

爆発圧接法を用いた微細多数穴による チャンネル（ユニポア）構造の創製

熊本大学 産業ナノマテリアル研究所
教授 外本 和幸

(2019年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2019005-A3)

キーワード：爆発加工，爆発圧接，多孔質材料，ユニポア

1. 研究の目的と背景

多孔質材料は、エネルギー吸収能や遮音性、熱伝導性など、多様な機能的特徴を有する新素材である。本研究では、多孔質構造に方向性を持たせた材料（ユニポア材）の創製を、爆発圧接法を応用することで実現しようとする。爆発圧接法は、異種金属でも非常に高い接合強度を実現できることから¹⁾、この技術を応用することで一方向にそろえた多数穴構造を実現できることがこれまでの研究で明らかにされている²⁾。

類似の材料としては、ロータス型ポーラス金属³⁾がよく知られているが、この方法では金属溶湯中にガスを導入しながら伸長された多数穴構造を形成するので、穴の構造は比較的微細かつ不均一である。これに対してユニポア材は、均一な断面構造を持つ多数の管に、後で取り出すことのできるロウなどを封入してその外側から爆発力を作用することで、一体化された均一なチャンネル（ユニポア）構造を実現できる（図1，図2）。

本報告では、円筒型と平板型のユニポア材の創製法と、各種の特性評価を実施した研究成果について報告する。

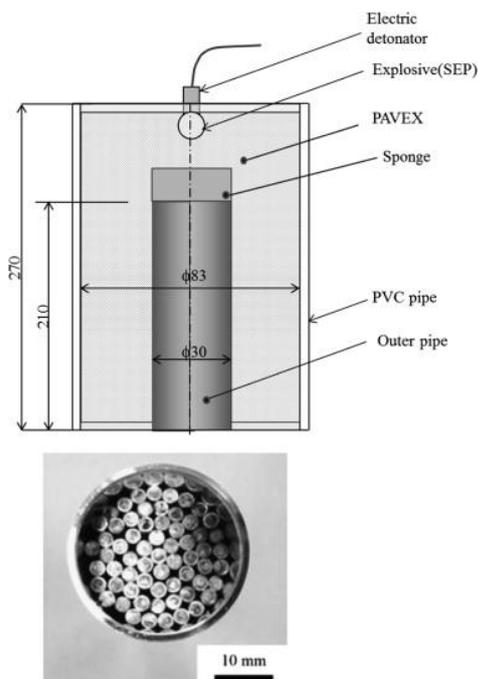


図1 円筒型ユニポア材の製造方法²⁾

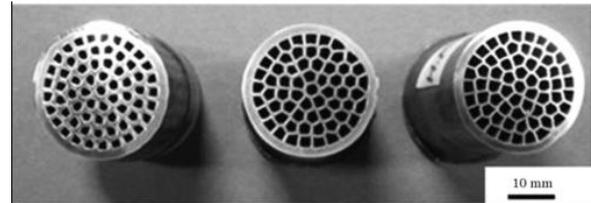


図2 円筒型ユニポア材の断面²⁾

2. 円筒型ユニポア材の創製と評価

従来型と異なる内部構造を持つユニポア材の創製を試みた一例を、図3の断面写真に示す。この場合は、大きさの異なる2つの太い銅管の間に、銅の細い丸棒とステンレス鋼細管にロウを挿入したものを交互に配置して、図1と同様の方法で爆発圧力を作用させることで成形し、複合構造のユニポア材を得ることを試みた結果である。この場合、円筒形状のステンレス鋼管が四角形状に変形して矩形断面のチャンネル構造を得ることができた。

図4にAUTODYN-codeを用いた変形過程の数値解析結果を示すが、細い水色の部分がロウを封入したステンレス鋼管で、実験結果と同様に矩形のチャンネル構造が得られることが確認されている。

図5に温度分布の数値解析結果を示すが、空隙が最後に閉じる矩形断面の折れ曲がり部分の付近に1000℃を超える高温領域が生じており、銅の一部に溶融が生じると推察された。実際の断面組織においても、矩形に折れ曲がったステンレス鋼近傍の銅の部分に溶融が確認されている。

