

国内外におけるマグネシウム合金塑性加工の研究開発動向

高津 正秀*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 54, No. 11 (2004), pp. 493-498

Domestic or overseas trend in research and development of magnesium alloy plastic processing

Masahide KOHZU*

Keywords: magnesium alloy, plastic processing, trend in research and development, reference summary

1. はじめに

近年、「環境にやさしい材料」としてマグネシウムがにわかに注目を集め、10年ほど前から研究発表、研究論文が急増している。このことは、高い比強度と優れたリサイクル性によるところが大きい。すなわち、リサイクルによる原材料費の低減を前提として、近い将来における需要の大幅な拡大を予測されているのだが、逆にある程度需要が拡大しないとリサイクルシステムがうまく機能しないことも意味する。そこで、ドイツなどでは、国策として大量使用が見込める自動車部品への適用を進めているが、わが国では鋼指向が根強く、高比強度材料としての高張力鋼の研究も盛んである。原材料高で需要が伸びない以上、品質の向上に加えて生産性の向上によるコストダウンを画策するのは自然な動きであり、生産性の高い塑性加工（展伸材の利用）は、マグネシウムが注目され始めた当初から研究対象となっている。展伸用マグネシウム合金としては、熱間加工用のZK60 (Mg-5.5Zn-0.6Zr)もあるが、実際に製造されている合金のほとんどはMg-Al-Zn系であり、なかでもAZ31 (Mg-3Al-1Zn)がその大部分を占める。これは、他の合金系に比べて、室温を含む広い温度範囲で抜群の延性を示し、かつ適度な強度を有しているからである。とはいえ、軟鋼、アルミニウム、銅などの延性金属に比べると、けっして塑性加工性がよいとは言えず、工業的な規模で生産するには、いまだ克服しなければならない課題を残している。ここでは、AZ系に限定して、1994年以降の塑性変形、塑性加工に関連した文献を挙げておく^{1)~174)}。

2. 研究開発の動向

文献数は2000年から急増し、2003年になってもなお増え続けている。1999年以前^{1)~16)}は、圧延板のプレス成形性に関するものがほとんどで、コニカルカップ、エリクセン、深絞りなどの基本的な成形性試験が行われ、200°C前後の温間域での成形性向上が示され^{1)~6),12),16)}、応用研究としてしわ押

さえ制御深絞りも試みられている¹³⁾。また、機械的性質や成形性に対する集合組織や加工熱処理、表面処理などの影響についても調べられ^{7),9),11)}、流動応力のモデリングや成形性の有限要素解析も報告されている^{10),15)}。軽量構造体の製造技術として、レーザビーム溶接と板成形が⁸⁾、また、プレス成形以外では、スピニング成形も可能であることが示された¹⁴⁾。

2000年^{17)~31)}に入っても同様の研究は依然多く、機械的性質や成形性が多くの研究者により調べられた。熱処理、成形温度、ひずみ速度、また、深絞りでのコーナアールや潤滑など、多くのファクタが成形性を左右することがわかり、少なくとも実験室レベルではかなり厳しいプレス成形も可能であることが示された。使用される市販AZ31圧延板の材質にロット間のばらつきも含めてかなりの違いがあることから、得られたデータの普遍性は乏しいが、この材料の変形、破壊に関する大まかな傾向はつかめたと言える。ほかに、深絞りでの工具の表面処理、冷間曲げでの形状凍結性などの実用研究^{18),20),26)}、板の二軸での成形限界と焼なましの影響²⁸⁾、板以外にも押出円管の機械的特性とプレス曲げの研究がある^{22),25)}。また、超微細結晶粒では伸びの逆ひずみ速度依存性（衝撃的な引張で大きな伸び）があることが示された²³⁾。研究・開発の方向としては、加工装置や型のコスト低減をねらった室温ないしそれに近い低温での成形（低速ないし軽微な加工）と、生産性向上をねらった高速での成形（必然的に高温）に次第に分かれてくる。

2001年^{32)~76)}になると、実用化研究が活発になり、圧延、押出、鍛造などの素材の製造技術や、具体的な用途を視野に入れた加工技術の開発^{33),38),71)}が、一定の成果を収めるようになってきた。素材の製造では、押出による板材の製造^{65),66)}やコイル圧延が行われるようになり、結晶粒径や集合組織の制御^{65),72)}も試みられている。二次加工も、板・管の曲げ^{54),57),66)}、せん断加工^{41),46)}、シェービング加工^{40),58),68)}、伸びフランジ成形⁴⁴⁾、張出成形^{51),60)}、スピニング加工^{50),55)}、局部加熱深絞り⁵⁶⁾、鍛造^{32),34),53),71),75)}、プレスフォー

*大阪府立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 堺市学園町1-1)。Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University (1-1 Gakuen-cho, Sakai-shi, Osaka 599-8531).

