F1-Honda製ギヤの開発

Development of Honda Gears for Formula One Gearbox

小　西　康　一*　　野　島　浩　明*
Koichi KONISHI　　Hiroaki NOJIMA
長　沼　輝　興*　　木　村　　宙*
Teruoki NAGANUMA　　Hiroshi KIMURA

要　旨

軽量，コンパクト化と信頼性を両立した自社製ギヤの開発をおこなった．継続的な短期開発を実現するために，FEM 解析を活用したギヤ諸元設定技術の構築と，FEM 解析の基礎となる S-N 曲線を元にした寿命予測手法を確立した．また，実走テストで散発したギヤ破損のプロセスをギヤの塑性変形を指標として，高負荷，短寿命のレース用に特化した軽量ギヤの評価手法も確立した．これらにより軽量化，コンパクト化，高信頼性を達成し，2003年よりレースに適用しレースでのトラブルゼロを達成した．

また，パワートレイン性能向上のためにすべてのギヤ歯面にレース使用条件に適した Diamond like carbon（DLC）コーティングを適用し，97.0%の伝達効率を達成した．2007年から順次適用した．

ABSTRACT

Development programs were conducted to enable the development of Honda-made gears that balanced low weight and compactness with reliability. Development of a technology for the formulation of gear specifications using FEM analysis and a method of predicting the lifespan of the gears based on S-N curves, which formed the basis for FEM analysis, helped enable continuous short-term development efforts. As gears would sometimes fail in actual vehicle tests, a method of evaluation of lightweight gears optimized for high-load, short-lifespan race use was established with the plastic deformation of the gears as an index. The lightweight, compact, and high-reliability gears developed in this process were employed in races from 2003, and were entirely trouble-free.

In addition, a diamond-like carbon (DLC) coating optimized for race use was applied to all the gear tooth surfaces to boost the performance of the powertrain, helping to achieve a transmission efficiency of 97%. The coating was applied to different gear sets in sequence from 2007.

1．まえがき

第３期 F1 活動の当初はレース用ギヤボックスの専門メーカーのギヤを使用していた．しかし上位チームは競争力向上に寄与すべく，さらなる軽量，コンパクト化した自社製のギヤを使用していた．

F1 ギヤボックスは車両の後端付近に位置し運動性能への重量寄与度が大きい．レシオギヤは各レースコースに合わせた駆動力を設定するために多くの種類のギヤが必要である．またギヤボックスのトラブルはレースリタイアに直結する．このため，軽量化と高い精度の寿命予測ができる仕様決定手法が必要であった．また，近年のエンジン開発凍結レギュレーションにより駆動系損失低減の重要性が増してきた．

これらの要求に対し FEM 解析を活用した F1 ギヤ設計手法と定量的評価基準を構築することと，不測の過大負荷への対処手法を確立することで，軽量化と信頼性を両立したギヤを開発した．また駆動系損失の大部分を占める要因がギヤの伝達効率であることを突き止め，レース使用条件に適したギヤ用 DLC コーティングを開発した．

2．F1 ギヤボックス内部レイアウト

F1ギヤボックス内部構造は，車体ディメンジョン，空力等のパッケージ要求，レギュレーションを考慮して，縦置き並行２軸式とし，最終減速（ファイナル）の一段上流に中間シャフト（クロスシャフト）を配置した構造である．このF1ギヤボックス内部構造を Fig. 1 に示す．

