オープンチャンネル金属と

その製造方法

中 嶋 英 雄*

1. はじめに

ポーラス金属や発泡金属は低密度で大きな表面積を有し無 垢の金属とは大きく異なる. これらの金属は軽量化材料, 触 媒, 電極, 振動やエネルギー吸収材, 衝撃吸収材などへ応用 が期待され,そのいくつかは製品化されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾.ポー ラス金属の多くは気孔が球状や多面体形で等方的であるが, ロータス金属は一方向に配列した異方的形状の気孔であ る⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾.このような一方向気孔のポーラス材料は自然界の 木材、葉、茎などにも見られ、流路としての機能を持ってい る. ロータス銅は一方向気孔に冷媒を流すことによって優れ た冷却能を有するヒートシンクとして開発が進められてい しての貫通性を確保するためにロータス銅を薄く切断して使 用しなければならないという制約がある. もし気孔が長い口 ータス金属ができれば貫通孔を得るためにスライスする必要 がなくなる. また, アルミニウムでロータス金属ができれば 軽量の低コストの製品化が可能になる. しかしながら, ロー タス金属の製法では良質なロータスアルミニウムを製造する ことができない(12).

このような金属の溶融過程を介さない金属合金の穿孔方法には、機械的なドリル法、電子ビームやレーザーアブレーション法などがある。前者では、金属にドリルを当てて回転させ切削金属片を除去して穿孔できるが、細い孔を開けるには技術的難点がある $^{(13)}$. まず $^{(1)}$ 直径 $^{(1)}$ 1 mm 以下の細いドリルの刃を製造するのは容易ではないこと、 $^{(2)}$ 1 ドリルの刃は金属中で回転すれば摩損しやすく、従って $^{(2)}$ 1 mm 以下の穿孔は長時間をかけなければならず、コスト高になってしまう。それに対して、Gillen と Moore は電子ビームを利用して穿孔

した $^{(14)}$. 静電レンズで電子ビームを絞り照射し、金属面に小さな溶融池を作りそれを蒸発させて孔を開けた。高真空雰囲気を必要とするので実用化には不適である。一方、Williams と Zouch は大気中でレーザーを用いて穿孔した $^{(15)}$. この穿孔技術は航空機ジェットエンジンの燃焼室の冷却パネルの多孔質化に採用されているが、穿孔には時間と費用がかさむ。これらの2種類の方法では孔の直径に対する長さの比(アスペクト比)は高々10程度であり長尺の孔の作製には適していない。

以上の方法に対して、以下ではテンプレート(鋳型)にワイヤーを用いて焼結金属や溶融金属中にそのワイヤーを埋入し固化させた後、そのワイヤーを除去する方法で孔を作る手法を紹介する。この方法によって比較的長尺の細い孔を形成させることができる。このような方法で作製された方向性を有する孔をもつポーラス金属をオープンチャンネル金属と呼ぶことにする(16)。本解説の前半では従来研究されてきたオープンチャンネル金属の製法を比較検討し、後半では、著者の発明した簡便なオープンチャンネル金属の製法を紹介し、その優位性について言及する。

2. 粉末焼結法によるオープンチャンネル銅,チタンとその合金の作製

一方向性気孔を有するロータス金属は溶融状態と固体状態のガスの溶解度差を利用して作製されるが $^{(17)}$, ここではこのロータス金属の製法とは異なる粉末焼結法や溶融凝固法によるオープンチャンネル金属の作製法を紹介する。これらの製法を一覧表にまとめたものが表1である。Hakamadaらは直径 $80\sim150~\mu m$ のポリフッ化ビニリデンワイヤーをスペーサーとして銅粉末に埋入し、その銅粉体を 300~MPaで

^{*} 岩谷産業株式会社中央研究所·技術顧問,大阪大学名誉教授(〒661-0965 尼崎市次屋 3-3-16)

Open-channel Metals and Their Fabrication Methods; Hideo Nakajima (Iwatani R&D Center, Iwatani Corporation, Ltd. Amagasaki, Professor Emeritus, Osaka University)

Keywords: open-channel metals, porous metals, aluminum, solidification, holes, porosity, extraction, x-ray CT scan 2020年11月 2 日受理[doi:10.2320/materia.60.74]

表 1 粉末焼結法および溶融凝固法によって作製されたオープンチャンネル金属合金の研究.

