

高強度・高靱性(高強靱性)マグネシウム合金の製造技術の開発(第1報)

Development of Manufacturing Technology of Wrought Magnesium (Mg) Alloy with High Strength and High Ductility (Report I)

藤井徳雄* 金子貫太郎* 塩崎修司* 近藤勝義** 護法良憲***

Norio Fujii, Kantaro Kaneko, Shuji Shiozaki, Katsuyoshi Kondoh, Yoshinori Goho

CO₂削減による地球温暖化防止、有限石化エネルギーの有効利用は世界的な課題であり、自動車、鉄道、航空機などの移動体の軽量化はこれらの課題に有効な方策の一つである。したがって、当社は軽量化技術開発のためH16年度からの3年間、NEDO助成事業として大阪大学および(株)ゴーシューとともに高強度・高靱性(高強靱性)マグネシウム合金開発に取り組んで、従来のマグネシウム合金と同等の伸びを有しながら引張強さ・耐力が50~80%増加できる製造技術を開発し、また二つの学会から技術開発賞を受賞したので、その技術に関する研究開発成果を報告する。

The prevention of global warming by the reduction of CO₂ gas emissions and the effective utilization of limited fossil energy are worldwide challenges. Making means of transportation (e.g. automobiles, trains and aircrafts) lightweight is one of the effective solutions to these challenges. Therefore, Kurimoto has for 3 years since from 2004 been developing a wrought Mg alloy of high strength and high ductility in cooperation with Osaka University and Gohsyu Corp., and the financial support of NEDO. This paper reports on a newly developed process that produces an Mg alloy of similar elongation as conventional Mg and 50-80% increase in tensile strength compared to the conventional Mg. Besides, the process has received technical development prizes from two societies.

1. はじめに

マグネシウム(Mg)合金は、地球上で6番目に多い元素で、鉄鋼材料の約1/4、アルミニウム合金の約2/3の低比重を有するなどの特徴を持っているが、アルミニウム合金レベルの高強度化が困難であり、高強度化に伴う靱性(伸び)の低下や、最密六方構造に起因する低温での塑性加工性の問題など実用化を妨げる様々な要因があるため、現状の用途は携帯電話やノートパソコンなどの携帯機器・PDA(Personal Digital Assistant)用筐体部品などのような、強度があまり必要でないものに使用されているに過ぎない。しかし、今まで塑性加工法を利用した結晶粒の微細化¹⁾や急冷凝固プロセスによる組織制御²⁾、直接溶湯圧延法などが検討されてきたが、全ての課題を同時に解決できるような材料・プロセス技術の確立には未だ至っていない。そこで、本研究ではH16年度より独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・大学発事業創出実用化研究開発費助成金を受けて、低温域での成形加工性に優れた高強靱性Mg合金の環境軽負荷型製造技術の構築とその装置開発を実施している。軽量化技術は、世界的課題となっているCO₂排出量の削減などの地球環境問題や原油価格の高騰に起因する省エネ問題などへの有効な方策の一つである。なか

でも、Mg合金は、近年、軽量化素材として着目され、特に自動車用あるいは航空機用部品をはじめとする移動体用構造部材としての実用化ニーズも大きい。このような背景のもと、本研究開発は、まさに大気汚染物質の排出抑制、有限石化エネルギーの有効利用など地球環境への負荷軽減技術を具現化する従来にないMg展伸材の革新的製造プロセス技術の構築と実用化を目指すものである。現在、NEDO助成事業期間の2/3を終えたところであるが、開発した製造法は日本塑性加工学会および日本金属学会から技術開発賞を受賞したので、それらの内容を含めて研究開発成果の現状を報告する。

