

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560080

研究課題名（和文）高機能性付与材料の超高サイクル疲労信頼性評価・保障と利用の最適化

研究課題名（英文） Evaluation of Very High Cycle Fatigue Reliability and Optimization of Usage for High Functional Materials

研究代表者

塩澤 和章 (SHIOZAWA KAZUAKI)

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・教授

研究者番号：90019216

研究成果の概要（和文）：高機能性付与材料の超高サイクル疲労に現れる内部き裂発生型破壊の機構解明を行い，高信頼性・安全性を保障する疲労設計手法の確立および高強度・高硬度材料の開発を行った。高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2)，高速度鋼 (SKH51) および低合金鋼 (SCM435, SNCM439) の回転曲げおよび軸荷重疲労試験の結果，破壊様式は表面破壊型 (S 型)，GBF 領域を形成しない内部破壊型 (I 型) および GBF 領域を形成する内部破壊型 (IG 型) の3種類に分類され，二段折れ曲がり或は二重 S-N 曲線が現れた。この破壊様式の遷移する応力振幅は基材に存在する介在物寸法及び試験片表面の圧縮残留応力に依存して変化し，これらを考慮した破壊様式の遷移図を提案した。破面の詳細観察を通して，GBF 領域形成機構として新たに「微細炭化物の離散剥離説」を提案した。この説を基にして，GBF 領域形成を抑制して内部破壊を生じない新高速鋼を試作し疲労強度評価を行い，超高サイクル域までの全領域で表面破壊を生じ，介在物を起点とする内部破壊を生じないことを確認した。一方，展伸マグネシウム合金の超高サイクル疲労試験を行い，二段折れ曲がり S-N 曲線の存在を明らかにした。これは双晶変形と結晶のすべりに起因する疲労破壊機構の変化によって現れる現象であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to establish the fatigue design method of mechanical elements assured high reliability and safety, and develop high functional materials having high-fatigue strength in very high-cycle fatigue (VHCF) regime, mechanism of subsurface crack initiation and propagation originated at an inclusion were investigated. As the results of rotating bending and axial loading fatigue tests up to cycles of 10^9 using specimens of high-carbon chromium bearing steel (SUJ2), high-speed steel (SKH51) and low-alloy steel (SCM435, SNCM439), two-stepwise or duplex S-N curve was appeared according to the change in three failure modes; such as surface-induced failure mode (S-mode), subsurface-induced failure mode without GBF formation (I-mode) and that with GBF formation around an inclusion at crack origin (IG-mode). It was pointed out that stress amplitude changing the failure mode depends not only size of inclusion at crack initiation but also amount of compressive residual stress in surface layer. And a map for transition of failure mode affected by the residual stress was proposed. From the detailed observation and analysis of fracture surface, the mechanism of GBF formation in VHCF regime was proposed as the new 'dispersive decohesion of spherical carbide' model. Based on this model, new high-speed steel was made experimentally by control the chemical compositions and a distribution of small spherical carbide precipitated around an inclusion. From the result of experimental evaluation, fatigue crack initiation mode changed from large carbide particle in surface layer in low cycles to crystal slip in surface in high cycles, and subsurface inclusion induced failure mode never appeared in VHCF regime. On the other hand, fatigue tests in VHCF regime were carried out in air at laboratory atmosphere

using extruded magnesium alloys and it was made to clear that two-stepwise S-N curve appeared with change in crack initiation mechanism from twinning deformation in high-stress amplitude level to crystal slip in low-stress amplitude and VHCF regime.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009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：超高サイクル疲労，破壊機構，疲労信頼性，内部破壊，高機能性付与材料

1. 研究開始当初の背景

原子力発電，航空機，鉄道車両などを始めとする各種機器・構造物の経年劣化や高齢化設備時代の到来という社会的背景に関連して，超高サイクル域（ギガサイクル域，超長寿命域）における疲労挙動が注目され始めたのは1990年代の初めである。10⁷回を越える超高サイクル域の疲労において，見掛け状の疲労限度が消失し，二段折れ曲がり或は二重S-N曲線と呼ばれる特異な挙動を呈することが明らかとなった。これは表面き裂発生型破壊から介在物を起点とする内部き裂発生型破壊へ疲労破壊機構が変化する為である。しかし，その破壊機構の変化については未解決の状態であった。長期間使用機器の高信頼性・安全性を保証する技術の確立と高強度材料の開発において，材料内部をき裂発生起点とする疲労破壊機構の解明と新たな疲労設計法の開発・確立は重要な研究課題であった。

