F1用ギヤボックス開発概論

Overview of Gearbox Development for Formula One

眞　野　　敦*
Atsushi MANO

要　旨

レースの世界では通常トランスミッションのことをギヤボックスと呼ぶ．F1実戦用ギヤボックスの開発は，Hondaとしては第３期 F1 活動が初めての挑戦となった．そのため技術開発のみならず，製造，供給，運用など多くの課題をも解決する必要があった．それらの課題を乗り越えて，数々の先駆け技術をレースに提供できるまでになった経緯を交え，F1 用ギヤボックス技術進化の概要を紹介する．

ABSTRACT

In the racing world, the transmission is ordinarily referred to as the gearbox. Honda first tried developing an Formula One racing gearbox with its third-era Formula One activities. To do this, it was necessary not only to develop the technology, but also to solve several problems, including production, supply and operation. This article recounts how Honda overcame these problems to bring a number of technological firsts to the racing world and gives an overview of the advancement of Formula One gearbox technology.

１．まえがき

一般的に F1 技術が語られる場合，エンジンパワーや空力性能について語られることが多いが，ギヤボックスについて技術紹介される機会は少ない．よってまずギヤボックスに必要とされる基本要件を説明し，各要素技術の進化をHonda での開発経緯も含め紹介する．

２．F1 用ギヤボックスとは

2.1. レギュレーション

世界自動車連盟(FIA)の規定する F1 テクニカルレギュレーションにおけるトランスミッションに関する記述を抜粋すると以下の通りである．

（１）２輪駆動のみ許可

（２）車両停止時に手動にてクラッチが切れること

トラブルなどによりコース脇に車両が停止した際にコース係員が手押しによる車両移動ができる状態を確保する必要があるため，各車両にはエンジン停止後でも作動する手動のクラッチ遮断スイッチが設けられている．

（３）ギヤレシオは前進(2007 年までは４速以上)７速以下，CVT は禁止

（４）リバースギヤを装備すること

（５）左右駆動力配分は禁止

以上に加え，2008年よりは，コスト抑制を目的として新たに以下の規定が追加された．

（６）１ギヤボックスで４レース連続使用義務

（７）変速ギヤのギヤ幅は 12 mm 以上，軸間は 85 mm 以上，一組のギヤ重量は 600 g 以上

技術の過当競争を避けるために新設された部分以外は大枠の制限に留まっており，ギヤボックスの設計自由度は一般的に高いといえる．そのため，軽量，コンパクト，高効率化を主目的に，各チームとも積極的な技術開発を進めている．

2.2. 要求性能

F1用ギヤボックスに求められる性能を列挙すると以下の

＊四輪R&Dセンター

ようになる．

（1）耐久信頼性

（2）軽量，コンパクト性

（3）低重心，低ヨー慣性モーメント

（4）短い変速時間

（5）高い伝達効率

（6）ケーシング剛性

量産車と異なり，リヤサスペンションが直接ケーシングに取り付けられる(Fig. 1)ため，十分な剛性と強度が必要とされ，車両挙動に影響を与える．

（7）空力性能への寄与

車体後部のリヤウィングやディフューザへの気流確保を阻害しないためにできる限り小型，特に後方形状は細くあることが要求される．

（8）良好なメンテナンス性

各レースセッションの合間にレシオギヤの交換が完了できる必要がある．

また，Fig. 2 に示すように内部機構は，クラッチを介して入力されるエンジントルクを7組の変速ギヤ，ベベルギヤ，ファイナルギヤからドライブシャフトを経てタイヤに伝えている．