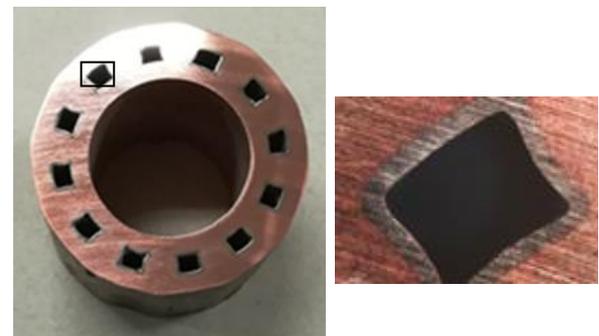


図3 複合構造からなる円筒型ユニポア材の断面組織

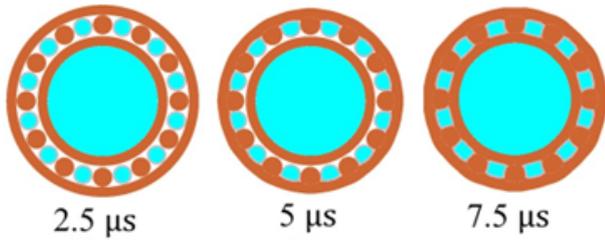


図4 AUTODYNによる変形過程の数値解析結果

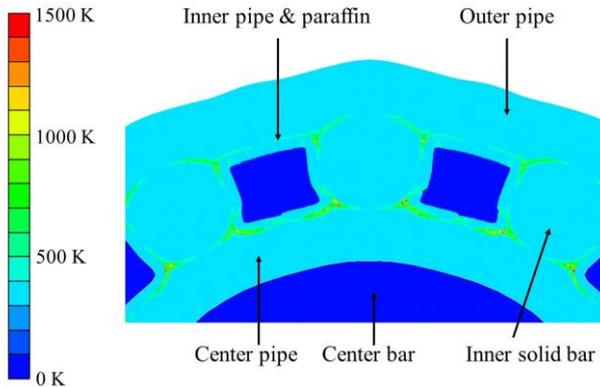


図5 温度分布の数値解析結果 (10μs 後)

多孔質材料は、衝突変形時のエネルギー吸収材料等への期待もあり、本研究では火薬衝撃銃を用いて高速衝突実験を実施することを試みた。ここでは、立方体形状 (17.3x17.3x17.3mm³) に切り出した材料を穴が整列している方向に対して垂直に加速して、厚い鋼板上に数百 m/s の速度で衝突させ、高速度カメラを用いて光学観察実験を実施した。この実験では、空隙が閉塞する時に発光現象が観察され、超高温・超高压が発生している状況が確認された。同じ条件で AUTODYN を用いた数値解析 (図6が衝突モデル) を実施した結果 (衝突速度 400m/s の場合) を図7に示す。穴の変形は、まず加速方向に穴を押しつぶす現象が生じ (図7 (a)の左向きの矢印)、その後鋼板との衝突で生じた反射波によって逆方向への速度成分も生じ (図7 (b)の右向きの矢印)、これらが対向衝突することで穴が閉塞することが確認された。穴が閉塞する時の対向衝突で生じる圧力は 16GPa 程度と見積もられ、超高压の発生技術としても応用が可能ではないかと期待している⁴⁾。

ここで円筒形状ではなく、三角形状の穴形状を用いた場合のシミュレーションも実施したが、形状を工夫することで 70GPa 程度の超高压の発生が可能であることが予測された⁴⁾。この場合は、三角形の傾斜角をうまく調整して金属の傾斜衝突で生じる材料の高速流れを左右の2ヶ所に形成し、これらを対向衝突させて 1400m/s 程度の相対速度を生じさせることによって、さらに高い圧力を実現できる可能性が示された⁴⁾。