金属合金	作製方法	テンプレート材料(直径)	テンプレートの除去法 (除去に要する時間)	孔サイズ/気孔率	研究者(文献番号) (年)
Cu	粉末焼結法	Al ワイヤー(0.2, 0.5 mm)	化学的溶解(48 hrs)	孔サイズ 0.2, 0.5 mm	Hakamada et al. (18) (2008)
Cu	粉末焼結法	ポリフッ化ビニリデンワイヤー (0.08-0.15 mm)	蒸発	クラック発生	Hakamada et al. (19) (2007)
Ti	粉末焼結法	鉄鋼ワイヤー(0.25-0.5 mm) 鋼球(1.58 mm)	電気化学的溶解(10 hrs)		Kwok et al. (20) (2008)
Ti-6Al-4V	粉末焼結法	鉄鋼ワイヤー	電気化学的溶解	気孔率19%, 34%	Jorgensen and Dunand (21) (2011)
NiTi	粉末焼結法	鉄鋼ワイヤー	電気化学的溶解 (25–62 hrs)		Neurohr and Dunand (22) (2011)
Al-Si	溶融凝固法	鉄鋼ワイヤー(0.5-5 mm)	半溶融金属中での引抜き	孔サイズ 0.5-5 mm	Haga and Fuse ⁽²³⁾ (2018)
Al-Mg, Al-Mn, Al-Cu, Cu-Zn	溶融凝固法	鉄鋼ワイヤー(2 mm)	半溶融金属中での引抜き	孔サイズ 2 mm	Haga and Fuse ⁽²⁵⁾ (2019)
Al-Mg-Si-Cu (A6061)	溶融凝固法	グラファイト棒(2-4 mm)	加熱蒸発(290 hrs)	孔サイズ 2-4 mm 気孔率36-48%	Muto et al. (26) (2019)
Al	溶融凝固法	鉄鋼ワイヤー(0.28-3.2 mm)	室温での引抜き	孔サイズ 0.28-3.2 mm 気孔率0.3-32%	Nakajima ⁽²⁷⁾ (2019)

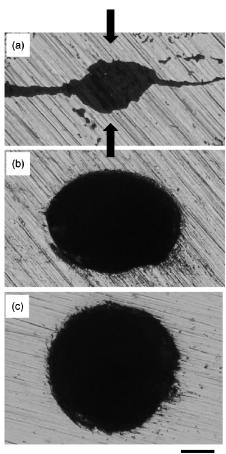
軸圧縮した. その後, Ar+5 vol%H₂雰囲気中で900℃に2 h保持して焼結を行った. 焼結中にフルオロカーボン(炭素 —フッ素結合を持つ有機化合物)は蒸発し孔が残る. **図1**(a) はオープンチャンネル銅の孔の断面写真であるが、圧縮軸と 垂直方向にクラックが発生している. これは銅とポリフッ化 ビニリデンの間の弾性率の差が大きいことに起因している. このクラックの発生を抑制するためにアルミニウムワイヤー (直径 $200 \, \mu m \, b \, 500 \, \mu m$)が使われた. アルミニウムと銅の 弾性率は大きく違わない. 銅粉体中にアルミニウムワイヤー (直径 200 µm)を埋入し 300 MPa の一軸方向に圧縮した後, 0.2 mol/L の NaOH 水溶液中に 48 h 浸漬しアルミニウムワ イヤーを溶出させた. 図1(b)にその孔の断面が示されてい る. クラックは発生していないが、テンプレートとなるアル ミニウムワイヤーの断面は円形であるにもかかわらず形成さ れた孔の断面は楕円形になっている. 一軸加圧成形に代わっ て冷間静水圧圧縮成形(CIP)を採用すると孔の断面は円形状 に改善された. CIP を用いることによってアルミニウムワイ ヤーのテンプレートをオープンチャンネルアルミニウムの孔 の形にそのまま成形させることができた(18)(19).

Dunand らは,①開放型気孔には骨成分が侵入してインプラントの固着力を高め,②気孔による多孔質化がインプラントの剛性率を低減させるという根拠から生体材料への適用を想定してオープンチャンネルチタン $^{(20)}$ およびその合金 $^{(21)}$ やNiTi $^{(22)}$ の作製研究を行なった.スペーサーとして鋼ワイヤー,球,メッシュをチタン粉体中に埋入し 350 MPa の冷間静水圧圧縮成形した.さらに, 10^{-6} Torr の真空中で1050 C、12 h の焼結処理が施された.その後,電気化学的な方法で鋼スペーサーを解離させた.直径 500 μ m,長さ 8 μ m の

 μ m, 長さ 7 mm の炭素鋼ワイヤーを解離させるのに 20 h をかけている。図 2 に示すように、炭素鋼ワイヤーを解離させて形成された孔の径はワイヤー径と同一であった。鋼中の炭素の存在によって TiC 層が形成され Fe と Ti の相互拡散が抑制されたことによると考えられる。それに対して直径 406 μ m の炭素を含まない鋼ワイヤーをスペーサーに用いた場合、図 3 に示すように解離後の孔はワイヤーの直径よりも 2 倍も大きくなっている。これは Ti と Fe による相互拡散層が形成されてその拡散層も電気化学的に解離されてしまい、孔径が大きくなったと推察される。この 2 つの研究グループによる作製法は粉末焼結法を使っているので、製造コストが高価であり孔生成には長時間を要し、量産化には不適である

