

熱交換性能の高いラティス構造に関する研究

－金属AMの特徴を活かした金型の冷却性能向上－

高野昌宏* 宮川広康* 吉田勇太*

材料を1層ごとに積層しながら造形する金属AMは、複雑な形状を造形できる利点を有している。特に、従来工法では作製が難しい格子状のラティス構造は、金属AMの代表的な構造である。本研究では金属AMの効果的な活用を目的に、内部にラティス構造を配置した水管の熱交換性能について検討した。用いたラティス形状は八面体とし、そのアスペクト比と格子間隔を変化させたラティス水管の圧力損失や熱交換量を実験により測定した。結果として、ラティス水管の圧力損失はダルシー・ワイスバッハの式でおおよそ近似できることを明らかにした。また、ラティス水管の熱交換性能はアスペクト比で大きく変化し、本研究で使用した条件ではアスペクト比2.5が最も良い値を示した。この結果を基に設計したラティス水管金型は、コンフォーマル水管金型と比べて、熱交換性能が1.7倍に向上することを確認した。

キーワード：付加製造，3Dプリンタ，ラティス構造，圧力損失，熱交換

Study on Lattice Structure with High Heat Exchange Performance

- Improvements in Heat Exchange Performance of a Metal Mold with Metal AM Characteristics -

Masahiro TAKANO, Hiroyasu MIYAKAWA and Yuta YOSHIDA

Metal additive manufacturing (AM) which builds materials through consecutive layering, has the advantage that complicated shapes can be formed. Particularly, the lattice structures, which are difficult to fabricate using conventional methods, are typically created using metal AM. In this research, the heat exchange performance of a water pipe structure with lattice-shaped fins was investigated for the purpose of effectively utilizing metal AM. The lattice shape used for this study was an octahedron, and its aspect ratio and lattice spacing were changed. The pressure loss and heat exchange rate of the lattice structure water pipe were measured by experiments. As a result, it was shown that the pressure loss of the lattice water pipe could be approximated by the Darcy-Weissbach equation. The heat exchange performance of the lattice water pipe varied greatly with the aspect ratio. An aspect ratio of 2.5 was found to be the optimum value under the conditions used in this study. It was confirmed that a lattice water pipe design based on the result improved heat exchange performance by 1.7 times compared to a conformal water pipe.

Keywords : additive manufacturing, 3D printer, lattice structure, pressure loss, heat exchange

1. 緒 言

3Dプリンタとして知られているAM(Additive manufacturing)技術は付加製造であるため、複雑な形状を造形できる利点を有している。特に、従来工法では作製が難しいラティス構造は、金属AMで造形できる代表的な構造であり、軽量化や衝撃吸収性の向上に関する研究¹⁾やヒートシンクへの応用に関する検討が行われている。また、内部に冷却用の複雑な水管を持つ金型^{2),3)}やタービンブレードが金属AMの効果的な活用

として提案、実用化されている。

本研究では、この冷却水管のさらなる熱交換性能の向上を目的に、内部にラティス構造を配置した冷却水管を提案した。ラティス構造は、熱交換面積の増加に加えて、強度・剛性や流体の拡散性も向上するため、水管の形状や配置の設計自由度を高めることができ、より表面近傍に水管を形成できる利点をもつ。ラティス水管の圧力損失、および熱交換量を評価し、熱交換性能が高いラティスの寸法、形状について検討した結果を報告する。さらに、金型に応用した場合の冷却効果についても報告する。

