



K. Hokamoto

爆発圧接技術を応用した均一多数穴を 内包する長尺中空材料の創製

外本 和幸*

1. まえがき

一方向にそろった多数の穴構造を内包する材料としては、中嶋が開発したロータス (Lotus) 金属¹⁾がよく知られている。このロータス金属は、金属液相を一方向凝固させるプロセスで熔融金属中にガスを発生させ、穴の方向が一方向に配向した多孔質構造を形成させて製造される。この方法で得られる穴の径は比較的小さく、均一な形状ではない。

これに対して本稿では、異なる手法で一方向に均一な多数穴を有する多孔質材を得ることを試みた結果について報告する。ここでは、多数の細い金属管中にロウなどを挿入したものを束ねて太い金属管に入れ、その周りに設置した爆薬を爆発させることで、瞬間的な高圧力を作用させて材料を回収する。回収後、低融点のロウを加熱して溶かすことで、一方向に均一な穴構造を内包する多孔質材料が得られる。我々は、これをユニポア材と称して、良好な成形体を得るための条件や力学特性の他、各種の応用の可能性について検討している。

この方法は、基本的には爆発圧接技術の応用である。爆発圧接では、2枚の金属板の一方を高速加速して、相手材と傾斜衝突させることで、衝突点で生じる激しい材料流動現象 (金属ジェット) が生じ、励起された金属表面同士が高圧下で強固に結合される。この技術は、特に異種金属の接合に有効であり、広く工業化されている²⁾。

この方法で得られたユニポア材は、前述のロータス金属とは異なり、穴の形状はどの横断面からみてもほぼ同一で、まっすぐな穴構造を形成する。

塑性加工法によって類似の構造を作ること宇都宮ら³⁾が提案しているが、通常の塑性加工法では材料を長手方向に伸ばさせながら加工が進むため、肉厚が薄い箇所にはくびれ破断が起こりやすいと思われる。このため、長尺の材料を均一に加工することは難しそうである。

我々が用いた爆発圧接を応用する方法の特徴は、高圧力の作用が、円周から中心方向に向かって作用するので、加工の前後で板厚はあまり変化しないことにある。長手方向へはほとんど伸びないことから、均一な肉厚のユニポア材の製造が期待できる。爆発圧接の生産現場では数メートルのサイズの異種金属接合体 (クラッド材) の生産活動が行われているので⁴⁾、同程度の長尺材の製造は十分に可能で

あると思われる。

ここでは、銅やアルミの他、異種金属の管を複合するなどして、各種円筒形状のユニポア材の製造を試みた結果について紹介する。

2. 実験方法

図1に、本研究で使用した装置の模式図と太い銅管中に挿入した多数の銅細管の充填状況を示す。ここでは、ロウを充填した細い金属管を、太い銅管中になるべく多く挿入した。使用した爆薬は、爆轟速度が比較的低く、爆発圧接に多く用いられる ANFO 系の爆薬 (爆速約 2.4km/s、密度約 530kg/m³) を、雷管とブースターを用いて起爆し、材料を回収した。

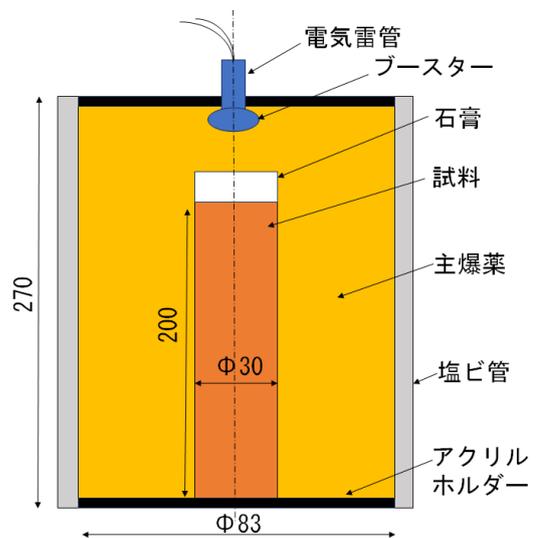


図1 実験装置の模式図(上)と実験前の充填状況(下)

