

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560075

研究課題名（和文）

超軽量化機器開発のための展伸マグネシウム合金の疲労機構解明と疲労信頼性の確立

研究課題名（英文） Study of fatigue failure mechanisms and establishment of fatigue reliability for extruded magnesium alloys to develop light weight mechanical components

研究代表者

塩澤 和章 (SHIOZAWA KAZUAKI)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：90019216

研究成果の概要（和文）：

押出しによって顕著な集合組織・異方性を示すマグネシウム合金展伸材の低サイクル疲労および高サイクル疲労強度特性評価と疲労破壊機構について検討を行なった。圧縮負荷時に生じる双晶変形に影響により、ヒステリシスループの形状は非対称となり、弾性および塑性ひずみエネルギーの両者を加味した全ひずみエネルギーにより低サイクル疲労寿命推定が可能となった。また超高サイクル疲労試験結果から、二段折れ曲がり S-N 曲線が認められた。この出現は応力比および荷重負荷様式に依存し、双晶および結晶のすべりに起因する疲労損傷機構の違いによるものである。さらに、疲労強度に及ぼす切欠きの影響並びに微粒子ショットピーニング処理による疲労強度改善効果を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Low-cycle and high-cycle fatigue performance and fatigue failure mechanism have been discussed for extruded magnesium alloys which showed a strong mechanical anisotropy and texture with extruding. Due to the action of mechanical twinning in compressive phase, asymmetrical shape of hysteresis loop was observed in total strain-controlled and stress-controlled low-cycle fatigue process. An energy-based model taken into account of plastic and elastic energy density was proposed to predict the fatigue lives. From the very high cycle fatigue experiments, specimens showed a stepwise S-N curve on which two knees existed. This characteristic appearance was depended on applied stress ratio, that is mean stress effect, and loading mode, such as axial loading and rotating bending fatigue, and also induced by crack initiation mechanism changing from the twin deformation in high-stress amplitude level to slip deformation in low-stress amplitude level. In this study, effect of notch on fatigue strength and improvement of fatigue strength by fine particle shot peening treatment were discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：高サイクル疲労，低サイクル疲労，マグネシウム合金，異方性，集合組織，応力比，ショットピーニング，切欠き効果

### 1. 研究開始当初の背景

実用金属材料の中で最軽量であるマグネシウム (Mg) 及びその合金は比強度、リサイクル性、援動吸収性、電磁遮断性などに優れており、地球温暖化防止や環境負荷物質の低減、機器の高効率化、省エネルギー化などの立場から注目され、航空機、鉄道車両、自動車などの輸送用機器への Mg 合金の適用が検討されている。しかし、Mg 合金は材料のコスト高、耐食性、耐熱性、疲労強度、耐クリープ性、靱性、延性などの諸特性が問題となり、機器・構造材としての普及を阻害している。これらの特性を改善し、強度特性の正確な把握による設計手法の確立を図ることによって、Mg 合金の適材適所への適用は飛躍的に拡大されることが期待される。従来、構造部材に対して Mg 合金鋳造材が用いられてきているが、鋳造欠陥などの影響が問題となることが多く、高信頼性・安全性を保證する機械・構造部材への適用に困難を生じてきた。近年の押し出し、圧延技術の進歩に伴って微視的組織が均一で欠陥の少ない展伸材が普及し、これら展伸材の機械・構造材料への適用が検討されてきている。

Mg 合金の結晶構造は欄密六方格子構造 (hcp) であることから、室温における主すべり系は (0001) <11-20> の底面すべりであり、その独立すべり系の数は 2 である。体心立方格子構造の鉄鋼材料や面心立方構造のアルミニウム合金などに比べてすべり系の少ない Mg 合金では結晶のすべり変形に加えて双晶変形が極めて重要な変形機構となる。一方、押し出しや圧延によって製造された展伸 Mg 合金は変形異方性が大きいことが特徴の一つである。展伸 Mg 合金の使用に際してはこれら変形異方性を考慮することが必要であり、疲労信頼性の保証に対して考慮すべき重要な課題である。しかし、展伸 Mg 合金の疲労強度特性評価に対して、これら変形異方性や集合組織の影響を積極的に考慮した研究は実施されていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

