HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	多穴ダイスを組み合わせた異形ダイスによる熱間押出材の結晶粒微細化と高延性化
Author(s)	富田, 花帆; 徳永, 透子; 大野, 宗一; 松浦, 清隆
Citation	日本金属学会誌, 79(4), 183-190 https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2014052
Issue Date	2015-04
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/75373
Type	article
File Information	J. Jpn Inst. Met. Mater. 79 183.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

日本金属学会誌 第79巻 第4号(2015)183–190

多穴ダイスを組み合わせた異形ダイスによる熱間押出材の結晶粒微細化と高延性化

富田花帆[1,*]　徳永透子[1,*]　大野宗一[2]　松浦清隆[2]

[1]北海道大学大学院工学院
[2]北海道大学大学院工学研究院

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 79, No. 4 (2015), pp. 183–190
© 2015 The Japan Institute of Metals and Materials

Grain Refinement and Ductility Improvement by Hot Extrusion Using a Heteromorphic Die with Small Holes

Kaho Tomita[1,*], Toko Tokunaga[1,*], Munekazu Ohno[2] and Kiyotaka Matsuura[2]

[1]*Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060–8628*
[2]*Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060–8628*

It has been shown using an Al–4.0 mass%Cu alloy as a demonstration material that hot extrusion with the use of a specially–designed die, which is called a heteromorphic die, leads to grain refinement and improvement in ductility. The heteromorphic die consists of two plates and one spacer. One plate is called a strain–giving die and has six holes of 5 mm in diameter, while the other plate is called a shape–giving die and has one rectangular hole of 9 mm × 15 mm in side length. The spacer separates these plates at a distance of 10 mm and gives a space between them. The Al–Cu alloy billet was hot–extruded from the strain–giving die into the space between the two dies to produce six thin bars, and all the six bars passed together through the shape–giving die to become a thick rectangular bar. The rectangular bar produced by the present extrusion was tensile–tested at room temperature and the results were compared with those of the un–extruded billet and the bar produced by a conventional hot extrusion using only the shape–giving die. The elongation of the specimens made of the billet, the bar extruded by the conventional method and the one extruded using the present heteromorphic die were 21, 35 and 57%, respectively. The largest elongation found in the sample extruded using the present heteromorphic die should be due to the fine recrystallized grain structure in that sample. It is suggested that the recrystallization is induced by a large strain generated in the present heteromorphic die due to the friction at the large contact area between the die hole wall and the alloy. ［doi:10.2320/jinstmet.J2014052］

(Received October 17, 2014; Accepted December 2, 2014; Published April 1, 2015)

Keywords: *aluminum, extrusion, mechanical property, grain refinement, plasticity*

1. 緒　　言

構造材料の高強度化・高延性化のためには結晶粒微細化が有効である．そのため，近年，ECAP（Equal–Channel Angular Pressing）法，HPT（High–Pressure Torsion）法やARB（Accumulative Roll Bonding）法といった巨大歪加工法による結晶粒微細化が注目されている[1,2]．これらの加工法はいずれも優れた方法ではあるが，実用化にあたってまだ課題が残されている．例えば，多くの繰り返しのプロセスが必要であることやビレットのサイズや形状が限られていることなどの問題がある[3,4]．

そこで，本研究では一度だけの加工で大きな歪を導入でき，しかも不必要な寸法変化を伴わない加工法として，特殊なダイスを用いた押出加工を提案し，その有効性を検討する．その特殊なダイスを本論文では異形ダイスと呼ぶ．押出加工という既存の生産技術を用いて通常の形状付与に併せて巨大歪加工が同時にできれば実用化が期待できる．

本研究では異形ダイスの効果を明らかにするために，模型合金としてAl–Cu合金を用いて押出加工し，その組織観察および機械的特性の調査を行った．

2. 実 験 方 法

実験に用いた試験材はAl–4.0 mass%Cu合金である．99.99%Alと99.96%Cuを原料に大気中で溶製し，直径45 mmの丸棒状インゴットを作製した．インゴットに対し，530℃，2時間の溶体化処理を行った後，200℃，2時間の時効処理を行った．押出加工前に時効処理を行った理由は，θ相粒子を析出させることで熱間押出工程における粒成長を抑制するためである．

Fig. 1に押出装置の模式図を示す．押出加重を低くするため間接押出法を用いた．電気炉内に設置したコンテナにビレット，ダイス，ラムを下からこの順に置き，ラムに上から荷重をかけ，合金を上方に押出した．押出温度は，予備実験においてなるべく低い押出可能温度を探し，490℃とした．ダ

* 北海道大学大学院生（Graduate Student, Hokkaido University）

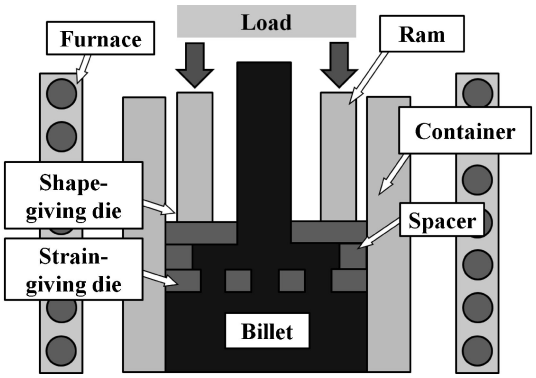

Fig. 1 Schematic illustration of hot extrusion equipment.

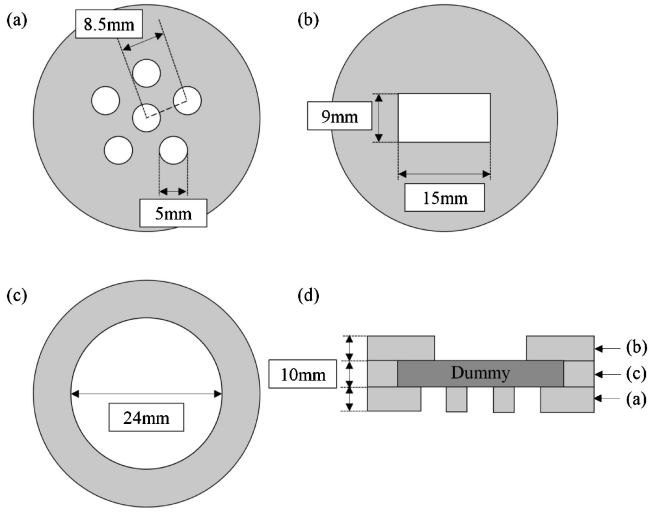

Fig. 2 Schematic image of dies: (a) a strain–giving die, (b) a shape–giving die, (c) a spacer and (d) a heteromorphic die, (The diameter and height of all dies are 45 mm and 10 mm, respectively).

