

「マグネシウム鍛造部材 技術開発プロジェクト」

プロジェクトの詳細説明（公開）

研究開発項目①「マグネシウム試作鍛造部品の
評価、解析、データ集積」

- ・(独)産業技術総合研究所
- ・(財)素形材センター

平成23年11月18日

p.1/37

研究開発項目① 背景

研究の必要性

現状のマグネシウム合金鍛造素材(押出材)を現状の鍛造装置(メカニカルプレス)で試作鍛造した部材の特性評価から次の結論を得た。

- ・400°Cの鍛造では割れの発生は無いが、鍛造部材の強度は素材と同等以下。
- ・鍛造温度250°Cでは、鍛造部材の強度は素材を超える場合もあるが、割れが発生。


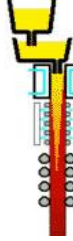
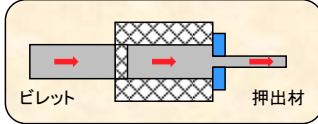

マグネシウム合金鍛造の課題

- 1) 鍛造素材として押出材を使用するため部材が高コスト化。
- 2) 鍛造による部材強度の向上が不十分。



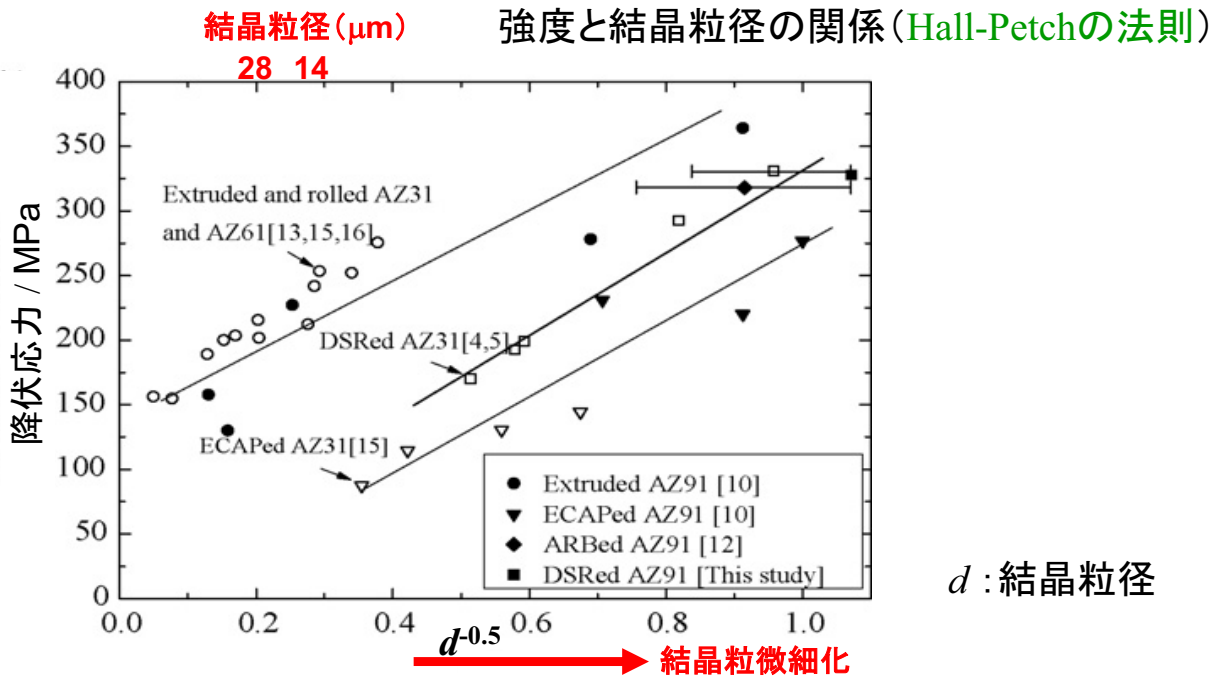
高機能マグネシウム鍛造部材創製のためのシンプルで低コストの
鍛造技術の開発が必要

マグネシウム鍛造部材用素材製造プロセスの特徴と比較

	現状 通常押出材製造工程	本研究開発 連続鍛造材製造工程
	 <p>押出装置</p>	 <p>連続鍛造装置</p>
	 <p>押出の模式図</p>	 <p>連鍛ビレットの例</p>
工程	(連続) 鍛造 ⇒ 均質化焼鈍 ⇒ 押出 ⇒ 鍛造	(連続) 鍛造 ⇒ 鍛造
コスト	現状で3000~5000円/kg	1000円/kgが目標
利点	既存設備の利用可能 サイズ、形状の自由度大 大量製造可能	・低コスト化可能(大量生産)
問題点	複雑な組織制御プロセス 高コスト(現状) 低降伏強度(低疲労限)	・ビレット径 & 合金系に制限あり(未トライ) ・粗大結晶粒径 ・低降伏強度(低疲労限)

事業原簿
p.III-2.1-9

マグネシウム合金の強度を支配する因子



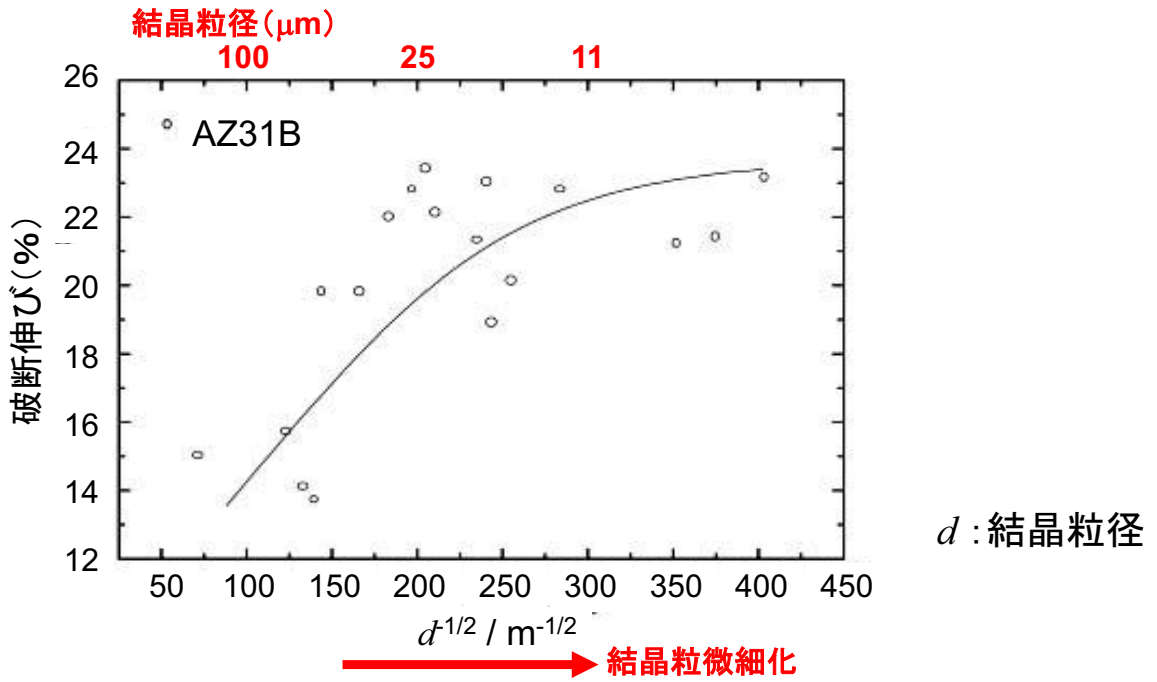
W.J.kim et al., *J. Alloys and Compounds*, vol.460(2008), 289-293

