押出し加工を利用した固相リサイクルによるアルミニウム導線の創成

山梨大学　大学院総合研究部工学域機械工学系
准教授　猿渡　直洋
（2023 年度 奨励研究助成（若手研究者枠） AF-2023042-C2）

キーワード：押出し加工，固相リサイクル，アルミニウム

１．研究の目的と背景

アルミニウムは実用金属材料中で最もリサイクル性に優れた材料であることは良く知られている．アルミニウムのリサイクルでは，回収したスクラップ材料を溶解して，不純物の除去や合金元素の添加等の成分調整を行った後にインゴットやビレット等を生成する溶解鋳造法が一般的に行われている．一方で，溶解に多量の熱エネルギーを要することや，ドロスの除去に関連して 10%程度の材料損失が発生すること等を理由に効率的なリサイクル手法の確立が求められている．アルミニウムの効率的なリサイクル手法の一つとして固相リサイクルが注目されている[1]．固相リサイクルは，スクラップ材料から得た粉砕粉や加工屑等（以降，被リサイクル屑と称す）を押し固めた圧縮成形体に対して押出しや圧延等の塑性加工を施すことによって，バー材や板材等を得る手法である．固相リサイクルでは，材料の溶解を伴わないため，従来の溶解鋳造法と比較して消費エネルギが最大 90%削減できる[2]ことや歩留りの面で優位と考えられている．

アルミニウム導線は，銅導線と比較して導電率は 2/3 程度と劣るものの比重は 1/3 程度と軽量であることから，架空送電線として 1900 年代初頭から利用されてきた[3]．近代化に伴い電気需要は爆発的に増大し，現在の日本国内における架空送電線および地中送電線の総延長は約 40, 000 km 以上とされている[4]．また，近年では電気自動車の電力伝達を見据えたアルミニウム導線の開発，採用が進んでいる[5]．このように，今後更なる需要が見込まれるアルミニウム導線に対して，固相リサイクルを利用した製造方法を確立することは持続可能な社会を実現する上でも必要不可欠である．

固相リサイクルにより成形した材料を導線として利用する場合の課題として，健全なバルク材の成形が挙げられる．ここで言う健全なバルク材とは，①ボイドを含まず，②被リサイクル屑の新生面同士が結合していると定義する．固相リサイクルでは，被リサイクル屑に対して塑性変形を付与してバルク化するため，塑性流動が不十分な場合ではリサイクル材中に多量のボイドが発生する．ボイドは材料中の空隙であるため電気抵抗の要因となる．また，被リサイクル屑の表面は酸化皮膜で覆われており，これらも電気抵抗を生じる要因と考えられ，導電性を確保するためには塑性流動により酸化皮膜を破壊し，被リサイクル屑の新生面同士を結合させる必要がある．

本研究では，押出し加工を利用した固相リサイクルによりアルミニウム導線を作製することを最終目標に定めている．研究の第一段階として，十分な導電性を確保できる固相リサイクル材を得るためのビレットの状態について検討を行った．具体的には，被リサイクル屑の大きさを変化させて，押し出し後のミクロ組織等を評価するとともに導電性との相互関係を調査した．

２．実験方法

2．1　押出し加工装置

初めに，押出し加工を行うための装置を設計，製作した．図 1 に押出し加工装置の概略図を示す．押出し加工用の金型として，コンテナ，ダイス，ステムを作製した．コンテナは S50C 製であり，直径が 6mm のビレットを装填する仕様とした．また，カートリッジヒーターを挿入する穴を設けており，加熱を行いながら押出し加工を実施した．ダイスは SKD61 で作製し，ダイス出口直径を 4mm，ダイス角を 45° に設定した．この時の押出比は 2. 25 である．ステムは直径が 6mm の S45C 製の丸棒とした．これら金型を押出し加工機のフレームに設置し，電動油圧ポンプにて油圧シリンダを 2.3mm/s の速度で稼働させて押出し加工を行った．