*熊本大学 産業ナノマテリアル研究所 教授

起爆後、爆薬中に爆轟波がまず伝播し、その時に生じる超高压の爆轟ガス圧力(推定値; 0.763GPa^5)の作用によって外管(太い管)が数百 m/s 程度の高速に加速され、細管を圧縮しながら成形加工が進み、最終的には空隙のない成形体が回収される。細管中に挿入したロウは、成形体回収後も細管内にとどまっておき、期待したような均一な一方向多孔質構造が得られた。

3. 実験および評価結果

3.1 銅のユニポア材に関する実験結果

図2に、回収された試料の外観と切断面の横断面写真を示す。回収された材料は、上下端の部分以外は概ね均一に成形されていると共に、断面写真を見る限り細管同士は良好に接合されていると思われた。試料の上端部は上方にある爆薬からの圧縮作用による変形、下端部は栓で封じた終端部分が慣性力によって引張破断を生じていた。

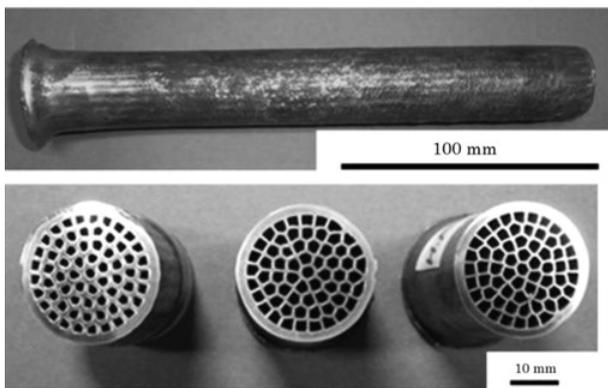


図2 回収材料の外観と横断面⁵⁾

図3に、細管の厚さ($t=0.5, 0.3, 0.2\text{mm}$)を変化させて得られた空隙率の異なる材料について、横断面の光学顕微鏡写真を示す。図3のいずれの写真にも、3つの細管が最後に衝突・接合する部分において、激しい変形・衝突で生じた溶融部が観察された。これは通常の爆発圧接と同様に、金属の高速傾斜衝突による金属ジェットによって生じた可能性もあるが、後に示す数値シミュレーションでは大変形後の温度上昇によって溶融が生じたとも考えられた。いずれにしても、細管同士の結合は良好であり、管壁同士が強固に接合している状況が確認された。

この溶融部周辺の硬度測定を行った結果を、図4に示す。図4によると、溶融部のビッカース硬度値(HV)は44~61程度で、焼きなまし処理した銅の硬度(HV60程度)か、低めの値を示した。特に硬度の低い領域は、溶融部に微細な収縮孔などの欠陥が多少生じていると推察された。これに対して溶融部以外は、HV130~150程度の値を示して十分に加工硬化していた。ちなみに、入手ままの銅の硬度値はHV120程度であった。また、溶融部近傍の非溶融領

域では高い硬度値が測定されており、これは激しい高速変形によって材料組織中に多くの構造欠陥が導入されたことによると思われた。

ここで、材料の断面積から計算した空隙率を、初期断面積から推定した理論空隙率と比較すると、いずれの試料についても実測値が理論値よりわずかに低下した。これは、細管の下端から多少のロウが、押し出されたことによると思われた。