イスの詳細を Fig. 2 に示す．歪付与ダイスは直径 5 mm の穴を 6 つ有しており(a)，成形ダイスには 9 mm×15 mm の矩形の穴が 1 つ空いている(b)．どちらのダイスの厚さも 10 mm となっており，これら 2 つのダイスが触れないよう外径 45 mm，内径 24 mm，高さ 10 mm のリング状スペーサー(c)を両者の間に置いた(d)．(d)は歪付与ダイスと成形ダイスおよびスペーサーを組み合わせて 1 つのダイスセットとした状態を示しており，本論文ではこのセットを異形ダイスと称する．異形ダイスの中のスペースには，(d)に示すようにダミーとして Al–Cu 合金を置いた．始めに押出されたビレットはまず歪付与ダイスの 6 つの小さな穴から出てダミーを押し出しつつスペース内に充満し，さらに成形ダイスから上に出て角棒状に押出される．

歪付与ダイスと成形ダイスの穴面積はほぼ同じであり，押出前後の材料断面積の比から見積もられる押出比は約 13，その自然対数から求められる真歪としては約 2.6 である．一方，押出による断面積変化量の初期断面積に対する割合として得られる公称歪(加工率)では約 92%である．異形ダイスの効果の有無を明らかにするため，歪付与ダイスを通さず成形ダイスのみによる押出も比較として行った．押出は一定加重 440 kN で行ったので，ラム速度は異形ダイスによる押出では 0.25 mm·min^{-1}，成形ダイスのみによる押出では 10 mm·min^{-1} と異なった．したがって，押出された後に高温下に曝される時間が両者の間で異なるので，この影響の有無を明らかにするため，押出後に熱処理した試料も用意して調査の対象とした．つまり，成形ダイス押出材およびビレット材を 490℃ の炉で約 2 時間保持することによって異形ダイス押出材と同じ熱履歴とした試料も用意し，押出ままの試料と比較した．

このように作製した試料に対して，微細組織観察と引張試験を行った．組織観察に関しては，断面をエメリー紙で#1500 まで研磨した後に粒径 100 nm のアルミナ研磨剤を用いて精密研磨を行い，1%フッ酸水溶液でエッチングしてから，光学顕微鏡による結晶粒観察を行った．引張試験に関しては，ワイヤ放電加工機を用いて，試験片の長手方向が押出方向と平行になるようにゲージ長さ 8.6 mm，厚さ 2.0 mm，幅 6.0 mm の試験片を切り出し，室温においてクロスヘッドスピード 8.6×10^{-3} mm·s^{-1} の条件で引張試験を行った．すべての試料に対しそれぞれ 2 回ずつ試験を行い，再現性を確認した．なお，引張試験片の採取にあたり，厚さ 9 mm の角棒押出材を厚さ方向にほぼ 4 等分するように薄板材を 4 枚切り出し，表面を含む 2 枚は避けて中央部の 2 枚を採用した．

3. 実験結果と考察

3.1 組織観察結果

Fig. 3(a)は異形ダイス押出材の横断面全体を低倍で撮影した写真を示している．ここには歪付与ダイスの 6 つの穴から押出されてきた 6 つの領域が認められ，それぞれの境界には帯のような模様が見られる．Fig. 3(b)と(c)は，Fig. 3(a)中に記入した(B)と(C)の部分を高倍で撮影した組織写真であり，それぞれ異なるダイス穴から押出された領域の中央部を示しているが，どちらの領域もほぼ同じような結晶粒組織を持っている．一方，Fig. 3(a)中で見られた領域境界の帯状組織に関しては，(B)/(C)の境界を(D)としてその高倍写真を Fig. 3(d)に示した．この部分では(B)や(C)の各領域内部の組織と比べてやや微細粒が多く見られるものの，基本的には領域内と領域境界部はほぼ同じ組織を持っている．また高倍写真では各領域の間には明瞭な境界はなく，隣接領域の組織は互いに連続している．すなわち，歪付与ダイスはその穴の配置を反映して巨視的な領域の広がりを持つ組織を生じさせるが，微視的にはほぼ均一な結晶粒組織となっている．

Fig. 4 に試料の縦断面上の結晶粒組織を示す．(a)は押出前のビレット，(b)は成形ダイスのみで押出した角棒，(c)は異形ダイスで押出した角棒の組織である．ビレットの組織は荒く，黒く見える部分はデンドライト樹間への Cu 偏析により生じた共晶組織である．これを成形ダイスのみで押出すると，一部で再結晶により生じた小さな結晶粒がみられたが，押出方向に伸長した 100 μm ほどの粗大な未再結晶粒も多く残っている(Fig. 4(b))．これに対し異形ダイスを用い

