

オープンチャンネル金属と

その製造方法

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 る⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.しかしながら、気孔長が有限であるので、流路と 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.もし気孔が長いロ 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1mm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)ドリルの刃は金 属中で回転すれば摩損しやすく、従って1mm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.

中

崲

英

雄*

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.

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 80~150 μm 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 で一

* 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]

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2mm	Haga and $\operatorname{Fuse}^{(25)}(2019)$
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)

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.

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 一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 µm と 500 µm)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48h 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℃, 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 µm,長さ8 mmの 鋼ワイヤーを除去するのに10 hを要している.直径250

ま て り あ 第60巻 第2号(2021) Materia Japan μm, 長さ7mmの炭素鋼ワイヤーを解離させるのに20h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 μm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.

溶融疑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℃から640℃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 27~290 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.

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⁾.

Core-bar

12

Insulator sheet



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⁾.

Si (mass%)

3



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℃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∇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 mm f 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.360s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

500

(a)



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⁾.



Heater Crucible Graphite disc Wire

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 インゴットを炉外に取り出す.(d)埋入されたステンレ 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15mm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.図9(f)と(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1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1 より長いところには形成されない. 高さが1のオープンチャ ンネル金属の気孔率 p 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_{Al} 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0.3~31.9% 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 Ď は

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

(c)

(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

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)

(b)

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

$$0^{-10} \,\mathrm{m}^2 \mathrm{s}^{-1} \le \tilde{D} \le 10^{-9} \,\mathrm{m}^2 \mathrm{s}^{-1} \tag{3}$$

となる. 680℃に 360 s の時間だけ保持した時の拡散距離を

1

 $0.4 \text{ mm} \le 2\sqrt{tD} \le 1.2 \text{ mm}$ (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 kN/mm²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)~(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)~(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



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1.0mmの銅ワ イヤー,直径0.6mmの白金ワイヤー,直径1.0mmの モリブデンワイヤーを引抜いて作製された⁽²⁷⁾.

0.85 mm, 90 mm, 105.9⁽²⁷⁾.

15mm

(a)





図12 (a)~(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)~(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 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







 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)1mm,119個,11.7%, (b)2mm,60個,18.8%,(c)3mm,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1 mm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

- 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:ポーラス材料学一多孔質が創る新機能性材料一, 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., 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– 263.
- (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

1 977年	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
市門公 時	・ポーニフガ料学 扩散

専□刀町・^{ハー}フへ材料子,弧取 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★