

往復動による高伝熱可能なヒートパイプ (自動車用エンジンピストン適用検討)

Heat Pipe with High Heat Transfer Rate by Reciprocating Motion
(Examination of Application to Automotive Engine Piston)

松 本 謙 司¹
Kenji MATSUMOTO

要 旨

一般にヒートパイプは振動や傾斜等によって、気液の流れが阻害され、極端に熱伝導率が低下するため、自動車やオートバイ等で使用されている事例がない。

そこで、我々は配管内部の摩擦エネルギー損失を変え、自励振動を強制的におこなう事によって気液二相の流れを制御し、熱輸送量を低下させない新たなヒートパイプを提案した。

往復動による振動を与え、熱伝達率を計測した結果、静止状態の熱伝達率に比べ 1.6 倍の熱伝達率を示す事が明らかとなった。そのメカニズムは、ヒートパイプ中に密封した液体が、初期の段階で往復により細かな液滴に分解する。その後、この液滴の状態では、ゲートとの接触しながら巨視的に一定の方向の駆動力を得て流れが一方向になる。更にループする事で気液が衝突する事がなく、凝縮領域から蒸発領域への気液の移動を可能にしたと考えている。

今回はエンジンピストンに適用した場合の熱解析を実施し、ピストンヘッド中央温度を 39 K 下げる事ができ、 ΔT も 140 K から 75 K まで低下させる事ができたため、サーマルストレス低減効果が期待される。

ABSTRACT

The flow of gas and liquid in heat pipes is generally impaired by factors such as oscillation and inclination, with the result that the heat transfer becomes excessively low. For this reason, there are no known cases of heat pipe use in cars and motorcycles, etc.

The authors, therefore, proposed a new heat pipe that controls the two-phase flow of gas and liquid without reducing the amount of heat transport, by reducing the friction energy loss inside the pipe and forcibly inducing self-oscillation.

Measurement results in the condition with oscillation applied by reciprocating motion showed an increase in the heat transfer coefficient by a factor of 1.6 compared with that at standstill. That mechanism is thought to be as follows. In the initial stage, the liquid sealed in the heat pipe is broken up into fine droplets by reciprocation. The droplets then acquire drive force in a constant direction macroscopically while contacting the gates, producing a unidirectional flow. Further, a loop flow channel enables transfer of gas and liquid from condensed areas to evaporation areas without gas-liquid collision.

This study performed thermal analysis of the case when applied to an engine piston. The results showed that the temperature at the piston head center was reduced by 39 K and ΔT was also reduced from 140 K to 75 K, and thus thermal stress reduction effects can be anticipated.

1. ま え が き

近年、低燃費や環境適合性を目指した EV や HV のモーターや power control unit (PCU)、バッテリー等の冷却方法はその性能向上や変形を抑える等の理由から重要な課題の一つである⁽¹⁾⁻⁽³⁾。通常、冷却溝の工夫や冷却水の変更、モーター表面へのオイルジェット冷却等直接的や間接的にこない、温度制御するが、現在使用している冷却媒体の

熱伝達率が H₂O や NH₃ に比べ比熱が低い事もあり、冷却効果が小さい⁽⁴⁾。

一方コンピューターやエアコンで利用されているヒートパイプは上記媒体の熱伝導率に対し、十数倍の熱伝導率である事は周知の事実である⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。しかし、ヒートパイプは構造上、振動等によって気液の流れが阻害され、極端に熱伝導率が低下する事が避けられない⁽⁹⁾。そのため、車載部品の冷却に使用されている報告がない。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所, 博士 (工学)

そこで、(1)配管内部の摩擦エネルギー損失を変える、(2)自励振動を強制的におこなう事によって気液二相の流れを制御し、熱輸送量を低下させず、高熱伝達率を確保する事で冷却用ヒートパイプが新たに開発できないかを検討した。検証には、与える振動として比較的制御しやすい往復動とし、往復しゅう動試験機を用いてストローク幅 50 mm で実施した。

更にそのヒートパイプを Internal Combustion Engine (ICE) 用エンジンピストン冷却に用いた場合の効果についても検証を実施したので報告する。

2. オリジナルヒートパイプの設計、試作

Fig. 1 に市販のヒートパイプとオリジナルのヒートパイプを示す。市販のヒートパイプは配管内部に金網タイプのウィックが入っているタイプとした。往復しゅう動試験機に取付けるため、同一形状の試験片にした。

当初、配管内部に金網タイプのウィックが入っている市販のヒートパイプとオリジナルのヒートパイプの熱伝導率比較を検討する予定であったが、過去の報告⁽²⁰⁾にもある様に市販のヒートパイプを振動させるとそのパイプの断面積分の熱伝導率に低下してしまうため、試験結果の比較では無垢のアルミ円柱材との比較とした。なおアルミ円柱材はアルミニウム 4000 系 NP12P を用いた。

