多孔体内マイクロメニスカス挙動に基づく高性能ループヒートパイプ蒸発器の開発

Development of high heat-transfer evaporator of loop heat pipe based on observation of micro-meniscus behavior in porous media

研究代表者　豊橋技術科学大学　助教　西川原　理仁
Masahito Nishikawara

Loop heat pipes (LHPs) and capillary pumped loops (CPLs) are two-phase heat-transfer devices using evaporation and condensation and are widely applied to various thermal control devices such as in spacecraft, automobiles, PCs, LED, and power semiconductor devices. However, thermos-fluid behavior in the capillary evaporator is not understood fully, then the optimum design method is not established. So, in this work, a visualized LHP using a glass tube in the evaporator case was fabricated and liquid-vapor interface behavior in the visualization evaporator was observed. As a result, relationship between the interface behavior on the contact surface between the evaporator case and the porous wick and heat-transfer coefficient of the evaporator was found. In addition, the LHP using copper porous media are developed. Effects of wick shape, porous structure of the wick, and contact state between the evaporator case and wick on the evaporator heat-transfer coefficient were evaluated experimentally.

要旨

ループヒートパイプ（LHP）は，蒸発および凝縮を利用した熱輸送デバイスであり，電子機器の冷却，排熱利用などへの応用が期待されているが，蒸発器内の熱流動現象が十分に理解されておらず，設計方法が確立されていない．そこで本研究では，蒸発器ケースにガラス管を用いた可視化 LHP を製作し，蒸発器内の気液界面挙動を観察した．観察によってケースと多孔体の接触面における気液界面と蒸発器の熱伝達機構との関係を明らかにした．さらに，実用を想定した銅多孔体を用いた LHP を製作した．ウィック形状，多孔体空隙特性，ケースとウィックの密着具合を変化させ，それぞれが蒸発器熱伝達率に与える影響を実験的に調査し，蒸発器の高性能化に成功した．

1．まえがき

ループヒートパイプ(LHP)は，作動流体の相変化を伴う二相流ループシステムであり，潜熱を利用しているため大容量の熱輸送が可能である．また，ウィックと呼ばれる多孔体中で働く毛細管力によって流体の循環を行うため電力が不要であり，効率的な熱輸送デバイスである．これらは次世代宇宙機熱設計における基盤技術として注目されている．また，宇宙分野だけでなく近年民生分野，電子機器の発熱部における冷却装置への応用が期待されている．応用分野は，PC などの電子機器の冷却，自動車排熱利用，パワー半導体の冷却などがある．さらに，熱エネルギー輸送技術が発展することで熱エネルギーの有効利活用が期待されている．

パワー半導体の一つである絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)は，今日の電気列車のトラクションシステムにおいて最先端のパワーエレクトロニクスである．各 IGBT モジュールによって放散される熱電力の大きさのオーダーは最大熱流束 20 W/cm^2 程度であり，上限温度は 150 ℃程度である．その熱管理は IGBT モジュールの寿命に多大な影響を与えることから，これまでドライパネル，ヒートパイプとコールドプレート，単相機械ポンプ式コールドプレートなどの冷却方法が使用されてきた．今後はより発熱密度が高くなると予想され，高効率な冷却装置が必要となる．

LHP の概略図を図 1 に示す．LHP は蒸発器と凝縮器が蒸気管と液管とで繋がれリザーバである補償室(CC)が蒸発器の上流側に設置された構造をもつ．内部には作動流体が封入され，蒸発器内のウィックと呼ばれる多孔体で毛細管力を発生させ流体を循環し

