

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年6月 2日現在

機関番号：34310  
研究種目：基盤研究(C)  
研究期間：2011～2013  
課題番号：23560142  
研究課題名（和文）創生した高じん性軽合金（SS-ECAP材）による超薄肉角型筐体成形プロセスの研究  
研究課題名（英文）Research on the forming process square shape of the super-thin wall housing case by newly made light-alloy metal with the high mechanical property  
研究代表者  
田中 達也（TANAKA, Tatsuya）  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号：70434678  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）4,100,000円、（間接経費）1,230,000円

研究成果の概要（和文）：半凝固鋳造を行ったAC4CHアルミ合金（以下、SS材）を本研究に使用した。さらに、この材料に対してECAP加工を施した超微細粒組織材料（以下、SS-ECAP材）も創製した。薄肉筐体を作製するインパクト成形によってこれらの材料の塑性加工性を評価した。この成形法は、バルクに高速で衝撃荷重を与え、そして高圧により狭いクリアランスから後方へ押出す。その結果、AC4CH合金に半凝固鋳造法とECAP加工を施すことで、機械的特性の向上だけでなく加工性も大きく向上した。通常インパクト成形の肉厚は0.7mm程度が限界とされているが、SS-ECAP材を用いれば0.4mmの超薄肉形状の箱型筐体が成形可能であった。

研究成果の概要（英文）：Semi-solid casting of AC4CH aluminum alloy (hereinafter, SS) was used for this research. Furthermore, ultrafine-grained metal (hereinafter, SS-ECAP) was fabricated by Equal-Channel Angular Pressing using SS material. Formability of these test materials was evaluated by an impact molding method to form thin-walled housing. This method is how to give impact load to the light weight metal of bulk at high speed, and extrude to backward from narrow clearance by high pressure. As a result, AC4CH aluminum alloy modified by semi-solid casting and ECAP processing achieve the improvement in not only the mechanical property but also the workability in impact process. Although it is known that the impact extrusion process can be performed stably to produce the thickness larger than 0.7 mm, a housing having super-thin walled square cross-section with 0.4 mm in thickness can be formed from SS-ECAP material.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：塑性加工，半凝固軽合金，ECAP 微細加工，後方高速押出成形，インパクト成形，電池用筐体，薄肉軽量化，加工硬化

## 1. 研究開始当初の背景

半凝固鋳造技術とは、溶湯を機械攪拌しながら冷却し、球状化した固体と液体が共存した状態で型に流し込み成型する方法で、溶湯金属から成型した場合に比べ、伸びや疲労強度などの特性が向上する。しかし、過去の研究から大きな強度向上は望めず、実用化された製品は少ない。一方、高強度化の方法として、アルミニウム合金（Al合金）を含め、多様な合金においてバルク状の微細粒組織を有する素材作製に、強歪みを与えることで結晶粒を微細化させる ECAP 法（Equal-

Channel Angular Pressing）が有効であることが報告されている。そこで、半凝固組織を有する材料に ECAP 加工を施すことにより、更なる靱性と強度の向上が期待できる。しかしながら、ECAP 法は 1980 年代に研究が開始され以来、未だに実用化されていない。その原因として、ECAP 法は複数回の繰返し加工による強せん断作用によって結晶粒が微細化され初めてその効果を発揮するが、加工方法に幾つかの問題がある。例えば加工の度に金型を一度解体して試料を取り出し、再び組み立てた後に試料を挿入する必要がある

等、加工効率の悪さ、加工条件のコントロールの難しさなどの問題が挙げられる。この問題を解決するために、金型の解体・組立作業を伴わずに連続で ECAP 加工を行う回転式 ECAP 法が 2000 年になり開発されたが、この方法では、加工ルートに制限があり、結晶粒微細化に最適とされているルート BC 法をすることができない。そこで、我々は加工の度に金型の解体・組立および試料の取出し・再挿入の作業を必要とせず、どのような加工ルートでも連続押し出しが可能な、新たな ECAP 法を開発した。まずは、連続押し出しに必須となる屈曲角度 90°の通路形状が押し出し時の負荷や機械的特性へ及ぼす影響を調べ、機械的特性には大きな影響を及ぼさないことを明らかにした上で、独自に設計した金型を使用し連続 ECAP 加工を実践した(図 1 参照)。その結果、結晶粒微細化に最も有効なルート BC 法により試料を金型から取り出すことなく 8Pass 以上の連続押し出しを行うことが可能となり、実用化の最大の課題である押し出しの連続化を実現し、ECAP 加工の加工効率を向上させることができた。連続方式の ECAP 加工法を確立した上で、半凝固鋳造材に特有の伸びを受け持つ初晶と高強度の共晶を同時に ECAP 加工により微細化することで高強度でありかつ高靱性なオリジナルな軽合金 SS-ECAP 材を開発した(図 2 参照)。