Fig. 2 に市販のヒートパイプの原理を示す。市販のヒートパイプ⁽¹⁰⁾は容器内に少量封入された作動液体が、蒸発部で蒸発し、管中央を通り凝縮部へ到達、液体となり、容器内壁に取り付けるウィックは目の細かい金属メッシュで毛細管力によって水が蒸発部へ移動しつつ熱移動させる。

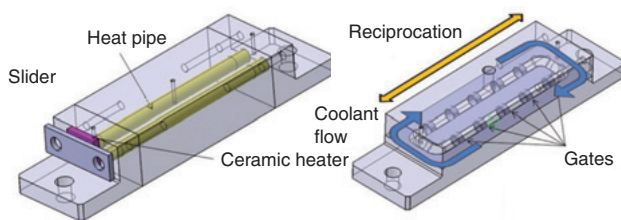


Fig. 1 Structures of specimen using commercially available heat pipe (left) and specimen using newly designed heat pipe (right)

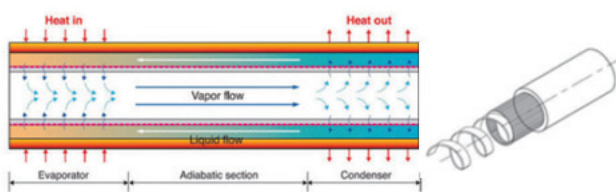
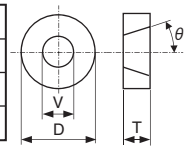


Fig. 2 Working principle of wick heat pipes

Table 1 Heat pipe specifications

Pipe length	144 mm
Pipe size	Φ8 mm
Number of gates	10
Gate size	D9 x T5 x V5.3, θ15°



オリジナルのヒートパイプは一定間隔に突起 (Gates) を用いて往復動時の液体と気体の流れを制御する配管構造とし、配管内に純水 / 空気を満たした。Fig. 3 に構造を示す⁽¹¹⁾。

Fig. 3 管断面を Fig. 4 を示す。オリジナルヒートパイプは振動をおこなう事で、液体が管内壁に沿って移動し、気体は液体とぶつかる事で細くなり、二相流になると予想し、設計をおこなった。

Table 1 にヒートパイプの仕様を示す。

また、Fig. 5 にオリジナルヒートパイプの試作工程を示す。

ヒートパイプの試作は室温でパイプ内に純水を入れ、液体注入装置で容器内を冷媒で満たした (Fig. 5 上図)。

アルミニウム試験片下部よりヒーターで大気圧にて加熱 (Fig. 5 中図) しながら圧力と温度を計測し、試験片の質量を測定しながら所定の冷媒質量になるまで排気し、所定の冷媒質量になった段階で密封をおこなう。密封は鉄球を

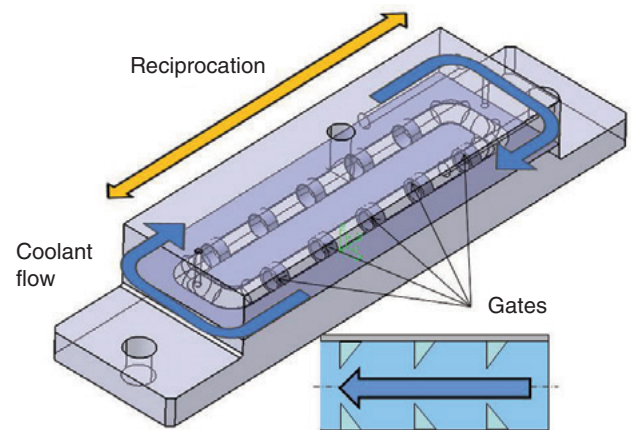


Fig. 3 Newly designed heat pipe

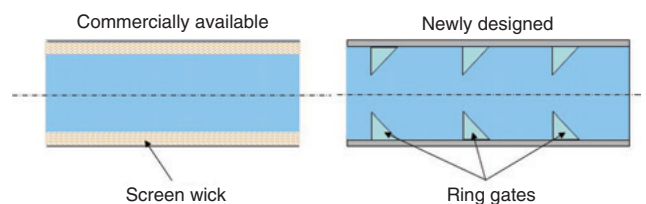


Fig. 4 Inner structures of heat pipes

穴に打ち込む事でおこなった。密封後、テストをおこなう温度までヒートパイプを覆っているアルミニウム試験片全体を加熱し、飽和蒸気圧 (Fig. 5 下図) を示す事を確認した。Fig. 6 に製作したヒートパイプを往復しゅう動試験機に取り付け、ヒートパイプ熱移送方向にヒートパイプを振る運動をさせながら、熱伝達率を計測した。

