

遊離砥粒を用いた金型内部冷却水管の仕上げ加工 表面突起付加による曲線水管の加工性改善

古本達明*1, 楠大樹*2, 網野亨*3, 細川晃*1, 田中隆太郎*1, 上田隆司*1

Internal finishing of cooling channel in molding die with free abrasive grains
Effects of face protuberance on internal face in curvature channels

Tatsuaki FURUMOTO, Daiki KUSUNOKI, Toru AMINO, Akira HOSOKAWA, Ryutaro TANAKA and Takashi UEDA

金属粉末の積層造形と造形物表面の切削加工によって得られる金型は、3次元CADで設計された冷却用水管を自由に配置できる特長を有し、射出成形時のサイクルタイム短縮が実現されている。しかしながら、オーバーハング部である水管上面は原理上切削できない課題を有していた。本研究では、金型内部の冷却水管について、水管内に遊離砥粒を流動させることで仕上げ加工する方法を提案している。内面上にらせん状の表面突起を付与したとき、曲率を有した水管の内部流れを解析するとともに、各条件が内面性状に与える影響について調べている。実験の結果、表面突起を付加することで水管の内部流れが乱流となり、突起のない水管と比較して著しく内面性状を改善することができた。また、突起のない水管では難しかった曲線内側の面上も効率的に加工することができた。さらに、同手法が既存金型の水管面上の錆を除去することにも効果的であることがわかった。

Key words: layered manufacturing, cooling channel, internal finishing, face protuberance, free abrasive grain

1. 緒言

3次元CADデータを用いた新しい試作技術として、積層造形法が発明されて30年が経過した¹⁾。現在では試作品の製作だけに留まらず、直接製品を造形するラピッドマニファクチャリング(RM)や、成形型を造形するラピッドツーリング(RT)が提案され実用化されている²⁾。また、造形物の表面性状を向上させるため、積層造形プロセスとエンドミル加工を複合化し、高精度に射出成形用金型を造形する加工機も開発され注目されている³⁾。同加工機は、深リブ構造を有する金型を一体モデルとして製作可能である。また、設計時に金型分割や放電加工による後加工などを考慮する必要がなく、金型の製作時間短縮が実現されている。さらに、冷却用水管を3次元CADで設計することで、金型内部の任意位置に水管を配置させることが可能となり、成形時のサイクルタイムが短縮できる特長も有している。

しかしながら、エンドミル加工による表面仕上げが可能であるといえど、オーバーハングとなる冷却水管の上面半分は原理上切削加工できない。金属粉末を積層造形するとき、その造形面には未熔融粉末や十分に熔融されずに凝固した不十分結合物が存在することが知られている⁴⁾。これらの結合層は、水管内に冷却水を流しているときに剥がれ落ち、金型を運用する際に水

管の詰まりを引き起こすだけでなく、結合層が剥がれ落ちることに伴って金型の冷却特性が変化することが実用化に向けた課題であった。

管径が大きい内面を研磨する場合、内面研削盤やホーニングが適用され、管径が小さくなるにつれて磁性流体研磨⁵⁾、遊離砥粒の高速流動による研磨⁶⁾、超音波援用による磁性流体研磨⁷⁾など、微粒砥粒を用いた様々な手法が提案されてきた。我々もこれまで、同複合加工機で造形した金型内部の冷却水管について、水管内に遊離砥粒を流動させることで不十分結合層を除去する手法を提案してきた⁸⁾。砥粒径、砥粒濃度、流動させる溶媒の内圧と加工性との関係を調べるとともに、内面上に存在する不十分結合層が金型内部の冷却性能に及ぼす影響について明らかにしてきた。また、内面上に表面突起を付加させる手法を提案し、冷却水管内面の加工効率が改善されることを示してきた⁹⁾。

本報では、表面突起を付加させて水管内面を仕上げ加工する手法について、これまで著しく加工性が乏しかった曲線状の水管内面に適用を試みた。また、既存金型の水管メンテナンスへの適用可能性を調べるため、錆が付着した水管内面の加工性能を評価したので、以下に報告する。