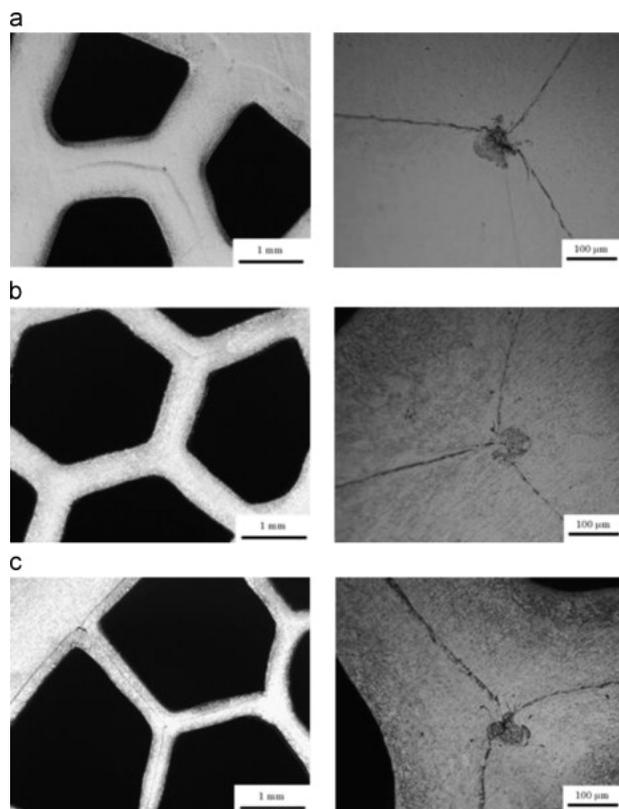


図3 断面の光学顕微鏡組織、低空隙率(a)、中空隙率(b)、高空隙率(c)⁵⁾

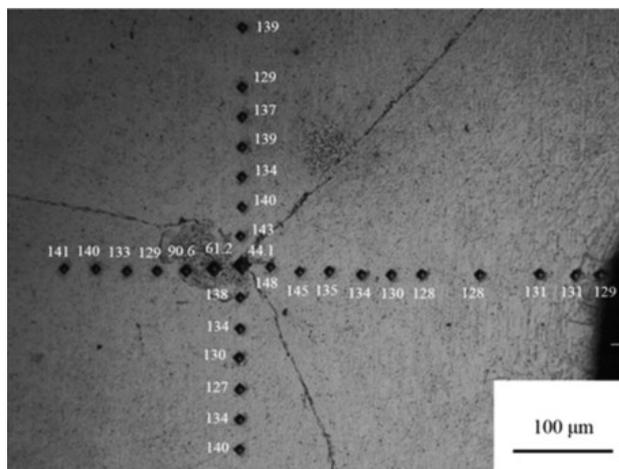


図4 高空隙率材の顕微鏡組織写真(ビッカース圧痕)⁵⁾

図5は、回収材料の縦断面の光学顕微鏡組織を示す。図5(a)に示す細管の肉厚が薄い場合（高空隙率）には、爆発圧接においてよく観察される波状界面が認められ⁶⁾、爆発圧接のメカニズムに基づいて激しく流動して良好な接合状態であることが示された。このことは、加速される金属の肉厚が薄いときには、容易に加速され、高い衝突速度と衝突角度が得やすかったことによると考えられた。これに対して、図5(b)に示す厚肉（低空隙率）の材料は、壁の質量が大きいことで、加速が難しく、十分な流動が得られずに平滑な境界を示すようであった。ここで、管同士の衝突においては、衝突傾斜角が一定でないこともあって、波の形成条件を満たさなかった可能性も考えられた⁴⁾。ただし、平滑な接合境界を示す場合にもはく離などは観察されず、材料同士の接合は十分に良好であると思われた。

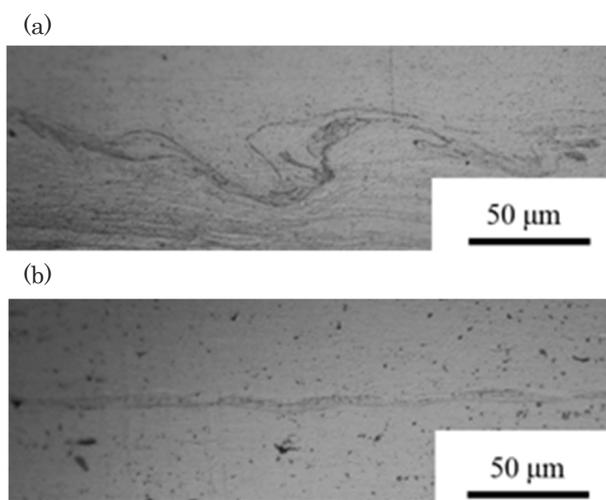


図5 高空隙率材に観察された波状境界(a)⁶⁾、低空隙率材に観察された平滑な境界(b)