受理日：平成16年8月25日

グ^{35),36)}, など多岐に及ぶ。加工機械としてサーボプレスを用いた板成形技術など³²⁾もある。また、潤滑剤や表面コーティングによる工具の潤滑改善と長寿命化など^{36),39),42),43),47),59),67)}もある。一方、基礎研究として、通常成形性の指標とされる引張試験での伸び値や n 値, r 値などが成形性に結びつかない理由が明らかにされ⁷⁶⁾, 素材の微細化や集合組織制御による機械的性質の向上^{62),65),66),72)}や破断伸びに及ぼす表面傷の影響⁴⁵⁾, 異方性の温度依存性, 常温成形性^{37),60),65),66),72),77)}, 温間加工後の引張特性などが報告されている。また、温間深絞りプロセスに対して、有限要素解析がなされ、加工軟化挙動の定式化⁷⁴⁾が報告されている。

2002年^{77)~118)}になっても同様に、多角的な研究や開発状況が報告されている。数が多いので個々の解説は省略し、特に際立った動きのみ紹介する。このころになると、成形加工に関しては、おおむね一通りの試験・研究は行ってきており、さらなる成形性向上と品質の安定化のために、化学組成、特に Mn 量 (Mn 化合物粒子の影響)^{107),108)}や組織制御による素材自体の品質向上^{85),86),97),105),106),110),112),118)}が重要視されるようになってきた。マグネシウム合金を扱う素材メーカーも増え、圧延条件の工夫や特殊な圧延技術を駆使して、微細化や集合組織制御が行われた。また、素材サイズの制約や製造コストの問題はあるものの、ECAE (ECAP) などの強加工による超微細粒材の自動車部品への適用の可能性が検討された⁸⁶⁾。化学組成に関しては、米国や中国からの輸入材に頼っている状況では制御できないため、国内でのスラブやビレットの鋳造も行われるようになってきている。成形法としては、多素材押出法による円管の成形⁹⁹⁾やガスブロー成形^{105),106)}が試みられ、温間加工後の引張特性も調べられた¹⁰²⁾。また、企業での研究開発も紹介された^{80),82),87),88)}。

2003年^{119)~161)}も前年同様、際立った動きのみ紹介する。温間での板プレスや鍛造では成形速度の影響が大きいことから、その制御が可能なサーボプレスの利用^{119),120)}が積極的に検討されるようになり、プレス成形から表面処理までの一貫生産¹²¹⁾も確立されてきた。実用的な成形性の評価方法の検討¹⁵²⁾がなされ、また、成形性に影響を与える Mn 量の耐食性への影響¹³⁵⁾も報告されている。新たな組織制御圧延法として、単ロール駆動法が試みられた。加工法としては、ラミネートによる加工性改善¹²⁸⁾, インクリメンタル張出成形¹²⁹⁾が試みられた。

2004年^{162)~174)}は、手近な文献のみの紹介にとどめる。切削チップを押し出しにより固化成形した固体リサイクル材のブローフォーミング¹⁷¹⁾, 粒成長や動的再結晶を伴った二次加工¹⁷³⁾のほか、鋳造材も含めた自動車部品への適用の期待¹⁷⁴⁾と課題が報告されている。現在、マグネシウム合金の塑性加工に関連した研究開発は、大企業のみならず中小企業でも盛んで、地域コンソーシアムなどでも一定の成果を上げている¹⁷⁰⁾。

3. おわりに

「国内外におけるマグネシウム合金塑性加工の研究開発動向」という題目で解説文の依頼を受け、書き始めたが、結局、ほとんど国内の動向になってしまった。これは、国内の講演論文や業界紙なども含んだ文献紹介の形をとったせいもあるが、欧文誌だけで比較しても、半数近くは日本での研究

であり、マグネシウム合金の塑性加工研究に関しては、「日本が世界をリードしている」と言っているだろう。今、ようやく高品質の素材が安定供給できる体制が整いつつあり、二次加工においても量産体制が整いつつある。当初のうたい文句である「環境にやさしい材料」として、展伸用マグネシウム合金が広く使われるようになることを期待したい。

参考文献

- 1) 沼 政弘, 菅又 信, 金子純一: “コニカルカップテストによる軽金属薄板の高温成形性の評価”, 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1994), 243.
- 2) 長田直樹, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の深絞り性”, 軽金属学会第89回秋期大会講演概要, (1995), 179.
- 3) 渡会秀明, 沼 政弘, 菅又 信, 金子純一: “コニカルカップおよびエリクセン試験による軽金属板の常温および高温成形性の評価”, 日本機械学会第3回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (1995), 7.
- 4) 長田直樹, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の成形性”, 軽金属学会第90回春期大会講演概要, (1996), 239.
- 5) 長田直樹, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の成形性”, 軽金属学会第91回秋期大会講演概要, (1996), 91.
- 6) E. Doege, K. Dröder: “Processing of magnesium sheet metals by deep drawing and stretch forming”, Mater. Tech., **85** (1997), 19.
- 7) 金子純一, 菅又 信, 大久保通則, 西川泰久: “マグネシウム合金展伸材の集合組織と機械的性質”, 軽金属学会第93回秋期大会講演概要, (1997), 17.
- 8) K. Haferkamp, I. Burmester, E. Doege, K. Dröder: “Innovative production technologies for magnesium light-weight constructions— Laser beam welding and sheet metal forming”, Proc. Int. Symp. Automot. Technol. Autom. (GBR), Materials for Energy-Efficient Vehicles/Paint and Powder Coating Applications, 30th (1997), 247.
- 9) 計見竜雄, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の成形性に及ぼす加工熱処理の影響”, 軽金属学会第95回秋期大会講演概要, (1998), 227.
- 10) H. Takuda, H. Fujimoto, N. Hatta: “Modelling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures”, J. Mater. Process Technol., **80-81** (1998), 513.
- 11) 永井修次, 松沢和夫, 嵯峨常生, 秋本政弘: “AZ31 マグネシウム合金の機械的性質に及ぼす表面処理の影響”, 軽金属学会第96回春期大会講演概要, (1999), 83.
- 12) 高津正秀, 染川英俊, 東 健司: “AZ31 マグネシウム合金の温間深絞り特性”, 第50回塑性加工連合講演会講演論文集, (1999), 205.
- 13) 吉原正一郎, 窪田直樹, 真鍋健一, 西村 尚: “マグネシウム合金板の深絞り加工における可変しわ抑え力制御の効果”, 第50回塑性加工連合講演会講演論文集, (1999), 189.
- 14) 高田佳昭, 内田俊夫, 村田重雄, 東 健司: “マグネシウム合金のスピンニング機による加工の可能性について”, 第50回塑性加工連合講演会講演論文集, (1999), 171.
- 15) H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta: “Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy”, J. Mater. Process. Technol., **80** (1999), 135.
- 16) M. Sugamata, J. Kaneko, M. Numa: “Conical cup and Erichsen testing of light metal sheets at elevated temperatures”, Adv. Technol. Plast., **2**, (1999), 1153.
- 17) 大上哲郎, 関口昭一, 菊池正夫, 伊藤 毅: “マグネシウム薄板の温間成形特性”, 第51回塑性加工連合講演会講演論文集, (2000), 413.
- 18) 古閑伸裕, ラッチャニー パイサーン: “マグネシウム合金板の深絞り加工 第1報 硬質膜コーテッド工具の有用性”, 第51回塑性加工連合講演会講演論文集, (2000), 411.
- 19) 菅又 信, 金子純一, 沼 政弘: “コニカルカップおよびエリクセン試験による軽金属板材の高温成形性の評価”, 塑性加工, **41** (2000), 233.
- 20) 鈴木秀人, 大屋邦雄, 西野創一郎, 正木郁也, 加藤友裕: “Al及びMg合金の冷間曲げ加工における形状凍結性評価”, 日本機械学会関東支部・精密工学会茨城講演会講演論文集, (2000),