*機械金属部

2. 評価したラティス形状と実験装置

本研究では、図1に示す造形がしやすい八面体(BCC形状)のラティス形状について熱交換性能を検討した。対象としたラティス形状の概寸を表1に示す。ラティス形状の格子間隔 l と梁の線径 d をそれぞれ変化させた。また、格子間隔 l と線径 d の比をアスペクト比 $a(a=l/d)$ として定義した。図2に実験に用いた供試体を示す。供試体は金属AM装置(㈱ソディック製・OPM250L)で製作し、10mm×10mmの正方形断面形状の水管内部に長さ100mmの範囲でラティス構造体を配置した。材質はSUS316 Lとした。この供試体の圧力損失と熱交換量を評価するための実験装置の概略を図3に示す。チラーにより水を経路内に循環させ、その流量を超音波式流量計(シナジースリー社製・UF25B100)により測定した。また、圧力損失は供試体の前後に設置した圧力計(㈱キーエンス製・GP-M010)の差圧から求めた。

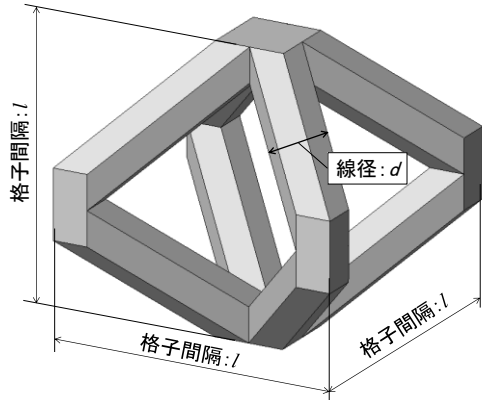


図1 八面体ラティス形状

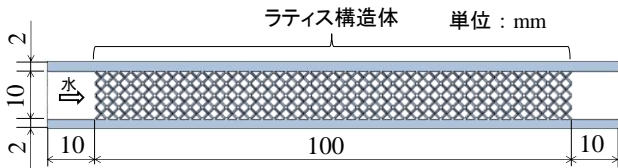


図2 供試体

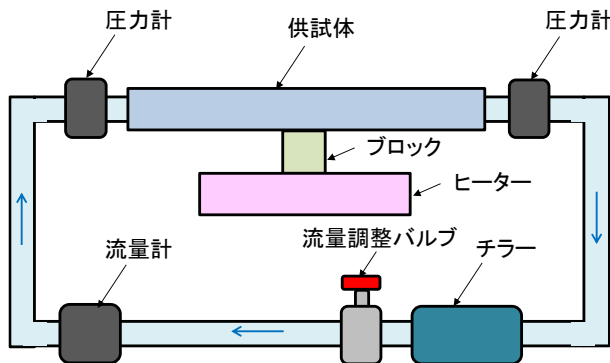


図3 実験装置

表1 ラティス形状の概寸

アスペクト比 a	線径 d [mm]	格子間隔 l [mm]
1.8	2.0	3.6
	3.0	5.4
2.5	0.7	1.75
	1.0	2.5
	2.0	5.0
5.0	0.3	1.5
	0.5	2.5
	1.0	5.0

熱交換量は、ヒータを作動させた状態にし、ヒータと供試体との間に設置したブロックの温度勾配を測定し、算出した。

3. 圧力損失

図4に測定した圧力損失を示す。ラティス構造体の内部を通過する水の平均流速は2.0m/sになるように調整した。同図に示すように同じアスペクト比では、格子間隔 l が大きくなると圧力損失 ΔP は低下する。また、格子間隔 l が同等の場合、アスペクト比 a が大きくなると、圧力損失 ΔP は低下する。このように格子間隔 l やアスペクト比 a によってラティス構造体の圧力損失 ΔP は大きく変化する。本研究では、これらの寸法の影響を統一的に評価するため、流体力学で用いられる次式のダルシー・ワイズバッハの式を用いて整理することにした。

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d_h} \frac{\rho v^2}{2}, \quad d_h = 4 \frac{A}{W} \quad (1)$$

λ : 管摩擦係数, L : 管長さ, ρ : 流体密度,
 v : 流速, A : 流路断面積, W : 断面にある壁面の長さ

上式の圧力損失 ΔP はラティス構造体の水力直径 d_h に反比例する関係となる。ラティス構造体の水力直径 d_h は以下の式から算出した。

$$d_h = \frac{4(1-\varphi)}{\frac{1}{al} \left\{ 4(\sqrt{6} + \sqrt{3}) - \frac{6(2 + \sqrt{2})}{a} \right\} + \frac{l_p}{S}} \quad (2)$$