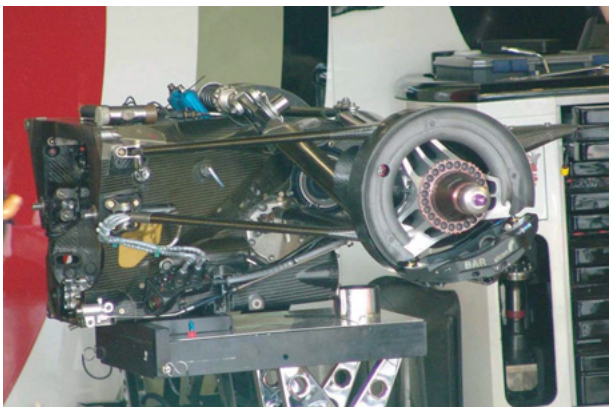

Fig. 1　Appearance of F1 gearbox

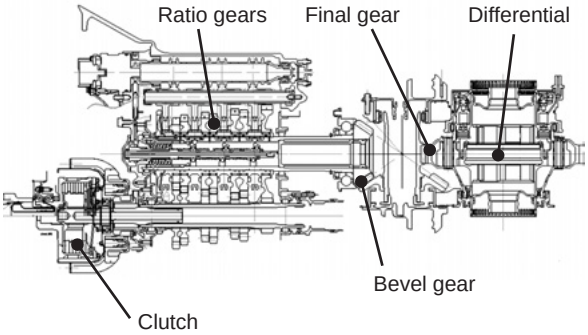

Fig. 2　Structure of F1 gearbox internals

3．独自開発のための準備

3.1. レースチームとの共同開発体制確立

第3期 F1 活動は British American Racing(BAR)との車体共同開発という形でスタートした．ギヤボックス開発はレースチームである BAR が中心であったことから，どのような形で共同開発を進めるべきかという点が最初の課題となった．BAR で当時おこなわれていた開発は，ケーシングを含めた全体パッケージ部分であり，ギヤシャフトなどの内蔵部品はレース用トランスミッション専門メーカに詳細設計と製造を委託していた．そのため，BAR ではギヤ，シャフト類のレイアウトに関して要求は出せるものの，他チームに先駆けた軽量化や革新的機構開発をおこなうことが難しく，また良いアイデアを提案できたとしても独占的に使用することも困難であった．一方，Honda の強みは，ケーシングからギヤ，シャフトまで内製できることや当時のレーシングチームには無かったギヤボックスの強度耐久性，性能を評価できる台上試験装置を持つことであった．よって Honda が専門メーカに成り代わって競争力のある技術を供給できれば，先駆け技術の開発や独占的使用が可能になるなど BAR にとってのメリットは大きい．そのため，日本での開発拠点である四輪R&Dセンター(HGT)ではギヤ，シャフトを中心とした技術開発を担うことで合意し，HGT における本格的な開発は 2002 年よりスタートした．その後レースチームが 2006 年に Honda Racing F1 Team(HRF1)に組織変更された後も引き続き同じ役割分担で開発を進めた．

3.2. F1ギヤボックス開発技術の習得

開発に先立ち，まずは業界水準技術の習得が必要であった．そのための主要課題は以下の四点であった．

（1）設計技術

ギヤの種類として量産車がギヤ音を重視したヘリカルギヤを採用しているのに対し，レース用は効率と強度を重視したスパーギヤを採用している．その違いはあるが設計ツールは同一であり，基本設計手法は流用可能であった．しかし，使用条件は量産の実績値を参考にできず，早期の歯面ピッチング発生への対応，変速ショックなどの衝撃荷重入力による歯形の弾性変形を考慮した歯先修正設定が必要であることを学んだ．

（2）製造技術

ギヤ強度保証および伝達効率の最大化の観点から，すべてのギヤは熱処理後に歯研(歯底までの一体研磨)処理をおこない，表面仕上げにはバレル研磨など歯面の面粗度向上処理とともに疲労強度向上のためのショットピーニング処理を施した．特に研磨処理においては，参考とした専門メーカ製ギヤと同等レベルの面粗度を得るために多くのトライアンドエラーと工夫が必要であった．またショットピーニ

ングでは，より高い表面残留応力とより深い残留応力の領域を付与するために，メディアの選定のみならず，多段ショットの採用，処理圧力，時間の選定など専門メーカの性能に追いつくには多大な時間を要した．

（3）材料技術

レース業界で使用されていたギヤ材料は，量産ギヤ材に対して高強度化されたものであり，競争力を確保するための専用高強度ギヤ材の開発が必要であった．満足のいく材料の性能が得られるまでには鉄鋼メーカの協力と，多大な時間が必要であった．

