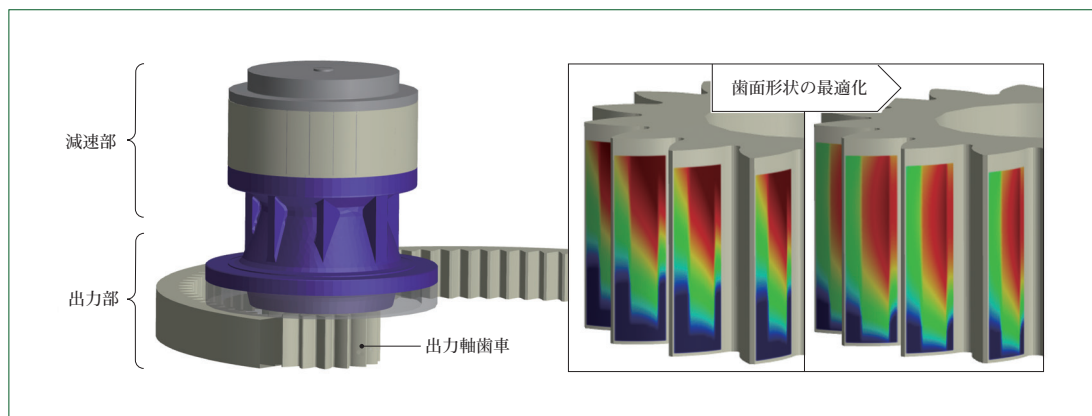


減速機全体構造を考慮した歯車表面の接触応力解析および最適設計手法の開発

Development of Tooth Contact Analysis and Optimal Design Method for Tooth Flank Shape Considering Entire Structure of Reducer

●門 井 幸 太*
Kota KADOI



歯当たり解析モデルおよび歯面形状の最適化
Model of tooth contact analysis and optimization of tooth flank shape

歯面間の偏差(ミスマイメント)は部品の隙間や加工誤差、組立て誤差などで少なからず発生し、歯面接触応力の増大を招き、歯面損傷につながる場合もある。ミスマイメントによる接触応力の増大を防ぐには一般的に歯面修整が適用されるが、複雑な減速装置になるほど適切な修整量を決めることが難しくなる。そこで修整量の適切な設計に向け、設計の妥当性を検証する方法と歯面形状の最適設計手法が必要とされる。本開発では、まず社内耐久試験で評価された種々の隙間や加工誤差を含む減速機を対象として、減速機構造全体を考慮した歯面接触応力解析モデルを構築した。モデルを用いた解析による接触応力分布を試験後の歯面接触状態と比較し、よく一致することが確認された。構築された解析モデルと品質工学の2段階設計を組み合わせることで歯面形状の最適化を行い、ミスマイメントや負荷トルク条件に対して接触応力を低減できることを明らかにした。

The misalignment between tooth flanks due to the clearance between parts, manufacturing errors or assembly errors causes an increase in tooth contact stress, which may lead to tooth flank failure. The tooth flank modification is generally applied to reduce the influence of the misalignment, but it is difficult to design appropriate amount of the modification in more complicated reducers. Therefore, the method of the design validation and the optimal design method of the tooth flank shape are needed. In this paper, the simulation model of the tooth contact analysis considering the entire structure of the reducer was built for a reducer which had undergone an endurance test in-house. The tooth contact distributions of analysis result were confirmed to be in good agreement with the gear tooth after the endurance test. Optimization of the tooth flank shape was performed by combining the analysis model of the reducer and two step design in quality engineering. The results were confirmed that the optimization method can decrease contact stress against misalignment and load torque condition.

1 まえがき

歯車減速機の主要な技術課題の一つとしてトルク密度(出力トルク/重量)の向上がある。その方策の一つとして重量の低減、たとえば減速機部品の小型化、減速機ケースの薄肉化や材料変更(鋳鉄からアルミなど)があるが、剛性低下を伴う設計変更になる場合が多い。一方、剛性が低下することで外部負荷による歯車のミスマイメントが増大し、歯車表面の接触応力の増加、ひいては表面損傷につながる場合もある。その未然防止のために歯車の強度設計技術にはさらなる高度化が求められている。

歯車表面強度の評価指標には、一般的に歯面接触応力が用いられる。接触応力の評価の際には歯車諸元のほかに構成部品や運転条件、運転環境などを考慮する必要がある、特に歯車表面ではミスマイメントが重要となる。歯面のミスマイメントは歯車を支持する部品の隙間、加工誤差、組立て誤差などが要因となって発生し、歯の片当たりや接触応力の増大を引き起こす。設計者はこれを防ぐべく、歯すじ形状の全部あるいは一部を曲線や直線として設計する歯面修整を行う(図1)。この修整形状は、ミスマイメントによる片当たりが生じないように設計する必要があることから、減速機全体を促えたミスマイメントに対する歯面設計が重要になる。

