

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249101

研究課題名(和文)ヘテロ構造型マグネシウム合金の高機能発現機構の解明とその組織制御技術への展開

研究課題名(英文)Elucidation of the high-performance expression mechanism of heterostructural magnesium alloys and its application to the structural control

研究代表者

鎌土 重晴 (KAMADO, Shigeharu)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30152846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マグネシウム合金のヘテロ構造形成メカニズムとそれによる高機能の発現メカニズムを解明し、その結果をもとに新規な高性能マグネシウム合金の開発を目指した。その結果、高温でも安定なナノサイズの析出物や化合物を分散させることにより動的再結晶が抑制され、変形方向に伸張した強い底面集合組織を有する未再結晶領域が形成され、強度および耐熱性が顕著に向上することを明らかにした。さらに、希薄Mg-Al-Ca-Mn系合金では合金元素量の最適化を図ることにより長短時間時効でピーク時効硬さに達し、局部変形領域でも双晶変形が抑制され、汎用熱処理型アルミニウム合金を上回る高強度・高延性得られることを見出した。

研究成果の概要(英文)：We aim to develop novel high performance magnesium alloys based on the elucidations of the heterostructure formation mechanism and high-performance expression mechanism in the magnesium alloys. As a result, dynamic recrystallization was suppressed by dispersion of nanoscale precipitates or compounds which are thermally-stable even at high processing temperatures and, therefore, large non-recrystallized grains with strong basal texture are extended along rolling or extrusion directions, resulting in conspicuous improvement of strengths and heat resistance. Furthermore, optimization of contents of alloying elements in dilute Mg-Al-Ca-Mn alloys leads to shortening of peak aging time and to an enhancement of age hardenability and, consequently, twinning deformation hardly occurs even in local tensile deformation regime and the extruded samples exhibit higher strengths and better ductility than general-purpose heat treatable wrought aluminum alloys.

研究分野：材料加工・組織制御工学

キーワード：マグネシウム合金 動的析出 動的再結晶 ヘテロ構造組織 集合組織 結晶粒径 変形機構 機械的性質

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化が人類の存亡をかけた深刻な問題となっており、その原因とされる温室効果ガスの一つであるCO₂削減が21世紀の科学技術の最重要課題となっている。マグネシウム合金(以下 Mg 合金)は構造用金属材料中で最も密度が小さく(Mg は 1.74 で、Al の 2/3、Fe の 1/4 に相当)、比強度(引張強さ/密度)および比剛性(ヤング率/密度)が大きいことから、CO₂ 排出削減を目的とした輸送機器の軽量化を目指して世界的に研究開発が進められている。構造材料として Mg 合金が広く使用されるためには、既存の軽量構造材料である Al 合金や鉄鋼と同程度まで引張強さ、耐力、耐熱性、疲労特性ならびに耐食性を向上させることが第一条件となるが、現状では市場のニーズに応えられる特性が得られていないため、構造用途の使用量は Al 合金の 1/100 程度である。

2. 研究の目的

本研究では資源的に豊富で安価な汎用元素、たとえば Al, Zn, Ca, Mn 等を主な合金成分とする汎用 Mg 合金に各種熱間加工を施し、ナノ・マイクロ組織解析によりヘテロ構造組織における組織-特性の因果関係を解明し、圧延、押出し、鍛造等の加工条件と熱処理条件の最適化に焦点を絞って研究を推進し、Mg 合金の相変態と再結晶を利用したヘテロ構造組織形成のためのナノ・ミクスケール組織制御技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