結晶粒径が細かいほど、室温での降伏応力は大きくなる。

マグネシウム合金の高強度化 → 結晶粒微細化

事業原簿
p.III-2.1-10

結晶粒径と破断伸びの関係

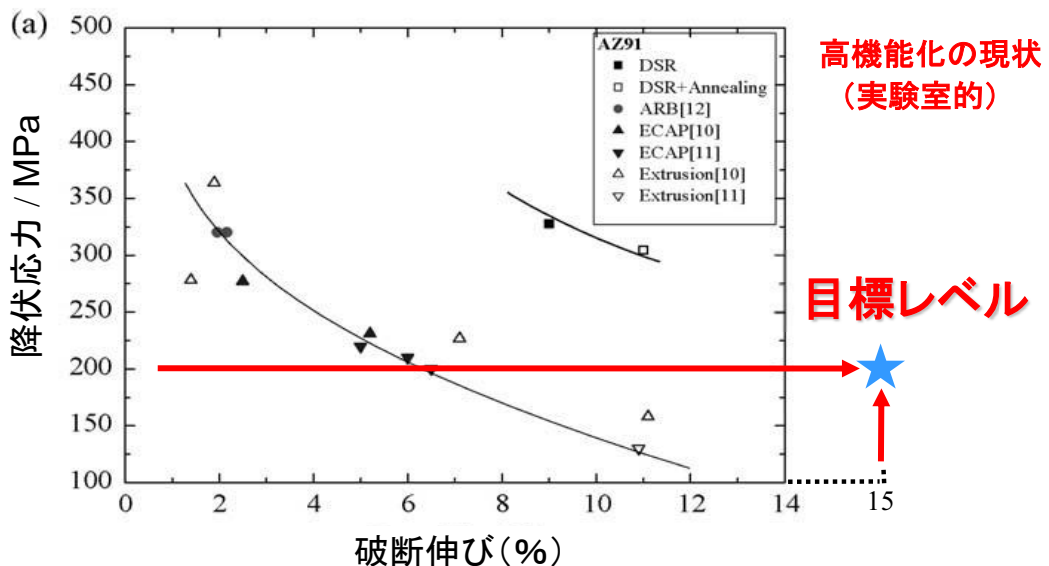


佐藤雅彦、加治屋強、八代利之、軽金属, 11(2004), 465

結晶粒径が細かいほど、室温での伸びは大きくなる。

材料の成形性向上 → 結晶粒微細化

マグネシウム合金の強度と伸びの関係



W.J.kim et al., J. Alloys and Compounds, vol.460(2008), 289-293

強度と伸びはトレードオフの関係



強度と伸びのバランスのよい組織を作り込むことが重要

高信頼性マグネシウム合金鍛造部材作製のためのキーポイント

- ・鍛造素材: 易成形加工性 ⇒ 微細結晶粒組織 (結晶粒径10 μ m以下)
- ・鍛造部材: 高強度・高延性 ⇒ 微細結晶粒組織 (結晶粒径10 μ m以下)

鍛造プロセスにおいて、結晶粒微細化を実現することが重要。



鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性・マイクロ組織の関連性を理解することが必要。



そこで次のように最終目標を設定した。

研究開発項目①

「マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積」

【最終目標(平成22年度末)】

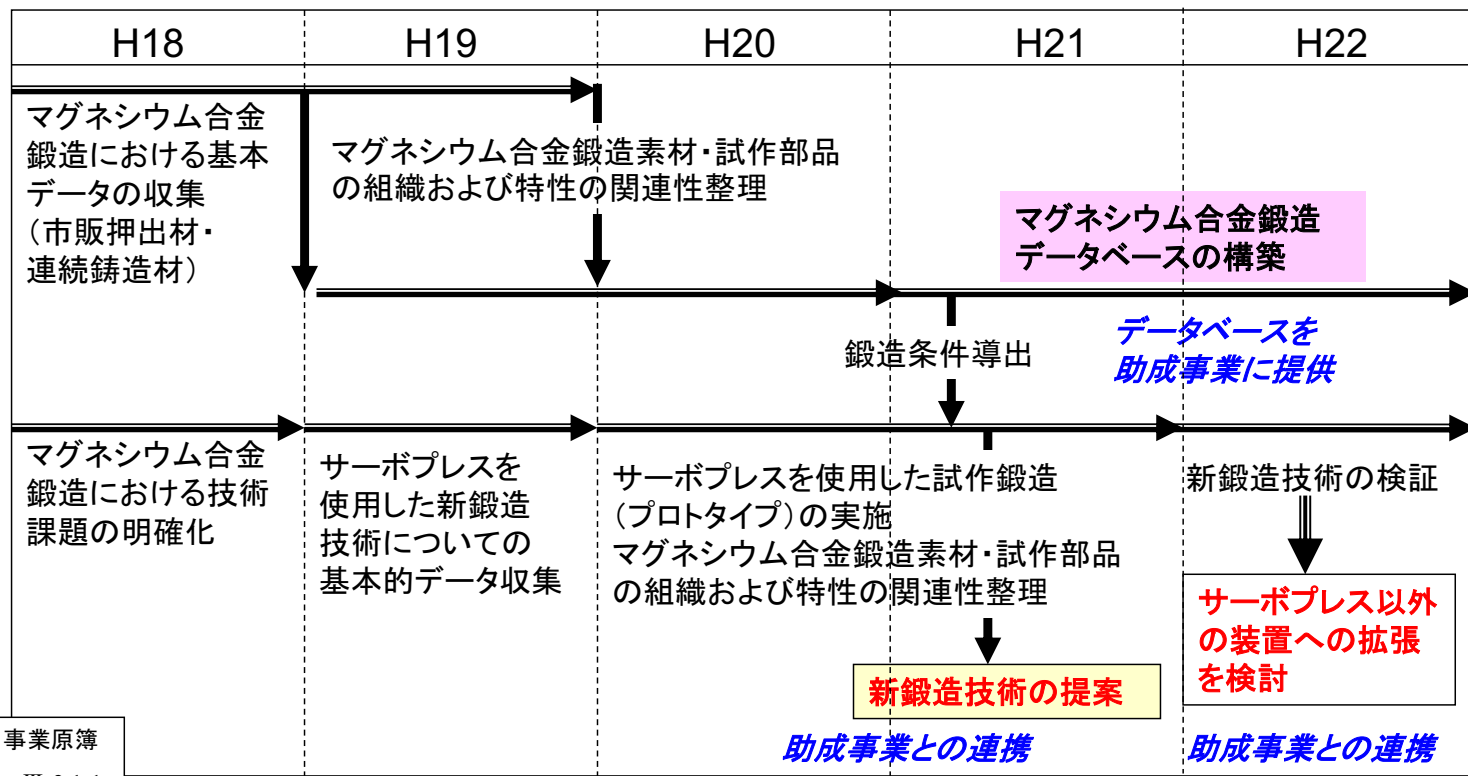
鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。