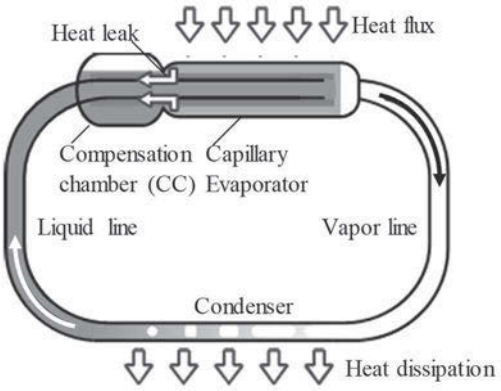


図1　LHP 概略図

ている．そのため外部駆動力が不要であること，相変化による高効率な熱輸送，ループであるため輸送距離が従来のヒートパイプより長くできること，簡易なパイプで構成されるためレイアウトの自由度が高いことなどが特長として挙げられる．蒸発器以外は簡易な構造であるため，蒸発器は LHP の設計を行う上で重要な構成要素である．蒸発器では液管からの還流液が熱負荷によって気体に相変化する．従って，蒸発器内流動は相変化を伴う多孔体内の気液二相流となる．ウィックの実効熱伝導率は気相と液相で異なるため，多孔体内気液分布と蒸発器熱伝達特性は密接に関係していると考えられる．そのため，蒸発器設計理論を構築する際，ウィック内気液分布挙動を考慮すべきであるが，その物理現象の解明は十分ではない．また，LHP 起動特性は，初期の蒸発器内の気液分布によって異なり，グルーブおよび蒸気管入口が液体で飽和した場合，蒸発器壁面が過熱され核沸騰および温度オーバーシュートが起きる[1]．しかし可視化によって直接蒸発器内の気液分布の影響は調べられていなかった．そのため，本研究では蒸発器ケースにガラス管を用いた可視化 LHP を製作し，グルーブ内が液で満たされているときの起動特性および気液界面挙動を観察する．またウィックと蒸発器ケースの接触面の気液界面挙動が熱負荷によってどのように変化するか，またそれが蒸発器の熱伝達率にどのように寄与するのかを明らかにするため調査した．さらに，パワー半導体 IGBT などを対象とした高熱流束での適応を目指して銅多孔体を用いた LHP を設計・製作し性能を評価した．熱輸送性能向上を目的としてウィック形状，多孔体空隙特性，ケースとウィックの密着具合を変化させ，それぞれが蒸発器の熱伝導率に与える影響を調査した．

2．実験装置

2．1　可視化 LHP

可視化 LHP は高熱流束の現象まで観察するため，毛細管限界における蒸発器への熱流束が 20 W/cm^2 となるように設計した．構築した可視化 LHP を図 2，可視化蒸発器を図 3，LHP 各寸法を表 1 に示す．本研究では蒸発器内部の観察を行うため，蒸発器ケースには透明な石英ガラス管，ウィックには石英ガラス多孔体（細孔半径 3.2 μm，空隙率 37 %）を用いた．蒸発器ケースとウィックは再焼結により結合されており，細孔径に対応する毛細管圧まで駆動可能であることをバブルポイント試験により確かめた．熱負荷は蒸発器外側に成膜された ITO(透明導電膜，酸化インジウムスズ)ヒータにより与えられる．凝縮器は，冷媒によって冷却された冷却板によって冷却器から排熱する．LHP 各点の温度は T 型熱電対によって計測

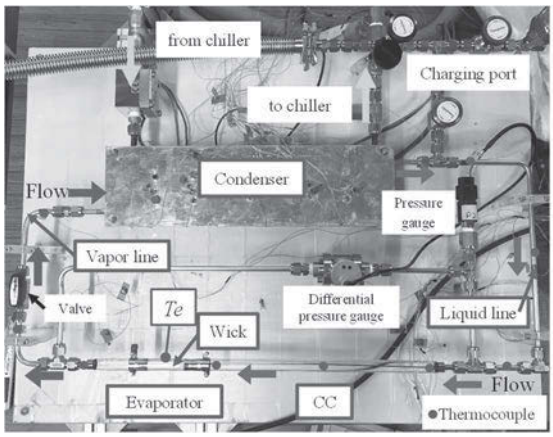


図2　可視化 LHP 全体図

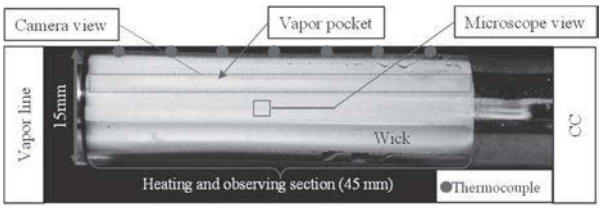


図3　可視化蒸発器(100 W 定常時)