Al, Zn, Ca, Mn 等の汎用的な合金元素を主成分とする Mg 合金の有するポテンシャルを最大限に引き出し、過酷な用途にも使用可能な高性能ヘテロ構造型 Mg 合金の最適加工プロセス条件を確立するために、以下のナノ・マイクロ組織と力学特性に関する系統的な研究を推進した。(1)既存の高強度・耐熱 Mg 合金の高温変形中の動的再結晶、動的析出を伴ったヘテロ構造組織形成メカニズム、および結晶粒径・集合組織、クラスター・析出物等のナノ析出組織を含むナノ・マイクロ組織と力学特性の因果関係を解明し、ヘテロ構造型合金におけるプロセス条件-特性-ナノ・マイクロ組織の関係および高強度・耐熱発現メカニズムの解明を行った。(2)(1)の成果から汎用 Mg 展伸合金の力学特性改善のための最適組織を提案し、さらに、(3)(2)の成果を具現化するための圧延、押出し、鍛造等の加工条件および熱処理条件の最適化を進め、企業研究者と協力して研究成果を実用化に向けた形にまで完成させ、社会への還元を目指した。

4. 研究成果

(1) 平成 25 年度は時効析出型展伸用合金である Mg-Gd-Y-Zn-Zr 系、Mg-Gd-Y-Zn-Mn 系、Mg-Gd-Y-Ca-Zn-Zr 系合金、Mg-Al-Ca-Mn 系、Mg-Sn-Zn-Al-Mn 系合金のヘテロ構造組織の

形成メカニズムおよび高機能発現メカニズムの解明を目指した。これらの合金系では 350~400 の比較的高い温度で押し出しあるいは圧延を施した場合でも、動的析出を伴った動的連続再結晶が生じる。その際、熱間加工中に形成されるナノサイズの動的析出物が、一般的に既存の展伸用マグネシウム合金で生じる二重双晶と動的回復を伴った動的連続再結晶を抑制し、その結果、せん断力が働く方向に伸長しただけの加工ひずみが大量に残留した強い底面集合組織を形成する未再結晶領域と、微細で比較的ランダム配向した再結晶粒領域からなるバイモーダルなヘテロ構造組織が形成される。低温・低速で熱間加工した場合にナノサイズの動的析出量が増えるため、未再結晶領域が顕著に増える。また、Mg-Gd-Y-Zn 系合金への添加元素を Zr から Mn に代替することにより、鑄造状態の組織が粗大化し、図 1 に示すように、未再結晶領域が 21% から 75% にまで大幅に増える。

Mn 添加合金 未再結晶領域=75%

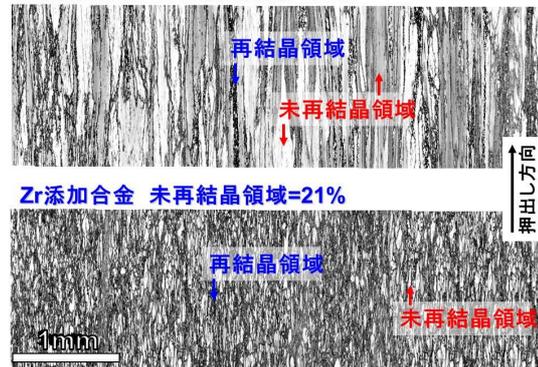


図 1 Mg-Gd-Zn-(Mn あるいは Zr) 合金の押し出しまま材のマイクロ組織

その結果、ナノサイズの析出物、大量の残留加工ひずみ、強い底面集合組織を有する未再結晶領域が増え、図 2 に示すように、強度、耐熱性および疲労強度とも顕著に向上し、各合金系の T5 処理材とも 400MPa 以上の耐力を得られるようになる。さらに、希土類元素

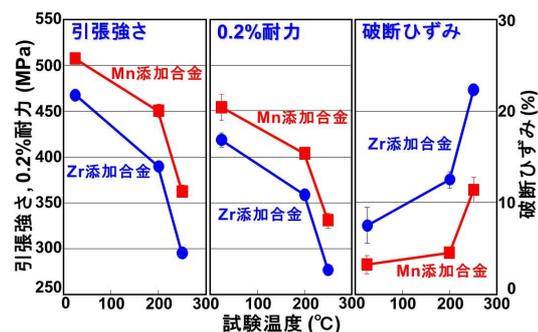


図 2 Mg-Gd-Zn-(Mn あるいは Zr) 合金の T5 材の高温引張特性

を含む合金では、図 3 に示すように、最少クリープ速度は 2 桁も小さくなる。さらに、高濃度 Mg-Al-Ca-Mn 系合金では、疲労試験初期段階で化合物内部あるいは化合物とマトリックスの界面に微小亀裂が発生するものの、

