

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「インパクト成形によるアルミ合金製大型矩形電池ケースの量産化技術開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 一般財団法人大阪科学技術センター

目 次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	3
1-4	当該研究開発の連絡窓口	3
第2章	インパクト成形によるアルミ合金材加工の確立と量産化技術開発	4
2-1	塑性変形による材料流動についての基礎検討	4
2-2	塑性変形による材料流動の均一化技術開発	7
2-3	量産化技術の基礎検討	9
第3章	インパクト成形加工に適したアルミ合金材料（スラグ）の開発	12
3-1	合金組成とスラグの作製	12
3-2	工業規模設備での試験スラグの作製・提供	13
3-3	合成添加元素の影響調査	14
3-4	アルミ合金材料における添加金属元素の影響解析	17
3-5	まとめ	19
第4章	インパクト成形加工時における、塑性流動解析技術の確立	20
4-1	矩形スラグによる成形品の形状把握	20
4-2	成形品の変形状態の把握	21
4-3	合金成分がケース作製に与える影響の把握	24
4-4	シミュレーション結果	30
4-5	高温スラグによるインパクト成形実験	32
4-6	まとめ	35
第5章	全体総括	36

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

高品質・多仕様を要する自動車、住宅等向けの二次電池用容器には、大容量化・大型化・軽量化・高強度化・形状安定・角型化・迅速供給・低価格という厳しい市場要求がある。

本研究開発では係るニーズに適応可能かつ設備変更の自由度が高い矩形電池ケースインパクト成形工法の実用化を目指す。工法実用化には、応力歪特性及び適正アルミ組成等の諸元明確化の課題があり、これらの解明を行い合金組成諸元確保と量産化技術を確立する。

上記の厳しい要求仕様を満たす高強度アルミ合金材のインパクトプレス工法について、3000番系の組成成分の種別・含有率と、プレス成形機構（金型及びプレス動作等）特性並びに成形中の型温度・アルミ材温度・材料変形速度等の各パラメーターを適正に制御すれば安定した量産システムが得られると思われる。

本事業では、以下の目標に向かって研究開発を進めた。

①インパクト成形によるアルミ合金材加工の確立と量産化技術開発

矩形比最大1：6の製品形状に対し、インパクト成形加工用アルミ合金に対するパンチ・ダイス形状・加工動作・加工温度の最適化を図り、システムに必要な潤滑剤特性諸元を明確化して、下記項目を推進する。

○成形品端面カット後の開口部寸法の下記ユーザー要求仕様（現状のユーザー要求値）の達成

長さ寸法公差 $\pm 0.1\text{mm}$ 、幅寸法公差 $\pm 0.5\text{mm}$

○事業終了時に、ユーザーへの信頼性テストサンプルの提供

○上記信頼性テスト合格時の量産設備の検討着手

②インパクト成形加工に適したアルミ合金材料（スラグ）の開発

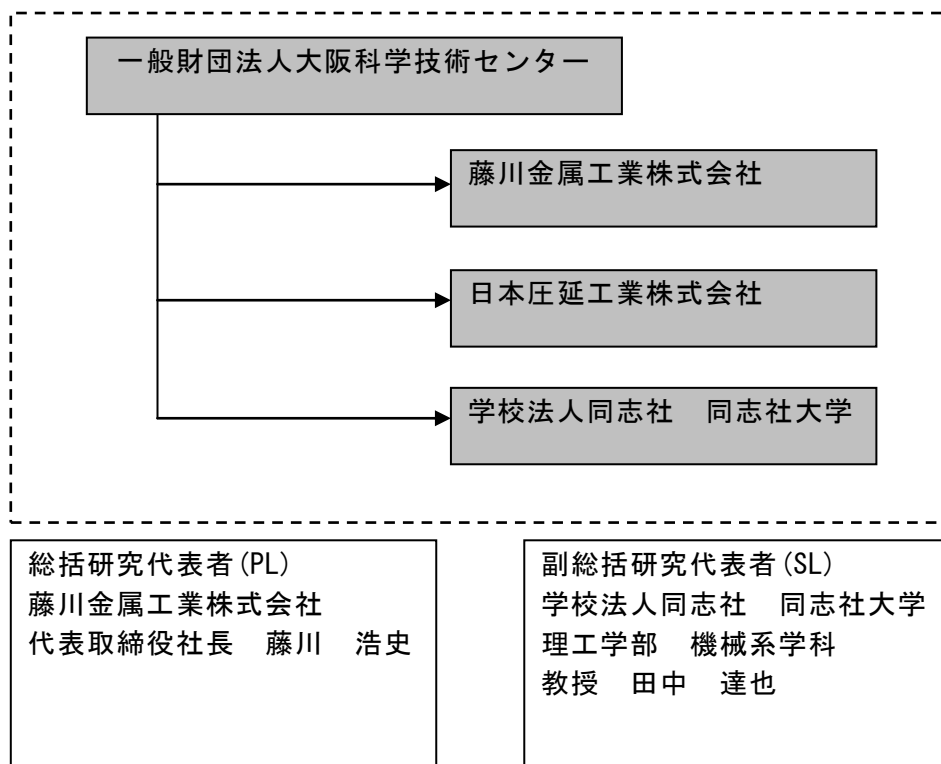
インパクト成形加工前はHV30前後で、成形加工後はHV50以上になる高強度アルミ合金を、3000番系の組成を基準にして、新組成のアルミ合金スラグ材を開発する。

③インパクト成形加工時における塑性流動解析技術の開発

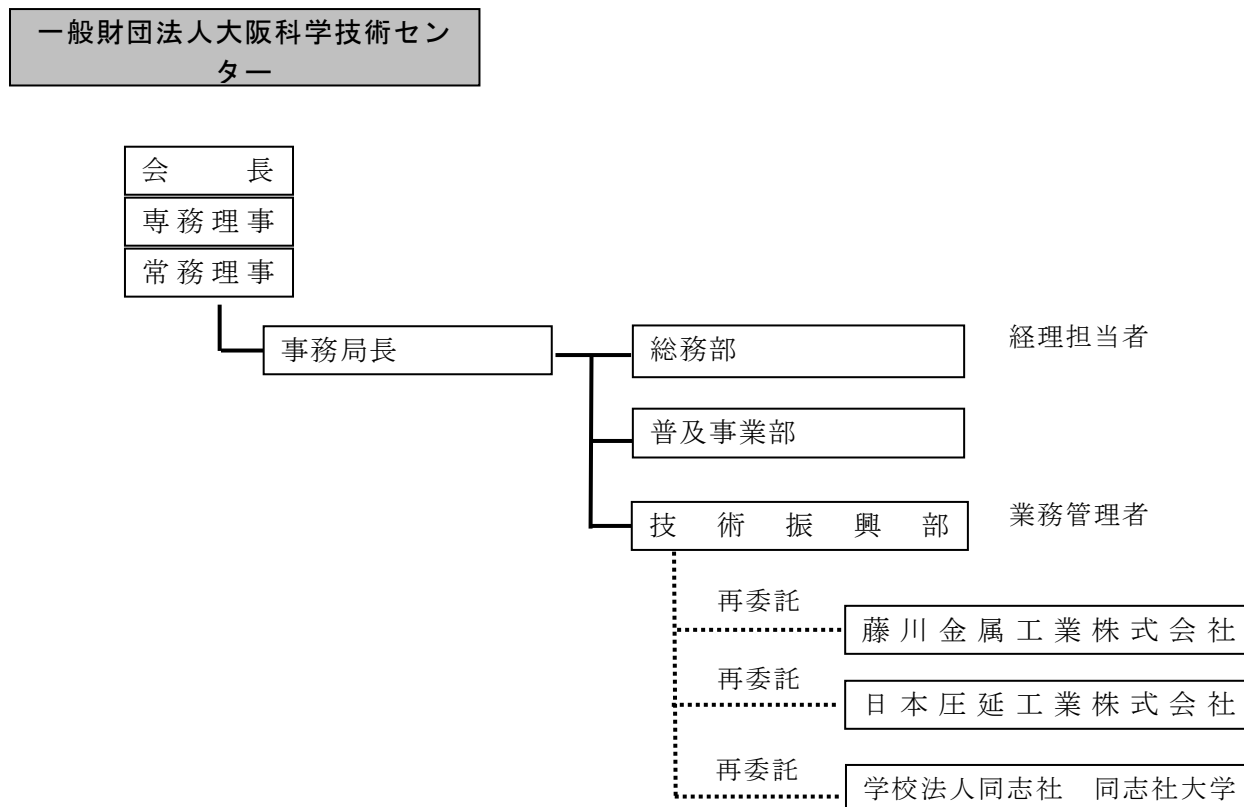
実験的アプローチに加え、理論解析をベースとしたシミュレーション手法を駆使して、大変形中の材料流動特性・製品品質に係わる潤滑剤効果・プレス時発生する熱機構等を明確化して、金型設計を含むインパクト加工システムの安定構築に資する理論的諸元を収集する。

1 - 2 研究体制

(1) 研究組織



① 事業管理機関



1-3 成果概要

1-3-1 インパクト成形によるアルミ合金材加工の確立と量産化技術開発

矩形成形品は、中央部と端部で材料の供給範囲が違い、中央部の供給過多、端部の供給不足の影響で、加工途中に長辺側側面に引張ひずみ(応力)が発生していると推測される。

インパクト成形時に使用する潤滑剤の潤滑能が良好であれば、成形荷重が低下するとともに、成形品の長辺中央部と短辺部との差が小さくなることが確認された。このことは、シミュレーション計算の結果とよく一致する。ただ、加工条件が厳しくなると、潤滑剤の効果は低下する。

成形品の形状をそろえ、同時にばり取りと面取り作業を行う切削機を導入したが、良好な性能を示し、安定した生産が可能となった。

1-3-2 インパクト加工に適した合金材料(スラグ)の開発

強加工で成形性を確保するためには、材料組織の微細均一が必要である。そのためには鋳造時の冷却速度を速くすることも有効な方法であることが確認できた。またTiやZrの結晶微細化に有効な金属の最適も重要であった。

材料の強度と加工性を確保するためにアルミに添加する金属元素をアルミ中に固溶することも重要で、加工時の割れの起点になる添加金属元素の量と形態を制御することが重要であることも確認出来た。

CC材は、DC材比べ冷却速度が速いために結晶粒がかなり細かい。特に板表面の近傍が微細な結晶粒である。DC材は、板表面近傍は微細組織が少し認められるが、板中央部を含めた大半部分は、圧延組織である。

EPMAマッピング組織の調査の結果、インパクト加工では、晶出物が割れの起点になるので、微細均一に分散させることが必要であることが判明した。

1-3-3 インパクト成形加工における、塑性流動解析技術の確立

インパクト成形加工時に材料が均一に持ち上がっていないことが、割れや凹みに影響していると考えられる。

インパクト成形時の材料流動について、スラグへのマーキングや高速度カメラでの撮影結果の解析を行った結果、場所による材料の変形速度の差によって、長辺中央部に左右方向の引張応力が発生していると考えられる。

重回帰分析により、材料成分、特性とインパクト成形時の割れ発生の関係について解析し、有効な知見が得られた。

シミュレーション解析により、インパクト成形時の潤滑剤の効果、パンチ形状の影響を把握した。

高温スラグのインパクト実験を行い、その有用性と問題点を確認できた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号

一般財団法人大阪科学技術センター

技術振興部 TEL: 06-6443-5322 FAX: 06-6443-5319

脇坂 啓司 Email: wakisaka@ostec.or.jp

石田 倫也 Email: ishida@ostec.or.jp

第2章 インパクト成形によるアルミ合金材加工の確立と量産化技術開発

2-1 塑性変形による材料流動についての基礎検討

2-1-1 対象材料、ワークの選定

材料 インパクト加工で実績の大きい A1070、電池ケースとして現在市場にて使用されている A3003 の二種類を選択したが、A1070 はインパクト成形時にすぐに割れが発生したため、A3003 材について実験を行った。

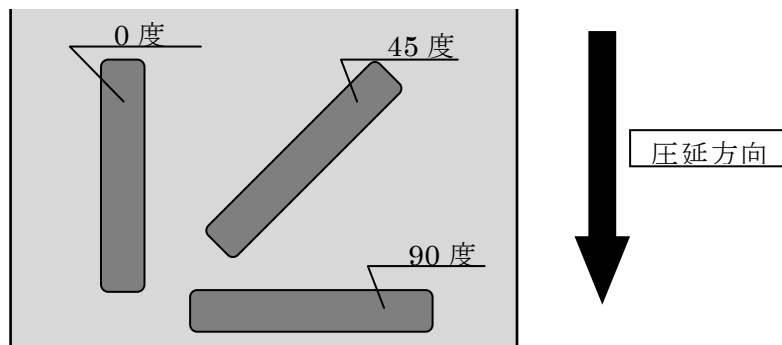
寸法 矩形製品の開発が主目的であるため、実際の市場で要求のある矩形電池ケースの諸元の調査を行った結果を表 2-1-1 にまとめる。今後下記を基本として研究開発を進める。

(表 2-1-1) 矩形電池ケースの諸元 (mm)

アスペクト比	縦	横	高さ	長辺板厚	短辺板厚	底厚
1 : 6	155	25	94.5	0.8	1.0	2
1 : 8	111.1	14.7	61	1	1.1	1

2-1-2 スラグ打抜き方法の確認

圧延方向に対して平行に打ち抜いたスラグを基準にして 0 度、90 度、45 度とし、インパクト加工性を確認した。(図 2-1-1 参照)。



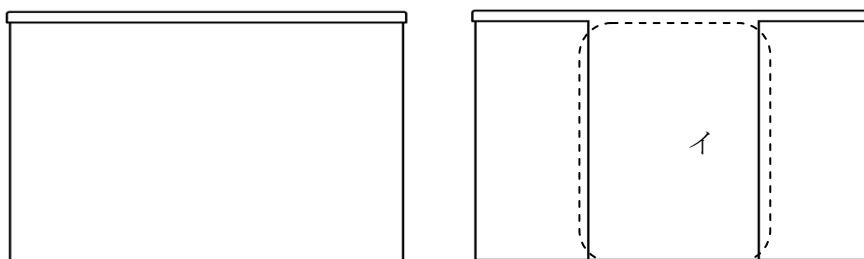
(図 2-1-1) スラグ打抜き方向の概略図

2-1-3 金型形状による流動特性の把握

2-1-1 に記載の市場にて検討されているアスペクト比 1 : 6、1 : 8 に対し金型を作製した。

2-1-3-1 アスペクト比 1 : 6 の実験結果

アスペクト比 1 : 6 に対し 2 種類のパンチ、ダイス (A タイプ、B タイプ) を用意した。A タイプは標準的な考え方に基づき製作したのに対し、B タイプはインパクト加工中の材料の流れに対し、パンチの構造の影響の有無を確認するため、加工時上昇する材料に抵抗を与える部位イをもうけた。



A タイプ

B タイプ

(図 2-1-2) パンチ形状

A タイプパンチによる流動特性確認結果

2-1-2 項の打抜き方向の影響(素材と矩形スラグの抜き方向)についても検証するため、圧延方向に対し 0 度、90 度、45 度の 3 方向で抜かれたスラグを用意し、材質 A3003 について検証を行う事とした。

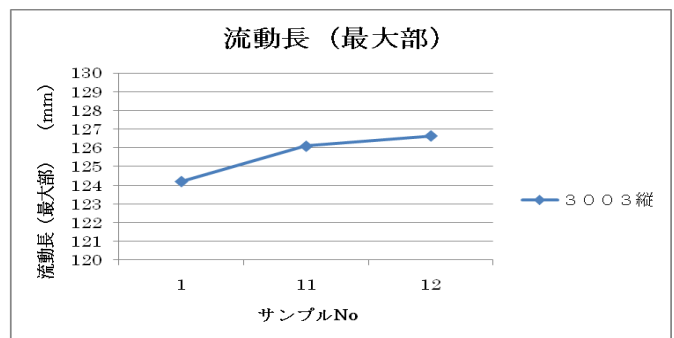
(表 2-1-2) A3003 材スラグでの検証結果

材料	抜き方向	成形順序	処置・対応	加工数	ワレ個数	金型焼付
A3003	0 度	1 回目	—	15	0	1
		2 回目	—	1	1	—
		3 回目	金型洗浄	1	0	—
	90 度	1 回目	—	8	1	—
		2 回目	—	5	1	—
		3 回目	—	1	1	—
		4 回目	金型洗浄	1	1	—
	45 度	1 回目	—	1	1	—
		2 回目	金型洗浄	1	1	—
		3 回目	金型洗浄	1	1	—

A3003 では連続的に加工可能であったが、パンチに焼付が発生した。

0 度ではワレ発生後金型（ダイス）を洗浄することによりワレの発生が改善したが 90 度、45 度では改善が認められなかった。

加工後の成形品形状と流動長推移を下に示す。流動長は作業の経過と共に伸びている。

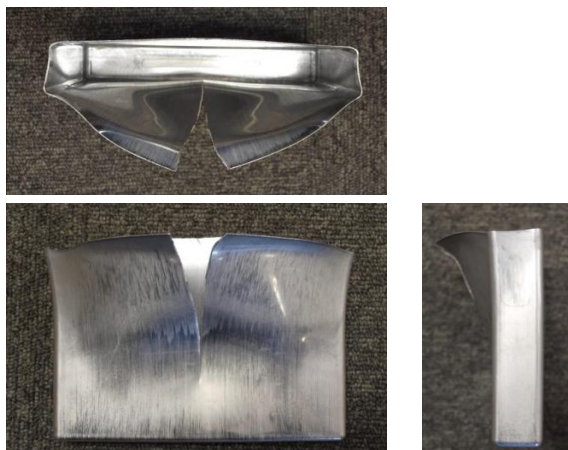


流動長推移 (推移は n 数の多い A3003-0 度のみ)