2. 金型冷却水管の仕上げ加工装置

金型冷却水管の内面加工装置概要を図1に、加工装置の仕様を表1に示す。加工装置は、油圧ポンプ、油圧シリンダおよび4つの密閉容器によって構成されている。密閉容器は、被加工水管を有する金型の両側にそれぞれ2つつ配置されている。図に示すように、被加工水管の両側に配置してい

*1 金沢大学理工研究域: 〒920-1192 石川県金沢市角間町
Kanazawa university

*2 金沢大学大学院: 〒920-1192 石川県金沢市角間町
Graduate school of Kanazawa university

*3 金沢大学大学院(現, 甲府市役所): 〒400-8585 山梨県甲府市
相生2-17-1
Kofu city hall

(学会受付日: 2012年3月28日)

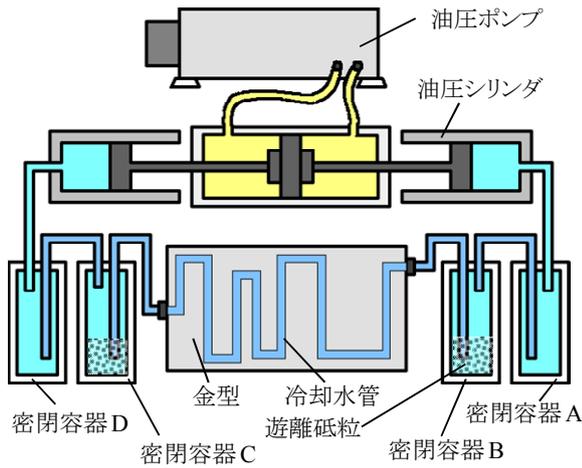


図1 金型水管内面の加工装置概要

表1 水管内面の加工装置仕様

砥粒		
材料	Al_2O_3	
平均粒径	250 μm	
濃度	C_v	7.5 vol%
溶媒	水	
内圧	P	1.4 MPa

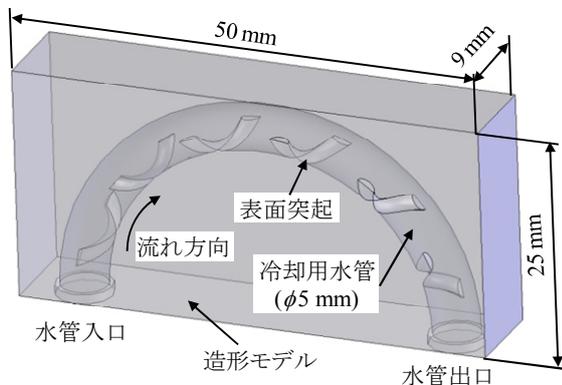


図2 解析に用いた水管モデル

る密閉容器BとCには水と砥粒が充填され、それぞれの外側に配置している密閉容器AとDには水のみが充填されている。容器AとDは、シリンダ内部に砥粒が流入することを防ぐために設置している。油圧ポンプで内圧を負荷してシリンダ内の水を押し出すと、砥粒と水の懸濁液が被加工水管内を通過して反対側の容器に導かれる。このとき、懸濁液中の砥粒の働きによって被加工水管内面を加工することができる。実験に用いる砥粒は、平均粒径が 250 μm のホワイトアルミナ砥粒である。あらかじめ予備実験を行って、被加工水管内部を通過する懸濁液の実濃度が 7.5vol%となるように内圧を調整した。また、本装置は電磁弁を用いて懸濁液の注水方向を交互に切り換えて往復運動させることができ、その周期は 1 秒である。

表2 解析条件

作動流体	水
流量 [l/s]	0.3
温度 [K]	293
出口圧	静圧
内壁	断熱壁

3. 冷却水管内部の流れ解析

3.1 水管モデル

解析に用いるモデルを図2に示す。解析は、外径寸法が 9×25×50mm の内部に水管直径が 5mm、水管中心軸の曲率半径が 20mm の水管モデルを用いて行った。また、水管の下面には、直径 2mm の半円状突起をらせん状に 10mm ピッチで付加した。このとき、積層造形法による製作を考慮してオーバーハングとなる水管上面には突起を付加しなかった。