3. 溶融凝固法によるオープンチャンネルアルミニウムとその合金の作製

Haga と Fuse はアルミニウムとその合金を半溶融状態に保持して埋入されたテンプレートワイヤーを引抜いてオープンチャンネルアルミニウムとアルミニウム合金を作製した(23)-(25). 直径が 0.5~5.0 mm の軟鋼ワイヤーを鋳型内に図4(a)に示すように取り付けて、その鋳型に溶融金属を注入した. 凝固過程の半溶融状態においてアルミニウムあるいはアルミニウム合金から軟鋼ワイヤーを引抜いた. Al-Si合金の結果が図4(b)に示されている. Siが6 mass%以上の合金では引抜き可能な温度幅は狭くなり、共晶温度以上の温度でのみワイヤーを引抜くことができる. 温度が液相線温度に近づくにつれて固相成分は減少し液相成分の割合が増加するので、引抜き孔はテンプレートの円形形状から逸脱して変形



50 μm

図 1 粉末焼結法によって作製されたオープンチャンネル銅. (a) 300 MPa で一軸圧縮した銅焼結体からポリフッ化 ビニリデンワイヤー除去して形成された孔(圧縮方向→ で示した), (b) 300 MPa で一軸圧縮した銅焼結体から アルミニウムワイヤーを溶解させて形成された孔, (c) 300 MPa で冷間静水圧圧縮成形した銅焼結体からアル ミニウムワイヤーを溶解させて形成された孔⁽¹⁹⁾.

してしまう.一方,共晶温度以下では合金は完全に凝固し剛性が高まることによってテンプレートワイヤーは引抜くことができなかった.図5には530°Cから640°Cの温度範囲の半溶融状態のA6061(Al-(0.8-1.2) mass %Mg-(0.4-0.8) mass %Si)合金を引抜いて形成された孔の断面の形状を示した.温度の上昇と共に円形状から逸脱した乱れた形状と化している.これは温度が上昇して液相線に近づくにつれてアルミニウムあるいはその合金の粘性が低下して引抜き後の孔が変形しやすくなったためと考えられる.本作製法では半溶融状態を利用するために,引抜き工程を高温で行うことが不可欠である.また,半溶融状態を形成する合金に限定されてしまうため,半溶融プロセスを使わない作製法が望まれる.

Muto らはグラファイトロッドを溶融アルミニウム合金中に埋入し凝固させた後、高温で長時間加熱してグラファイトを除去してオープンチャンネルアルミニウム合金を作製した $^{(26)}$. 直径 2.0, 3.0, 4.0 mm の太さのグラファイトロッドがテンプレートとして用いられた。凝固したアルミニウム合金インゴットを大気中で615℃にて $27\sim290~h$ 加熱した。図

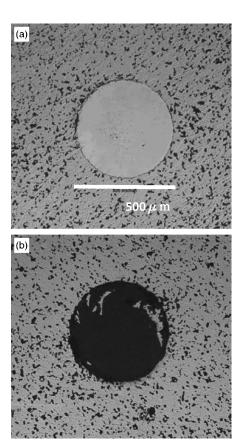
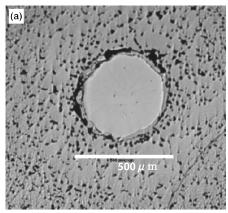


図2 (a)チタン粉体固化材に埋入された炭素鋼ワイヤーの断面,(b)チタン粉体固化材に埋入された炭素鋼ワイヤーを電気化学的に溶解させて作製された孔⁽²⁰⁾.

6 はそれぞれの加熱時間を経過した後の直径 25 mm, 長さ 20 mm のアルミニウム合金インゴットの断面写真を示したものである. 48 h 以上の長時間加熱することによって炭素の酸化蒸発が進行し 20 mm の貫通孔が生成された. さらに 290 h の加熱によって完全に炭素が蒸発, 除去されて穿孔が終了した. また, ECAE (Equal-Channel Angular Extrusion)法を用いて断面積を減じることなく塑性加工処理してアルミニウム合金の結晶粒を微細化し強化した. この際, 埋入されたグラファイトロッドが破壊され破片を除去することによって孔を作製する試みも行っている. この作製法ではグラファイトロッドを用いているために直径 2 mm 以下の細線をテンプレートに用いることができず, それ以下の微細孔の穿孔は困難であり, 長時間の加熱酸化や塑性加工が不可欠である. グラファイトロッドを用いずに酸化処理や塑性加工を必要としない低コストの作製法が望まれる.