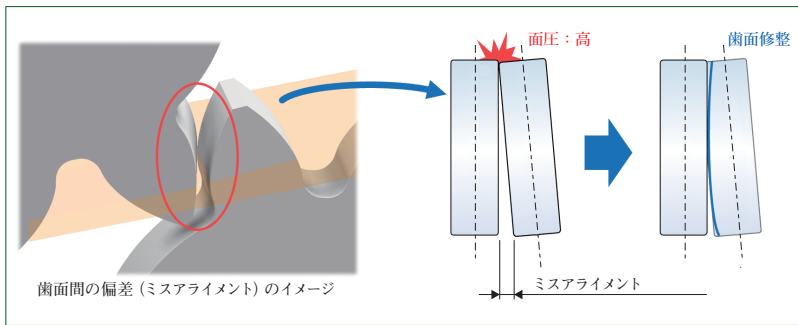


図1 ミスアライメントと歯面修整
Misalignment and tooth flank modification

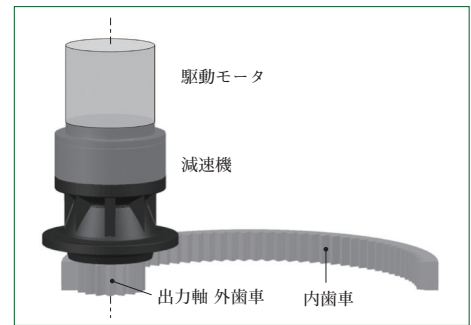


図2 減速機全体構造を含めたシミュレーションモデル
Simulation model considering entire structure of reducer

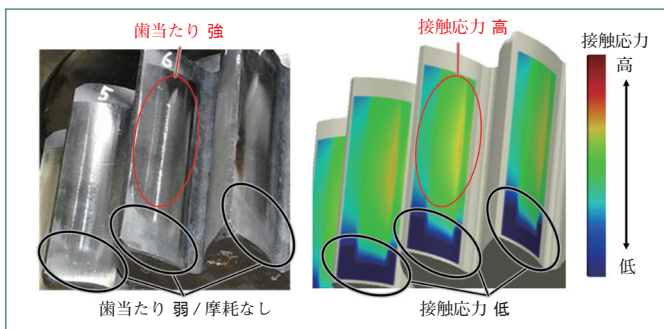


図3 定常負荷条件における耐久試験後の歯面と解析結果の比較
Comparison between tooth flank after an endurance test and analysis result on steady load condition

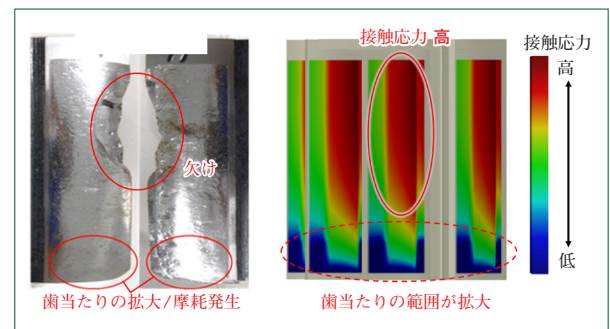


図4 ピーク負荷条件における耐久試験後の歯面と解析結果の比較
Comparison between tooth flank after an endurance test and analysis result on peak load condition

一般的に接触応力の計算はISO規格⁽¹⁾やJGMA規格⁽²⁾を使用する場合が多く、歯の片当たりや歯面修整による歯面荷重の増加に対しては係数を乗じて補正するのみである。しかし減速機全体構造におけるミスアライメントを考慮した応力評価や、歯面の詳細な接触状態(歯当たり範囲、分布荷重など)を評価するには、さらに詳細な計算手法が必要となる。また、複雑な減速機構になるほど設計段階での歯面修整の検証や運転条件による影響の把握は困難になり、妥当性検証は実機試験に依存する傾向にある。さらに、運転条件や環境の変化の検討が不十分であると、原因特定が困難な損傷が発生する場合もある。