2. 開発した製造技術・装置とその特徴

2.1 開発した製造技術と装置

上記の課題を鑑み、市場が求める実用化ニーズに対応できるMg合金素形材を開発すべく、粉体技術と塑性加工法を基調とした従来にない組織制御法として図1に示すような高強靱性Mg合金部材製造技術および装置(ロールコンパクト、Roll Compaction/RCP)を開発した³⁾⁻⁶⁾。また量産用RCP装置(RCP200型)全景と双ロール圧延加工部(RCP)、粉碎加工・粉体粒径調整部を図2に示す。図1において、ふるい目サイズで0.5~2mmのMg合金原料粉末はRCPで強加工され、約巾80×厚0.7mmの帯状に圧延された後、続いて粉碎機で0.5~10mmに整粒される。粉碎品は再びRCP加工部に供給されて同様の処理が繰り返し行われる。このようなRCPによる強加

* 機械事業部 マグネシウム合金プロジェクト

** 大阪大学接合科学研究所

*** 株式会社ゴーシュー 新素材開発室

工から粉碎までの一連の加工処理を1パスとして、50パスまで処理を行った。図1の組織写真から判るように結晶粒径が数百 μm の投入原料(AZ31マグネシウム合金)を用いた場合でもRCPによる強加工の結果、粉体素地の結晶粒径は1 μm 未満まで超微細化できる。他方、

省エネ効果のオンライン評価の観点からRCP加工中のロール回転数、圧力、電流値、温度、消費電力などの情報が自動計測・保存される。消費電力などの自動データ収集画面の一例を図3に示す。

