

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007年度 ～2009年度

課題番号：19560143

研究課題名 (和文) 熱処理シミュレーションによる歯車強度の最適化

研究課題名 (英文) Optimization of Gear Strength Using Heat Treatment Simulation

研究代表者

宮近 幸逸 (Kouitsu Miyachika)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30157664

研究成果の概要 (和文) : 本研究では、浸炭焼入れ平・はすば歯車の浸炭焼入れによる残留応力の計算を行うとともに、曲げ疲労および衝撃試験を行って、残留応力、曲げ疲労および衝撃強度に及ぼす硬化層深さ、浸炭部、リム厚さ、歯車構造、焼戻しおよびねじれ角の影響、残留応力と曲げ疲労強度の関係などについて明らかにした。また、高周波焼入れ平歯車の残留応力と硬化層を求めるとともに、硬化層、硬さ測定、焼入れ組織観察、曲げ疲労および衝撃試験を行い、硬化層深さ、硬化層パターン、残留応力、曲げ疲労および衝撃強度に及ぼす加熱時間、加熱電力、周波数、材料、前処理および焼戻しの影響などについて明らかにしている。

研究成果の概要 (英文) : In this research, an optimization of gear strength using heat treatment simulation was investigated. A heat conduction analysis and an elastic-plastic stress analysis during the case-carburizing process of the thick- and thin-rimmed spur gears and the helical gears were carried out by the simulator for the case-carburizing developed by the researchers. Bending fatigue tests and impact tests were carried out. Effects of the case depth, the case-carburized part, the rim and web thicknesses, the tempering and the helix angle on the residual stress, the bending fatigue strength and the impact breaking energy were determined. In the case of induction hardened gears, a suitable profile of hardened layer and pre-treatment condition for bending fatigue strength of induction hardened gears were investigated. In the first, residual stresses and hardened layers of gears induction hardened under various heating conditions were calculated by means of the induction- hardening simulator, which had been developed by authors. Measurements of hardened layers and bending fatigue tests of gears induction hardened under various heating conditions were carried out. Calculated hardened layers were compared with measured ones. The optimum heating condition for the bending fatigue strength of induction-hardened gears was examined. In the next step, the hardness measurement and the observation of macro- and micro- structure of hardened layer, and the bending fatigue test of induction-hardened gears made of as-rolled and thermally refined S35C and S45C steels were carried out for various heating conditions, and then profiles of hardened layer and $S-N$ curves were obtained. Effects of the pre-treatment and the heating condition (electric power P , frequency f and heating time t_h) on profiles and micro-structures of hardened layer of the gears were examined. The relationship among the bending fatigue strength, the profile of hardened layer and the hardness distribution and the micro-structure at the Hofer's critical section of tooth root fillet was determined. The suitable profile of hardened layer and the pre-treatment condition for the bending fatigue strength of induction hardened S35C and S45C steel gears were indicated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2100,000	630,000	2730,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3500,000	1050,000	4550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素

1. 研究開始当初の背景

本研究では、まず焼結金属歯車の高周波焼入れシミュレータの開発のために必要な材料の物性値の測定を、種々の材料組成、密度の焼結材に対して行い、次にこれらの測定値とFEMによる電磁界・熱伝導・弾塑性応力解析法を用いて高周波焼入れ過程の温度、応力、焼入れによる残留応力と硬化層を求める計算法を導くとともに、焼入れ過程の温度および残留応力・硬化層の測定を行って、本計算法の有効性を確かめる。また本計算法を用いて、種々の焼入れ条件に対する焼結金属歯車の残留応力、硬化層の計算を行って、これらに及ぼす加熱コイル、周波数、加熱電力などの影響について明らかにし、加熱コイルの最適設計法と焼入れ条件の選定法を確立する。さらに高周波焼入れ焼結金属歯車の曲げ・歯面疲労試験を行って、これらの疲労強度と残留応力、硬さの関係などについて検討を加える。浸炭および焼入れ焼結金属歯車に対しても焼入れシミュレータの開発を行い、これらの歯車の残留応力、硬さに及ぼす材料組成、圧粉密度、焼入れ条件について明らかにするとともに、曲げ・歯面疲労強度と残留応力、硬さの関係、焼割れ防止などについて検討を加える。また溶製材歯車の場合との比較検討も行う。