＊四輪R&Dセンター

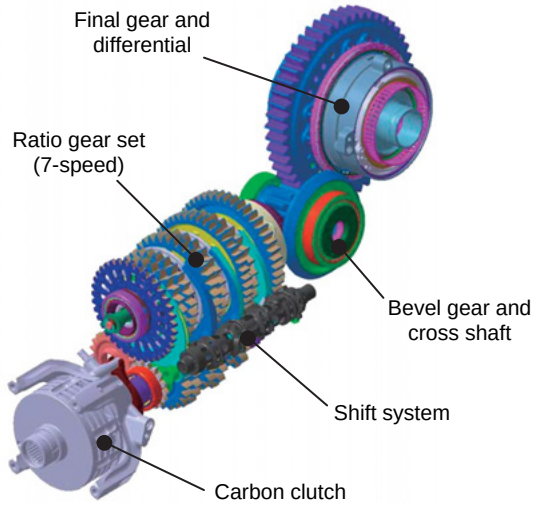


Fig. 1　3D model of Formula One gearbox internals

3．FEM 解析を活用した F1 ギヤ設計手法

3.1. 量産ギヤ設計手法の F1 への適用課題

従来のギヤの設計は，内製のギヤ諸元計算ツールにてギヤの諸元検討と歯底に発生する応力を評価している．量産車用ギヤでは，歯底肉厚はギヤモジュールによって一定の厚さを確保するのが基本で，上記の計算ツールはこれを前提条件としている．F1ギヤは，量産車用ギヤと比較して極端な高負荷，短寿命と軽量化を両立することが必要で仕様の決定の考え方が異なる．F1ギヤは歯元強度とピッチング強度の確保が重要となるため，ギヤモジュールを大きく取り，軽量化のために歯底肉厚を薄くした．このため同部の剛性低下の影響を考慮する必要が有り，従来の設計手法では不十分で歯の接触を考慮した FEM 解析をおこなった．

Fig. 2 に量産車用と F1 ギヤの形状差を示す．

3.2. FEM 解析条件

FEM解析では，解析条件が重要であり，特にスパーギヤの FEM 解析では，さまざまな噛み合い状態の最悪条件を再現することが必要である．スパーギヤの噛み合い状態は，噛み合い率が１から２の間になるため，噛み合い状態は一歯噛み合い，二歯噛み合いそして一歯噛み合いと連続している．その中で一歯噛み合いかつ，その噛み合い点が最も歯丈方向で高くなる状態が最も歯元の応力が高くなることを

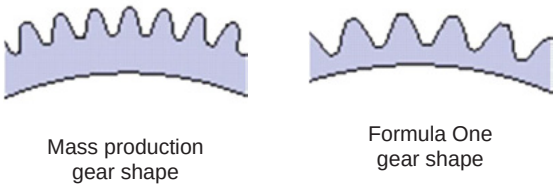


Fig. 2　Gear shape comparison

FEM 解析によって得た．

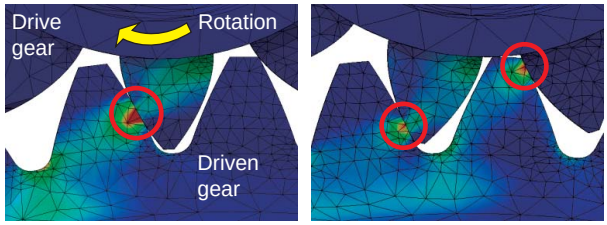
ギヤの噛み合い状態の違いと応力分布を Fig. 3 に，噛み合い位相を変化させた時の歯元の応力の変化を Fig. 4 に示す．

１歯噛み合いでは接触点が一ヶ所で応力分布も集中するが(Fig. 3)，二歯噛み合いでは接触点が二ヶ所になり，応力分布は緩和される(Fig. 4)．

また，さまざまな噛み合いの中から最も歯元応力が高くなる状態をギヤ諸元計算より求め，FEM解析モデルへ反映することで，短時間の解析を可能とした．

3.3. 歯先修整量の最適化

歯先修整とは，歯への負荷による弾性変形を考慮してインボリュート曲線に対し歯先形状を適正化することをいう．F1ギヤでは，前述の剛性低下による弾性変形量が大きく歯当りが変化し，強度や接触面圧への影響が大きいため歯先の変形量を FEM 解析で予測した．これを元に，歯先修整量の最適化をおこなった．



(a) 1 tooth meshing　　(b) 2 teeth meshing

Fig. 3　Gear meshing condition

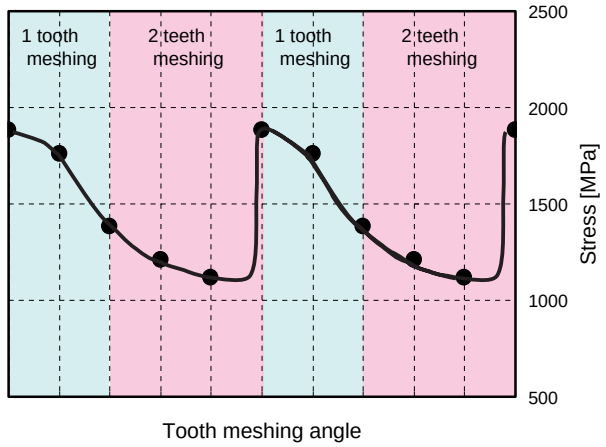


Fig. 4　Change in stress with gear meshing condition

4．F1 ギヤの定量的評価手法

4.1. ギヤの疲労強度試験

これまでのレース用ギヤの耐久性の評価は，実車のみでの評価が一般的であったが，自社製 F1 用ギヤの開発はギヤ単体の S-N 線図(ウェーラー線図)と実車のトルク頻度を