図6は、細管の肉厚が薄い場合（高空隙率）の縦断面の光学顕微鏡写真を示す。この断面写真には、わずかにくびれ（ネッキング）が生じている部分が認められた。回収サンプルはわずか（数%程度）ではあるが伸びひずみが測定されているので、部分的にくびれが生じる可能性は否定できない。しかしながら、細管の肉厚が薄い高空隙率の材料に対しても、接合した管壁の断面が破断するような状況は観察されなかった。すなわち、この材料（銅のユニポア材）に関しては、個別の細管の穴は区切られ、それぞれが閉じた構造を有していることも、特徴のひとつであるといえる。

ここで金属の衝突速度について簡単な見積り算を行った所、300~400m/s程度の速度に達していると推定された⁵⁾。銅の場合、爆発圧接に要する最低速度は200m/s⁴⁾程度と見込まれるので、十分に接合が可能な速度条件に達していると思われた。

円筒形状の内部にある多数の細管の衝突過程においては、中心軸に向かって圧力が高まり、マッハ軸を形成して中心部が吹き飛ばすようなケースが生じる可能性がある。実

際、金属円筒内に粉末を充填して行う爆発圧縮成形の場合、中心軸上に穴が空く現象が多く報告されている^{7),8)}。一方で、圧縮成形時の抵抗が大きい場合には、圧力が減衰して中心部の成形が十分に行われない場合も生じる⁸⁾。今回得られた試料は、外側の太い管の周辺部から中心部まで比較的均一に接合されていると思われ、圧力の作用が全体的にバランスした状況で接合できていると思われた。

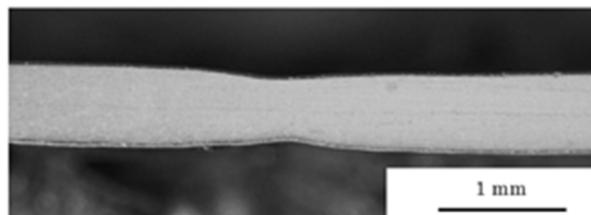


図6 高空隙率材で観察された長手方向へのネッキング⁶⁾

図7に、得られた材料を準静的圧縮した時の変位-荷重曲線を示す。実験は、回収された3種類の空隙率を有する材料に対して、円筒軸方向に垂直（transverse）に圧縮する実験と、軸方向（longitudinal）に圧縮する実験を行った。ここでは単管に対する圧縮実験結果も併せて示す。圧縮試験は、0.1mm/sのクロスヘッド速度で実施した。

図7から明らかなように、材料を円筒軸方向に垂直に圧縮した場合には、多孔質材料に特有のプラトー（荷重の平坦部）が観察され、空隙率が低いほど荷重値が高くなる一方、平坦部の変位幅は小さくなる結果であった。軸方向に圧縮した場合には、垂直方向への圧縮と同様、空隙率が低いほどプラトー荷重は高くなった。また、この場合の荷重は、垂直方向への圧縮の場合よりかなり高く、異方性があることが示された。軸方向に圧縮される場合、接合された細管同士が支えあうことで、プラトー荷重は比較的一定となり、座屈のような現象は起こりにくい状況であると思われた。

矩形に切り出した銅のユニポア材について、穴の方向に対して垂直に、火薬銃を用いて400m/s程度の速度で鋼（剛体）に高速衝突する実験を実施した時の光学観察結果を図8に示す。ここでは、左側の鋼板に対して、右側にあるサボ（加速用のプラスチック弾）の先端に設置したユニポア材が衝突している状況が撮影された。ここでは特に、衝突に伴って小さな穴が閉塞するごとに、発光現象が観察された⁹⁾。

図9は、その時の数値シミュレーション結果であるが、穴の閉塞に伴って高圧状態が生じていることが確認され、最大圧力値で25GPa程度の高圧力が発生していると推察された⁹⁾。

別報¹⁰⁾では、穴形状を三角形状にすると穴の閉塞時における圧力収束の度合いを高めることができ、70GPa程度の高圧力が発生することも数値シミュレーションによって確認している（図10）。