表1　可視化 LHP 各寸法

	Wick	Evaporator	VL	Condenser	LL
Length[mm]	50	50	440	950	510
O.D.[mm]	12	15	6.4	6.4	6.4

し，蒸発器は 7 点の平均温度を蒸発器温度 Te とし，蒸発器前後の圧力を計測した．蒸発器内の様子はマイクロレンズを装着した一眼レフカメラまたはマイクロスコープにより観察した．

可視化実験は，熱負荷 5-100 W (0.29-5.9 W/cm^2) にて核沸騰起動および熱負荷ステップ動作中の蒸発器内の様子を観察した．作動流体にはアセトンを用いた．コンデンサは-5 ℃の冷媒で冷却される．熱負荷 5-25 W の観察実験では蒸気管に設置したバルブにより圧力損失を与えている．

２．２　銅多孔体を用いた LHP

電車での搭載を想定し，サイズは参考文献[2]を参考に 0.5 m×0.5 m×1 m に収まるようにし，熱流束とウィック面積から最大熱輸送量が 1000 W となるよう設計を行った．凝縮器での冷却方法は電車の走行風による空冷を排熱方法としてプレートフィンチューブ式を採用し設計した．また蒸発器については 2 種類の製作方法，グルーブ形状の三相界線長さ，粉末焼結多孔体，繊維焼結多孔体の空隙構造の違いに着目し製作を行った．

製作方法について，①焼き嵌めおよび②再焼結を利用する 2 種類の方法で製作した．①は，ウィックケースをバーナーで加熱し，一方でウィックを液体窒素で冷却し収縮させ，熱膨張・熱収縮による寸法差を利用してウィックをケースに挿入する方法であり，蒸発器の製作方法としては一般的である．②ではウィックケース内を低真空状態に保ちつつ一定の軸回転を与え，バーナーで軟化温度まで加熱する．それによりケース内外での圧力差により縮径が生じ内部の多孔体に密着させ，さらに加熱し再焼結させることで管材と多孔体を結合させる方法である．従来の方法である焼き嵌めと比較して，多孔体と管材との密着性，シール性をより高めることで熱伝達率の向上を図る新しい蒸発器製作方法である．再焼結を利用して製作した蒸発器のバブルポイント試験の結果，蒸発器の蒸気管側から窒素ガスを圧入させた際，CC 側から気泡が発生する圧力が焼き嵌め蒸発器の 2 kPa から 13 kPa まで引き上げられシール性の向上を確認できた．グルーブ形状については，図 4 に示すように 2 種類のグルーブ形状のウィックを製作した．一つ目は軸方向に幅 2 mm，深さ 1 mm，長さ 45 mm の溝が計 10 か所存在する矩形グルーブ，二つ目は軸方向に幅 0.4 mm，深さ 1 mm，長さ 45 mm の溝が 16 か所，周方向に幅 0.3 mm，深さ 1 mm の溝が 56 か所のマイクログルーブである．どちらのグルーブ形状もケースと接している面積は同じであるが，マイクログルーブはウィック，ケース，グルーブの三相界線の長さが矩形グルーブの 5．5 倍となっている．三相界線上では熱流束が集中するので，長くすることで熱伝達率の向上を図る．

作動流体はアセトンを使用した．図 5 に製作した LHP および熱電対での温度測定箇所を示す．また，使用した銅ウィックの空隙特性および製作した LHP の各寸法を表 2，3 に示す．表 4 に実験条件を示す．図