用いて台上テストで評価をおこなった．高負荷，低サイクル疲労の S-N 特性の信頼性に懸案はあったが，それまでの実車評価の実績と照らし合わせ，単体の台上テストで十分評価できることがわかった．これを元にギヤの仕様を決定し，軽量化と高い信頼性を両立した (Fig. 5)．ギヤ歯元応力値は入力トルクから計算した値であり，S-N 線図は台上テスト結果から作成した．

4.2. ギヤの早期破損

台上テストでの寿命予測技術により，ギヤ破損トラブルは減少したが，実走テストで想定寿命より早いギヤの破損トラブルが散発した．代表的な破損写真を Fig. 6 に示す．

レースで使用したギヤの歯形を測定すると，一歯から数歯に塑性変形がみられた(Fig. 7)．塑性変形が一部分であることから瞬間的なギヤへの過大入力により塑性変形が起こり，これが原因で早期破損に至ったと推定して解析をおこなった．

塑性変形量は微小であるため歯形データの判断基準を定め圧力角修正量差異が 0.2 μm 以上を塑性変形と定義した．

塑性変形したギヤを疲労強度試験で確認した．その結果，塑性変形したギヤは，いずれも寿命が短く，破損までの寿命が想定値の 11.6%になるものもあった(Fig. 8)．

4.3. 過大入力への対応

F1ギヤボックスは発進時や変速時に発生する瞬間的な過大入力からドライブトレーン部品を保護するためにクラッチ締結力が適正な値になるように制御している．

しかしクラッチの摩擦材のばらつき，不確定な路面状況下でのタイヤトラクションの状態，イレギュラーな操作によるギヤボックス内のイナーシャなどに起因する過大入力を完全には排除できない．一方でまれに発生する過大入力を許容するギヤ設計をおこなえば重量増を避けられず競争力を失うこととなる．

F1ギヤボックスではエンジンの入力軸に直結したトルクセンサによって走行中の入力トルクをモニタリングしている．トルクセンサのロギングデータから塑性変形したギヤへの入力トルクを調査した．その結果，計算上の歯元応力に換算して 2300 MPa をしきい値にそれを超えるトルクが入力されたギヤにおいては塑性変形が起こっていた．

