

氏名(本籍)	ながた たかひろ 永田 尊礼 (東京都)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第 7号
学位授与の日付	平成29年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	密度の異なるプレアロイ低合金鋼焼結浸炭焼入れ歯車の荷重伝達能力とFEMによる応力解析
論文審査委員	(主査) 教授 竹増光家 教授 須川修身 教授 松江英明 教授 大島政英 教授 松岡隆志 准教授 内海重宜 教授 桑原利彦(東京農工大学大学院)

## 論文内容の要旨

### 論文要旨

自動車のトランスミッション用動力伝達歯車は高回転・高トルク的环境下で使用されるため、素材にはSCM材やSCR材など機械構造用溶製合金鋼(溶製鋼)が用いられている。これから歯車を製作する場合、多種多様な工作機械が使用され、一般に切断、荒加工、歯切り加工、シェービング加工などが行われ、そのほか熱処理や仕上げ加工など後加工が施されている。そのため、工程が複雑化してしまいコスト削減やリードタイムの短縮などが困難となっている。特に、自動車産業においてはコスト優先であることから、工程の簡略化あるいは根本的な見直しが強く求められている。一方、粉末冶金法は混合、成形、焼結の三工程のみでほぼ最終製品に近い形状まで製作でき、また金型を一度製作すればその製品を多量に生産できる特徴がある。そのため、歯車のような複雑形状をした部品を生産する場合、粉末冶金法は最適な製法であると言える。その反面、これで得られる焼結鋼は内部に不特定多数の空孔が存在するため、密度( $\rho = 6.8 \sim 7.2 \text{ Mg/m}^3$ )が低く、強度も溶製鋼に比べ劣る欠点を有している。これにより、焼結鋼の使用は低い荷重下で使用される部品に限られ、動力伝達歯車のような高荷重の加わる機械部品には信頼性の面で実用化されず、溶製鋼を素材とした部品からの置き換えが進んでいない。

近年、一回圧縮一回焼結(1P1S)のみで非常に高密度な焼結鋼( $\rho = 7.5 \text{ Mg/m}^3$ 以上)を作製できるプレアロイ合金鋼粉が開発され、これから製作した焼結鋼歯車に適切な表面転造と浸炭焼入れを施すと、一般的な溶製鋼歯車の曲げ疲労

強度 (1 GPa), 面圧疲労強度 (2 GPa) に匹敵するレベルに達することが明らかにされた. しかし, 高密度な焼結鋼を作製する場合, 成形圧力を著しく大きくしなければならないため金型から取り出すときの成形体損傷, 金型寿命が短くなるなど新たな問題もある. これに対し, 密度が若干低い焼結鋼 ( $\rho = 7.3 \sim 7.4 \text{ Mg/m}^3$ ) であれば, 成形圧力を高密度な場合に比べ 20%以上低減できる利点があるほか内在する空孔は軽量化や騒音軽減に寄与するなど歯車素材として優位な特性を有している. 仮に, 密度が若干低い焼結鋼歯車に対して, 表面転造による歯表面層の高密度化や適切な表面硬化熱処理を施すことで, 十分な荷重伝達能力を付与できれば, これら諸問題は解決できる.

また, 上記に溶製鋼歯車に匹敵する強度を有した密度  $7.5 \text{ Mg/m}^3$  以上の高密度な焼結鋼歯車を製作できることを記したが, 未だ実用化された例は少ない. これは, 焼結鋼の内部に存在する空孔が切欠き欠陥として作用するとして強度不足の懸念が持たれていることが考えられ, 空孔が内在する焼結鋼であっても強度が得られていることを理論的に立証する必要がある. その方法には一般的に有限要素法 (FEM) が用いられているが, これまでの FEM 解析は溶製鋼や焼結鋼など素材の違いを区別することができないため, 不特定多数の空孔を内包している焼結鋼では, 計算に必要な材料特性に対しその影響を考慮した値を付与する代替え策が採られている. しかし, この方法は解析モデルを均質等方性材料として取り扱うため, モデル全体に生じる応力分布は均一な応力場となる. 実際, 空孔のような欠陥が素材中に分散している焼結鋼では, その周囲に応力集中が生じるためモデル全体に現れる応力分布は均一な応力場とは異なると考えられ, 得られる解析結果は実際の現象を説明することができない. そこで, 焼結鋼に内在する空孔をモデルに再現できれば, その周囲に生じる応力集中が求められ, これをモデル全体の応力分布に反映できると考えられる.