(図 2-1-3) 加工後の成形品形状と流動長推移

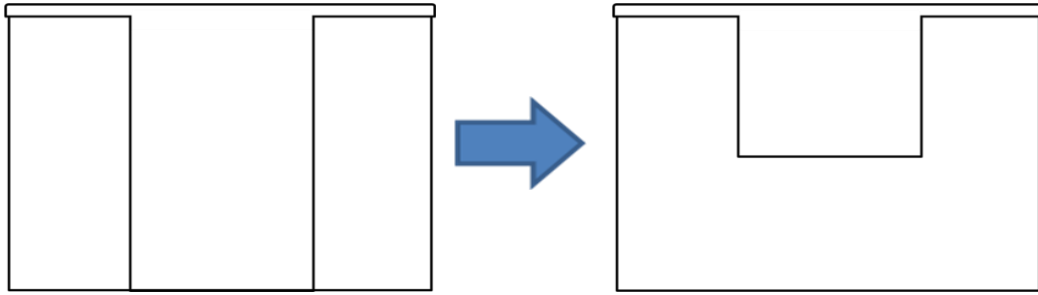
B タイプパンチによる流動特性確認結果

ワレが発生した。これにより、パンチの構造が材料の流れに影響すると判断する。



(図 2-1-4) B タイプ流動特性
確認結果

但し、標準のパンチに対し、相違が大きいと思われるため、マシニングセンターによる改造を下図のように施し、再トライを行ったが、現象に変化はなく、ワレが発生した。



(図 2-1-5) 金型の改造内容

改造：影響を及ぼす部位イの面積を半分（50%）にする。

影響の範囲及び度合いを考慮しパンチ形状も含め、今後検討の必要性があると考える。

金型による製品カットの検証

トリミングダイセット型を製作し、製品カットを行い、カット後の製品形状の変化を観察すると、カット後変形が生じた。

これは、高速カッターでも同じ現象が生じていたため、カットにより、拘束されていた歪が解放されたためと判断する。



(図 2-1-6) 製品カット結果

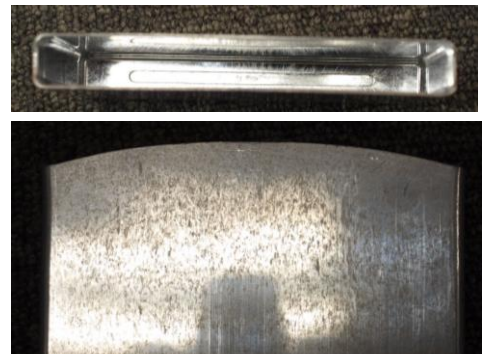
2-1-3-2 アスペクト比 1:8 の実験結果

アスペクト比 1:8 用パンチ、ダイスを用意しトライを行った。スラグは 1:6 にて実績のあった A3003 (0 度) を選定した。

インパクト加工中のワレの発生はなく、長辺側の歪 (1:6 同様) は調整中に発生した。

負荷荷重の推移は一定であり、1:6 との著しい差は見られない。

アスペクト比 1:6 同様に長辺方向の収縮が確認された。但し、製品を観察してもすべり線の発生は確認されなかった。



(図 2-1-7) アスペクト比 1:8 の成形品形状

2-1-4 まとめ

- ① 矩形は、中央と端部では材料の供給しなければならない範囲が違い、中央部の供給過多、もしくは端部の供給不足の影響で、加工途中に長辺側側面に引張ひずみ（応力）が発生していると推測される。このため、この荷重に対し、耐力の低い A1070 はワレが発生するため、使用は困難である。
- ② 但し、1:6 のほうが 1:8 より顕著に現象が現れた。これは、材料の移動距離による歪の発生の大小に関わるものと推測される。
- ③ 圧延方向に対し、0 度、90 度、45 度の抜き方向で製作したスラグは、今回実績より 0 度方向スラグを使用すると決定した。但しその因果関係は明白でないため、研究を進めるうち必要性があれば、抜き方向の検討を再度行う事とする。
- ④ 流動長は加工の経過に伴い変化する。但し形状、材質に左右される現象ではない。

2-2 塑性変形による材料流動の均一化技術開発

インパクト加工において、材料流動に影響を与えるファクターの一つは金型である。

特にインパクト加工は、材料がパンチに沿いながら塑性変形する特性がある。

現在、成形後の長辺側面にヒズミが発生しており、この現象が製品化の大きな妨げとなっている。

ヒズミ解消のため、マーカにて模様を付けたスラグをインパクト加工し、高速度カメラ画像及び、模様の状態から材料の移動を考え、それに対応するパンチ形状を考案し、トライを行った。また、アスペクト比の変化による影響を確認するため、比率を減少させ、1:3にて加工し、出来栄の変化を確認した。

2-2-1 ワーク及び高速度カメラ映像の確認と現象の把握及び対策立案

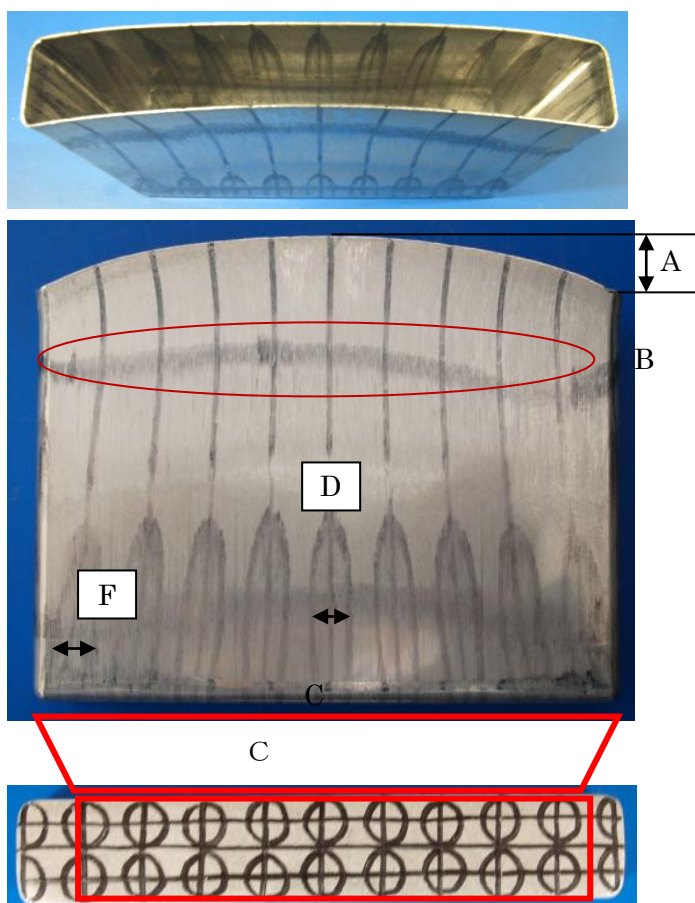


図 2-2-1

ワークを観察し、材料の流れを考えたところ、長辺側面中央と両端に、図 2-2-1 A の差がある。

成形過程において、図 2-2-1 B 部の収束が発生している。

底面の模様の変化をみると、図 2-2-1 C 部にて長辺側壁を形成し、残り両端部にて短辺側壁を形成している。

また、円の変形状態を見ると、中心 D と、両端 F では水平方向の広がりには顕著な差が表れている。

以上の事より、中心部は垂直方向に主に材料が移動し、両端部は垂直のみならず、水平にも材料が移動していると判断できる。

次に、高速度カメラの映像を見ると、中央部が先にダイス上面より現れ（図 2-2-2）、既に中央と両端に差が発生している事が確認でき、更に加工が進むにつれて中央部がせり上がってくる（図 2-2-3）事が確認された。

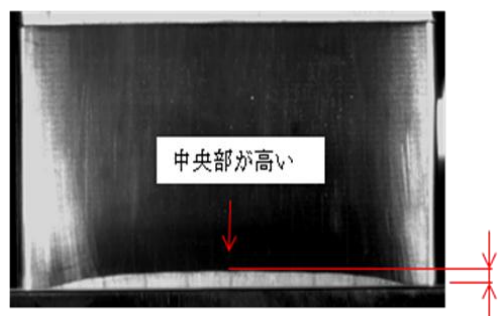


図 2-2-2

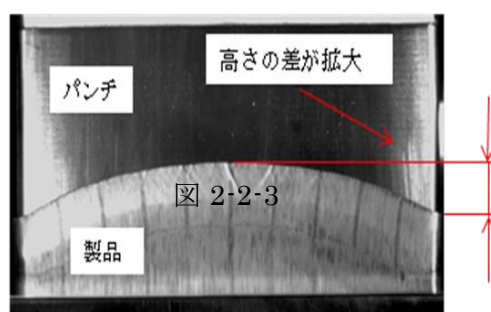
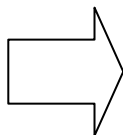
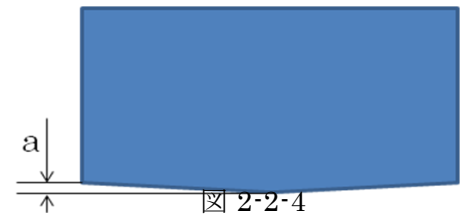


図 2-2-3

これらの現象から、材料を中心から押し出し、両端へ材料の供給を行う、もしくは中央部の材料の流れを規制する事で高さの差が縮まり、且つ側面中央部のヒズミも解消すると考え、パンチの形状を2種類考案し、製作した。

パンチ略図 2-2-4 は両端部への材料供給を目的とし、中心と端部に a の高低差を付けることで、ダイス底面に対し端部の開口面積が増え中心材料を端へ押し出す事を目的としたものである。

パンチ略図 2-2-5 は中心部 b と両端部 c のコーナー r の大きさに変化をつけたもので、中心部 b の r を両端部 c より小さくする事で中心部長辺側への材料の流れを抑え、中心部の伸びを制御する事を目的としたものである。



2-2-2 インパクト加工トライ及び結果

パンチ図 2-2-4、2-2-5 の 2 種類を製作し、インパクト加工トライを実施した結果、いずれも成形出来ず (図 2-2-6)、パンチ形状の微調整が必要となった。微調整を行うにあたり、トリアンドエラーを続けるよりも第 4 章にて進めている「塑性流動解析」の結果及び今後の進展を踏まえて検討していく事で、より精度の高い開発が見込める。



図 2-2-6

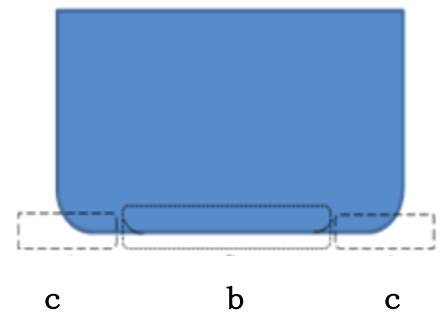


図 2-2-5

2-2-3 1:3 矩形インパクト成形実験

1:6 矩形ケースに対し、アスペクト比 1:3 に減少した場合の出来栄を確認し、変化点より今後の展開を考えるため加工トライを実施した。

寸法は製品断面積 (パンチとダイスのクリアランス) を統一することで比較対象となるよう考え、133×44 とした。

尚、底 R は条件を揃えるため、1:6 と同様とした。

2-2-4 インパクト加工トライ及び結果

予定寸法に対し、長辺側面 A 部 (図 2-2-7) の収縮が確認された。この収縮は、1:6 の時にも確認されている。

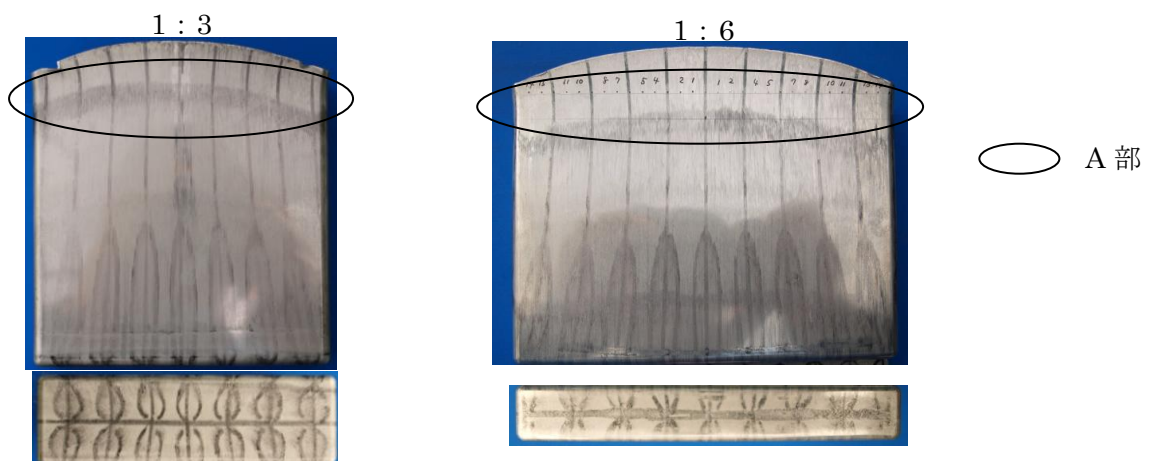


図 2-2-7

1:3、1:6 いずれも収縮傾向にあり、A 部くびれ付近の値が小さく、差異は認められなかったが、加工中の材料移動等、細かな解析の必要性が生じたため引き続きの研究が必要である。

2-2-5 まとめ、課題

パンチの形状変更によるトライにおいて、ワレが発生しているため、パンチ形状の微調整が必要となった、また、アスペクト比の影響を見るために行った、1:3 矩形インパクト成形では、顕著な差異を発見するに至っていない。

引き続き、1:6 では金型（パンチ）の微調整のための解析及び修正、1:3 では現象の解析が必要であるが、「塑性変形による材料の均一化」を進めるにあたって、今回まで行っていた現象の観察による対応では、トライアンドエラーにたより、ビジブルな現象に囚われ、本質を見逃してしまう可能性が生じる。

一方、第4章「インパクト成形加工時における、塑性流動解析技術の確立」において加工のみならず、材料も含め、その加工性及び塑性変形の過程の解析を行っており、「塑性変形による材料の均一化」を進めるのに有効なデータが出ている。

その解析技術から出てくるデータを利用し、より精度の高い研究を進める事で開発を完遂する。

2-3 量産化技術の基礎検討

2-3-1 インパクト加工実験による、潤滑剤の効果の確認

現在、製品化の大きな妨げとなっている、中央部のヒズミに対し金型形状でのアプローチを主として考えてきたが、平成23年度の「動摩擦係数の違いによる押出先端部の変化」図2-3-1より、動摩擦係数を低減する事により、均一な伸びを得られるというシミュレーション結果を踏ま

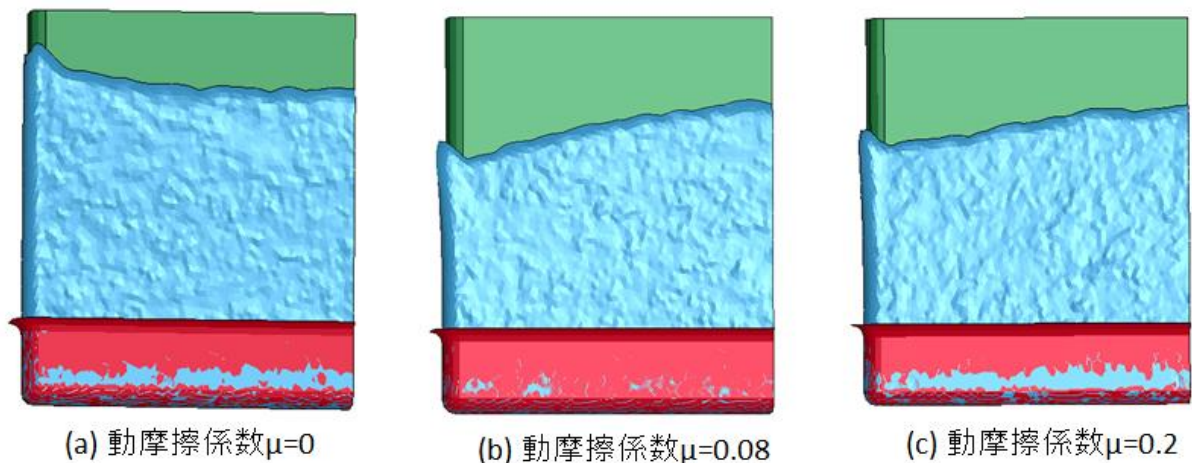


図 2-3-1 動摩擦係数の違いによる押出先端部の変化

えると、金型形状の変化により摩擦を与え材料の流れを制御するのは、摩擦を増す方向となり、塑性変形の均一化に対し、その有効性に疑問が生じた。

そのため、摩擦を軽減する事で、塑性変形の均一化を図る事に主眼を置いてはどうかと考え、その手段としての潤滑剤に着目し、摩擦の軽減が与える変化を観察した。

平成23年度導入した、潤滑剤塗布装置（図2-3-2）は予熱槽、塗布乾燥槽の2槽式にて治具を使用し、一度に5個のスラグに潤滑剤を塗布できる。この装置を使い、液体潤滑剤の塗布を行う。

潤滑剤の成分構成は潤滑剤メーカーと相談し、主な仕様を2種類と決め、液体潤滑剤A、Bと称し、構成成分の種類及び配合比率を変え、都度確認インパクト加工実験を行い、その変化を観察した。

潤滑剤確認インパクト加工サンプルのアスペクト比は1:5（135×27）とした。

これは、潤滑剤メーカーでの実績を踏まえ、研究の進捗がよりスムーズに進むよう配慮したためである。



図 2-3-2

矩形比 1 : 5 のインパクト成形実験で、従来粉末潤滑剤と液体潤滑剤 A、B の比較を行った。潤滑効果の指標は負荷荷重とした、これは潤滑性能がよければ負荷荷重が下がるためである。実験の結果、従来 25000kN に対し 2300kN との結果を得たが、思ったほど顕著な差は現れないため、更に A,B 各々の成分配合を変えてトライを重ね、ダイスへの潤滑剤の残留具合及びパンチの焼付き度合いから判断して液体潤滑剤 B に絞り、添加物を加え（液体潤滑剤 B+ α ）矩形比 1 : 5 にて再トライした結果明らかに差が出た。この時の液体潤滑剤 B+ α の目安荷重は 2000kN である。