またギヤ耐久試験機での確認においても歯元応力 2300 MPa以上でギヤには塑性変形が発生することが確認された (Fig. 9)．

この結果からすべてのギヤに歯元応力 2300 MPa 相当のトルクをギヤのトルクリミットとして設定した．

そして走行中にトルクセンサのテレメトリーデータをリ

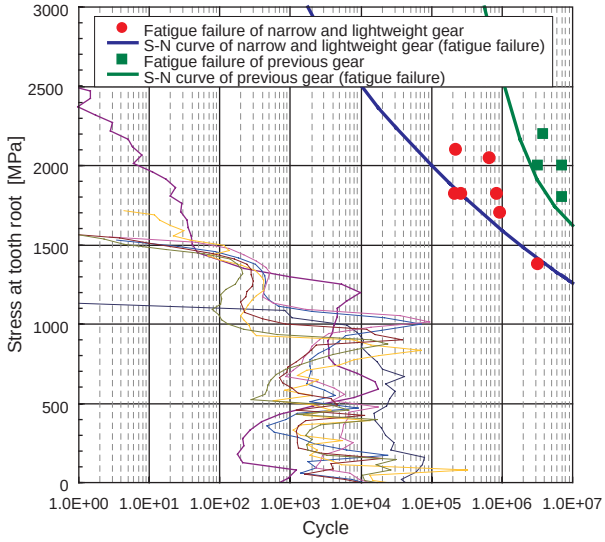


Fig. 5　Fatigue failure test results

Fig. 6　Broken gear

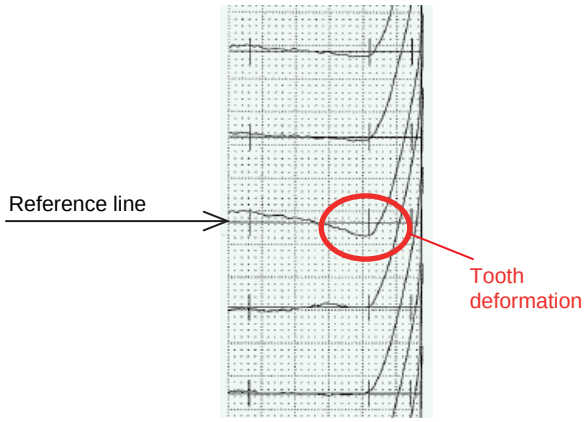


Fig. 7　Tooth profile data of deformed gear

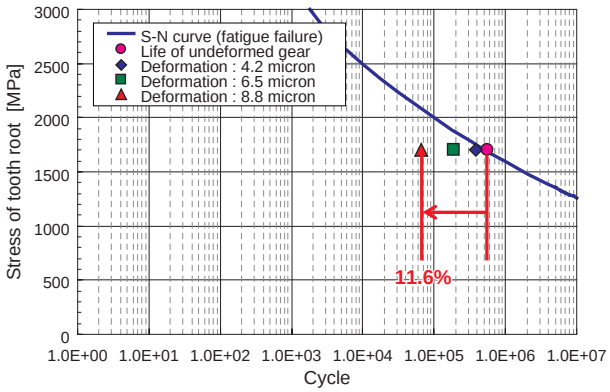


Fig. 8　Fatigue failure test result of deformed gear

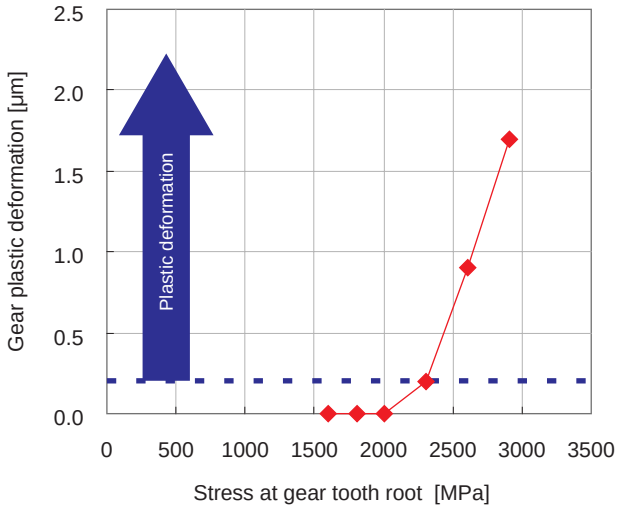


Fig. 9　Gear strength test results

アルタイムに監視し，トルクリミットを越えるトルクが入力された場合，ギヤボックスメンテナンス時にそのギヤを交換する運用方法を適用した．

以上の対応により軽量化と高い信頼性を両立し，レースでのトラブルゼロを実現した．

5．F1ギヤボックスの高効率化

5.1. 伝達損失の現状分析

損失要因の現状分析をおこなった．損失要因は無負荷時のフリクションと有負荷(トルク伝達)時の効率を測定することにより抽出した．

(1)オイルの撹拌による損失
(2)オイルシールなどの引きずりによる損失
(3)トルク伝達による損失
(4)オイルポンプの駆動損失

このうちトルク伝達による損失が入力トルクの大小により損失が増減する要因である．有負荷時の伝達損失はベアリングの損失を理論式にて算出し，ギヤの伝達損失と切り分けをおこなった．各損失要因の寄与度を測定した結果を Fig. 10 に示す．

この結果ギヤの伝達損失がギヤボックス損失のうちの62%と大部分を占めることがわかった．

5.2. 高効率化手法

伝達損失は，各ギヤ同士が噛合う時の歯面の滑りにより発生するため，歯面の摩擦係数低減により損失を低減することが可能である．

摩擦係数低減の手法としては以下の3種類が考えられる．

(1)ギヤ歯面の面粗度向上
(2)ギヤ歯面へのコーティング
(3)低フリクションギヤオイル

ギヤ歯面の面粗度向上については，F1で使用しているギヤは歯研仕上げおよびバレル研磨をおこなっており，面粗度の向上は期待できない．そこで(2)のギヤ歯面へのコーティングと(3)の低フリクションオイル開発をおこない，伝達損失低減を図った．

5.3. コーティング膜種選定

実際の F1 の使用条件ではギヤ歯面の滑り速度は 20 m/s 以上，面圧は 2 GPa 以上となる．この条件下でも磨耗しないコーティングが必要で，次の観点で複数の候補からギヤのコーティング膜種選定をおこなった．

(1)耐摩耗性に優れ，レース用エンジン部品に使用されるメタル DLC
(2)メタル DLC をさらに高硬度化した DLC
　また量産トランスミッションのギヤ用のピッチング対策として実績があり，しゅう動性改善による摩擦係数低減が期待できる次の2種類も比較対象とした．
(3)固体潤滑皮膜(二硫化モリブデン樹脂コート)
(4)浸硫品