これらのことから、設計段階で利用可能な減速機全体を考慮した歯面の接触応力解析手法が必要である。本開発では、まず、歯車だけでなく軸、軸受、減速機ケースといった減速機全体構造まで含めたシミュレーションモデルを構築した。次に、社内耐久試験において損傷した歯車を対象として、構築したモデルを用いた歯車表面の接触応力解析を実施し、損傷要因について検証した。さらに、構築したモデルに品質工学の手法を組み合わせることで、ミスアライメントに対してロバストとなる歯面形状の最適設計を実施した。

2 歯車表面の接触応力解析と損傷原因の推定

接触応力解析は、社内耐久試験において歯面が損傷した歯車を対象に進めた。図2に、社内耐久試験の負荷条件を模擬したシミュレーションモデルを示す。本モデルは減速機を駆動するモータ、減速機、負荷側からのトルクが作用する内歯

車により構成される。

社内耐久試験を定常負荷条件およびピーク負荷条件の2条件で実施したところ、図3左および図4左に示すように試験後の出力軸外歯車において表面状態に違いが生じた。すなわち定常負荷条件では損傷が生じなかったのに対し、ピーク負荷条件では歯先の欠けといった損傷や、歯当たりの拡大および摩耗が発生した。2章では、歯面の接触応力解析をもとにピーク負荷条件で歯面が損傷した要因について検討した結果を述べる。

2.1 減速機全体構造モデルの作成

作成したシミュレーションモデルは種々の部品を含む。実態に則した歯当たりを再現すべく、各部品の諸元は実寸法もしくは許容差寸法を考慮できるようにし、変形の影響が大きいと想定される減速機ケースなどは有限要素モデルを用いた。

2.2 解析結果とモデルの妥当性

接触応力解析の入力条件および境界条件は、社内耐久試験を模擬して設定した。解析の対象は、減速機の出力軸外歯車とその相手内歯車、減速機内部歯車とした。本報では、主に出力軸外歯車の解析について述べる。

シミュレーションモデルの妥当性検証のために、定常負荷条件における試験終了後の歯面写真と接触応力解析の結果を比較した(図3 カラーコンターは接触応力)。歯面写真において、鏡面のように摩耗した歯当たりが強い箇所に対し、解析結果も同様に接触応力が比較的高くなっている。また、歯当たり範囲もおおむね一致していることが確認され、構築したシミュレーションモデルは実現象の検証モデルとして妥当であると考えられる。

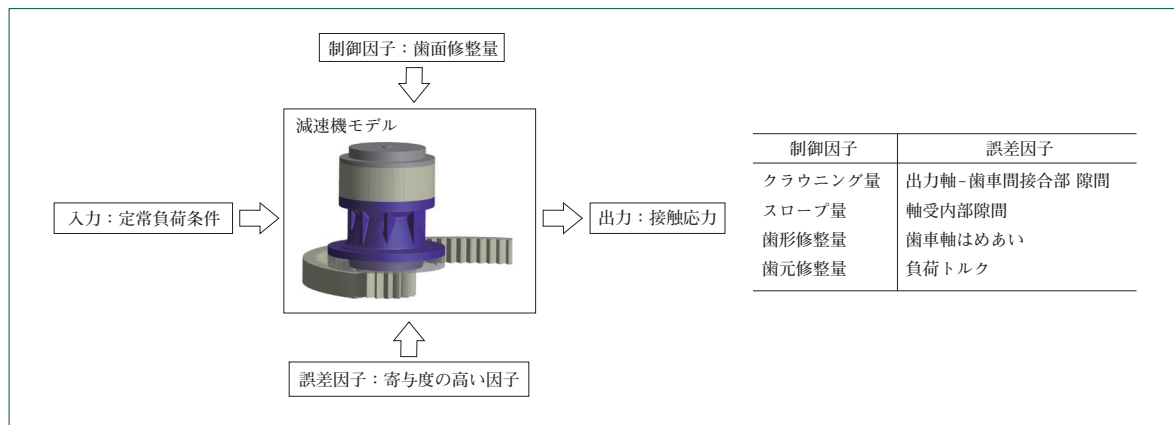
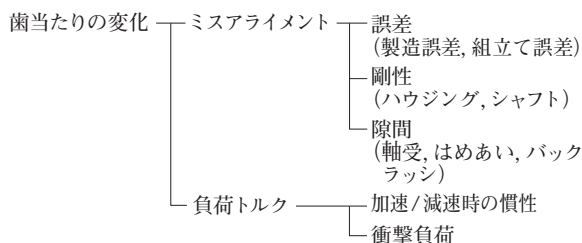


図5 システムチャートおよび因子
System chart and factors

2.3 損傷要因の推定

次にピーク負荷条件での損傷要因を検討した。図4左のピーク負荷条件での歯面写真では、歯当たりの面積が拡大し歯面損傷が生じている。そこで、構築したシミュレーションモデルを評価検証ツールとして要因分析を行った。