- 193.
- 21) 染川英俊, 高津正秀, 田辺重則, 東 健司: “AZ31 マグネシウム合金のプレス成形性”, 日本材料学会第 49 回学術講演会講演論文集, (2000), 339.
 - 22) 長谷川収, 西村 尚: “AZ31 マグネシウム合金押し出し円管のプレス曲げにおける変形挙動”, 軽金属学会第 98 回春期大会講演概要, (2000), 359.
 - 23) 向井敏司, 山野井雅, 渡辺博行, 石川皓一, 大神田佳平, 東健司: “微細結晶粒マグネシウム合金の高速変形特性”, 軽金属学会第 98 回春期大会講演概要, (2000), 323.
 - 24) 大年和徳, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金の圧延および熱処理条件による機械的性質の変化”, 軽金属学会第 98 回春期大会講演概要, (2000), 25.
 - 25) 長谷川収, 西村 尚: “AZ31 マグネシウム合金押し出し円管の材料特性とプレス曲げにおける変形”, 軽金属学会第 99 回秋期大会講演概要, (2000), 219.
 - 26) 古閑伸裕, ラッチャニー パイサーン: “硬質膜コーテッド工具による AZ31 マグネシウム合金板の無潤滑深絞り加工”, 軽金属学会第 99 回秋期大会講演概要, (2000), 31.
 - 27) 大年和徳, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の常温での絞り性”, 軽金属学会第 99 回秋期大会講演概要, (2000), 29.
 - 28) 長田直樹, 大年和徳, 勝田基嗣, 高橋清造, 山田 正: “AZ31 マグネシウム合金板の一軸および二軸変形に及ぼす焼なまし温度の影響”, 軽金属, **50** (2000), 60.
 - 29) 相田収平, 田辺 寛, 須貝裕之, 高野 格, 大貫秀樹, 小林勝: “AZ31 マグネシウム合金板の深絞り成形性”, 軽金属, **50** (2000), 456.
 - 30) 金子純一, 菅又 信, 沼 政弘, 西川泰久, 高田秀男: “マグネシウム合金展伸材の機械的性質と成形性に及ぼす集合組織の影響”, 日本金属学会誌, **64** (2000), 141.
 - 31) H. Somekawa, M. Kohzu, S. Tanabe, K. Higashi: “The press formability in magnesium alloy AZ31”, Mater. Sci. Forum, 350-3 (2000), 177.
 - 32) 榎本機工: “2001 年我が社の新技術・新製品 サーボモーター駆動スクリュープレスを使用したマグネシウム, 薄板熱間鍛造”, 鍛造技報, **26** (2001), 9.
 - 33) 清水 亨: “マグネシウム合金圧延板の MD プレーヤへの用途開発”, アルトピア, **31** (2001), 41.
 - 34) 千野靖正, 下島康嗣, 山田康雄, Cui'e Wen, 馬淵 守: “自由鍛造された AZ31, ZK60 マグネシウム合金のマイクロ組織と機械的特性”, 材料, **50** (2001), 1228.
 - 35) 濱 葆夫: “展伸用マグネシウム合金のプレスフォーミング製法”, 素形材, **42** (2001), 6.
 - 36) 渡辺 洋: “最近の鍛造用潤滑剤 フォーミングプレスによる Mg 鍛造と潤滑剤 ミニディスクケースの開発と量産化”, 鍛造技報, **26** (2001), 30.
 - 37) 高松 勉, 小原 久: “マグネシウム合金の最新の動向 マグネシウム合金の冷間加工例について”, 金属, **71** (2001), 661.
 - 38) 渡辺 洋, 濱 葆夫: “マグネシウム合金の鍛造法による薄肉ミニディスクケースの開発”, 第 207 回塑性加工シンポジウムテキスト, (2001), 87.
 - 39) 古閑伸裕: “硬質カーボン膜コーテッド工具によるマグネシウム合金のプレス加工”, 第 207 回塑性加工シンポジウムテキスト, (2001), 93.
 - 40) 古閑伸裕, 羽斗一成: “AZ31 マグネシウム合金板のシェービング加工”, 平成 13 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2001), 157.
 - 41) 古閑伸裕, 羽斗一成: “AZ31 マグネシウム合金板のせん断加工”, 平成 13 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2001), 155.
 - 42) 古閑伸裕, ラッチャニー パイサーン: “マグネシウム合金板の深絞り加工 (第 3 報 プレコート AZ31 マグネシウム合金板の深絞り性)”, 平成 13 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2001), 65.
 - 43) 古閑伸裕, ラッチャニー パイサーン: “マグネシウム合金板の深絞り加工 (第 2 報 コーテッド工具の寿命調査)”, 平成 13 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2001), 63.
 - 44) 長谷川収, 西村 尚, 山本弘園, 山本 章: “AZ31 マグネシウム合金板材の伸びフランジ成形性”, 第 52 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2001), 207.