2. 研究の目的

高機能性付与材料の超高サイクル疲労に現れる内部き裂発生型疲労破壊の機構解明を行い，高信頼性・安全性を保証する疲労設計手法の確立並びに有効な疲労強度向上策を検討すると共に，破壊機構に基づいて新しい高強度・高硬度材料の開発・設計指針を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

各種高強度・高硬度鋼(SUJ2, SKH51, SCM435, SNCM439)の室温・大気中における10⁹回を打ち切り繰返し数とする回転曲げ疲労試験および軸荷重疲労試験を行い，S-N曲線の特徴を

明らかにすると共に，負荷応力比の影響を検討した。走査型電子顕微鏡(SEM)，走査型プローブ顕微鏡(SPM)，電子線マイクロアナライザー(EPMA)を用いて破壊起点の詳細観察を行い，更に，破面のトポグラフィ情報を基にした破面の再構築と内部破壊過程のコンピュータ・シミュレーション(FRASTA法)により破壊機構を解明した。

本研究から得られた内部破壊機構を基に新しい高速度鋼を試作して，その疲労強度特性について微視的組織構造の立場から検討した。

展伸マグネシウム合金の超高サイクル域における疲労強度特性を明らかにする為に，回転曲げ疲労試験および軸荷重疲労試験を行い，疲労破壊機構および破壊機構の変化に及ぼす双晶変形の影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 超高サイクル域の内部き裂発生起点となった介在物周囲に形成される凹凸の大きな特異な領域(GBF, 図1)の特徴として，**Ⓐ**凹凸の粗さは基材中に存在する微細炭化物の大きさ及び分布に依存する(図2)，**Ⓑ**GBFの外側に比べて高濃度の炭素が検出される，および**Ⓒ**FRASTA法の結果から，離散的な微小き裂の発生と連結・合体を生じる，ことが明らかとなった。これらの事実を基に，GBF領域形成の機構として「微細炭化物の離散剥離説」を提案し，これは各種高強度・高硬度鋼で成立することを明らかにした。(雑誌論文②，⑤，⑥，⑦)

(2) 疲労破壊の形態は，表面き裂発生型破壊(S-mode)，GBF領域を形成しない内部き

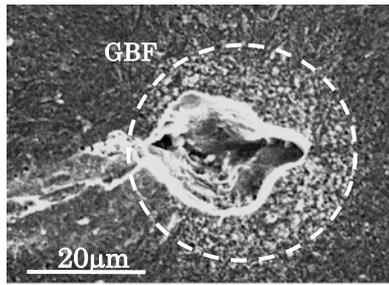


図1 超高サイクル疲労破面に現れる介在物周囲に形成された GBF 領域の一例

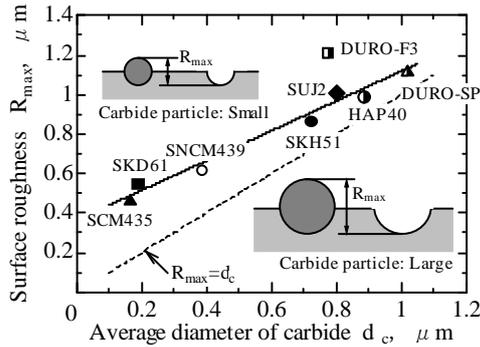


図2 GBF 領域の粗さと基材中の炭化物寸法の関係

裂発生型破壊 (I-mode) および GBF 領域を形成する内部き裂発生型破壊 (IG-mode) の3種類に分類され (図3), 回転曲げ疲労試験および応力比の異なる軸荷重疲労試験に何れにも認められた。(雑誌論文①, ②, ⑦, ⑧, ⑪, ⑭)

(3) 疲労破壊の形態の変化する応力振幅は基材中の非金属介在物或は粗大炭化物の大きさに依存すると共に, 試験片表面の圧縮残留応力の大きさに依存することを破壊力学的検討により明らかにした。即ち, 大きな表面圧縮残留応力が存在する程, S-mode から I-mode へ変化する応力振幅は大きくなる。破壊形態の遷移する応力振幅に及ぼす圧縮残留応力の影響を考慮した「破壊形態遷移図」