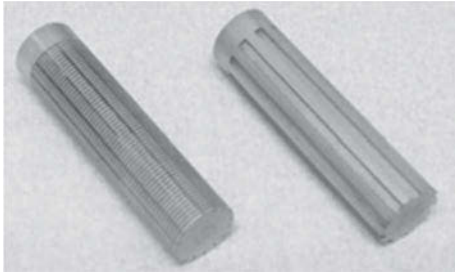


図 4　ウィック（左：マイクログルーブ，右：矩形グルーブ）

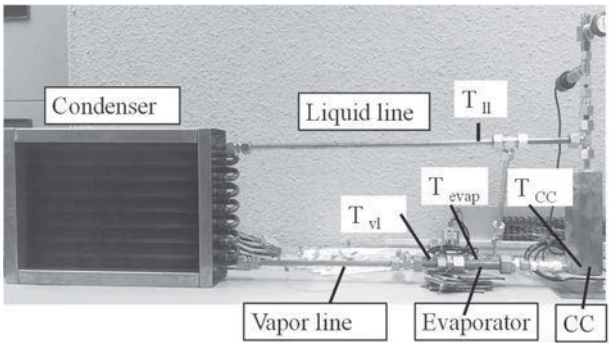


図 5　製作した LHP および熱電対の位置

表 2　ウィック空隙特性

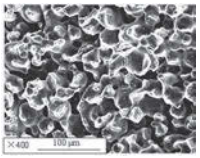
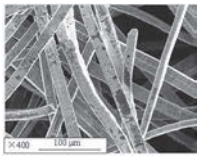
	粉末焼結多孔体	繊維積層多孔体
細孔半径 [μm]	4.0	30
空孔率	0.23	0.42
SEM 画像		

表3　銅LHP各寸法

	長さ［mm］	外径［mm］
蒸発器	50	15
蒸気管	310	9.53
凝縮器	5600	9.53
液管	540	9.53
CC	150	60

5に示したLHPと図2で示した可視化LHPを使用した．条件1，2でグルーブ形状の比較，条件3，4でケースとウィックの密着強さの比較，条件1，5でウィックの空隙特性の比較を行う．

3．結果と考察

3．1　可視化実験

初期気液分布（グルーブ領域における気相有無）の違いによる起動に必要な最小熱負荷を調べた．グルーブに気相が存在する場合は3 Wで起動するが，気相無しでは10 W以上の負荷でなければ核沸騰起動しなかった．初期気液分布によって起動に必要な最小熱負荷が異なることが分かった．また，熱負荷10，40，100 Wで核沸騰起動における気液界面挙動および温度応答を調べた．各熱負荷における核沸騰起動時の蒸発器温度を図6に示す．熱負荷が高くなるにつれて核沸騰開始が早くなり，起動が最も遅い熱負荷10 Wでは加熱開始から300 s後に核沸騰が観察された．熱負荷100 Wでは蒸発器温度の上昇過程で核沸騰が観察されたため，温度の急下降が見られなかった．過熱度を蒸発器温度と飽和温度との差で算出したところ，最大過熱度はそれぞれ33 ℃(10 W)，68 ℃(40 W)，108 ℃(100 W)であった．核沸騰起動では，瞬間的にウィック全体がドライアウトし，その後CC内の液が浸透していく挙動を観察した．

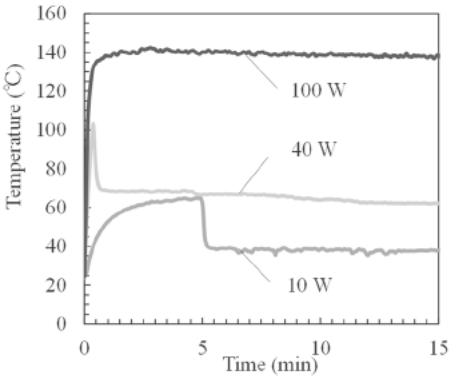


図6　各熱負荷における核沸騰起動時の蒸発器温度

熱負荷5–25 Wにおいてウィックと蒸発器ケースの接触面およびメニスカス（三相界線に形成される濡れ）を図3で示した領域をマイクロスケールで観察した．マイクロスコープによる観察結果を図7，各熱負荷に対する蒸発器熱伝達率およびメニスカス面積を図8に示す．蒸発器熱伝達率は蒸発器から蒸気への熱伝達率でガラスの熱抵抗は差し引いて算出した．メニスカス面積は画像処理により求めた（図8に示す青い領域）．熱負荷12.5 Wから15 Wの増加により，核沸騰が生じ，ウィックと蒸発器ケースの接触面から液相が排出され，気液二相状態となり，蒸気が周期的に噴出される様子が観察された．ここで，ウィックとケースの接触面の状態の遷移前を状態A（接触面が液相のみ），遷移後を状態B（接触面が気液二相）とする．状態Aおよび状態Bにおいて，熱負荷増加にしたがってメニスカス面積が減少することを観察した．この傾向は，蒸発器熱伝達率の結果と一致した．また，状態Aから状態Bへ遷移する熱負荷と蒸発器熱伝達率が急激に増加する熱負荷が一致することが明らかとなった．状態Aでは三相界線に形成されるメニスカスの気液界面から蒸発が支配的であり，熱