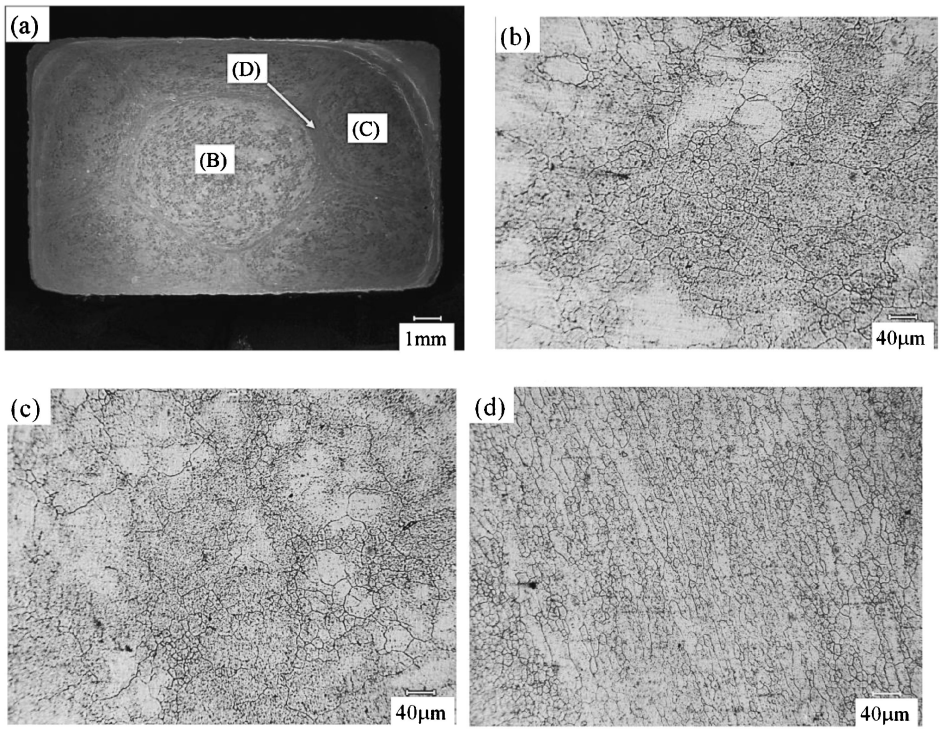

Fig. 3　Microstructures observed on a cross section of the rectangular bar extruded using a heteromorphic die. (a) Full picture of the cross section at a low magnification. (b), (c) and (d) High magnification pictures showing points (B), (C) and (D) indicated in Fig. 3 (a), respectively.

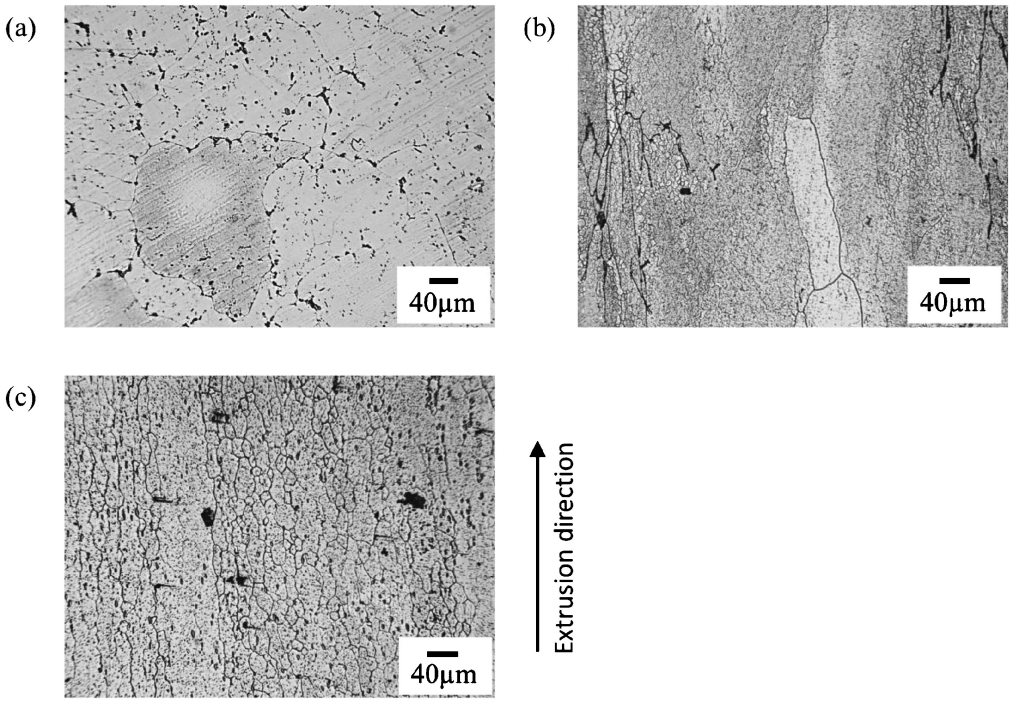

Fig. 4　Microstructures of Al–Cu alloy: (a) sample before extrusion, (b) sample extruded with the shape–giving die, (c) sample extruded with the heteromorphic die.

て押出した場合，全面で再結晶が起こり平均粒径 20 μm の非常に微細な組織となった．(Fig. 4(c))．すなわち，(b)と(c)の間ではビレットの断面積と押出された角棒の断面積から見積もられる見かけの加工率は同じであるが，後者ではより大きな歪をより均一に受けたため，全体に再結晶粒が発達したものと推察される．これは，後者ではビレット材が角状のダイス穴を通る前に多数の小さな丸い穴を通って押出されているためである．このとき，小さな丸穴の合計面積と角状のダイス穴の面積は同じであるので，1 枚目のダイスを通るときに約 92％の加工を受けるが，2 枚目のダイスを通るときには面積変化はないので加工率の追加はないものとみなせる．それにもかかわらず Fig. 4(c)の組織のみが微細になっ