以上の4種類について損失低減効果と耐久性の確認をおこなった．比較基準としてはこれまで標準的に使用していた浸炭処理のみのギヤを使用した．

5.4. 効果および耐久性の確認

単体の台上テストでの損失確認結果を Fig. 11 に，損失低減確認後のギヤ表面状態を Fig. 12 に示す．

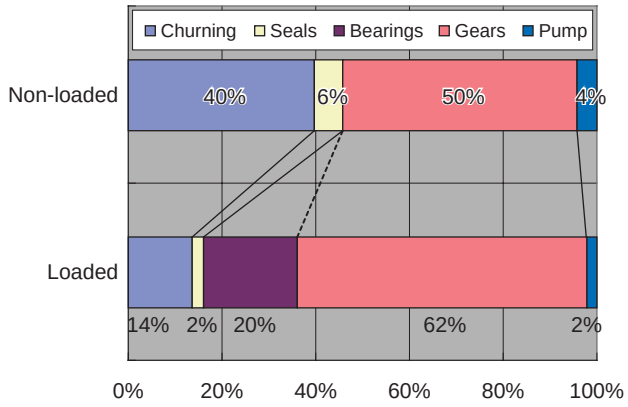


Fig. 10　Effective rate of power loss factors

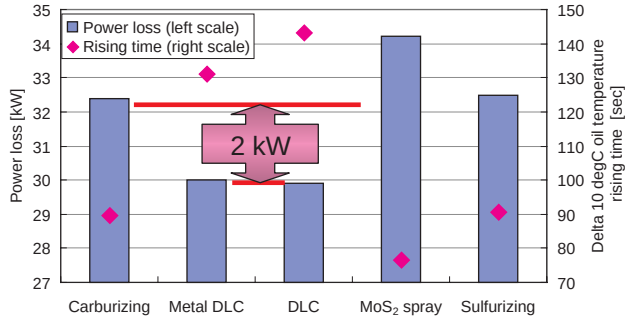


Fig. 11　Confirmation of loss reduction effect

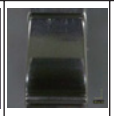
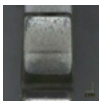
Coating	Carburizing	Metal DLC	DLC	MoS_2 spray	Sulfurizing
Gear surface condition					
	Teeth touch mark only	DLC peeling DLC wear	Minute scuffing	Coating peeling Gear surface wear & scoring	Gear surface wear & scoring

Fig. 12　Surface condition after durability test

損失低減は二種類の DLC コーティングギヤとも，2 kW の効果が確認され，メタルDLCはコーティングの損傷が発生，一方高硬度DLCはギヤ歯面の歯先に微小な引っ掻き損傷が発生したが，実用上影響の無いことがわかった．

固体潤滑皮膜と浸硫品は，伝達損失低減効果が認められず，またコーティングにも磨耗が発生した．これはコーティング処理上ギヤ表面の面粗度をベースより粗くする必要があり，これによる面粗度の低下が伝達効率を低下させたものと推測した．

5.5. DLC コーティングギヤのレース投入

DLCコーティングを施したシフトギヤ，ファイナルギヤを 2007 年シーズン中盤に，ベベルギヤを 2008 年シーズンよりレースへ適用した．歯先修整の最適化，コーティング前処理の適正化をおこなうことで，レギュレーション規定である４レース終了後においても十分な耐久性を示した(Fig. 13)．

5.6. 低フリクションギヤオイル

オイルメーカと共同で低フリクションオイルの開発をおこなった．開発初期の段階でDLCコーティングを施さないギヤにおいては1 kW 以上の損失低減効果が認められたが，DLCコーティングを施したギヤを使用した場合は効果が得られなかった．

そこで DLC コーティングとオイルの親和性の改善をおこない，0.4 kWの伝達損失低減効果のオイルを開発し2008年よりレース適用した．

Fig. 13　Final gear condition after 4 races

６．まとめ

F1 ギヤ開発において，以下の結果が得られた

(1)FEM を活用した F1 ギヤ設計手法を確立した．

(2)ギヤ単体での台上テストによる寿命予測と，不測の過大入力への定量的評価手法を確立した．またレースでの運用手法も構築した．

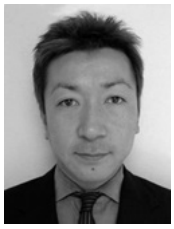
(3)ギヤボックスの伝達効率 97%を達成できるギヤコーティングとオイルを開発した．

その結果，機能と信頼性を高い次元でバランスすることが可能になりレーストラブルゼロと伝達効率の向上を達成した．

謝　　辞

低フリクションオイル開発にご協力いただいた新日本石油株式会社の方々に紙面を借りて感謝の意を表します．

■著　者■



小西康一

野島浩明

長沼輝興

木村　宙