 - 45) 廣井徹磨, 西村惟之, 西村 尚: “マグネシウム合金板 AZ31 の破断伸びに及ぼす表面きずの影響”, 第 52 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2001), 181.
 - 46) 阿高松男, 森永義章: “難加工材のせん断加工に関する基礎特性”, 第 52 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2001), 155.
 - 47) 古閑伸裕, R. Paisarn: “硬質膜コーテッド工具による AZ31 マグネシウム合金板の無潤滑深絞り加工”, 塑性と加工, **42** (2001), 145.
 - 48) 大上哲郎, 関口昭一, 菊池正夫, 伊藤 叡: “AZ31 マグネシウム薄板の温間成形特性”, 塑性と加工, **42** (2001), 246.
 - 49) 向井たか貴, 浅川基男: “マグネシウム合金のバルク素形材加工”, 日本機械学会第 9 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2001), 335.
 - 50) 吉原正一郎, 長谷川大気, 山本弘園, 川原正言: “マグネシウム合金管のスピニング加工における変形挙動と組織変化”, 日本機械学会第 9 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2001), 161.
 - 51) 松本幸司, 西村 尚: “AZ31 マグネシウム合金板の温間張出し成形”, 日本機械学会第 9 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2001), 145.
 - 52) 松岡信一, 村井 勉, 宮本 進, 沖 善成, 清水和紀, 竹本輝雄: “マグネシウム合金押し出し材の表面品質におよぼすダイス構造の影響”, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol. 1 (2001), 491.
 - 53) 榎本良夫: “マグネシウム合金の鍛造”, 第 65 回軽金属学会シンポジウムテキスト, (2001), 46.
 - 54) 長谷川収: “AZ31 マグネシウム合金円管の曲げ加工”, 第 65 回軽金属学会シンポジウムテキスト, (2001), 41.
 - 55) 中村 信, 内田俊夫: “スピニング加工機によるマグネシウム合金板材の成形の試み”, 第 65 回軽金属学会シンポジウムテキスト, (2001), 24.
 - 56) 吉原正一郎, 枝広崇夫, 西村 尚, 藤城良夫: “マグネシウム合金板の局部加熱冷却深絞り加工”, 軽金属学会第 100 回春期大会講演概要, (2001), 45.
 - 57) 長谷川収, 西村 尚: “AZ31 マグネシウム合金押し出し円管のプレス曲げにおける加工力および変形状態”, 軽金属学会第 100 回春期大会講演概要, (2001), 33.
 - 58) 古閑伸裕, 羽斗一成: “AZ31 マグネシウム合金板のせん断・シェービング加工”, 軽金属学会第 100 回春期大会講演概要, (2001), 263.
 - 59) 古閑伸裕, ラッチャニー パイサーン: “AZ31 マグネシウム合金板深絞り加工における潤滑の検討”, 軽金属学会第 100 回春期大会講演概要, (2001), 261.
 - 60) 長山知史, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の常温張出し”, 軽金属学会第 100 回春期大会講演概要, (2001), 271.
 - 61) 村井 勉, 松岡信一, 宮本 進, 麻生柳雄, 沖 善成, 竹本輝雄: “マグネシウム合金の押出性に及ぼす押出条件の影響”, 軽金属学会第 101 回秋期大会講演概要, (2001), 305.
 - 62) 吉田 雄, シーザー ローレンス, 小島 陽, 鎌土重晴: “Mg-Al-Zn 系合金の引張特性に及ぼすマイクロ組織および集合組織の影響”, 軽金属学会第 101 回秋期大会講演概要, (2001), 317.
 - 63) 廣井徹磨, 西村惟之, 永井修次, 西村 尚: “AZ31 マグネシウム合金板の破断伸びに及ぼす初期表面きずの影響”, 軽金属学会第 101 回秋期大会講演概要, (2001), 303.
 - 64) 行武栄太郎, 菅又 信, 金子純一, 桑原利彦: “AZ31 マグネシウム合金板の常温および高温における成形性”, 軽金属学会第 101 回秋期大会講演概要, (2001), 301.
 - 65) 大年和徳, 勝田基嗣: “押出材より作製した AZ31 マグネシウム合金板の常温絞りと集合組織”, 軽金属学会第 101 回秋期大会講演概要, (2001), 299.
 - 66) 長山知史, 勝田基嗣: “押出材より作製した AZ31 マグネシウム合金板の常温張出性および曲げ性”, 軽金属学会第 101 回秋期大会講演概要, (2001), 297.
 - 67) 古閑伸裕, R. Paisarn: “AZ31 マグネシウム合金板の深絞り加工における硬質カーボン被覆工具の実用性の検討”, 軽金属, **51** (2001), 441.
 - 68) 古閑伸裕, 羽斗一成, R. Paisarn: “AZ31 マグネシウム合金板のせん断・シェービング加工”, 軽金属, **51** (2001), 452.