た理由は，後述するようにダイス穴の周囲長の違いが影響していると考えた．

3.2 引張試験結果

Fig. 5 に引張試験における応力–歪曲線を示す．ビレット材の破断伸びは 21％であったが，成形ダイスで押出すと 35％まで伸びた．異形ダイスで押出したものはさらに大きな伸びを示し，その値は 57％に達した．成形ダイスによる押出材における延性の向上は，ビレット内にあった気孔などの鋳造欠陥が押出時の高温高圧のもとで圧着され著しく軽減されたためであり，異形ダイスによる押出材におけるさらなる延性の向上は再結晶による組織の均一微細化のためであると推察される．一方で引張強さに着目すると，破断伸びとは逆にビレット材が最も高く，異形ダイスによる押出材が最も低かった．Hall–Petch 則によれば小さな結晶粒径を持つ異形ダイスによる押出材が最も高強度を示すことが予測されるが，Fig. 5 の引張試験結果はこれと反している．この原因として，押出速度の違いによる押出材の高温保持時間の違いを疑った．すなわち，異形ダイスによる押出では加工中の抵抗のためにラム速度が 0.25 mm·min^{-1} と遅く，一方成形ダイスのみによる押出では 10 mm·min^{-1} であったため，押出時間には約 2 時間の差がある．異形ダイス押出材はこの 2 時間ずっと加熱炉の中に置かれたので，この間に回復や再結晶が十分に起こり軟化したものと考えた．一方の成形ダイス押出材では加工がわずか数分で終わったために加工時の歪が残存していたものと推察された．また，ビレット材が高強度を示したのは，Fig. 4(a)に見られたように樹間に残存した共晶金属間化合物 θ 相によるものと推察された．それゆえ，異形ダイス押出材と同じ熱履歴を他の試料にも与えて熱履歴を統一した上で，再度組織観察および引張試験を行った．

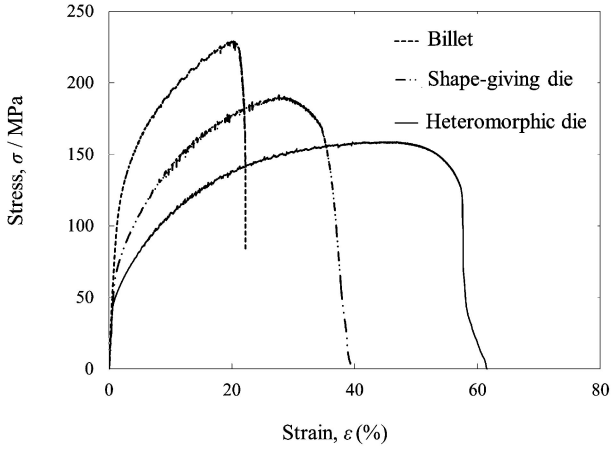

Fig. 5 Results of tensile tests at room temperature for the billet and as–extruded samples.

3.3 熱履歴統一試料の組織観察

ビレット材と成形ダイス押出材のそれぞれに 490℃–2 時間の熱処理を追加して施し，組織観察を行った結果を Fig. 6 に示す．ビレットでは，熱処理前(Fig. 4(a))と比べて共晶組織が固溶してわずかに少なくなっている(Fig. 6(a))．成形ダイス押出材では熱処理前に見られた細かい再結晶粒がかなり成長しており，また再結晶が新たに起こった形跡がないことから，再結晶は完了し歪は完全に解放されたとみられる(Fig. 6(b))．

3.4 熱履歴統一試料の引張試験

Fig. 7 に熱履歴統一試料の引張試験結果を示す．熱処理の追加によりビレット材と成形ダイス押出材の伸びがわずかに増加したが，それでもなお異形ダイス押出材の伸びが最も高い値を示している．すなわち，異形ダイス押出材の優れた延性は，押出後の軟化によるのではなく微細で均一な結晶粒組織によるものであることが明らかとなった．一方引張強さに関しては，ビレット材，成形ダイス押出材ではほぼ同程度となったが，異形ダイス押出材はそれらよりやや低い値を示している．結晶粒組織が微細であるにもかかわらず強度が低い原因として，本研究で観察される 10～100 μm 程度の粒径範囲では粒径の変化に対して強度がさほど鋭敏に変化しないこともあるが，むしろ以下のように集合組織の影響が考えられる．アルミニウム合金の熱間押出において〈111〉+〈100〉の二重繊維組織が発達することが知られており[5–7]，また加工後の焼鈍等で再結晶が起こった場合，再結晶粒は〈100〉方位を示すことが知られている[7]．この再結晶〈100〉集合組織は強度低下をもたらすことが報告されており[8]，本実験結果における異形ダイス押出材の低強度はこれによるものと推測される．また，集合組織の影響により強度が低くなるときには延性が高くなることも報告されており[9]，これは本研究結果と符合する．

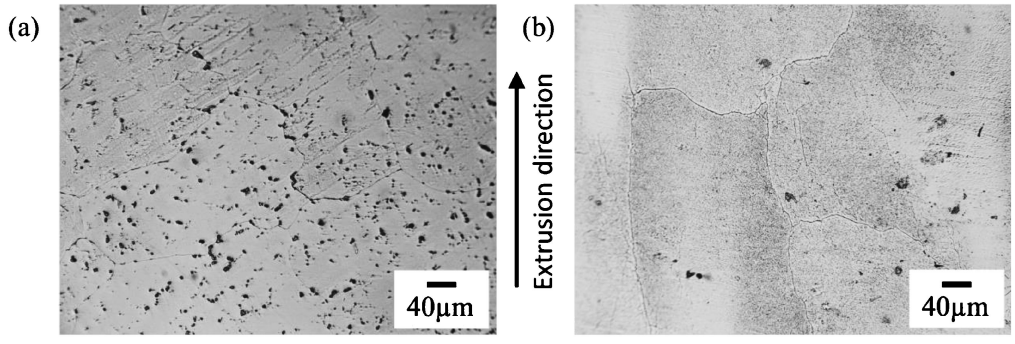

Fig. 6 Microstructures of Al–Cu alloy: (a) annealed billet, (b) annealed extruded sample with the shape–giving die.

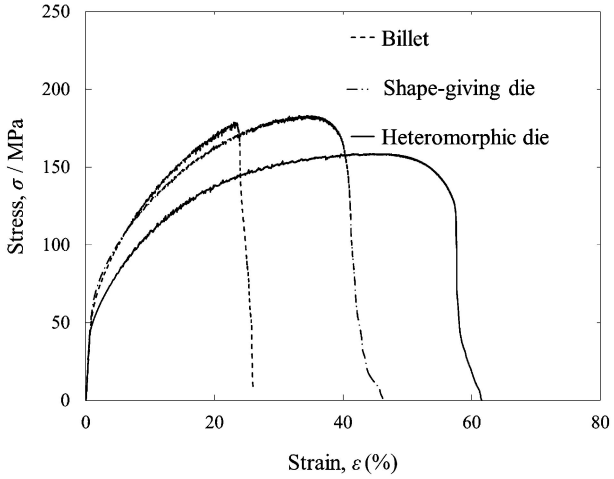

Fig. 7　Results of tensile tests at room temperature for annealed samples and extruded sample with a heteromorphic die.