本論文では, まずプレアロイ合金鋼粉から製作した密度の異なる焼結鋼歯車について, 表面転造する場合と未転造の場合とで焼結鋼歯車の一本歯曲げ疲労試験, 運転試験を行い, 初期密度や歯の表面層緻密化の度合いが疲労強度 (曲げ疲労強度, 面圧疲労強度) に与える効果を検討する. 次に, FEM を使用した焼結鋼歯車の理論的な応力解析を行うため, はじめに空孔の周囲に生じる応力集中を解析結果に反映させる新たな試み (モデルの構築) について検討し, その空孔の分布や大きさ, 表面層緻密化の度合いが応力分布に与える効果を解析的に検証した. さらに, 得られた解析結果と実際の試験結果とを比較すること

で定性的、定量的な評価を行っている。

試験歯車は、2種類のプレアロイ合金鋼粉（Cr-Mo系、Ni-Mo系）を使用して、各々IPISの工程から密度7.30～7.55 Mg/m<sup>3</sup>の範囲にある密度の異なる焼結鋼平歯車を製作し、そのうち転造する歯車にはCNC転造盤を使用して表面層の緻密化を行った。そして、全ての試験歯車に対して浸炭焼入れを施した後、各疲労試験に供した。試験はパルセータによる一本歯曲げ疲労試験、動力循環式歯車運転試験機を使用した面圧疲労試験を行った。

この結果、いずれのプレアロイ合金鋼粉から製作した焼結鋼歯車の曲げ疲労強度は、未転造の場合では密度7.5 Mg/m<sup>3</sup>以上に高密度化すれば溶製鋼歯車のそれに匹敵するレベルに達する。また、転造した焼結鋼歯車の曲げ疲労強度と面圧疲労強度は、密度7.40 Mg/m<sup>3</sup>まで低くしても溶製鋼歯車に匹敵する強度を有し、特に密度7.40 Mg/m<sup>3</sup>の歯車は溶製鋼歯車や密度7.5 Mg/m<sup>3</sup>以上の歯車に比べ大きく強度が向上する。そして、密度7.40 Mg/m<sup>3</sup>の焼結鋼歯車は転造することによって未転造時に比べ強度の増加率が最も大きく、表面層緻密化による強度の向上効果が顕著に現われる。以上により、各々のプレアロイ合金鋼粉から製作した、密度7.40 Mg/m<sup>3</sup>以上の焼結鋼歯車に対して、転造による表面層の緻密化を行うことによって、疲労強度は現行使用されている溶製鋼歯車のそれに匹敵、あるいはそれ以上の強度を有することを明らかにした。そして、空孔を含む焼結鋼であっても、高荷重の環境で使用される溶製鋼の代替材として、十分使用に耐えうることを明らかにした。

次に、FEMを使用した焼結鋼歯車の応力解析では、空孔の周囲に生じる応力集中を解析結果に反映させるため、モデルに空孔を配置する新たな試みを検討した。まず応力集中を求めるため、実際に製作した密度の異なる各焼結鋼歯車の空孔組織写真を基に、空孔の分布や大きさ、形状を取り込んだモデルを構築し、これの表面層から所定の深さに配置した空孔を除去する（以下、これを緻密化深さ $\delta$ と称する）ことで、表面転造を表現した表面層緻密化モデルをも構築した。解析はこのモデルを使用した焼結鋼歯車の歯の曲げ応力解析、噛合い時の純転がり接触（ピッチ点）を想定した接触応力解析を行い、表面層緻密化の度合いや密度の違いが応力分布に与える効果を検討し、得られた解析結果と実際の試験結果（一本歯曲げ疲労試験、運転試験）とを比較している。