次に、このように創生した SS-ECAP 材の加工性について検討した。近年、環境問題の影響からハイブリッド自動車に代表されるように蓄電技術の向上が注目されている。有効な技術として日本発の Li イオン電池の開発が盛んに行われている。Li イオン電池には箱型の筐体が必要であり、一般に薄肉筐体の製造には深絞り加工が用いられている。しかしながら、深絞り加工では、高強度材料になればなるほど難加工となり複数回の加工が必要となることで高コストとなる。一方、インパクト成形と呼ばれる後方高速押し出し加工では、金属スラグ材(塊状)に高速でパンチを衝突させ狭い隙間から高压で金属スラグを塑性変形させ押し出す加工方法で、1 工程で薄肉の成形が可能であり、高生産性、型費は比較的安価など深絞り加工と比べてかなり優位である。しかし、通常伸びが確保される純度 99%以上の純アルミニウム A1000 系が多く用いられ、インパクト成形に適用可能な金属スラグ材材料は限られており、現状ではインパクト成形による薄肉で高強度の筐体成形は困難である。上述したように、SS-ECAP 材は、高強度深絞り箱型筐体用として近年使用され始めた Mn 添加の A3003 と比較しても同等の伸びを持ち、引張強度も高い。そこで、高強度でありながら伸び特性も向上した SS-ECAP 材にインパクト成形することを試みた。

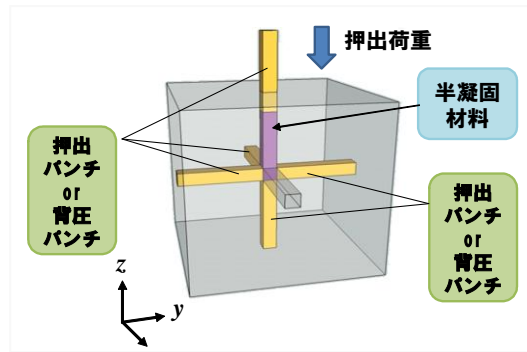


図 1 開発した 6 軸連続 ECAP 超微細加工法の金型概要図 (他の経路を一時的に塞ぐことで、-z 方向から x 方向に押し出せる)

## 2. 研究の目的

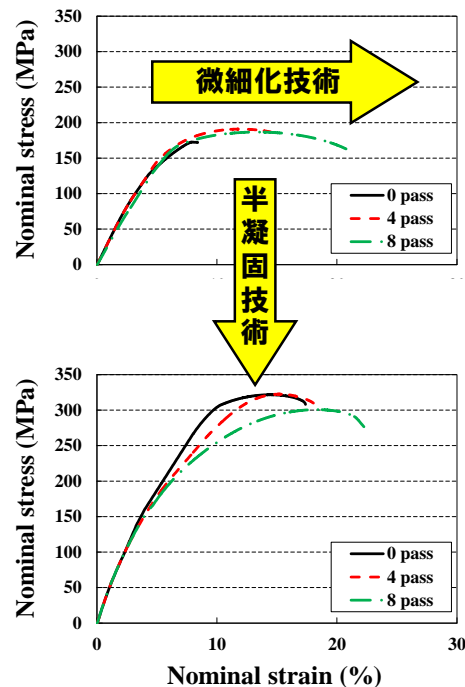


図 2 半凝固鋳造と ECAP 加工の効果

本研究では、高強度でありながら高靱性でもある SS-ECAP 材の塑性加工特性(塑性流動性)を評価することを目的に、鋳造材料である AC4CH 材、AC4CH 合金の半凝固鋳造材である SS 材、さらに SS 材を ECAP 微細加工した SS-ECAP 材を供試材としてインパクト成形を実施した。さらに現在 Li イオン電池筐体として深絞り加工によって成形され使用されている A3003 材も比較のためにインパクト成形した。

## 3. 研究の方法

まずは、比較的成形が容易な薄肉円筒型

管体の成形実験を行った。成形性の評価方法として、各材料における成形品の成形状態を観察し、成形品から切り出した試験片を用いて機械的特性の評価を行った。引き続き、実際の Li イオン電池管体は矩形箱型のため、成形はかなり困難になるが縦横比が 1:8 であるインパクト成形用の金型を使用して薄肉矩形管体の成形を行った (図 3 参照)。試作した金型および成形品外観写真を図 4、5 に示す。上述したように、半凝固鑄造および ECAP 微細加工を施した SS-ECAP 材を含めて AC4CH 材 3 種類および A3003 材の合計 4 種類の試料をインパクト成形した。高速押出を実現するためにサーボプレス機 (コマツ製 HIF200) を使用した。成形条件として、温度は常温、パンチ速度は 375mm/s を標準として変化させた。また、潤滑剤にはステアリン酸亜鉛を使用した。成形品の肉厚については、通常のインパクト成形では 0.7mm 程度の肉厚が限界とされているところを 0.5mm から 0.4mm と薄肉化について検討した。