3.2 解析条件

突起を設けた冷却水管内部について、作動流体の流れを調べるため FloWorks™ を用いて解析を行った。解析条件を表2に示す。解析では、作動流体として水を用い、水管内壁は断熱条件とした。また、水管入口側に流入量 0.3l/s、出口側には静圧を与えた。解析で用いた流体の流入量は、後述する加工実験のときに実測して得られた値を用いた。解析は、表面突起のない条件でも行って比較した。

3.3 解析結果

図3に、水管内面の表面突起が内部流れに及ぼす影響を調べた結果を示す。図3(a)に示すように、表面突起がない水管では流体が管壁に沿うように平行に流れていた。また、流体の入口側と出口側の流速に大きな違いはなかった。一方、図3(b)に示すように水管内面にらせん状の表面突起を付加すると、水管上面の流体は管壁に沿うように平行に流れていたが、水管下面の流体がらせん状突起に沿うようにして上面側に押し上げられ、内部流れが乱流となった。また、突起を付加することで水管の断面積が小さくなるため、突起のない水管と比較して流速が速くなり、水管の上面と下面との速度差も大きくなった。

これらの結果から、表面突起を水管の下面に付加することで、内部流れを乱流にすることが可能であることがわかる。そのため、懸濁液を水管内部に流すとき懸濁液内部の砥粒を効率的に管壁へ接触させることが可能となり、攪拌研磨効果が得られ水管内面の加工性を改善させることが期待できる。

4. 金型冷却水管内部の仕上げ加工実験

4.1 粉末積層造形装置

水管内面に表面突起を付加したときの加工効率を調べるため、水管モデルを積層造形して加工実験を行った。積層造形装置の概要を図4に、造形条件を表3に示す。実験は、外径寸法が 9×25×50mm、内部の水管直径が 5mm、水管中心軸の曲率半径が 20mm の水管モデルを金属光造形複合加工機(株式会社 柗松浦機械製作所製: LUMEX)で造形して行った。図

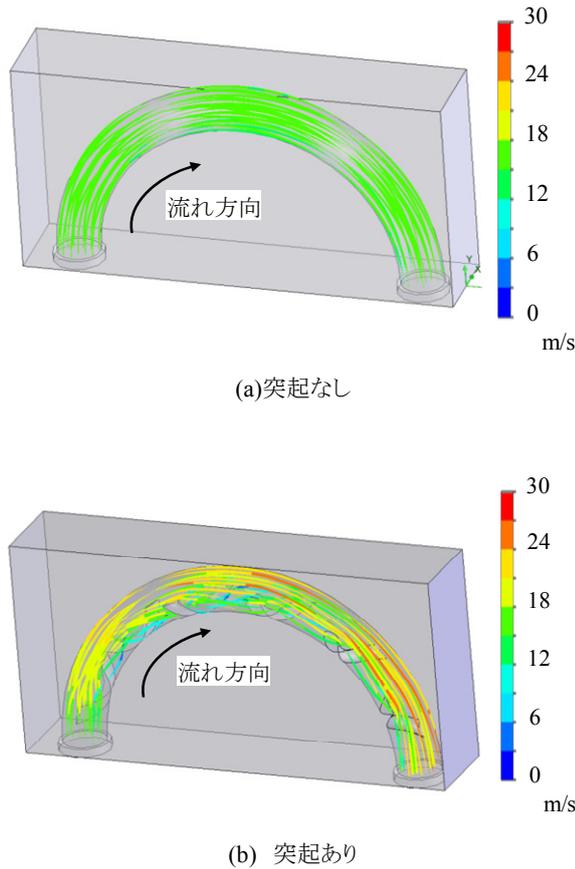


図3 表面突起の有無による内部流れの変化

表3 冷却水管の造形条件

使用粉末	
材質	SCM, 銅合金, ニッケル
平均粒径 [μm]	25
かさ密度 [kg/m^3]	4200
造形条件	
使用レーザー	Yb:Fiberレーザー
波長 [nm]	1070
ビーム径 [mm]	0.1
レーザーパワー [W]	200
レーザー走査速度 [mm/s]	440
積層厚さ [μm]	50
ハッチングピッチ [μm]	50