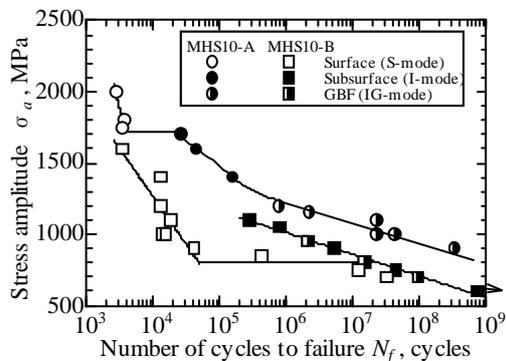


図3 高速度鋼の回転曲げ疲労試験から得られた S-N 曲線の一例 (3種類の破壊様式が認められる)

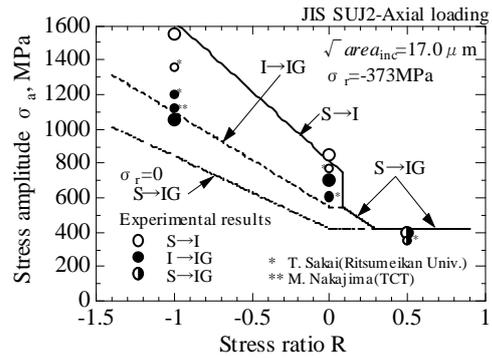


図4 破壊様式の遷移に及ぼす負荷応力比の影響に関する破壊力学的検討 (表面残留応力の有無による比較)

を新たに提案した。また, この考え方に基いて, 破壊形態の遷移に及ぼす負荷応力比の影響を具体的に明らかにした (図4)。(雑誌論文①, ③, ⑥, ⑧, ⑫, ⑮)

(4) 超高サイクル域の S-N 特性に及ぼす焼戻し温度の影響について検討を行った結果, 低温焼戻し材では内部き裂発生型破壊を生じる二段折れ曲がり S-N 曲線が現れるのに対して, 高温焼戻し材では 10^9 回までの繰返しにおいて内部き裂発生型破壊を生じず, 明確な疲労限度が現れた (図5)。これは, 焼戻し温度に依存して現れる基材中の微細炭化

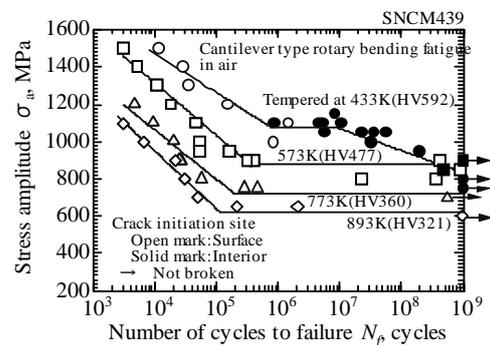


図5 超高サイクル疲労強度特性に及ぼす焼戻し温度の影響

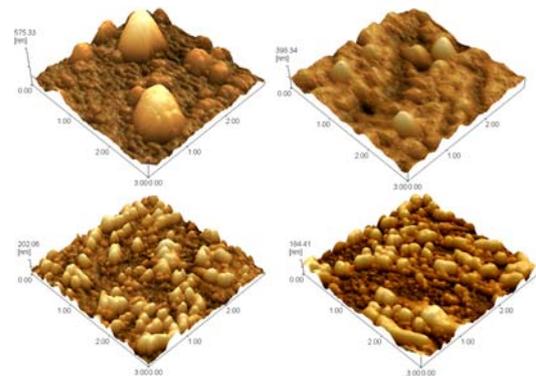


図6 SCM435 鋼の焼戻し温度による微細炭化物の変化 (SPM 観察)

物の大きさに依存するものであり、焼戻し温度が高くなるに伴って微細炭化物の析出が微細化するためであることが明らかとなった(図6)。(雑誌論文④)