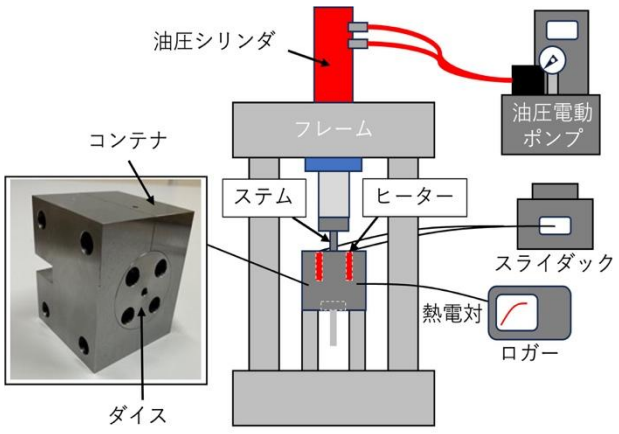


図 1　押出し加工装置の概略図

2．2　ビレットの構造および被リサイクル層

本研究で用いるビレットは，図 2 に示すような被リサイクル層をパイプ状の容器に充填する構造を採用した。直径が 6mm，長さが 30mm の A1070 アルミニウム合金（以降，A1070）丸棒に，直径が 4mm，深さが 28．5mm の穴加工を施し，片端が閉じた容器とした．そこに，被リサイクル層を模擬して A1070 の粉末を充填した．粉末を充填した後に，A1070 丸棒から加工したフタで容器を密閉した．A1070 の粉末は，ふるい分けを行い表 1 に示す 3 水準の粒度を用意するとともに，粉末の大きさが導電性に及ぼす影響を調べた．

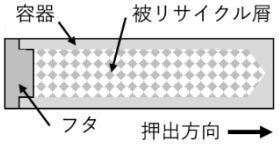


図 2　ビレットの構造

表 1　A1070 粉末の粒度

粒度の呼称	粉末の大きさの範囲
780 μ m	850~710 μ m
600 μ m	710~500 μ m
460 μ m	500~425 μ m

なお，本研究では，ビレットの状態，特に，被リサイクル層の充填方法やその大きさが押出し加工後のミクロ組織や導電性に及ぼす影響を調査することを目的としているため，添加元素の影響が少ないと考えられる A1070 をビレット材ならびに被リサイクル層に採用した．

2．3　押出し加工

200℃に加熱したコンテナにビレットを挿入し，ビレット温度の安定化のため 3 分間保持した後に，油圧ポンプを稼働し押出し加工を行った．この時，ビレットの焼き付き防止を目的として，コンテナとビレットの接触部に BN グリスを塗布した．押し出しによりダイス出口から露出した部分（長さが約 55mm）を切断し，押出材として各種評価を行った．

2．3　各種評価

図 3 に押出材の外観を示す．断面観察等の予備検討の結果から，先端の 10mm と後端の 15mm は粉末の充填状態が不安定な領域と判断されたため，上記を除いた押出材中央部 35mm について各種評価を行った．

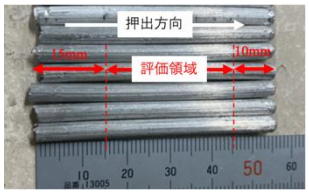


図 3　押出材の外観と評価領域

密度測定

押出材内部の空隙の状態を推測するために，アルキメデス法を用いた見かけ密度の測定を実施した．測定には，電子天秤と比重測定キットを使用した．

断面観察

押出材における粉末の変形状況や空隙等を把握するために，光学顕微鏡による断面観察を実施した．押出材を押出方向と垂直もしくは水平に切断し，樹脂に包埋した．その後，機械研磨を行い鏡面に仕上げた後にバーカー氏液を用いて，印加電圧が 20V，時間が 30s の条件下で陽極酸化処理を行い，粉末同士の境界を浮き立たせて観察を行った．