機械・構造物の軽量化に対して注目される Mg 合金展伸材の疲労変形挙動および疲労破壊機構を変形異方性・集合組織の観点から明らかにし、軽量化機器・構造物の高安全性・信頼性を保証する疲労データの蓄積と疲労設計指針を確立すること、および疲労強度向上策を検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究に用いた試験片材料は Mg-Al-Zn 系マグネシウム合金 AZ31, AZ61 および AZ80 であり、押し出し比 99.4, 押し出し温度 623K で押し出した直径 16mm の丸棒素材である。一部、時

効処理の影響を検討するために AZ80 に T5 の時効処理を施した試験片 AZ80T5 を用意した。疲労試験は、軸荷重制御と全ひずみ制御の低サイクル疲労試験、軸荷重制御の高サイクル疲労試験 (繰返し速度 20~40Hz) および片持ち回転曲げ疲労試験 (同 52.5Hz) を室温・大気中の実験室雰囲気で行った。疲労破面は走査型電子顕微鏡 (SEM) で詳細観察を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 低サイクル疲労変形挙動と疲労寿命評価

0.1% のひずみ増分を加えながら負荷と除荷を繰返す試験を引張側と圧縮側でそれぞれ実施して得られた応力-ひずみ曲線を図 1 に示す。また、この実験によって得られた引張側および圧縮側の 0.2% 耐力を表 2 に示す。引張りと圧縮の耐力は大きく異なり、供試材によって異なることが明らかとなった。この耐力の違いが疲労挙動に顕著な影響を及ぼすことになることが一連の研究で明らかとなった。

完全両振りの荷重制御および全ひずみ制御低サイクル疲労試験の結果、ヒステリシスループは非対称な形状を示し、前者では圧縮の平均ひずみを後者では引張りの平均応力を生じた。これらは図 2 に示すように圧縮の

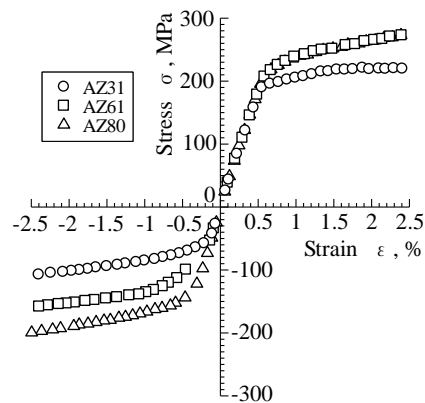


Fig. 1 Stress vs. strain curve obtained from the incremental-stepwise loading-unloading test.

Table 1 Experimental measurement of proof stress obtained from incremental-stepwise loading-unloading test.

	0.2% proof stress (MPa)		$\sigma_{0.2^C} / \sigma_{0.2^T}$
	Ten. $\sigma_{0.2^T}$	Comp. $\sigma_{0.2^C}$	
AZ31F	200	65	0.325
AZ61F	230	100	0.435
AZ80F	225	150	0.667
AZ80T5	250	220	0.880

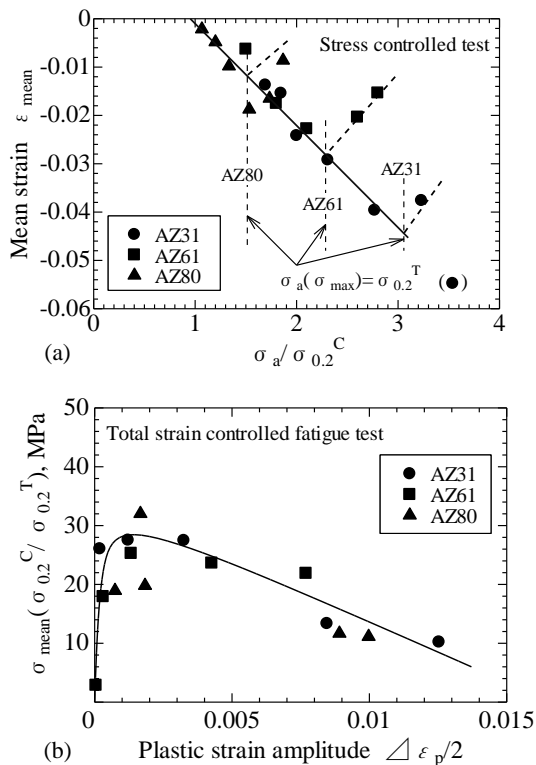


Fig. 2 Dependency of mean stress and mean strain appeared during fatigue on tested alloys; (a) stress controlled low-cycle fatigue test and (b) total strain controlled low-cycle fatigue test.