【目標の設定根拠】

マグネシウム合金の鍛造工程を理解するためには、鍛造素材と鍛造後の鍛造部材特性の関係を明らかにする必要がある。

本研究課題の目的と全体概要

低コストの鍛造素材として期待される**マグネシウム合金連続鍛造材**を対象とした**新規鍛造技術を開発**する。



研究開発の達成度

【最終目標(平成22年度末)】

鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。

	達成度	根拠	今後の課題
鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理	○	鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造データベースを構築した。	データの追加によるデータベースの充実化
鍛造部材の評価方法を確立する	○	マグネシウム合金鍛造部材の評価を行なう場合に留意すべき点を明らかにした。	

研究開発項目①

「マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積」

具体的開発内容

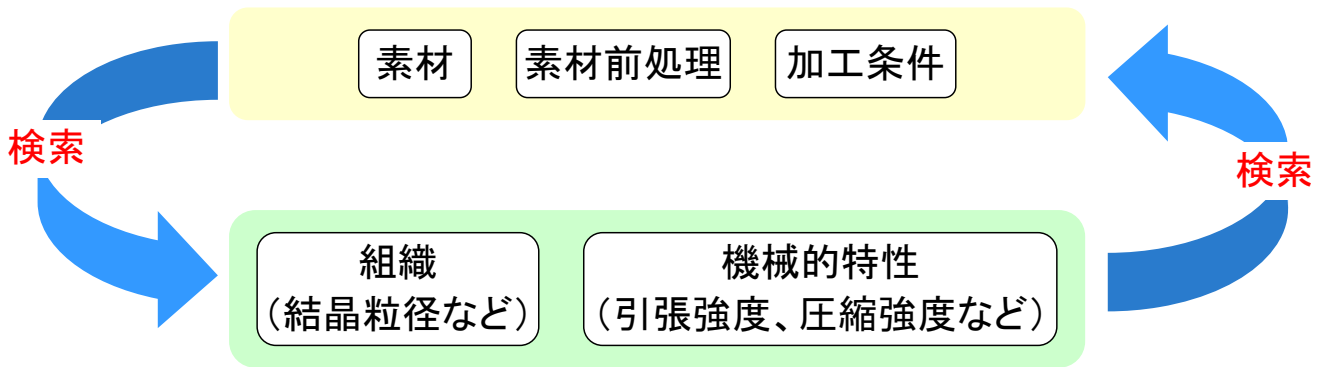
- (1) モデル鍛造において、素材特性・加工条件・部品特性の関連性整理とデータ集積を行い、**鍛造データベース**を構築する。
- (2) **マグネシウム合金連続 casting 材**を対象とした**鍛造プロセス**を構築する。
- (3) マグネシウム合金鍛造部材の**評価方法**を確立する。

検討内容ー1)

鍛造データベースの構築

データベースの構築と意義

◆基盤研究成果(集中研)を助成事業に活用するためのツール



データベースを利用すると...

- ある素材をある条件で加工した場合、できたものの組織や機械的特性は？
- ある素材をある条件で加工する場合、どのくらいの荷重が必要なのか？
- ある組織や機械特性を持つ鍛造品を作る場合、どのような条件で加工するのか？

といった情報が得られる。

事業原簿

p.III-2.1-28

企業現場で使える／使い易い生きたデータベース。

p.13/37

鍛造データベースの構成

鍛造素材DB、圧縮試験DB、試作鍛造DB、鍛造事例集、から構成される。

鍛造素材DB
素材の組織、引張試験、圧縮試験等

The screenshot shows a software interface with a table of material data on the left and a graph of test results on the right. The graph plots stress against strain, showing a peak followed by a drop.

圧縮試験DB
高温圧縮試験結果

The screenshot displays a graph of stress-strain curves for high-temperature compression tests, with several curves showing different material behaviors under heat.

試作鍛造DB
サーボプレスによるモデル材の鍛造

The screenshot shows a data entry form for forging parameters and a photograph of a forged metal component, likely a piston or similar part, with a blue arrow pointing to a specific feature.

鍛造事例集
Mg製鍛造部品の紹介

The screenshot features a grid of images showing various forged magnesium alloy parts, such as brackets and connectors, with accompanying text descriptions.