(5) 「微細炭化物の離散剥離説」に基づいて新たな高速度鋼を試作した。基材中に存在する炭化物の極微細化および分布量の減少によってGBF領域形成の抑制・遅延化を図ることを開発指針として提案したものである。疲労試験の結果(図7)、試作鋼(MHS2)の高応力振幅・短寿命域における粗大炭化物を起点とした表面破壊から、低応力振幅・長寿命域における結晶のすべり(組織割れ)に起因した表面破壊(図8)に遷移する二段折れ曲がりS-N曲線となり、 10^9 回までに内部き裂発生型破壊は認められなかった。また、長寿命域における疲労強度は比較材として実施したSKH51よりも向上した。GBF領域形成の抑制は主としてMC系炭化物の減少によるものであることが明らかとなった。更に、試作材にプラズマ窒化処理を施した結果、表面改質効果により疲労強度は更に向上した。

(6) 展伸マグネシウム合金(AZ80)の超高サイクル回転曲げ疲労試験を行った結果、

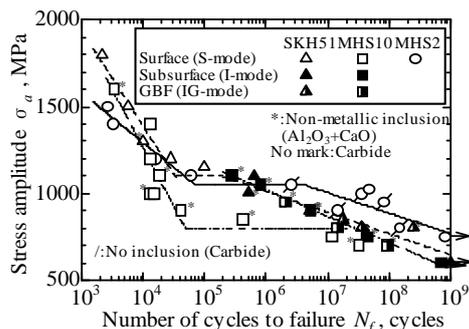


図7 内部破壊を抑制した開発高速度鋼(MHS2)のS-N曲線(SKH51との比較)

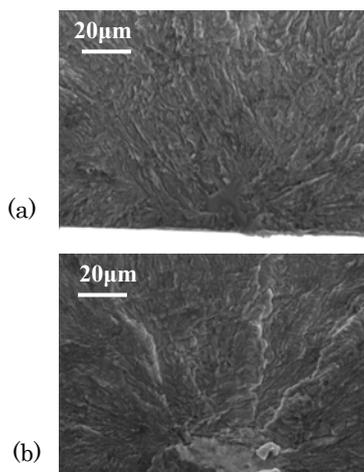


図8 開発高速度鋼MHS2の疲労破面、(a)高応力振幅域の炭化物を起点とした表面破壊、(b)低応力振幅域の組織割れ(すべり)を起点とした表面破壊

二段折れ曲がりS-N曲線が得られ、見掛け上の疲労限度が消失し 10^9 回までには疲労限度が認められなかった(図9)。これは稠密六方格子構造と押しに基づく変形異方性の影響によるものであり、高応力振幅・短寿命域における双晶に起因する疲労き裂の発生から、低応力振幅・長寿命域における結晶のすべりに起因する疲労き裂の発生へと破壊機構が変化する為であることが明らかとなった。破壊機構の遷移は基材の圧縮における耐力と関係する。また、応力比の異なる軸荷重疲労試験の結果から、上記双晶変形の寄与の重要性を指摘した。(雑誌論文⑨、⑩、⑬)

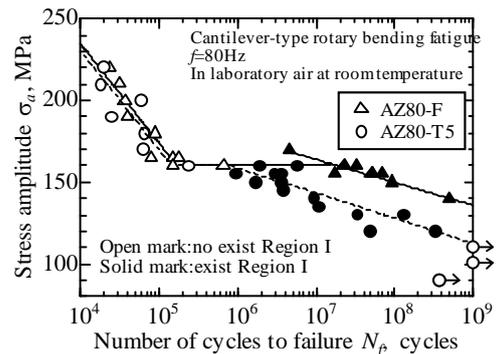


図9 展伸マグネシウム合金AZ80の超高サイクル疲労における二段折れ曲がりS-N曲線(回転曲げ疲労試験)

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15件)

- ① 塩澤和章, 長谷川貴之, 西野精一, 高炭素クロム軸受鋼の超高サイクル軸荷重疲労特性に及ぼす応力比の影響, 材料, 査読有, Vol.56, No.12, 2007, pp.1103-1110.
- ② 塩澤和章, 高強度鋼の超高サイクル疲労に関する研究動向, Nachi Technical Report, 査読無, Vol. 14-A1, 2007, pp.1-11.
- ③ 塩澤和章, 村井優文, 低合金鋼SNM439の超高サイクル域における軸荷重疲労特性, 日本機械学会論文集, A編, 査読有, 74巻742号, 2008, pp.885-893.
- ④ 塩澤和章, 柴田暢宏, 丸山泰弘, 低合金鋼SNM439の超高サイクル疲労特性に及ぼす焼戻し温度の影響, 材料, 査読有, Vol.57, No.9, 2008, pp.905-912.
- ⑤ K. Shiozawa and L. Lu, Internal fatigue failure mechanism of high strength steels in gigacycle regime, Key Engineering Materials, 査読有, Vols. 378-379, 2008, pp.65-80.
- ⑥ K. Shiozawa and L. Lu, Effect of non-metallic inclusion size and residual stresses on gigacycle fatigue properties in high strength steel, Advanced Materials Research,