耐力  $\sigma_{0.2}^C$  で無次元化することによって統一的に評価可能であった。

図3はひずみ制御および荷重制御低サイクル疲労の両疲労寿命の推定法を検討した結果である。ヒステリシスループから得られる塑性ひずみエネルギーと引張側の弾性ひずみエネルギーの和として求められる全ひずみエネルギー概念を用いることによって疲労寿命が予測可能である。本手法はこれまでに提案されているMorrowモデル, SWTモデル, DITモデルに比べて高精度の予測が可能であることが明らかとなった。

(2) 高サイクル疲労に及ぼす応力比の影響

応力比  $R=0, -1$  および  $-1.5$  の条件下で軸疲労試験を行い、応力比の影響を検討した。AZ31F および AZ80F の S-N 曲線を図4に示す。  $R=0$  条件では他の供試材 AZ61F および AZ80T5 を含めて明瞭な疲労限度を示した。  $R=-1$  および  $-1.5$  条件では AZ31F の  $R=-1.5$  条件を除いて二段折れ曲がり S-N 特性を示した。また、回転曲げ疲労試験 ( $R=-1$ ) の結果、AZ80F および AZ80T5 では明瞭な二段折れ曲がり S-N 曲線を示したが、AZ31F および AZ61F の2材は単調に変化する S-N 曲線であり、供試材の S-N 特性は応力比および荷重荷重様式の影響を受けて変化することが明らかとな

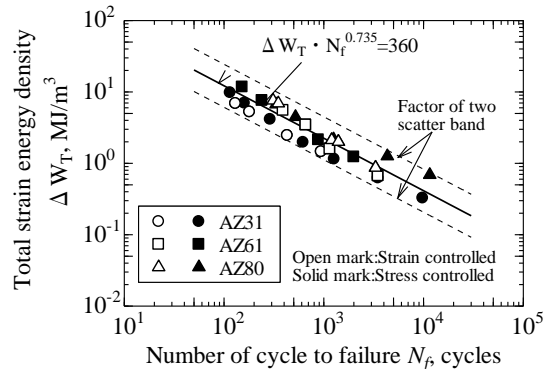


Fig. 3 Prediction of fatigue lives for three kinds of extruded magnesium alloy tested under total strain controlled and stress controlled low-cycle fatigue with total strain energy concept.

った。二段折れ曲がり S-N 曲線の出現は疲労損傷機構の違いによるものである。

図5はき裂発生起点近傍のSEMによる観察結果の一例である。低応力振幅域の疲労破面には平坦で無特徴な破面様相(領域I)が認められた。一方、高応力振幅域で破壊した試験片のき裂発生起点近傍には領域Iは認められず領域II Bのみが観察された。この領域Iの有無によって破面様相を分類し、負荷最小応力  $\sigma_{min}$  と圧縮の耐力  $\sigma_{0.2}^C$  の比と疲労寿命の関係を整理した結果を図6に示す。領域Iが観察された試験片は  $\sigma_{min} / \sigma_{0.2}^C < 1$  であり、明