歯当たりを大きく変える要因は、かみ合い部に生じるミスアライメントと歯車に負荷されるトルクに大別される(下図参照)。



定常負荷条件およびピーク負荷条件の試験で同一の減速機を用いて試験していることから、誤差や剛性、隙間も同一であり、ミスアライメント依存の要因による歯当たりへの影響は小さいと推察される。実際、シミュレーションモデルによる接触応力解析の結果(別途検討)からも、ミスアライメントについては影響が小さいことが確認された。

一方、負荷トルク依存については、ピーク負荷条件では定常負荷条件に対して最大で2倍以上の負荷トルクが作用することが想定され、その状態を模擬した条件で接触応力解析を実施した。図4右に、接触応力解析の結果を示す。定常負荷条件を想定した解析結果(図3右)と比較し、歯当たり範囲が歯面下部まで拡大しており、ピーク負荷条件での歯面写真とよく一致することが確認された。これにより、ピーク負荷条件において定常負荷条件の2倍以上の負荷トルクが作用し、歯面下部までに至る摩耗や歯面の欠けといった損傷が発生したと推察される。したがって歯車強度設計として、運転条件の影響を考慮した歯面詳細形状の設計が必要と考えられる。

3 歯面形状の最適設計

2.3では、ピーク負荷条件において接触応力が上昇することを明らかにした。このことに加え、部品間の隙間や許容差寸法などもミスアライメントに影響し接触応力が増加すると

考えられるため、設計者はこれらの外乱に対してロバストな歯面形状を設計する必要がある。そこで次の手順に沿って歯面形状の最適設計を実施した。

- (1) ミスアライメントに影響する因子の抽出と寄与度分析の実施
- (2) (1)の影響因子を考慮した歯面接触応力を低減する歯面修整量の最適化

3.1 影響因子の寄与度分析

ミスアライメントに影響する因子を特定するに当たり、減速機の軸方向と径方向の接触・拘束関係を切り分けて考え、歯当たりへの影響が大きいと考えられる部品間の隙間とはめあいを抽出した。そして、軸受内部の隙間や軸・軸受のはめあい公差、軸-歯車接合部の隙間、歯車かみ合いでのバックラッシュなどが影響因子として挙げられた。

これら因子の寄与度分析は、品質工学の手法⁽³⁾に基づいてY(ミスアライメント)に対するX(因子)の影響を分析することとした。具体的には、Xについては部品の寸法許容差やはめあい・隙間公差から水準を定め、Yは各因子水準によって生じるかみ合い歯面間のミスアライメント変化量とした。YとXをもとに実験計画を作成し、寄与率の計算を行った。その結果、寄与率の高い因子は出力軸-歯車間の接合部隙間、減速機内部で使用される軸受の内部隙間、減速機内部の歯車軸はめあいと抽出された。

3.2 最適形状の計算

歯面形状の最適化計算は、設計因子や誤差因子の影響に対してロバストで、かつ歯面接触応力を低減することを目的として行った。計算手法として、構築したシミュレーションモデルと品質工学における2段階設計⁽³⁾を組み合わせるものを適用した。2段階設計とは、第1に歯面接触応力の解析結果(出力)のばらつきを小さくし、第2に歯面接触応力を目標値に近づけるといった設計思想である。図5に、本計算のシステムチャートを示す。

2段階設計の対象は、入力を定常負荷条件とした静特性システムである。制御因子には歯すじ修整量としてクラウニング量およびスロープ量、歯形修整量として歯先修整量および歯元修整量を採用した。誤差因子については、寄与度分析の結果から寄与度の高い因子を抽出し、N1(接触応力を低くす

