを燃焼し、熱エネルギーを取り出して工業的に利用するためには、有炎燃焼・チャー燃焼の燃焼形態により変動する熱を適切に輸送する必要がある。具体的には、供給側(バイオマスブリケット燃焼)と需要側のそれぞれにおいて、時間的に変動する温度と熱負荷に対応できる高効率な熱輸送技術が必要である。そのなかで、従来のヒートパイプと異なる熱輸送機構をもつ自励振動ヒートパイプが、今後の高性能熱輸送デバイスとして注目されている(Ma, 2015)。自励振動ヒートパイプとは加熱部と冷却部の間を何回も往復する流路内部を真空排気し、作動流体を流路内体積の約50%封入したものである(図1)。毛管力で形成された液柱が、加熱部と冷却部間の温度差に伴い生じる蒸気圧力差により自励的に振動する。本研究では、この自励振動ヒートパイプを基盤技術として、バイオマスエネルギーの有効利用を目指し、時間的に変動する熱負荷に対応することができる高効率な熱輸送デバイスを開発する。具体的には、自励振動ヒートパイプの流路内の液柱を強制振動させる。これにより、自励振動ヒートパイプの動作温度範囲が広がるとともに、液柱振動条件を制御することにより、熱輸送性能を変更できるようになる。本研究では、液柱振動をコントロールする方法として、磁性流体および磁場を用いることを提案する。磁性流体を自励振動ヒートパイプの作動流体として用い、磁性流体液柱に磁場を印加することで、熱輸送の制御を行う。これにより、バイオマスエネルギー有効利用のための高性能熱輸送デバイスの開発する。

2. 研究成果および考察

熱負荷変動による熱輸送特性の変化

風洞に設置された熱交換器型自励振動ヒートパイプ(Pulsating Heat Pipe, PHP; 図2)について、熱負荷変動による熱輸送特性の変化を実験的に評価した。種々の冷却空気流速 U における熱抵抗 R_{th} と熱負荷 Q の関係を図3に示す。図3では、同じ U に対する結果が同一のシンボルで示されており、塗りつぶしシンボルは Q を増加させた場合、白抜きシンボルは Q を減少させた場合である。はじめに $U=5$ m/s の結果について議論する。 Q を増加させた場合(●印)に着目すると、スタートアップ前($Q=10$ W, 20 W)における R_{th} は、スタートアップ後の Q における R_{th} と比較して、大きくなっている。