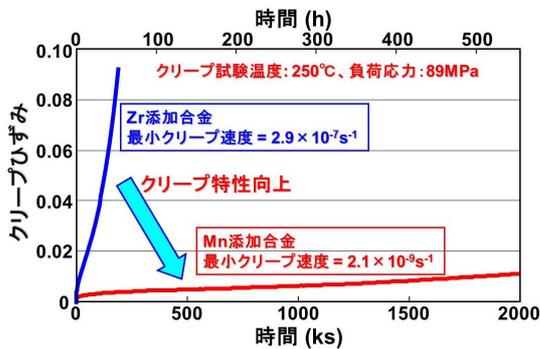


図3 Mg-Gd-Zn-(MnあるいはZr)合金のT5処理材のクリープ特性

未再結晶領域により亀裂進展が抑制され、室温における疲労強度は超々ジュラルミンの疲労強度を上回るようになる。

(2) 希薄合金のヘテロ構造組織形成メカニズムの解明とその展開による高機能化、ならびに高濃度合金の凝固時に形成されるヘテロ構造組織を生かしたプロセス制御による組織の超微細化・均質化とそれにより得られる高機能発現メカニズムの解明についても検討した。希薄Mg合金では、低温加工を施した場合、二重双晶と動的回復を伴った動的な連続再結晶が生じ、結晶粒は微細化されるものの、集合組織は弱化する。一方、高温加工では粒界の張出しを伴った動的な不連続再結晶が生じ、強い集合組織が形成される。その結果、高温押出材の方が強い集合組織に起因した高耐力が得られる。また、図4に示すように、Mg-Al-Ca-Mn系希薄合金でもAl添加量の増加に伴い、比較的低温でも動的な不連続再結晶が生じ、強い集合組織を有する再

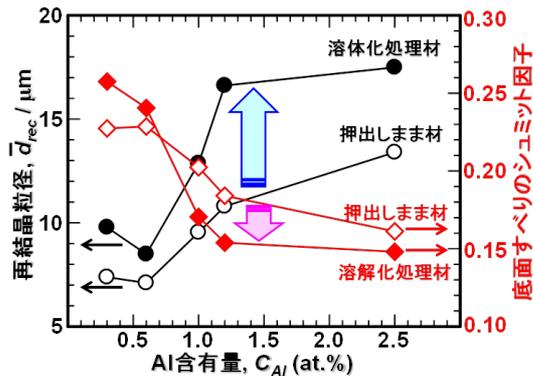


図4 Mg-xAl-0.2Ca-0.2Mn合金押出材の結晶粒径と集合組織に及ぼすAl添加量の影響

結晶粒が形成されることを見出し、図5に示す時効硬化曲線に及ぼすAl添加量の影響からAl添加量を最適化(1.0~1.2%)し、短時間で高い時効硬化能を発現させることにより、図6に示すように、汎用的な時効硬化型Al合金(6N01-T6材)を大きく上回る引張耐力と伸びを同時に得ることに成功した。さらに、図7に示すように、Mn添加量の増加に伴い微細なAl-Mn化合物のピン止め効果により微細な再結晶粒と強い底面集合組織が形成され、高い強度が得られることも明らかにした。