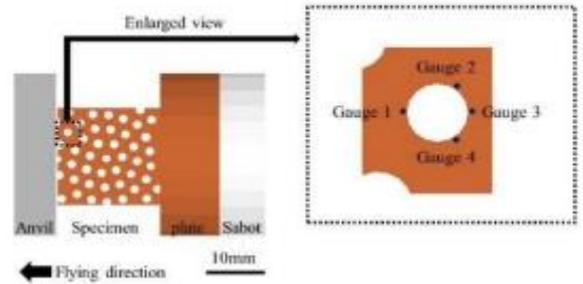
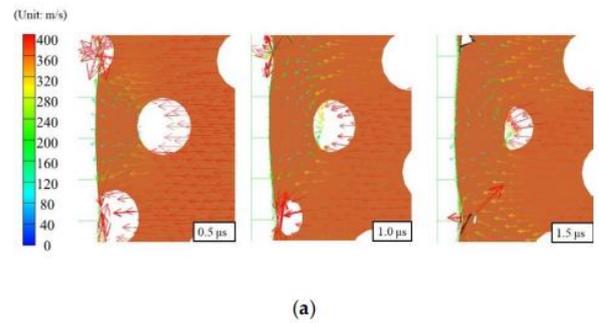
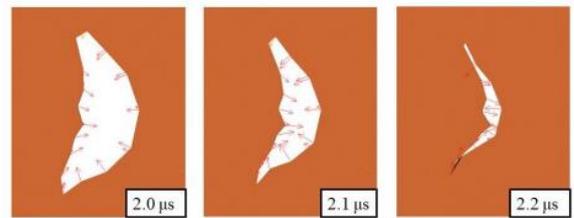


図6 数値解析のための多孔質材料の高速衝突モデル⁴⁾



(a)



(b)

図7 空隙の閉塞挙動に関する数値解析結果⁴⁾
(衝突速度 400m/s の場合)

この他にも、ユニポア材の伝熱特性評価を実施して伝熱相関式を構築した。これを活用し、10MPa の圧力下におけるヘリウムガス冷却 (管内流速; 25m/s) で 30,000 W/m²/K を超える熱伝達係数が得られたことから、ガス冷却ダイバーターとしての利用の候補にもなり得ることが知られた⁵⁾。

3. 平板型ユニポア材の創製と評価

本研究では、平板形状のユニポア材の創製も試みた。ここでは微細なマイクロチャンネル構造の実現を目指して、数百μm 程度の多数の溝 (穴) をエッチングで形成した板を、多層爆発圧接法⁶⁾を応用して一挙に接合することを試みた。特に本研究では回収材料表面の凹凸の低減を目的として、爆薬と試料の間にゼラチンを挿入する方法⁷⁾を用いて接合実験を行った。

この実験では数百μm 厚さの板を多層接合することから、爆発圧接が良好な状況で実施可能かを確認することを目

的として、火薬衝撃銃を用いた多層爆発圧接過程の可視化実験を実施した。図8に高速カメラを用いた連続画像を示すが、多層に積層された金属薄板同士の高速度傾斜衝突時に激しい励起による発光（金属ジェット）が連続移動していることが明瞭に観察され、薄板の多層接合に際しても良好な接合が期待できることが知られた。



図8 衝撃銃を用いた多層爆発圧接過程の光学観察結果
(ターゲット傾斜角 10° , 衝突速度 430 m/s)

図9に多層爆発圧接過程のシミュレーション結果 (AUTODYN による) を示すが、光学観察結果と同様に金属ジェットの形成が確認されている。一方で、爆発圧接で接合境界にみられる波状界面の形成は模擬できていないが、実際の接合体の顕微鏡組織では、波状界面の形成が確認されている。