- 69) 軽金属協会マグネシウム委員会：“マグネシウム合金展伸材の標準性質測定に関する研究”，軽金属協会，(1962)。
- 70) 戸澤康壽：“マグネシウム合金板の深絞り加工 マグネシウム委員会の共同研究（昭和35年）の紹介を兼ねて”，軽金属，**51** (2001)，492。
- 71) 濱 葆夫，渡辺 洋：“薄肉マグネシウムの熱間鍛造技術の開発ーミニディスクプレーヤー用ケースの実用化”，軽金属，**51** (2001)，514。
- 72) 大年和徳，勝田基嗣：“AZ31 マグネシウム合金板の圧延条件による機械的性質および集合組織の変化”，軽金属，**51** (2001)，534。
- 73) E. Doege, K. Dröder: “Sheet metal forming of magnesium wrought alloys. Formability and process technology”, J. Mater. Process Technol., **115** (2001), 14.
- 74) E. Doege, G. Kurz: “Development of a Formulation to Describe the Work Softening Behaviour of Magnesium Sheets for Heated Deep Drawing Processes”, CIRP Ann (Int. Inst. Prod. Eng. Res.), **50** (2001), 177.
- 75) Y. Chino, M. Mabuchi, K. Shimojima, Y. Yamada, C. Wen, K. Miwa, M. Nakamura, T. Asahina, K. Higashi, T. Aizawa: “Forging Characteristics of AZ31 Mg Alloy”, Mater. Trans., **42** (2001), 414.
- 76) M. Kohzu, F. Yoshida, H. Somekawa, M. Yoshikawa, S. Tanabe, K. Higashi: “Fracture Mechanism and Forming Limit in Deep-Drawing of Magnesium Alloy AZ31”, Mater. Trans., **42** (2001), 1273.
- 77) 村井 勉：“マグネシウム合金押出技術の現状”，アルトピア，**32** (2002)，9。
- 78) 藤井空之：“マグネ合金板製造技術とプレス加工技術”，アルトピア，**32** (2002)，16。
- 79) 平賀 仁：“自動車向け鍛造工部品用マグネシウム合金の開発およびその加工技術の研究開発”，アルトピア，**32** (2002)，33。
- 80) 古閑伸裕：“最新・せん断加工 マグネシウム合金板の精密せん断加工”，プレス技術，**40** (2002)，62。
- 81) 渡辺 洋：“新材料・加工技術で需要を伸ばすマグネシウム合金ープレスフォーミング”，工業材料，**50** (2002)，50。
- 82) 菅又 信：“コニカルカップおよびエリクセン試験による軽金属合金板材の高温成形性の評価”，天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書・国際交流報告書，**14** (2002)，64。
- 83) 佐藤丈士：“高機能マグネシウム合金の成形・利用技術に関する研究（第2報）絞り加工研究”，岐阜県製品技術研究所研究報告，No. 3 (2002)，79。
- 84) 河部昭雄，中山 洋，伊藤 弘，塩谷 進：“マグネシウム合金板材における温間プレス加工法の開発”，静岡県静岡工業技術センター研究報告，No. 47 (2002)，1。
- 85) 伊勢野陽平，中下大輔，伊藤吾朗，本橋嘉信：“結晶粒微細化処理を施した AZ31 マグネシウム合金板の引張変形挙動”，日本機械学会関東支部・精密工学会茨城講演会講演論文集，(2002)，133。
- 86) 吉田 雄，シーザー ローレンス，鎌土重晴，小島 陽，渡辺洋：“AZ31 マグネシウム合金大径 ECAE 加工材の自動車用足まわり部品への応用展開”，第 46 回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集，(2002)，274。
- 87) 渡辺 洋，濱 葆夫：“マグネシウム合金の薄肉鍛造技術の開発 プレスフォーミング法の実用化”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，9。
- 88) 中村 信：“スピニング加工機によるマグネシウム合金板材の成形の試み”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，15。
- 89) 宅田裕彦：“マグネシウム合金板のプレス成形性”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，23。
- 90) 古閑伸裕：“マグネシウム合金板のプレス加工”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，31。
- 91) 松本 良，小坂田宏造：“マグネシウム合金の精密温間鍛造”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，39。
- 92) 松岡信一，村井 勉：“マグネシウム合金の押し出し加工の現状”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，47。
- 93) 長谷川収：“AZ31-O マグネシウム合金板材の伸びフランジ成形性”，第 213 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，53。
- 94) 岩崎 源，桜井俊治，藤井空之，馬淵 守：“AZ31 マグネシウム合金の角筒深絞り成形”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，187。
- 95) 行武栄太郎，金子純一，菅又 信：“マグネシウム合金板材の耐凹み性試験”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，185。
- 96) 行武栄太郎，菅又 信，金子純一：“マグネシウム合金板の常温および高温における曲げ成形性”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，179。
- 97) 小豆島明，青木孝史朗，安田 裕：“くり返しせん断変形加工を施した AZ31 の冷間成形性”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，173。
- 98) 古閑伸裕，田川吾吾，R. Paisarn：“マグネシウム合金板の深絞り加工（第5報 コーナーアールの成形性に及ぼす影響）”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，115。
- 99) 鷹松 誠，西村圭夫，村上 紘，池田圭介：“多素材押出法による AZ31 マグネシウム合金円管の成形”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，175。
- 100) 古閑伸裕，羽斗一成，R. Paisarn：“硬質膜コーテッド工具によるマグネシウム合金板の打抜き・シェービング加工”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，19。
- 101) 阿高松男，森永義章，大郷賢一：“マグネシウム合金のせん断加工に関する基礎特性”，平成 14 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2002)，17。
- 102) 宅田裕彦，井上大輔：“AZ31 マグネシウム合金板の温間加工後の引張特性”，塑性と加工，**43** (2002)，1173。
- 103) A. W. El-Morsy, K. Manabe：“AZ31 マグネシウム合金の温間深絞りの FE 解析”，第 53 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2002)，105。
- 104) 松本幸司，小磯宣久，西村 尚：“AZ31 マグネシウム合金板の温間張出し成形”，軽金属学会第 102 回春期大会講演概要，(2002)，299。
- 105) シーザー ローレンス，吉田 雄，鎌土重晴，小島 陽：“ECAE 加工した AZ31 マグネシウム合金における集合組織の形成と加工材の変形挙動”，軽金属学会第 102 回春期大会講演概要，(2002)，325。
- 106) 伊勢野陽平，小室貴弘，伊藤吾朗，本橋嘉信：“再結晶微細化処理を施した AZ31 マグネシウム合金板の引張変形特性”，軽金属学会第 102 回春期大会講演概要，(2002)，329。
- 107) 川上義邦，勝田基嗣：“AZ31 マグネシウム合金板の常温成形性に及ぼす Mn 化合物の影響”，軽金属学会第 102 回春期大会講演概要，(2002)，331。
- 108) シーザー ローレンス，吉田 雄，関根卓義，鎌土重晴，小島陽：“Mn 添加量を変化させた AZ31 マグネシウム合金圧延材のマイクロ組織と引張特性”，軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要，(2002)，381。
- 109) 代市敬之，清水貞明，田村洋介，本保元次郎，金沢憲一，佐藤英一郎：“AZ31 マグネシウム合金押出角パイプの曲げ加工性”，軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要，(2002)，123。
- 110) 伊勢野陽平，中下大輔，伊藤吾朗，本橋嘉信：“結晶微細化処理を施した AZ31 マグネシウム合金板の引張変形特性”，軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要，(2002)，127。
- 111) 吉田 雄，シーザー ローレンス，関根卓義，鎌土重晴，小島陽：“AZ31 マグネシウム合金圧延板の引張特性の異方性およびその温度依存性”，軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要，(2002)，121。
- 112) 福田 正，手塚裕康，里 達雄：“熱間圧延および焼なまし条件により組織制御した AZ31 合金の機械的性質”，軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要，(2002)，119。
- 113) 長谷川収，真鍋健一，西村 尚：“AZ31 マグネシウム合金押出円管の室温におけるプレス曲げによる変形挙動”，軽金属，**52** (2002)，298。
- 114) P. E. Krajewski: “Elevated Temperature Forming of Sheet Magnesium Alloys”, Spec. Publ. Soc. Automot. Eng. No. SP-1683, (2002), 21.
- 115) X. Wu, H. Hao, Y. Liu, F. Zhu, J. Jiang, R. Krishnamurthy, S. Wang, P. E. Smith, W. Bland, G. D. Pfaffmann: “Elevated Temperature Formability of Some Engineering Metals for Gas Forming of Automotive Structures”, Spec. Publ. Soc. Automot. Eng. No. SP-1683, (2002), 9.
- 116) Y. H. Chen, S. Lee, J. Y. Wang: “Isothermal Gas Forming of Mg