ワーク開口部の円弧が、従来粉末潤滑剤の形状口に比べ、（液体潤滑剤 B+ α ）のイは緩やかになった。これは、長辺方向の中央と両端の材料移動が均等に進んだ結果と思われる。

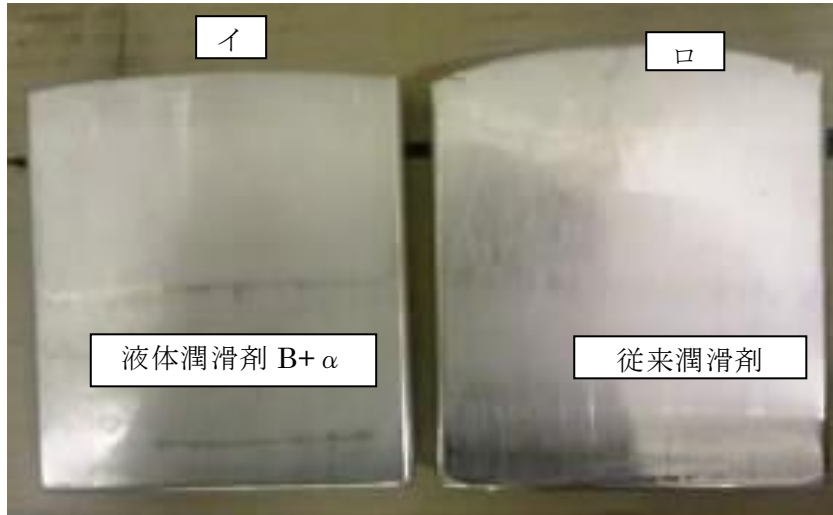


図 2-3-3

この結果より、更に厳しい加工条件である矩形比 1 : 6 にて液体潤滑剤（B+ α ）のトライを行い、従来粉末潤滑剤との比較のため、負荷荷重とワークの各部（2-3-4）の寸法測定を行う。

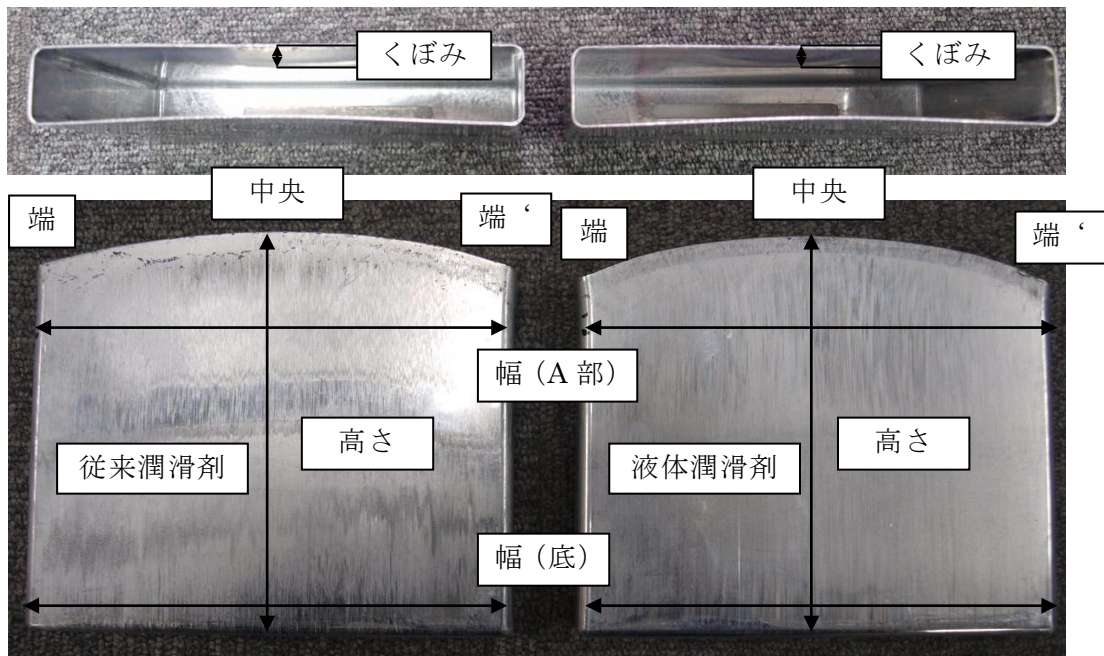


図 2-3-4

結果

荷重平均は $\Delta 105\text{kN}$ 、高さの差（中央-端平均） $\Delta 2.99\text{mm}$ 、側面中央部窪み深さ $\Delta 0.13$ 、幅寸法 A 部-底+001 となった。

潤滑効果が増すことで加工時の負荷荷重が下がり摩擦が軽減されたと判断できる。

その効果として、中央部と端の伸びの差が減少し、側面中央部のくぼみ量も軽減された、但し長辺寸法に差が現れず、また 1 : 5 程顕著に形状が改善されてはいない。

まとめ

摩擦抵抗が減少すれば、塑性変形に影響が出る事が実証された、この影響は、有効であると判断する。

潤滑剤の効果は、矩形比 1 : 5 では顕著な差として現れたが、更に厳しい加工条件の矩形比 1 : 6 では変化は見られるものの、期待したほどの効果は無かった。しかし潤滑剤塗布量、金型の摩擦抵抗の軽減対策等の条件設定により更なる改良が見込まれる。

今後は加工条件設定に取り組む。

2-3-2 加工熱制御技術開発

例外はあるが、矩形のインパクト加工は温間にて加工するのが望ましいと考えられる。

加工時に発生する熱は、この温間加工に有利であり、熱は上昇し続けるものではなく、金型を温めることで、恒温状態を維持する事は可能である。

温める方法は今後の課題となるが、熱間鍛造が可能であることを考えると、技術的に不可能ではないと思われる。詳細は、第4章を参照。

2-3-3 量産化技術開発の検討

平成23年度、簡易量産装置を導入し、潤滑剤塗布及びインパクト加工の自動化による生産の安定についての対応は行ったが、製品にするためのステップとして、インパクト成形後ワークの全長カットの問題が残されていた。

精度よく、安定し、バリ除去のための面取り作業まで含んだ工程を対象に研究を進めた。

また、現状のワークにはヒズミが生じており、矩形比 1 : 5 の潤滑剤による改善はみられたものの、矩形比 1 : 6 では十分な成果が得られていない。

2-3-3-1 専用切削機の導入

精度よく切断加工を行い、且つバリ除去及び面取り作業を自動化するため、専用切断機の開発に取り組んだ。

今回開発した専用切断機(図2-3-5)は、同時に2個のワークの切断作業が可能であり、切断後の面取り及びバリ除去工程まで一貫で行えるものである。

工程は切断、面取り、バリ取りとなっており、ヒズんだままのワークでも治具により矯正して取付可能となっている。

プログラムの変更でワークの寸法変更にも対応可能である。

この設備により、切断加工の懸念事項であったバリの除去が自動化され、安定した生産が可能となり、また仕様変更に対する対応力についても問題はなくなった。

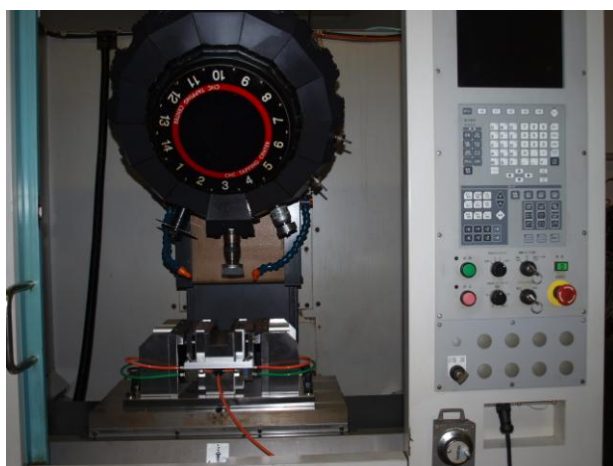


図 2-3-5

2-3-4 まとめ、課題

インパクト成形時に使用する潤滑剤の潤滑能が良好であれば、成形荷重が低下するとともに、成形品の長辺中央部と短辺部との高さの差が小さくなる事が確認された。このことは、シミュレーション

計算の結果とよく一致する。ただ、加工が厳しくなると、潤滑剤の効果は低下する。

成形品の形状をそろえ、同時にバリ取りと面取り作業を行う切削機を導入したが、良好な性能を示し、安定した生産が可能となった。

第3章 インパクト成形加工に適したアルミ合金材料（スラグ）の開発

3-1 合金組成とスラグの作製

インパクト成形用アルミ合金は、一工程で缶を成形する強加工法であり、加工硬化型（1000・3000・5000系）の中で1000・3000系が候補となる。

強度と延性のあるA3003合金をベースに、主要添加金属の種類（Si、Fe、Mn等）・量を変化させて、機械的性質を把握する。各種添加金属の目的と影響を表3-1-1に示す。

合金組成諸元の確立のため、サンプル作製は次の3方法で実施した。

- 1) 予備実験：合金種類の絞り込みのため、予備試験法(ブックモールド法)を実施。
 - 2) 小型DC(直接冷却)法連続鋳造・熱間圧延：予備試験結果から合金種を選定し実施。
 - 3) 連続鋳造直接圧延(CC法)の工業規模設備で、代表的組成を実施。
- 以上のうち、2)と3)のサンプルをインパクト試験用に提供した。

(表3-1-1) アルミ合金への各種添加金属の目的と影響

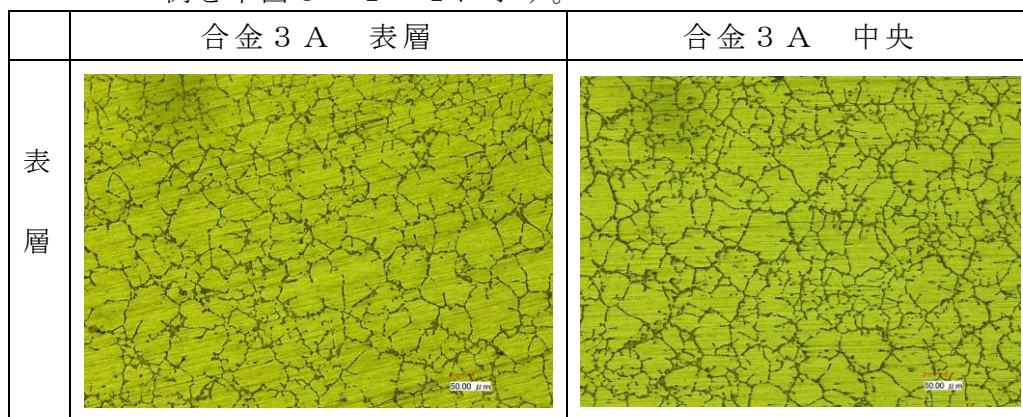
	元素	内 容
1	Mn	Mnが主要添加の合金は、加工硬化型の非熱処理合金で、1000系よりも高強度。Mn添加で、引張強さと延性の向上に有効である。多量添加は粗大晶出物が生成し、延性低下・表面欠陥となる。本プロジェクトでの連続鋳造直接圧延の場合は、急冷凝固でMnが固溶し易くなるため良好な加工性が期待できる。
2	Fe	Feは、Siと共に、代表的不純物元素である。固溶体として存在すれば、硬化に寄与する。固溶限が大変小さいため、大きい硬化元素としては期待できない。凝固時にFe ₃ Al等の脆い化合物を生成し易く、破壊亀裂の起点となる。
3	Si	Al-Mn-Si加合物としてAl-(Mn-Fe)-Siのように、Feを固溶した形になる
4	Cu	固溶度は大きく固溶体硬化する。多量添加すると難加工となる。
5	Mg	固溶度は大きく固溶体硬化する。多量添加すると難加工となる。
6	Ti等	Ti、Zrは、主に結晶粒微細化目的で添加される。これらの微細化化合物は機械特性を向上させる。

3-1-2 直接冷却連続鋳造(DC法)試験

インパクト試験に供する材料の各種合金を下記内容にて作製

- 1) 試験場所 福岡アルミ工業(株) (福岡県粕屋郡)
- 2) 試験概要 (1) 鋳造関係設備 : DC(Direct Chill)式連続鋳造機
 - ① 試験場所 : 福岡アルミ工業(株) (福岡県粕屋郡)
 - ② 炉・鋳造機・鋳型 : 600kg傾動炉・2500mm・W100xL310mm純銅製(2) 鋳造条件① 鋳造温度 ; 700~720℃ ② 鋳造速度 ; 100mm/分
 - ③ 冷却水量 : 通常 220ℓ/分

- 3) 鑄塊組織 全てのマクロ・ミクロ組織は、鑄塊の表層部・中央部とも微細で良好。一例を下図3-1-1に示す。



(図3-1-1)

- 4) 鑄造状況 下図に示す。

溶湯が鑄型に導かれている状況



(図3-1-2)

鑄造機ピットより取出した鑄塊



(図3-1-3)

- 5) 合金組成 3年間で実施した合金組成を表3-3-1に示す。尚、鑄造法の異なるCC材(連続鑄造直接圧延法)も合わせて示す。

3-1-3 熱間圧延

- 1) 試験場所：(株)コベルコ科研(兵庫県高砂市)
- 2) 工程：スラブ切断→均熱処理(590℃x10h)→熱延前加熱(460℃x>2h)→熱間圧延(84mmt→11mmt)→粗矯正→圧延板切断→熱処理(320℃x2h)→矯正→切断
- 3) 熱延状況：



(図3-1-4)

3-2 工業規模設備での試験スラグの作製・提供

合金・スラグ形状・抜き方向及び焼鈍条件別に、インパクト加工に与える影響を調査するための金型を製作し、スラグを製作しインパクト加工に提供した。

3-2-1 金型の製作

- 1) アスペクト比： 3 (スラグ形状：132.8 x 43.8 x t 7.2)
- 2) アスペクト比： 6 (スラグ形状：154.8 x 24.8 x t 11.0)

そのダイセットとダイスの例を 下図に示す。



(図3-2-1) ダイセット



(図3-2-2) ダイス

3-2-2 インパクト試験用スラグの提供

インパクト加工の予備試験用スラグとして、各条件のスラグを提供した。

- 1) 合金種： ①A1070 ② A3003
- 2) 形状： ① 矩形 (スラグ形状)： w24.8 x L154.8 x t11.0 (アスペクト比 6)
② 矩形 (スラグ形状)： w43.8 x L132.8 x t11.0 (アスペクト比 3)
③ 円形 (スラグ形状)： ϕ 69.5 x t11.0 (予備試験用)
- 3) 打抜き方向

铸造・圧延材は、加工方向によりその組織に方向性を有する。この異方性の加工への影響調査のため、上記矩形形状①のスラグを作製し、圧延方向に対して、0度・45度及び90度の3種を提供した。

インパクト結果への影響は、圧延方向による差は、殆ど認められなかった。

3-3 合金添加元素の影響調査

3-3-1 インパクト試験用スラグ合金の物性とインパクト試験

1) インパクト加工試験の成形性条件

- (1) プレス： 200 ton クランク式縦型駆動
- (2) 金型： スラグ形状； 154.8 mmL x 24.8 mmW x 11 mmT
- (3) 潤滑： ステアリン酸亜鉛

2) 3年間で実施した「合金組成ごとの機械的性質とインパクト試験結果」を次ページの表3-3-1に示す。

- (1) 組成： Si、Fe、Mg、Zrの組成を変化させて影響をみた。
- (2) 各合金の下記機械的性質を、測定した。

①引張強さ②耐力③降伏比④n値⑤伸び(全、一様、局部)⑥硬さ(Hv, HRL)

3) インパクト試験結果

- (1) 割れ率の高かった合金は、①2-A(高Fe) ②1-A(同左) ③2-B(高Mg高Fe) ④5-B(高Si)であった。

Si・Fe等の析出物が大きく・多くの場合、割れの起点になったと思われる。

- (2) CC材は、同組成のDC材1-A材に比較して 割れ率ゼロと良好であった。

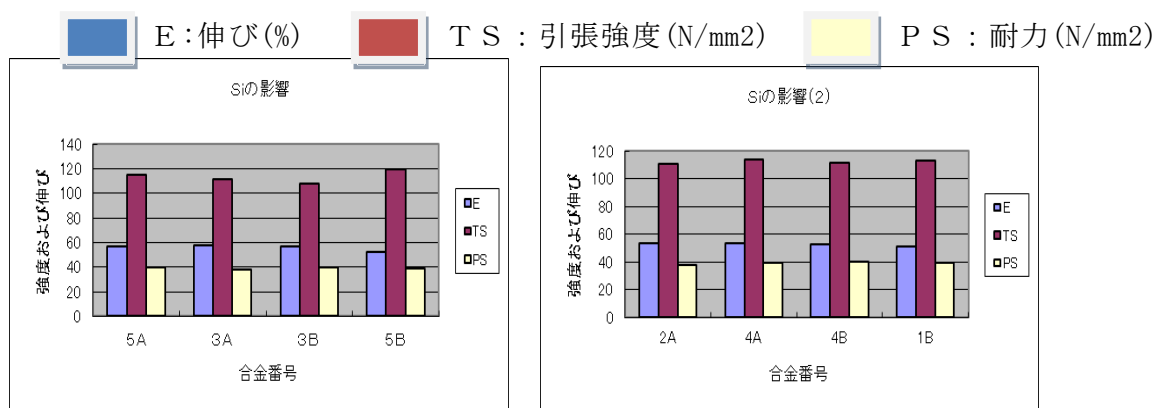
DC材とCC材の相違点は铸造法で、CC铸造法は、薄板铸造で冷却速度がかなり速いため、結晶粒度がかなり微細で また添加金属の固溶量が多いことが、加工性が良好であったと考えられる。