4. 金属ワイヤーの引抜きによるオープンチャンネル アルミニウムの作製

オープンチャンネル金属を製品に応用するには長尺の微細 孔を有する多孔質金属を長時間を費やさずに低コストで製造 することが必要である。また、前述のオープンチャンネル金 属の製造技術は直線形状の孔しか作製することができない。



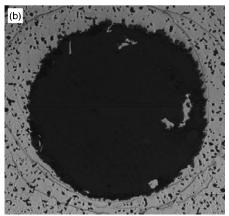
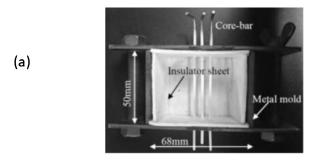


図3 (a)チタン粉末固化体に埋入された太さ406 μm の炭素を含まない鋼ワイヤーの断面,(b)チタン粉体固化材に埋入された鋼ワイヤーを電気化学的に溶解させて作製された孔. 孔径は800 μm に拡大している⁽²⁰⁾.



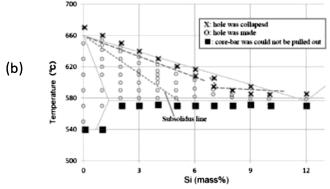


図4 (a)軟鋼ワイヤーが設置された金属製鋳型,(b)テンプレート軟鋼ワイヤーの引抜きの難易度が示された温度範囲およびSi濃度範囲(²³⁾.

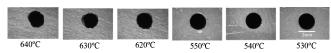


図 5 オープンチャンネルアルミニウム合金 A6061のチャンネル孔の引抜き温度依存性⁽²³⁾. (孔の直径 2 mm)

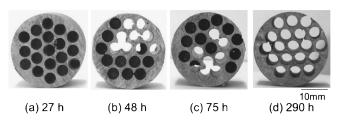
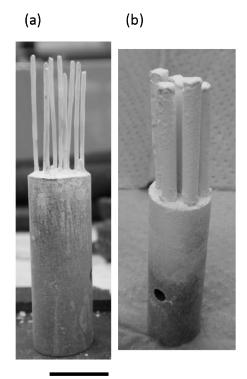


図 6 アルミニウム合金 A6061に埋入されたグラファイトが 615 $^{\circ}$ で加熱中に蒸発して生成される孔の貫通度に及ぼ す加熱時間の影響 $^{(26)}$.

もしスパイラル状やらせん状に曲がった孔ができれば、さまざまな応用への道が開けるであろう。著者は、(1)たいへん大きなアスペクト比をもち、(2)スパイラル状あるいはV字型のチャンネル孔を有するオープンチャンネルアルミニウムの作製法を新たに発明した(27)。本節では従来の製法との違いを比較しながら、その製法を詳述する。

オープンチャンネルの原型となる金属ワイヤーにはステン レス鋼(SUS304),銅,白金,モリブデンを用いた.ステン レス鋼ワイヤーの直径は0.28, 0.35, 0.45, 0.70, 0.85, 1.2, 1.6, 2.0, $3.2 \, \text{mm} \phi$ である. 銅, 白金, モリブデンワイヤーの直 径はそれぞれ 1.0, 0.6, 1.0 mm である. ボロンナイトライド を離型剤に用い 10~20 µm の厚さにそれぞれのワイヤー表 面に塗布した. 図7に示すように、離型剤を塗布したワイヤ ーはグラファイト台座に設置された. 図8(a)に示すよう に、それをグラファイト製の坩堝内に挿入した. ワイヤーの 上に固体アルミニウム素材を置き、電気炉で680℃で大気中 加熱を行うと、溶融アルミニウムが降下してワイヤー間に充 填される. 360 s 後に電気炉から坩堝を取り出して凝固させ ると、図8(c)のようにグラファイト台座に取り付けられた ワイヤーが埋入されたアルミニウムインゴットが作製され る. 台座および金属ワイヤーを引抜くとオープンチャンネル アルミニウムが作製できる(図8(d)). 金属ワイヤー表面に 塗布されたボロンナイトライドは金属ワイヤーとアルミニウ ムの間の拡散障壁として作用し, 両金属間の相互拡散を抑制 する.この際、温度制御が極めて重要である.800℃より高 温ではボロンナイトライドは分解して離型効果を喪失してし まう(28). そうすると,ワイヤーはアルミニウムに固着して しまい引抜き時に摩擦力が増大し摺動せず,ワイヤーを引抜 くことができなくなってしまう. 離型剤はボロンナイトライ ドに限定されるものではなく多種の酸化物や窒化物でも可能 である. 銅や鉄鋼のオープンチャンネル化には、ボロンナイ トライドは無効で、それぞれの金属の溶融温度で安定な化合 物を選択する必要がある. ワイヤーを引抜いたオープンチャ ンネルアルミニウムの3次元イメージはX線CT(X-ray



15mm

図7 グラファイト台座に設置された,ボロンナイトライドを塗布されたステンレス鋼ワイヤー. 台座の直径は 15 mm. ワイヤーの直径,長さ,本数は (a) 0.85 mm, 25 mm, 9 本, (b) 3.2 mm, 25 mm, 7 本(27).