試験片には3か所 (Fig. 6 左図) の熱電対を取り付け、温度の流れを計測した。

加熱源は Fig. 6 左図の左側に設置したセラミックスヒータとし、放熱はパーソナルコンピュータ CPU 冷却用のクーリングフィンで放熱をおこなった。

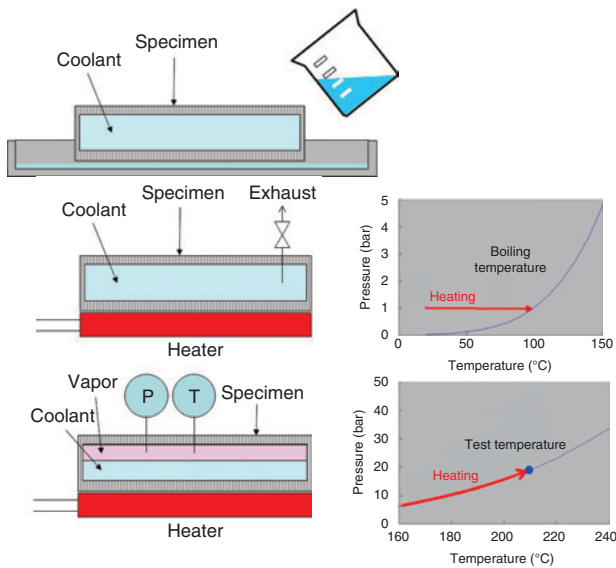


Fig. 5 Prototype process of newly designed heat pipe

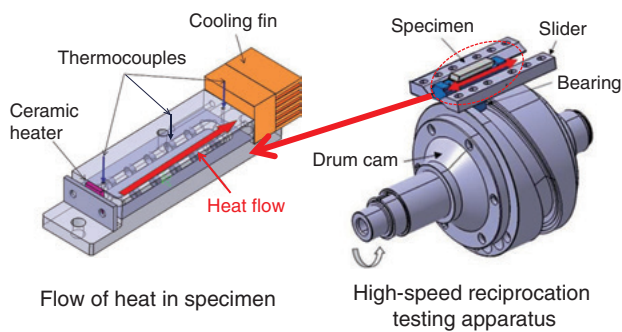


Fig. 6 Flow of heat in specimen and high-speed reciprocation testing apparatus

3. 振動試験（往復動）

Table 2 に往復動試験条件を示す。

ヒートパイプは市販品と水 / 空気の比率を 50/50, 70/30, 80/20 の3種類製作し、最適な比率を求める事にした。

Table 2 Conditions of reciprocation test

Reciprocating speed range	0.0 to 3.0 m/sec
Reciprocating stroke	50 mm

また、比較のために試験片内にヒートパイプを入れていないアルミ無垢の同形状についても同様の試験をおこなった (Fig. 7)。

テストでは安定した温度が取得できるまで速度を一定とし、温度が安定した値を一定時間示したのを確認後、設定速度へ変化させた。所定の速度に達した後、同様の温度計測を実施する形で進めていった。

熱源は軽量のセラミックスヒータをクーリングファンと反対側に試験片へ密着する様に接触させ、市販のヒーター用銀ペーストを挟む様に配置した。入熱量は 30 W とした。

振動試験には往復しゅう動試験機⁽¹²⁾を使用した。試験片は断熱材を含むアルミニウムカバーで試験片全体を覆い、試験片外部へ熱が逃げにくい構造とした。Fig. 8 に試験中の試験片と周辺部の写真を示す。

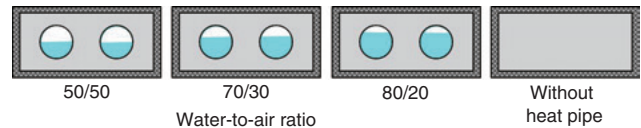


Fig. 7 Comparison of heat pipes with different water-to-air ratios

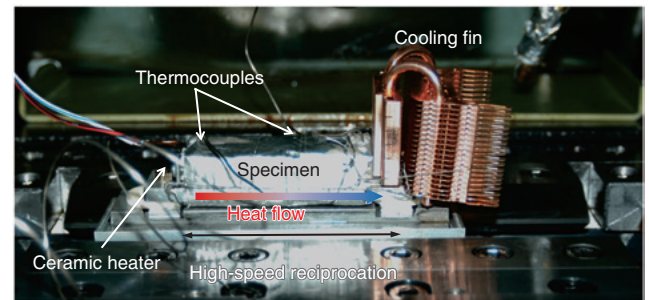


Fig. 8 Specimen during high-speed reciprocation test (3 m/sec)

4. 振動テスト結果

熱収支計算は下記の式 (1) と (2) にて実施した。

$$q = \lambda_e A_e \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

q : 熱量 (W/m²)

λ_e : 熱伝導率 (W/m²K)

A_e : 断面積

L : 長さ

アルミ試験片にヒートパイプを入れていない断面状態と入れた断面状態の2種類にて計算し、放熱は均一と仮定した。また、熱収支計算は断面から割合を算出した。

$$q = (\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2) \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