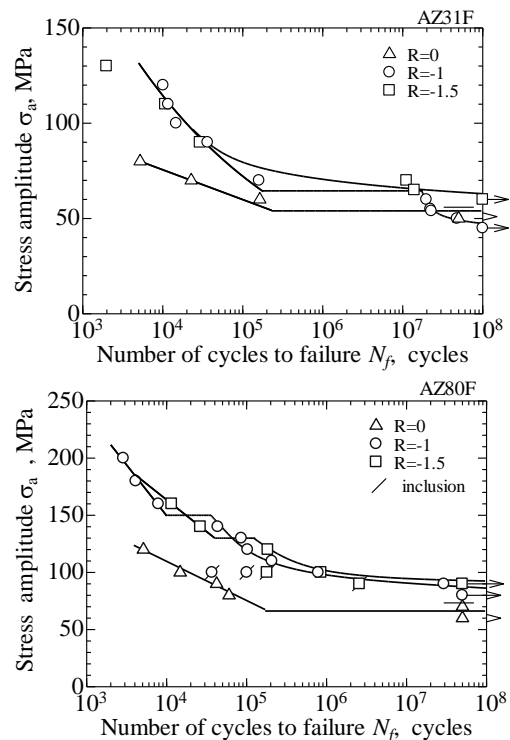


Fig. 4 S-N curve of AZ31F and AZ80F obtained from the axial loading fatigue tests under stress ratio of 0, -1 and -1.5.

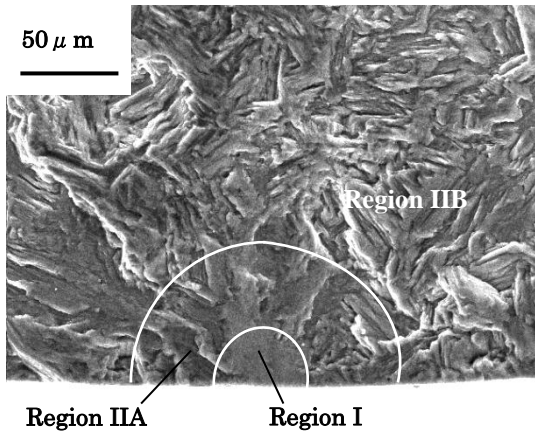


Fig. 5 Typical SEM observation of fracture surface around crack initiation site tested under low-stress amplitude level for AZ80T5.

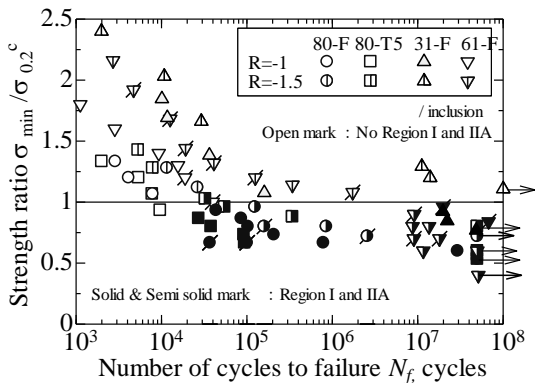


Fig. 6 Experimental relation between the minimum stress in a cycle divided by 0.2% proof stress in compression and fatigue life.

瞭に破面様相が分離できた。負荷最小応力が圧縮の耐力を越える領域では双晶変形によって疲労き裂が発生して破壊に至るのに対して、最小応力が圧縮の耐力以下の負荷条件では結晶のすべりによってき裂が発生する。したがって、二段折れ曲がり S-N 曲線は高応力振幅域における双晶変形から低応力振幅域におけるすべり変形へと破壊機構が変化するために生じるものであることが明らかとなった。応力比  $R=0$  の条件では双晶変形を生じず、すべりのみが生じ、明確な疲労限度はすべりによる疲労き裂の発生・進展の限界として現れる。二段折れ曲がり S-N 曲線の水平部は双晶によるき裂の発生・進展の限界として現れる。以上の通り、本研究では Mg 合金展伸材の高サイクル疲労損傷機構を新たに提案した。

(3) 微粒子ショットピーニング (FPSP) による疲労強度向上に関する検討

AZ80F, AZ80T5 および AZ61F に  $ZrO_2$  セラミックス粒子 #400 (平均粒径  $40\mu m$ ) を照射圧力 0.1 と 0.3MPa で照射した FPSP 処理材の疲労強度改善効果について検討した。FPSP