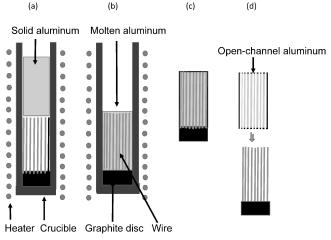


図8 離型剤を塗布された金属ワイヤーの引抜きによるオープンチャンネルアルミニウムの作製方法. (a)離型剤を塗布された金属ワイヤーをグラファイト台座に設置し坩堝に固体アルミニウムと共に挿入した. (b)電気炉でアルミニウムを溶融すると、溶融アルミニウムは降下しワイヤー間の隙間に充填される. (c)凝固後、アルミニウムス鋼ワイヤーを引抜くと、オープンチャンネルアルミニウムが作製される(27).

Computed Tomography)で測定された.この X線 CT 法はオープンチャンネル構造を可視化する有力な手段である. 凝固後,ワイヤーがアルミニウムインゴットから引き抜か

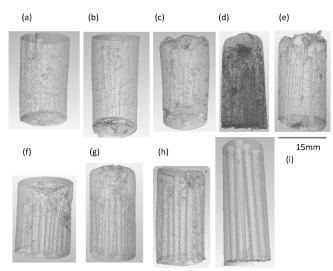


図 9 異なるチャンネル孔径をもつオープンチャンネルアルミニウムの X線 CT スキャンイメージ写真. チャンネル孔の直径. 本数, 気孔率はそれぞれ(a) 0.28 mm, 9 本, 0.3%, (b) 0.35 mm, 9 本, 0.5%, (c) 0.45 mm, 9 本, 0.9%, (d) 0.70 mm, 21本, 4.6%, (e) 0.85 mm, 9 本, 2.9%, (f) 1.2 mm, 21本, 13.4%, (g) 1.6 mm, 9 本, 10.2%, (h) 2.0 mm, 9 本, 16.0%, (i) 3.2 mm, 7 本, 31.9% $^{(27)}$.

れた. ワイヤー表面にもチャンネル内壁にもボロンナイトラ イドの付着が認められた. このことはボロンナイトライドが ステンレス鋼ワイヤーともアルミニウムとも解離せずに反応 しなかったことを示唆している. 図9にはオープンチャンネ ルアルミニウムの X 線 CT スキャン 3 次元イメージを示し た. アルミニウムインゴットの直径は 15 mm である. チャ ンネル径はテンプレートワイヤーの太さで決まる. ボロンナ イトライドの塗布厚さは数 10 μm と薄いのでボロンナイト ライドのチャンネル径に及ぼす影響は無視できる. 一方向に 配向した一方向性チャンネル孔が観察される. アルミニウム ロッドインゴットの上部には引け巣が見られたが、オープン チャンネルは凝固後、テンプレートを引抜くことによって形 成されるので、埋入されたワイヤーには影響しないと考えら れる. $\boxtimes 9(f) \ge (g)$ ではワイヤーの長さがアルミニウムイン ゴットの長さよりも短い. ワイヤーの長さlがアルミニウム インゴットの長さLより短い場合、オープンチャンネルはlより長いところには形成されない. 高さがlのオープンチャ ンネル金属の気孔率 þは

$$p = \frac{\pi \left(\frac{d_{\rm h}}{2}\right)^2 ln}{\pi \left(\frac{d_{\rm Al}}{2}\right)^2 l} = n \left(\frac{d_{\rm h}}{d_{\rm Al}}\right)^2 \tag{1}$$

ここで d_h および d_{AI} はそれぞれチャンネル孔とアルミニウムロッドの直径、n はチャンネル孔の数である。図 9 に示したオープンチャンネルアルミニウムの気孔率は $0.3\sim31.9\%$ である。発泡金属やロータス金属では気孔サイズ、気孔長さや気孔率は発泡剤、温度、ガス圧力、凝固速度、凝固方向などを制御しなければ決めることができない。それに対して本

製法ではテンプレートワイヤーの直径,長さと本数を指定すれば予め気孔サイズ,長さや気孔率を決定することができる。それ故,オープンチャンネル孔の再現性はかなり良く発泡金属やロータス金属より優れている。ワイヤー間の間隔が狭いとき,液体金属の表面張力や粘性の影響で液体がワイヤー間の空隙に浸透しない場合がある。そこで液体金属に振動を加えたり加圧することによって不十分な浸透を解消することができる。