この結果、歯元曲げ応力分布では隅肉部の最弱断面近傍最表面層に最大主応力の極大値 $\sigma_{1\_peak}$ が生じ、それは密度が低いほど、又は $\delta$ が大きいほど小さくな

る。そして、 $\delta$ が十分に大きくなると密度に関わらず $\sigma_{1\_peak}$  はほぼ同等になる。ピッチ点を想定した接触応力解析では、垂直対称軸において最大主せん断応力の極大値 $\tau_{1\_peak}$ が接触点から深さ約 90  $\mu\text{m}$  の位置で発生し、 $\tau_{1\_peak}$  と密度の関係、 $\tau_{1\_peak}$  と $\delta$ の関係は $\sigma_{1\_peak}$ における密度や $\delta$ との関係と同様の傾向が得られる。また、いずれの応力分布も密度 7.40  $\text{Mg/m}^3$  のモデルにおいて $\delta$ が深くなるほど、特に $\delta = 0.2 \text{ mm}$  以上に表面層の緻密化を行うと、 $\sigma_{1\_peak}$  や $\tau_{1\_peak}$  の減少率はこれの前後の密度モデルに比べ最も大きく、強度の向上効果が FEM 解析結果からも得られることを明らかにした。そして、実際の空孔を再現した FEM モデルを使用したシミュレーション結果は、実際の試験結果を定性的、定量的によく説明でき、焼結鋼のような異なる物質を含む素材の FEM 解析を行う場合には、本モデルを使用する手法が有効であることを明らかにした。

## 論文審査の結果の要旨

(論文審査の要旨)

本論文はまず、密度の異なるプレアロイ低合金鋼焼結浸炭焼入れ歯車の荷重負荷能力試験を行い、歯元曲げおよび面圧疲労強度に及ぼす素材の初期密度や転造による歯表面層緻密化の影響を明らかにしている。次に内部に空孔を配置した FEM モデルによる応力解析を行い、空孔周囲に生じる応力集中が、曲げおよび接触応力場に及ぼす影響を調べ、疲労強度との関係を考察している。その結果、各疲労強度に最も強く関係する因子である、曲げ応力解析における最弱断面近傍の最表面層に生じる最大主応力の極大値 $\sigma_{1\_peak}$ 、および接触応力解析における表面下の最大せん断応力の極大値 $\tau_{1\_peak}$  はともに、素材密度が高くなるにつれ、緻密化深さ $\delta$ が増大するにつれ減少し、また、素材密度 7.40  $\text{Mg/m}^3$  のモデルにおいて $\delta$ の増加による $\sigma_{1\_peak}$  や $\tau_{1\_peak}$  の減少率が最も顕著であることを解明している。これらは実験で得られた密度や表面転造が及ぼす疲労強度向上の関係とよく符合していた。従来の均質等方な材料特性を用いる FEM 解析では、焼結歯車に生じる応力場と各種疲労強度との関係を首尾よく説明することができなかったが、本論文ではそれらを統合的に裏付けることに成功した点に特徴がある。

本論文は 6 つの章から構成されている。

第 1 章の序論では、本論文のターゲット製品である自動車トランスミッション用動力伝達歯車の製造過程の現状と問題点を包括的に解説し、近年特に強く求められている生産工程簡略化によるコスト低減と、ネットシェープによる省資源・省エネルギーの観点から、粉末焼結歯車が特に適している一方で、その材料的・強度的問題点と、それらを克服し実用化するために解決すべき課題を明確にした上で、本研究の位置付けと目的を具体的に述べている。