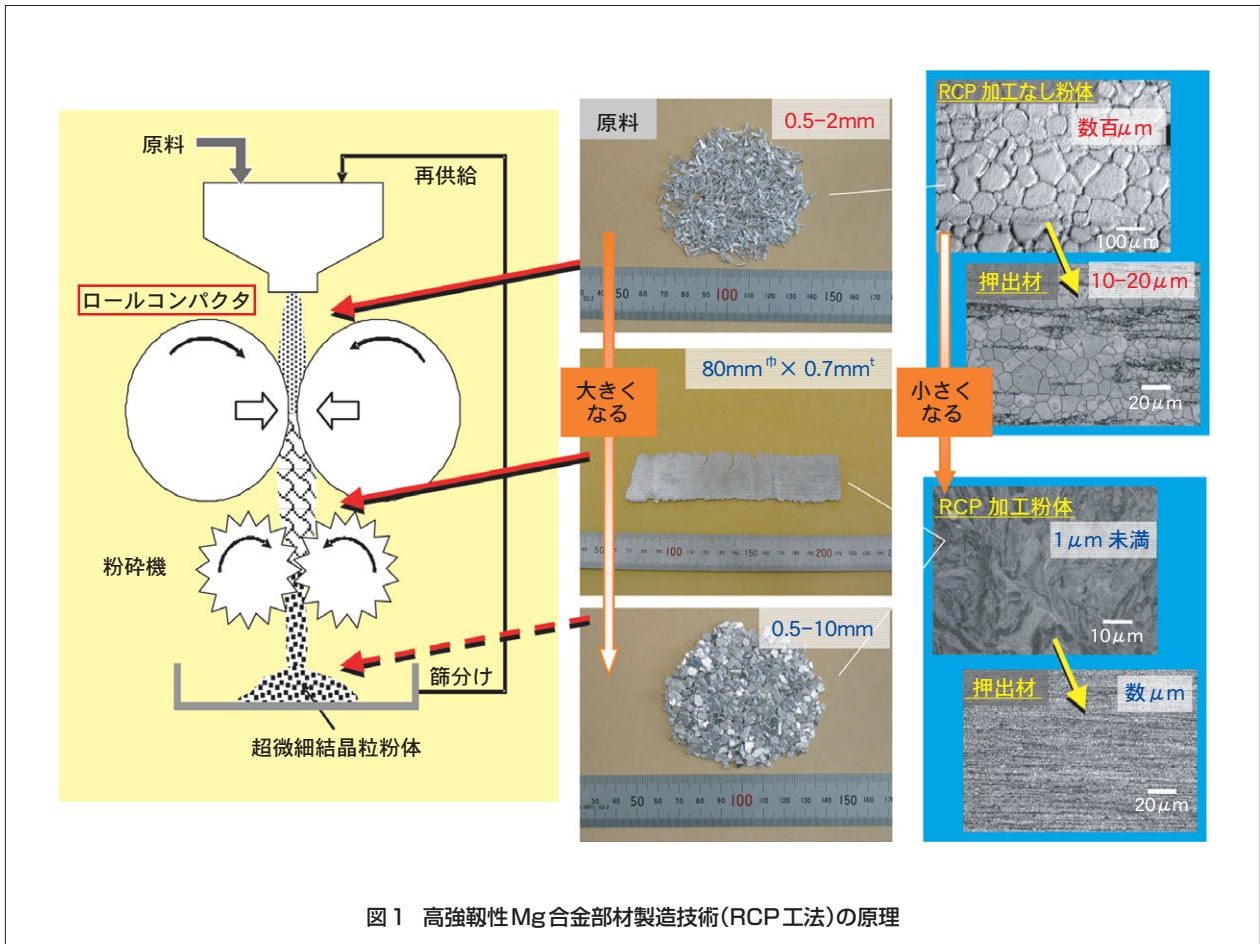


図1 高強靱性Mg合金部材製造技術(RCP工法)の原理



図2 量産用RCP装置(RCP200型)全景と双ロール圧延加工部、粉碎加工・粒径調整部

Microsoft Excel - トレンドグラフ 20051130-1.xls

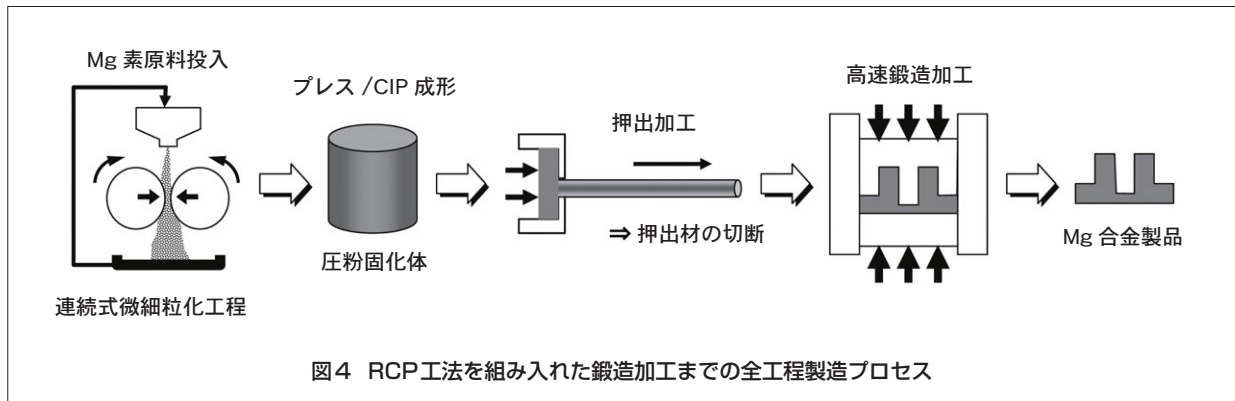
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H) Adobe PDF 質問を入力して(たさい)

Mg合金処理設備 実験機 DATA管理ファイル

ロギング開始時刻	炉1ホップ 炉温	炉2ホップ 炉温	炉3ホップ 炉温	ローコンパ クダ本体温度	油圧ユニッ ト圧力	プレーカ電 流	ローコンパ クダ固定ロー ラ速度	ローコンパ クダ給粉ロー ラ速度	プレーカ速度	カッター速度
	℃	℃	℃	℃	Mpa	A	Hz	Hz	Hz	Hz
	34.4	27.7	20.7	23.1	35.7	4.3	60.0	60.0	60.0	30.0
ロギング停止時刻	ロー ギヤップ 1	ロー ギヤップ 2	ロー ギヤップ 平均値	総括盤一次側 瞬時電力	総括盤一次 側積算電力	ローコンパ クダ固定ロー ラ電力	ローコンパ クダ給粉ロー ラ電力	カッター電力		
	mm	mm	mm	KW	KWh	KW	KW	KW		
データログクリア	0.01	0.00	0.01	13.4	119	0.0	0.0	1.1		