事業原簿

p.III-2.1-28

p.14/37

データベースの内容

データベース名	概要	素材種類	主なデータ内容
鍛造素材DB	鍛造に用いられる各種素材の特性データベース	AZ61 押出材 AZ80 押出材 ZK60A 押出材 ACM722 ダイキャスト材 ACM522 ダイキャスト材	組織観察、引張試験、圧縮試験
圧縮試験DB	高温圧縮試験結果のデータベース *長岡技術科学大学より提供された87データを含む	AZ91 鋳造材 AZX911 鋳造材 ACM522 ダイキャスト材 AZ61 押出材 AZ80 押出材 ZK60 押出材	圧縮試験、組織写真、引張試験 (鍛造加工マップ)
試作鍛造DB	サーボプレス等により作製された試作鍛造品に関するデータベース *宮本工業、菊水フォーシングにおいて実施された実験結果を含む	AZ91 鋳造材 AZX911 鋳造材	組織写真、引張試験
鍛造事例集DB	製品あるいは製品に近い試作品の事例集 *宮本工業、奥村鍛工、菊水フォーシングより提供されたデータ	AZ61 AZ80 ZK60 ACM522	外観写真、組織写真、引張試験

事業原簿

p.III-2.1-29

p.15/37

検索画面の例(試作鍛造データベース)

条件入力による検索機能を持つ。

試作鍛造データベース

検索条件 No. 1/1

形状: H19試作鍛造品(前鍛造のみ(集研研)) H19試作鍛造品(成形済(集研研)) H21試作鍛造品(集研研(宮本工業))

素材: 材質 AZ91 AZX911 前処理 HOMO なし

鍛造条件: 鍛造タイプ Typ#01 前鍛造のみ Typ#02 前鍛造+成形:一工程 Typ#03 前鍛造+成形:二工程

前鍛造: 鍛錬成形比 材料温度(℃) 金型温度(℃) 鍛造速度(mm/s) 金型コーティング CN TiAlN TiAlSiCN TiC TiN なし

成形: 材料温度(℃) 金型温度(℃) 鍛造速度(mm/s) 金型コーティング CN TiAlN TiAlSiCN TiC TiN なし

後処理: T5 T6 なし

引張試験: 強度(MPa) 耐力(MPa) 伸び(%) 試験温度(℃) 室温

組織観察: 平均結晶粒径(μm) 再結晶率(%)

検索

試作鍛造データベース

検索結果表示

レコード No. 1/42 (全330)

No. S0025

形状: H19試作鍛造品(集研研):成形済(Shape#002) 装置: デジタルサーボプレス

材質: AZ91 連続鋳造材(DC鋳造材) プラック材No.FB002

前処理: 均質化処理 410℃ 24h

鍛造タイプ: 前鍛造+成形:一工程(Typ#02) 鍛造条件No.FC014

前鍛造: 鍛錬成形比 1.4 温度 材料: 300℃ 金型: 320℃ 鍛造速度 1mm/s 金型コーティング なし 潤滑 材料側: MoS2のみ 金型側: MoS2のみ 前鍛造後の冷却

成形: 温度 材料: 300℃ 金型: 320℃ 鍛造速度 1mm/s 金型コーティング なし 潤滑 材料側: MoS2のみ 金型側: MoS2のみ 成形後の冷却 水冷(金型内の保持時間15sec未満)

下死点: 後処理 なし

組織観察

採取場所	平均結晶粒径	再結晶率
bot	5.6 μm	94%
wall-1	5.0 μm	96%
wall-2	5.2 μm	82%

引張試験(試験条件)

採取場所	試験温度	強度	耐力	伸び
bot	室温	348MPa	241MPa	17%
wall	室温	343MPa	212MPa	15%

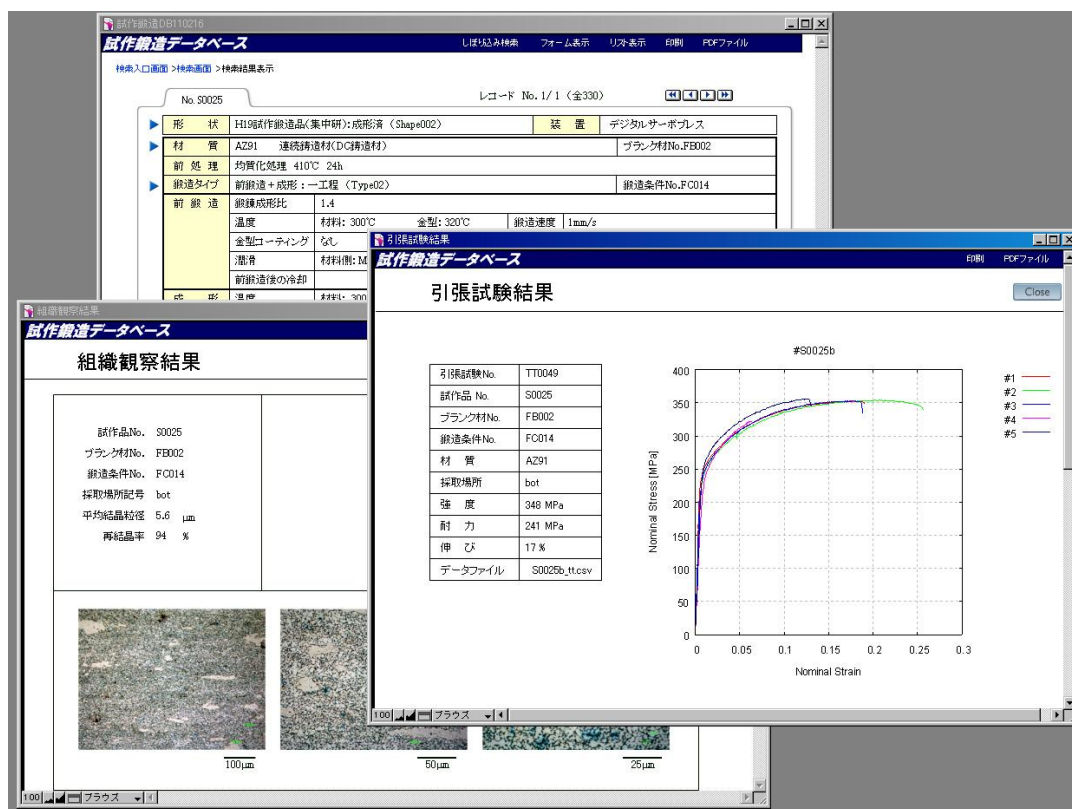
クリックすると詳細画面を開く

事業原簿

p.III-2.1-30

p.16/36

検索結果の例(試作鍛造データベース)