（4）試作協力体制の整備

競争力のある技術をタイムリーに開発するためには，多くの専門試作メーカによる短期試作による製造支援が不可欠である．ギヤ，シャフト類は，実績のある多くのギヤ試作メーカの協力を得て，比較的容易に製作できるようになったが，ベアリングの試作には困難を伴った．レース用のギヤボックスを新開発する場合，専用形状のベアリングの採用は性能向上に寄与する．しかしベアリングは専門性の高い機能部品であることから，試作メーカは存在しない．よって量産メーカに試作を依頼することになるが，少量多品種試作への対応が困難なことから試作期間が長くなり，開発ニーズと折り合わないという事例が頻発した．しかしNTN(株)の開発支援協力により，F1専用ベアリングの共同開発体制を構築することができた．その結果，仕様検討から試作，納品までの期間が短縮され，タイムリーな対応が可能となった．

3.3. 技術開発のねらい

前項までの課題に対する取り組みとともに，ギヤボックス領域における戦闘力確保の観点から，重点開発目標をラップタイムへの寄与度の高い以下の二項目に絞り込んだ．

（1）軽量，コンパクト化

レース車両の重量はドライバ込みで605 kg以上とレギュレーションで決められていることから，ギヤボックスの軽量化は直接的な車両軽量化には繋がらない．しかし重量調節用のバラスト重量を増すことで車両重量配分の自由度の向上や低重心化を図れる．また，コンパクト化は軽量化のみならず，ギヤボックス形状のスリム化による空力性能の向上に繋がる．これらは車両戦闘力の向上に寄与する．

（2）変速時間の短縮

F1 では 90 年代初頭より，Fig. 3 に示すようなモータサイクルに採用されているのと同原理のドグクラッチと油圧アクチュエータで駆動されるシフトバレルで構成されるシーケンシャルシフト機構が採用されている．特に加速中のアップシフトにおいては，そのシフト時のトルク抜けのため空気抵抗により車両が 1.0 G にも達する減速をするため，変速時間を短縮することはラップタイム向上に直結し重要である．

3.4. レース部品供給体制の確立

競争力のある独自技術を投入するためには，その技術を開発するのみでなく，レース運営に必要な数量を安定した品質で製作し，供給することが必要である．Honda としては，これまでレースエンジンを組立完成品でレースチームに供給することはあったが，部品単品での供給は初めての試みとなった．このため，以下の二点の観点から組織を含めた仕組み作りが必要であった．

（1）製造品質保証

走行機能に関わる重要部品については，製造ロットや走行寿命管理などの個々の部品履歴の管理をおこなうために，部品番号，シリアルナンバー，製造ロット管理をおこなう．これらの情報は部品に直接レーザマーキングされるためインフラ整備が必要となった．レーザマーカーの導入はもちろんのこと，業務として推進するためのルール，ルートそして体制の策定からおこなった．

また，それぞれの部品が図面品質を満足していることを証明する検査成績表を一点一様で添付する必要があった．そのため部品の全品検査体制を整えるとともに，シリアルナンバー打刻，重点管理寸法の決定をおこなった．それに加え，機能的に問題が無いと判断される微小な公差外品の救済処置の Concession Report を作成するルールを策定し，HGT と HRF1 の双方で機能的な問題が無いかを判断し部品救済できる仕組みを整え不要なコストアップの防止と部品供給の安定化を図った．

（2）部品発送体制

これまで HGT においては，部品発送の機能が存在しなかったため，完成品の梱包から発送までの工程を整備した．変速ギヤ，ファイナルギヤなどは，現場での保管，組み換え作業が効率的におこなえるよう，防錆，耐衝撃性，識別のしやすさを考慮した専用梱包箱を作成した．