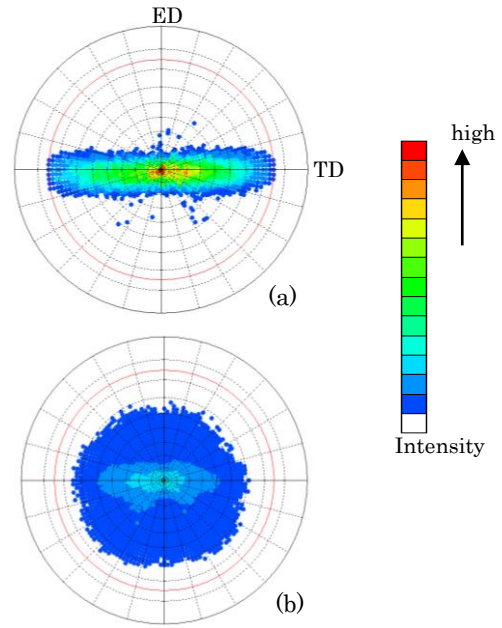
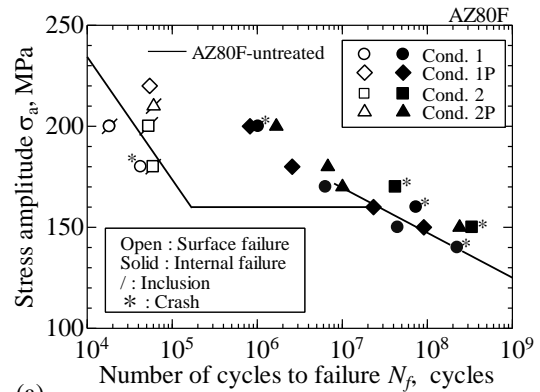
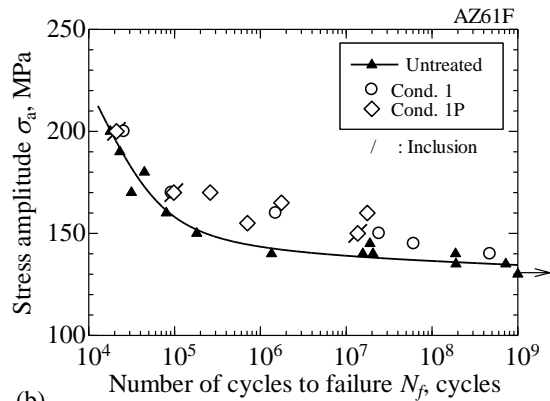


Fig. 7 Experimental measurement of {0002} pole figure of extruded AZ80F measured by Schulz's method; (a) before FPSP-treatment, (b) after FPSP-treatment.



(a)



(b)

Fig. 8 S-N curve for (a) AZ80F and (c) AZ61F treated with FPSP.

処理結果、試料表面から深さ  $50\mu m$  の範囲内に圧縮の残留応力層と高硬度層の形成が確認された。また図 7 に示すように、(0002)面の極点図測定の結果から、押出しによって生じた集合組織は FPSP 処理によって c 軸配向

が分散化される傾向が認められた。

図 8 は FPSP 処理材の片持ち回転曲げ疲労試験から得られた S-N 曲線である。AZ80F および AZ80T5 は FPSP 処理による表面粗さの影響により疲労強度の向上は得られなかった。エメリー紙によって表面粗さを除去することによって高応力振幅域でのみ 10~20% 程度の疲労強度が向上した。これら両材は高応力振幅域で表面破壊を、低応力振幅域では結晶のすべりに起因する内部破壊を示した。したがって、疲労強度向上を生じる応力振幅域は未処理材に現れる二段折れ曲がり S-N 曲線の水平部以上の領域であった。一方、AZ61F は実験を行った全応力振幅域で表面破壊であり、表面粗さに鈍感であって、疲労強度の向上に表面粗さの影響は認められなかった。本材は全応力振幅域で 5~15% の疲労強度向上効果が認められた。

本研究を通して、FPSP 処理を施した本供試材の疲労損傷は圧縮残留応力の影響に加え、結晶の配向変化を考慮し、結晶のすべりに加えて変形双晶の機構を加味する必要があることを指摘した。