S : 水管の断面積 (ラティス構造体を含む)
 l_p : 水管の周長さ, φ : 固体占有率

ここで固体占有率 φ は、水管断面のなかでラティスが占める割合であり、アスペクト比 a の関数として表される。

$$\varphi = \frac{9}{2} a^{-2} - \frac{3\sqrt{6}}{2} a^{-3} \quad (3)$$

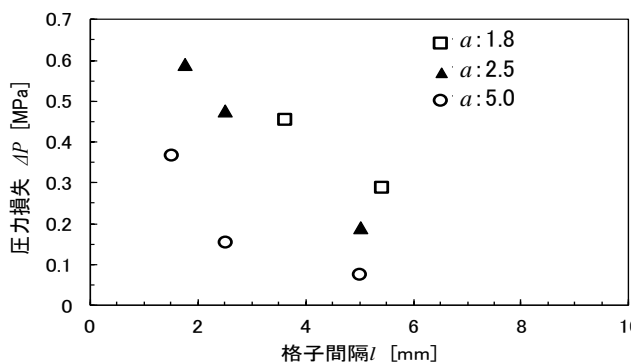


図4 圧力損失と格子間隔の関係

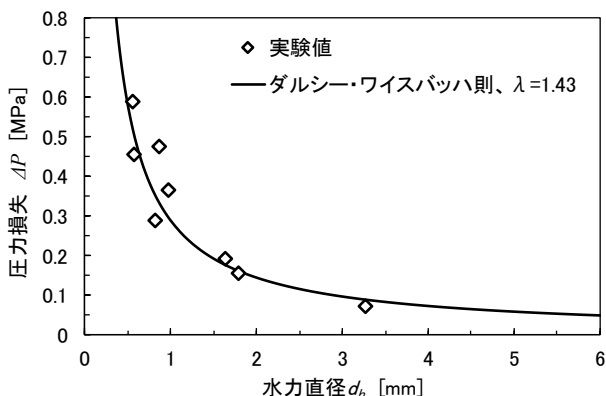


図5 圧力損失と水力直径の関係

図5に圧力損失 ΔP と水力直径 d_h との関係を示す。同図に示すように様々な寸法のラティス構造の圧力損失 ΔP は(1)式でおおよそ近似できている。この時の管摩擦係数 λ は1.43である。通常の管摩擦係数と比べて大きな値であるが、水とラティスが衝突する影響も含まれているためと考えられる。以上の結果から、ラティス構造の圧力損失 ΔP は、水力直径 d_h から推定可能であることが示唆された。

4. 熱交換性能

ラティス構造による熱交換量の増加率を図6に示す。増加率は内部にラティス構造がない供試体で測定した熱交換量を基準とした。また、ラティス構造体内部を通過する水の平均流速は0.5m/sとなるように調整した。図6に示すように、格子間隔が小さいほど熱交換量は大きくなるが、一方で図4に示すように圧力損失も同様に増加する。熱交換器の性能としては、冷却水が流れやすく、かつ熱交換量が大きいことが望ましい。そこで、同じ圧力損失で熱交換量を比較することにした。図7に、熱交換量の増加率と圧力損失の関係を示す。アスペクト比 $a: 2.5$ のラティス構造の熱交換量が、他のアスペクト比のものよりも高い値を示した。この優