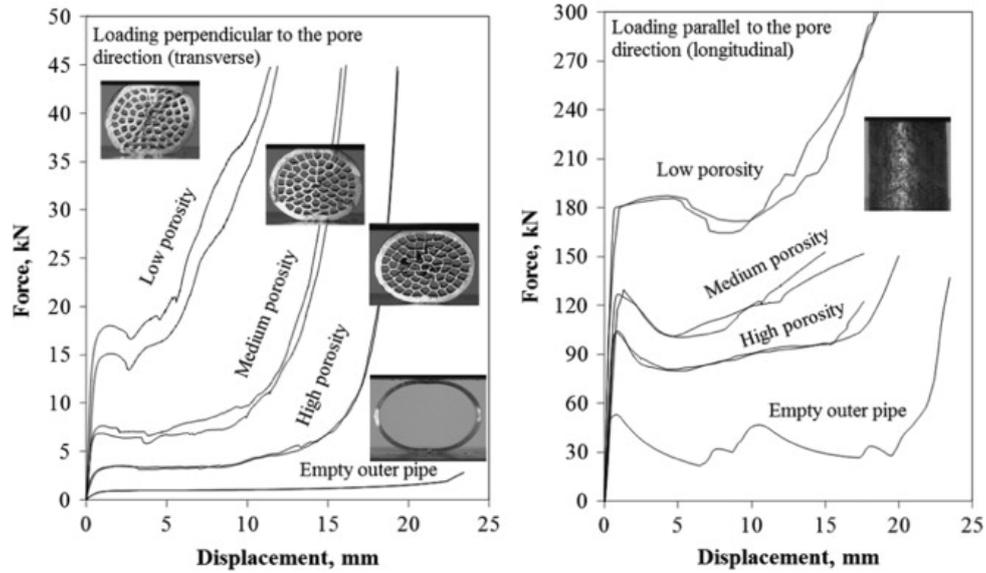


図7 銅のユニポア材に関する圧縮試験結果⁵⁾

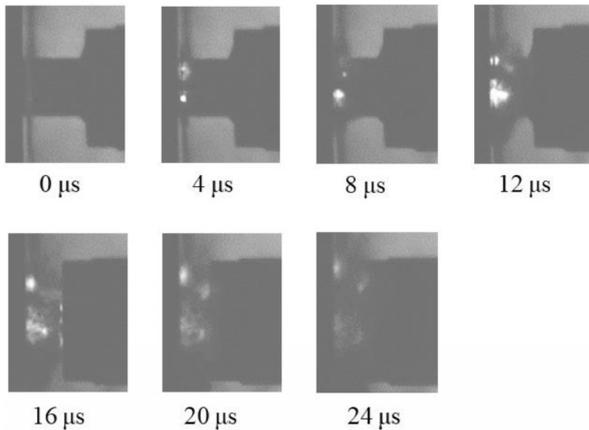


図8 高速衝突に伴うユニポア材の光学観察結果⁹⁾

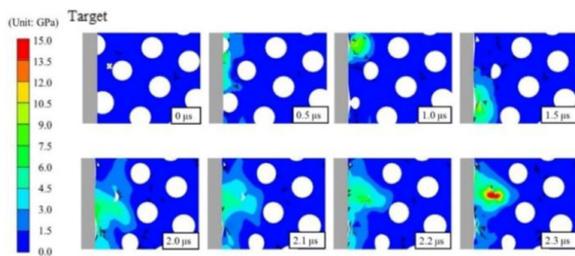


図9 高速衝突時のユニポア材の変形シミュレーション⁹⁾

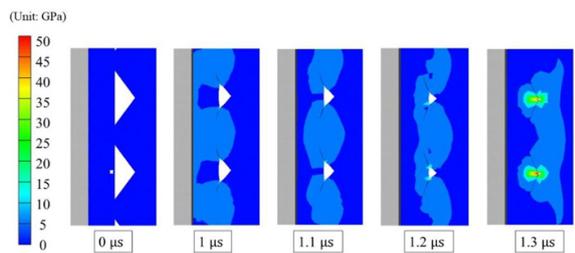


図10 三角穴の閉塞過程の変形シミュレーション¹⁰⁾

この他、伝熱特性評価を実施して伝熱相関式を構築し、これを活用して 10MPa の圧力下でのヘリウムガス冷却（管内流速；25m/s）で、30,000W/m²/K を超える熱伝達係数が得られ、ガス冷却ダイバーターの候補にもなる得ることが示された¹¹⁾。