表4　銅LHPでの実験条件

	グルーブ形状	蒸発器製作方法	多孔体構造	使用したLHP
1	矩形グルーブ	焼き嵌め	粉末焼結	可視化LHP
2	マイクログルーブ	焼き嵌め	粉末焼結	可視化LHP
3	マイクログルーブ	焼き嵌め	粉末焼結	製作したLHP
4	マイクログルーブ	再焼結	粉末焼結	製作したLHP
5	矩形グルーブ	焼き嵌め	繊維積層	製作したLHP

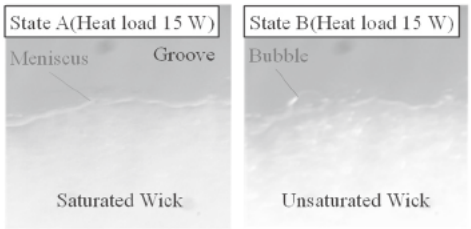


図7　マイクロスコープによる観察結果

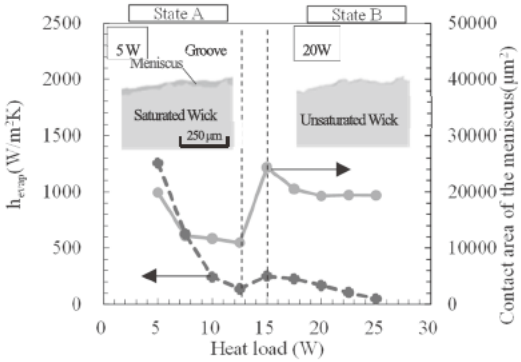


図8　各熱負荷における熱伝達率およびメニスカス面積

負荷増加によるメニスカス面積の減少により熱伝達率が低下する．状態 B ではメニスカスおよび接触面で新たに形成された気液界面からの蒸発により，小さなメニスカスでも高い蒸発器熱伝達率を示した．

熱負荷 20-100 W においてウィックとケースの接触面を観察した．接触面の画像を二値化処理して気相領域と液相領域を判別し，飽和度を求めた(濡れている状態が飽和度 1 となる)．二値化画像を図 9，各熱負荷における熱伝達率と飽和度の関係を図 10 に示す．蒸発器内の観察により，熱負荷 20 W において状態 A から状態 B への遷移と熱負荷増加によって蒸気ポケットが観察された．蒸気ポケットは閉じているように見えるが，蒸気がグルーブに抜けている様子がマイクロスコープの観察によって確認された．熱負荷増加による飽和度の減少に伴い，熱伝達率が低下する．ウィックとケースの接触面において，熱抵抗の大きい蒸気相が生成されたため低い熱伝達率を示した．

実験結果および蒸発器内の観察結果に基づき，ウィックと蒸発器ケースの接触面における熱流動形態についてまとめる．図 11 に接触面の各状態での熱流動形態の模式図を示す．図 11(a) の状態 A について説明する．まず低熱負荷では，三相界線に形成されるメニスカスの気液界面から蒸発が生じる．それが蒸発