- Alloy AZ31 Sheet”, *J. Mater. Sci. Technol.*, **18** (2002), 227.
- 117) S. Lee, Y. H. Chen, J. Y. Wang: “Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61”, *J. Mater. Process Technol.*, **124** (2002), 19.
- 118) Y. Chino, M. Mabuchi, R. Kishihara, H. Hosokawa, Y. Yamada, C. Wen, K. Shimojima, H. Iwasaki: “Mechanical Properties and Press Formability at Room Temperature of AZ31 Mg Alloy Processed by Single Roller Drive Rolling”, *Mater. Trans.*, **43** (2002), 2554.
- 119) 菅沼俊治: “製品コストダウンに寄与する型技術最新動向 マグネシウム合金板のサーボプレス成形技術”, *型技術*, **18** (2003), 31.
- 120) 菅沼俊治, 久野拓律: “マグネシウム合金板のサーボプレス成形技術”, *アルトピア*, **33** (2003), 27.
- 121) 岡原治男: “マグネシウム合金のプレス成形から表面処理までの一貫生産技術の確立”, *アルトピア*, **33** (2003), 21.
- 122) 高津正秀: “実用マグネシウム合金 AZ31 の温間プレス成形性”, *天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書・国際交流報告書*, **15** (2003), 100.
- 123) 鎌田征男, 岡山祐樹, 直井 崇: “マグネシウム合金板 AZ31 の引張り及び平面ひずみ圧縮試験における応力-ひずみ挙動”, *日本機械学会第 11 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集*, (2003), 307.
- 124) 中川文昭, 村井 勉, 沖 善成, 松岡信一: “マグネシウム合金押出材のプレス成形性に関する研究”, *日本機械学会第 11 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集*, (2003), 309.
- 125) 行武栄太郎, 菅又 信, 金子純一, 久保田正広: “常温および高温における Mg 合金板材の伸びフランジ成形性”, *平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (2003), 1.
- 126) 行武栄太郎, 久保田正広, 金子純一, 菅又 信: “Mg 合金板材の動的デント試験”, *平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (2003), 3.
- 127) 岩永健吾, 志水慶一, 岡本浩明: “Mg 合金板 (AZ-31) の室温から準温間域での加工性改善 (第一報)”, *平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (2003), 5.
- 128) 田代博文, 岩永健吾, 岡本浩明, 志水慶一: “Mg 合金板 (AZ31) のラミネートによる加工性改善 (第二報)”, *平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (2003), 7.
- 129) 相田収平, 坂井 修, 宮口弘明, 田中興一, 井関日出男: “AZ31 マグネシウム合金のインクリメンタル張出し成形”, *平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (2003), 297.
- 130) 高橋正春, 松崎邦男, 花田幸太郎, 佐野利男: “マグネシウム展伸材の特性評価 (第 1 報) — 板材の延性特性評価 (熱影響) —”, *平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (2003), 317.
- 131) 鷹松 誠, 西村圭央, 陳 中春, 池田圭介: “Mg 合金板材の引張変形に伴う集合組織と異方性の変化”, *第 54 回塑性加工連合講演会講演論文集*, (2003), 49.
- 132) 佐藤 学, 山下 実, 佐藤丈土, 駒田庸介: “マグネシウム合金板の常温成形の可能性に関する検討”, *第 54 回塑性加工連合講演会講演論文集*, (2003), 51.
- 133) 森下貴甲, 宅田裕彦, 木下俊行, 白川信彦: “マグネシウム合金 AZ31 板の高温変形抵抗”, *第 54 回塑性加工連合講演会講演論文集*, (2003), 53.
- 134) 行武栄太郎, 金子純一, 菅又 信: “AZ31 マグネシウム合金板の常温および高温における成形限界”, *塑性と加工*, **44** (2003), 276.
- 135) 関根卓義, 吉田 雄, シーザー ローレンス, 鎌土重晴, 小島陽: “Mn 添加量を変化させた AZ31 マグネシウム合金圧延板の変形挙動と耐食性”, *軽金属学会第 104 回春期大会講演概要*, (2003), 93.
- 136) 川上義邦, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の絞り性に及ぼす板厚の影響”, *軽金属学会第 104 回春期大会講演概要*, (2003), 227.
- 137) 代市敬之, 本保元次郎, 金沢憲一, 佐藤英一郎: “AZ31 マグネシウム合金押出角パイプの曲げ加工性に及ぼす曲げ条件の影響”, *軽金属学会第 104 回春期大会講演概要*, (2003), 215.
- 138) 横田靖央, 村田 眞: “熱間ローラによるマグネシウム合金管材のスピニング加工における加工力”, *軽金属学会第 104 回春期大会講演概要*, (2003), 243.
- 139) 勝田基嗣, 古閑伸裕: “AZ31 マグネシウム合金板の成形性に及ぼす圧延条件の影響”, *軽金属学会第 104 回春期大会講演概要*, (2003), 257.
- 140) 山口貴司, 大橋裕次郎, 伊藤吾朗, 本橋嘉信: “結晶粒微細化処理を施した AZ31 マグネシウム合金展伸材の成形性”, *軽金属学会第 105 回秋期大会講演概要*, (2003), 19.