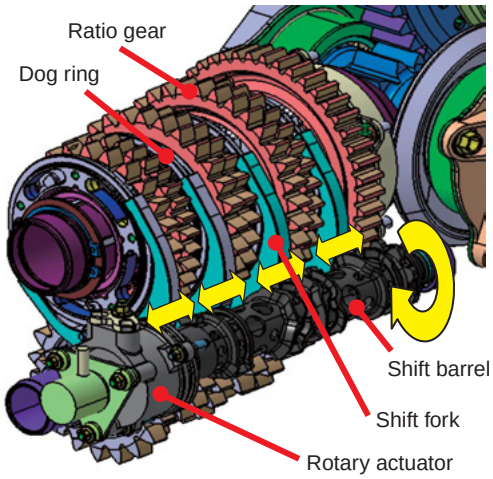

Fig. 3　Appearance of F1 gear-change system

4．技術進化内容

各レースチーム間の技術開発競争により，第３期 F1 活動期間中にギヤボックス技術は進化を遂げることとなった．その進化の詳細について，他チームのトレンド変化および HGT で取り組んだ具体的技術を紹介しながら振り返える．

4.1. ケーシング

ケーシングは車体の一部としての機能も兼ねるため，軽量と高剛性を両立させることが求められる．そのための手法として，さまざまな材料研究や製法開発がおこなわれた．従来はアルミニウム合金やマグネシウム合金の砂型鋳造が標準であったが，近年各チームは大きく二つの方向に分かれた進化の道を選んだ(1), (2)．一つ目は鋳造製法を進化させ，薄肉鋳造による軽量化をおこなう方向である．これはラピッドプロトタイプ技術を採用したもので，薄肉化とともに抜き勾配やアンダカットなどの型製作上の制約がないために無駄肉の排除が可能である．鋳造材料はアルミニウムもしくはチタニウムが選択される．二つ目は，Fig. 4に示すようなカーボン強化樹脂(CFRP：Carbon Fiver Reinforced Plastic)を採用する方向である．CFRP は比剛性を金属材料に比べて大きくできる利点があり，軽量化と高剛性の両立に優位となる．但し製作時間が長く，製造コストは鋳造方式に比べて不利となる．2008年時点では，各チームの製法は上記の二種のどちらかにに分かれており統一されたトレンドは存在していない．HGT では，CAE 技術を使った剛性最適化プログラムを用いた軽量マグネシウムケーシング開発に取り組み，2002年終盤戦に投入した．しかしより軽量化を実現可能なCFRP製ケーシングをBARが開発し，2004年よりレース適用したことから，HGTによるケーシング開発は中止した．

4.2. ギヤ

各チームのギヤ調達は，トップチームは設計，製造とも

Fig. 4　Appearance of CFRP gearbox casing

に内製化され独自技術開発環境を構築している一方，中堅以下のチームは，専門メーカからの調達をおこない F1 用に標準化された内部機構を各チーム車両パッケージに合わせるためのカスタマイズをおこなう形で供給を受けている．前述の通りギヤボックスそのもののコンパクト化は車両競争力への寄与が大きいことから，ギヤについても積極的な小型化への取り組みがおこなわれた．その手法としては，高強度ギヤ材料の採用，FEM の活用による安全率の最適化，製法の進化などが挙げられる．HGTでは，ギヤ材料から独自開発をおこない，歯元曲げ強度および歯面ピッチング強度を向上させることで，それまでベースとしていた専門メーカ製ギヤに比較し，１速から３速ギヤで1 mm，４速から７速ギヤで 2 mm ギヤ幅を短縮した．これによる軽量化効果は約 1 kg であり，2003 年の終盤戦より投入し，その後のスタンダードとなった．当初，原因不明のギヤ歯破損(歯元からの折損)が発生したが，解析の結果，変速時のショックや車両の急激な挙動変化による想定以上の衝撃入力により一部の歯が塑性変形することで，疲労強度が低下し，短寿命で破損するというメカニズムが判明した．これにより通常使用状態で歯の変形を防止する設計基準を確立し，適用した．但し，想定以上の過大入力に対しては，設計的に強度を上げると軽量化とは相反し，競争力の低下に繋がる．よって，過大入力の発生を抑える制御の開発をおこなうとともに，トルクセンサを組み込むことで常にギヤに対する入力値を監視し，許容トルクをオーバーした入力があった場合にはそのギヤを再使用禁止にするなどの運用をおこない，ギヤ強度とのバランスをとりながら軽量化の取り組みを進めた．ギヤ試験機を使用し，歯曲がり発生時のトルクを同定することで設計応力との相関取りをおこない，精度良い設計許容応力の設定を可能とした．