図10には異なる長さのチャンネル孔をもつオープンチャン ネルアルミニウムインゴットを示した. 孔の長さは X線 CT イメージおよびインゴットに埋入されたワイヤーを引抜いた ワイヤーの長さを実測して知ることができる. また, 孔のア スペクト比は孔の直径と長さから求めることができる. 図 10(b)はそのアスペクト比が270のものであるが、最近、ア スペクト比が1,000のオープンチャンネルアルミニウムが作 製された⁽²⁹⁾. 粉末焼結法⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾や溶融凝固法⁽²³⁾⁽²⁶⁾でのワイ ヤー引抜き法,ドリルやレーザーによる穿孔法(13)-(15),ロ ータス金属作製法⁽¹²⁾などの従来製法ではアルミニウムの微 細孔のアスペクト比は高々10程度であるのに対し、本製法 では従来法の100倍もの長尺のチャンネル孔を作製できる. 図11にはステンレス鋼、銅、白金、モリブデンワイヤーをテ ンプレートに用いて作製されたオープンチャンネルアルミニ ウムの X線 CT スキャンイメージを示した. もし固体のワ イヤーとワイヤー間の空隙に浸透した溶融アルミニウムとの 間で相互拡散が生じるとするならば、相互拡散による合金層 が生成されるはずである.このときの相互拡散係数 \tilde{D} は

$$\tilde{D} = c_{\rm Al} D_M + c_M D_{\rm Al} \tag{2}$$

である. ただし, c および D はそれぞれ組成と固有拡散係数である $^{(30)}$. 添字の Al と M はそれぞれアルミニウムおよび

(a) (b)

図10 異なるチャンネル孔の長さをもつオープンチャンネルアルミニウムの X線 CT スキャンイメージ写真. チャンネル孔の直径, 長さ, アスペクト比はそれぞれ(a) 0.85 mm, 25 mm, 29.4, (b) 0.28 mm, 76 mm, 271.4, (c) 0.85 mm, 90 mm, $105.9^{(27)}$.

金属である。融点付近における液体金属中の拡散係数は $10^{-9}\,\mathrm{m}^2\mathrm{s}^{-1}$ 程度であり $^{(31)}$,融点直下の固体金属中の拡散係数よりも数オーダー大きい $^{(32)}$. 従って, \tilde{D} は

$$10^{-10} \,\mathrm{m^2 s^{-1}} \le \tilde{D} \le 10^{-9} \,\mathrm{m^2 s^{-1}} \tag{3}$$

となる. 680℃に 360 s の時間だけ保持した時の拡散距離を

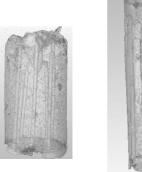
 $0.4 \text{ mm} \le 2\sqrt{t\tilde{D}} \le 1.2 \text{ mm}$ (4)

と見積もることができる. ただし, t は時間である. もしボロンナイトライドが溶融アルミニウムと固体テンプレートワイヤーとの界面に存在しないとすれば、金属ワイヤーは合金層を形成してアルミニウムに固着してしまいワイヤー引抜きは不可能である. 今回の場合はワイヤーが容易に引抜きできることからボロンナイトライドは拡散の障壁として働き、相互拡散による合金化を防止している.

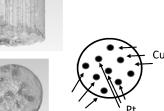
ところで,この引抜きの難易度はアルミニウムインゴットからのテンプレートワイヤーの引張強度を測定することによって定量的に評価することができる.ボロンナイトライドを塗布しないステンレス鋼ワイヤーをアルミニウムに埋入した場合, $1\,\mathrm{kN/mm^2}$ の引張強度を加えてもワイヤーを引抜くことができずワイヤーは破断してしまう.しかしながら,ボロンナイトライドを塗布するとその 1/10程度以下の引抜き力で容易にワイヤーを引抜くことができる.詳細については原著論文で公表する(29).

図12(a) \sim (c)にはスパイラル状や V字型の孔を有するオープンチャンネルアルミニウムの X線 CT スキャンイメージを示した。図12(d) \sim (f)にはアルミニウムに埋入する前のスパイラル状や V字型のテンプレート(ステンレス鋼ワイヤ

(a) (b)







15mm

図11 異なるテンプレートワイヤーによって作製されたオープンチャンネルアルミニウムの X線 CT スキャンイメージ写真。上写真はオープンチャンネルアルミニウム側面から,下写真は底面から撮影された。(a)直径 0.85 mm のステンレス鋼ワイヤー,(b)直径 1.0 mm の銅ワイヤー,直径 0.6 mm の白金ワイヤー,直径 1.0 mm のモリブデンワイヤーを引抜いて作製された(27).

15mm

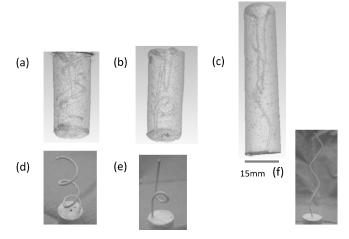
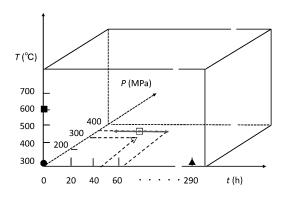


図12 (a) \sim (c)異なる形状のステンレス鋼ワイヤーを用いて作製されたオープンチャンネルアルミニウムの X線 CT スキャンイメージ写真. (d) \sim (f)異なる形状のステンレス鋼ワイヤー. (a), (d)スパイラルチャンネルアルミニウム,チャンネル直径 0.85 mm, (b), (e)スパイラルチャンネルアルミニウム,チャンネルアルミニウム,チャンネル直径 1.2 mm, (c), (f) V字型チャンネルアルミニウム,チャンネル直径 $0.85 \text{ mm}^{(27)}$.