図9　ウィックとケースとの接触面の二値化画像

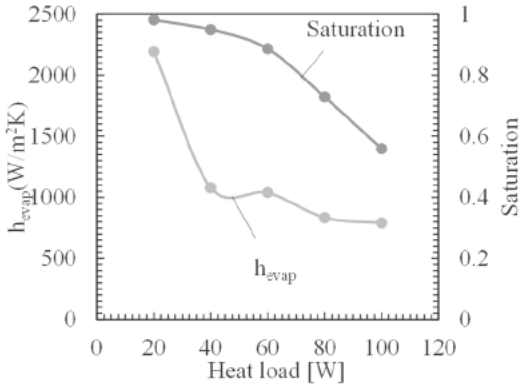


図 10　各熱負荷における蒸発器熱伝達率と飽和度の関係

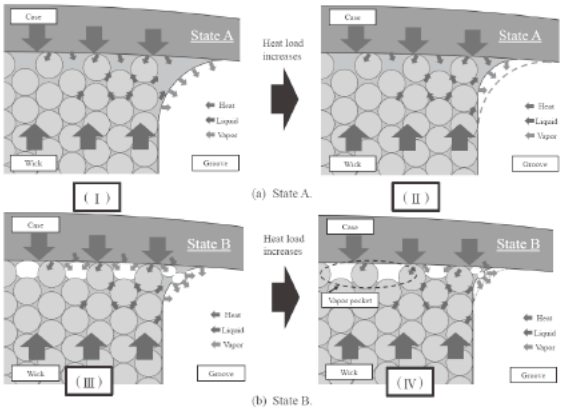


図 11　蒸発器ケースとウィックとの接触面付近における熱流動挙動

器全体の熱伝達において支配的である(Ⅰ)．熱流束の増加によりメニスカスが縮小すると，蒸発面積の減少により蒸発器熱伝達率が低下する．ウィックと蒸発器ケースの接触面は液相で満たされており，そこからの蒸発はない(Ⅱ)．続いて熱流束が高くなると，図 11(b) のようにウィックと蒸発器ケースの接触面あるいはウィック内部で核沸騰が生じ，ウィックと蒸発器ケースの接触面に気相領域が生まれ気液二相状態となる．新たな気液界面の形成により，ウィックと蒸発器ケースの接触面でも蒸発が起こる．発生した蒸気はグルーブ方向に押し出され，メニスカスの気液界面からバブルとなって蒸気が排出される．

メニスカスとウィックと蒸発器ケースの接触面に新たな気液界面からの蒸発および沸騰により，小さなメニスカスでも高い蒸発器熱伝達率を示した(Ⅲ)．状態 B において熱負荷を増加させた中熱負荷領域では，ウィックと蒸発器ケースの接触面の気相領域が拡大し，蒸気ポケットが形成される．ウィックと蒸発器ケースの接触面に熱抵抗の大きい蒸気相の生成とウィックと蒸発器ケースの接触面にあった気液界面の減少による蒸発量の低下によって熱伝達率が低下する(Ⅳ)．さらに毛細管限界付近となるとウィックと蒸発器ケースの接触面が蒸気で満たされる．また，蒸気管と液管の差圧がウィックの毛細管圧力に近いためCCおよびコアにある作動流体を吸い上げることができずウィック表面で気液界面の後退が起こり，ウィックが熱抵抗の大きい蒸気相に覆われるため，さらなる熱伝導率の低下が起こる．

Odagiri らの大気圧開放状態の実験では低熱流束領域では熱負荷の増加に伴って熱伝達率が増加し，中熱流束で最も高い値に到達し，ある熱流束を境に減少，高熱流束において小さな熱伝達率に推移することが明らかになっている[3]．本実験では，熱負荷が小さい場合では熱負荷の増加に伴って熱伝達率が緩やかに減少した．その後ある熱負荷で熱伝達率が急激に上昇し最も高い値を示し，その後減少，高熱負荷では小さな熱伝達率に推移する結果となった．あるところで熱伝達率がピーク値となり，その後急激に値が降下する点においては一致する結果であったが，低熱流束領域における熱伝達率の推移は異なる結果となった．

3．2　　銅LHP実験

図 12 に条件 5 での実験結果を示す．横軸が時間，縦軸が熱負荷と温度を示している．実験開始から 500 秒程度で蒸発器温度 Tevap が急激に下がり，蒸気管温度 Tvl が上昇していることから蒸発が開始し起動したことが分かる．熱負荷を増加させていくと凝縮器温度 Tcond が増加していることから蒸気が下流に侵入し凝縮二相領域が伸びていることが分かる．