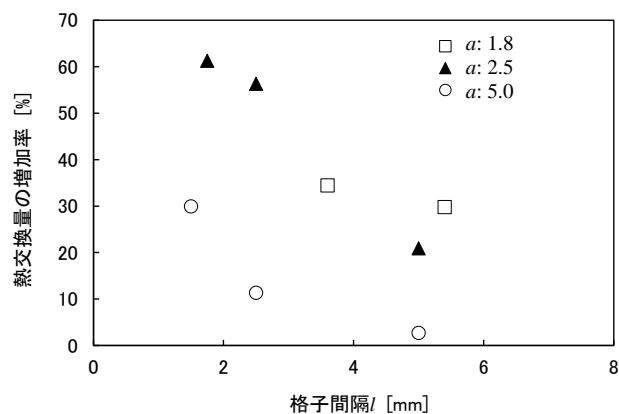


図6 熱交換量の増加率と格子間隔の関係

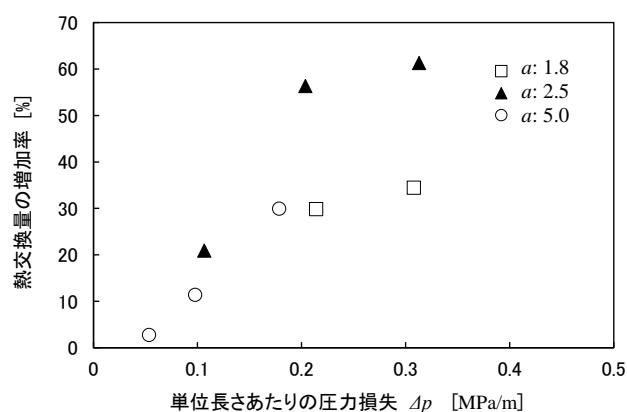
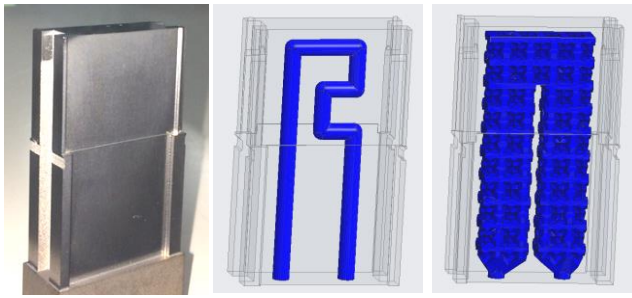


図7 熱交換量の増加率と圧力損失の関係

れたアスペクト比は、水と接するラティス表面の熱交換量（表面積と熱伝達率が影響）とラティス内部の熱移動量（ラティス線径と材料の熱伝導率が影響）とのバランスによって決まるものと考えられる。以上の結果を基に熱交換性能の優れたラティス構造を設計するには、最初にアスペクト比を決定し、次に水管が許容できる圧力損失に応じてラティスの格子間隔を決定すべきである。

5. 金型への応用

ラティス構造を持つ水管の効果を検証するため、射出成形用金型への適用を検討した。図8に、設計したラティス水管と従来の内部が空洞のコンフォーマル水管を示す。ラティス水管は強度と流体の拡散性が優れているため、コンフォーマル水管よりも断面を大きく、かつ端部まで配置できる利点がある。図9に示すようにラティス水管の流路は射出圧に対する金型強度や変形量を満足するように、10mm×6mmの断面形状とし、金型表面からの距離は2.5mmとした。また、コンフォ