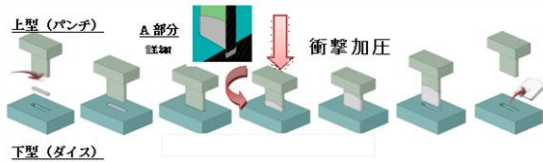


図 3 矩形箱型インパクト成形模式図

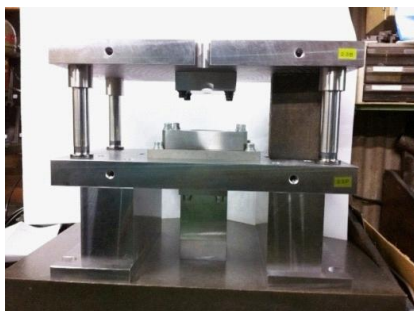


図 4 試作したインパクト成形用金型

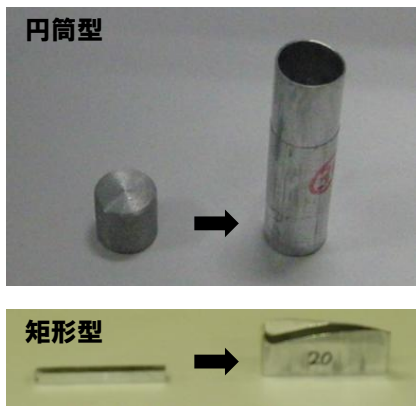


図 5 円筒および矩形形状サンプル

#### 4. 研究成果

図 6 には、各種供試材における高速押出し時のパンチの押出荷重と成形後の硬さの関係を示す。図より、インパクト成形前の硬さは強度に比例しているが、ECAP 法を施した材料は事前に十分なひずみ加えられているためインパクト成形後の硬度上昇率は低下した。一方、SS 材は成形時に最も大きな押出荷重を必要とするが、8pass の ECAP 法を施した場合、A3003 に近い押出負荷および成形品 (成形後) 硬度となった。このようなインパクト成形時の押出荷重が二相の超微細組織化により低下する原因は明らかではない。また、この傾向は 0.5mm、0.4mm 共に同様であった。そして、成形品肉厚を薄くすることにより、インパクト時 (パンチの高速衝突時) の変形抵抗 (内圧) が上昇し、最大押出し荷重が上昇する。このように、インパクト成形は非常に高い静水圧下で高速変形により加工されており、この分野ではホプキンソンバー法や爆発成形など引張変形や張出変形下での研究を中心とするこれまでの高速変形挙動に関する研究があるが、変形抵抗が結晶粒の超微細化により低下するという報告例はない。したがって高圧力下での高速変形では、従来の知見にない粗粒材とは異なった変形機構が作動している可能性がある。

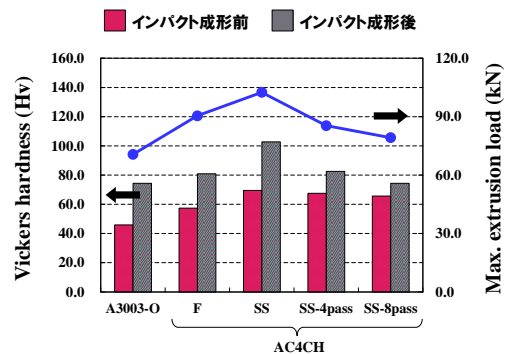


図 6 0.5mm 肉厚のインパクト押出し荷重と成形前後のビッカース硬度

次に、成形品の機械的特性を確認するために、矩形成品サンプルから押出し方向に直角にダンベル型試験片を放電加工機により切り出し、静的引張り試験を実施した。インパクト成形前後で典型的に異なる A3003 と SS-ECAP 材 (4Pass) を図 7 に取り上げた。A3003 の場合、引張強度は 100MPa→250MPa へと向上したが、伸びは 33%→5%へと大きく減少した。一方、SS-ECAP 材はインパクト成形前後での引張強度は 290MPa と変化なく、伸びのみ 20%→7%へと減少することが分かった。すなわち、ECAP 加工の強せん断作用によって結晶粒が微細化された高強度化材料は、インパクト成形時の強せん断作用では既にほとんど加工硬化による変化はなく、伸びの低下は小さい。インパクト成形品の不良