図 13 に各条件での蒸発器熱伝導率の比較を示す．熱伝達率は負荷した熱流束を蒸発器と蒸気管の温度差で割り算出した．マイクログルーブ 2 は矩形グルーブ 1 と比較して 40 W で 1.8 倍，60 W で 1.5 倍となり，熱伝達率を向上させることが出来た．再焼結で製作した蒸発器 4 は焼き嵌めで製作した蒸発器 3 と比較して 20 W の低熱負荷時のみ熱伝達率が 2.3 倍と向上した．繊維積層多孔体 5 は粉末焼結多孔体 1 と比較して蒸発器熱伝達率が高く，最大熱負荷も大幅に上昇した．本LHPは設計では 50 W/cm^2 に対応できるようにしたが実際には 9 W/cm^2 までしか到達できなかった．これは作動流体に水ではなくアセトンを使用したことが原因であると考えられる．水はアセトンと比較してメリット数（表面張力×潜熱/動粘性係数）が 10 倍程度高いことから，水を使用することで毛細管限界が高くなり単純な比で考えると 90 W/cm^2 まで熱輸送することが期待できる．しかし，図 12 の結果より高熱負荷においては，CC 及び液管の温度が蒸気管の温度と同程度となっていることから蒸気が CC 内で発生していることが予想される．これは重力

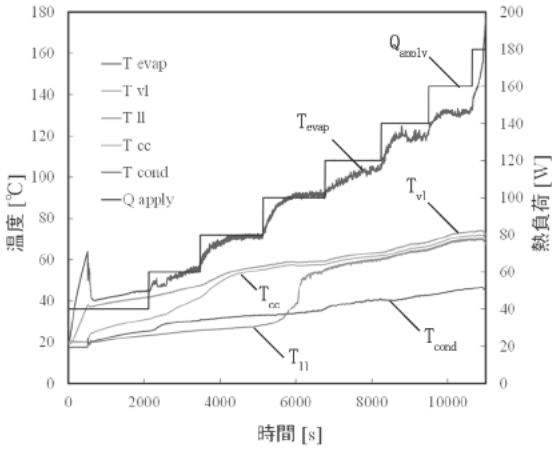


図 12　構築した銅-水 LHP での実験結果

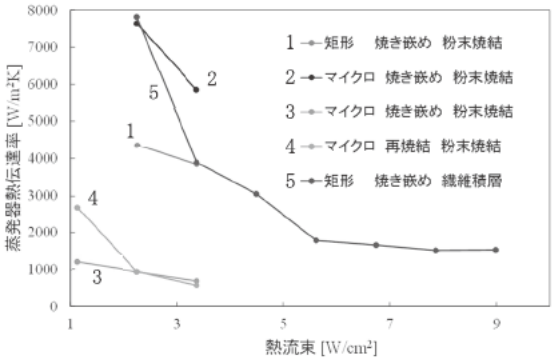


図 13　蒸発器熱伝達率

方向に対する蒸発器，CC，液管の配置によって促進されたものだと考えられ，凝縮器の熱抵抗を悪化させる原因となる．そのため今後は各要素の構造，配置方法などの工夫が必要である．

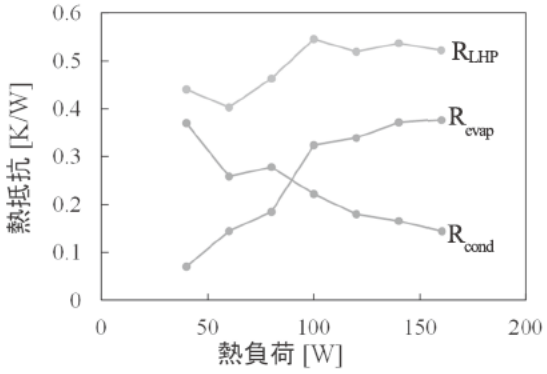


図14　銅LHPの熱抵抗

最後に図14に蒸発器，凝縮器，LHPの熱抵抗を示す．条件5における結果である．高熱負荷では蒸発器の熱抵抗が大きくなっているため，高熱流束域での蒸発器熱伝達率のさらなる向上が必要となる．熱負荷160 W，熱流束9.0 W/cm^2，において蒸発器熱抵抗は0.4 K/W，凝縮器熱抵抗は0.1 K/W，LHPトータルでは0.5 K/Wとなった．