λ_1 : アルミの熱伝導率

A_1 : アルミの断面積

λ_2 : ヒートパイプの熱伝導率

A_2 : ヒートパイプの断面積

Fig. 9 に振動時ヒートパイプのテスト結果を示す。

ヒートパイプの入っていないアルミ無垢試験片は実有効熱伝導率が 140 W/m K で往復動の速度が変化しても変わらない。

しかし、水と空気の比率 70/30 の場合、熱収支計算のバルク基準面積割合をヒートパイプ 10% とした場合、静止した状態ではアルミのみより熱伝導率は下がる。静止した状態ではアルミ無垢試験片に対し、ヒートパイプを入れたものの方が低熱伝導率であった。これはヒートパイプ内の空気が熱伝導率を下げ、断面積分を減少させているからであると思われる⁽¹³⁾⁻⁽²³⁾。

2 m/sec からアルミのみより若干熱伝導率の上昇を示し、3 m/sec では 620 W/m K に達する。この効果をヒートパイプのみで計算し直すと 3 m/sec 時で 4900 W/m K となる。

参考までにアルミバルクのみ熱伝導率が 140 W/m K、静止状態による市販ヒートパイプの熱伝導率は 3000 W/m K 程度の物が多いため、アルミバルクの 35 倍、市販ヒートパイプの 1.6 倍の熱伝導率を示した。Fig. 10 にヒートパイプの充填率の効果について示す。

水 / 空気の比率が 50/50 の場合、速度が上昇するに従い、実効熱伝達率も上昇する。更に水 / 空気の比率が

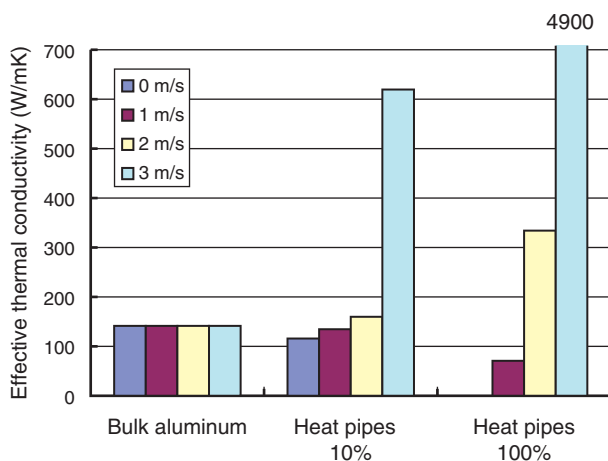


Fig. 9 Effectiveness of heat pipes during high-speed reciprocation

70/30 の場合、速度 2 m/sec までは 50/50 の熱伝達率の方が高いが 3 m/sec で急激に上昇し、620 W/m K に達する。80/20 では 1 m/sec で 235 W/m K と最大熱伝達率を示すが 3 m/sec では 180 W/m K と低下した。

Fig. 11 に今回開発したヒートパイプ内の飛沫の概念図を示す。

独自ヒートパイプが高熱伝導を示した理由について検討をおこなっている。中に密封した液体は、初期の段階で往復により細かな液滴に分解される。この液滴の状態、ゲートと接触しながら巨視的に流れが一方方向になる。その後、ループする事で気液が衝突する事がなく、凝縮領域から蒸発領域への気液の移動を可能にしたと考えている。

結果として、停止時のバルクアルミニウムの伝熱量よりも高い性能を高速往復条件の下で示す事ができた。

以上のことから振動慣性力増加は有効な熱輸送手段であることが分かったため、ICE 用エンジンピストン冷却を事例に検討をおこなった。

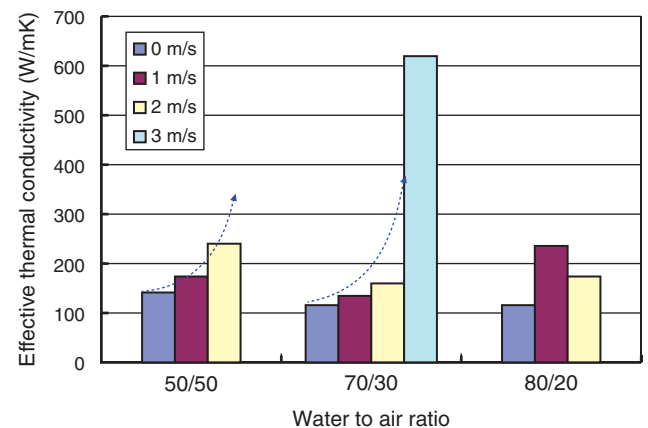


Fig. 10 Effectiveness of heat pipe filling ratio

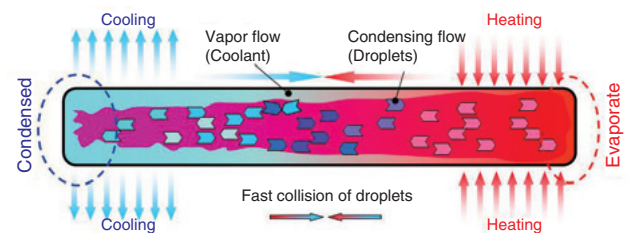


Fig. 11 Diagram of droplet movement

5. エンジンピストンへの応用

前述のデータを基にエンジン用ピストン適用を検討し、熱解析を実施した⁽²⁴⁾⁻⁽²⁷⁾。

Wang らはヒートパイプをピストンのスカート部に組み込みその効果を検証し、3980 W/m℃ と高い熱伝導率が得

られた事を既に報告している。しかし、彼らの構造ではシリンダーの傾斜角によって作動流体が一方に偏り、熱伝達効率に不均一となる可能性があるため、我々は下記のような構造とした。Fig. 12 にピストンにヒートパイプを取り付けた図、この図を元に試作したヒートパイプを配置したピストンを示す。