ー)を示した.これらの孔の形状は本製法であるオープンチャンネル金属製造技術に特有のものである.ワイヤー引抜き法,ドリルやレーザーによる穿孔法,ロータス金属作製法などの従来製法では直線的な形状の孔しか作製できず,曲がった形状の孔は作れなかった.従来製法では直線的な工具や直線的なビームを用いたり,一方向凝固法を用いているためである.それに対して,本製法では直線的な孔だけではなく曲がった孔も自在に作製できる点が独創的である.このオープンチャンネル金属の製造技術は工程が簡単であり,低コストでの製造が可能であること,しかも従来の100倍もの高いアスペクト比の孔を有する金属,スパイラル形状などの曲がりくねった孔を有する金属を作製できるなどのメリットを有することで無比の製法であると言える.

ところで,一方向性気孔を有するポーラス金属の1つ, ロータス金属は強度に大きな異方性がある. Hyun らはロー タス金属の引張⁽³³⁾, 圧縮強度⁽³⁴⁾を測定した. 長尺の孔の平 行方向の引張・圧縮強度は垂直方向のそれらより大きい. 平 行方向の強度は気孔率の増加と共に線形的に減少することや 垂直方向の強度の低下は孔の近傍に応力集中が発生するため であることを明らかにした. オープンチャンネル金属では1つの金属体の中に様々な向きを持った孔を混在させることが でき, 孔に曲げ形状を付与することができることなどの操作 によって応力集中を可能な限り回避させることができる. ま た、このようなユニークなオープンチャンネル孔を利用すれ ば、その孔を流路として冷媒を流すことによって従来にない 高性能のヒートシンクを製品化できる可能性がある. このよ うなヒートシンクはコンピューターや自動車などの電子デバ イスの冷却, 航空機ジェットエンジン燃焼室の冷却パネル, ヘリコプターのローター, 工作機械の冷却などへの応用が期 待される. また、軽量化構造アルミニウム、マグネシウム合



■ Haga, ▲ Suzuki, ● Nakajima, ▽ Hakamada, □ Dunand

図13 オープンチャンネル金属のテンプレートの引抜き時の 温度,テンプレートの除去に要する時間および金属体 作製に要する圧力の関係.

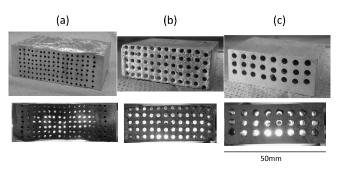


図14 (上段)オープンチャンネルアルミニウムの外観および (下段)透視写真. チャンネル孔直径, チャンネル孔数 および気孔率はそれぞれ(a)1 mm, 119個, 11.7%, (b)2 mm, 60個, 18.8%, (c)3 mm, 24個, 17.0%.

金として自動車車体のピラーや衝撃吸収材,吸音材としても 適用が期待される.

オープンチャンネル金属を作製するには種々の多数のプロセスが必要であるが、ここでは大きな製造コストを要する3つのプロセス要素を抜粋して比較した。図13には縦軸にオープンチャンネル金属のテンプレートの引抜き工程の温度、横軸にはテンプレートの除去に要する時間および金属体作製に要する圧力をとって数種の製法を比較した。従来の鋳造法(半溶融法)を用いた製法は高温を要すること、従来の粉末焼結法を用いた製法では焼結固化体作製に高圧力が必要で、テンプレートの溶解除去に長時間を必要とする。それに対し、Nakajimaの製法(27)では室温で瞬時にテンプレートの引抜きができ、グラフの原点付近に位置する。このグラフの原点に位置する製法は低コストでしかも短時間で製造できることを示している。図14には多数のチャンネルを有するオープンチャンネルアルミニウムの外観および透視写真を示した。透視によってチャンネルは100%貫通していることが確認できる。

5. お わ り に

本解説の後半で紹介した固体金属に埋入されたテンプレートの引抜きによるオープンチャンネル金属の穿孔法は、粉末

焼結法や溶融凝固法での半溶融引抜き法・グラファイト引抜き法、ドリルやレーザーによる穿孔法、ロータス金属作製法などの従来製法を優越した優れた技術であり、その製品化が企業において進行中である。このオープンチャンネル金属のチャンネル孔を冷媒の流路として利用する冷却盤には流路の高密度化と共に、微細化も要求される。チャンネル径が1mmかそれ以下の長尺の微細孔への要求が高い。このニーズに応えられるのは従来の穿孔技術ではほとんど不可能で、本製法に限定されるといっても過言ではない。

