

連携記事

ロータス金属を用いた高性能工作機械およびヒートシンクの開発

Development of High-performance Machine Tools and Heat Sinks Using Lotus-type Porous Metals

(株) 森精機製作所 マテリアル研究所 材料評価 TM 榎原 一
Makoto Kashihara

三菱電機 (株) 先端総合技術研究所 千葉 博
Hiroshi Chiba

(株) 森精機製作所 マテリアル研究所 GM 米谷 周
Hiroshi Yonetani

広島国際大学 工学部 大串哲朗
Tetsuro Oguchi

1 ロータス炭素鋼を用いた工作機械の開発

1.1 緒言

工作機械には従来以上に省エネルギー化・高精度化が望まれており、工作機械の移動体を軽量化して運動性能を向上させ、消費エネルギーを低減させる必要がある。現在、主に用いられている鋳鉄に代わって、アルミニウム合金の開発も行われているが¹⁾、アルミニウム合金には依然として機械剛性が低く、熱膨張係数が大きい等の課題がある。

そこで、近年新たな軽量構造材料として注目されているロータス金属²⁾に着目した。それは、従来の球形気孔を有するポーラス金属では気孔率の増加に伴って比強度は低下するが、ロータス金属は気孔長手方向に負荷がかかった場合でも、応力集中が生じずに比強度を一定に保ちながら気孔率を増加できるという優れた機械的性質があり³⁾、さらに熱膨張係数はノンポーラス金属と同様といった特性がある⁴⁾。

これらの特性を生かしたロータス金属を工作機械へ適用する試みを、新製造技術プログラム「高度機械加工システム開発事業 機械加工システムの新構造部材の開発 軽量高剛性構造材料と評価技術の開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業として実施した⁵⁾。

1.2 ロータス炭素鋼を用いた移動体の製作

1.2.1 ロータス炭素鋼厚鋼板の作製

溶接性とコストを考慮して、炭素鋼素材にはJIS SS400 (AISI 1018相当) を使用した。図1に本研究で開発したロータス炭素鋼厚鋼板作製のための連続鑄造装置と、図2にその構造の概略図を示す。装置の大きさは、幅5.5×奥行5.8×高さ6.0m³である。作製方法は、先ずチャンバー内を2.5MPaの窒素ガスを充填し、高周波誘導加熱にて、るつぼ内の炭素鋼

試料を1873Kに加熱し、その状態で600s以上保持した。その後、溶湯をダミーバーにより下方へ引出し、鑄型内 (20×100mm²) で一方向凝固させ、長さ500～700mmのロータス炭素鋼を作製した。作製したロータス炭素鋼の断面は図3に示すように、引出方向に長く伸びた気孔が形成されていた。気孔は、気孔率約50%、気孔径0.1～2.5mm、平均気孔径1.5mmであった。



図1 ロータス炭素鋼作製用連続鑄造装置

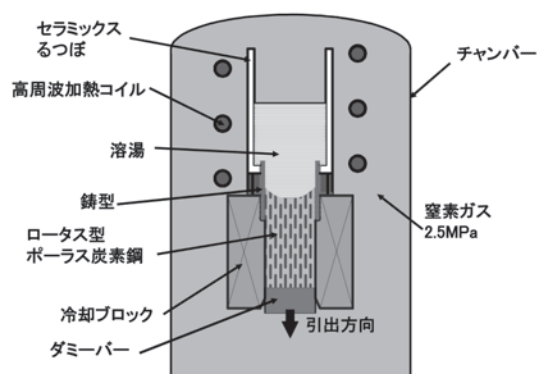


図2 ロータス炭素鋼作製のための連続鑄造装置概略図

1.2.2 サドルの製作

横形マシニングセンタ NH4000DCG ((株) 森精機製作所製) (図4 (a)) の既存の鋳鉄 (FC300) 製サドル (図4 (b)) を、図4 (c) に示すロータス炭素鋼厚鋼板溶接構造のサドルに置き換えた。図4 (c) に示すロータス炭素鋼厚鋼板のつなぎ目部分をカットワイヤで充填させ、マグアーク溶接を行う施工法を用いた。サドル上下の梁部およびサドル左右のリニアガイド取付部 (図4 (a)、図4 (c)) は取付穴を多数必要とし、ネ