3.2 その他の材料からなるユニポア材の創製

これまでは、銅に関する実験結果について示したが、純アルミを用いたユニポア材の創製についても試みた。ここでは、細管の肉厚が 0.2mm と 1mm の場合についての結果を示す¹²⁾。

ここで回収実験は、図1に示した銅の装置とほぼ同じ装置を使用し、概ね良好な成形体が得られている。回収材料の横断面写真を図11に示す。

実験条件に対応する試料を爆発圧縮成形した時のシミュレーション結果を図12に示すが、回収された材料の断面組織の予測結果は、図11の実験結果とほぼ同様であった。これは、周囲からの高圧力の作用で外側の太い管が加速され、まずは空隙を埋めるように成形が進むことから、容易に推察がつく結果であった。この場合も銅と同様に、長手方向への変形（伸長）もわずかであり、成形前の初期断面積から予測した空隙率よりも、成形後の空隙率が多少小さい値を示す状況であった。

管の肉厚が薄い場合には、激しい変形によって管が伸長され、破断するようなことも生じていた。図13は横断面 (a) と縦断面 (b) の顕微鏡組織写真を示すが、特に細管の肉厚が薄い (0.2mm) 場合に細管が内部に向かって大変形を生じるようなことがあり、図13 (a) に示すように、細管が破断している個所が認められた。銅より相対的に軟らかいアルミの場合には、細管が局所的に大変形を生じやすい状況も、図14の数値シミュレーションで確認されている（この場合、破断条件は考慮していない）。

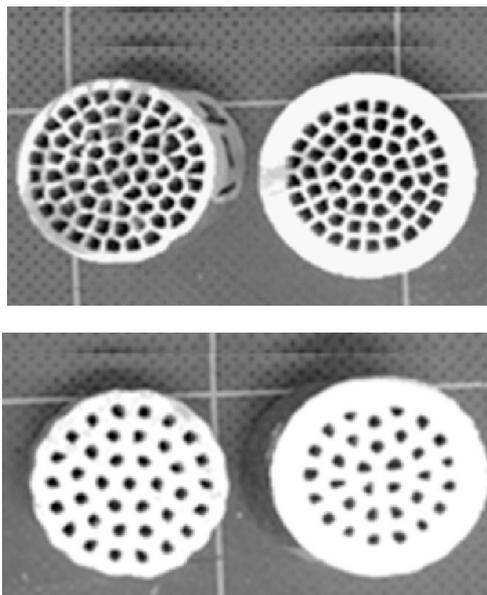


図 11 回収材料の断面¹²⁾

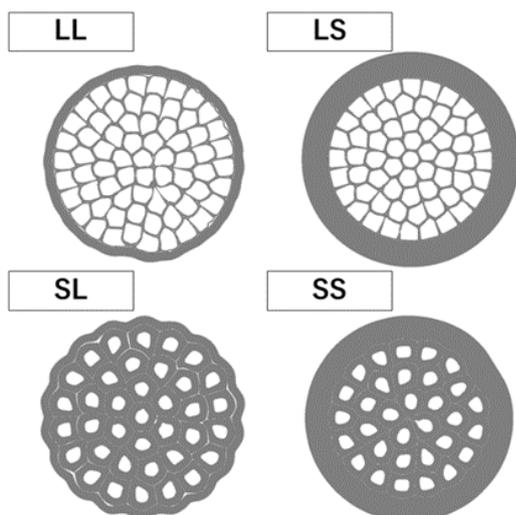


図 12 シミュレーションによる断面形状予測¹²⁾

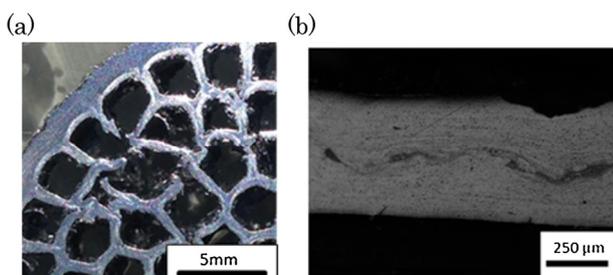


図 13 回収材料の顕微鏡組織¹²⁾
(横断面(a)と縦断面(b))