表 3-3-1		合金組成ごとの機械的性質とインパクト試験結果													
铸造ロット	CC	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	3-C	4-A	4-B	4-C	5-A	5-B	5-C	
組成 wt %	Si	0.06	0.03	0.50	0.03	0.03	0.19	0.39	0.41	0.20	0.42	0.42	0.10	0.60	0.60
	Fe	0.55	0.54	0.54	0.54	0.54	0.15	0.16	0.16	0.41	0.41	0.41	0.16	0.16	0.16
	Cu	0.10	0.13	0.13	0.13	0.13	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09
	Mn	1.10	1.16	1.39	1.37	1.37	1.43	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
	Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ti	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
	Zr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.04
	Al	98.14	98.11	97.41	97.90	97.29	98.10	97.91	97.79	97.83	97.61	97.51	98.20	97.70	97.66
引張強度	N/mm ²		107.0	113.3	111.0	155.1	111.0	107.9	109.5	113.6	111.8	113.3	115.3	119.1	118.5
耐力	N/mm ²		36.8	39.1	38.0	49.5	38.3	39.5	38.7	39.3	39.8	40.2	40.1	39.1	39.4
降伏値	%		34.4	34.5	34.2	31.90	34.5	36.60	35.3	34.6	35.6	35.5	38.4	32.8	33.2
n値	*100		35.0	31.0	34.0	35.00	31.9	30.50	30.5	31.9	31.2	31.2	32.4	31.8	31.6
伸び	%		54.2	51.2	53.6	36.80	57.5	57.00	56.8	53.3	52.8	53.1	56.6	52.1	52.7
一様伸び	%		37.5	38.3	40.9	25.90	46.7	46.70	47.7	43.3	42.0	43.0	47.9	41.7	43.9
局部伸び	%		16.7	13.0	12.7	10.9	10.8	10.3	9.1	10.0	9.9	9.4	8.7	10.4	8.8
硬さ	Hv	33.0	30.4	31.4	30.9	40.2	36.0	36.8	35.1	33.2	32.6	35.2			
硬さ	HRL		87.4	90.4	90.2	100.5	97.0	92.1	93.0	90.4	91.8	91.6	97.6	98.6	99.0
インパクト試験	供試数	19	19	19	20	18	5	15	5	21	20	20	20	20	20
	非割れ数	19	14	18	12	15	5	15	5	15	20	20	20	18	19
	割れ数	0	5	1	8	3	0	0	0	0	0	0	0	2	1
	割れ率 %	0	26	5	40	17	0	0	0	0	0	0	0	10	5
	備考														
[インパクト試験条件]															
1. スラグ形状 : 154.8 mmL x 24.8 mmW x 11.0 mmT (アスペクト比 : 6.2)															
2. 供試材料製造条件															
1) 铸造 : (1) DC铸造 : 100x310mm 速度120mm/min (2) CC铸造 : 22x300mm 速度5,300mm/min															
2) 熱延 : (1) DC材 : t 84 → 11mm (2) CC材 : t 22 → 11mm															
3) 焼鈍 : 540 °C x 4hr															

3-3-2 合金材成分と物性

矩形電池ケース材必要物性は、成形後強度と成形性（伸び等）である。各成分における機械的性質を、下記の図3-3-2と図3-3-3で示す。

1) Si添加の機械的性質への影響



(図3-3-2)

(図3-3-3)

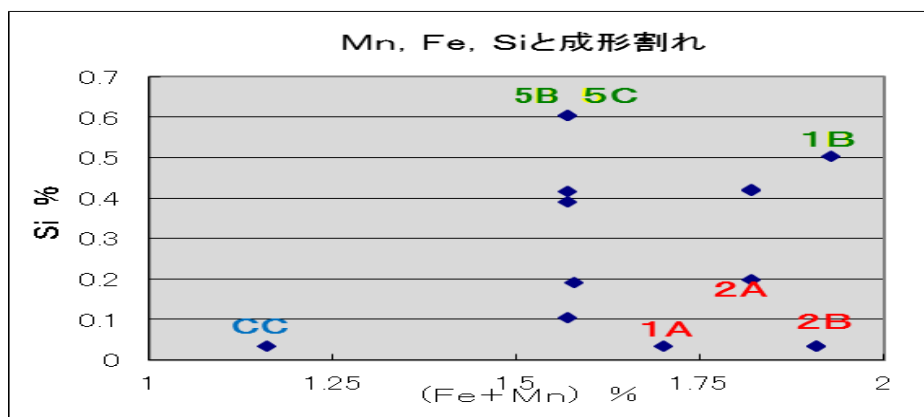
5 A	3 A	3 B	5 B	2 A	4 A	4 B	1 B
Si (%)	0.10	0.19	0.34	0.03	0.20	0.42	0.50

Si量最多5-Bの伸びが低い。他合金もSi量増で伸び低下。
引張強度と耐力には、Si量による差異は、見られなかった。

2) FeとMnの添加の機械的性質への影響

FeとMnの添加量合計で見ると、その量が多い場合伸びがかなり低下（成形性に負の影響）する。引張強さと耐力には、差が殆どみられない。

MnとFeにSiを加えた3成分合金の、インパクト加工試験時の成形性割れの影響を 図3-3-4に示す。



(図3-3-4) (Fe+MnとSi)の成形性への影響

- ① 1A・2A・2B : インパクト試験時の割れ発生率 = 17～40%
- ② 1B・5B・5C : " = 0～5%
- ③ CC・その他 : " = 0%

3) ジルコニウム (Zr) の影響

Zrの添加は、Tiと同様に鋳造組織の結晶微細化し、粒界が増大して転位が動きにくくなるので強度が向上する。Si・Fe・Mn等の添加物も効果を発揮するが、加工性は低下する。Zrは強度と加工性を両立させるため、結晶微細化・再結晶抑制・耐熱性向上で添加される。また、Zrは電池ケース材料でレーザー溶接性向上に使用される。

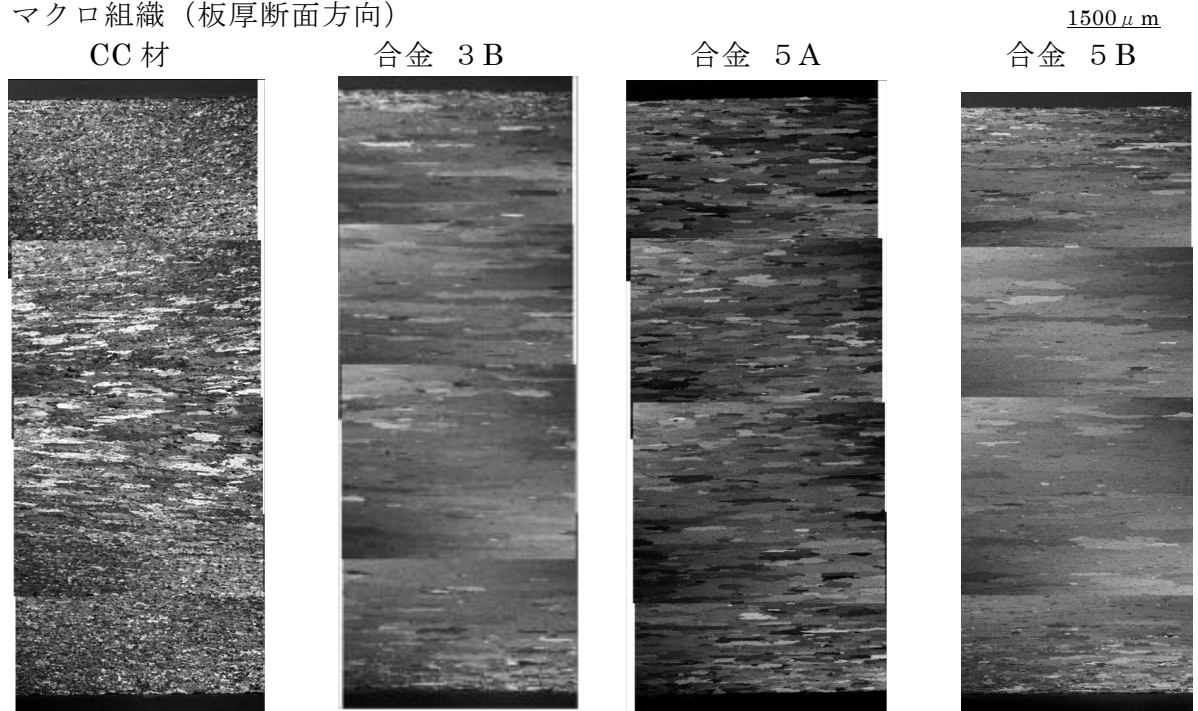
3-4 アルミ合金材料における添加金属元素の影響解析

アルミ合金材の組織観察を 特徴的な合金とインパクト加工結果を考慮して4種 を選
定し、圧延材とインパクト加工材のマクロ・ミクロ組織を観察した。 圧延材のEPMA
マッピング分析も行った。

3-4-1 圧延材のマクロ・ミクロ組織観察

主たる条件の相異は、鋳造法と珪素添加量である。

1) マクロ組織 (板厚断面方向)



(図3-4-1-1)

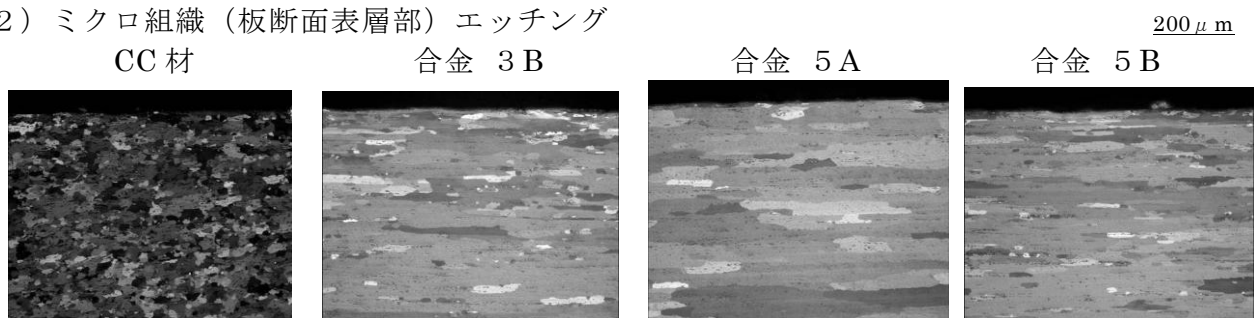
(図3-4-1-2)

(図3-4-1-3)

(図3-4-1-4)

CC材は、DC材と異なり 結晶粒が細かい。鋳造厚が薄く、冷却速度が速いためであ
る。特に板厚の1/4の両面は 微細な結晶粒である。3種のDC材は、板表面近傍は 微
細組織が少し認められるが、板中央部を含めた大半部分は、圧延組織である。

2) ミクロ組織 (板断面表層部) エッチング



(図3-4-1-5)

(図3-4-1-6)

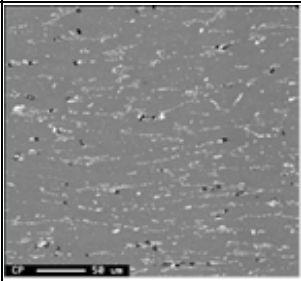
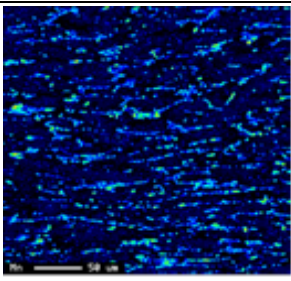
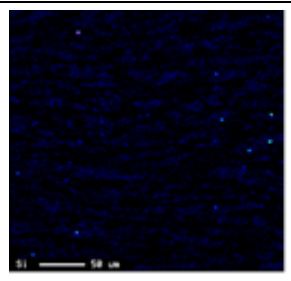
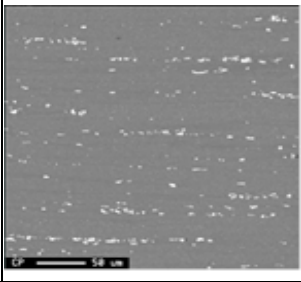
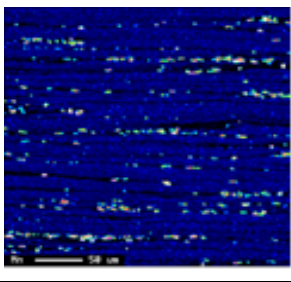
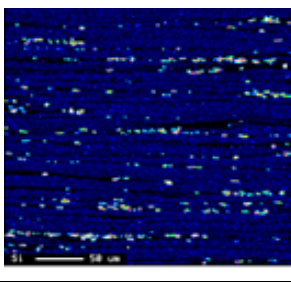
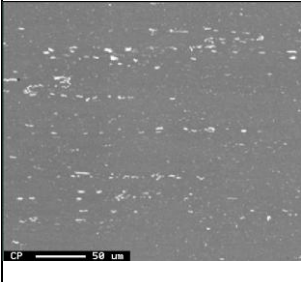
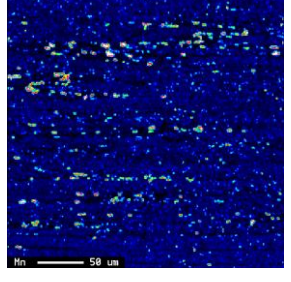
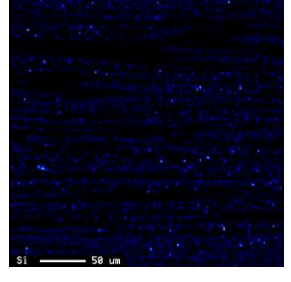
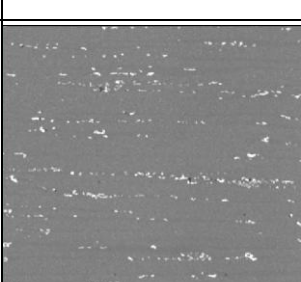
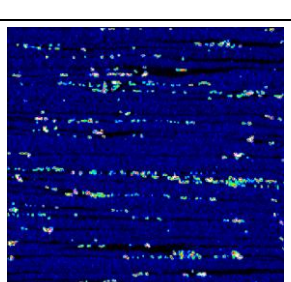
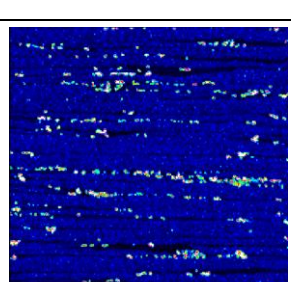
(図3-4-1-7)

(図3-4-1-8)

CC材が明らかに微細粒状結晶である。他DC材は細長い圧延組織で粒界に大きい析
出物が見られ、インパクト加工時の割れの起点の可能性が高い。

3-4-2 圧延材のEPMAマッピング分析

観察合金は、前項と同じく、1) CC材、及びDC材の合金組成別の 2) 3B材、3) 5A材、4) 5B材とした。主たる条件の相異は、珪素添加量と铸造法である。

	反射電子線像	Mn	Si
CC材		 1.16	 0.03
3B材・DC		 1.41	 0.39
5A材・DC		 1.4	 0.10
5B材・DC		 1.41	 0.60

(図3-4-2) EPMAマッピング分析像

- 観察内容は下記の通り。(色が赤から青になるほど、濃度が少ないことを意味する。)
- 1) CC材 : Mnは粒界上に晶出し、他材より均一に分散し固溶している。
CC铸造法の冷却速度が速い効果と考えられる。
 - 2) DC-3B材 : Mn・Siとも全体的には固溶しているが、Mn-Si系化合物が高濃度で晶出が認められる。
 - 3) DC-5A材 : Mn晶出物が、比較的均一微細に分散しているようだが局部的に高濃度部分が認められる。
 - 4) DC-5B材 : 3B材と同傾向であるが、Si添加量が多い分固溶量及び晶出物が多く認められる。

インパクト加工への影響は、晶出物が割れの起点になるので、微細均一に分散させることが加工割れ低減となる。この観点からでは、割れの可能性には、CC材に次ぎ5A材が少なく3B材、5B材が割れ確率が高くなる可能性がある。

3-4-3 インパクト材の組織

観察合金4種は、1) 1A材、2) 3B材、3) 5A材、4) 5B材とした。
 観察位置は、成形缶の(1)縁、(2)側面(3)底の3ヶ所で行った。
 それぞれの位置は、右の図3-6の通り

- 単位：mm
- (1)スラグ寸法 : 154.8 x 24.8 x 11.0
- (2)インパクト缶寸法 : 155 x 25 x (70h) 側面
- (3)インパクト缶厚さ : 壁 1、底 2

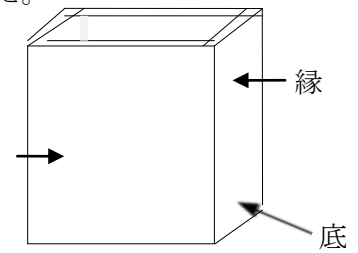


図3-4-3-1

1) インパクト缶の「側面」

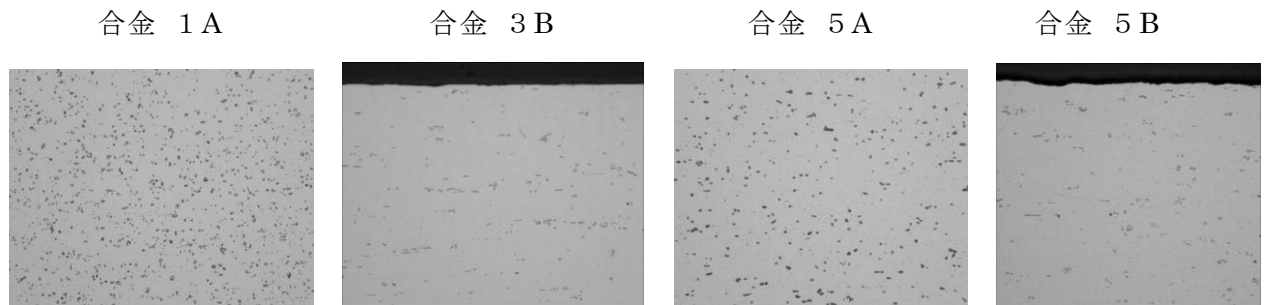


図3-4-3-2

図3-4-3-3

図3-4-3-4

図3-4-3-5

インパクト缶の「側面」のDC4種合金(1A、3B、5A、5B)のマイクロ組織では、何れも最少厚で25mmから1mmに衝撃的に加工され細く伸びた結晶粒界に微細な析出物が認められる。