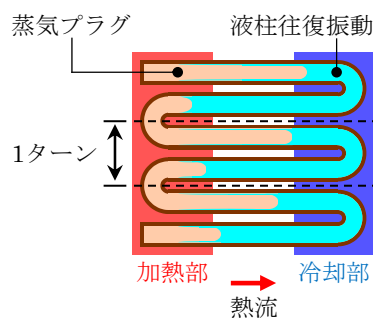


図1. 自励振動ヒートパイプ

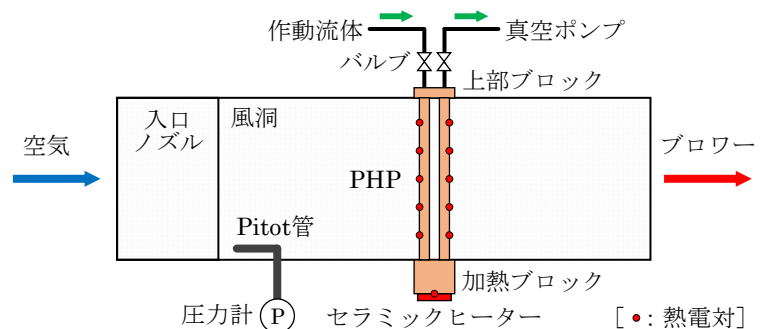


図2. 実験装置

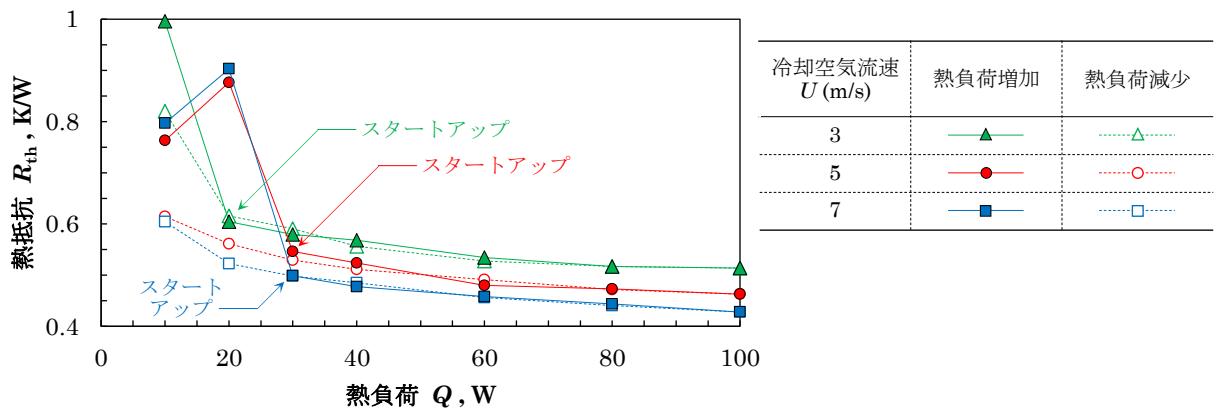


図3. 種々の冷却空気流速に対する熱抵抗と熱負荷の関係

これは、スタートアップ前では流路内の液柱の自励振動が生じず、PHP下部の加熱ブロックで作動液体が沸騰し上部の管群放熱部で凝縮した作動流体が加熱ブロックへ流下するというサーモサイフォンと同様な動作をするためであると考えられる。そして Q の増加に伴い、PHP下部において生じた蒸気泡により作動液体が管群放熱部へ押し上げられるようになり、スタートアップが生じると R_{th} は単調に小さくなっている。これは、流路内の液柱自励振動が激しくなるためであると考えられる。つぎに、 Q を減少させた場合 (○印) について議論する。 Q が 100 W から 30 W の間において、 Q を増加させた場合と減少させた場合で、同じ Q での R_{th} はおおよそ等しい。しかし、 Q が 30 W より小さくなると、 Q を増加させた場合における R_{th} と比較して、 Q を減少させた場合での同じ Q に対する R_{th} のほうが小さくなっている。この理由は、つぎのとおりである。前述したように、 Q を増加させた場合では、スタートアップするために PHP 下部の作動液体を押し上げる必要がある。一方 Q を減少させた場合では、すでに作動液体は管群放熱部側に押し上げられ、自励振動している状態で、スタートアップ熱負荷 ($Q=30$ W) となる。そしてスタートアップ熱負荷より熱負荷が小さい場合においても、作動液体が PHP 上部に押し上げられた状態が維持され、液柱の自励振動が継続したものと考えられる。以上のことから、 Q を増加・減少させた場合において PHP の熱輸送性能に差異が生じたものと考えられる。

冷却空気流速 U を変化させた場合について議論する。 $U=7$ m/s (■・□印)、3 m/s (▲・△印) のいずれの場合においても、前段落で議論した $U=5$ m/s (●・○印) の場合と同様に、スタートアップ熱負荷より熱負荷 Q が小さいとき、 Q を増加させた場合と比較して、 Q を減少させた場合のほうが、同じ Q での熱抵抗 R_{th} が小さくなっている。一方、 $U=7$ m/s の場合では、 $U=5$ m/s の場合と同じ $Q=30$ W でスタートアップしているが、 $U=3$ m/s の場合では $Q=20$ W でスタートアップしている。この理由はつぎのとおりである。前述したように PHP 下部で生じた蒸気泡が作動液体を PHP 上部へ押し上げて、スタートアップするものと考えられるが、 U が小さくなるほど PHP 上部の管群放熱部は冷却されず、発生する蒸気泡は消滅しにくく、作動液体を PHP 上部へ押し上げやすくなる。その結果、 U が小さくなると、スタートアップ熱負荷が小さくなったものと考えられる。