- 査読有, Vols.44-46, 2008, pp.33- 42 .
- ⑦ J.W. Zhang, K. Shiozawa, L.T. Lu, W. Li and W. H. Zhang, Fatigue fracture behavior of bearing steel GCr15 in very high cycle regime, *Advanced Materials Research*, 査読有, Vols.44-46, 2008, pp.119-126.
- ⑧ K. Shiozawa, T. Hasegawa, Y. Kashiwagi and L. Lu, Very High Cycle Fatigue Properties of Bearing Steel under Axial Loading Condition, *International Journal of Fatigue*, 査読有, Vol. 31, No.5, 2009, pp.880-888.
- ⑨ 塩澤和章, 永井将之, 村井 勉, 高橋 泰, マグネシウム合金AZ61 及びAZ80 押し出し材の低サイクル疲労挙動, *材料*, 査読有, Vol. 58, No.3, 2009, pp.235-242.
- ⑩ 塩澤和章, 柏木友貴, 村井 勉, 高橋 泰, マグネシウム合金AZ80 展伸材のギガサイクル疲労挙動とフラクトグラフィ, *日本機械学会論文集 (A編)*, 査読有, 75 巻 754 号, 2009, pp.733-741.
- ⑪ L. T. Lu, J. W. Zhang and K. Shiozawa, Influence of inclusion size on S-N curve characteristics of high-strength steels in the giga-cycle fatigue regime, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 査読有, Vol. 32, No. 8, 2009, pp.647-655.
- ⑫ 島谷祐司, 塩澤和章, 仲田武弘, 吉本隆志, 高速度工具鋼の超高サイクル疲労強度特性に及ぼす表面残留応力および介在物寸法の影響, *日本機械学会論文集 (A編)*, 査読有, 75 巻 759 号, 2009, pp.1598- 1607.
- ⑬ 塩澤和章, 長田浩平, 展伸マグネシウム合金AZ61 の高サイクル疲労強度特性に及ぼす応力比の影響, *材料*, 査読有, Vol.58, No. 12, 2009, pp.982-989.
- ⑭ T. Sakai, B. Lian, M. Takeda, K. Shiozawa, N. Oguma, Y. Ochi, M. Nakajima and T. Nakamura, Statistical duplex S-N characteristics of high carbon chromium bearing steel in rotating bending in very high cycle regime, *International Journal of Fatigue*, 査読有, Vol. 32, No. 3, 2010, pp.497-504
- ⑮ K. Shiozawa, M. Murai, Y. Shimatani and T. Yoshimoto, Transition of fatigue failure mode of Ni-Cr-Mo low-alloy steel in very high cycle regime, *International Journal of Fatigue*, 査読有, Vol. 32, No. 3, 2010, pp.541-550.
- [学会発表] (計 20 件)
- ① 塩澤和章, 張田敬侑, 仲田武弘, 吉本隆志, 島谷祐司, 清涼治樹, 高強度鋼の高サイクル疲労に及ぼす表面圧縮残留応力の影響, *日本材料学会第 56 期総会学術講演会講演論文集*, 2007, pp.351-352.
- ② 塩澤和章, 柏木友貴, 永井将之, 軸受鋼 SUJ2 の軸荷重疲労試験における内部き裂発生・進展に関するFRASTA解析, *日本材料学会第 56 期総会学術講演会講演論文集*, 2007, pp.353-354.
- ③ 塩澤和章, 高強度鋼の超高サイクル疲労のメカニズム【基調講演】, *先進機能材料・先進構造材料の開発・評価・応用に関するコラボレーションシンポジウム*, 2007.
- ④ 塩澤和章, 杉本匡史, 高速度工具鋼SKH51 の高サイクルねじり疲労強度特性, *日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 No.07-1*, Vol. 1, 2007, pp.103-105.
- ⑤ 塩澤和章, 村井優文, SNCM439 鋼の超高サイクル域における軸荷重疲労強度特性, *日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集No.07-1*, Vol. 1, 2007, pp.117-118.
- ⑥ K. Shiozawa, Takayuki Hasegawa and L. Lu, S-N characteristic of bearing steel under axial loading condition in very high cycle fatigue regime, *Fourth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4)*, 2007, pp.227-235.
- ⑦ 塩澤和章, 山本浩人, 村井優文, SNCM439 鋼の軸荷重疲労強度特性に及ぼすショットピーニング処理の影響, *日本材料学会第 57 期学術講演会講演論文集*, 2008, pp.161-162.
- ⑧ 塩澤和章, 福森毅, 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に及ぼす時効処理の影響, *日本材料学会第 57 期学術講演会講演論文集*, 2008, pp.439-440.
- ⑨ 塩澤和章, 仲田武弘, 高速度工具鋼YXR3 の超高サイクル疲労強度特性に及ぼす表面残留応力の影響, *日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス*, 2008, CD-ROM.
- ⑩ 塩澤和章, 長田浩平, 村井勉, 高橋泰, マグネシウム合金AZ61 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 M&M2008 材料力学カンファレンス*, 2008, CD-ROM.
- ⑪ 塩澤和章, 柏木友貴, 村井勉, 高橋泰, マグネシウム合金AZ80 展伸材のギガサイクル疲労とフラクトグラフィ, *日本材料学会第 29 回疲労シンポジウム*, 2008, pp.13-16.
- ⑫ K.Shiozawa and L.Lu, Effect of non-metallic inclusion size and residual stresses on gigacycle fatigue properties in high strength steel (Invited), *Proc. of 2008 International Conference on Advances in Product Development and Reliability (PDR'08)*, 2008, pp.33-42.
- ⑬ J.W. Zhang, K. Shiozawa, L.T. Lu, W. Li and W.H. Zhang, Fatigue fracture behavior of bearing steel GCr15 in very high cycle regime, *Proc. of 2008 International Conference on Advances in Product Development and*