3-5 まとめ

1) インパクト材

大型矩形電池ケースに求められる物性は、耐熱性を含めた機械的物性が充分かつ安定であることに加え、低加工コストが求められる。インパクト加工は、短時間で強加工されるため、高強度かつ低コストが得られる。

強加工で成形性を確保するためには、材料組織の微細均一が必要である。そのためには、鋳造時の冷却速度を速くすることも有効な方法であることが確認できた。

またTiやZrの結晶微細化に有効な金属の最適も重要であった。

材料の強度と加工性を確保するためにアルミに添加する金属元素をアルミ中に固溶することも重要で、加工時の割れの起点になる添加金属元素の量と形態を制御することが重要であることも確認出来た。

今回得られた知見を基に、より最適な合金組成の検討ができる。また、強加工製品材には、結晶微細化、固容量の増加が必要であり、最適合金種でのCC法での開発を進めたい。

2) 圧延材の組織

CC材は、DC材比べ冷却速度が速いために結晶粒がかなり細かい。特に板表面の近傍が微細な結晶粒である。DC材は、板表面近傍は微細組織が少し認められるが、板中央部を含めた大半部分は、圧延組織である。

3) EPMAマッピング組織

CC材は、Mnが粒界に晶出し均一に分散し固溶もしている。DC材の3BではMn-Si系化合物が高濃度で晶出している。DC5A材は、Mn晶出物が比較的均一微細に分散しているが局部的に高濃度部分が認められる。DC5B材は、Si添加量が多いため晶出物が多く認められる。インパクト加工への影響は、晶出物が割れの起点になるので、微細均一に分散させることが必要である。

第4章 インパクト成形法における、塑性流動解析技術の確立

4-1 矩形スラグによる成形品の状態把握

A3003 をスラグ材料として用いてインパクト成形加工した成形品の機械的特性を調べた。試験片は図 4-1-1 に示したように 4 種類(長辺側の縦・横方向，短辺側縦方向，底面)作成し引張試験を行い，引張強さ及び破断伸びを調べた。

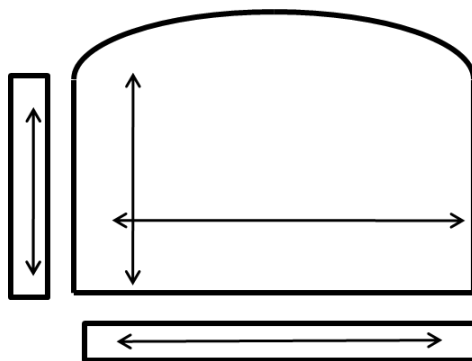


図 4-1-1 試験片の作成位置

引張試験から得られた各試験片引張強さの結果を図 4-1-2，破断伸びの結果を図 4-1-3 に示した。

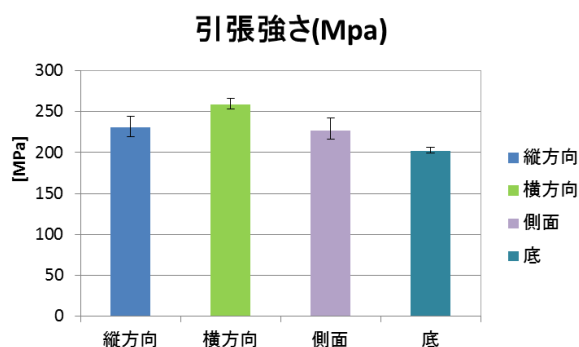


図 4-1-2 各試験片引張強さ

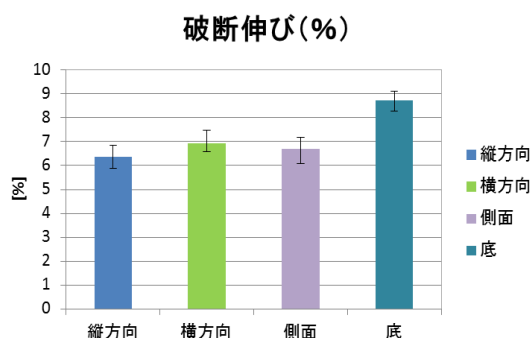


図 4-1-3 各試験片破断伸び

実験結果から，側面と長辺側縦方向は共に縦方向であり機械的特性に大きな差が見られない。つまり短辺側及び長辺側の縦方向の加工度はほぼ同じ程度であることが分かった。しかし長辺側の引張強さは高く，破断伸びは大差ない結果となった。長辺側において縦方向よりも横方向の方が，加工度に関して少し大きいこと考えられる。また底辺は他の位置よりも加工度が小さいことが分かった。

成形品の状態で大きな問題点が図 4-1-4 に示した長辺側の凹みである。



図 4-1-4 成形品の長辺側の凹み

この凹みは残留ひずみに関係していると考えられたので残留ひずみを計測した。実験方法としてひずみゲージを図 4-1-5 に示した番号 1~6 の位置に横向きに張り付，成形品を①~③の順番で電動ノコギリを用い切断しひずみを計測した。ひずみゲージ 1~6 の実験結果を図 4-1-6 に示した。

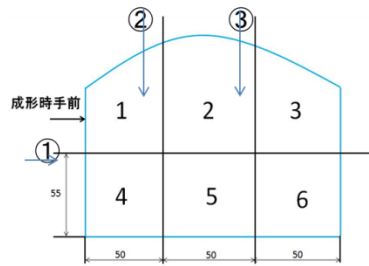


図 4-1-5 残留ひずみ計測手順

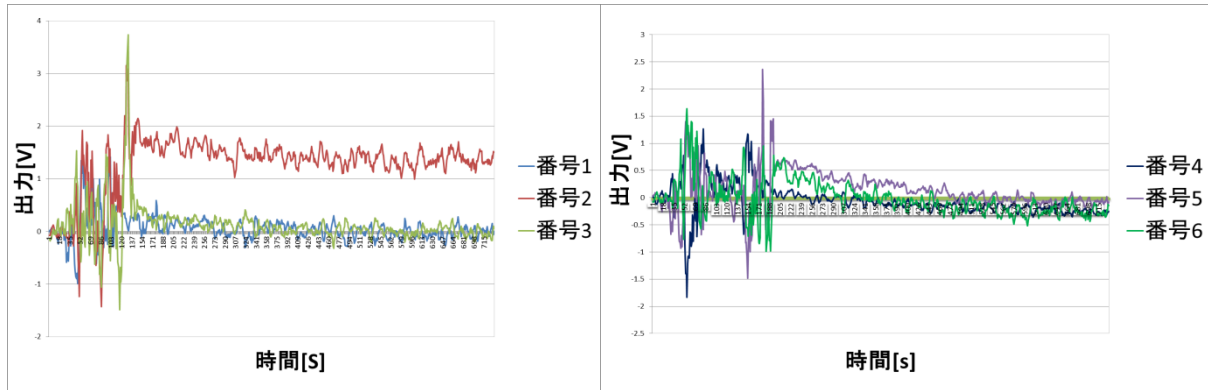


図 4-1-6 残留ひずみ計測結果

実験の結果，成形品長辺側の番号 2 部分に他の位置よりも大きな圧縮がかかっていることが分かった．圧縮が生じている原因はインパクト加工時に材料が均一に持ち上がっておらず，材料が中央部に材料が多く流れていることであると考えられる．また長辺側中央部に材料が流れていることは矩形スラグにマークを記しインパクト実験を行った結果図 4-1-7 からも観測することができた．この様にインパクト加工時に材料が均一に持ち上がっていないことが割れや凹みに影響を与えていると考えられ，今後材料が均一に持ち上がることで問題が改善できないか検討する必要がある．

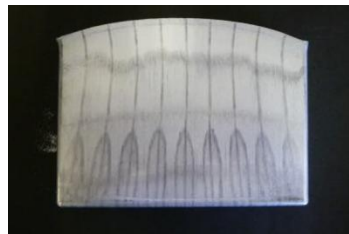


図 4-1-7 マーク付きの成形品

4-2 成形品の変形状態の把握

インパクト成形では成形時に大きな加工熱が発生し，金型が大きく昇温することが分かっている．

そこで今回連続インパクト成形加工を行い，加工熱によりパンチ温度がどの程度上昇するために熱電対を用いて計測した．パンチ上部と下部の温度計測の為にパンチに熱電対用の穴を加工した．材料は A3003 を使用し，矩形スラグ及び金型寸法は 3-2 と同様である．パンチ温度計測結果を図 4-2-1 に示した．温度計測開始後 350[s] の時およそ 40 回インパクト成形加工が行われていた．金型の安全上，パンチ温度が均一になるまで

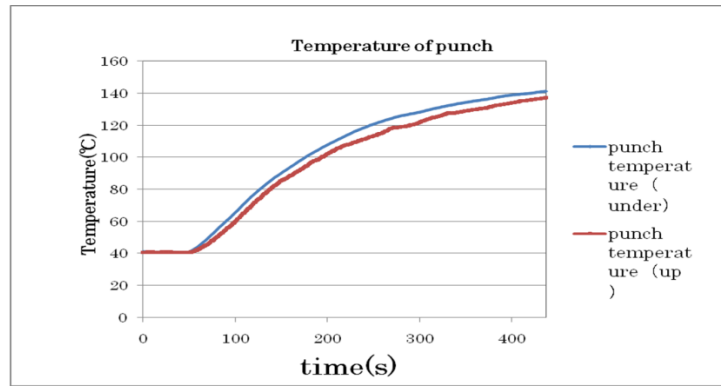


図 4-2-1 パンチ温度計測結果(連続インパクト成形加工時)

実験は行わなかったが、加工が進むにつれてパンチ温度上昇が抑えられてきている。パンチ温度 150~160[°C]付近で温度が安定すると思われる。また連続インパクト成形加工した時の成形品の寸法を計測した。計測位置は図 4-2-2 に示した成形品の中央幅である。計測結果を図 4-2-3 に示した。

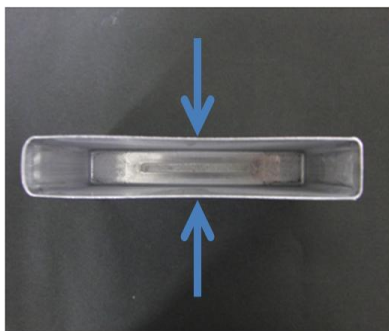


図 4-2-2 寸法計測位置

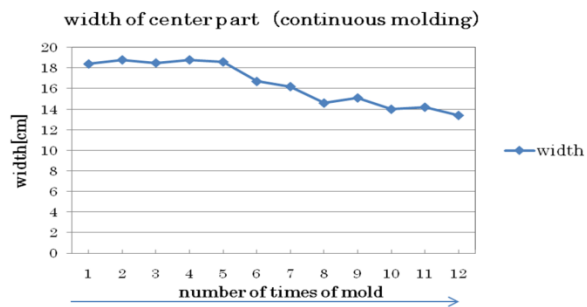


図 4-2-3 計測結果

計測の結果、連続インパクト成形加工を行った成形品の中央幅は減少している事(凹みが大きくなっている)ことが分かった。この原因として考えられるのは成形時に加工熱が発生しパンチ温度が上昇したことにより、加工状況に変化が生じ熱ひずみなどの問題が生じたこととであるとされる。今後加工温度がインパクト加工に与える影響を把握する必要がある。

次にインパクト成形時のスラグ材料の変形状態把握を目的として、高速度カメラを用いてインパクト成形法の観察を行った。測定に用いた高速度カメラは株式会社 Photron 製 FASTCAM-512PCI である。撮影速度 2000[fps]、シャッター速度 1/frames とした。撮影された動画を粒子追跡により解析するための目印として、図 4-2-4 及び図 4-2-5 に示した様にスラグにはマーカーで線を引いた。図 4-2-5 において、長辺のみにマーカーを引いたものを①長辺(long side)、下面のみのものを②下面(lower surface)、短辺のみのものを③短辺(short side)、長辺と下面のものを④2面(long side and lower surface)、図 4-2-4 に示した用に全面に引いたものを全面(all surface)と呼称することとした。

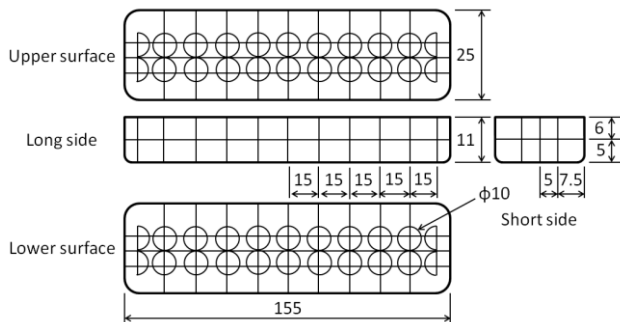


図 4-2-4 スラグマーカー

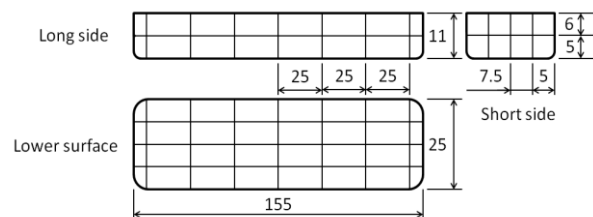


図 4-2-5 スラグマーカー

実験によって得られたケースを、線を引いた位置ごとに図 4-2-6 から図 4-2-10 に示す。図 4-2-6 から図 4-2-10 を見ると分かるように、スラグの長辺部分はケース長辺部分の上半分、スラグ下面部分はケース長辺の下半分および短辺の下半分、スラグ短辺部分はケースの短辺上半分になる

ことがわかった。また、図 4-2-10 から、スラグの上面部分はケースの内側部分となっていることがわかった。

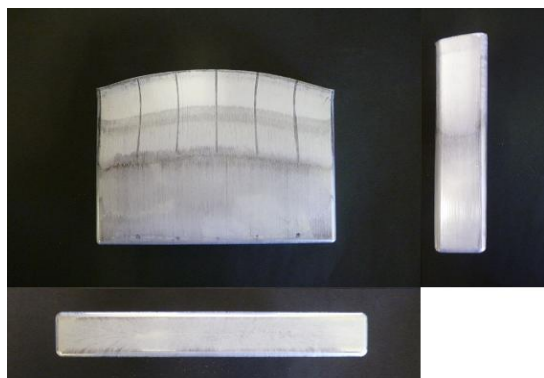


図 4-2-6 マーク付の成形品(①long side)



図 4-2-7 マーク付の成形品(lower surface)

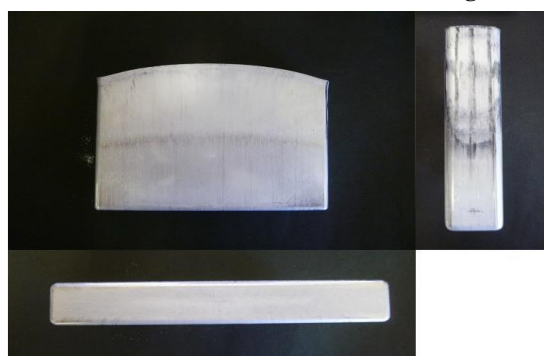


図 4-2-8 マーク付成形品(short side)

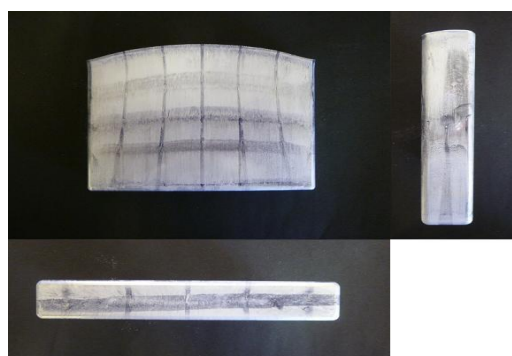


図 4-2-9 マーク付成形品(long side and lower surface)

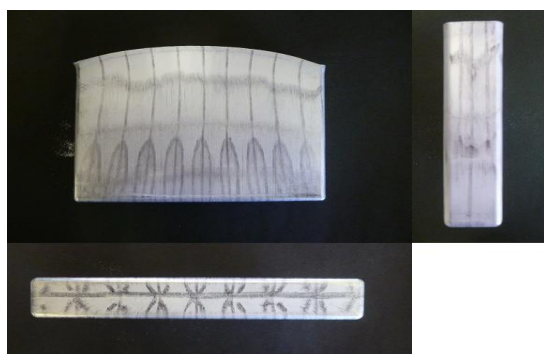


図 4-2-10 マーク付成形品(all surface)

割れの発生しなかったケースについて、観察すると、ケースの長辺側上部でネッキングが発生していることが分かった。こういったネッキングは、円筒ケースの成形では見られず、矩形ケースでのみ発生していることから、インパクト成形法を用いて矩形ケースを成形する際には何らかの応力が発生していることが考えられる。そこで、ネッキングについて考えると、ネッキングは通常、引張応力の発生している方向と 45 度の方向に発生することが分かっていることから、ケースの長辺側の左右方向に対して、引張応力が発生している可能性が考えられる。

そこで、割れが発生したものについて、高速度カメラの動画を観察してみた。割れ発生の様子を図 4-2-11 に示す。図 4-2-11 の上に映っているものがパンチ、下に映っているものがスラグである。上でも述べたように、この写真の左を見ると、ケース長辺側の上においてケースにはネッキングが発生している。また、高速度カメラの動画から、このネッキングを基点にして割れが発生している様子も確認された。このことから、インパクト成形法では成形中にケース長辺の上において、左右方向に引張応力が発生おり、これが原因で、割れが発生すると考えられる。

また高速度カメラによって撮影された動画を、粒子追跡ソフトを用いて、ケース長辺の各点での変位の測定を行った。測定ソフトは DIPP-Motion Pro 2D (株式会社ディテクト製) を使用した。測定位置について、図 4-2-12 に示す。図 4-2-12 に示した用に、ケースの中心に位置する部分を[1]とし、そこから、一点ずつ[6]までの合計 6 ヶ所について測定を行った。また、この図 4-2-12