ピストン内には最も冷やしたいピストントップからピストンスカート部へ伝熱する様に配置をした。

ヒートパイプは Fig. 3 で示した形状とし、配管内部に逆流防止のゲートを設け、気体の流れを制御した。スカート部に設けた銅合金のピストンリングより熱をピストンからスリーブへ伝導させるようにした。

実際に試作した光造形ピストンと 3D プリンターによるアルミ合金製ピストンを Fig. 13 に示す。また、Fig. 14 に

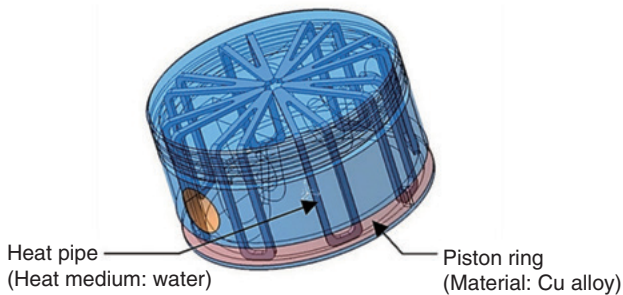


Fig. 12 Piston with built-in heat pipe



Fig. 13 Prototype produced by optical molding (left), prototype produced by metal 3D printer (right)

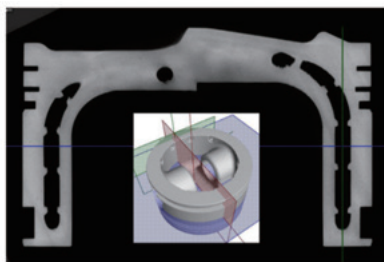


Fig. 14 Sectional image of piston with built-in heat pipes

ヒートパイプを配置したピストンの内部を CT スキャン像で示す。ピストン内部に設けたゲートが方向性を持って形成されている事がわかる。

5.1. 計算方法

下記に頂面からスカート部までヒートパイプを埋め込んだピストンの定常 3 次元熱伝導方程式を数値的に解く熱伝導計算をおこない、放熱特性を予測する事をおこなった。HP 熱伝導率はピストンリング素材の熱伝導率と稼働時の実測値から求めた熱伝導率⁽²⁸⁾を基に Fig. 9 で得られたデータから 2000 W/m K とその半分である 1000 W/m K とした。

基礎式 (3) を示す。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

境界条件を下記に示す (Bulk Body = BULK)

ピストンボア径: ϕ 110

母材熱伝導率: 150 W/m K

HP 熱伝導率: 1000 W/m K・2000 W/m K

形状: ピストン (1/4 モデル)

Fig. 15 にピストンの部位と温度解析事例を示す。

筒内熱伝達率と筒内温度は指圧データから Woschni モデルを用いてその時間平均を与えた。メタル接触部は接触熱抵抗のモデルを入れるべきだが今回は簡易的に熱伝達と同形式で与えた。

Table 3 に各部位の伝熱面境界条件を示す。

ヒートパイプ挿入部は温度が均一になることを仮定して温度を一定として計算した。

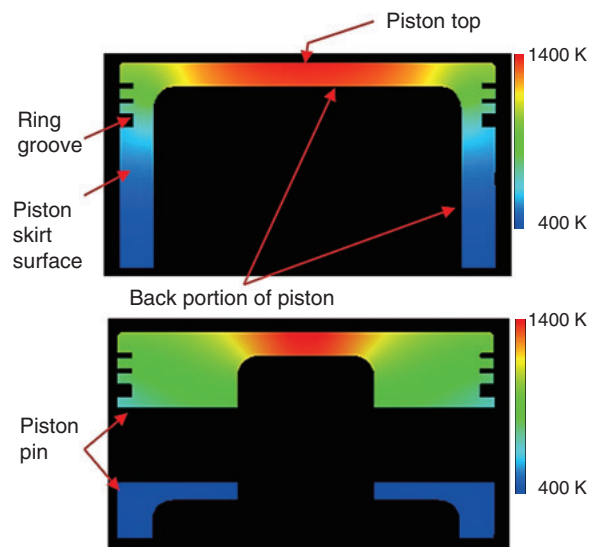


Fig. 15 Example of thermal analysis

Table 3 Heat transfer boundary condition

Area	Heat-transfer coefficient (W/m ² K)	Temperature (K)
Piston top	423	1373.15
Ring groove	2878	403.15
Piston skirt surface	300	403.15
Piston pin	1471	403.15
Back portion of piston	232	403.15