第2章では、歯車の荷重負荷能力試験に使用した密度の異なるプレアロイ低合金鋼焼結浸炭焼入れ歯車の製作手順、および試験方法について述べている。試験歯車は、2種類のプレアロイ合金鋼粉（Cr-Mo系、Ni-Mo系）から一回圧縮一回焼結の工程により密度  $7.30 \sim 7.55 \text{ Mg/m}^3$  の範囲の焼結鋼素材を成形し、機械加工により試験平歯車を製作し、一部は仕上げ転造により歯表面層を緻密化し、全試験歯車に浸炭焼入れを施している。一本歯曲げ疲労試験はパルセータにより、面圧疲労試験は動力循環式歯車運転試験機により行っている。

第3章では、焼結鋼歯車の強度試験結果について述べている。いずれの焼結鋼歯車も、曲げ疲労強度は、密度  $7.5 \text{ Mg/m}^3$  以上であれば、未転造でも溶製鋼歯車のそれに匹敵する。一方、転造した焼結鋼歯車の曲げ疲労強度と面圧疲労強度は、密度  $7.40 \text{ Mg/m}^3$  以上であれば溶製鋼歯車のそれらと同等以上になり、特に、密度  $7.40 \text{ Mg/m}^3$  の焼結鋼歯車は、表面層緻密化による強度向上の効果が最も顕著に現われる。これらの結果から、プレアロイ合金鋼焼結浸炭焼入れ歯車の荷重負荷能力は、密度  $7.40 \text{ Mg/m}^3$  以上であれば、歯表面層を適切なレベルに緻密化することにより、溶製鋼浸炭焼入れ歯車のそれに匹敵し、自動車トランスミッション用動力伝達歯車の素材として十分使用できることを明らかにしている。

第4章では、FEMによる応力解析手法について述べている。特に独創的なのは、焼結鋼歯車の組織写真を基に空孔を取り込んだFEMモデルを構築し、空孔周囲に生じる応力集中を応力場に反映させるという新たな試みを行っている点である。歯元曲げ応力解析では歯元隅肉部危険断面近傍に、噛み合いピッチ点における接触応力解析では接触域近傍に数 $\mu\text{m}$ 四方の細かな要素を配置し、気孔の大きさ、形状、分布を再現している。また、各モデルに対して表面から所定深さ内にある空孔を除去することで表面層緻密化の状態を表している。

第5章では、FEMによる応力解析結果について述べ、実験結果と比較検証している。各疲労強度に最も強く関係する因子である、曲げ応力解析における最弱断面近傍の最表面層に生じる最大主応力の極大値 $\sigma_{1\_peak}$ 、および接触応力解析における表面下の最大せん断応力の極大値 $\tau_{1\_peak}$ はともに、素材密度が高くなるにつれ、緻密化深さ $\delta$ が増大するにつれ減少し、また、素材密度  $7.40 \text{ Mg/m}^3$  のモデルにおいて $\delta$ の増加による $\sigma_{1\_peak}$  や $\tau_{1\_peak}$  の減少率が最も顕著であることを解明している。これらは実験で得られた密度や表面転造が及ぼす疲労強度向上の関係とよく符合しており、従来の均質等方な材料特性を用いたFEM解析では説明することができなかったそれらの点を、統合的に裏付けることに成功している。

第6章では、本論文全体を要約して主たる結論をまとめ、さらに、今後の研究課題や焼結歯車の実用化に関する将来展望についても言及している。

以上のように、本論文は、空孔を考慮したFEMモデルによる応力解析が、焼結鋼歯車の

疲労強度および荷重負荷能力評価をする上で非常に有効であることを実証したものであり、粉末冶金分野、材料加工分野、機素潤滑設計分野、計算力学分野における解析手法の発展に貢献するところが大きいと高く評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の論文として、十分価値あるものと認められる。