2. 研究の目的

本研究では、浸炭焼入れ平・はすば歯車の浸炭焼入れによる残留応力を開発した浸炭焼入れシミュレータを用いて計算を行うとともに、硬化層の硬さ測定、組織観察、曲げ疲労および衝撃試験を行って、残留応力、曲げ疲労および衝撃強度に及ぼす硬化層深さ、浸炭部（歯面、歯車側面、リム内周、ウェブ表面）、リム厚さ、歯車構造、焼戻しおよびねじれ角の影響、残留応力と曲げ疲労強度の

関係などについて検討を加えた。また、高周波焼入れ平歯車の焼入れ過程の電流密度、温度、応力の計算を行うことにより、残留応力と硬化層を求めるとともに、硬化層、硬さ測定、焼入れ組織観察、曲げ疲労および衝撃試験を行い、表面硬さ、焼入れ組織、硬化層深さ、硬化層パターン、残留応力、曲げ疲労および衝撃強度に及ぼす加熱時間、加熱電力、周波数、材料、前処理および焼戻しの影響などについて検討を加えた。これらの結果に基づいて、浸炭および高周波焼入れ歯車の曲げ疲労および衝撃強度にたいする最適焼入れ条件の選定法について明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

- 次のような項目について計算・実験を行った。
- (1) 浸炭焼入れシミュレータによる浸炭焼入れ平・はすば残留応力の計算
 - (2) 溶製材用高周波焼入れシミュレータと焼結材の物理定数の測定値などを用いて焼結材用高周波焼入れシミュレータ開発
 - (3) 高周波焼入れシミュレータによる高周波焼入れ歯車の残留応力の計算
 - (4) 油圧式曲げ疲労試験機を用いて浸炭および高周波焼入れ平歯車および薄肉ウェブ構造平歯車の曲げ疲労試験
 - (5) 円筒歯車用油圧式曲げ疲労試験機を用いて浸炭焼入れはすば歯車の曲げ疲労試験
 - (6) 浸炭および高周波焼入れ平歯車の衝撃試験

4. 研究成果

本研究において得られたおもな結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 浸炭焼入れによる平歯車のHoferの危険断面の圧縮残留応力 $\sigma_{\theta=30}^*$ （絶対値）は、側

面浸炭焼入れによって減少し、その程度は硬化層厚さの増加、歯幅の減少につれて増大する。

(2) 浸炭焼入れ平歯車の曲げ疲労限度は、側面浸炭焼入れによって硬化層が厚すぎる場合には減少し、適切な硬化層深さの場合には、浸炭部にかかわらず変化しない。

(3) 浸炭焼入れ薄肉ウェブ構造平歯車（リム厚さ $l_w=2m$ ）の曲げ疲労限度荷重 P_{nu} は、対称ウェブ構造歯車の場合には、一体歯車の場合とほぼ同じになるが、非対称ウェブ構造歯車の場合には一体歯車の 0.85 倍程度になる（重量は約半分になる）。

(4) 浸炭焼入れはすば歯車の曲げ疲労限度に対しても、平歯車の場合と同様に最適硬化層深さが存在する。

(5) 本研究で用いたような浸炭焼入れはすば歯車の曲げ疲労限度円周力 F_{tu} は、ねじれ角 β_0 の増加とともに増大する。

(6) 浸炭焼入れはすば歯車の F_{tu} は、 $\beta_0 = 10, 20^\circ$ 、有効硬化層深さ $d_e = 0.67 \text{ mm}$ では、側面浸炭焼入れした場合(Case TS)のほうが側面浸炭防止した場合(Case T)より大きくなるが、 $\beta_0 = 20^\circ$ 、 $d_e = 1.12 \text{ mm}$ では、逆に Case T の場合のほうが大きくなる。(6) 浸炭焼入れ焼戻し歯車の衝撃破断エネルギー E_b は、有効硬化層深さ d_e にかかわらず $T_1 = 180^\circ\text{C}$ 付近で極大値をとる。