- 141) 川上義邦, 雄澤 悟, 勝田基嗣: “AZ21 および AZ31 マグネシウム合金板の焼きなまし温度による機械的性質の変化”, *軽金属学会第 105 回秋期大会講演概要*, (2003), 23.
- 142) 雄澤 悟, 川上義邦, 勝田基嗣: “AZ21 および AZ31 マグネシウム合金板の焼きなまし温度による成形性の変化”, *軽金属学会第 105 回秋期大会講演概要*, (2003), 25.
- 143) 大口祐満, 菅又 信, 金子純一, 久保田正広: “加熱ロール式圧延機による AZ31 マグネシウム合金板材の成形性”, *軽金属学会第 105 回秋期大会講演概要*, (2003), 227.
- 144) 渡辺博行, 向井敏司, 鈴木桂介, 清水 亨: “AZ31 マグネシウム合金圧延板の角筒絞り性に及ぼす結晶粒径の影響”, *軽金属*, **53** (2003), 50.
- 145) R. Paisarn, 田川省吾, 古閑伸裕: “AZ31 マグネシウム合金板の深絞り性に及ぼす工具アールの影響”, *軽金属*, **53** (2003), 152.
- 146) 大年和徳, 長山知史, 勝田基嗣: “AZ31 マグネシウム合金板の圧延条件による常温成形性の変化”, *軽金属*, **53** (2003), 239.
- 147) 西村 尚, 長谷川収, 小磯宣久, 松本幸司: “AZ31 マグネシウム合金板の結晶粒微細化と張出成形”, *軽金属*, **53** (2003), 302.
- 148) E. Yukutake, J. Kaneko, M. Sugamata: “Anisotropy and Non-Uniformity in Plastic Behavior of AZ31 Magnesium Alloy Plates”, *Mater. Trans.*, **44** (2003), 452.
- 149) Y. Cisar, Y. Yosida, S. Kamado, Y. Kojima, F. Watanabe: “Microstructures and Tensile Properties of ECAE-Processed and Forged AZ31 Magnesium Alloy”, *Mater. Trans.*, **44** (2003), 476.
- 150) S. R. Agnew, O. Duygulu: “A mechanistic understanding of the formability of magnesium: Examining the role of temperature on the deformation mechanisms”, *Mater. Sci. Forum*, 419-4 (2003), 177.
- 151) F. Kaiser, D. Letzig, J. Bohlen, A. Styczynski, Ch. Hartig, K. U. Kainer: “Anisotropic properties of magnesium sheet AZ31”, *Mater. Sci. Forum*, 419-4 (2003), 315.
- 152) M. Kohzu, F. Yoshida, K. Higashi: “Evaluation of press formability in magnesium alloy”, *Mater. Sci. Forum*, 419-4 (2003), 321.
- 153) H. Takahashi, Y. Oishi, K. Wakamatsu, N. Kawabe: “Tensile properties and bending formability of drawn magnesium alloy pipes”, *Mater. Sci. Forum*, 419-4 (2003), 345.
- 154) J. K. Hwang, K. Y. Sohn, K. H. Kim, D. M. Kang: “CAE application to press forging of magnesium alloys”, *Mater. Sci. Forum*, 419-4 (2003), 371.
- 155) Y. H. Chen, S. Lee, J. Y. Wang: “Isothermal sheet formability and microstructure study of rolling processed magnesium alloy AZ31”, *Mater. Sci. Forum*, 419-4 (2003), 383.
- 156) C. F. Chan, M. S. Yong, C. J. Tay, H. M. Shang: “The influence of process parameters on forged magnesium alloys”, *Mater. Sci. Forum*, 437-4 (2003), 427.
- 157) M. S. Yong, B. H. Hu, C. M. Choy, A. V. Kreijl: “Evaluation on the formability of magnesium alloy, AZ31”, *Mater. Sci. Forum*, 437-4 (2003), 435.
- 158) K. Siegert, S. Jäger, M. Vulcan: “Pneumatic bulging of magnesium AZ 31 sheet metals at elevated temperatures”, *CIRP Annals-Manufacturing Technol.*, **52** (2003), 241.
- 159) F. K. Chen, T. B. Huang, C. K. Chang: “Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets”, *Int. J. Mach. Tool Manu.* **43** (2003), 1553.
- 160) S. Yoshihara, H. Nishimura, H. Yamamoto, K. Manabe: “Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process”, *J. Mater. Process Technol.*, **142** (2003), 609.
- 161) F. K. Chen, T. B. Huang: “Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets”, *J. Mater. Process Technol.*, **142** (2003), 643.