4．結論

LHP蒸発器内気液界面挙動を解明するため可視化蒸発器を有するLHPを構築し，気液界面挙動の観察を行った．また銅多孔体を用いたLHPを構築し，ウィック形状，空隙特性，製作方法の工夫によって蒸発器の高性能化を試みた．以下の結果を得た．

1) 核沸騰起動時における気液界面挙動を観察した．熱負荷が高いほど核沸騰開始時間は早く，最大過熱度は大きくなる．また，初期気液分布によって起動に必要な最小熱負荷が異なる．
2) 低熱負荷領域では，メニスカスサイズが熱伝達率に影響を与える．熱負荷増加により核沸騰が生じ，接触面で新たに形成された気液界面とメニスカスにより高い熱伝達率を示す．さらに熱負荷が増加すると，接触面の蒸気ポケットが形成され，低い熱伝達率を示す．
3) グルーブ形状の違いによる比較実験では，蒸発器の三相界線を長くすることで蒸発器の熱伝達率を向上させることが出来た．
4) 再焼結を利用し製作した蒸発器では，焼き嵌めを利用したものより熱伝達率を向上させることが出来た．
5) 粉末焼結よりも繊維焼結多孔体の方が蒸発器熱伝導率，最大熱流束ともに高かった．

発表論文

[1] 西川原　理仁，上田 洋祐，柳田 秀記，“核沸騰起動におけるループヒートパイプ蒸発器の気液相分布挙動”，日本機械学会学術誌，2018.（アクセプト）

[2] M. Nishikawara, K. Otani, Y. Ueda, and H. Yanada, Liquid-vapor phase behavior and operating characteristics of the capillary evaporator of a loop heat pipe at start-up, International Journal of Thermal Sciences, 2018.（アクセプト）

[3] 鹿野晃史，西川原理仁，柳田秀記，銅ウィックを有する高熱流束ループヒートパイプの開発，日本設計工学会東海支部平成２９年度研究発表講演会，名古屋，pp. 1-2，2018年3月.

[4] 上田洋佑，西川原理仁，柳田秀記，可視化蒸発器を用いたループヒートパイプの起動特性と熱輸送機構に関する研究，日本設計工学会東海支部平成２９年度研究発表講演会，名古屋，pp. 3-4，2018年3月.

[5] 西川原理仁，上田洋祐，柳田秀記，ループヒートパイプ蒸発器の動的気液界面挙動の観察，混相流シンポジウム 2017，調布，E122，2017年8月.

[6] 上田洋祐，西川原理仁，柳田秀記，大谷浩輔，ガラス管蒸発器を有するループヒートパイプの起動時における気液界面挙動の観察，第22回動力・エネルギー技術シンポジウム，豊橋，B224，2017年6月.

[7] 山田裕也，西川原理仁，柳田秀記，大谷浩輔，上田洋祐，ループヒートパイプ蒸発器内の蒸発メニスカスの観察と熱流動解析，第54回日本伝熱シンポジウム，大宮，C131，2017年5月.

[8] M. Nishikawara, K. Otani, Y. Ueda, and H. Yanada, Fabrication and Visualization of Loop Heat Pipe Evaporators Using Transparent Tubes, Asian Conference, Mar., 2017.

[9] 大谷浩輔，上田洋佑，西川原理仁，柳田秀記，ガラス管蒸発器を有する可視化ループヒートパイプの構築，日本機械学会熱工学コンファレンス2016，松山，F233，2016年10月.

参考文献

（1） Jentung Ku, Loop Heat Pipe Startup Behaviors, 46th Int. Conf. on Environmental Systems, 2017.

（2） 中沢洋介,逸見琢磨,青山育也,東芝レビュー,Vol.58 No.9, pp.10-13, 2003.
（3） K. Odagiri, M. Nishikawara, H. Nagano, Microscale infrared observation of liquid-vapor interface behavior on the surface of porous media for loop heat pipes, Applied Thermal Engineering Vol.126, pp. 1083-1090, 2017.