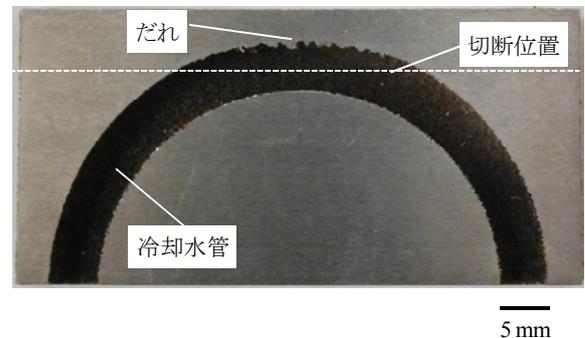


図5 加工前の水管断面

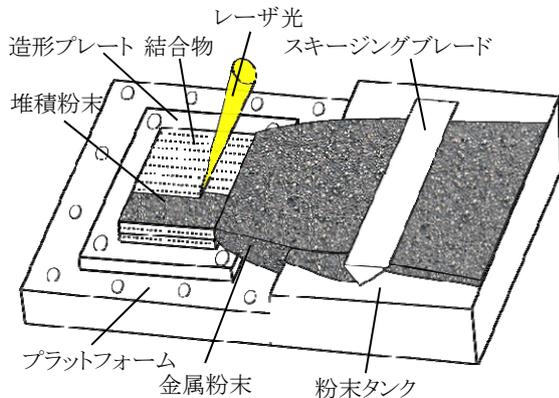


図4 積層造形装置の概要

2 に示した解析モデルと同じである。このとき、水管の下面に突起を付加しないモデルと、直径が 2 mm の半円状突起をらせん状に 10mm ピッチで付加したモデルを造形した。

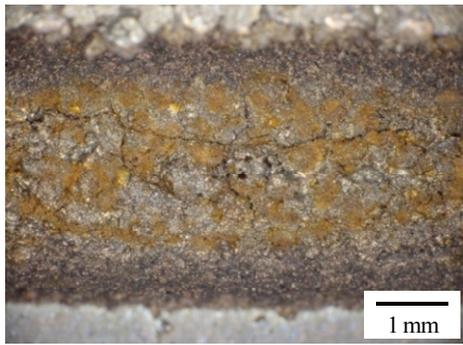
使用する粉末は、鉄系粉末が 70%、銅合金系粉末が 20%、ニッケル系粉末が 10% 含まれる混合粉末で、その平均粒径は 25 μm である。各層の粉末堆積厚さは、スキージングブレードを用いて 50 μm で一定となるようにした。このとき、粉末を加圧せずに堆積させるためプレート上の粉末かさ密度は 4200 kg/m^3 であるが¹⁰⁾、造形後の結合物にはほとんど気孔が存在していないことを確認している⁴⁾。使用する造形プレートの表面は、粉末が溶融・

凝固する時のぬれ性をよくするため、#45 のアルミナ砥粒でブラスト処理を施した。粉末の堆積後、3 次元 CAD モデルから得られた各層の断面形状にしたがってレーザー照射して造形した。レーザー照射中は、粉末表面の酸化を防ぐためプラットフォーム内部を窒素ガスで充填した。