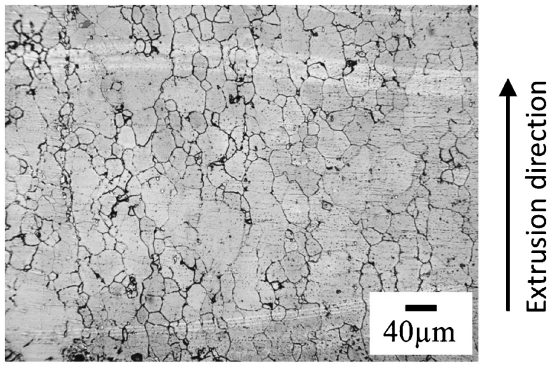

Fig. 8　A microstructure of the aging–treated extruded sample with a heteromorphic die.

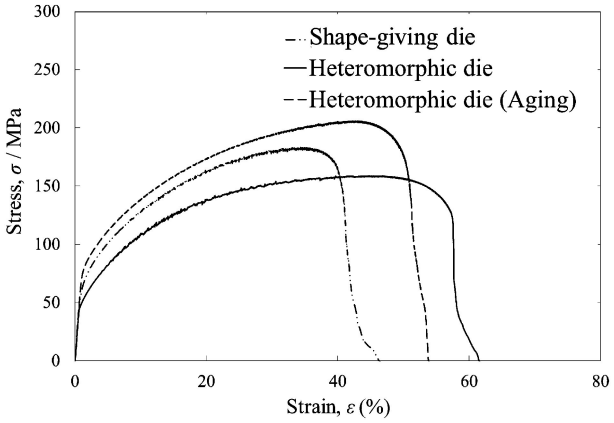

Fig. 9　Results of tensile tests at room temperature for aging–treated extruded sample with heteromorphic die and as–extruded samples.

3.5　時効処理

Fig. 7 に示したとおり，異形ダイス押出材は成形ダイス押出材と比較して延性には優れるが強度がやや低い．高延性を保ったまま強度を向上させるため，押出材に対し時効処理を行うことを考えた．異形ダイス押出材に対して 530℃，30 分の溶体化処理を行った後，200℃，2 時間の時効熱処理を行った．このようにして得た試料に対して組織観察および室温での引張試験による機械的特性の調査を行った．

Fig. 8 に異形ダイス押出材に対して時効処理を加えた試料の組織写真を，Fig. 9 にその試料の引張試験結果をそれぞれ示す．Fig. 8 において熱処理による多少の粒成長は認められるが，組織はまだ微細な結晶粒に占められており，平均粒径は 21 μm である．Fig. 9 には，比較として異形ダイス押出ままの試料および熱履歴を統一した成形ダイス押出材試料の結果もそれぞれ Fig. 7 から転載している．時効処理を加えた異形ダイス押出材の引張強度は，異形ダイス押出ままの試料および成形ダイス押出材試料よりも大きな値を示しており，これは時効処理による析出強化が寄与していると考えられる．延性に関しても，時効熱処理によりわずかに低下してはいるものの，十分に高い値を示している．これらの結果より，異形ダイス押出材に対して時効処理を加えることによって高延性・高強度をともに達成できることが明らかとなった．

3.6　異形ダイスによる結晶粒微細化のメカニズム

3.1 ですでに述べたように，異形ダイスを用いた押出において結晶粒が著しく微細化した原因としては，ダイスの断面積から見積もられる見かけの加工率ではなく，ダイス穴の周囲長の影響が考えられる．すなわち，ダイス穴を通ってビレット材が押出されるとき，ダイス穴壁面とビレット材の摩擦により壁面近傍のビレット材内部にせん断歪が発生し，このときの歪量はすべてのダイス穴の合計周囲長が長いほど大きいと考えられる．それゆえ異形ダイス押出材では，同じ見かけ加工率を持つ成形ダイス押出材よりも大きな歪を受け，そのために再結晶による微細組織が発達したものと推察される．これを確かめるため，押出途中の異形ダイスを内部の合金試料ともども縦に切断し，多穴ダイス近傍とダイス穴中心付近の試料組織を観察した．Fig. 10(a)はダイス穴の壁面近傍の組織，(b)はダイス穴の中心部の組織を示している．壁面近傍，中心部のどちらでも再結晶が起こっているが，組織を比較してみると壁面近傍の方が全面で再結晶を起こしており，粒径は細かい．これは，Fig. 3 に示した押出材の横断面組織の観察結果とも符号する．このようにビレット材料がダイス穴を通る際に壁面近くの組織の方がより微細になる理由として，壁面では摩擦のためにビレット材料が壁に拘束され，一方において拘束のない穴の中心部では比較的自由に流動できるので，両者の間の流動速度差により壁面近傍のビレット材にせん断歪が生じて再結晶が促されたことが考えられる．このため，成形ダイスと比べて穴の周囲長が長い多穴歪付与ダイスを通した押出材において微細結晶粒組織が観察されたものと考察した．この考察の妥当性を証明するため，以下のように押出加工の計算機シミュレーションを実施した．

3.7　多穴歪付与ダイスによる押出の計算機シミュレーション

3.7.1　有限要素モデル

解析には汎用有限要素法プログラム FORGE 2011 を用いた．構成式としては以下のように表される Norton–Hoff 粘塑性方程式を用いた[10]．

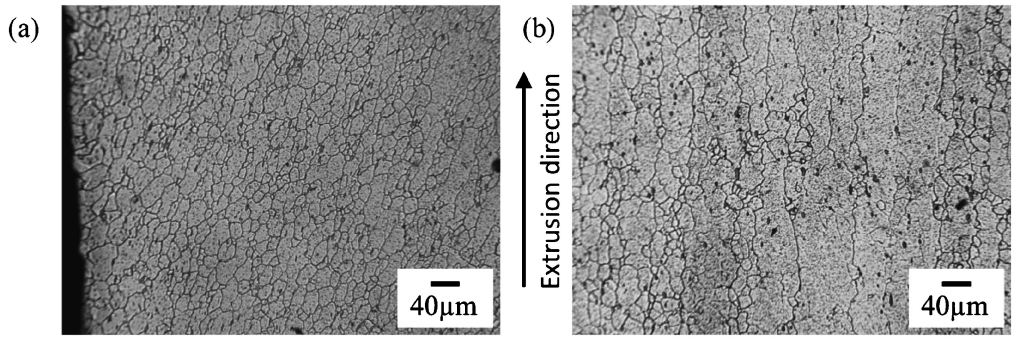

Fig. 10 Microstructures of Al–Cu alloy: (a) near the wall of the die hole, (b) center of the die hole.