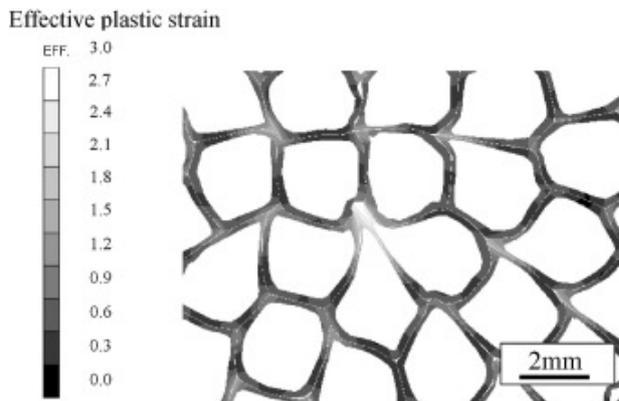


図 14 シミュレーション結果の拡大図¹²⁾

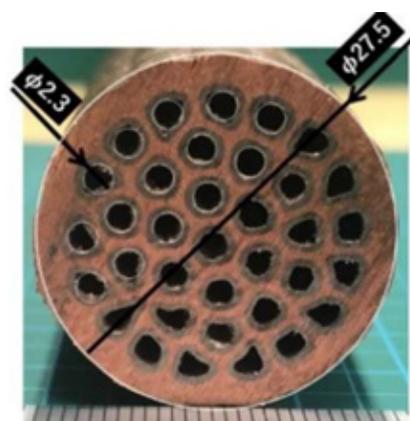


図 15 ステンレス鋼と銅からなる
複合構造のユニポア材¹³⁾

図 13 (b) は接合された材料の縦断面を示すが、この場合には波状界面を形成して、細管の壁同士は良好に接合している状況が観察された。

図 15 は、銅の細管中にステンレス鋼の細管を挿入して作製した複合構造のユニポア材の断面写真である。また、図 16 に示すように、内外の太い銅管の間に銅の細い丸棒とロウを封入したステンレス鋼細管を交互に挿入することで、複雑な内部構造を持つユニポア材の創製も可能であった¹³⁾。この時得られた材料の断面写真を図 17 に示すが、ステンレス鋼の細管がうまく変形して、矩形形状のマイクロチャンネル構造を実現することができた。

図 18 は矩形に変形したステンレス鋼近傍の顕微鏡組織写真であるが、ステンレス鋼が屈曲した部分近傍の銅が溶融している状況が認められた。数値解析による温度分布を図 19 に示すが、ステンレス鋼屈曲部周辺の銅に 1000℃以上の高温域が生じており、実験との良好な対応関係が確認された。

上記以外にも、細管をらせん状や直交するように配置することなどによっても、多様なユニポア構造を実現することは可能と思われる¹⁴⁾。今後、各種の中空構造を有する材料の創製と新しい応用展開を期待したい。