磁場印加による熱輸送特性のコントロール

図4に実験装置の模式図を示す。1ターン PHP を2段に重ねた2ターン PHP となっている。4本のガラス管流路 (外径 3 mm, 内径 2 mm, 長さ 107 mm) の両端は管継手により銅ブロックに接続されている。実験装置立体図 (図4(b)) に示すように緑色で塗りつぶされている部分が流路になって

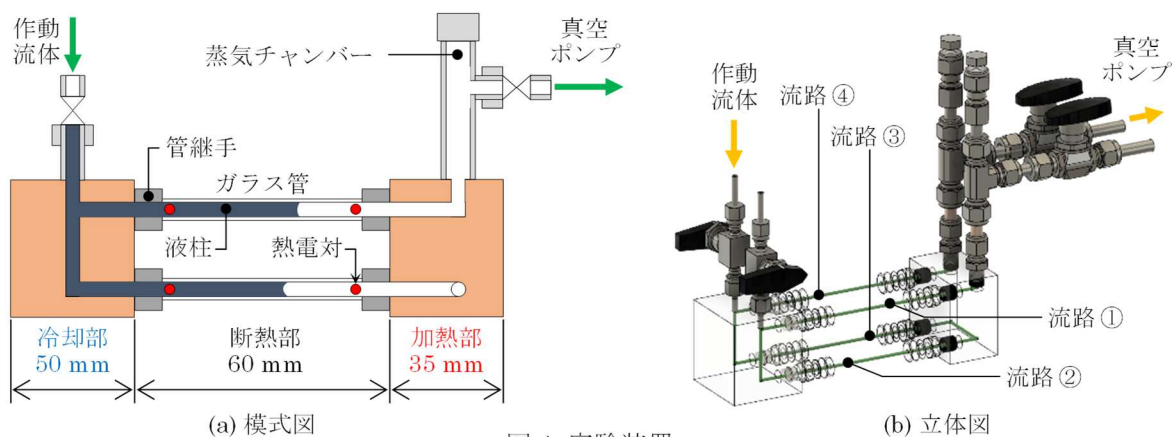


図4. 実験装置

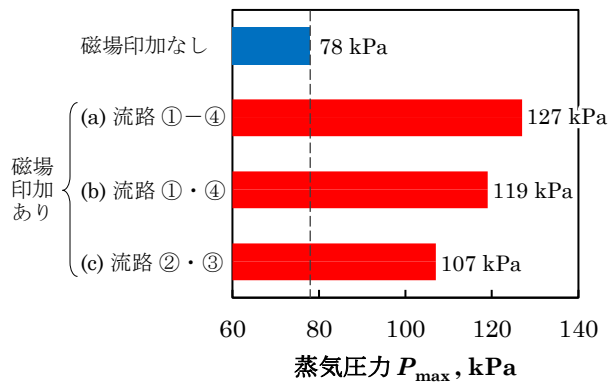


図 5. 磁場印加パターンと最大蒸気圧力の関係

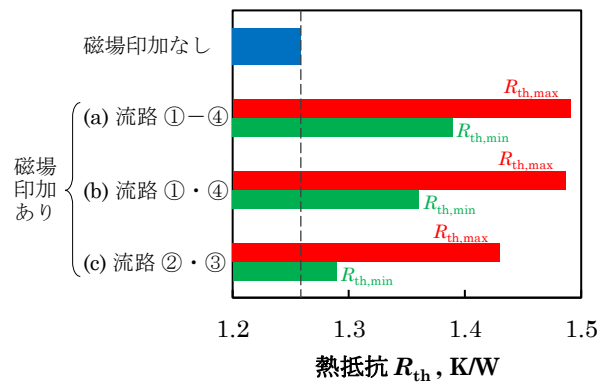


図 6. 磁場印加時における熱抵抗の関係

いる。図中の①-④は、ガラス管流路の番号を示している。加熱部銅ブロック中心部にはカートリッジヒーターが挿入されている。ヒーター投入電力は 66 W 一定とした。冷却部銅ブロックは、冷却水を流すことにより約 10 °C 一定となるようにした。作動流体は水ベースの磁性流体 M-300 (シグマハイケミカル, 飽和磁化 38 mT) を蒸留水で 40 wt% に希釈したものを使用した。以上の実験装置を用いて、PHP の磁性流体液柱が自励振動する場合において磁場を印加し、流路内液柱振動を静止させた。磁場印加は(a) 流路①-④全てに磁場を印加する場合、(b) 流路①・④に磁場を印加する場合、(c) 流路②・③に磁場を印加する場合の 3 条件で実験を行った。なお、磁場印加開始は、加熱部温度が 80 °C (液柱自励振動開始) となったときに行った。これら実験に対して加熱部温度・蒸気圧力の時間変化を測定するとともに、磁性流体液柱の振動状態について観察を行った。

はじめに、磁場印加パターン (a) 流路①-④全てに磁場を印加する場合 について議論する。磁場を印加しない場合と比較して、磁場を印加する場合の加熱部温度の上昇速度は大きく、液柱は間欠的に自励振動し、その際に加熱部温度が 3 °C 程度低下した。温度低下後は、液柱自励振動が停止し、再び加熱部温度は上昇し、連続的な液柱自励振動を再開した。これは、蒸気圧力差が磁気力を上回るからであると考えられる。つぎに、磁場印加パターン (b) 流路①・④ (流路端側) に磁場を印加する場合、(c) 流路②・③ (隣接ターン) に磁場を印加する場合 について議論する。磁場を印加した後に液柱振動が再開されたときの蒸気圧力 P_{max} を図 5 に示す。