導電性の評価

押出材の導電性を評価するために，直流 4 端子法を用いて電気抵抗値を測定した．測定に先立ち，押出材表面に付着した汚れ（例えば，BN グリス）を除去するために 10%水酸化ナトリウム水溶液に 1min 間浸漬した．室温にて 2A の直流電流を印加した際の電圧を測定し，電気抵抗値に換算した．

3．実験結果および考察

3．1　密度測定

はじめに，押出材内部の空隙の状態を確認するために密度測定を実施した．各粒度の粉末を充填して押し出した押出材の見かけ密度の測定結果を図 4 に示す．なお，粉末を充填して押し出した押出材の比較対象として，直径が 6mm の A1070 丸棒をそのまま直径が 4mm へと押し出した材料（以降，バルク押出材と称す）についても密度を測定した．図 4 の棒グラフは 3 本の押出材を測定した際の平均値を示しており，変動幅は 3 本の最大および最小値を示している．バルク押出材の見かけ密度の平均値は 2.70 g/cm^3 であり，文献値 [6]とほぼ合致した．一方で，粉末を充填した押出材の見かけ密度は 2.67 g/cm^3 とバルク押出材の 99%程度を示した．このことから，粉末を充填した押出材内部の空隙は極めて少なく，健全な押出材が作製できたと判断した．

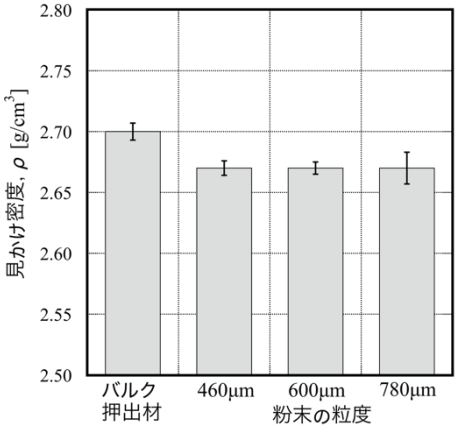


図 4　見かけ密度の測定結果

3．2　断面観察

各粒度の粉末を充填した押出材について，押出方向と垂直および水平断面を観察した結果をそれぞれ図 5 および図 6 に示す．押出材垂直断面の全体像（図 5 a)）から，断面中心部には粉末が，その周りには容器部分が観察され，押し出し後もビレット時の構造が維持されていることが確認された．いずれの押出材においても粉末部に空隙等はほとんど確認されず，また粉末は比較的アスペクト比の低い形状を有していた（図 5 b)，c)，d))．押出方向と水平の断面（図 6 参照）では，いずれの押出材においても粉末が押出方向と平行方向に伸長した様子が確認された．