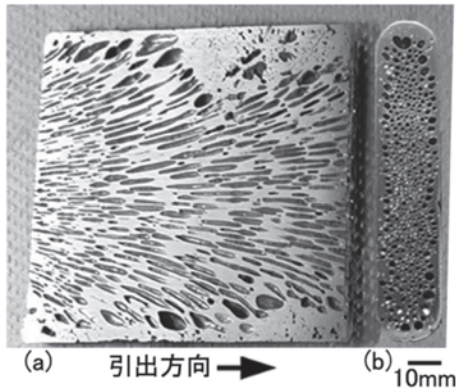


図3 窒素ガス圧2.5MPaで連続鋳造法により作製した引出方向に平行 (a) および垂直 (b) に切り出したロータス炭素鋼の断面

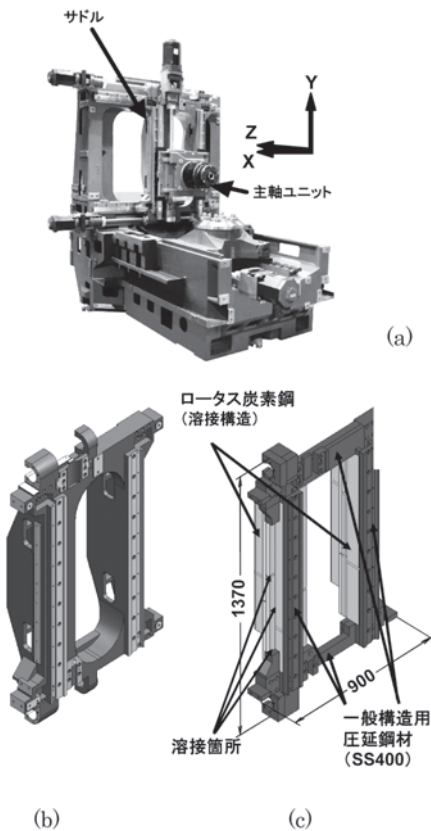


図4 (a) 本研究で評価した横型マシニングセンタ、(b) 既存の鋳鉄製サドルと (c) ロータス炭素鋼製サドル (単位: mm)

ジ部の強度を確保するためノンポラスの一般構造用圧延鋼材SS400を使用した。なお、サドルのサイズは、幅900×高さ1370×奥行き250mm³である。

従来の鋳鉄製サドルの重量360kgと比較して作製したロータス炭素鋼製サドルは212kgで41%軽くなり、主軸ユニットを含めた移動体全体では18%の軽量化となった。

1.3 工作機械の特性評価試験

既存の鋳鉄製サドルおよびロータス炭素鋼製サドルを搭載した横形マシニングセンタで、静剛性測定試験、残留振動測定試験、切削試験、消費電力測定を行なった。紙面の都合上、試験方法は割愛する。

1.3.1 静剛性

鋳鉄製サドルおよびロータス炭素鋼製サドルの静剛性測定試験の結果を図5に示す。鋳鉄製サドルと比較したロータス炭素鋼製サドルの静剛性は、X軸方向26%、Y軸方向27%、Z軸方向13%低下した。

1.3.2 残留振動

X軸切削送り速度5000mm・min⁻¹におけるロータス炭素鋼製サドルおよび鋳鉄製サドルのX軸方向残留振動の結果は、ロータス炭素鋼製サドルでは減速時間を32msに、鋳鉄製サドルでは減速時間を64msで最大振幅が±1μm以内となった。同様に、早送り12500mm・min⁻¹では、ロータス炭素鋼製サドルの11msに対し、鋳鉄製サドルは44msとなった。以上の様に、ロータス炭素鋼による軽量化により慣性力が小さくなり、加減速性能を2倍以上に高められた。

1.3.3 切削

重切削加工では、主軸ロード100%におけるロータス炭素鋼製サドルと鋳鉄製サドルの切削除去量はX、Y軸方向共1.92×10⁻⁶m³・s⁻¹、仕上げ加工も切削除去量はX、Y軸方向共