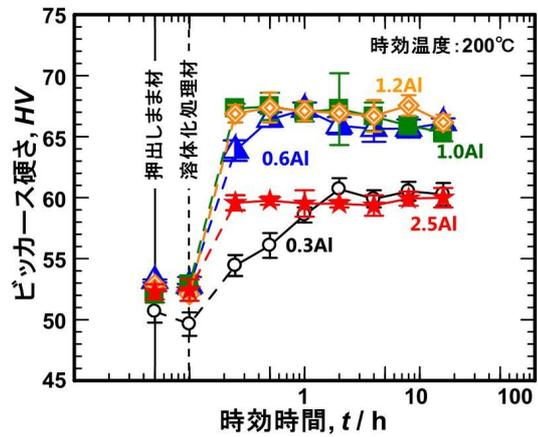


図5 Mg-xAl-0.2Ca-0.2Mn合金押出材の時効硬化特性

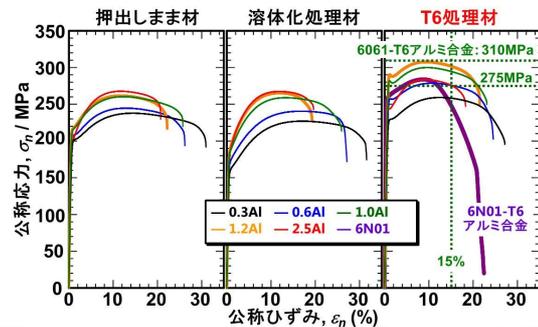


図6 Mg-xAl-0.2Ca-0.2Mn合金押出材の引張特性

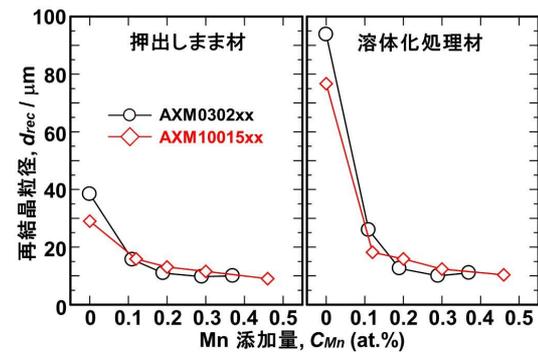


図7 希薄Mg-Al-Ca-Mn合金の押出しまま材および溶体化処理材の再結晶粒径に及ぼすMn添加量の影響

一方、共晶組成に近いMg-Al-Ca-Mn系の高濃度合金を連続鋳造し、冷却速度を大きくすると、層状の共晶領域の層間隔および化合物の幅がナノサイズまで微細化される。そのようなヘテロ構造組織のままに熱間加工を施すと、化合物がナノサイズまで分断・球状化し、動的再結晶が促進されるとともに、球状化合物のピン止め効果により、再結晶粒は1μm未満にまで超微細化される。その結果、図8に示すように、引張強さ495MPaの高強度と200程度までの耐熱性を兼ね備えた高機能材料が得られる。一方では、ジュラルミンのような高濃度Al合金では高速押出しが困難とされているが、前述したように、加工中に化合物がナノ球状化し、再結晶サイトとなるため、動的再結晶が促進され、高速押出しも可能になる。

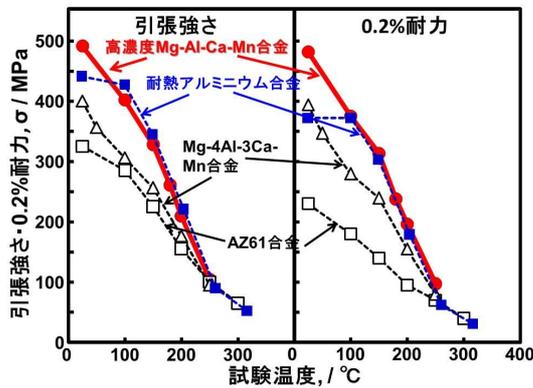


図8 高濃度 Mg-Al-Ca-Mn 合金の押し出しま材の高温引張特性

(3) Mg-Al-Ca-Mn 系合金の合金組成・プロセス条件 - 特性 - ミクロ組織の因果関係を明らかにするとともに、耐力と延性を両立可能なミクロ組織因子、たとえば再結晶粒径、集合組織因子、微細分散化合物の種類とサイズ、ナノ析出物等の定量的評価を目指した。