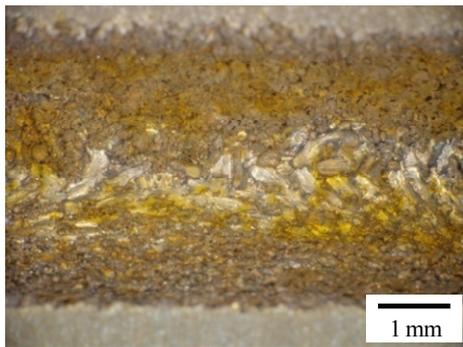
4.2 加工前の内面観察

表面突起のない冷却水管を造形し、その断面を観察した結果を図 5 に示す。図から、オーバーハング部位である水管上面も造形可能であることがわかる。しかしながら、上面頂上部に近づくにつれて内面上にだれが観察できる。レーザー照射位置の下部に造形物が存在しないと、溶融した金属粉末が球状に凝固することがわかっており¹¹⁾、頂上部近傍のだれは積層造形法に起因して生じる球状凝固によると考えられる。

水管の上面、下面それぞれの表面を光学顕微鏡(株式会社キーエンス製:VHX-1000)で観察した結果を図 6 に示す。観察は、ワイヤ放電加工機(株式会社ソディック製:AQ325L)を用いて、図 5 に示すプレート表面から 20mm の高さで造形物を分割して行った。水管上面は、図 6(a)に示すように球状に凝固した結合物の周辺に未溶融粉末が付着していた。また、レーザー照射によって十分に溶融されずに凝固した不十分結合層に錆が生じていた。そのため、表面粗さは $R_z=155\mu\text{m}$ と大きくなった。一方、水管下面は上面と同様に不十分結合層に起因した錆が



(a) 水管上面 ($R_z=155 \mu\text{m}$)



(b) 水管下面 ($R_z=116 \mu\text{m}$)

図6 加工前の水管内面の光学顕微鏡観察

表4 表面粗さ測定条件

評価長さ [mm]	4
カットオフ値 [mm]	0.8
走査速度 [mm/s]	0.3

確認されたが、球状凝固は生じていなかった。そのため、表面粗さは水管上面よりも小さく $R_z=116\mu\text{m}$ であった。

これらの結果から、水管内面の性状は、積層造形法に起因して上面と下面で大きく異なることがわかった。これまでの研究で、性状の異なる水管内面を加工するとき、水管面上の不十分結合層が除去されて合金化層が露出することが、仕上げ加工を実用化するための指標となることがわかっている。そのため、本実験でも水管内面の光学顕微鏡観察および表面粗さ測定を行って、提案する加工法を評価する。

4.3 実験方法

前節で切断した造形物を用いて、水管内面の再加工実験を行った。造形物は、実験の時に水漏れすることを防ぐためシール材(アサダ(株)製: R50356)を介してクランプした。そして、一定時間加工を行った後、クランプを外して水管内面の様子を光学顕微鏡で観察した。また、表面粗さ計(株東京精密製: SURFCOM-2000DX)を用いて、表4に示す条件で水管内面の頂上部と最下部の粗さを測定した。測定方向は、水管内面の長手方向であり、突起を付加した内面の測定では突起を含

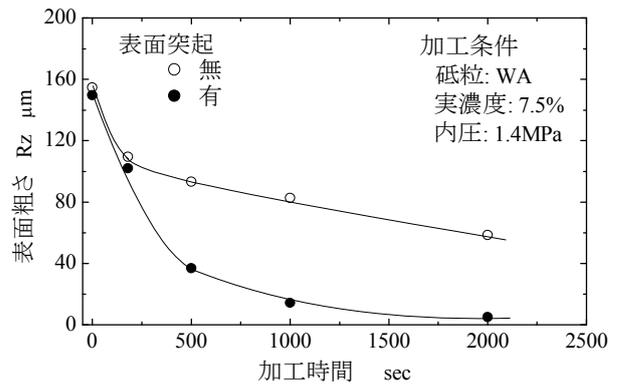


図7 水管上面の加工特性



(a) 突起なし ($R_z=58 \mu\text{m}$)



(b) 突起あり ($R_z=0.8\mu\text{m}$)

図8 2000秒加工後の水管上面の様子

まない位置で評価した。また、再加工実験後の粗さ測定は同じ位置で行った。そして、これらの再加工実験と評価を繰り返し行い、加工時間が表面性状に及ぼす影響を調べた。このとき、解析と同様に表面突起のない冷却水管でも加工実験を行って比較した。