事業原簿
p.III-2.1-31

マグネシウム合金連続鑄造材の鍛造データをデータベース化。
世界初の成果！

p.17/37

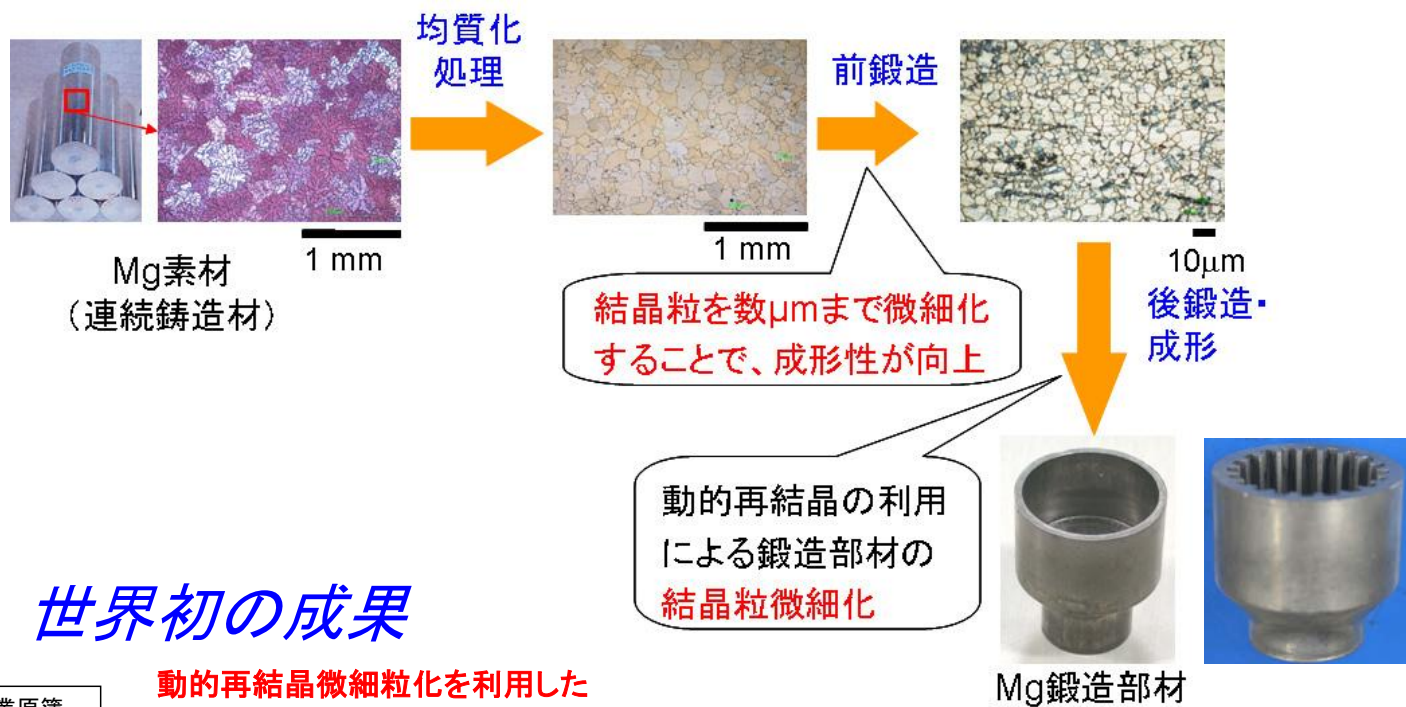
検討内容-2)

マグネシウム合金連続鑄造材の 最適鍛造技術の構築

p.18/37

新規鍛造プロセスの概念図

動的再結晶による結晶粒微細化の効果を利用したマグネシウム合金連続鋳造材の鍛造プロセスを構築



世界初の成果

事業原簿
p.III-2.1-11

動的再結晶微細粒化を利用した鋳造材からの直接鍛造プロセスは世界初

p.19/37

サーボプレスによる新規鍛造技術の開発

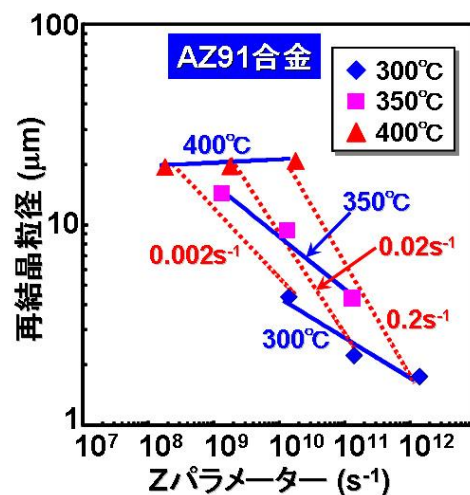
マグネシウム合金の動的再結晶粒径は、温度や加工速度などに大きく依存する。



したがって、本研究開発で検討している動的再結晶を最大限に活用した鍛造プロセスでは、鍛造条件の精密な制御が重要となる。



そこで、従来のメカプレスではなく、任意の位置でスライドの速度を任意に設定可能といった、特長を持つサーボプレスによる新規鍛造技術を開発する。



AZ91マグネシウム合金(均質化処理材)の再結晶粒径のZパラメータ依存性(鎌土ら)

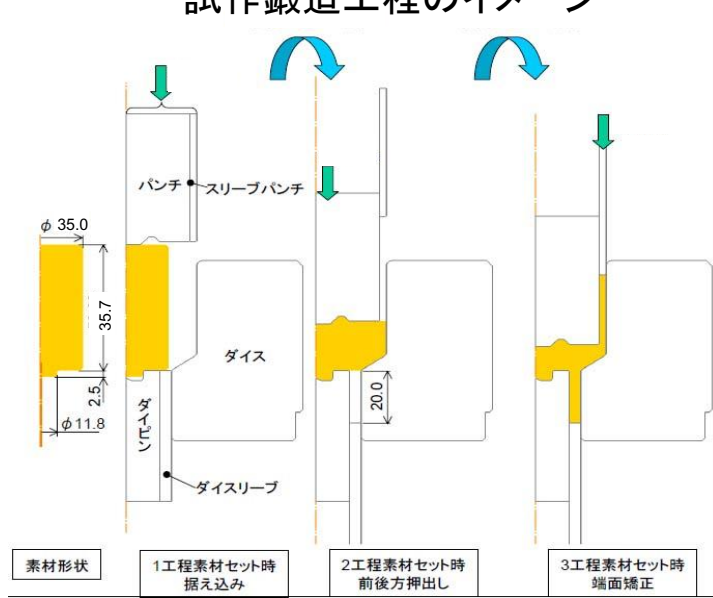
事業原簿
p.III-2.1-11,12

p.20/37

サーボプレスによる新規鍛造工程の例

プロジェクト集中研にて実施

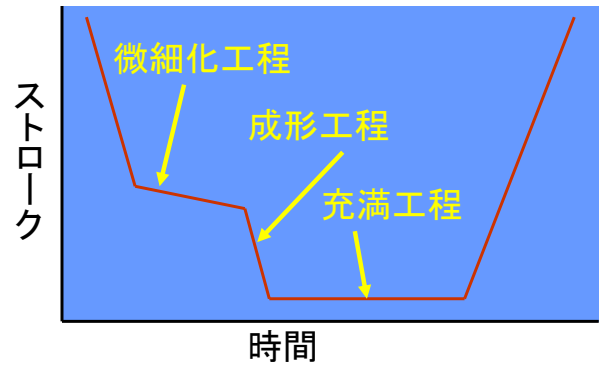
試作鍛造工程のイメージ



結晶粒微細化 → 成形

(一工程、一つの金型で実施し、省工程化を実現)