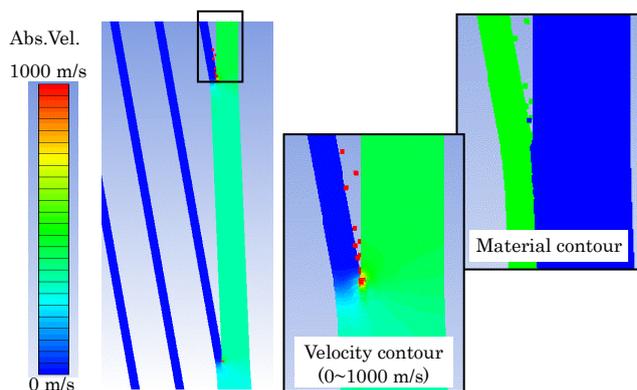


図9 爆発圧接過程のシミュレーション結果

穴のない金属薄板 (0.3mm 厚) と、0.5mm 幅の貫通溝を並行に多数設けた金属板を交互に配置し、多層爆発圧接法を用いて作製した材料の横断面組織を図10に示す。図10(a)は銅、(b)はステンレス鋼 (SUS304) を用いた場合の結果で、接合境界に剥離などはみられず、良好な接合状態を示した。図10で示した実験では溝を爆轟方向に平行に配置したが、溝を爆轟方向に垂直に配置した場合でも良好な接合が確認されている。

これらの実験では、溝部に Sn を予め挿入して、接合後に熔融させて Sn を除去した。図11(a)に銅のマイクロチャンネル部分の EPMA 観察結果を示すが、左が Cu の濃度分布、右が Sn の濃度分布を示す。ここではチャンネルの壁面の一部に Sn の残存が確認されるとともに、その場所に Cu の存在がみられることから、合金化を生じた部分がわずかに生じていた。図11(b)はステンレス鋼の結果を示すが、壁面には Sn の残留のみが観察された。この場合、ステンレス鋼と Sn の融点の差が大きいため、合金化は生じていないと思われた。

微細なチャンネル構造を利用して、マイクロリアクターを模したユニポア材の創製の可能性についても検討した。図12は 0.5mm 厚さのステンレス鋼に 0.5mm 幅、深さ 0.25mm の半円形状の溝を片側のみに形成した接合前の試料である。この試料に対して、前述と同様の方法でステンレス鋼の薄板を接合することを試みた。接合試料の横断面組織を図13に示すが、この場合も接合境界に剥離などはみられず、良好な状態で接合されていることが確認された。

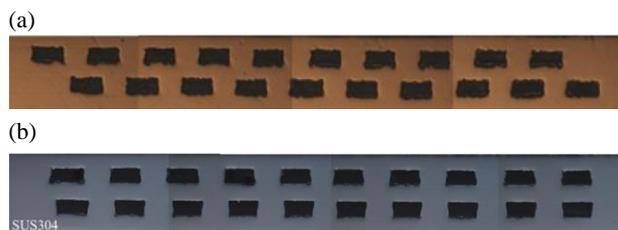


図10 多層爆発圧接法によって得られたマイクロチャンネルの断面組織

図14は、得られた接合体についてX線CTを用いて内部の構造を観察した結果である。観察領域の制限があることに加えて、サンプルの傾斜があったために試料のフォーカス位置が写真毎に異なっているものの、図の赤丸で囲まれた領域のそれぞれに明確な空隙構造が形成されていた。

4. まとめ

本研究では爆発圧接技術の新しい応用として、微細な多数穴構造を有する多孔質材料（ユニポア材）の創製を試みた。

円筒型形状の材料では、複雑な内部構造を有するユニポア材の創製法や、高速衝突による材料の変形挙動・空隙が閉塞する時の超高压発生の可能性などについて明らかにすることができた。

金属薄板の多層爆発圧接法を利用した平板状のユニポア材の創製に関しては、爆発圧接過程の可視化や接合組織の解析を行い、良好な接合状態が実現できていることが確認された。

爆発圧接法を利用することで強固な接合が実現できることが、本法の利点であると考えている。爆発圧接では数メートルサイズの異材接合体が実際に生産されており、将来、大型のユニポア材の供給も実現できるのではないかと期待している。

謝 辞

公益財団法人天田財団の助成金によって本研究を推進することができ、厚くお礼申し上げます。また、研究に協力していただいた熊本大学の田中 茂准教授、稲尾大介博士、マリボル大学（スロベニア）の Zoran Ren 教授、Matej Vesenjak 教授、熊本高専の西 雅俊講師、崇城大学の森 昭寿教授、山陽小野田市立山口東京理科大学の結城和久教授、沖縄高専の下嶋 賢准教授、さらに実験・研究に参画された学生諸氏にも、深謝します。