4.4 表面突起付加による水管上面の加工特性

水管上面について、表面突起の有無による加工時間と表面粗さとの関係性を調べた結果を図7に、2000秒加工した後の水管上面の中央付近を光学顕微鏡で観察した結果を図8に示す。加工前の表面粗さは、図6(a)に示したように面上に積層造形法に起因しただれや不十分焼結層が存在するため、

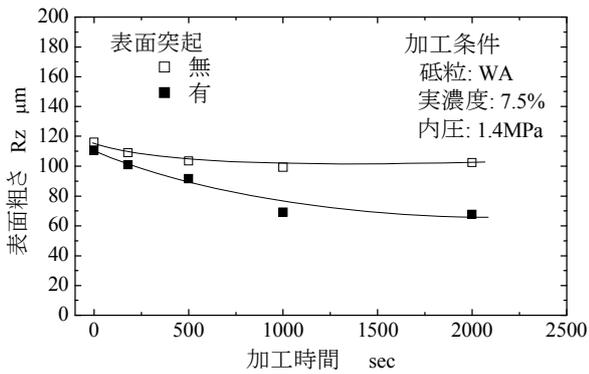


図9 水管下面の加工特性

$R_z=155\mu\text{m}$ 程度であった。表面粗さは、図7に示すように表面突起の有無に関わらず加工時間が長くなるにつれて小さくなった。また、加工開始から180秒までは急激に表面粗さが改善された。懸濁液が管壁に沿って流れるとき、懸濁液内の砥粒が遠心力によって水管上面に接触し、遠心力に起因した高圧・高速流動研磨の効果が得られ、それに伴って水管表面の未熔融粉末や不十分結合層が除去されたためと考えられる。その後、加工が進行するにつれて水管表面に合金化層が露出し、表面突起がない水管では表面粗さの減少が緩やかになった。その結果、2000秒加工した上面の表面粗さは、図8(a)に示すように $R_z=58\mu\text{m}$ となった。

一方、表面突起を付加した水管では、未熔融粉末や不十分結合層が除去された後も加工時間とともに表面粗さが改善された。これは、遠心力に起因した高圧・高速流動研磨の効果に加えて、流れが乱流になったことに伴う攪拌研磨効果が得られたためと考えられる。水管下面の流体がらせん状突起に沿うようにして上面側に押し上げられ、砥粒を効率的に管壁に接触させることができ、その作用で加工が進行したと考えられる。その結果、2000秒加工した上面の表面粗さは、表面突起を付加することで著しく改善され、図8(b)に示すように $R_z=0.8\mu\text{m}$ となった。

4.5 表面突起付加による水管下面の加工特性

水管下面について、表面突起の有無による加工時間と表面粗さとの関係を調べた結果を図9に、2000秒加工した後の下面の中央付近を光学顕微鏡で観察した結果を図10に示す。加工前の表面粗さは、図6(b)に示したように積層造形法に起因した球状凝固が面上になく、 $R_z=116\mu\text{m}$ 程度であった。突起のない水管では、遠心力に起因した高圧・高速流動研磨の効果が得られず、加工時間を長くしても水管下面の表面粗さはほとんど減少しなかった。また、図10(a)に示すように2000秒加工した後も水管内面に錆が観察された。造形物表面に付着した未熔融粉末など結合力の弱い層が水流によってわずかに除去されたが、不十分結合層を十分に加工することはできなかった。

一方、突起を付加した水管では水管上面の加工実験と同様に、加工時間とともに表面粗さが改善された。また、図10(b)に示すように、2000秒加工すると表面にわずかに錆が