Al 添加量の増加に伴い、底面集合組織が強くなるものの、再結晶粒径は大きくなること、一方、Mn 添加量の増加に伴い、底面集合組織はほとんど変化しないものの、再結晶粒は顕著に微細となり、塑性加工後の溶体化処理中の再結晶粒の粗大化もほぼ完全に抑制されることを明らかにした。この Mn 添加による再結晶粒の微細化と粗大化抑制はナノサイズの Al-Mn 化合物の分散によることも解明した。また、本系合金では単層規則 GP ゾーンの時効析出により強度特性の改善を図れるが、その時効硬化量は Al : Ca 比が 3~5 : 1 程度で最大となること、さらに Mn 添加により Al-Mn 析出物を形成するため、時効硬化量は小さくなるが、一方で図9に示すように、Ca と容易に化合物を形成する不純物でもある Si と Al-Mn が化合物を形成し、時効硬化に寄与する Ca 固溶量を多くし、時効硬化量の低減を抑制する効果も見出した。

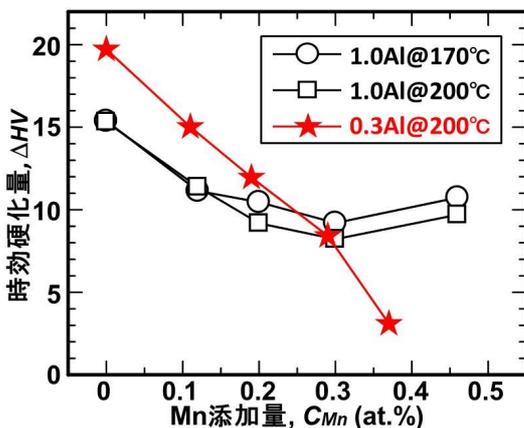


図9 Mg-(0.3あるいは1.0)Al-0.2Ca-Mn 合金押し出しま材の時効硬化量に及ぼす Mn 添加量の影響

これまでに得られた Mg-Al-Ca-Mn 系合金のミクロ組織因子と特性の定量的評価のために、重回帰分析を行った結果、引張強さお

よび耐力は再結晶粒径と底面集合組織に強く依存すること、延性も両因子に影響されるものの、ばらつきが大きいことがわかった。前者はすべり変形が主となる一様変形領域における特性であり、後者は圧縮双晶等も生じる局部変形領域も含むためと考えられた。その結果から、強度と延性の両立のためには、圧縮双晶の抑制が重要であることがわかった。事実、図10に示すように、単層規則 GP ゾーンを大量に析出させた合金では、溶体化処理状態からの強度特性の改善とともに、局部変形領域における圧縮双晶の抑制により延性の低下を抑制可能であることも見出した。

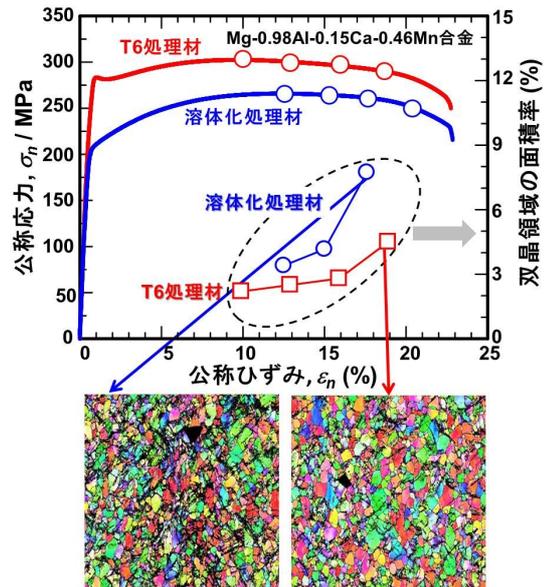


図10 希薄 Mg-Al-Ca-Mn 合金押し出しま材の溶体化処理材と T6 処理材の応力-ひずみ曲線と局部変形領域における IPF マップ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計27件) **以下すべて査読有**