参考文献

- 1)例えば；外本和幸：溶接学会誌，87-1（2018），43-47.
- 2)K.Hokamoto, M.Vesenjak, Z.Ren: Mater. Lett., 137（2014），323-327.
- 3) <https://www.lotus-t-s.co.jp/>（2023年5月10日参照）
- 4)M.Nishi, S.Tanaka, A.Mori, M.Vesenjak, Z.Ren, K.Hokamoto: Metals, 12（2022），128.
- 5)K.Yuki, R.Kibushi, R.Kubota, N.Unno, S.Tanaka, K.Hokamoto: Energies, 15(2022), 1042.
- 6)K.Hokamoto, A.Chiba, M.Fujita, T.Izuma: Composites Engineering, 5-8（1995），1069-1079.
- 7)D.Inao, A.Mori, S.Tanaka, K.Hokamoto: Metals, 10-1（2020），106.

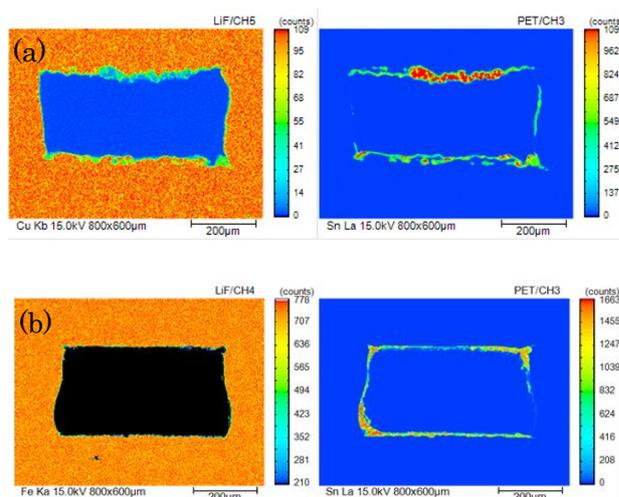


図11 マイクロチャンネル部分のEPMA観察結果

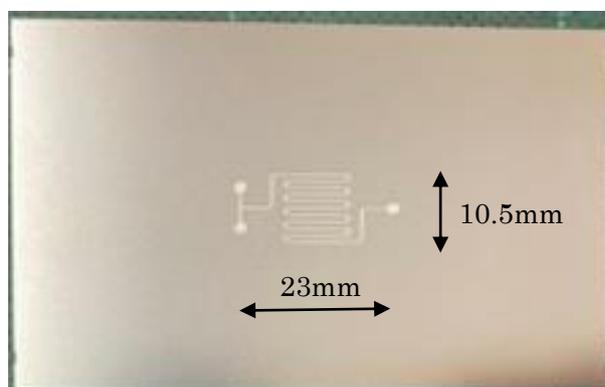


図12 片面溝加工を施したステンレス鋼薄板素材



図13 マイクロリアクターを模した接合体の断面組織

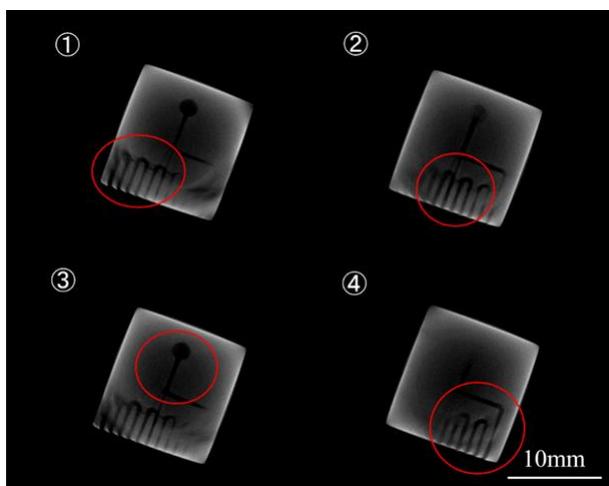


図14 X線CTを用いた内部構造の観察結果