日付	時刻	温度						油圧圧力	電流			
		接続1 D07000 炉1ホップ炉温	接続1 D07001 炉2ホップ炉温	接続1 D07002 炉3ホップ炉温	接続1 D07003 炉クダ本体温度	接続1 D07004 炉クダ固定ローラ温度	接続1 D07005 炉クダ給粉ローラ温度		接続1 D07006 油圧ユニット圧力	接続1 D07007 プレーカ電流	接続1 D07008 カッター電流	接続1 D07009 カッター電流
000:05	05/11/30	09:29:29	15.0	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:10	05/11/30	09:29:36	15.0	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:15	05/11/30	09:29:41	15.1	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:20	05/11/30	09:29:46	15.0	14.4	14.8	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:25	05/11/30	09:29:51	15.1	14.4	14.8	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:30	05/11/30	09:29:56	15.1	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:35	05/11/30	09:30:01	15.1	14.2	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	14.0	0.0	0.0
000:40	05/11/30	09:30:06	15.0	14.3	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	24.7	0.0	0.0
000:45	05/11/30	09:30:11	15.0	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	27.8	0.0	0.0
000:50	05/11/30	09:30:16	15.1	14.2	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	30.9	0.0	0.0
000:55	05/11/30	09:30:21	15.1	14.2	14.8	350.0	350.0	350.0	17.0	34.1	0.0	0.0
001:00	05/11/30	09:30:26	15.0	14.4	14.8	350.0	350.0	350.0	17.0	34.5	0.0	0.0
001:05	05/11/30	09:30:31	15.0	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	34.7	0.0	0.0
001:10	05/11/30	09:30:36	15.1	14.3	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	34.4	0.0	0.0
001:15	05/11/30	09:30:41	15.1	14.4	14.7	350.0	350.0	350.0	17.0	34.7	0.0	0.0

図3 消費電力などの自動データ収集画面



2.2 RCP工法を組み入れた鍛造加工までの全工程製造プロセス

図4に原料粉末のRCP加工から鍛造加工までの全工程製造プロセスの模式図を示す。同図において、RCP加工粉末は円柱状の圧粉固化体に成形して加熱された後、押出装置で丸棒材、板材およびパイプ材等のいろいろな形状の押出材に加工される。この押出材は曲げ・溶接・機械加工など2次加工されて製品化されるものもあるが、鍛造工程で自動車部品などのような大量生産される部品に加工される場合もある。なお、本NEDO事業では、RCP加工技術ならびに製造装置の開発を主たる目的とするが、同図に記載の熱間押出加工ならびに3次元鍛造加工技術の確立も含めたプロセス開発を行った。

2.3 RCP工法の特徴

前図1においてRCP加工を施さないAZ31原料粉末を用いて作製した押出材の結晶粒径は10~20 μmであるが、50パス処理粉末からの押出材の結晶粒は押出加工過程において動的再結晶によって数μmと従来素材の1/10以下の微細組織を形成する。RCP工法の特徴はこのように、RCP加工粉末径が原料粉末より大きくなるにもかかわらず、加工粉末と押出材の結晶粒径は逆に1 μm未満~数μm程度にまで超微細化することである。既存の粉末結晶粒の微細化法ではバッチ式で密閉構造の粉砕機内で強加工してするが、この場合結晶粒だけでなく同時に粉末粒径も微粉化されるので、粉塵爆発などの危険性が高まるなどの欠点がある。しかし、RCP工法では加工粉末の粒径が大きいので、粉塵爆発の危険が無い