加工速度を任意に制御



試作鍛造品外観
(鍛造温度300°C)

事業原簿
p.III-2.1-12,13

装置の制約で鍛造速度の上限は10mm/s

サーボプレスによる新規鍛造技術の開発

○ 企業の要望: 速い速度(100mm/s程度)で鍛造を行ないたい。

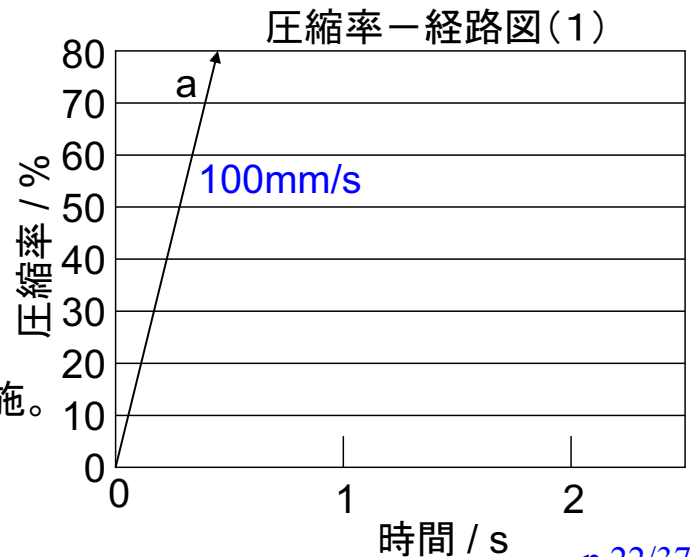
そこで、サーボプレスによる鍛造を10mm/sよりも速い速度で行なうプロセスを、企業と共同で検討した。

助成事業との連携!

コマツ製630tonサーボプレス(HIC630)によるすえ込み鍛造を宮本工業で実施

- 円柱状試験片: 直径40mm×高さ48mm
- 試験片の潤滑: 化成処理皮膜+黒鉛
- 圧縮板の潤滑: 黒鉛塗布
- 試験片および圧縮板の温度: 300°C
- 最終圧縮率: 80%

まずは鍛造速度100mm/sで据え込み鍛造を実施。



事業原簿
p.III-2.1-20

供試材

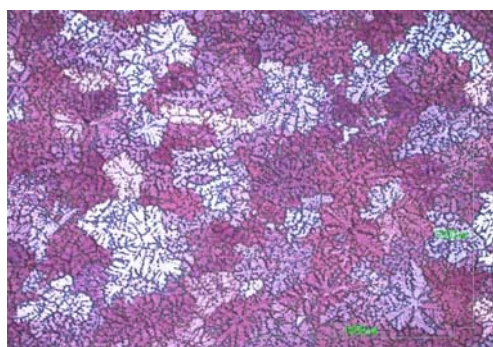
Mg-9Al-1Zn (AZ91) 合金連鑄ビレット(三協マテリアル製)

均質化处理材(HOMO)(410° C、24時間)

試料径: 155 mm

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca
AZ91	9.2	0.90	0.01	<0.002	0.006	<0.002	<0.002	0.003