本計算では設計目標としてピストン頭頂部温度は 200 K を設定した。

Fig. 16 にピストンへのヒートパイプ設置状況を示す。

5.2. 計算結果

Fig. 17 にピストン 1 個分のヒートパイプなしピストン伝熱計算結果を示す。

ピストントップ中央部の温度は 583 K (310℃) に達し、ピストントップ端部の温度は 523 K (250℃) であった。スカート部でも 443 K (170℃) であった。ピストンの最高温度と最低温度差 ΔT は 140 K であった。Fig. 18 にヒート

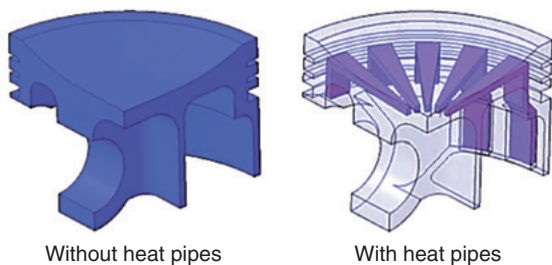


Fig. 16 Arrangement of heat pipes in piston

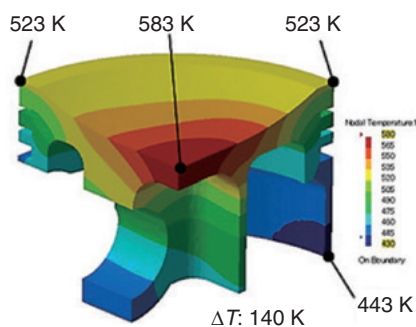


Fig. 17 Results of heat transfer calculation without heat pipes

パイプ (1000 W/m K) 設置のピストン伝熱計算結果 (ピストン 1 個分) を示す。

ピストントップ中央部の温度は 557 K (284℃) に達し、ピストントップ端部の温度は 518 K (245℃) であった。スカート部はヒートパイプによる伝熱によって 461 K (188℃) であった。ピストンの最高温度と最低温度差 ΔT は 96 K であった。

Fig. 19 にピストン 1 個分のヒートパイプ (2000 W/m K) 設置ピストン伝熱計算結果を示す。

ピストントップ中央部の温度は 544 K (271℃) に達し、ピストントップ端部の温度は 517 K (244℃) であった。

スカート部はヒートパイプによる伝熱によって 469 K (196℃) であった。ピストンの最高温度と最低温度差 ΔT は 75 K であった。

計算結果を Fig. 20 にまとめた。

ピストントップ中央部の温度はヒートパイプによって熱が移動したため、ピストンの最大温度が低下した事が分かる。

逆にヒートパイプ有によりピストンスカート部の温度が若干上昇している。この事はピストン温度分布の均衡化によってピストンに対するサーマルストレス軽減に効果がある事が分かった。

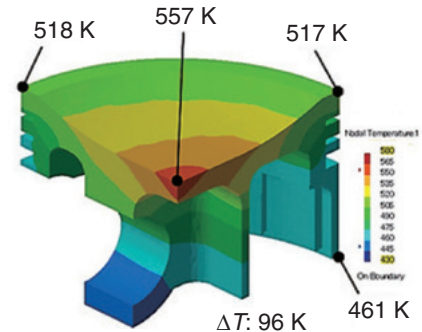


Fig. 18 Results of heat transfer calculation for piston with heat pipes (1000 W/m K)

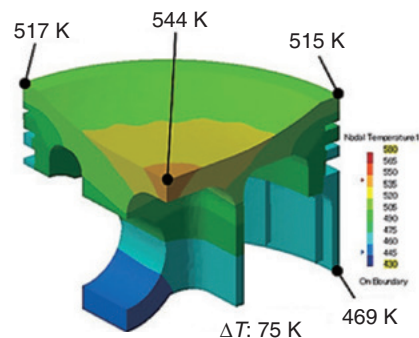


Fig. 19 Results of heat transfer calculation for piston with heat pipes (2000 W/m K)

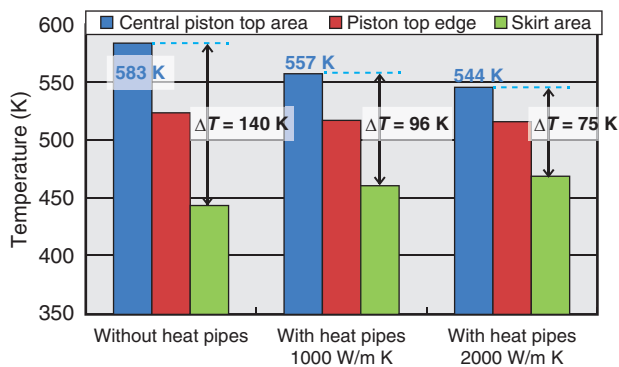


Fig. 20 Comparison of calculation results

6. まとめ

- (1) 往復しゅう動速度の増加と共に一定間隔に突起を用いて往復動時の液体と気体の流れを制御するヒートパイプの熱伝導率は急激な増加傾向を示す事が分かった。
- (2) このヒートパイプは単体換算すると静止状態による市販ヒートパイプの1.6倍の熱伝導率を示した。
- (3) ICEピストンに対し、作動流体に水を用いて計算をしたが、ピストンヘッド中央温度を39 K下げることができ、 ΔT も140 Kから75 Kまで低下させる事が分かった。