ところで、3Dプリンター技術 (additive manufacturing technology)によってもオープンチャンネル金属の作製は可能であろう。この3D法はプロトタイプ製品の作製や小型の高性能製品の製造に長じている(35)。しかしながら、3D法は粉末を素材としているため製造コストは高価であり、レーザーや電子ビームによる積層造形法を採るため成形体の製造に長時間を要する。オープンチャンネル金属を製品化するには、低コスト製造と量産が不可欠である。3D法ではこの課題をクリヤーすることが求められる。

文 献

- (1) L. J. Gibson and M. F. Ashby: Cellular Solids, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (1997).
- (2) H. Nakajima: Prog. Mater. Sci., 52(2007), 1091-1173.
- (3) H. Nakajima: Porous Metals with Directional Pores, Springer, Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London (2013).
- (4) M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson and H. N. G. Wadley: Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom (2000).
- (5) H. Nakajima, S. K. Hyun, K. Ohashi, K. Ota and K. Murakami: Colloids and Surface A: Physicochemical and Eng. Aspects, 179 (2001), 209–214.
- (6) 中嶋英雄: ポーラス材料学―多孔質が創る新機能性材料―, 内田老鶴圃(2016).
- (7) 中嶋英雄:まてりあ,56(2017),166-169.
- (8) 中嶋英雄:まてりあ, 58(2019), 252-260.
- (9) H. Nakajima: Mater. Trans., 60(2019), 2481-2489.
- (10) H. Chiba, T. Ogushi and H. Nakajima: J. Thermal Sci. Tech., 5 (2010), 222–237.
- (11) H. Chiba, T. Ogushi and H. Nakajima: Proc. ASME/JSME 2011 8th Thermal Eng. Joint Conf. (AJTEC2011), Hawaii, USA (2011), 1–9.
- (12) T. Ide, Y. Iio and H. Nakajima: Metall. Mater. Trans. A, 43A (2012), 5140–5152.
- (13) Y. Goto: http://www.osaka-jp.net/osk22-2.htm, 2017.
- (14) D. Gillen and D. Moore: http://www.blueacretechnology.com,

- 2012.
- (15) P. E. Williams and A. D. L. Zouch: 1993. US patent 5222617.
- (16) H. Nakajima: J. Mater. Res., 35 (2020), 2535-2546.
- (17) J. S. Park, S. K. Hyun, S. Suzuki and H. Nakajima: Acta Mater., 55 (2007), 5646–5654.
- (18) M. Hakamada, Y. Asao, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: Mater. Lett., **62**(2008), 1118–1121.
- (19) M. Hakamada, Y. Asao, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: Scripta Mater., **56**(2007), 781–783.
- (20) P. J. Kwok, S. M. Oppenheimer and D. C. Dunand: Adv. Eng. Mater., 10 (2008), 820–825.
- (21) D. J. Jorgensen and D. C. Dunand: Acta Mater., $\mathbf{59}(2011)$, 640-650.
- (22) A. J. Neurohr and D. C. Dunand: Acta Biomater., 7(2011), 1862–1872.
- (23) T. Haga and H. Fuse: Adv. Mater. Process. Tech., 4(2018), 1623.
- (24) T. Haga, K. Toyoda and H. Fuse: Key Eng. Mater., 748 (2017), 187–191.
- (25) T. Haga and H. Fuse: Solid State Phenom., 285 (2019), 259-
- (26) D. Muto, T. Yoshida, T. Tamai, M. Sawada and S. Suzuki: Mater. Trans., 60 (2019), 544–553.
- (27) H. Nakajima: Metall. Mater. Trans. A, 50A (2019), 5707–5712.
- (28) Juntsu: https://www.juntsu.co.jp/qa/qa0912.php
- (29) H. Nakajima: private communication (to be submitted).
- (30) P. G. Shewmon: Diffusion in Solids, McGraw–Hill, New York, USA (1963), 117–122.
- (31) T. Iida and R. I. L. Guthrie: The Physical Properties of Liquid Metals, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom (1988), 199–225.
- (32) H. Mehrer: Diffusion in Solid Metals and Alloys, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1990).
- (33) S. K. Hyun, K. Murakami and H. Nakajima: Mater. Sci. Eng. A, **A299** (2001), 241–248.
- (34) S. K. Hyun and H. Nakajima: Mater. Sci. Eng. A, A340 (2003), 258–264.
- (35) I. Gibson, D. W. Rosen and B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, Heidelberg, Dordrecht, London (2010).



中嶋英雄

東北大学大学院工学研究科博士課程修了 米国レンスレア工科大学博士研究員,東北 大学金属材料研究所助手,助教授,岩手大 学工学部教授を経て

1996年 大阪大学産業科学研究所教授,

2011年 日本学術会議会員(2期6年間)

2012年 大阪大学名誉教授,(公財)若狭湾エネルギー研究センター所長

2019年 岩谷産業株式会社中央研究所 技術顧問 現在に至る

専門分野:ポーラス材料学,拡散