安全な製造法であるとともに、次章に示すとおり多くの優れた特性を持つ高強靱性Mg合金部材を製造することができる。

3. 実験結果および成果

3.1 結晶粒の微細化

AZ31B粉末を常温でプレス成形固化し、その粉体固化ビレットを窒素ガス雰囲気中で400℃にて5分間加熱した後、直ちに押出加工(ダイス温度:300℃、押出比:37)を行い、直径φ7.8mmの丸棒材を作製した。図5に押出材の組織観察結果を示す。(a)は原料粉末を用いた場合、(b)は常温で50パス処理した場合の結果である。原料粉末を用いた場合でも温間押出加工時の動的再結晶により結晶粒径は10~20 μm程度にまで微細化している。しかし、(b)に示すようにRCP加工を施すことで押出材の組織はより微細かつ均質なものとなっており、比較的粗大な領域でも粒径は2~3 μmであり、結晶粒が集積した緻密領域ではサブミクロン程度まで微細化している。以上の結果よりRCP加工によって粉末素地に形成された微細組織は、温間押出などのように加工・熱処理工程を経ても顕著な粒成長は生じることなく、本研究開発が目的とする均質微細組織を創製できることを確認した。

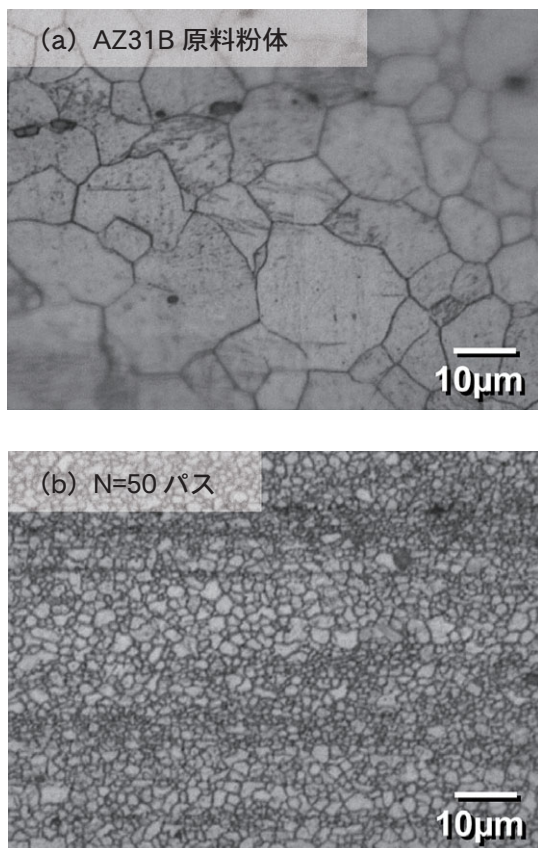


図5 AZ31-RCP押出材の光学顕微鏡による組織観察

3.2 RCP加工粉末の押出材の強度と伸び特性

前述AZ31BのRCP加工粉末の押出材から引張試験片(平行部の直径φ3mm、長さ10mm)を採取し、常温にて歪速度 $5 \times 10^{-4}/s$ の条件下で引張試験を行った。その結果を市販のAZ31B押出材、6061アルミ合金素材(T6熱処理)と比較して図6に示す。溶製ビレットを押出した市販AZ31B材と比較して、RCP加工による微細組織構造を形成することで押出材の引張強さ・耐力はいずれも120~140 MPa程度増大し、破断伸びも向上する。さらに自動車部品などに使用されている6061アルミ合金と比較しても同等以上の特性を有していることから、両者の比重差を考慮するとRCP加工Mg合金を部材に適用することで30~35%の軽量化効果が期待できる。