- (1) L.B. Tong, M.Y. Zheng, L.R. Cheng, S. Kamado, H.J. Zhang: "Effect of extrusion ratio on microstructure, texture and mechanical properties of indirect-extruded Mg-Zn-Ca alloy", Mater. Sci. Eng. A, **569**, 2013, 48-53. DOI: 10.1016/j.msea.2013.01.052
- (2) H. Yan, S.W. Xu, R.S. Chen, S. Kamado, T. Honma, E.H. Han: "Activation of {10-12} twinning and basal slip in high ductile Mg-2.0Zn-0.8Gd rolled sheet with non-basal texture during tensile deformation at room temperature", J. Alloys and Comp., **566**, 2013, 98-107. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.03.008
- (3) F.R. Elsayed, T.T. Sasaki, T. Ohkubo, H. Takahashi, S.W. Xu, S. Kamado, K. Hono: "Effect of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of microalloyed

Mg–Sn–Al–Zn alloys”, *Mater. Sci. Eng.: A*, **588**, 2013, 318-328. DOI: 10.1016/j.msea.2013.09.050

(4) T. Bhattacharjee, T. Nakata, T.T. Sasaki, S. Kamado, K. Hono: “Effect of microalloyed Zr on the extruded microstructure of Mg–6.2Zn-based alloys”, *Scripta Mater.*, **90-91**, 2014, 37-40. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.07.011

(5) J.P. Hadorn, T.T. Sasaki, T. Nakata, T. Ohkubo, S. Kamado, K. Hono: “Solute clustering and grain boundary segregation in extruded dilute Mg–Gd alloys”, *Scripta Mater.*, **93**, 2014, 28-31. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.08.022

(6) Y. Miyashita, H. Inzunza, A. Elizondo, Y. Murayama, Y. Otsuka, S. Kamado: “Fatigue Behavior of Extruded Mg–Al–Ca–Mn Alloy with T6 Treatment at Elevated Temperature”, *Key Eng. Mater.*, **627**, 2015, 417-420. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.627.417

(7) T. Nakata, T. Mezaki, R. Ajima, C. Xu, K. Oh-ishi, K. Shimizu, S. Hanaki, T. T. Sasaki, K. Hono, S. Kamado: “High-speed extrusion of heat-treatable Mg–Al–Ca–Mn dilute alloy”, *Scripta Mater.*, **101**, 2015, 28-31. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.01.010

(8) L.B. Tong, M.Y. Zheng, L.R. Cheng, D.P. Zhang, S. Kamado, J. Meng, H.J. Zhang: “Influence of deformation rate on microstructure, texture and mechanical properties of indirect-extruded Mg–Zn–Ca alloy”, *Mater. Characterization*, **104**, 2015, 66-72. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.09.020

(9) T. Nakata, T. Mezaki, R. Ajima, C. Xu, K. Oh-ishi, K. Shimizu, S. Hanaki, T. T. Sasaki, K. Hono, S. Kamado: “High-speed extrusion of heat-treatable Mg–Al–Ca–Mn dilute alloy”, *Scripta Mater.*, **101**, 2015, 28-31. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.01.010

(10) L.B. Tong, M.Y. Zheng, L.R. Cheng, D.P. Zhang, S. Kamado, J. Meng, H.J. Zhang: “Influence of deformation rate on microstructure, texture and mechanical properties of indirect-extruded Mg–Zn–Ca alloy”, *Materials Characterization*, **104**, 2015, 66-72. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.09.020

(11) H.L. Ding, X.B. Shi, Y.Q. Wang, G.P. Cheng and S. Kamado: “Texture weakening and ductility variation of Mg–2Zn alloy with CA or RE addition”, *Mater. Sci. Eng.: A*, **645**, 2015, 196-204. DOI: 10.1016/j.msea.2015.08.025