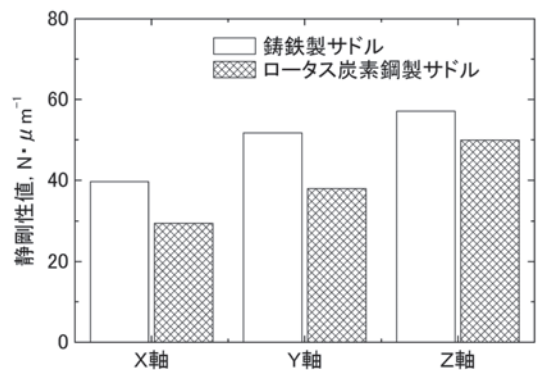


図5 各軸方向における各種サドルの静剛性値の比較

$1.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、主軸ロード値7%と、共に同等であった。

溝荒加工の切削除去量は、Y軸方向の加工では切削除去量 $9.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、主軸ロード値60%と、鋳鉄製とロータス炭素鋼製サドル共に同等であった。一方、X軸方向の加工では、鋳鉄製サドルの切削除去量が $9.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、主軸ロード値60%に対し、ロータス炭素鋼製サドルでは工具が微振動し、測定し得ない程度の凹凸の加工面となるビビリ現象が発生し、切削除去量が $8.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、主軸ロード値48%に減少した。これは、切削時の加工断続周波数26.7Hzの9倍の240Hzとロータス炭素鋼製サドルの固有振動数230～250Hzがほぼ一致したことに起因していた。

1.3.4 消費電力

図6に、X軸方向のみに移動およびモデルワーク加工空運転時の消費電力量を示す。鋳鉄製サドルと比較して、ロータス炭素鋼製サドルの消費電力量は、15～20%削減できた。

1.4 結言

本研究では、工作機械の構造体にロータス炭素鋼を使用することにより、次のような結果を得た。

- (1) 軽量化により、残留振動の抑制および消費電力の削減効果があった。
- (2) 従来の鋳鉄製サドルと比較して剛性が低下したため、静剛性、切削性能の特性は低下した。
- (3) 重量が41%と大幅に軽減したが、静剛性は13～27%の低下に抑えられた。これは、ロータス炭素鋼を使用することにより、比剛性が高まり、曲げ剛性、ねじり剛性の低下が少なかったことによる。

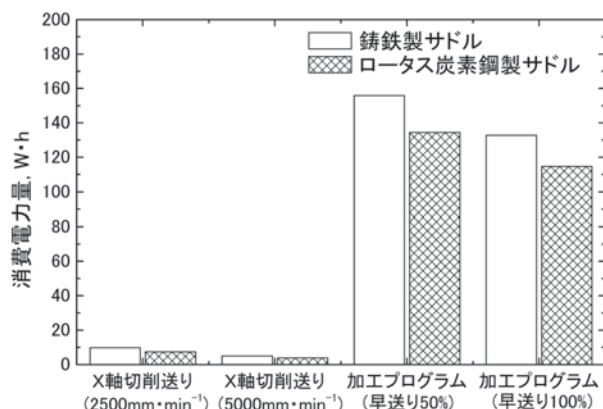


図6 モデルワーク加工空運転時の消費電力量の比較

2 ロータス銅を用いたヒートシンクの開発

2.1 はじめに

近年、電子デバイスの小型化、高性能化に伴ってデバイスからの発熱密度（発熱損失を発熱面積で除した値）は飛躍的に上昇しており、その効果的な冷却のために高性能なヒートシンクが求められている。

1981年Tuckermanらは冷媒が流れるヒートシンク内の流路（チャンネル）の直径が小さい程、温度境界層の厚さが薄くなり、高い熱伝達率を得られることを理論的および実験的に示した⁶⁾。その後、多くの研究者により微小流路をもつヒートシンクの開発が行われてきた。中でも、ポーラス金属の気孔に冷媒を流すヒートシンクは、微小気孔径による高い熱伝達率と単位体積当たりの表面積が同時に得られることから、冷却特性の大きいヒートシンク材料として期待されている。

これまでに、発泡型ポーラス金属や銅繊維からなる多孔質金属を用いたヒートシンクの開発が行われ、高い伝熱性能をもつことが明らかになっている⁷⁻⁸⁾。しかし、これらの多孔質金属に冷媒を流した場合、気孔が3次元的に連結しているため、隣合う気孔を流れる冷媒の合流あるいは分流によって発生する圧力損失により、ヒートシンク全体の圧力損失が大きくなる欠点があった。そのため、これらの多孔質金属をヒートシンクとして応用するためには、冷媒を送り出すための大きな動力が必要となっていた。

圧力損失を減少させるためには、気孔内の冷媒流れを1次元化することが有効であることが考えられる。図7に焼結金属や発泡金属と異なる一方向性の気孔を多数もつロータス銅の断面を示す。ロータス金属は以下の特長を持っている。(1) 直進性の気孔である。(2) 製造時において、気孔径と気孔率が制御可能である。(3) 数十～数百 μm の気孔径を持つ⁹⁻¹⁰⁾。以上の特長よりロータス銅をヒートシンクに利用した場合、微細な気孔径による温度境界層厚さの低減に伴う熱