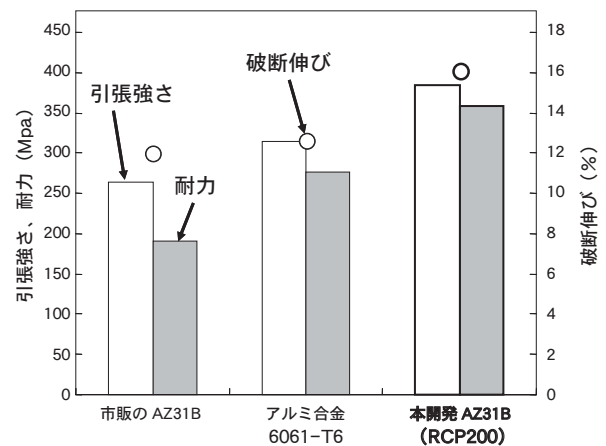
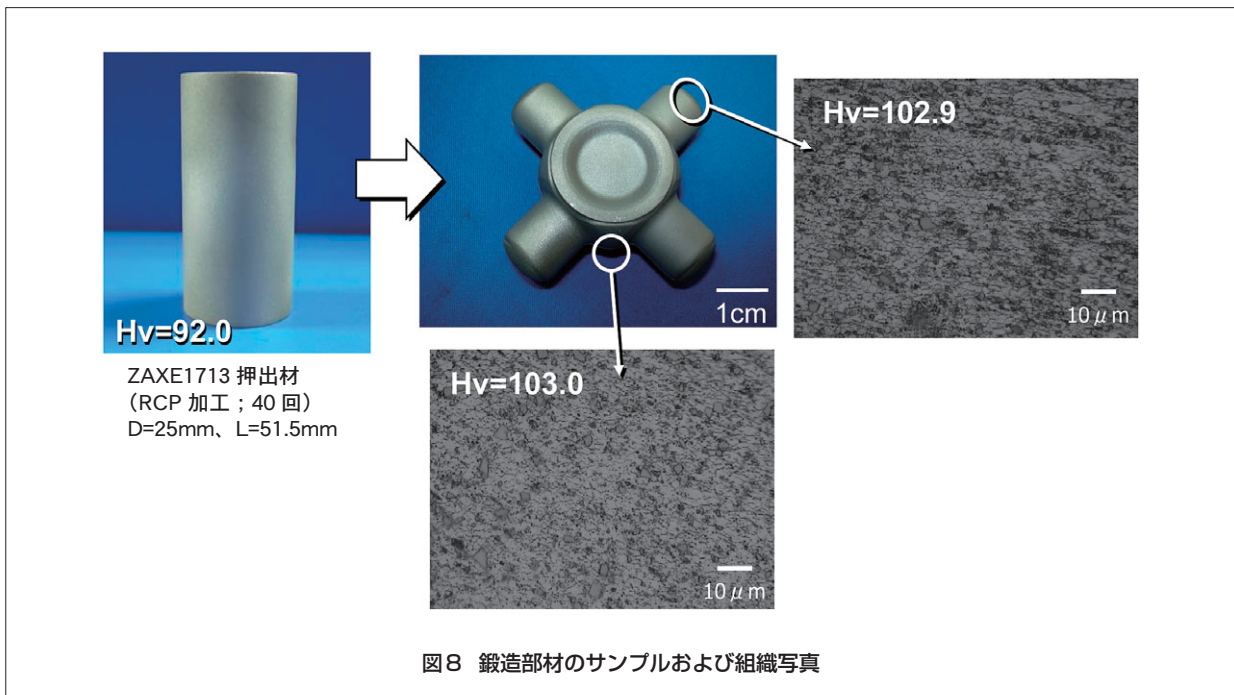
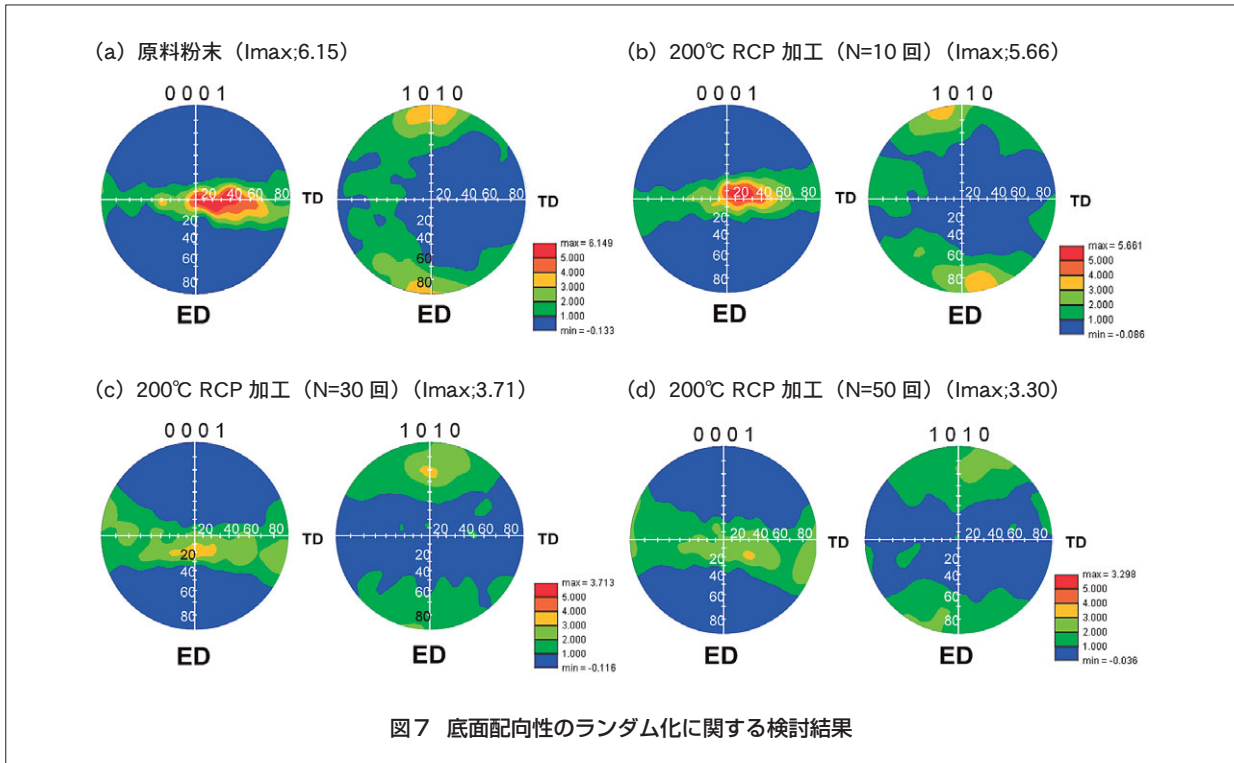