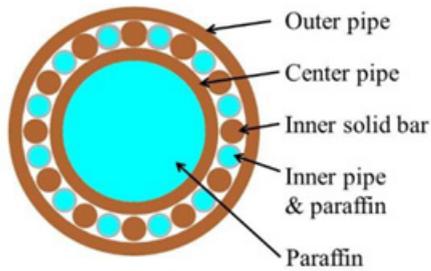


図 16 複雑な内部構造のユニポア材創製の試み¹³⁾



図 17 回収された複雑な内部構造を持つユニポア材¹³⁾

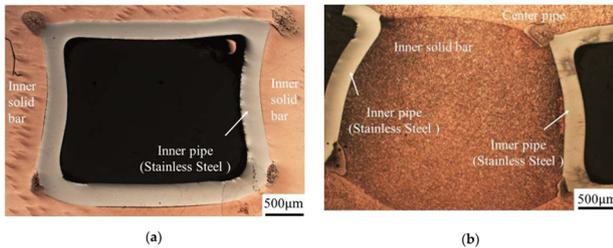


図 18 矩形に変形したステンレス鋼周辺の組織¹³⁾

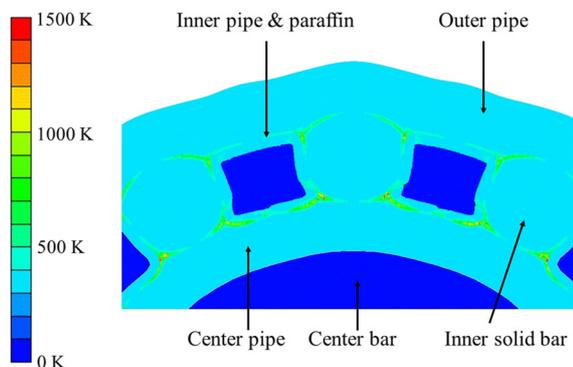


図 19 ステンレス鋼周辺の温度上昇のシミュレーション結果¹³⁾

4. まとめ

爆発圧接技術を応用して、均一多数穴構造を持つ円筒形状の多孔質材料（ユニポア材）の創製に関して実施した研究の結果について報告した。単一の材料だけでなく、複合構造や複雑な穴構造からなる材料の創製も可能であり、メートルサイズの長尺材の製造も実現できそうなので、今後、各種の新しい用途を開拓できればと考えている。特に熱交換機の小型化など、冷却に関する応用展開があることを期待している。

また、軸対称形状（管）への応用にとどまらず、薄板形状のユニポア材の創製などにも新しい展開を模索しており、現在研究を進めている。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの研究助成によって実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) Nakajima, H.: Progress in Materials Science, 52-7(2007), 1091.
- 2) 外本和幸・氏本泰弘：塑性と加工, 43-496(2002), 370.
- 3) 宇都宮裕・鶴田裕之：素形材, 53-2(2012), 14.
- 4) Crossland, B.: Explosive Welding of Metals and its Application, (1982), 84-129, Clarendon Press.
- 5) Hokamoto, K., Vesenjaj, M. & Ren, Z.: Materials Letters, 137(2014), 323.
- 6) Vesenjaj, M., Hokamoto, K., Sakamoto, M., Nishi, T., Krstulovic-Opare, L. & Ren, Z.: Materials and Design, 90(2016), 867.
- 7) Meyers, M.A. & Wang, S.L.: Acta Metall., 36(1988), 925.
- 8) Pruemmr, R.A., Balakrishana Bahat, T., Siva Kumar, K. & Hokamoto, K., Explosive Compaction of Powders & Composites, (2006), 1-41, Scientific Publisher.
- 9) Nishi, M., Tanaka, S., Vesenjaj, M., Ren, Z. & Hokamoto, K.: Int. J. Impact Eng., 136(2020), 103409.
- 10) Nishi, M., Tanaka, S., Mori, A., Vesenjaj, M., Ren, Z. & Hokamoto, K.: Metals, 12(2022), 128.
- 11) Yuki, K., Kibushi, R., Kubota, R., Unno, N., Tanaka, S. & Hokamoto, K.: Energies, 15(2022), 1042.
- 12) Hokamoto, K., Shimomiya, K., Nishi, M., Krstulovic-opara, L., Vesenjaj & Ren, Z.: J. Mater. Process. Technol., 251(2018), 262.
- 13) Nishi, M., Tanaka, S., Vesenjaj, M., Ren, Z. & Hokamoto, K.: Metals, 10(2020), 193.
- 14) 外本和幸・大塚 誠彦・飛田 栄治・ゾーラン レン・マテイ ベセニャク：特許第 6821150 号, 第 6856208 号, (2021).