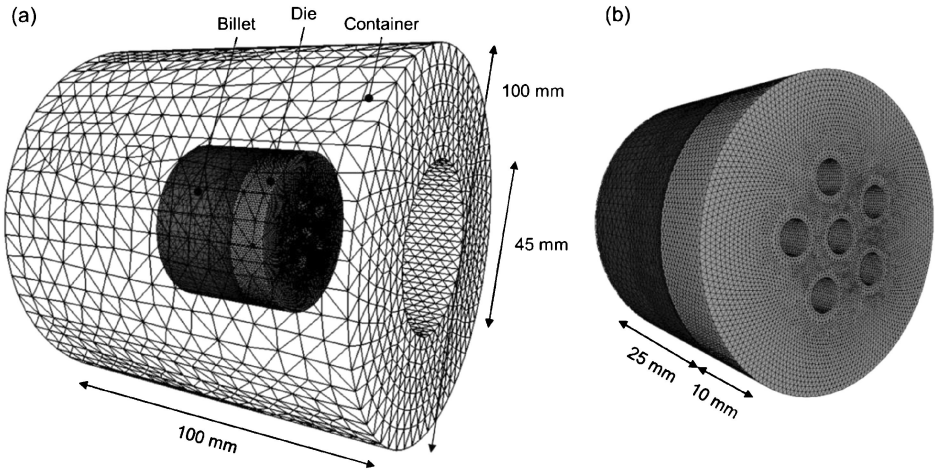

Fig. 11 Initial meshes of the billet, the 6-hole die and the container; (a) whole image and (b) enlargement of the billet and die.

$$\boldsymbol{s}=2K(\sqrt{3}\ \dot{\bar{\varepsilon}})^{m-1}\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \qquad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{s}$ は偏差応力，K は材料定数，m は歪速度感受性指数，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ は歪速度テンソルを表している．$\dot{\bar{\varepsilon}}$ は以下のように示される相当歪速度を表している．

$$\dot{\bar{\varepsilon}}=\left(\frac{2}{3}\sum_{i,j}\dot{\varepsilon}_{ij}^{2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

解析のための押出材料として，実験で用いた合金とほぼ同じ化学組成を持つ Al–Cu 合金（Al–4.35Cu–1.5Mg–0.6Mn–0.25Si–0.25Fe–0.075Ti–0.05Cr–0.025Zr; mass%）の構成式を FORGE のデータベースから引用し用いた．構成式は以下の Hansel–Spittel 式で表すことができる．

$$\sigma_{\mathrm{f}}=667.98713\exp(-0.00485T)\times\varepsilon^{-0.03347}\exp\left(\frac{-0.00228}{\varepsilon}\right)\cdot\dot{\varepsilon}^{0.08079} \qquad (3)$$

ここで，σ_{f} は流動応力，ε は歪，T は温度，$\dot{\varepsilon}$ は歪速度を表している．Fig. 11 に本研究で用いた FEM 解析モデルを示す．モデルは実験装置と同様に設計され，すべての物体に対して四面体要素を用いた．激しい変形が予想されるダイス出口近傍で細かくなるように要素分割した．激しい加工による要素の歪を防ぐため，FORGE 付属のリメッシング機能を用いた．

3.7.2 ダイス

解析で用いたダイスを Fig. 12 に示す．(a)は実験に用いたものと同じ多穴ダイスで押出加工率約 92%に相当し，周囲長は 94 mm である．(b)は(a)の穴の位置を中心に寄せたものであり，(c)は穴の数が 11 個で加工率が約 86%と低いが周囲長は 169 mm と長いもの，(d)は穴形が三角形であり加工率は(a)のダイスと同じであるが周囲長は 130 mm と長い．(b)，(c)，(d)はそれぞれ穴の位置，穴の数，穴の周囲長が押出材中の歪量に及ぼす影響を調査する目的で設計された．本論文ではそれぞれ(a)6 穴ダイス，(b)中心寄り 6 穴ダイス，(c)11 穴ダイス，(d)三角穴ダイスと呼ぶこととする．また，ベアリング部の長さは 10 mm とし，内径に傾斜はつけていない．

3.7.3 境界条件

押出材合金とダイス表面および押出材合金とコンテナ内壁の間での界面における接触条件は以下に示す Tresca 則による制限つき Coulomb 摩擦則を用いた[11]．

$$\tau=\mu\sigma_n\frac{\Delta\boldsymbol{V}}{\Delta V}\ \text{if}\ \mu\sigma_n<\bar{m}\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

$$\tau=\bar{m}\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\frac{\Delta\boldsymbol{V}}{\Delta V}\ \text{if}\ \mu\sigma_n>\bar{m}\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

ここで，τ はせん断応力，μ は Coulomb 摩擦係数，σ_n は垂直応力ベクトル，$\Delta\boldsymbol{V}/\Delta V$ は相対表面速度，$\bar{m}$ はせん断摩擦係数を示している．本解析では，実験で用いた潤滑剤の摩擦係数に最も近いものを FORGE のデータベースから選び，Coulomb 摩擦係数は 0.15，せん断摩擦係数は 0.3 とした．大気温度は 298 K とし，コンテナ，ダイス，ビレットの初