図6 引張特性と破断伸びの比較

3.3 RCP加工による底面配向性のランダム化に関する検討結果

200℃温間RCP加工したAM60粉末を圧粉固化した後、押出加工によって得られた素形材の押出方向断面についてSEM/EBSPによる構造解析を行った。その結果を図7に示す。底面である(0001)に着目すると、(a)の原料粉末を用いた場合には押出方向に沿って強い配向性を示しており(等温線がTD方向に広がった状態で中央部の集積度が高い)典型的な押出材の集合組織である。これに対してRCP加工を施したAM60粉末を用いると、同じ(0001)底面での配向性はパス回数の増加に従って徐々に緩和され、たとえば、(d)の50パス品では中央部の集積状態も見られず、等温線の高低差を示すImax値も3.3と(a)の原料粉末の場合に比べて約1/2に減少している。以上のことから、RCP加工した粉末を押出加工して得られたマグネシウム合金素材においても底面配向性のランダム化は達成でき、RCP加工による集合組織制御が可能であることを確認した。



3.4 RCP加工による鍛造加工性

RCP加工粉末を押し固化した素材を金型閉塞温間鍛造加工によって大変形量を付与した場合の造形技術および部材の品質管理を行った。ここではZAXE1713の粉末に対して常温で40パスのRCP加工を施し、直径φ26mmの押し出材を作製した。これを200℃に加熱した後、軸方向から圧縮変形により4方向の張出し鍛造加工を行い、図8に示すような3次元複雑形状部材を試作した。目視にて外観を確認したところ、表面の亀裂・割れ・しわもなく、特に大変形量が付与された張り出し部の先端にも