- Reliability (PDR'08), 2008, pp.119-126.
- ⑭ K. Shiozawa and M. Murai, Transition of Fatigue Failure Mode of High-Strength Steel in Very High Cycle Regime (Invited), Proc. of Materials Science & Technology 2008 Conference and Exhibition (MS&T 2008), 2008, pp.655-669.
 - ⑮ 山本浩人, 塩澤和章, 島谷祐司, 吉本隆志, 越正夫, 小熊規泰, 高速度工具鋼の超高サイクル軸荷重疲労強度特性, 日本機械学会北陸信越支部第46期総会・講演会講演論文集, No.097-1, 2009, pp.23-24.
 - ⑯ 塩澤和章, 宮崎雅士, 柏木友貴, 小熊規泰, 友坂敏信, 展伸マグネシウム合金AZ80の超高サイクル域の疲労に及ぼす二段二重変動応力の影響, 日本材料学会第58期学術講演会講演論文集, 2009, pp.163-164.
 - ⑰ 塩澤和章, 山本浩人, 島谷祐司, 仲田武弘, 吉本隆志, 越正夫, 高速度工具鋼の超高サイクル疲労強度特性に及ぼす荷重負荷様式の影響, 日本機械学会材料力学カンファレンスM&M2009, 2009, CD-ROM, 3P
 - ⑱ 塩澤和章, 村田将一郎, 島谷祐司, 仲田武弘, 吉本隆志, 越正夫, 開発マトリックスハイスの超高サイクル回転曲げ疲労強度特性評価, 日本機械学会材料力学カンファレンスM&M2009, 2009, CD-ROM, 3P.
 - ⑲ K. Shiozawa, M. Nagai and T. Kaminashi, Low cycle fatigue behaviour of extruded magnesium alloys, 12th International Conference on Fracture, 2009, CD-ROM #01174, 10p.
 - ⑳ K. Shiozawa, Y. Shimatani and T. Nakada, Effect of inclusion size and residual stress on gigacycle fatigue properties of high speed tool steel, 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, 2009, pp.111-112.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩澤 和章 (SHIOZAWA KAZUAKI)
富山大学・大学院理工学研究部・教授
研究者番号：900192216

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：