以上の結果から、ピストンのサーマルストレス低減に効果がある事が分かった。また、伝熱量を増加させる効果は構造を工夫する事であることも分かった。ただヒートパイプを設置する事による強度影響や、長期間使用に耐えられる構造、ヒートパイプを組み込んだスカート部の肉厚増による重量増など当然予想される。

しかし、原理的には決して不可能ではなく、今後の開発をする事で発想、工夫次第では非常に優れたエンジン冷却システムとなる可能性を有していると思われる⁽²⁹⁾⁻⁽⁴³⁾。

参考文献

- (1) <https://avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs/>
- (2) Huang, J., Nain, S. S., Miller, R., Rizzo, D., Sebeck, K., Shurin, S., Wagner, J.: A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System- Design, Model, and Control, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, Issue 5, p. 1-12, (2019)
- (3) Fujita, H., Itoh, A., Urano, T.: Newly Developed Motor Cooling Method Using Refrigerant, World Electric Vehicle Journal, 10, 38, p. 1-10, (2019)

- (4) Larminie, J., Lowry, J.: Chapter 4 Electricity Supply, Electric Vehicle Technology Explained Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., p. 187-216, (2012)
- (5) Wang, Q., Cao, Y., Wang, R., Mignano, F. Chen, G.: Studies of a Heat-Pipe Piston Crown, Journal of Gas Turbines and Power, vol. 122, p. 99-105, (2000)
- (6) Sonoda, K., Iwasita, I., Kobayasi, K., Nakasu, H., Yao, N., Ishiyama, T.: Heat Pipe Cooling of Exhaust Valves for Improvement in Hot Corrosion Resistibility, Technical Paper MESJ, p. 61-70, (1990)
- (7) Ling, J., Cao, Y., Chang, S. W.: Analyses of Radially Rotating High-Temperature Heat Pipes for Turbomachinery Applications, Journal of Gas Turbines and Power, vol. 121, p. 306-312, (1999)
- (8) 山脇栄道, 高橋晃, 熊田雅弥, 吉田豊明, 三村富嗣雄, 瀧将展: ヒートパイプを利用したタービン冷却システムの研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 68 巻, 675 号, p. 3107-3113, (2002)
- (9) Asias, A., Shusser, M., Leitner, A., Nabi, A., Grossman, G.: Instability of Heat Pipe Performance at Large Axial Accelerations, Journal of Heat Transfer, Vol. 129, p. 137-140, (2007)
- (10) <http://dx.doi.org/0.5772/62328>
- (11) Matsumoto, K., Harada, H., Taniguchi, H., Ito, N.: Study on the Cooling Method of Car Engine Pistons - Part 1, Basic Test for Achieving High Heat Transfer Coefficient, SAE Technical Paper 2015-01-1653, p. 5, (2015)
- (12) Ono, Y., Matsumoto, K.: Effect of Surface Irregularities of Piston Ring and Sleeve Materials in High-Speed Reciprocating Test, SAE Technical Paper 2015-01-0681, p. 7, (2015)
- (13) 大串哲朗, 野村武秀, 矢尾彰, 増本博光, 村上政明: 溝型ウィックヒートパイプの最大熱輸送特性 (片面加熱の場合の重力下と微小重力下での毛管限界), 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻, 618 号, p. 520-525, (1998-2)
- (14) Thomas, S. K., Klasing, K. S., Yerkes, K. L.: Acceleration-Induced Body Forces on the Capillary Limit of Helically Grooved Heat Pipes, Journal of Heat Transfer, Vol. 120, p. 441-451, (1998)
- (15) Song, F., Ewing, D., Ching, C. Y.: Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, p. 4721-4731, (2004)
- (16) Chen, S. W., Hsieh, J. C., Chou, C. T., Lin, H. H., Shen, S. C., Tsai, M. J.: Experimental investigation and visualization on capillary and boiling limits of