(7) 高周波焼入れ歯車の加熱電力 P が小さい場合には、加熱時間 t_h がかなり大きくなるため、 P が大きい場合に比べて歯形に沿った硬化層が得難い。

(8) 高周波焼入れ S35C, S45C 調質鋼および圧延鋼歯車の曲げ疲労強度に対する最適硬化層パターンを示した。

(9) 本研究で得られた S45C 調質鋼高周波焼入れ歯車の最大曲げ疲労限度は、浸炭焼入れ歯車の場合に匹敵する大きさである。

(10) 本研究で用いたような S35C, S45C 調質鋼高周波焼入れ歯車の焼入れ組織は、全歯幅にわたってマルテンサイトであるが、S35C, S45C 圧延鋼の場合には、フェライトが残り、とくに歯幅中央部に多く残る。

(11) S35C, S45C 調質鋼および圧延鋼を用いた高周波焼入れ歯車の曲げ疲労強度に対する適切な焼入れ条件を歯元の表面硬さおよび有効硬化層深さから推定するためのマップを提示した。

(12) 高周波焼入れ歯車の E_b は、調質鋼のほうが焼ならし鋼の場合より大きい。また、調質鋼の場合には最適加熱時間が存在するが、焼ならし鋼の場合には、実用加熱時間の範囲では加熱時間の増加とともに増大する。

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 13 件）

- ① Kouitsu Miyachika and Wei-Dong Xue, Residual Stresses of Spur Internal Gears Due to Case-Carburizing, Proc. of The Forth Asian Conference on Heat Treatment and Surface Engineering, 2009, pp.350-355.
- ② Kouitsu Miyachika, Kazuaki Ando, Wei-Dong Xue, Imaduddin Helmi Bin Wan Nordin, Effects of Case Depth, Side-Face Carburizing and Helix Angle on Residual Stress and Bending Fatigue Strength of Case-Carburized Helical Gears, Proc. of ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2009, 2009, DETC2009/PTG-87313 on CD-ROM.
- ③ Kouitsu Miyachika, Wei-Dong Xue, Shuji Sawada and Hidefumi Mada, Effects of Roller Configuration on Residual Stresses of Rollers Due to Case-Carburizing, Proceedings of The 17th IFHTSE Congress, NETSU SHORI Vol.49 Special Issue Vol.1, 2009, pp.129-132.
- ④ Kouitsu Miyachika, Hideaki Katanuma and Yohichi Takemura, Suitable Profile of Hardened Layer and Pre-Treatment Condition for Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Gears, Proceedings of The 17th IFHTSE Congress, NETSU SHORI Vol.49 Special Issue Vol.1, 2009, pp.89-92.
- ⑤ Kouitsu Miyachika, Kazuaki Ando, Takao Koide, Hidefumi Mada, Hideaki Katanuma, Kengo Nojima and Satoshi Oda, Effects of Carburized Part, Case Depth and Helix Angle on Bending fatigue Strength of Case-Carburized Helical Gears, Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, 2009, pp.338-343.
- ⑥ Takao Koide, Ichiro Ishizuka, Teruie Takemasu, Kouitsu Miyachika and Yasuhiro Fukai, Load Bearing Capacity of Surface Rolled High Density Sintered Metal Gears, Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, 2009, pp.313-316.
- ⑦ Kouitsu Miyachika, Hideaki Katanuma, Jun Iwanaga and Hidefumi Mada, Hardened Layer and Bending