流路②・③に磁場を印加する場合 (パターン (c)) と比較して、流路①・④に磁場を印加する場合 (パターン (b)) の方が、液柱振動による熱輸送を抑止できる蒸気圧力が高くなることがわかる。この理由はつぎのとおりである。流路①・④に磁場を印加する場合 (パターン (b)) は作動流体の蒸発に伴う圧力擾乱が液柱で挟まれた蒸気プラグの 1 か所のみで起こるのに対して、流路②・③に磁場を印加する場合 (パターン (c)) は圧力擾乱が流路両端の蒸気プラグの 2 か所で起こる。このことから、流路①・④に磁場を印加した場合 (パターン (b)) の方が、より高い蒸気圧力まで液柱振動を抑えることができたものと考えられる。最後に熱抵抗について議論する。図 6 に種々の磁場印加パターンにおける熱抵抗を示す。図 6 中の $R_{th,max}$ は磁場印加中の最大の熱抵抗、 $R_{th,min}$ は磁場印加中の液柱の連続的な自励振動再開後の最小の熱抵抗である。まず、磁場印加パターン(a)・(b)に注目すると、 $R_{th,max}$ が近い値となった一方で、 $R_{th,min}$ には差が見られた。これは磁場を印加する流路数の違いによるものと考えられる。磁場印加パターン(c)については磁場印加パターン(a)・(b)と比較して $R_{th,max}$ ・ $R_{th,min}$ のいずれも小さく、 $R_{th,min}$ が磁場印加なしの場合と近い値となっており磁場印加パターンにより、PHP の熱輸送性能が変化することがわかる。

3. 将来展望

本研究により、バイオマスブリケット燃焼による熱エネルギーの輸送を目指した熱交換器型の自励振動ヒートパイプの熱輸送特性の詳細について明らかにするとともに、磁性流体と磁場を用いた自励振動ヒートパイプの熱輸送性の制御実現可能性を示すことができた。今後は、自励振動ヒートパイプの実機に対して、磁性流体と磁場を用いた液柱振動制御による熱輸送制御モデルについて構築する。これにより変動する熱負荷に対して安定した熱輸送を継続的に行うことができるようにするとともに、所望の熱輸送性能を実現できる自励振動ヒートパイプについて完成させる。

4. 研究発表

- [1] 三浦正義, 中尾尚也, 星野裕太, 伊東弘行, 「3次元自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に及ぼす熱負荷変動の影響」, 『日本機械学会熱工学コンファレンス 2022 講演論文集』, (2022), pp. 1-4.