の原因は現在のところ、①塑性流動で発生する速度場の差異による引張応力の発生が引張強度を超えた場合、あるいは②加工硬化による伸びの低下により破断ひずみ以上の伸びが生じた場合と考えられる。そのため、①②の条件に対して、SS-ECAP 材は A3003 材に比べて優位であったと考えられるため 0.4mm 肉厚という非常に薄い矩形箱型形状であっても成形品の割れる頻度は小さく、AC4CH 材や SS 材に比べて成形品の成功率が高かったものと思われる。

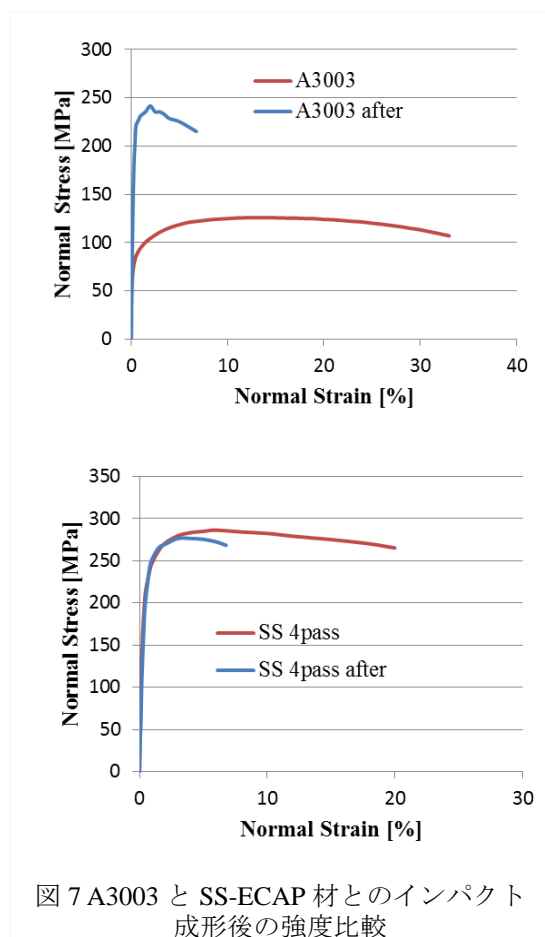


図 7 A3003 と SS-ECAP 材とのインパクト成形後の強度比較

以上のように、SS 材に ECAP 加工を施すことにより、より薄肉の条件の成形においても割れは発生せず、成形性は向上することがわかった。その要因として、インパクト加工時に生じる成形品の加工硬化による硬さの上昇が抑えられたことによって、伸びの低下も抑えられたからであると考えられる。通常のインパクト加工では困難とされていた硬度（強度）が高く、伸びの小さい材料であっても、金属組織中に初晶と共晶を分離し、それぞれを ECAP 加工法により微細化して、高硬度のままでも伸びを向上させることが出来れば、インパクト加工が可能で、さらには非常に薄肉の筐体成形品が成形可能なことを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

[1] “Effect of mesostructure on strain rate dependent behavior in high strength steel sheets”, K. Natori, R. Kishi, H. Shimahara, Y. Arao, T. Tanaka, High Performance and Optimum Design Structure and Materials VII, 2014 (掲載ページ未定)

[2] “Development of the continuous process method for ECAP using a tri-axis rotary die and microstructural evolution of semi-solid aluminum alloy”, K. Natori, F. Nomura, Y. Arao, T. Tanaka, High Performance Structures and Materials VI, WIT Transaction on the Built Environment, Vol. 124, pp. 107-117, 2012

〔学会発表〕(計 4 件)

[1] “軽金属材料による超薄肉箱成形の研究”, 野尻竜男, 荒尾与史彦, 田中達也, 名取恵子, 平成 25 年度 第 64 回 塑性加工連合講演会, 2013

[2] “Effect of mesostructure on strain rate dependent behavior in high strength steel sheets”, K. Natori, T. Tanaka, 7th International Symposium of the UCSD-Doshisha Medical Imaging Research Center, 2013

[3] “半凝固軽金属微細化材料による超薄肉箱成形の研究”, 矢島知晃, 荒尾与史彦, 田中達也, 平成 24 年度 第 43 回 塑性加工春季講演会, 2012

[4] “Forming of housing by impact extrusion press using ultrafine-grained semi-solid light metal”, K. Natori, T. Yashima, Y. Arao, T. Tanaka, The 7th Australasian Congress on Applied mechanics, 2012

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況（計1件）

名称：高靱性軽合金材料及びその製造方法  
発明者：田中 達也、鈴木 毅、松葉 卓也  
権利者：同志社大学  
種類：特許  
番号：5202038  
取得年月日：平成25年2月22日  
国内外の別：国内

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中達也 (TANAKA, Tatsuya)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号：70434678

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：