- Fatigue Strength of Induction Hardened Thermally Refined Steel Gears, JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.3, No.2, 2009, pp.136-154.
- ⑧ Meng Mu, Seigo Nishimura, Kouitsu Miyachika and Takao Koide, Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Thin-Rimmed Spur Gears with Web Arrangement (Effects of Rim Thickness and Web Structure), Proceedings of JSMME 2008 Joint Symposium on Mech. and Materials Eng. Between Tottori Univ. and Northeastern Univ., 2008, pp.157-164.
- ⑨ Ichiro Ishizuka, Takao Koide, Kouitsu Miyachika and Teruie Takemasu, Effects of Rolling on Load Bearing Capacity of Sintered Metal Gears, Proceedings of JSMME 2008 Joint Symposium on Mech. and Materials Eng. Between Tottori Univ. and Northeastern Univ., 2008, pp.141-146.
- ⑩ Imaduddin Helimi Bin Wan Nordin, Kazuaki Ando, Kouitsu Miyachika, Tkao Koide and Chiaki Namba, Bending Fatigue Strength of Case-Carburized Spur Gears with Boss, Proceedings of JSMME 2008 Joint Symposium on Mech. and Materials Eng. Between Tottori Univ. and Northeastern Univ., 2008, pp.23-29.
- ⑪ Kouitsu Miyachika, Wei-Dong Xue, Takao Koide, Hidefumi Mada, Kengo Nojima, Satoshi Oda and Hideaki Katanuma, Residual Stress and Bending Fatigue Strength of Case-Carburized Thin-Rimmed Spur Gears with Asymmetric Web Arrangement, Proc. of 2007 ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2007, DETC2007-34047 on CD-ROM.
- ⑫ Kouitsu Miyachika, Hideaki Katanuma, Takao Koide, Michiaki Morimoto, Jun Iwanaga, Hidefumi Mada and Satoshi Oda, Effects of Pre-Treatment and Heating Time on Hardened Layer and Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Gears, Proc. of JSME-KSME Joint International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2007, A-14 on CD-ROM.
- ⑬ Kouitsu Miyachika, Takao Koide, Satoshi Oda, Naoki Motoka, Keiichi Uemoto, Yoshihisa Matsumoto and Hideaki Katanuma, Effects of Heating Conditions on Residual Stress, Hardened Layer and Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Sintered Metal Gears, Proc. of JSME-KSME Joint International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2007, A-12 on CD-ROM.
- [学会発表] (計 18 件)
- ① 茅山真士, 宮近幸逸, 馬田秀文, 小出隆夫, 志賀 寿, 浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労強度に及ぼす側面浸炭焼入れおよび歯幅の影響, 日本機械学会中国四国支部第 48 期総会・講演会, 平成 22 年 3 月 6 日, 広島工業大学.
- ② 吉村 樹, 宮近幸逸, 茅山真士, 片沼秀明, 馬田秀文, 高周波焼入れ歯車の衝撃強度に及ぼす焼戻しの影響, 日本機械学会中国四国支部第 48 期総会・講演会, 平成 22 年 3 月 6 日, 広島工業大学.
- ③ 小出隆夫, 深井康宏, 竹増光家, 宮近幸逸, 高密度焼結金属歯車の荷重伝達能力に及ぼす表面転造とショットピーニングの影響, 日本機械学会中国四国支部第 48 期総会・講演会, 平成 22 年 3 月 6 日, 広島工業大学.
- ④ 吉村 樹, 宮近幸逸, 片沼秀明, 茅山真士, 西村征吾, 前田憲正, 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労および衝撃強度に及ぼす焼戻しの影響, 日本設計工学会平成 21 年度秋季大会研究発表講演会講演論文集 35~38 頁, 平成 21 年 10 月 23 日, ガーデンパレス広島.
- ⑤ 宮近幸逸, 茅山真士, 亀田真吾, 安藤和彰, 浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労強度に及ぼす側面浸炭焼入れ, 歯幅および粒界酸化の影響, 日本設計工学会講演論文集 No.26 19~24 頁, 平成 21 年 6 月 6 日, 広島工業大学広島校舎.
- ⑥ 宮近幸逸, 牟猛, 片沼秀明, 吉村樹, 馬田秀文, 小出隆夫, 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労(加熱時間, 前処理および歯数の影響), 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会, 2009 年 3 月 6 日, 山口大学.
- ⑦ 西村征吾, 宮近幸逸, 安藤和彰, 志賀 寿, 小出隆夫, 浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労および衝撃強度に及ぼす焼戻しの影響, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会, 2009 年 3 月 6 日, 山口大学.
- ⑧ 小出隆夫, 深井康宏, 石塚伊知郎,