微小亀裂もなく良好な部材が得られた。各所の組織を観察した結果、鍛造前と同様の微細組織が維持されており、しかも硬さに関しては103 Hv程度と鍛造前に比べて約10 Hvの増加が確認できた。このようにRCP工法を経由したMg押し出材は、微細な結晶粒とランダム配向性を有することで鍛造加工を施した場合、低温での塑性変形であっても品質欠陥を生じることなく、また顕著な粒成長も伴わずに良好な部材創製ならびに形状付与が可能であることを確認した。

3.5 省エネ効果の検証

前述2.1で記載したとおり、量産用RCP装置は連続運転時の消費電力などを自動測定できるシステムを有しており、その結果、10パス毎の値は0.50～0.56 kWh/kg(平均処理量180 kg/hr/パス)であり、目標値の動力原単位0.7 kWh/kgおよび粉体処理能力100 kg/hr/パスを達成した。

なお、平成17年度までのRCP加工実験の結果、当該製造法による省エネ効果は本NEDO事業における省エネ目標値を達成することを検証した。

3.6 学会等の受賞歴

- ・2005. 7. 23 INTERNATINAL CONFERENCE ON POWDER METALLURGY & PARTICULATE MATERIAL (2005.7.19 - 23カナダ・モントリオール)でポスター賞受賞
- ・2006. 5. 26日本塑性加工学会から技術開発賞を受賞
- ・2006. 9. 16日本金属学会から技術開発賞を受賞

4. おわりに

これまでの板やパイプなどのMg合金展伸材は、アルミ合金よりも遅い押出速度、低温での加工性が劣るための低生産性などによる1・2次加工コストの増加が、Mg合金の広範囲での実用化・部材化を抑制している。これに対して、本技術成果によれば、高強度・高靱性を維持しながら、押出の高速化、低温での成形加工や鍛造加工を可能とする。これによりMg合金部材としての普及を図ることを支援するものと期待できる。

しかしながら、マグネシウム合金素材材に対する市場からの機能向上とコストダウンなどの要求は厳しいことから、他の製造企業との協業関係を強化し、高強靱性Mg合金の特性向上ならびにコストダウンを図っていく所存である。

参考文献

- 1) Y. Yoshida, L. Cisar, S. Kamado and Y. Kojima : Mater. Trans., 44(2003)、468-475.
- 2) 井上明久、川村能人、松下光英、林健太郎：高強度ナノ結晶マグネシウム基合金、Mater. Sci. Forum、386-388(2002)、509-518
- 3) 近藤勝義、荻沼秀樹、川端健詞、住田雅樹、秋田亨、金子貫太郎：RCPプロセスによる微細結晶粒を有する粗大マグネシウム合金粉体の特性、軽金属学会第109回秋季大会、千葉工業大学、(2005)
- 4) K. Kondoh, H. Oginuma, M. Sumida, Y. Shiozaki and Y. Goho : High-Strengthened Magnesium Alloys by Employing Coarse Powder with Refined Grains, 1st Asian Symposium on Magnesium Alloys, Jeju-do, Korea, (2005)
- 5) K. Kondoh, H. Ogimuma, K. Kawabata, K. Kaneko, T. Akita And S.Kamado : Wrought Magnesium Alloys in Employing Grain-refined Coarse Magnesium Alloy Powder via RCP Process, Mater. Trans. (Submitted).

6) 高強靱性マグネシウム合金の環境軽負荷型製造技術の開発、まてりあ 第45巻第1号(2006)

執筆者

藤井徳雄

Norio Fujii

平成6年入社

平成17年よりMg合金の開発に従事



金子貫太郎

Kantaro Kaneko

昭和46年入社

ゴミ処理技術、粉碎・分級技術

および設備の開発・設計に従事



塩崎修司

Shuji Shiozaki

昭和56年入社

粉碎・分級技術

および設備の開発・設計に従事



近藤勝義

Katsuyoshi Kondoh

大阪大学接合科学研究所 教授

博士(工学)



護法良憲

Yoshinori Goho

株式会社ゴーシュー

新素材開発室長