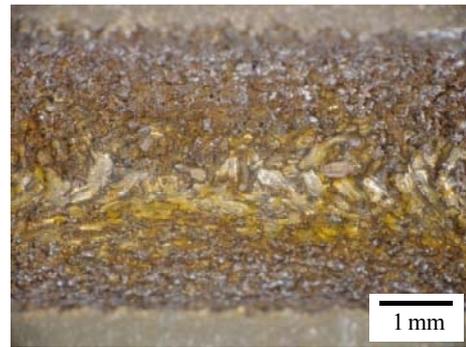
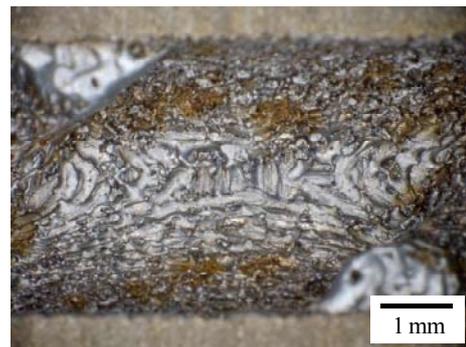
(a) 突起なし ($R_z=102\mu\text{m}$)(b) 突起あり ($R_z=68\mu\text{m}$)

図10 2000秒加工後の水管下面の様子

残ったが、合金化層が露出して未熔融粉末や不十分結合層が除去された。水管上面の加工と異なり、遠心力に起因した高圧・高速流動研磨の効果は得られないが、突起を付加することで内部流れが乱流となり、攪拌研磨効果によって加工が進行したためと考えられる。

本論文では具体的に述べていないが、本実験および評価は水管の側面についても行った。その結果、水管下面の結果と同様、表面突起を付加することで攪拌研磨効果が得られ、水管内面の性状が改善された。

これらの結果から、表面突起を付加することで、水管の全面に対して加工できることがわかった。水管の曲率が内面の加工性に及ぼす影響についてさらに検討する必要がある。しかしながら、提案する本手法は、積層造形とエンドミルの複合加工機を用いて金型冷却水管を製作する過程で、水管下面を切削する工程を省ける可能性を有している。その結果、同複合加工機による金型製作において、製作時間の短縮も期待できる。

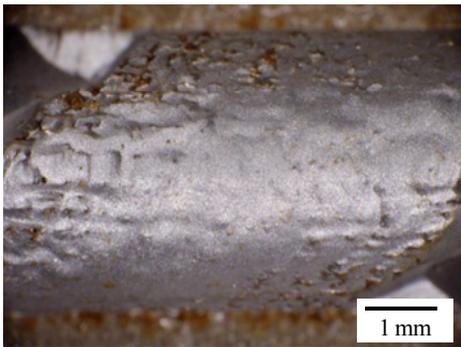
4.6 水管加工の既存金型への適用性

本実験で用いた水管内面の仕上げ加工装置について、既存金型への適用可能性を検討するため、内面上の錆の除去性について調べた。実験では、3000秒加工した水管に対して、防錆処理をほどこさずに水中で1週間放置し、その後再び本装置を用いて加工実験を行った。

加工前後の水管下面を観察した結果を図11示す。図11(b)は、放置した水管に対して500秒加工した結果である。



(a) 加工前



(b) 500 秒加工後

図 11 水管下面の錆に対する加工性

図 11(a)から、加工前の水管表面では露出した合金層にも錆が確認されたが、これらの錆は500秒加工することで除去できた。すなわち、水管内面に対する表面突起の付加が、造形物表面の未熔融粉末や不十分結合層の除去だけでなく、内面上の錆を除去することにも効果的であり、既存金型の冷却水管をメンテナンスする用途にも適用できると考えられる。

これらの結果から、これまで加工性が著しく乏しかった曲線状の冷却水管について、表面突起を付加することで効果的に加工できることがわかった。また、本論文では記載していないが、ダイヤモンド砥粒や CBN 砥粒を用いた水管内面の加工性についても調べた。その結果、本実験の範囲では、費用対効果の観点から本実験で用いたアルミナ砥粒が最も適していた。加えて、提案する本手法が水管内面の錆を除去する用途にも適用でき、複雑な水管形状や内面性状に対して安価で効果的に加工できることを示した。