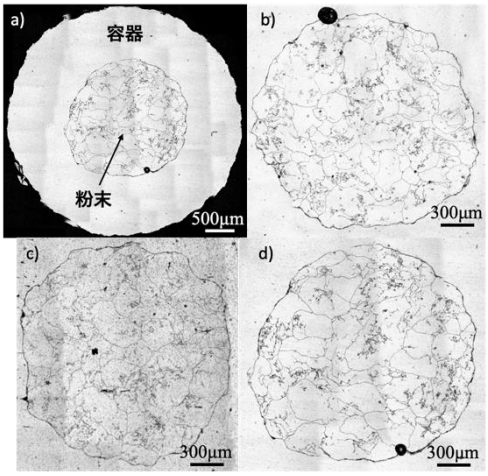


図 5　押出材の垂直断面写真．a)：全体像(粒度 780 μ m)，粉末部の拡大像 b)：460 μ m，c)：600 μ m，d)：780 μ m．

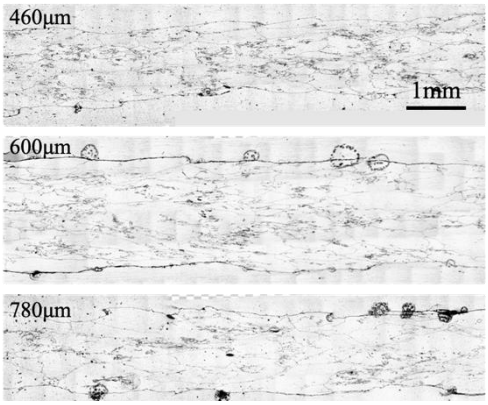


図 6　押出材の水平方向断面写真

以上の観察画像をもとに切片法により粉末の粒径を測定した結果を図 7 に示す．垂直断面では，いずれの押出材においても充填した粉末の粒度に対して 40%程度の値を示した．一方で，水平断面については粉末の粒径を押出方向と水平方向について測定したが，いずれの押出材においても充填した粉末の粒度に対して増大する傾向が確認された．その増大の割合は，460 μ m が約 70%，600 μ m が約 50%，780 μ m が約 20%であり，元の粒度が小さいほど押し出しによる伸長度合いが大きかった．

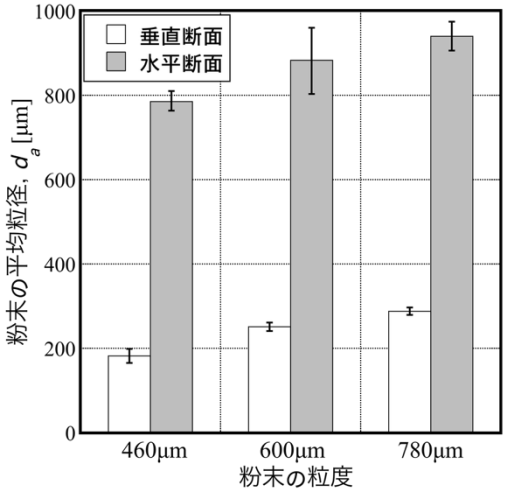


図 7　押出材中の粉末の平均粒径

3．3　導電性の評価

図 8 にバルク押出材および各粒度の粉末を充填した押出材の電気抵抗値を示す．バルク押出材の電気抵抗の平均値は 28.4nΩ・m であり，文献値[6]の 28nΩ・m とほぼ合致した．一方で，粉末を充填した押出材の電気抵抗値は，460 μ m が 36.3nΩ・m，600 μ m が 34.4nΩ・m，780 μ m が 32.7nΩ・m でありバルク押出材と比較して増大した．このことから，粉末を充填した押出材では導電性が低下しており，かつ充填した粉末の粒度が小さいほど高い電気抵抗値を示すことが明らかとなった．

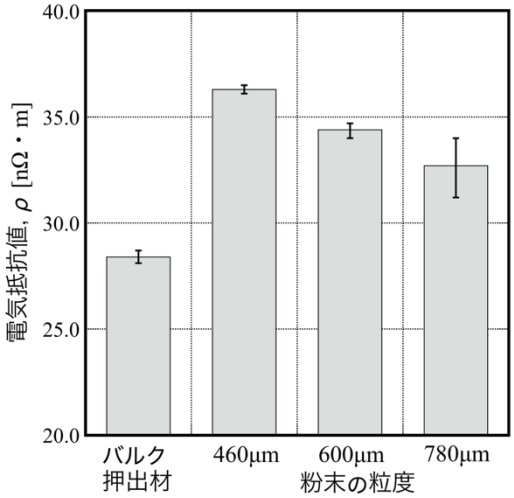


図 8　押出材の電気抵抗値

3．4　充填粉末の大きさと電気抵抗値の関係

図 8 に示した結果より，粉末を充填した押出材ではバルク押出材と比較して電気抵抗値が増大するとともに，充填する粉末の粒度と電気抵抗値の間に密接な関係が存在することが明らかとなった．これは，粉末同士の境界において生じる界面抵抗に起因する現象と考えられた．そこで，粉末の境界と電気抵抗値の関係を詳しく調べるために，押