鑄造まま



$d_{ave} = 290 \mu\text{m}$

1 mm

均質化处理後



$d_{ave} = 150 \mu\text{m}$

1 mm

事業原簿

p.III-2.1-16

p.23/37

鍛造後の外観および内部組織

鍛造速度: 100mm/s 圧下率: 80%

③



①

①



②



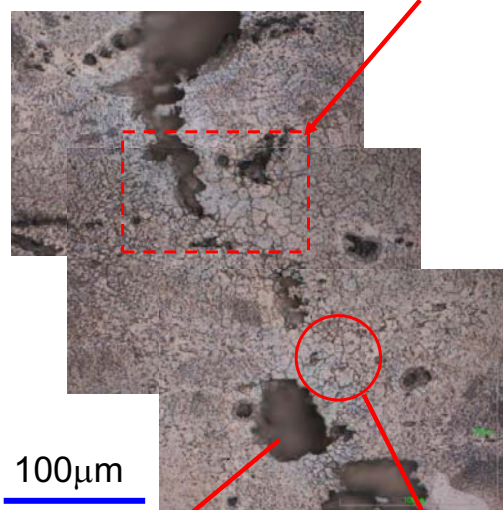
③



○ 側面に多数の亀裂が発生。

○ 変形初期に多数の応力集中箇所が形成され空洞が生じたことを示唆。

クラックは表面から結晶粒界に沿って、空洞を連結する形で内部に進展している。



100μm

内部には空洞が観察された。

結晶粒径は10μm以下まで微細化している。

事業原簿

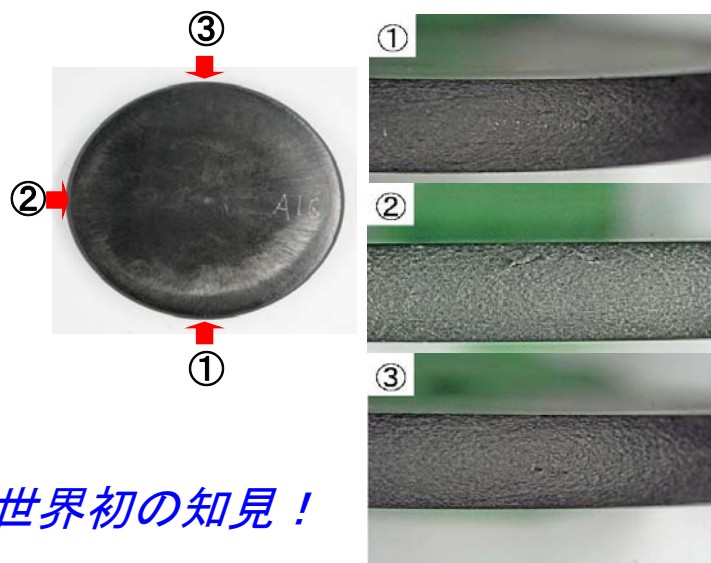
p.III-2.1-21

変形初期に応力集中箇所を少なくする必要がある。

p.24/37

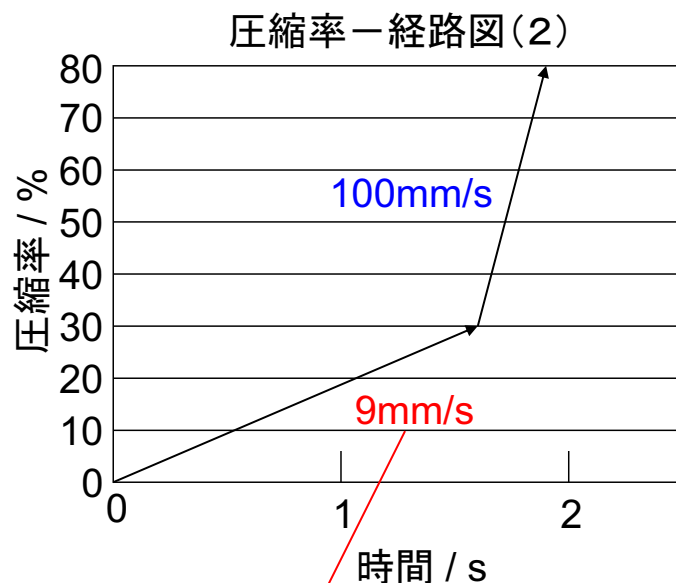
サーボプレスによる新規鍛造工程の検討

圧縮率30%までは9mm/sで据え込み鍛造を行ない、それ以降、圧縮率80%までは100mm/sで据え込み鍛造を実施。



世界初の知見！

○ 低速での圧縮を最初に行なうことで、割れ発生が抑制される。



集中研のサーボプレスの鍛造速度の上限にほぼ一致させる。

鍛造後の内部組織

鍛造速度: 9mm/s ⇒ 100mm/s

圧下率: 30% ⇒ 80%



内部に空洞はほとんど観察されない。

結晶粒径は10μm以下まで微細化している。

○ 変形初期に低速で据え込み鍛造を行なうと、高速での場合に比べて応力集中箇所が少なく、空洞の形成も抑制されることを示唆。

● 連続鋳造ビレットの鍛造性は変形初期の成形条件、とくに変形速度、ひずみ量と温度に依存する。すなわち、組織微細化に適した条件を選ぶことが重要であることを明らかにした。

検討内容－3)

マグネシウム合金鍛造部材の 評価方法の確立

p.27/37

研究開発項目①(3) マグネシウム合金鍛造部材の評価方法の確立

マグネシウム合金鍛造部材の評価

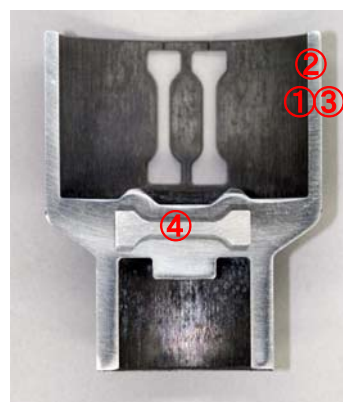
- 企業および集中研での試作鍛造部材を評価するために必要なのは、組織観察および機械的特性である。
- 評価手法としては従来から行なわれているものであるが、鍛造部材の評価を行なう場合に留意すべきポイントを明確化した。

評価手法	評価内容	評価の目的・ポイント
1)ミクロ組織観察	① 結晶粒径	結晶粒微細化の定量的把握
	② 再結晶率	組織均質性の定量的把握
2)室温引張試験	① 引張強度 ② 0.2%耐力 ③ 破断伸び	鍛造部材の機械的特性の把握
3)結晶方位解析	① 集合組織 ② 結晶方位マップ	鍛造部材の組織異方性の把握

マグネシウム合金鍛造部材の組織観察例

○鍛造部材の組織観察

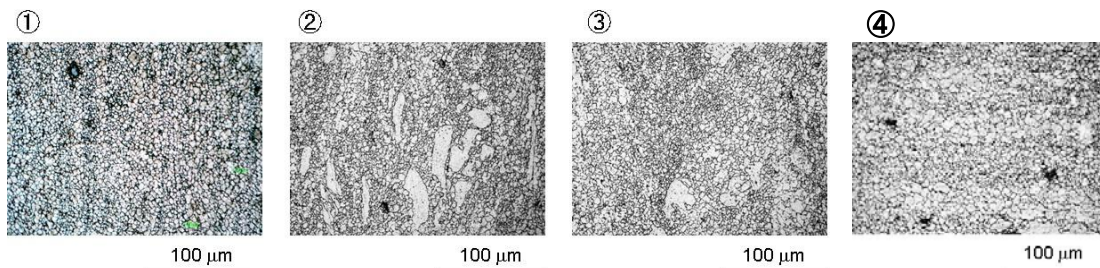
- ①結晶粒径 ⇒ 結晶粒微細化の確認
- ②再結晶率 ⇒ 組織の均質性の指針



Mg鍛造品例

マグネシウム合金鍛造部材の場合、場所によって組織が異なる可能性があるため、**試料採取場所に留意**して観察する。目的に応じて、異なる場所での組織観察を実施する。

部位による組織の違いの例(AZ91)



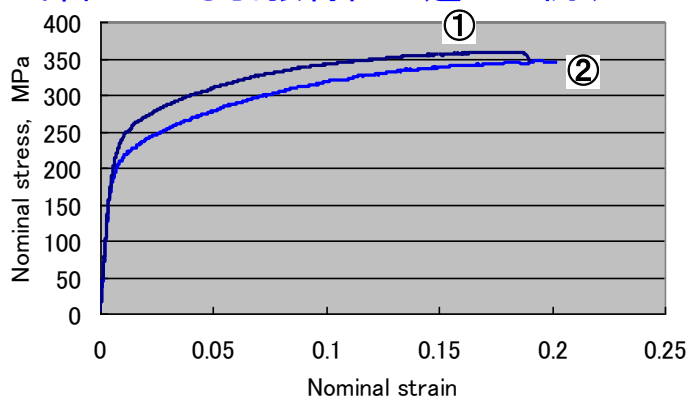
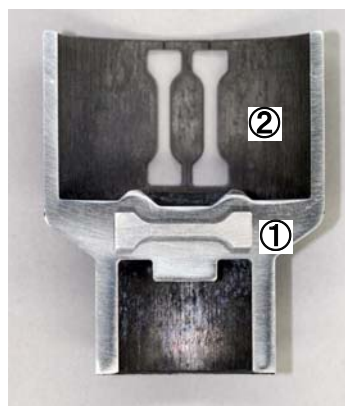
平均結晶粒径	6.0μm	5.5μm	5.5μm	7.5μm
再結晶率	95%	89%	89%	95%