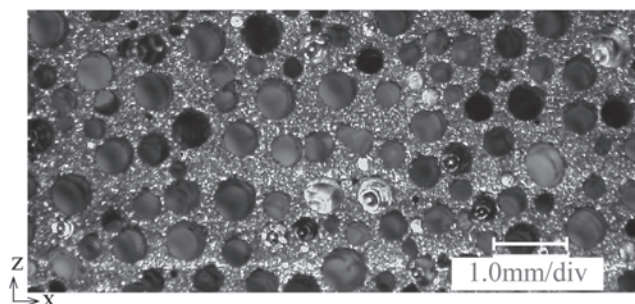


図7 ロータス銅の外観

伝達率の増大と、直進性の気孔による圧力損失の低減とが同時に得られる利点がある。

図8はロータス銅ヒートシンクを使用したパワーモジュールの水冷方式を示したものである¹¹⁾。発熱体である電子デバイスの直下にロータス銅を配置し、冷却水としてエチレングリコール水溶液からなる不凍液をロータス銅の気孔内に流すシンプルな構成になっている。この構成により電子デバイスで発生した熱は、ロータス銅の気孔内を通過する冷却水に熱伝達される。

本章では、ロータス銅ヒートシンクの放熱特性について紹介する。

2.2 ロータス銅の気孔径分布

図7で示したロータス銅の断面での気孔径分布を図9に示す。図中には気孔率 p 、最大気孔径 d_{max} 、最小気孔径 d_{min} 、平均気孔径 d_{mean} の各値を示している。気孔径分布は平均気孔径を中心に比較的まとまって分布しており、ヒートシンク素材として好ましい分布となっている。なお、ロータス銅ヒートシンクにはこの気孔径分布をもつ試験片の他に、 $d_{mean}=0.09\text{mm}$ 、 $p=29.0\%$ の2種類を用意した。

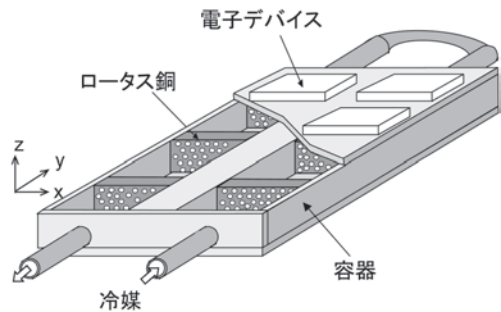


図8 ロータス銅ヒートシンクを使用したパワーモジュール構成

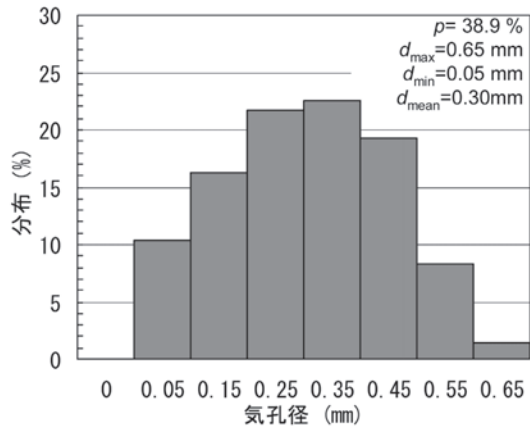


図9 ロータス銅の気孔径分布

2.3 ロータス銅ヒートシンクの放熱特性

2.3.1 実験方法

ロータス銅ヒートシンクの優れた放熱特性を明らかにするために、ロータス銅ヒートシンクの他に比較対象として従来の溝型ヒートシンク、更に溝間隙を小さくした溝型マイクロチャンネルヒートシンクの2種類の放熱特性を評価した。

ロータス銅ヒートシンクの構成と仕様を図10に示す。ロータス銅ヒートシンクとしては、冷却水の流れ方向に沿って直線状の気孔を持つ厚さ2 mmのロータス銅フィン ($d_{mean}=0.09\text{mm}$ 、 $p=29\%$) を1個だけ銅ベース板にロウ付け接合したもの (ロータス銅ヒートシンクA)、および $d_{mean}=0.30\text{mm}$ 、 $p=38.9\%$ で厚さ3mmのロータス銅フィンを3個並べて銅ベース板にロウ付けしたもの (ヒートシンクB) の2種類用意した。一方、従来の溝型ヒートシンクは図11に示すようにフィン厚さ1mm、フィン間隙3mmで、溝型マイクロチャンネルヒートシンクはフィン厚さ、フィン間隙共0.5mmのいずれも銅製で、それぞれを銅ベース板にロウ付けした。これら全てのヒートシクの流れ方向の長さは20mmである。