の左右方向を x 軸，上下方向を y 軸とした．また，成形の特性上，測定の開始時間はスラグがダイから出てきた直後を開始位置とした．

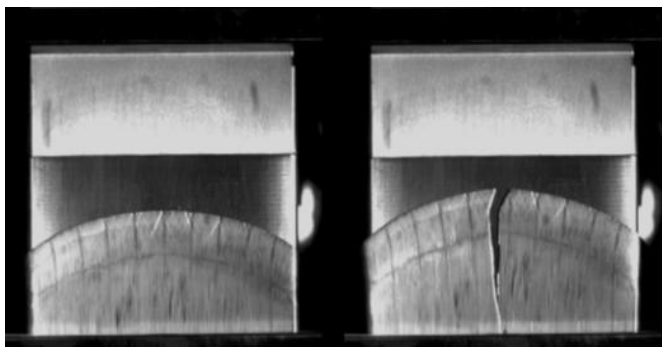


図 4-2-11 割れ発生の様子

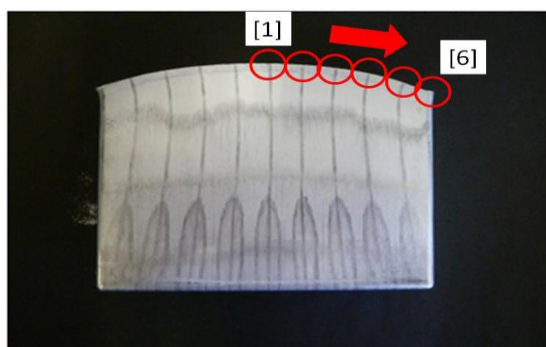


図 4-2-12 粒子追跡計測位置

測定の結果，得られたグラフを図 4-2-13，図 4-2-14 に示す．これらのグラフは横軸に時間，縦軸に x, y の変位をそれぞれとったものである．測定の結果，図 4-2-13 より，成形の初期段階である 0.15 から 0.2[s]に，ケース上部において，ケースが x 軸方向，すなわち図 4-2-12 で右方向に変形していく様子が確認された．この期間にケースに引張応力が発生している可能性が考えられる．また，現在までの研究の結果，ケースがダイから見え始めて 0.05[s]までに割れが発生することが分かっており，その結果をグラフに赤い縦線で書きこんだ．この結果から，成形の初期段階である 0.13 から 0.18[s]に引張応力が発生している可能性が考えられる．次に，図 4-2-15，図 4-2-16 に成形時の変形速度を示す．図 4-2-15 より，ケース長辺においては，中央ほど変形速度が速く，中央から離れるほど変形速度が遅いことがわかった．また，図 4-2-15，図 4-2-16 を見ると，赤線で表記したケースの割れが発生する位置で，x, y 軸ともに変形速度が一定になっていることから，x, y 軸方向の変形は同時期に起こっていることは明らかであり，ケース長辺の変形速度が中央ほど速く，中央から離れるほど遅いことが原因で，左右方向に引張応力が発生しているものと考えられる．左右方向に発生する張応力が割れに影響を与えていると考えられる．

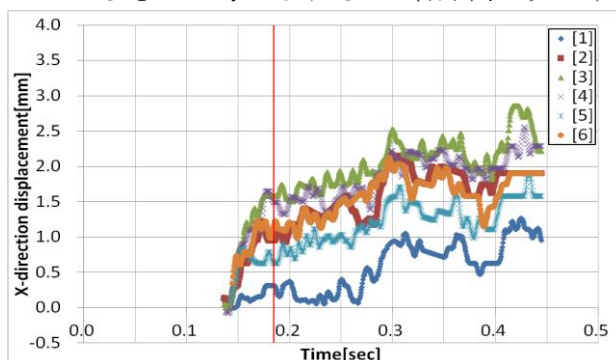


図 4-2-13 X 方向移動距離(粒追跡結果)

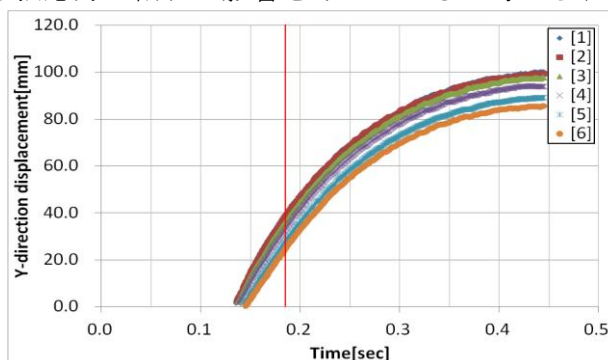


図 4-2-14 Y 方向移動距離(粒子追跡結果)

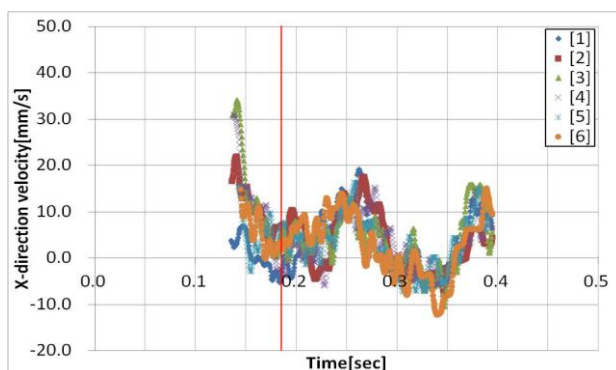


図 4-2-15 X 方向移動速度(粒子追跡結果)

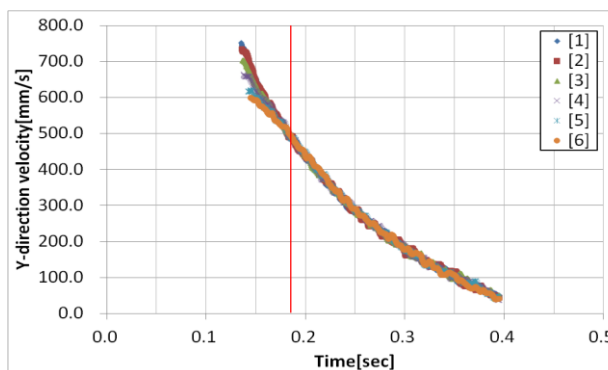


図 4-2-16 Y 方向移動距離(粒子追跡結果)

4-3 合金成分がケース作製に与える影響の把握

インパクト成形法により電池ケースを作製する場合，ケースに様々な欠陥が生じることが分か

っている。そこで、成形に用いるスラグに 10 種類の材料を用いて実験を行い、それらの違いについて比較検討を行った。実験に用いたスラグは、インパクト成形に一般的に使用されている、A3003 を基礎として、異なる合金組成のスラグを作製した。スラグ材料の成分表を表 4-3-1 に示した。

表 4-3-1 スラグ材料成分表

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zr
1-A	0.03	0.54	0.13	1.16	0	0.03	—
1-B	0.50	0.54	0.13	1.39	0	0.03	—
2-A	0.03	0.54	0.13	1.37	0	0.03	—
2-B	0.03	0.54	0.13	1.37	0.61	0.03	—
3-A	0.19	0.15	0.09	1.43	0	0.04	—
3-B	0.39	0.16	0.09	1.41	0	0.04	—
3-C	0.41	0.16	0.09	1.41	0	0.03	0.11
4-A	0.20	0.41	0.10	1.41	0	0.05	—
4-B	0.42	0.41	0.10	1.41	0	0.05	—
4-C	0.42	0.41	0.10	1.41	0	0.05	0.10

2-A を基準として、シリコンの量を増やしたものを 1-B、マンガンの量を減らしたものを 1-A、マグネシウムを添加したものを 2-B と呼称する。さらに、3-B・4-B を基準にして Si を減らしたものを 3-A・3-B、Zr を添加したものを 3-C と 4-C と呼称する。冷間鍛造プレス K1-6300E(アイダエンジニアリング製)を使用し、実験条件としてパンチ速度を 24[SPM]で行った。潤滑剤として、ステアリン酸亜鉛を使用した。実験で得られた割れに関する結果を表 4-3-2 に示す。

表 4-3-2 実験結果(割れの発生率)

	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	3-C	4-A	4-B	4-C
割れ	5	1	8	3	0	0	0	6	0	0
非割れ	14	18	12	15	5	15	5	15	20	20
確率[%]	26.3	5.3	40.0	16.7	0.0	0.0	0.0	28.6	0.0	0.0

実験の結果、1-A~2-B の 4 種類の材料についてはケース割れが見られたが、3-A~4-C の 6 種類の材料についてはケース割れが見られなかった。この原因について考察する。そこで各スラグの引張強さ及び破断伸びを図 4-3-1 に示した。引張強度に着目すると、2-B の引張強度は 3-A~4-C の 6 種類の材料と比較しておよそ 1.5 倍大きい。また、1-A~2-A と 3-A~3-C を比較すると、引張強度には大差はないが、前者ではケース割れが見られ、後者では見られなかった。以上のことから、スラグの引張強度の大小がケース割れに大きな影響を与えるとは考えにくい。次に破断伸びに着目すると、1-A~2-B の材料は 3-A~3-C と比較して、破断伸びが 5~10[%]程度小さい。これと、前者ではケース割れが見られ、後者では見られなかったことから、スラグの破断伸びが大きいほど、ケースは割れにくいということが考えられる。しかし、これらの考察に 4-A~4-C を加えて考えると 4-A~4-C 間において機械的特性に大差は無いが、4-A は割れが生じているので現時点では割れに引張強さ及び破断伸びがどの程度影響しているかは分からなかった。そこで 3-4 での結果、長辺側材料がインパクト成形加工中に短辺側に移動していることを考慮すると、成形加工前の機械的特性ではなく、成形加工後の機械的特性が割れに影響を与えているのではないかと考えられる。従って成形品長辺側水平方向の引張強さ及び破断伸びを計測した。各成形品 1-A~4-C の引張強さ及び破断伸びの計測結果を図 4-3-2 に示した。各スラグ、インパクト成形加工によって加工硬化が激しく生じており引張強さの値が高くなり、破断伸びが低い値を示している。ところがスラグの機械的特性の傾向とインパクト成形加工後の機械的特性の傾向に大きな違いは無く割れに大きく影響を与えている特性を把握することはできなかった。インパクト成形加工時パンチ温度は 140[°C]以上になることが

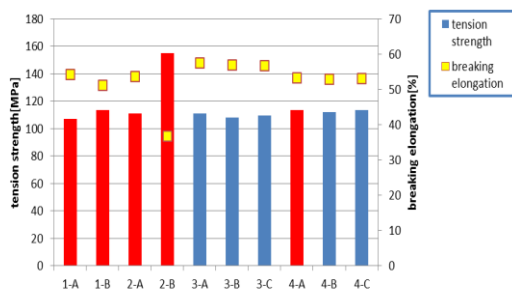


図 4-3-1 各スラグの引張強さ及び破断伸び

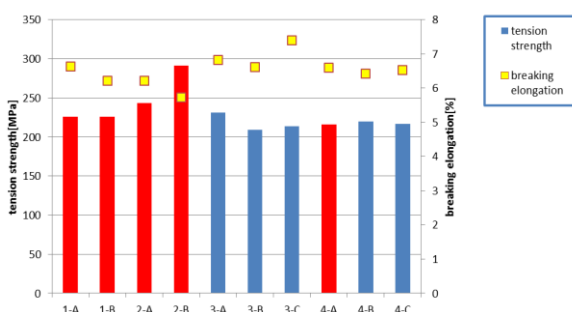


図 4-3-2 成形品の引張強さ及び破断伸び

分かっているため、スラグ材料について室温時の機械的特性だけでなく、高温時の機械的特性についても調査検討する必要があると考え、高温引張試験を行った。このとき、インパクト成形時のひずみ

み速度は微小であることが分かっており、加えてアルミニウム合金はひずみ速度への依存性が小さいことから、スラグ材料について衝撃特性により評価する必要はないものと考えた。そこで 60, 80, 100, 140, 180[°C]において、100kN 万能試験機 (INSTRON 社製) を使用し高温引張試験を行った。3-A~4-C の引張試験の結果得られた、公称応力-公称ひずみ線図を図 4-3-3~図 4-3-4 に示す。図 4-3-3~図 4-3-7 から、金属の成分の違いごとに比較検討を行った。図 4-3-3 は 3-A と 3-B, 図 4-3-4 は 4-A と 4-B を比較したものである。これらにより、Si を減少させると、引張強度と破断伸びが低下することがわかった。次に、図 4-3-5 は 3-B と 3-C, 図 4-3-6 は 4-B と 4-C を比較したものである。これらにより、Zr の量を増加させると、引張強度が向上し、伸びは低下することが分かった。最後に、図 4-3-7 は 3-B と 4-B を比較したものである。これにより、Fe の量を増加させると、引張強度が向上し、伸びは低下することが分かった。1-A~2-B について、実験結果のまとめを図 4-3-8 に示す。また、3-A~4-C の実験結果のまとめを図 4-3-9 に示す。実験の結果、引張強度は高温ほど低く、破断伸びは高温ほど高くなるという傾向が見られた。図 4-3-8 と図 4-3-9 の 100°Cでの結果を比較すると、1-A~2-A に比べて 3-A~4-C の引張強度には大差はない。しかし、1-A~2-B 及び 4-A にはケース割れが見られるが、3-A~3-C 及び 4-B,4-C には見られなかった。また、2-B は 3-A~4-C より引張強度は 45[%]程度大きい、16[%] ケース割れが発生している。以上のことにより、高温時での引張強度の大小がケース割れに大きな影響を与えるとは考えにくい。図 4-3-8 と図 4-3-9 の 100°Cでの破断伸びについて着目すると、1-A~2-B に比べて 3-A~4-C の破断伸びは大きい。しかし、破断伸びの大きい分類の 4-A は割れている。100°C時の 3-A~4-C の中で 4-C の破断伸びは一番低い値を示している。これよりある程度の破断伸び以上であると割れないのでは考えられる。

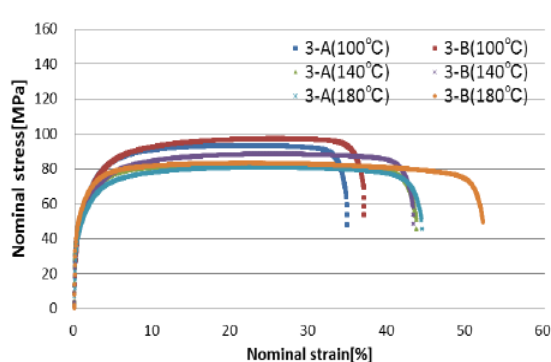


図 4-3-3 公称応力-公称ひずみ線図(3-A,3-B)

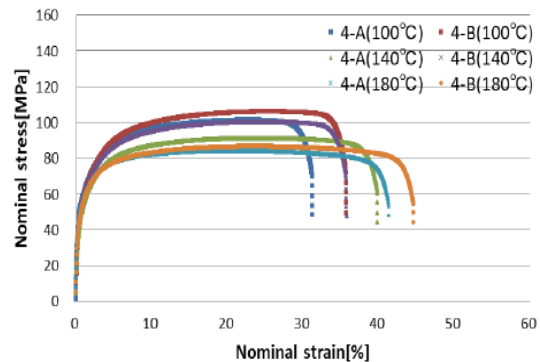


図 4-3-4 公称応力-公称ひずみ線図(4-A,4-B)

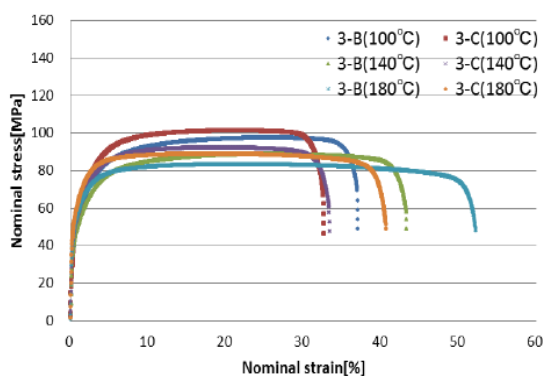


図 4-3-5 公称応力-公称ひずみ線図(3-B,3-C)

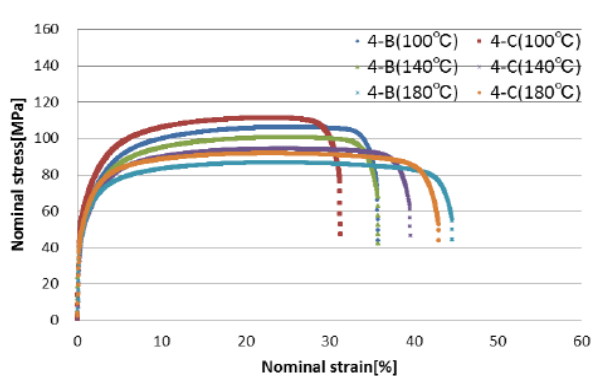


図 4-3-6 公称応力-公称ひずみ線図(4-B,4-C)

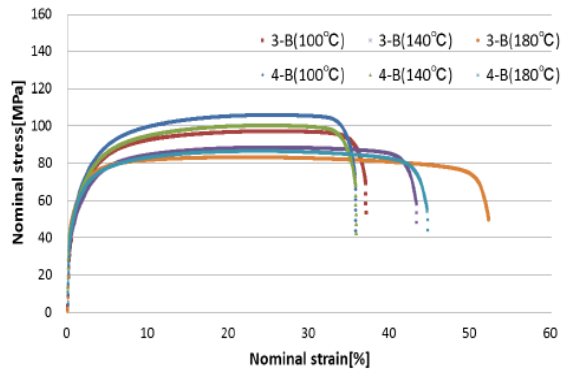


図 4-3-7 公称応力-公称ひずみ線図(3-B,4-B)

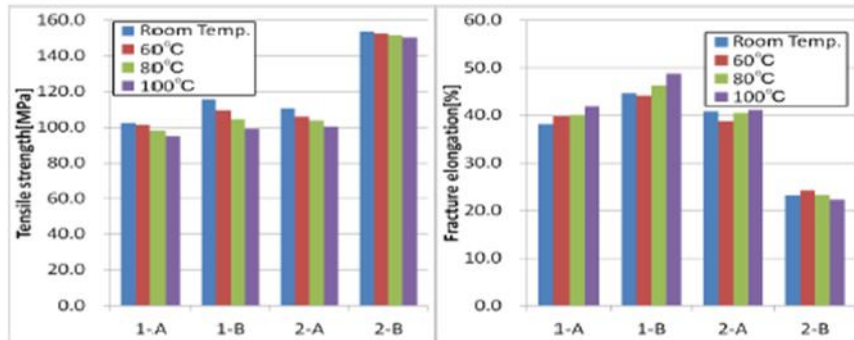


図 4-3-8 実験結果まとめ(1-A~2-B)