(a) 金型外観写真 (b) コンフォーマル水管形状 (c) ラティス水管形状

図8 金型の外観写真と内部の水管形状

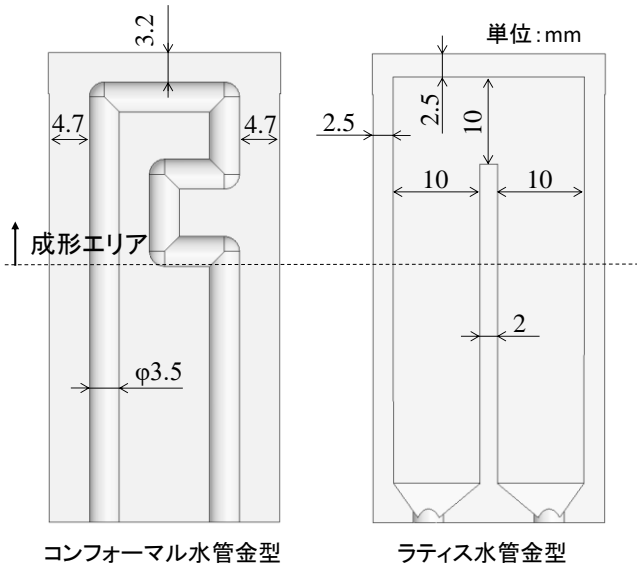


図9 水管の流路寸法 (単位:mm)

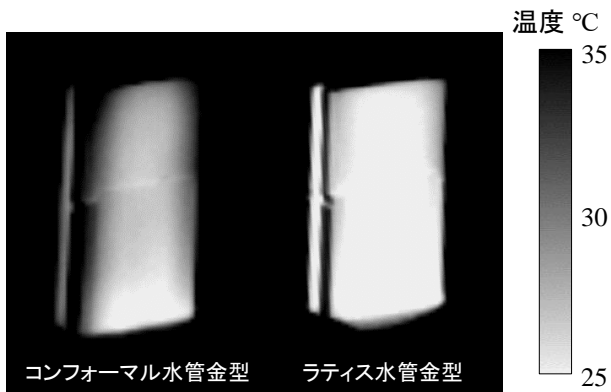


図10 金型表面の温度分布

ーマル水管の流路寸法も同様に強度，変形を満足するように決定した。ラティス構造のアスペクト比 a は2.5とし，コンフォーマル水管と同じ圧力損失となるように格子間隔を5.0mmとした。金属AMで造形したマルチ層鋼の金型（図8参照）を用いて，恒温槽で冷却効果を検証した。雰囲気温度は150℃とし，冷却水の温度は20℃，流量は2.3L/minとした。なお，同じ状

態でのポンプ流量は，ラティス水管の方がわずかに大きくなったことから，ラティス水管の圧力損失はコンフォーマル水管よりも低いと考えられる。図10に，サーモビューアで測定した定常状態における金型表面の温度分布を示す。コンフォーマル水管金型に比べ，ラティス水管金型の方は，全体が均一に冷却されている。また，冷却水温度から算出した金型全体の熱交換量はコンフォーマル水管の1.7倍であった。

6. 結 言

金属AMの効果的な活用を目指し，内部にラティス構造を配置したラティス水管の熱交換性能について検討し，以下の結論を得た。

- (1) ラティス水管の圧力損失は，ダルシー・ワイズバッハの式でおおよそ近似できることを明らかにした。
- (2) ラティス水管の熱交換性能はアスペクト比で大きく変化し，本研究で使用した条件ではアスペクト比2.5が最も良い値を示した。
- (3) (2)の結果を基に設計したラティス水管金型は，コンフォーマル水管金型と比べて，熱交換性能が1.7倍に向上することを確認した。

本結果から，金属AMならではのラティス水管の有効性を示すことができた。将来的には，水管形成が難しい金型の空冷化への応用も期待できるものと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり，金型設計にご協力頂いた㈱ソディックに感謝します。

参考文献

- 1) 牛島邦晴, Wesley James Cantwell, 陳 玳二. 圧縮荷重を受ける軽量Lattice構造の機械特性の評価. 日本機械学会論文集A編, 2009, vol. 75, no. 759, p. 1492-1499.
- 2) Satoshi Kitayama, Hiroyasu Miyakawa, Masahiro Takano, Shuji Aiba. Multi-objective optimaization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel. International journal of advanced manufacturing technology, 2017, Vol. 88(5-8), p. 1735-1744.
- 3) 高野昌宏, 吉田勇太, 宮川広康, 谷内大世, 前川満良. 金属積層造形を用いた高耐久・高機能金型の開発. 石川県工業試験場研究報告, 2015, vol. 65, p. 14-18.