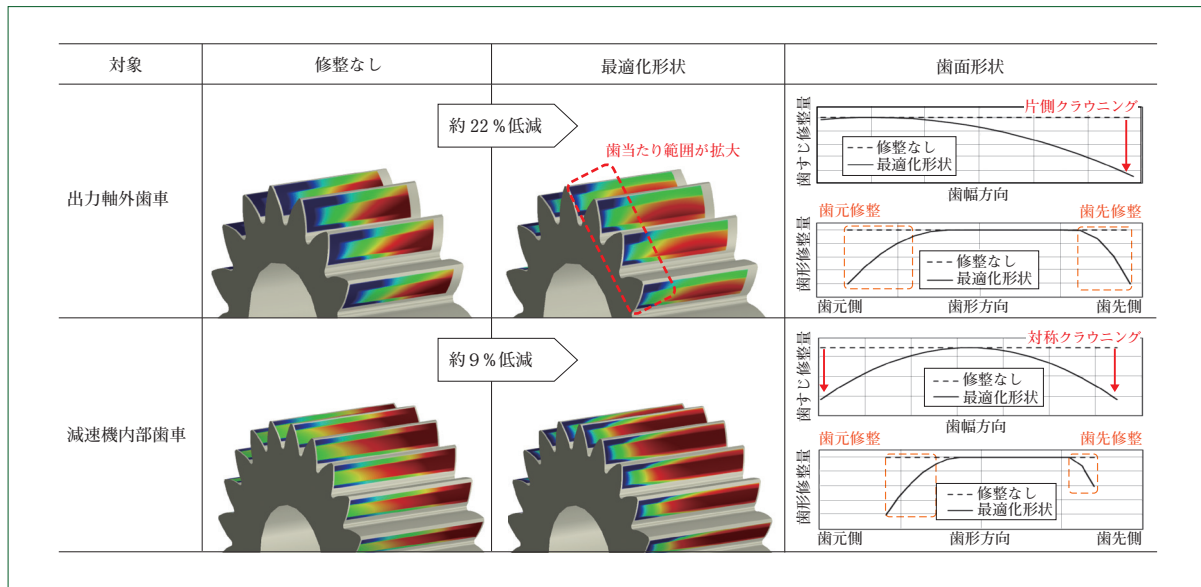


図6 最適歯面形状による歯当たり解析結果
Result of tooth contact analysis with optimal tooth flank

る水準)およびN2(接触応力を高くする水準)に振り分けたものを使用した。出力として接触応力解析における応力の最大値が取得され、この最適化計算の評価指標として採用した。

2段階設定は次の手順に従って実施した。

- (1) 制御因子および誤差因子に基づく実験計画を作成し、出力(接触応力)を取得する。
- (2) 出力のSN比および感度を計算し、各制御因子の主効果を評価する。
- (3) 出力のロバスト性を向上させる制御因子水準を選択する(Robust Design)。
- (4) ロバスト性を担保しつつ、接触応力を低減させる制御因子水準を選択する(Tuning Design)。

図6に、最適化計算結果の一例として、ピーク負荷条件における出力軸外歯車と減速機内部歯車での計算結果を示す。歯面修整なしの解析結果と比較し、最適歯面形状を用いることで歯当たり範囲が拡大し、接触応力を最大約22%低減できることが確認された。また歯面形状は、出力軸外歯車で片側クラウニングおよび歯先・歯元修整、減速機内部歯車で対称クラウニングおよび歯先・歯元修整となる形状が導出された。これは、歯面が強く接触している箇所に対して逃げを設けた形状となっており、歯面修整形状として妥当であると推察される。定常負荷条件においても同様に、接触応力が低減できることが確認された。

このように、減速機全体構造を含めたシミュレーションモデルと品質工学における2段階設計を組み合わせ、接触応力の低減を目的とした歯面形状の最適設計プロセスを構築した。本技術により減速機詳細設計フェーズにおける事前評価・検討が可能となり、歯車減速機設計の信頼性向上に貢献できると期待される。

4 むすび

- (1) 歯車だけでなく、軸や軸受、減速機ケースといった減

速機全体構造を含めたシミュレーションモデルを開発し、社内耐久試験において損傷が生じた歯車を対象に歯面の接触応力解析を実施した。

- (2) 歯車表面の損傷に対してこの接触応力解析を用いることで、試験でのピーク負荷条件による影響が大きく、部品間の隙間などにより生じるミスアライメントの影響は小さいことを明らかにした。
- (3) この接触応力解析に品質工学の手法を組み合わせることで、負荷条件およびミスアライメントに対してロバストとなる歯面形状の最適設計を実施し、ピーク負荷条件での接触応力を最大約22%低減できることを明らかにした。
- (4) 当社では、歯車減速機のさらなる信頼性向上に貢献すべく、本開発で構築した歯車の接触応力解析手法および歯面形状の最適設計手法をはじめとする、設計高度化に向けた技術開発を引き続き行っていく。

(参考文献)

- (1) International Organization for Standardization, ISO Standard 6336-2:2019 Part2: Calculation of surface durability (pitting) (2019).
- (2) 日本歯車工業会, JGMA 6102-02 平歯車及びはすば歯車の歯面強さ計算式 (2009).
- (3) 立林和夫, 入門 タグチメソッド, 日科技連出版社 (2004).