(12) T.T. Sasaki, F.R. Elsayed, T. Nakata, T. Ohkubo, S. Kamado, K. Hono: “Strong and ductile heat-treatable Mg–Sn–Zn–Al wrought alloys”, *Acta Mater.*, **99**, 2015, 176-186. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.060

(13) T. Nakata, T. Mezaki, C. Xu, K. Oh-ishi, K. Shimizu, S. Hanaki, S. Kamado: “Improving tensile properties of dilute Mg–0.27Al–0.13Ca–0.21Mn (at.%) alloy by low temperature high speed extrusion”, *J. Alloys and Comp.*, **648**, 2015, 428-437. DOI:

10.1016/j.jallcom.2015.07.051

(14) L.B. Tong, J.B. Zhang, Q.X. Zhang, Z.H. Jiang, C. Xu, S. Kamado, D.P. Zhang, J. Meng, L.R. Cheng, H.J. Zhang: “Effect of warm rolling on the microstructure, texture and mechanical properties of extruded Mg–Zn–Ca–Ce/La alloy”, *Mater. Characterization*, **115**, 2016, 1-7. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.03.012

(15) M.G. Jiang, C. Xu, T. Nakata, H. Yan, R.S. Chen, S. Kamado: “Development of dilute Mg–Zn–Ca–Mn alloy with high performance via extrusion”, *J. Alloys and Comp.*, **668**, 2016, 13-21. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.01.195

(16) M.G. Jiang, C. Xu, T. Nakata, H. Yan, R.S. Chen, S. Kamado: “Rare earth texture and improved ductility in a Mg–Zn–Gd alloy after high-speed extrusion”, *Mater. Sci. Eng.: A*, **667**, 2016, 233-239. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.093

〔学会発表〕(計90件)

(1) S. Kamado, T. Nakata: “High-speed-extrudable Magnesium Alloy with Age Hardenability”, 12th IUMRS Intern. Conf. on Adv. Mater., Symp. B1 Magnesium (The 5th Intern. Conf. on Magnesium), September 24, 2013, Qingdao Intern. Conv. Center (Qingdao, China). **(Invited Lecture)**

(2) S. Kamado: “Advanced Technologies and Research Projects on Magnesium Alloys in Japan”, The 5th Asian Symp. on Magnesium Alloys (ASMA5), Toki Messe (Niigata, Japan), October 7, 2013. **(Plenary Lecture)**

(3) T. Homma, K. Ohta, S. Saikawa, K. Sakakibara, S. Takeda, S. Kamado: “Creep Properties in Die-cast AZ91D Alloys Containing Ca”, The 5th Asian Symp. on Magnesium Alloys (ASMA5), Toki Messe (Niigata, Japan), Oct. 7, 2013. **(Invited Lecture)**

(4) Y. Miyashita, E.M. Adrian, Y. Murayama, S. Kamado, T. Homma: “Fatigue strength and crack growth behavior of extruded Mg–Al–Ca–Mn alloy at room and elevated temperature” The 5th Asian Symp. on Magnesium Alloys (ASMA5), Toki Messe (Niigata, Japan), Oct. 8, 2013. **(Invited Lecture)**

(5) C. Xu, M.Y. Zheng, S.W. Xu, K. Wu, E. Wang, G.H. Fan, S. Kamado: “Ultra high strength and high ductility of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy sheets fabricated by hot rolling and ageing”, The 5th Asian Symp. on Magnesium Alloys (ASMA5), Toki Messe (Niigata, Japan), Oct. 7, 2013.

(6) 鎌土重晴、中田大貴、大石敬一郎、佐々木泰祐、宝野和博: “汎用型 Mg–Al–Ca–Mn 系合金押し出し材の高強度化”, 第 57 回 日本学術会議材料工学連合講演会、日本材料学会、京都テルサ(京都府京都市) 平成 25 年 11 月 26 日。 **(招待講演)**

(7) S. Kamado: “Development of Commonly-used Heat Treatable Magnesium Alloys for High Speed Extrusion”, the Intern.