出材内部の粉末の状態をモデル化し，電気抵抗値との対応関係を検討した．図 5 に示した垂直方向の断面写真から，1 個の粉末はその周囲の 6 個の粉末と接する状況が確認された．そのため，押出材の粉末を六角柱としてモデル化し，単位体積あたりの粉末の境界面積を以下の式を用いて見積もった．

$$A_p = A_h \times N_p / 2$$

ここで，A_pは単位体積あたりの粉末の境界面積である．A_hは粉末をモデル化した六角柱の表面積であり，図 7 に示した粉末の垂直断面および水平断面の粒径をもとに算出した．N_pは単位体積あたりの粉末の個数であり，図 5 および図 6 に示した各方向の断面写真から粉末の個数を算出した．単位体積あたりの粉末の境界面積と電気抵抗値の関係を図 9 に示す．バルク押出材は粉末を充填していないため，図中では粉末の境界面積を 0 mm² としてプロットした．図から明らかなように，単位体積あたりの粉末の境界面積と電気抵抗値との間には線形関係があり，その相関係数 R は 0.99 であった．このことから，粉末を充填した押出材では，粉末境界の数密度を極力低減することが，導電性の確保に対して重要であることが明らかとなった．

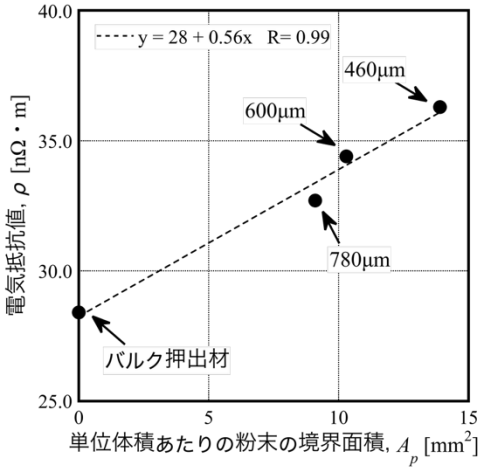


図 9　単位体積あたりの粉末の境界面積と電気抵抗値の関係

4．結言

本研究では，押出し加工を利用した固相リサイクルによりアルミニウム導線を作製する研究の第一段階として，被リサイクル屑を模擬した A1070 粉末を A1070 製容器に充填したビレットから押出材を作製し，充填する粉末の大きさと導電性の関係について検討した．その結果，以下のことが明らかとなった．

1) 粉末を充填した押出材の見かけ密度は 2.67 g/cm³ とバルク押出材の 99%程度を示した．この時の押出比は 2.25 であり押出比が比較的小さい条件下での押出し加工であったが，空隙等が少ない健全なバルク材が得られた．
2) 押出材の断面組織を観察した結果，充填した粉末の粒径は垂直では 40%程度まで減少し，水平方向では押出方向に伸長するように変形した．この時，元の粒度が小さいほど押し出しによる伸長度合いが大きいことが確認された．
3) 粉末を充填した押出材では導電性が低下した．また，充填した粉末の粒度が小さいほど高い電気抵抗値を示した．
4) 単位体積あたりの粉末の境界面積と電気抵抗値の関係を調査したところ，両者の間には強い相関関係が確認された．この結果から，導電性を確保するためには粉末境界の数密度を極力低減する必要があることが明らかとなった．

謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団による研究助成(2023 年度 奨励研究助成(若手研究者枠)AF-2023042-C2)を受けて実施しました．ここに深甚なる謝意を申し添えます．

参考文献

1) S. Shamsudina, M. A. Lajis, Z. W. Zhong：Procedia CIRP, 40 (2016) 256.
2) V. Güley, N. B. Khalifa, A. E. Tekkaya：Int. J. Mater. Form., Vol. 3, (2010), 853.
3) 三宅保彦：軽金属，Vol. 36, No. 1 (1986), 51.
4) 東京電力パワーグリッド HP, https://www.tepco.co.jp/pg/electricity-supply/operation/line.html（アクセス日：2026. 05. 28）
5) 篠田辰規・市川雅照・瀬下裕也・和田政宗・望月淳：フジクラ技報，122, 1 (2012), 17.
6) 軽金属学会:アルミニウムの組織と性質, (1991), 413.