本報では、積層造形で得られた金型内部の冷却水管について、面上に存在する不十分結合層を除去することを目的として、らせん状の表面突起を付加することを提案した。これらの表面突起は、加工終了後にも内面上に残存することになり、金型使用時に冷却水を流動させた際にも、その流れを乱流にすると考えられる。冷却水の流れが冷却性能に及ぼす影響については、今後さらなる検討が必要である。

5. 結言

金属粉末を積層造形して得られる金型内部の冷却用水管

について、表面突起を付加して水管内面を仕上げ加工する手法を提案し、水管内部の流れ解析を行うとともに、これまで著しく加工性が乏しかった曲線状の水管内面に適用を試みた。また、既存金型の水管内面メンテナンスへの適用可能性について調べた。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 曲線水管の内面下側にらせん状突起を付加することで、内部流れを乱流にすることができ、水管下側の流体を上面側に押し上げる効果がある。
- (2) 懸濁液内の砥粒に遠心力が作用する面では、高压・高速流動研磨の効果によって水管内面を加工することができる。また、表面突起を付加することで流れが乱流となり、攪拌研磨効果も得られて加工効率が上がる。
- (3) 懸濁液内の砥粒に遠心力が作用しない面では、高压・高速流動研磨の効果は得られない。しかしながら、表面突起を付加することで内部流れを乱流にでき、攪拌研磨効果によって内面を加工することができる。
- (4) 水管内面の仕上げ加工装置は、内面上に付着した錆の除去にも効果がある。

謝辞

本実験で使用した金属光造形複合加工機は、パナソニック株式会社エコソリューションズ社からお借りしました。記して深甚なる謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) H. Kodama: Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *Rev. Sci. Instrum.*, 52, 10 (1981) 1770.
- 2) J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke and T. H. Childs: Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Ann.*, 56, 2 (2007) 730.
- 3) S. Abe, Y. Higashi, I. Fuwa, N. Yoshida and T. Yoneyama: Milling-combined laser metal sintering system and production of injection molds with sophisticated functions, *Proc. of 11th Int. Conf. Precis. Eng.*, Tokyo, Japan, (2006) 288.
- 4) A. Yassin, T. Ueda, T. Furumoto, A. Hosokawa, R. Tanaka and S. Abe: Experimental investigation on cutting mechanism of laser sintered material using small ball end mill, *J. Mater. Process Tech.*, 209, 15-16 (2009) 5680.
- 5) T. Shinmura, H. Yamaguchi, Y. Shinbo: A new internal finishing process of a non-ferromagnetic tubing by applying a rotating magnetic field, *Int. J. JSPE*, 26, 4 (1992) 302.
- 6) K. Yamamoto, T. Kurobe, Y. Yamada and T. Miura: High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capillary (1st Report), *Fundamental Polishing Characteristics*, *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, 64 1 (1998) 126 (in Japanese).
- 7) R. S. Mulik and P. M. Pandey, Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives, *Int. J. refract. Met. H.*, 29, 1 (2011) 68.
- 8) T. Furumoto, T. Ueda, T. Amino and A. Hosokawa: A study of internal face finishing of the cooling channel in injection mold with free abrasive grains, *J. Mater. Process Tech.*, 211, 11 (2011) 1742.
- 9) T. Furumoto, T. Ueda, T. Amino and S. Abe: Inner face polishing of molding die with flowing slurry (2nd report), Improvement of inner face characteristics with face protuberance, *Die and Mould Technology*, 26, 12 (2011) 74 (in Japanese).
- 10) T. Furumoto, T. Ueda, N. Kobayashi, A. Yassin, A. Hosokawa and S. Abe: Study on laser consolidation of metal powder with Yb: fiber laser, Evaluation of line consolidation structure, *J. Mater. Process. Technol.*, 209, 18-19 (2009) 5973.
- 11) M. Shiomi, A. Yoshidome, F. Abe and K. Osakada: Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders, *Int. J. Mach. Tool Manufact.* 39, 2 (1999) 237.