- 162) 大山 礼, 小池淳一, 鈴木真由美, 丸山公一: “AZ61 マグネシウム合金圧延材における破断伸びの異方性と配向性の関係”, 日本金属学会誌, **68** (2004), 27.
- 163) 勝田基嗣: “マグネシウム合金の材料特性と成形性”, プレス技術, **42-2** (2004), 39.
- 164) 三吉宏治: “サーボプレスによるマグネシウム合金加工”, プレス技術, **42-2** (2004), 46.
- 165) 菅沼俊治: “デジタルサーボフォーマによるマグネシウム合金加工”, プレス技術, **42-2** (2004), 51.
- 166) 藤井空之: “超塑性現象を利用したマグネシウム合金のプレス加工”, プレス技術, **42-2** (2004), 56.
- 167) 長谷川収: “マグネシウム合金の曲げ加工”, プレス技術, **42-2** (2004), 60.
- 168) 原田雅行: “マグネシウム合金の鍛造加工”, プレス技術, **42-2** (2004), 63.
- 169) 木村茂樹: “チタン・マグネシウム加工のための潤滑剤”, プレス技術, **42-2** (2004), 69.
- 170) 平賀 仁, 上野 博, 木村文夫: “マグネシウム合金の塑性加工に挑戦する新潟県燕・三条地域”, プレス技術, **42-2** (2004), 73.
- 171) Y. Chino, M. Kobata, K. Hosokawa, Y. Yamada, H. Iwasaki, M. Mabuchi: “Blow Forming of Mg Alloy Recycled by Solid-State Recycling”, Mater. Trans., **45-2** (2004), 361.
- 172) 吉田 雄, シーザー ローレンス, 関根卓義, 鎌土重晴, 小島陽: “AZ31 マグネシウム合金圧延板の引張特性に及ぼす Mn 量の影響”, 日本金属学会誌, **68** (2004), 412.
- 173) A. Takara, Y. Nishikawa, H. Watanabe, H. Somekawa, T. Mukai, K. Higashi: “Secondary Processing of AZ31 Magnesium Alloy Concomitant With Grain Growth or Dynamic Recrystallization”, Mater. Trans., **45** (2004), 2377.
- 174) 向井敏司, 渡辺博行: “マグネシウム合金の自動車部材への適用の期待と課題”, 工業材料, **52-8** (2004), 31.