ヒートシンクの熱伝達特性を評価するための実験装置を図12に示す。ヒートシンクは試験ダクト内に設置した。また、銅ベースのヒートシンク接合面と反対側の面には、電子デバイスの発熱を模擬したヒータブロックを半田付けした。ヒートシンクのフィンを通過する冷却水はポンプと冷却水冷却器が一体となったサーキュレータによって駆動され、フィル

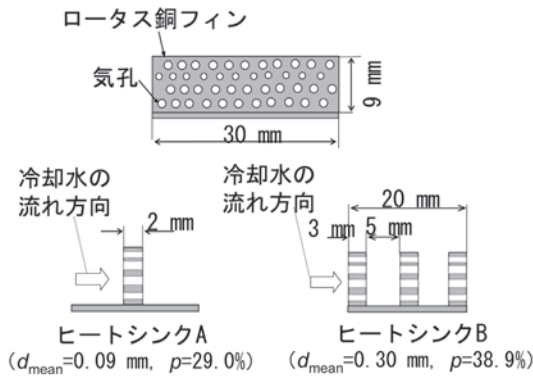


図10 ロータス銅ヒートシンクAおよびBの構成と仕様

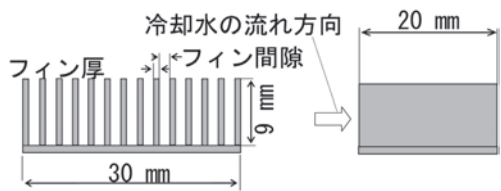


図11 溝型ヒートシンクと溝型マイクロチャンネルヒートシンクの構成

タ、流量計を通して、試験ダクト内を循環している。冷却水としては純水を使用した。冷却水の試験ダクト内の入口温度 T_i 、出口温度 T_o 、銅ベース板の温度 T_b を K 型熱電対で計測した。

各ヒートシンクの熱伝達特性を評価するために、ヒートシンクベース面積 A_b 、冷却水の入口温度 T_i を基準とした熱伝達率 h_{bi} ($= Q_h / (A_b \cdot (T_b - T_i))$) を用いた。ここで、 Q_h はヒータ入力熱量から断熱材を通過する熱損失分を除去した熱量である。

ヒートシンク前後の圧力損失は、圧力センサ (Krone 社製 DP-15) によって 5% の精度で計測した。

2.3.2 実験結果

圧力損失 ΔP に対する各ヒートシンクの熱伝達率 h_{bi} の比較を図 13 に示す。図中の記号は実測値、実線は実測範囲の予測値、点線は実測範囲外での予測値である。ロータス銅ヒートシンクの場合、ロータス銅の有効熱伝導率、フィン効率と気孔内流れを円管流れでの熱伝達率の式を使って計算した予測値である。従来の溝型ヒートシンクの熱伝達特性は、計算