Conf. in Asia - 2013 (IUMRS-ICA 2013), I, December 19, 2013 at INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE in Bangalore, India (**Invited Lecture**)
(8) S. Kamado, T. Nakata, S. Hanaki, K. Shimizu and Y. Matsumoto: "Effect of Extrusion Temperature of Microstructures and Tensile Properties of High-speed-Extruded Mg-Al-Ca-Mn Alloys", The 6th Asian Symp. on Magnesium Alloys (ASMA6), Chengdu, China, Dec. 20-22, 2014. (**Invited Lecture**)
(9) C. Xu, Y. Yamamura, T. Honma, K. Oh-ishi, and S. Kamado: "Effect of Ca Additions on Microstructure and Creep Resistance of Mg-Gd-Zn-Zr Alloy", The 6th Asian Symp. on Magnesium Alloys (ASMA6), Chengdu, China, Dec. 20-22, 2014.
(10) 中田大貴、鎌土重晴、松本泰誠、清水和紀、花木 悟: "高速押し出し用マグネシウム合金に関する研究開発動向", 軽金属学会第128回春期大会、東北大学青葉山キャンパス、平成27年5月17日(日)。 (**基調講演**)
(11) S. Kamado, T. Nakata, S. Hanaki, K. Shimizu, Y. Matsumoto: "Optimizing Contents of Alloying Elements for Improving Performance of High-Speed Extrudable Mg-Al-Ca-Mn Alloys", The 10th Intern.l Conf. on Magnesium Alloys and Their Applications, Oct. 12, 2015, Jeju, Korea, (2015). (**Keynote presentation**)
(12) Y. Miyashita, E.M. Adrian, Y. Murayama, S. Kamado: "Fatigue mechanism of extruded Mg-Al-Ca-Mn alloy", Processing and Fabrication of Adv. Mater. (PFAM24), Dec.18-20, Osaka(2015)

〔産業財産権〕
出願状況(計 4件)

名称: Mg合金とその製造方法
発明者: 佐々木泰祐、宝野和博、中田大貴、鎌土重晴、花木悟、清水和紀、岩川博昭、松本泰誠
権利者: 物質・材料研究機構、長岡技術科学大学、三協立山(株)
種類: 特許
番号: 特願 2015-051281
出願年月日: 平成 27 年 3 月 13 日
国内外の別: 国内

名称: マグネシウム合金
発明者: 清水和紀、松本泰誠、岩川博昭、花木悟、鎌土重晴、中田大貴、佐々木泰祐、宝野和博
権利者: 三協立山(株)、長岡技術科学大学、物質・材料研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2015-051435
出願年月日: 平成 27 年 3 月 13 日
国内外の別: 国内

名称: マグネシウム合金圧延材およびその製造

方法ならびにプレス成型品
発明者: 吉田雄、吉田克仁、河部望、鎌土重晴、中田大貴
権利者: 住友電気工業(株)、長岡技術科学大学
種類: 特許
番号: 特願 2015-207092
出願年月日: 平成 27 年 10 月 21 日
国内外の別: 国内

名称: マグネシウム合金圧延材およびその製造方法ならびにプレス成型品
発明者: 吉田雄、吉田克仁、河部望、宮永倫正、鎌土重晴、中田大貴
権利者: 住友電気工業(株)、長岡技術科学大学
種類: 特許
番号: 特願 2016-079490
出願年月日: 平成 28 年 4 月 12 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
鎌土 重晴 (KAMADO, Shigeharu)
長岡技術科学大学・技学研究院・教授
研究者番号: 30152846
- (2) 研究分担者
宮下 幸雄 (MIYASHITA, Yukio)
長岡技術科学大学・技学研究院・准教授
研究者番号: 00303181
- (3) 研究分担者
本間 智之 (HOMMA Tomoyuki)
長岡技術科学大学・技学研究院・准教授
研究者番号: 50452082