#### (4) 疲労強度特性に及ぼす切欠きの影響

展伸マグネシウム合金の疲労強度に及ぼす切欠きの影響に関するデータが不足している現状から、切欠き係数を実験的に求めた。試験片は 60°V 型環状切欠き試験片であり、切欠き深さ 1mm, 最小断面部直径 5mm, 切欠き先端部半径  $\rho=0.5, 0.3, 0.1, 0.05$  mm の 4 種類の切欠き形状である。実験は片持ち回転曲げ疲労試験機を用い、繰返し速度  $f=52.5$  Hz で室温・大気中の実験室雰囲気下で行った。

図 9 は  $10^7$  回における切欠き係数  $K_t$  と弾性応力集中係数  $K_f$  の関係である。図中には低炭素鋼 S30C, アルミニウム合金 A6061-T6 および難燃性マグネシウム合金 AMX602B の結果

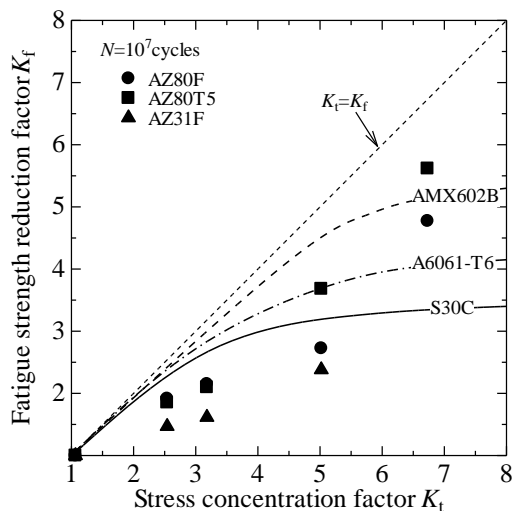


Fig. 9 Experimental relationship between stress concentration factor and fatigue strength reduction factor

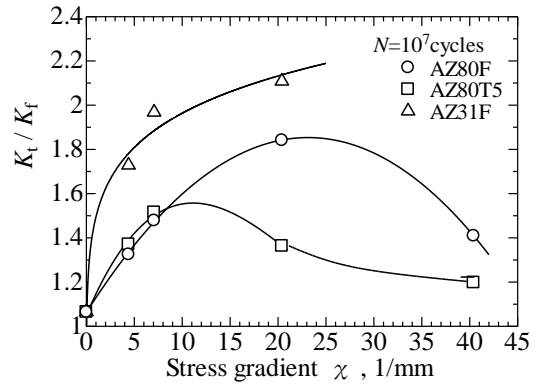


Fig. 10 Relation between fatigue strength reduction and stress gradient at notch root.

を比較のため併記した。本研究で用いた 3 供試材の切欠き係数は弾性応力集中係数の小さい範囲では切欠きに鈍感であるが、その大きな領域 ( $K_t > 5$  程度) では敏感となることがわかる。なお、本 3 供試材共に  $10^9$  回までに停留き裂は観察されず、分岐点は生じなかった。

図 10 は  $K_t/K_f$  と切欠き部先端の応力勾配  $\chi$  との関係を示した結果である。 $K_t/K_f$  が 1 に近い程切欠きに敏感である。AZ31F が他の 2 材に比較して切欠き係数が小さく、切欠きに対して鈍感である。一方、AZ80F および AZ80T5 の両材は鋭い切欠き形状では  $K_t/K_f$  が小さくなり敏感となる。その程度は時効処理を施した AZ80T5 の方が顕著である。なお、図 10 は切欠き材の疲労限度を推定する Siebel の方法に対して必要な線図である。

#### 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 5 件)

(1) 塩澤和章, 宮崎雅士, 展伸マグネシウム合金の超高サイクル疲労強度特性に及ぼす微粒子ショットピーニング処理の影響, 日本機械学会論文集, A 編, 査読有, 掲載決定

(2) 塩澤和章, 北島 純, 上梨智弘, 村井勉, 高橋 泰, 展伸マグネシウム合金の低サイクル疲労変形挙動と疲労寿命評価, 日本機械学会論文集, A 編, 査読有, 77 巻 780 号, pp.1225~1237 (2011)

(3) K. Shiozawa, J. Kitajima, T. Kaminashi, T. Murai and T. Takahashi, Low-cycle fatigue deformation behavior and evaluation of fatigue life on extruded magnesium alloys, Procedia Engineering, 査読有, Vol. 10, pp.1244-1249 (2011).