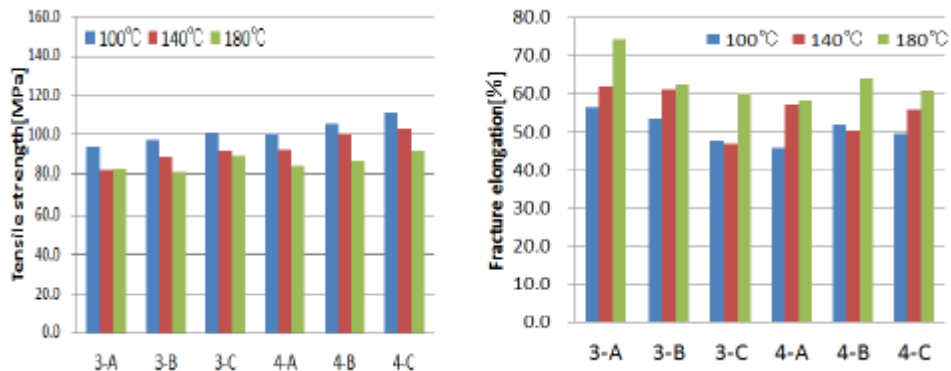


図 4-3-9 実験まとめ(3-A~4-C)

実験より高温での破断伸びが割れに大きく影響していることが考えられるが、信憑性に欠ける。そこで、スラグ成分及び機械的特性と割れの関係解析することでスラグ成分の割れへの影響を確率統計面で把握できないか検証を行った。判別分析・重回帰分析を用いてアルミ合金における添加物金属元素の割合と割れの関係について解析を行った。判別分析・重回帰分析を行う上で1-A~4-Cではデータが不足なので、新たに5-A~5-Cに関して追加実験を行った。今回解析するスラグ添加物成分のまとめと各スラグの割れ率を表4-3-3に示す。

表 4-3-3 スラグ添加物成分のまとめと各スラグの割れ率

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zr	割れ率[%]
1-A	0.03	0.54	0.13	1.16	0	0.03	-	0.26
1-B	0.5	0.54	0.13	1.39	0	0.03	-	0.05
2-A	0.03	0.54	0.13	1.37	0	0.03	-	0.4
2-B	0.03	0.54	0.13	1.37	0.61	0.03	-	0
3-A	0.19	0.15	0.09	1.43	0	0.04	-	0
3-B	0.39	0.16	0.09	1.41	0	0.04	-	0
3-C	0.41	0.16	0.09	1.41	0	0.03	0.11	0
4-A	0.20	0.41	0.10	1.41	0.00	0.05	-	0
4-B	0.42	0.41	0.10	1.41	0	0.05	-	0
4-C	0.42	0.41	0.10	1.41	0	0.05	0.10	0
5-A	0.1	0.16	0.09	1.41	0	0.04	0	0
5-B	0.6	0.16	0.09	1.41	0	0.04	0	0.1
5-C	0.6	0.16	0.09	1.41	0	0.04	0.04	0.05
A3003	0.06	0.55	0.10	1.10	0.05	0.05	-	-

簡略化した手順は図 4-3-10 に示す。今回 4-A は割れの金型が馴染んでいないと考えられたので非割れとした。

手順

- ① 成形時の割れと深く関連があると考えられるスラグ特性を重回帰分析により抽出しスラグ特性と割れ率の関係を定量化する
- ② ①で関連が大きいと抽出されたスラグ特性とスラグ組成との関係を重回帰分析により求める
- ③ 更に抽出されたスラグ特性と割れの関係を判別分析により解析し、割れの起こり難いスラグと起こり易いスラグを判別抽出する
- ④ 最後に②③の重回帰分析と判別分析を組み合わせ、スラグ組成の割れに与える影響を把握する

図 4-3-10 解析簡略手順

手順①において、重回帰分析において扱うスラグ特性の独立変数は引張強さ・耐力・伸びとした。重回帰分析の結果、耐力>伸び>>引張強さという順で割れに影響しているという解析結果になった。

そこで耐力・伸びの 2 独立変数を用い同様に重回帰分析を行った。得られた重回帰式を式(1)に示した。

$$\text{割れ率} = 4.8787596 - 0.097835 * \text{耐力} - 0.018235 * \text{伸び} \quad \text{-----}(1)$$

手順①において影響が大きいとされた耐力・伸びについてスラグ添加金属元素との関係を求めるため重回帰分析を行った(手順②: Mg はデータが少ないので省いた)。結果耐力に関しては Ti > Mn の順で影響しているという結果になった。得られた重回帰式を式(2)に示した。

$$\begin{aligned} \text{耐力} = & 27.515773 + 0.7814998 * \text{Si} + 0.2675495 * \text{Fe} + 6.5713342 * \text{Mn} + 51.795003 * \text{Ti} + 1.716274 \\ & * \text{Zr} \quad \text{-----}(2) \end{aligned}$$

伸びに関しては Si・Fe が大きく影響しているという結果になった。得られた重回帰式を式(3)に示した。

$$\begin{aligned} \text{伸び} = & 58.607554 - 7.986715 * \text{Si} - 9.908654 * \text{Fe} + 1.6872634 * \text{Mn} - 30.66171 * \text{Ti} + 10.729475 * \text{Zr} \\ & \text{-----}(3) \end{aligned}$$

次に手順③でスラグ特性(伸び・耐力)と割れに関して判別分析を行った。結果表 4-3-4 に示した。判別結果 1 を割れ、0 を非割れとしている。結果 4-A は非割れと設定していたが判別分析の

結果割れという結果になった。この結果を分かり易く縦軸に耐力，横軸に伸びのグラフを作りデータをプロットした(図 4-3-11)。

表 4-3-4 判別分析結果

	割れ判別	伸び	耐力	実際の群	判別結果	判別値
1-A	1	54.2	36.8	1	1	-6.73
1-B	1	51.2	39.1	1	1	-4.3458
2-A	1	53.6	38	1	1	-3.8334
3-A	0	57.5	38.3	0	0	3.82531
3-B	0	57	39.5	0	0	6.89317
3-C	0	56.8	38.7	0	0	3.93473
4-A	0	53.3	39.3	0	1	-0.0961
4-B	0	52.8	39.8	0	0	0.68278
4-C	0	53.1	40.2	0	0	2.50444
5-A	0	56.6	40.1	0	0	8.17026
5-B	1	52.1	39.1	1	1	-2.8048
5-C	1	52.7	39.4	1	1	-0.7964

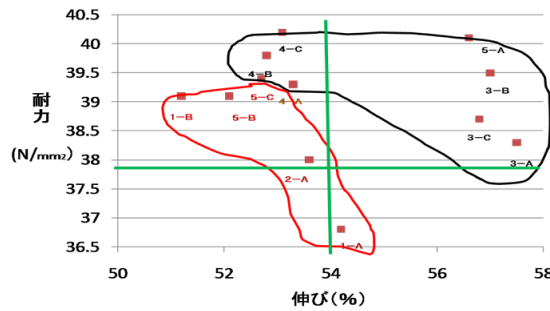


図 4-3-11 耐力—伸び(プロット表)

4-A は耐力—伸びグラフにおいて割れと非割れの間地点に位置しており，割れやすいスラグ特性と考えられる。また耐力・伸びがある値以上だと割れない事が予測できた。最後に手順④において，式(1)と(2)を利用し判別分析を行った。Si, Mn, Fe の値を変化させたときの結果を図 4-3-12, 4-3-13 に示した。両グラフとも Si が多く添加されると割れやすい傾向が出た。Mn は多いほど割れにくく，Fe は少ないほど割れにくい事が予測できた。

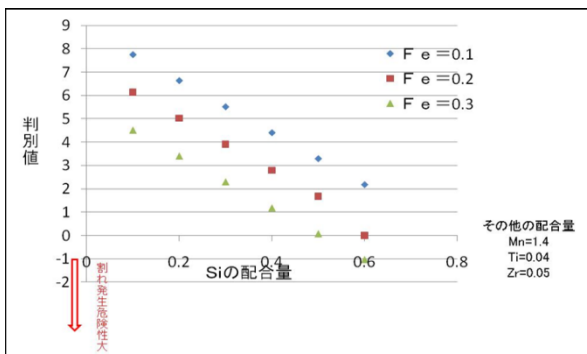


図 4-3-12 判別値予想グラフ(Fe, Si 変化)

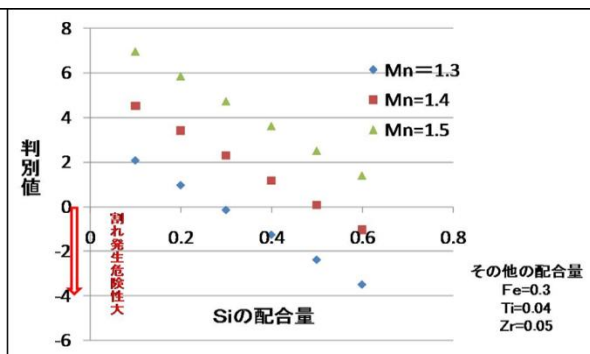


図 4-3-13 判別値予想グラフ(Mn, Si 変化)

4-4 シミュレーション結果

インパクト成形法において発生する特有の欠陥であるケース割れの原因の一つは、長辺でのケース高さ差の発生であると分かっている。そこで、摩擦がケース高さ差にどのような影響を与えるかを調査するために動摩擦係数を 0, 0.08, 0.2 と変化させて解析を行った。解析ソフトとして非線形動構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用いた。解析モデル及びメッシュの作製はプリポストプロセッサ JVISION を用いた。解析で用いたモデルのメッシュ形状を図 4-4-1 に示す。解析モデルをスラグとパンチ、ダイの 3 部分で構成した。拘束条件はスラグと各工具の対称面を移動拘束し、ダイは完全拘束とした。軸対称な要素であることから、計算時間を短縮するために 1/4 モデルを用いることとした。ダイとパンチはシェル要素のみで構成し、剛体と定義した。スラグは、物性モデルを多直線近似等方弾塑性体として、ソリッド要素で構成した。また、解析に用いたスラグの機械的特性を表 3-7-1 に示す。スラグの寸法を図 3-7-2 に示す。ダイ断面の長短辺比を 1:6 とした。また、クリアランスを短辺側は 1 [mm]、長辺側は 0.8[mm] とした。

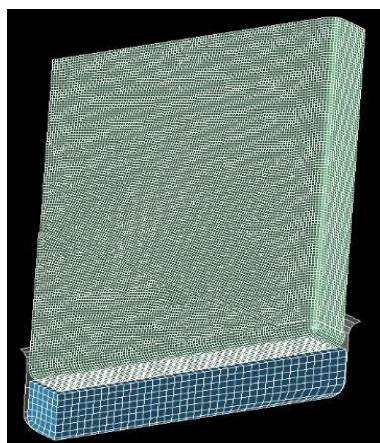


図 4-4-1 メッシュ形状

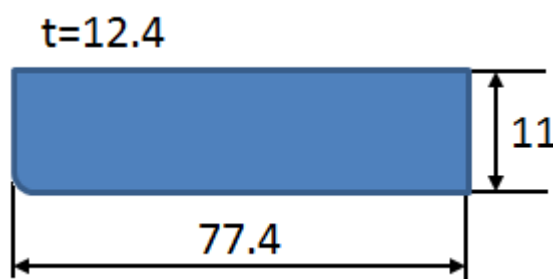


図 4-4-2 スラグ寸法

表 4-4-1 解析に用いた機械的特性

Mass density[ton/mm ³]	Young's modulus[GPa]	Poisson ratio	yield stress[MPa]
2.73E-09	71.8	0.33	40.7

解析で得られたケース形状について図 4-4-3 に示す。また、x 軸方向の応力分布について図 4-4-4 に示す。図 4-4-3 より、摩擦係数 $\mu = 0$ の場合、ケース角部は中央部よりも大きく変形することが分かった。また、摩擦の小さい条件で行った解析において、ケース高さ差の減少がみられた。よって、摩擦の大小がケース形状に大きな影響を与えていると考えられる。さらに、図 4-4-4 よりケース角部において、圧縮方向の応力が小さい傾向にあると分かった。また、摩擦係数が大きいほどケース長辺側中央の圧縮応力が大きいと分かった。これらにより、摩擦係数が大きいほど長辺中央の圧縮応力が大きくなり、中央でのケース高さが大きくなると考えられる。

次に長辺でのケース高さ差を小さくするために、ランド高さを変更したパンチを用いて解析を行った。ランドとは、パンチ側面の出っ張り部分であり、この部分が成形中の材料と接触する部分である。長辺中央のランド部分を大きくすることで、中央でのケース高さを小さくし、長辺に発生する高さ差を減少させようと考えた。

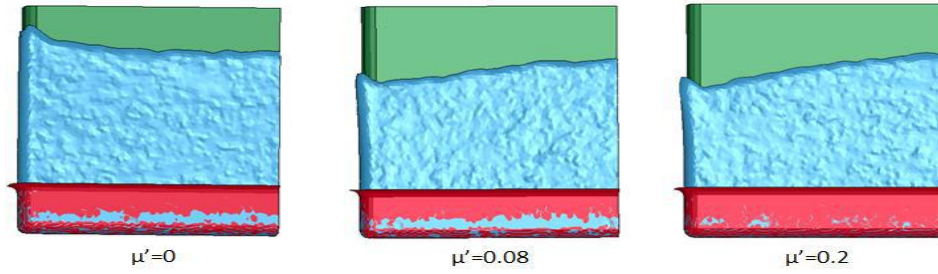


図 4-4-3 解析で得られたケース形状

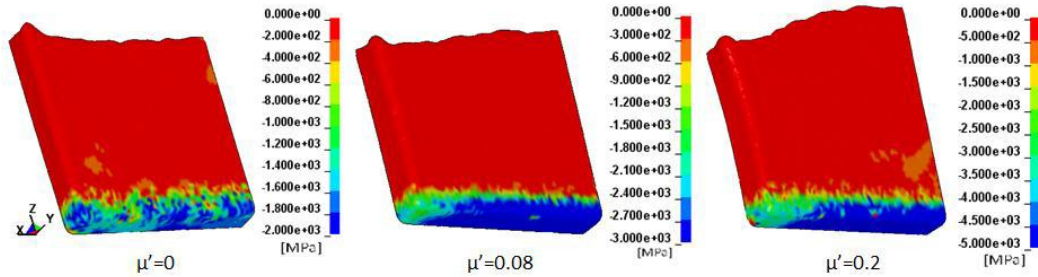


図 4-4-4 x 軸方向の応力分布

解析で用いたパンチ形状を図 4-4-5 に示す. パンチ(A)は長辺のランド高さが 3[mm]で一定であり, パンチ(B)は長辺中央部のランド高さが 40[mm]であり, パンチ(C)は長辺中央部のランド高さが 60[mm]のパンチである. 解析モデルをスラグとパンチ, ダイの 3 部分で構成した.

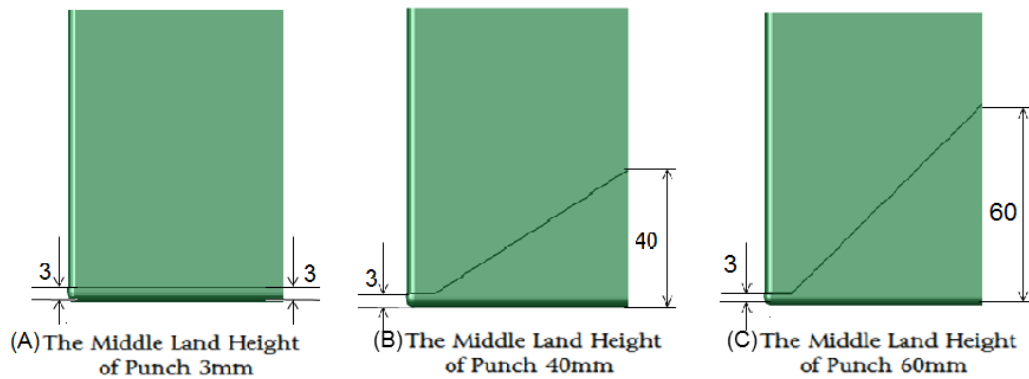


図 4-4-5 解析に用いたパンチ形状

拘束条件及び材料特性は先述と同様である. 解析で得られたケース形状について図 4-4-6 に示す. 図 4-4-6 より, 長辺中央部のランド高さを 60[mm]としたパンチにおいて, ケース長辺での変形速度の差が小さくなった. これは, ランド部分に材料が接触することによって, 変形と反対方向に摩擦力が発生し, それによって長辺中央部でのケース高さが小さくなったからであると考えられる.

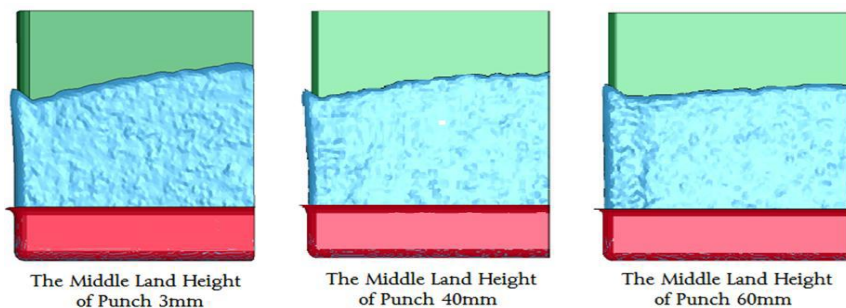


図 4-4-6 解析で得られたケース形状

ランド高さを変更した時の解析結果から, 長辺中央部のランド高さを 60[mm]としたパンチを用いることにより, ケース長辺での変形速度の差を小さくできると分かった. これを実証するために, ランド高さ変更パンチを用いて, インパクト成形実験を行うことにした. 実験条件は, A3003 のスラグを用いスラグ及び金型の寸法は 3-2 と同様, 冷間鍛造プレス K1-6300E(アイダエンジニア

アリング製)を使用しパンチ速度を 24[SPM]で行った. また, 実験に使用したランド高さ変更パンチを図 4-4-7 に示す. 実験により成形したケースを図 4-4-8 に示す. 図 4-4-8 右下に示したように, 左右の長辺の高さが異なってしまった.