- 竹増光家, 宮近幸逸, 高密度焼結金属歯車の荷重伝達能力に及ぼす表面転造の影響, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会, 2009 年 3 月 6 日, 山口大学.
- ⑨ 西村征吾, 安藤和彰, 宮近幸逸, 小出隆夫, 難波千秋, 小田 哲, 浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労強度に及ぼす焼戻しの影響, 日本機械学会中国四国支部・九州支部合同企画「岡山講演会」, 2008 年 10 月 22 日, 岡山大学.
- ⑩ 片沼秀明, 宮近幸逸, 竹村揚一, 小出隆夫, 小田 哲, 高周波および浸炭焼入れ歯車の硬化層と曲げ疲労強度, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008 年 8 月 2 日, 横浜国立大学.
- ⑪ 片沼秀明, 竹村揚一, 宮近幸逸, 小出隆夫, 小田 哲, 高周波焼入れ歯車の硬さと曲げ疲労強度, 日本機械学会第 8 回機素潤滑設計部門講演会, 2008 年 4 月 21 日, 倉敷アイビースクエア.
- ⑫ 安藤和彰, 宮近幸逸, 小出隆夫, 小田 哲, 浸炭焼入れはすば歯車の曲げ疲労強度・き裂伝ば, 日本機械学会第 8 回機素潤滑設計部門講演会, 2008 年 4 月 21 日, 倉敷アイビースクエア.
- ⑬ 安藤和彰, 宮近幸逸, 小出隆夫, 難波千秋, 小田 哲, 浸炭焼入れ平歯車の歯元曲げ強度に及ぼすボス幅の影響, 日本機械学会中国四国支部第 46 期総会・講演会, 2008 年 3 月 6 日, 近畿大学工学部 (東広島市).
- ⑭ 竹村揚一, 牟 猛, 片沼秀明, 宮近幸逸, 小出隆夫, 小田 哲, 浸炭および高周波焼入れ薄肉非対称ウェブ構造平歯車の曲げ疲労強度・き裂, 日本機械学会中国四国支部第 46 期総会・講演会, 2008 年 3 月 6 日, 近畿大学工学部 (東広島市).
- ⑮ 宮近幸逸, 牟 猛, 片沼秀明, 竹村揚一, 小出隆夫, 難波千秋, 高周波焼入れ薄肉ウェブ構造平歯車の曲げ疲労強度 (リム厚さおよびウェブ構造の影響), 日本機械学会 MPT2007 シンポジウム<伝動装置>, 2007 年 11 月 29 日, 鳥取県民文化会館.
- ⑯ 片沼秀明, 竹村揚一, 宮近幸逸, 小出隆夫, 小田 哲, 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労強度に対する最適硬化層パターン, 日本機械学会 MPT2007 シンポジウム<伝動装置>, 2007 年 11 月 29 日, 鳥取県民文化会館.
- ⑰ 安藤和彰, 宮近幸逸, 小出隆夫, 小田 哲, 浸炭焼入れはすば歯車の残留応力と曲げ疲労強度 (硬化層深さ, ねじれ角および

浸炭部の影響), 日本機械学会 MPT2007 シンポジウム<伝動装置>, 2007 年 11 月 29 日, 鳥取県民文化会館.

- ⑱ 安藤和彰, 宮近幸逸, 小出隆夫, 小田 哲, 浸炭焼入れはすば歯車の曲げ疲労強度・き裂に及ぼすねじれ角・浸炭部の影響, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007 年 9 月 11 日, 関西大学吹田キャンパス.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.tottori-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮近 幸逸 (Kouitsu Miyachika)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 3 0 1 5 7 6 6 4

(2) 研究分担者

小出 隆夫 (Tkao Koide)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 6 0 1 2 7 4 4 6