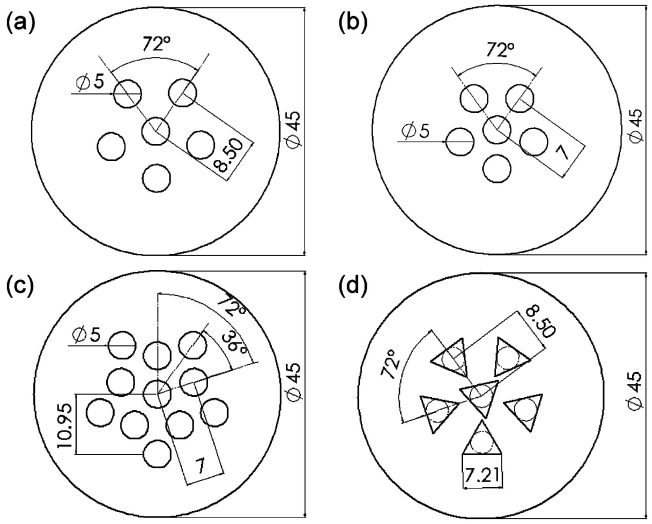

Fig. 12　Die designs for the simulations; (a) 6-hole die, (b) 6-centered-hole die, (c) 11-hole die and (d) triangle-hole die, (All dimensions are in mm).

期温度は実験と同じく 763 K とした．コンテナとダイスは剛体とし，摩擦係数は押出中変化しないものと仮定した．また，加工速度がきわめて遅いことから加工発熱の影響は無視した．FORGE2011 による数値解析の詳細な説明は他の文献を参照されたい[11]．

3.7.4　シミュレーション結果と考察

⑴　ダイス孔形状の影響

Fig. 12 で示したダイスを用いて 10 mm 押出した後の相当歪分布および測定された相当歪の平均値を Fig. 13 に示す．(a)と(b)は 6 穴ダイスを，(c)と(d)は中心寄り 6 穴ダイスを，(e)と(f)は 11 穴ダイスを，(g)と(h)は三角穴ダイスを用いて押出された押出材の横断面と長手方向断面をそれぞれ示している．Fig. 13 における横断面はダイスの直上の位置を表し，縦断面はダイスの中心を通る断面を示している．また，図中下部に示されている相当歪の平均値は上記横断面において評価した結果である．この平均相当歪値から，11 穴のダイスを用いた場合が最も大きい歪を示すことがわかる．(a)6 穴ダイスと(c)中心寄り 6 穴ダイスを比較すると，穴の位置は付与される平均的な歪量に対して大きな影響を及ぼさないことがわかる．また，(a)6 穴ダイス，(c)中心寄り 6 穴ダイス，(g)三角穴ダイスを比較すると，見かけの加工率はどれも同じであるのに穴周囲長が長い(g)の三角穴ダイスの結果において最も大きい平均歪が得られた．(a)6 穴ダイスと(e)11 穴ダイスを比較すると，(a)と比べて(e)は見かけの加工率が小さいにもかかわらず平均歪が大きいことがわかる．その理由は穴周囲長が長いためである．これらのことから，押出材の平均相当歪量はダイスと押出材合金の間の接触面積により決定される，と考えられる．すなわち，周囲長が大きいと押出材合金にかかる摩擦力が大きくなりダイス穴近傍におけるせん断歪が大きくなると考察される．この考察が正しいならば，ダイスと押出材合金の間の摩擦係数の増加につれて平均歪が大きくなるはずである．これを確認するため，以下に摩擦係数の影響をシミュレーションした．

Table 1　Implemented friction conditions.

	Coulomb friction coefficient, μ	Shear friction coefficient, $\bar{m}$
Low	0.075	0.15
Medium	0.15	0.30
High	0.40	0.80

⑵　ダイスと合金間での摩擦係数の影響

ダイスと押出材合金の間の摩擦係数が押出材の相当歪にどのような影響を与えるかを調査するため，摩擦係数を Table 1 に示すように変化させ解析を行った．これらの調査においてはすべて Fig. 12(a)で示した 6 穴ダイスを用いた．得られた結果を Fig. 14 に示す．Fig. 13 と同様に(a), (c), (e)は押出材横断面を(b), (d), (f)は押出材長手方向断面を示しており，相当歪の平均値は観察した横断面において測定を行った結果である．この図から，合金とコンテナ内壁間での摩擦係数が大きいほど押出材に付与される歪量が大きいことがわかる．したがって，周囲長が大きいと押出材合金にかかる摩擦力が大きくなりダイス穴近傍におけるせん断歪が大きくなるとする前章での考察は正しいことが確認された．

以上のように，本研究で提案する異形ダイスによる押出加工においては，見かけの加工率よりむしろダイス穴の周囲長が大きいことにより押出材合金に付与される歪が大きくなり，その結果，強加工による空隙や偏析など鋳造欠陥の軽減および分散化，さらには再結晶組織の微細均一化が起こり，押出後の材料が高い塑性変形能を示したものと考察された．

4.　結　　言

本研究では多穴ダイスを組み合わせた異形ダイスを用いて Al-Cu 合金の熱間押出を行い，押出材の組織観察および引張試験による機械的特性の調査を行った．結果を以下に要約する．

⑴　一般的な成形ダイスを用いた押出材では部分的な再結晶にとどまったが，これと同じ見かけ加工率を持つ異形ダイスを用いた押出材ではほぼ全面が再結晶し，非常に微細な結晶粒組織が得られた．

⑵　ビレット材，成形ダイス押出材，異形ダイス押出材の室温での伸びはそれぞれ 21，35，57％となり，本研究で提案した異形ダイスが延性の増加をもたらすことが示された．

⑶　異形ダイス押出材に時効処理を加えると高延性を維持したまま強度が大きく上昇した．

⑷　異形ダイスを用いた押出による結晶粒微細化はダイス穴壁面の摩擦の影響によることが，ダイス内を流れる試料金属の微細組織観察および押出加工の計算機シミュレーションから明らかにされた．

本研究の一部は，財団法人天田金属加工機械技術振興財団一般研究開発助成(AF-2009005)および JSPS 科研費 25・1024 の助成の下に行われたものであり，記して謝意を表します．