- micro-grooves made by different processes, *Sensors and Actuators A* 139, p. 78-87, (2007)
- (17) 宮崎芳郎:解説 自励振動ヒートパイプ, 日本機械学会誌, 2003.2, Vol. 106, No. 1011, p. 107-110, (2003)
- (18) 宮崎芳郎:自励振動ヒートパイプの作動限界, 福井工業大学研究紀要, 第 33 号, p. 375-380, (2003)
- (19) 大丸拓郎, 吉田周平, 永井大樹, 岡本篤, 安藤麻紀子, 杉田寛之:逆止弁付自励振動ヒートパイプの内部流動モデル構築, 熱工学コンファレンス講演論文集, 2014 巻, F224-1, (2014)
- (20) 三浦正義, 長崎孝夫, 伊藤優:加振機構を用いた自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, 14-00651, p. 1-14, (2015)
- (21) Zhang, Y., Faghri, A.: Heat transfer in a pulsating heat pipe with open end, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, p. 755-764, (2002)
- (22) Qu, W., Ma, H. B.: Theoretical analysis of startup of a pulsating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, p. 2309-2316, (2007)
- (23) Es, J., Woering, A. A.: High-acceleration performance of the Flat Swinging Heat Pipe, *NLR-TP 2000-01-2376*, p. 9, (2000)
- (24) Liao, Q., Jen, T. C., Chen, Q., Li, L., Cui, W.: Heat transfer performance in 3D internally finned heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, SAE Technical Papers 2000-01-2376, p. 9, (2007)
- (25) Catton, I., Stroes, G. R.: A Semi-Analytical Model to Predict the Capillary Limit of Heated Inclined Triangular Capillary Grooves, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, p. 162-168, (2002)
- (26) Borujerdi, A., Layeghi, M.: A Numerical Analysis of Vapor Flow in Concentric Annular Heat Pipes, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, p. 442-448, (2004)
- (27) 藤中信一, 佐伯壮一, 小河原加久治:両端密閉型ヒートパイプにおける熱流体関連振動の可視化による考察, 日本機械学会, No. 02-9, Dynamics and Design Conference 2002 CD-ROM 論文集, p. 788-791, (2002)
- (28) 伊藤吉保:ピストン温度分布に関する一考察, 日立評論, 第 43 巻, 第 2 号, p. 282-287, (1961)
- (29) Rittidech, S., Yodluk L., Songsorn K.: Effect of Internal Flow Patterns on Heat transfer Performance of a Closed-end Oscillating Heat Pipe at Vertical Position, *American Journal of Applied Sciences* 4(12), p. 1071-1074, (2007)
- (30) 高島武雄:上部が加熱された垂直管内の水・蒸気柱の熱的自励振動現象の可視化と圧力変動の測定, 小山工業高等専門学校研究紀要, 第 39 号, p. 31-36, (2007)
- (31) Xu, J. L., Li, Y. X., Wong, T. N.: High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, p. 3338-3351, (2005)
- (32) Wilson, C. A.: Experimental Investigation of Nanofluid Oscillating Heat Pipes, Master's Thesis, University of Missouri, (2006)
- (33) Khandekar, S., Groll, M., Charoensawan, P., Terdtoon, P.: Pulsating Heat Pipes: Thermofluidic Characteristics and Comparative Study with Single Phase Thermosyphon, *Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference*, Vol. 4, p. 459-464, (2002)
- (34) Zhang, Y., Faghri, A.: Oscillatory Flow in Pulsating Heat Pipes with Arbitrary Numbers of Turns, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 17, No. 3, p. 340-348, (2003)
- (35) Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M., Terdtoon, P.: Closed loop pulsating heat pipes Part A: parametric experimental investigations, *Applied Thermal Engineering* 23, p. 2009-2020, (2003)
- (36) Vassilev, M., Avenas, Y., Schaeffer, C., Schanen, J. L., Schulz-Harder, J.: Experimental Study of a Pulsating Heat Pipe with Combined Circular and Square Section Channels, *Industry Applications Conference*, p. 23-27, (2007)
- (37) 高橋恭郎, 梅田洋, 李木経孝, 橋本律男, 水田桂司:アニュラー型回転ヒートパイプの水平姿勢における作動液流動と熱輸送特性(第 1 報, 作動液蒸発域の流動形態と熱輸送量), 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻, 589 号, (1995)
- (38) 高橋恭郎, 梅田洋, 李木経孝, 橋本律男, 水田桂司:アニュラー型回転ヒートパイプの水平姿勢における作動液流動と熱輸送特性(第 2 報, 各種伝熱条件に対する伝熱実験と理論解析), 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻, 592 号, p. 3321-3328, (1995)
- (39) 水田桂司, 高橋恭郎, 黄樹偉, 柳謙一, 橋本律男, 猪谷彦太郎:アニュラー型回転ヒートパイプの水平姿勢における作動液流動と熱輸送特性(第 3 報, 作動液膜の蒸発形態と蒸発熱伝達率), 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻, 626 号, (1998)
- (40) 藤岡和正, 中山恒:水平な自軸まわりに回転するヒートパイプの熱解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 54 巻, 506 号, (1988)
- (41) Loh, C. K., Harris, E., Chou, D. J.: Comparative Study of Heat Pipes Performances in Different

Orientations, 21st IEEE SEMI-THERM Symposium,
(2005)

- (42) Assouad, Y., Caplot, M., Gautier, T.: Advanced Cooling Techniques Comparison for Airborne Electronic Circuits, 13th IEEE SEMI-THERMTM Symposium, (1997)
- (43) Delil, A. A. M.: Pulsating and oscillating heat transfer devices in acceleration environments from microgravity to supergravity, NLP-TP-2001-001, p. 28-43, (2001)

■ 著 者 ■



松本 謙 司