マグネシウム合金鍛造部材の引張試験例

○鍛造部材の引張試験

- 場所による組織の違いにより引張特性が異なる可能性があるため、**試料採取場所に留意**して試験を行なう。目的に応じて、異なる場所から試料を採取して試験を行なう。

部位による引張特性の違いの例(AZ91)

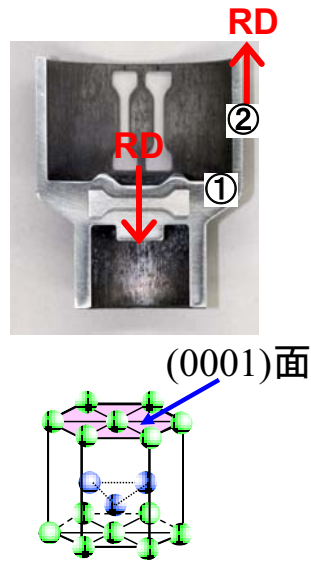


	引張強度	0.2 % 耐力	破断伸び
①	359 MPa	240 MPa	19 %
②	347 MPa	197 MPa	21 %

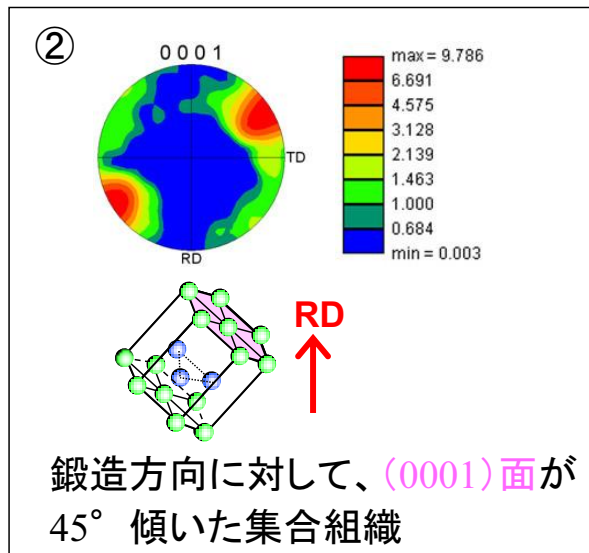
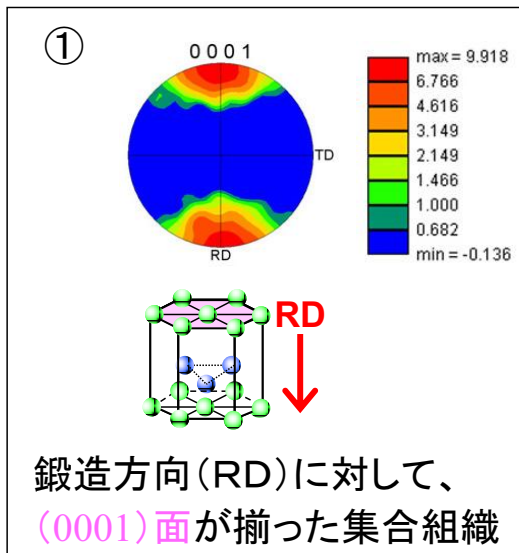
マグネシウム合金鍛造部材の結晶方位解析例

○鍛造品の結晶方位解析

- 結晶方位は機械的特性に影響を与えるので重要である。場所により結晶方位が異なる可能性があるため、**試料採取場所に留意**して解析を行なう。目的に応じて、異なる場所から試料を採取して解析を行なう。



事業原簿
p.III-2.1-26,27



p.31/37

まとめ

p.32/37

成果の意義(1)

○新しい技術領域の開拓

動的再結晶による組織制御と成形を同時に行なう鍛造技術という、**組織制御技術と塑性加工技術を融合した新しいものづくり技術**を開発した。

○成果の水準

サーボプレスを利用して、マグネシウム合金連続鑄造材から一工程で鍛造部品を作製した例は**他にはまだなく、本委託事業の成果が世界初**である。

また、マグネシウム合金連続鑄造材の鍛造データベース構築は世界初の成果である。

成果の意義(2)

○成果の優位性

- 1) 結晶粒微細化を行ないつつ成形を行なうことで、従来技術による鍛造部材よりも優れた特性を有する部材を作製することが可能。
- 2) サーボプレスを使用することで、従来のメカプレスによる鍛造よりも省工程化、部材の高精度化が可能。
- 3) 以上の点で、本研究成果は従来技術よりも優位性を持つ。

○成果の汎用性

組織制御と成形を同時に行なう鍛造技術は、**汎用のメカプレス機への拡張が可能**であるとの見通しを得た。すなわち、本研究で開発された新規鍛造プロセスは汎用性を有すると期待される。

成果の普及

	H18	H19	H20	H21	H22	合計
論文(査読あり)	1			1	3	5
研究発表・講演	1			6	6	13
特許出願						
知財登録				5		5
受賞実績					1	1
展示会への出展				3	3	6

- 知財登録：鍛造データベースを産総研知財部に登録
- 受賞：第19回アルミニウム鍛造技術賞(2011年3月16日)

実用化への見通し

委託事業の成果を助成事業に参加した企業にフィードバックし、企業でのものづくりに活用することで実用化を図る。

実用化に資する委託事業の成果

- ★新鍛造プロセスの開発
 - ・鍛造工程中で結晶粒微細化制御
 - ・サーボプレスの活用(クランクプレスにも適応可能な見通し)
- ★マグネシウム鍛造データベースの構築



マグネシウム鍛造最適化、試作、実用化

- 材料の最適化(高強度、高靱性)、低コスト化
- 機械的特性の確保(高強度、伸び)
- 鍛造加工性の向上、鍛造温度の低温化



- 高品質Mg部品の試作
⇒事業化での品質確保、高生産性、低コスト化に見通し