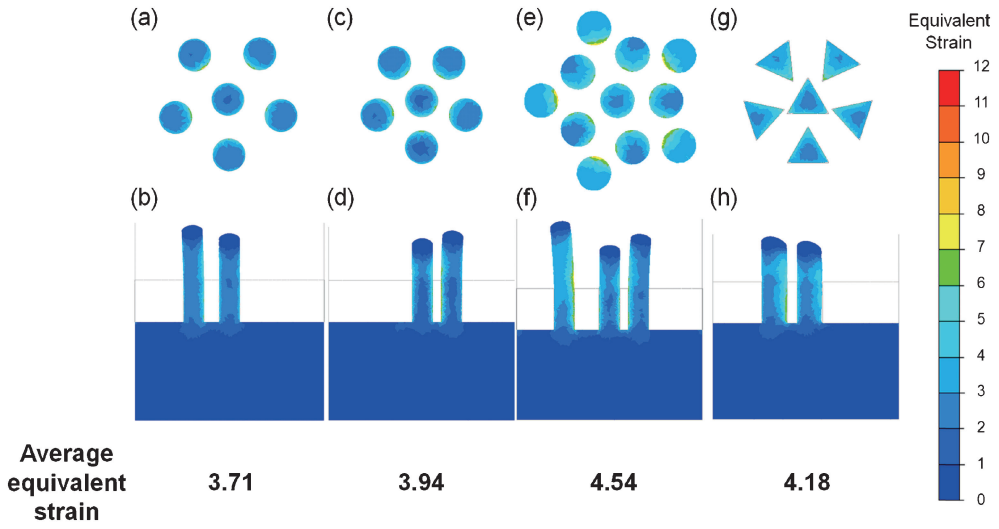

Fig. 13 The distributions of equivalent strain after extrusion of 10 mm with (a) and (b) 6–hole die, (c) and (d) 6–centered–hole die, (e) and (f) 11–hole die and (g) and (h) triangle–hole die. Figures (a), (c), (e) and (g) show the cross section of the extrudates directly above the die, and figures (b), (d), (f) and (h) show the longitudinal section of the extrudates, which passes through the center of the die. The average equivalent strains were measured on the observed cross sectional plane.

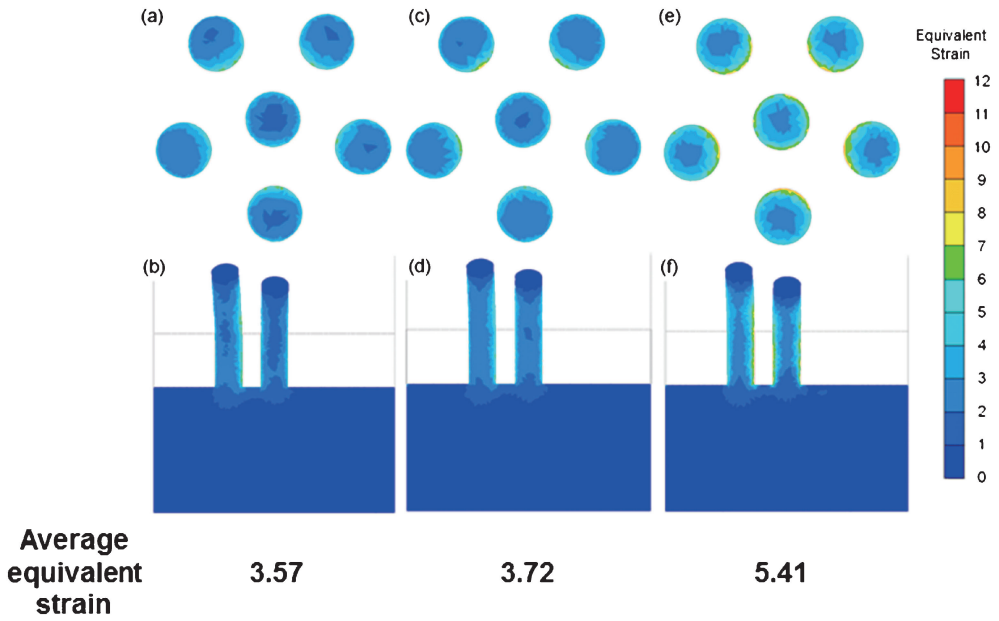

Fig. 14 The distributions of equivalent strain after extrusion of 10 mm with various friction conditions at the interface between the metal and the die; (a) and (b) low friction, (c) and (d) medium friction and (e) and (f) high friction conditions. Figures (a), (c) and (e) show the cross section of the extrudates directly above the die, and figures (b), (d) and (f) show the longitudinal section of the extrudates, which passes through the center of the die. The average equivalent strains were measured on the observed cross sectional plane.

文 献

1) N. Tsuji: J. JILM **62**(2012) 392–397.
2) R. Yonemoto, M. Arita and Z. Horita: J. JILM **62**(2012) 459–463.
3) G. Sakai, Z. Horita and T. G. Langdon: Mater. Sci. Eng. A **393**(2005) 344–351.
4) Y. Harai, K. Edalati, Z. Horita and T. G. Langdon: Acta Mater. **57**(2009) 1147–1153.
5) T. Takahashi and Y. Kobayashi: J. JILM **18**(1967) 81–87.
6) G. Wasserman: J. JILM **17**(1967) 5–13, (Trans. by Y. Masuda into Japanese).
7) C. J. McHargue, L. K. Jetter and J. C. Ogle: Trans. Metall. AIME **215**(1959) 831.
8) T. Takahashi and Y. Kobayashi: J. JILM **19**(1968) 17–23.
9) N. Inakazu, M. Kitamura and H. Matsumoto: J. Japan Inst. Metals **50**(1986) 1016–1022.
10) J.–L. Chenot and M. Bellet: *Numerical Modelling of Material Deformation Processes*, ed. by P. Hartley, I. Pillinger and C. E. N. Sturgess, (Springer–Verlag, London, Berlin, 1992) pp. 179–224.
11) T. S. Cao: PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 10 2013.