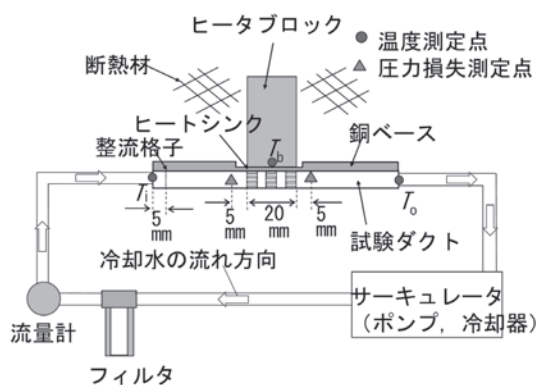


図 12 ヒートシンク放熱性能評価装置

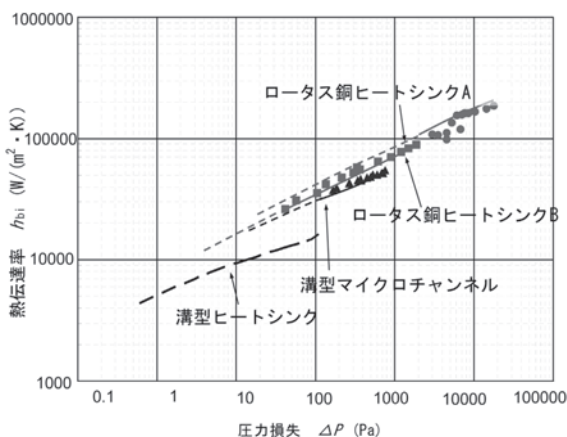


図 13 圧力損失に対する各ヒートシンクの熱伝達率の比較

結果のみの値である。

圧力損失 1000 Pa 時の熱伝達率 h_{bi} で比較すると、 $d_{mean} = 0.09 \text{ mm}$ のロータス銅ヒートシンク A の実測値からの予測値は溝型マイクロチャンネルより 1.6 倍、従来の溝型ヒートシンクより 3.3 倍高く、約 $100000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の値を示している。

次に圧力損失 ΔP と流量 U との積で表されるポンプ動力 $\Delta P \cdot U$ に対する各ヒートシンクの熱伝達率 h_{bi} の比較を図 14 に示す。ポンプ動力 $\Delta P \cdot U = 0.02 \text{ W}$ 時の熱伝達率 h_{bi} を比較すると、ロータス銅ヒートシンク A の実測値からの予測値は溝型マイクロチャンネルより 2 倍、従来の溝型ヒートシンクより 5 倍高い値を示している。

以上から、ロータス銅ヒートシンクの熱伝達特性は非常に高く、 $100000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以上の熱伝達率を示すことが明らかになった。

さらにその予測値は $\pm 20\%$ の精度で実測値と一致することも明らかになった¹¹⁻¹²⁾。

2.4 おわりに

ロータス型ポーラス銅を使った高性能水冷ヒートシンクは高い熱伝達特性を示すことから、今後特に発熱密度の高いパワー素子、レーザーダイオード、高周波素子用のヒートシンクとして期待されている。

謝 辞

工作機械開発の共同研究者、森精機製作所 山本幸佑氏、古田正昭氏、大阪大学 津村卓也氏、中田一博氏、金相烈氏、鈴木進補氏（現、早稲田大学）、中嶋英雄氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木聡、織田和宏、岡田博、倉増幸雄、杉田薫：第 118 回軽金属学会春期大会講演概要、(2010)、181。

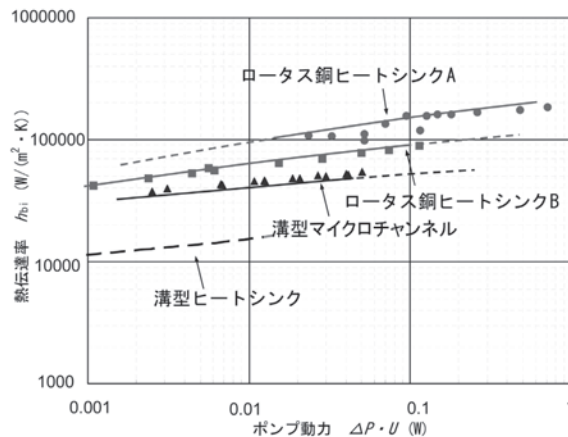


図 14 ポンプ動力に対する各ヒートシンクの熱伝達率の比較

- 2) H.Nakajima : Prog.Mater. Sci., 52 (2007) , 1093.
- 3) S.K.Hyun, K.Murakami and H.Nakajima : Mater. Sci. Eng., A, 299 (2001) , 241.
- 4) M.Tane, S.K.Hyun and H.Nakajima : Scripta Mater., 54 (2006) , 545.
- 5) 森精機製作所：高度機械加工システム開発事業報告書, 平成20年度, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 機械システム技術開発部
- 6) D.B.Tuckerman and R.F.W.Pease : IEEE Electron Device Letters, 2 (1981) , 5, 126.
- 7) A.F.Bastawaros and A.G.Evans : Adv. Electron Packaging, 26 (1999) , 733.
- 8) H.Y.Zhang and X.Y.Huang : Int. J. Heat Mass Transfer, 44 (2001) , 1593.
- 9) H.Nakajima : Proc.Jpn.Acad., SerB, 86 (2010) , 884.
- 10) H.Nakajima and T.Ide : Metall.Mater. Trans. A, 39 (2008) , 390.
- 11) H.Chiba, T.Ogushi and H.Nakajima : JSME Int. J. Series B, 47, (2004) , 3, 516.
- 12) H.Chiba, T.Ogushi and H.Nakajima : J. Thermal Sci. Tech., 5, (2010) , 2, 222.

(2011年7月4日受付)