(4) 塩澤和章, 上梨智弘, 北島 純, 村井勉, 高橋 泰, 展伸マグネシウム合金 AZ31 の低サイクル疲労強度特性, 日本機械学会論文集, A 編, 査読有, 77 巻 773 号, pp. 58-70 (2011).

(5) K. Shiozawa, M. Kashiwagi, T. Murai and T. Takahashi, Fatigue behaviour and fractography of extruded AZ80 magnesium alloys in very high cycle regime, Procedia Engineering, 査読有, Vol. 2, pp. 183-191 (2010)

〔学会発表〕(計 11件)

(1) 塩澤和章, 宮崎雅士, 展伸マグネシウム合金の疲労強度特性に及ぼす微粒子ショットピーニング処理の影響【基調講演】, 日本材料学会 疲労シンポジウム, (2012年11月20日, 慶應義塾大学日吉キャンパス)

(2) 塩澤和章, 池田 惇, 福森 毅, 展伸マグネシウム合金の超高サイクル疲労強度特性に及ぼす応力比の影響, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, CD-ROM OS1601(2012年9月24日, 愛媛大)

(3) 塩澤和章, 北島純, 上梨智弘, 村井勉, 高橋泰, マグネシウム合金押し出し材の応力及びひずみ制御低サイクル疲労変形挙動と疲労寿命評価, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, CD-ROM, OS2018, 4p., (2011年7月17日九州工業大学)

(4) K. Shiozawa, J. Kitajima, T. Kaminashi, T. Myrai and T. Takahashi, Low-cycle fatigue deformation behavior and evaluation of fatigue life on extruded magnesium alloys, International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2011年6月5-9日, Lake Como, Italy,

(5) 北島 純, 塩澤和章, 村井勉, 高橋泰, 展伸マグネシウム合金の応力制御低サイクル疲労挙動に及ぼす変形異方性の影響, 日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会講演論文集, No.117-1, pp.167-168 (2011年3月5日信州大学繊維学部)

(6) 横川 晃, 塩澤和章, 村井勉, 高橋泰, マグネシウム合金展伸材 AZ31 及び AZ80 の超高サイクル疲労に及ぼす切欠きの影響に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会講演論文集, No.117-1, pp.165-166 (2011年3月5日信州大学繊維学部)

(7) 塩澤和章, 上梨智弘, 北島 純, 村井勉, 高橋 泰, 展伸マグネシウム合金の低サイクル疲労変形挙動と疲労寿命評価, 日本材料学会第30回疲労シンポジウム, pp.45-49 (2010年10月28日, 高知城ホール)

(8) 塩澤和章, 北島 純, 上梨智弘, 村井勉, 高橋 泰, 展伸マグネシウム合金の応力制御低サイクル疲労挙動に及ぼす変形異方性の影響, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, CD-ROM #1711, pp.732-734, (2010年10月11日, 長岡技術科学大学)

(9) 塩澤和章, 池田惇, 村井勉, 高橋泰, マグネシウム合金 AZ80 押し出し材の疲労強度特性に及ぼす応力比の影響, 日本機械学会 2010年度年次大会講演論文集 No.10-1, Vol.1,

pp.167-168 (2010年9月8日, 名古屋工業大学)

(10) 塩澤和章, 宮崎雅士, 村井勉, 高橋泰, ショットピーニング処理を施したマグネシウム合金 AZ80 押し出し材の超高サイクル疲労特性, 日本機械学会 2010年度年次大会講演論文集 No.10-1, Vol.1, pp.163-164 (2010年9月8日, 名古屋工業大学)

(11) K. Shiozawa, M. Kashiwagi, T. Murai and T. Talahashi, Fatigue behaviour and fractography of extruded AZ80 magnesium alloys in very high cycle regime 【keynote lecture】, 10th International Fatigue Congress (2010年6月8日, Prague, Czech Republic)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塩澤 和章 (SHIOZAWA KAZUAKI)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：90019216

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：