図 4-4-7 実験用ランド高さ変更パンチ

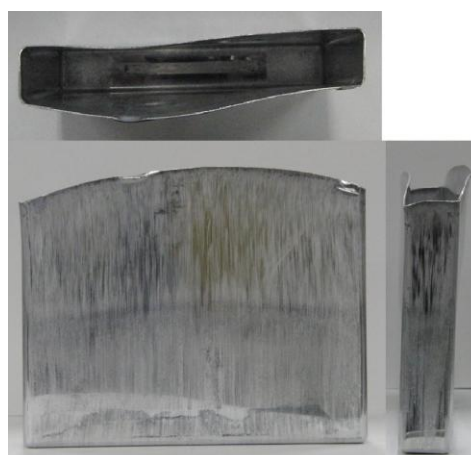


図 4-4-8 成形品

インパクト成形法では, ダイとパンチの中心からのずれからクリアランスに差がうまれた場合, クリアランスの大きい方へ多くの材料が流れていくことが分かっている. しかし, 今回の場合, 左右の長辺側の板厚に差はないため, クリアランスに差はなかったと思われる. パンチのランド面であるが, ラッピング加工を施しているものの, 新品パンチであるために, 摩擦係数が均一でなかったと考えられる. このため, 摩擦の小さかった右側の長辺に材料が多く流れ, ケース高さが大きくなったと考えられる. 図 4-4-6 と図 4-4-8 を比較すると, ランド高さ変更パンチを用いて成形したケース形状と解析で得たケース形状は異なっていた. この原因について考える. この原因についても, 解析ではすべての面で一定, 一様の摩擦状態となっているが, 成形実験で用いたパンチは新品であったために摩擦にばらつきがあったためであると考えられる.

4-5 高温スラグによるインパクト成形実験

インパクト成形加工の問題点に割れや凹みなどの諸問題がある. 割れ及び凹みの原因として長辺側と短辺側の材料流れの違い, インパクト成形加工時に発生する加工熱などが考えられる. そこでインパクト成形時にスラグ温度を再結晶温度付近まで高温にすることで, 変形能上昇や加工熱の影響を低減させることが可能であると考えることが出来る. まずは小型金型を用い高温スラグでのインパクト実験を行った. スラグ材料は A3003 を用い, 潤滑剤はステアリン酸亜鉛を用いた. 矩形スラグ及び金型寸法を図 4-5-1 に示した. 実験条件として AC サーボプレス機(コマツ製 H1F200)を用いスラグ温度を常温, 100, 150, 200, 250, 300, 350[°C]及びパンチ速度を 20, 208, 375[mm/s]で行った. 実験で得られた各条件時の成形荷重を図 4-5-2 に示した. 各パンチ速度においてスラグ温度が 250°C までは成形荷重が低下する傾向にあるが, 300°C 以上は荷重が上昇傾向にある. この原因は潤滑剤が高温に対応できていないと考えられ今後潤滑剤の改良が必要である.

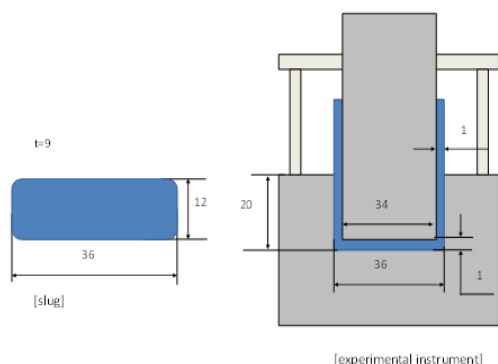


図 4-5-1 矩形スラグ及び金型寸法

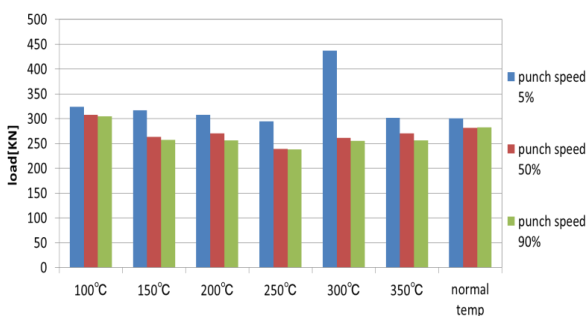


図 4-5-2 成形荷重

またスラグ温度が常温及び 100℃では各パンチ速度での成形荷重は大きな差は生じていないが、150~250℃においてパンチ速度が増加するに従い成形荷重が減少傾向にあることが分かった。勿論スラグを高温にすることで変形能が高くなり温度が上昇するに従い荷重が減少していることは理解できるが、パンチ速度を高速にするに従い荷重が減少している原因としては常温では見られなかったひずみ速度依存性がスラグ温度を高温にするに従い大きくなっていることが考えられる。次に各条件での成形品の寸法を計測した。計測位置として図 4-5-3 に示すように長辺側の中央部と長辺側端の高低差を計測した、つまりミミの大きさを計測したことになる。計測結果を表 4-5-1 に示した。すると高温スラグを用いた時に図 4-4-4 に示したようにミミの大きさが小さい物が成形できた。

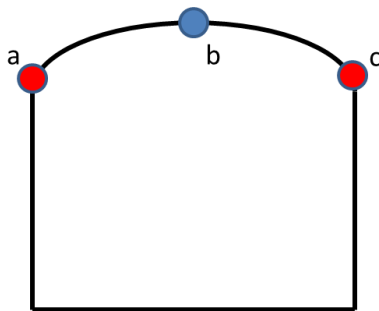


図 4-5-3 計測位置

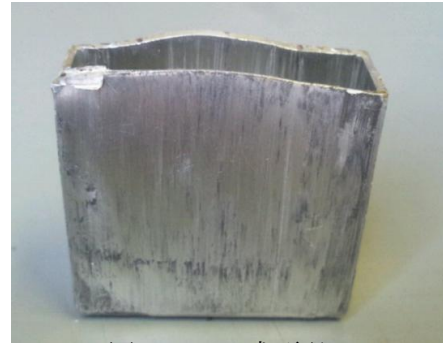


図 4-5-4 成形品

表 4-5-1 成形品寸法(高低差)

高低差[mm]	normal temp	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃
Punch speed 90%	3.23	3.13	3.40	3.79	4.32	2.40	2.875
Punch speed 50%	3.50	5.13	3.46	3.66	3.33	2.36	3.625
Punch speed 5%	3.11	3.51	3.63	3.78	3.22	2.40	

スラグ温度が 300, 350℃でミミの大きさ(高低差)が小さい成形品が成形できた。この原因として高温スラグにより変形能が高くなり材料が均一に持ち上がっている傾向にあることが分かった。小型である条件下で割れの発生原因である材料流れの不均一さを改善できることが分かったので大型金型を用い同じことが生じるか検証する必要がある。大型金型を用いて高温スラグインパクト成形実験を行った。実験条件は冷間鍛造プレス K1-6300E(アイダエンジニアリング製)を用いスラグ温度は常温, 100, 200, 300℃とし、パンチ速度を 24[SPM]で行った。潤滑剤はステアリン酸亜鉛ではなく高温使用可能なステアリン酸ナトリウムを用いた。実験で得られた各温度での割れ発生結果を表 4-5-2 に示した。成形されたケースを図 4-5-5 に示した。割れの少なかった順は、スラグ温度 100℃=200℃<20℃<300℃となった。

表 4-5-2 各スラグ温度での割れ発生の結果

Temperature[℃]	Slug	Non cracked case	Cracked case	Cracked ratio[%]
20	5	4	1	20
100	5	5	0	0
200	5	5	0	0
300	5	3	2	40

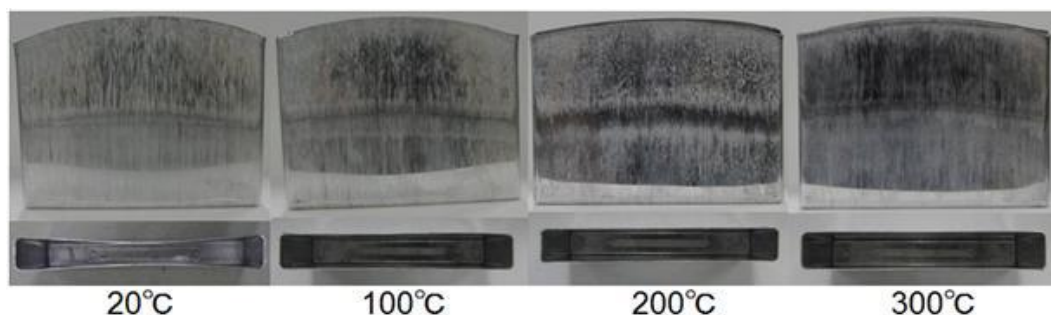


図 4-5-5 各スラグ温度成形品

この結果より、インパクト成形の際に常温のスラグより高温スラグを用いたほうが、ケース割れを防げると分かった。スラグ温度 300℃で割れが発生した原因について考える。スラグ温度 300℃で作製したケースを観察すると、ケース壁面の表面が他の温度で作製したケースに比べて、鏡面となっている。これは、潤滑がうまくいっておらず、材料が成形中にダイの壁面と擦れたために発生したと思われる。よって、300℃では潤滑剤が本来の性能を維持できず、潤滑不良のためにケース割れが発生したと思われる。インパクト成形法特有の欠陥であるケース割れの原因の一つは、ケース高さ差が発生し、これによって長辺中央の左右方向に引張応力が発生したためであると分かっている。高温スラグを用いることで小型金型を用いた時と同様ミミの発生を低減し、均一に材料が持ちあがることで割れの発生を防いだ結果となった。割れのなかったケースについて、ケースの長辺に発生するケース高さの差とケース凹みを測定した。ケース高さ差の測定結果を図 4-5-6 に示す。ケース凹みについての模式図を図 4-5-7 に示す。図 4-5-7 に示す X はケースを上部から見たとき、中央に生じている凹みである。凹みを測定した結果を図 4-5-8 に示す。

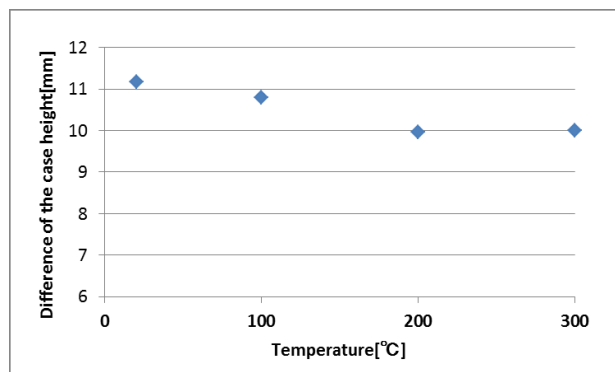


図 4-5-6 ケース高さ測定結果

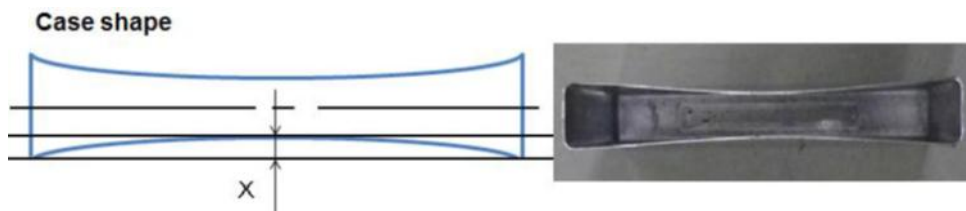


図 4-5-7 ケース凹みの模式図

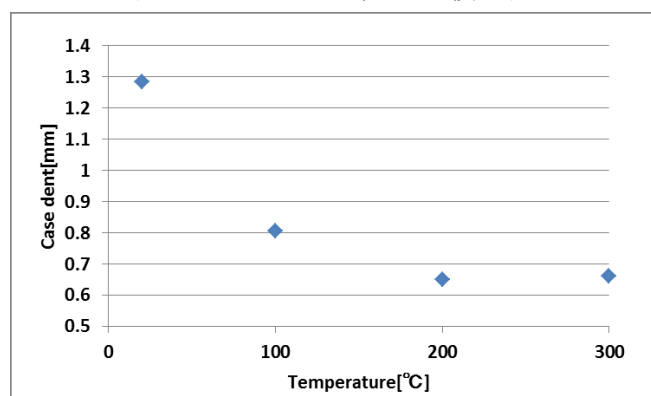


図 4-5-8 凹み計測結果

高温スラグを用いた時、成形品の機械的特性がどのように変化したのかを調査するために、高温スラグを用いて成形したケースの引張試験を行った。図 4-5-9 にケースの引張強度を示す。また、図 4-5-10 にケースの破断伸びを示す。図 4-5-9 と図 4-5-10 より、高温スラグを用いてインパクト成形を行うと、成形品ケースの引張強度が小さくなり、伸びが大きくなると分かった。インパクト成形をしても硬化の小さい材料のほうが、ケースの破断伸びが小さくならず、ケース割れが少ないと考えられる。アルミニウムの再結晶温度である 200℃前後で加工したことにより、

硬化を減少させ、ケースの破断伸びを大きくすることができたためケース割れが減少したと考えられる。

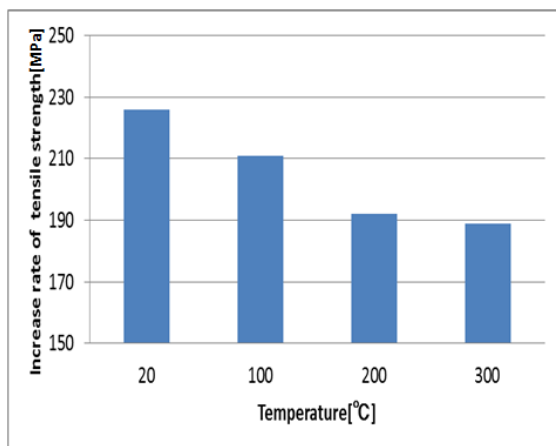


図 4-5-9 成形品の引張強度

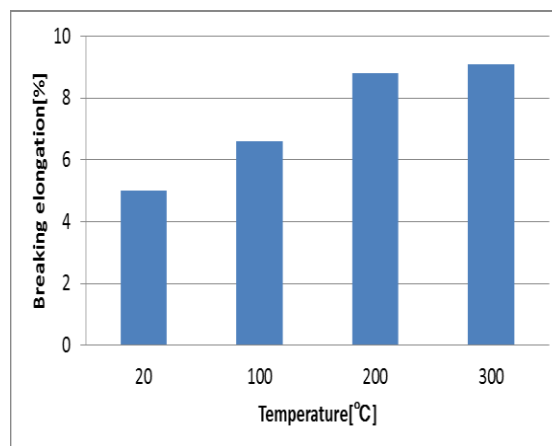


図 4-5-10 成形品の破断伸び

4-6 まとめ

インパクト成形加工時に材料が均一に持ち上がっていないことが、割れや凹みに影響していると考えられる。

インパクト成形時の材料流動について、スラグへのマーキングや高速度カメラでの撮影結果の解析を行った結果、場所による材料の変形速度の差によって、長辺中央部に左右方向の引張応力が発生すると考えられる。

重回帰分析により、材料成分、特性とインパクト成形時の割れ発生の関係について解析し、有効な知見が得られた。

シミュレーション解析により、インパクト成形時の潤滑剤の効果、パンチ形状の影響を把握した。

高温スラグのインパクト実験を行い、その有用性と問題点を確認できた。

第5章 全体総括

- ① 矩形成形品は、中央部と端部で材料の供給範囲が違い、中央部の供給過多、端部の供給不足の影響で、加工途中に長辺側側面に引張ひずみ（応力）が発生していると推測される。
- ② インパクト成形時に使用する潤滑剤の潤滑能が良好であれば、成形荷重が低下するとともに、成形品の長辺中央部と短辺部との差が小さくなることが確認された。このことは、シミュレーション計算の結果とよく一致する。ただ、加工条件が厳しくなると、潤滑剤の効果は低下する。
- ③ 成形品の形状をそろえ、同時にばり取りと面取り作業を行う切削機を導入したが、良好な性能を示し、安定した生産が可能となった。
- ④ 強加工で成形性を確保するためには、材料組織の微細均一が必要である。そのためには、鋳造時の冷却速度を速くすることも有効な方法であることが確認できた。またTiやZrの結晶微細化に有効な金属の最適用量も重要であった。
- ⑤ 材料の強度と加工性を確保するためにアルミに添加する金属元素をアルミ中に固溶することも重要で、加工時の割れの起点になる添加金属元素の量と形態を制御することが重要であることも確認出来た。
- ⑥ CC材は、DC材比べ冷却速度が速いために結晶粒がかなり細かい。特に板表面の近傍が微細な結晶粒である。DC材は、板表面近傍は微細組織が少し認められるが、板中央部を含めた大半部分は、圧延組織である。
- ⑦ EPMAマッピング組織の調査の結果、インパクト加工では、晶出物が割れの起点になるので、微細均一に分散させることが必要であることが判明した。
- ⑧ インパクト成形加工時に材料が均一に持ち上がっていないことが、割れや凹みに影響していると考えられる。
- ⑨ インパクト成形時の材料流動について、スラグへのマーキングや高速度カメラでの撮影結果の解析を行った結果、場所による材料の変形速度の差によって、長辺中央部に左右方向の引張応力が発生すると考えられる。
- ⑩ 重回帰分析により、材料成分、特性とインパクト成形時の割れ発生の関係について解析し、有効な知見が得られた。
- ⑪ シミュレーション解析により、インパクト成形時の潤滑剤の効果、パンチ形状の影響を把握した。
- ⑫ 高温スラグのインパクト実験を行い、その有用性と問題点を確認できた。