4.3. 変速機構

1990年代初頭に登場したシーケンシャル方式セミオートマチックギヤボックスは基本構造として定着し，近年まで変化することはなかった．その間，変速時間の短縮は，各部部品の軽量化やフリクション低減による作動時間の短縮やエンジンとの協調制御によるトルク最適化制御を中心におこなわれたものの大きな進歩はなかった．HGTでは重点開発目標の一つである変速時間の短縮を実現するために，変速時のトルク抜けが発生しないシームレス変速機構の開発をおこなった．原理的には前段駆動のまま次段を噛み込ませることで瞬間的に変速を完了させるものである．これを実現させるためには大きくは下記の二つの技術課題があり，それぞれに対する対応をおこなった．

(１)同時噛みによるインターロックの回避

一般的に二つの変速段を同時に噛み合わせるとインターロックが発生し，ギヤもしくはシャフトが破損する．よって同時噛みを許容するために，ワンウェイクラッチ構造を組

み込むことで次段選択後に前段が減速歯面に切り替わってもワンウェイクラッチを空転させ，インターロックを回避できる構造とした．但し，常にワンウェイクラッチが作動すると減速時のエンジンブレーキが利用できないなどの不都合が生じるため，変速時以外はこのワンウェイクラッチ機構をロックし，空転を防止する機構とした．

（2）変速時のショック増大

瞬時に変速させることで，エンジントルクに加えて変速比によるイナーシャ変化分のトルク変動が瞬時に発生し，衝撃トルクは増大する．これに対しては，イナーシャ変化の大部分はエンジンイナーシャであることから，変速時のクラッチ容量の最適化制御を開発することで，衝撃トルクの低減をおこなった．この制御と前記の機構を組み合わせることで，ギヤ強度との両立が可能となった．

ベンチテストおよび実走テストを繰り返した結果，これらの課題を解決し，2005年の開幕戦よりレース投入をおこなった．ラップタイム改善効果が，１ラップあたり 0.4 秒短縮と単独の技術として大きい効果を得た．また，アップシフト時のトルク抜けが無く，衝撃トルクを低減したことで，変速時の駆動力変動が小さくなり，コーナリング中の変速や雨天時などの低タイヤグリップ状態での変速動作をおこなうことが可能となった．変速時にトルク抜けの無いこの技術は，Honda がレース投入一番乗りとなったが，その効果が大きいことから，他チームもそれぞれ精力的な開発をおこない，2008年にはすべてのチームがシームレスシフトとして採用するに至った．しかし他チームが採用した構造はシフトバレルを２本持ち，偶数ギヤ段と奇数ギヤ段を別々に制御する構造といわれており，これに比べHondaが採用した構造はシフトバレルを１本で成立させ，またギヤの同時噛みを防止した点で独自性があり，信頼性と軽量化において優位性があると思われる．

また，ギヤボックス全長を短縮する技術を構築することを目的に革新的変速機構の開発にも着手していた．ギヤボックスの全長は Fig. 2 からわかるように，クラッチ部，変速ギヤ部，ベベルギヤ部，ファイナルギヤ部，デファレンシャル部に大きく分けられる．ここでは，変速ギヤ部の短縮に着目し，ギヤとギヤの間に設置されたドグリングとシフトフォークを無くすという発想から検討が繰り返された．結果としてシームレス変速の利点を失うことなく，変速機構部をメインシャフト内部に構成し，各変速ギヤを隙間無く並べることで全長を19%短縮，重量で12%の軽量化を達成できる構造を目指した．内部変速機構の耐久性確保に困難を伴ったが，結果として所定の目標レベル性能を達成した．2008 年末の実走テストへの投入が決定されていたが，F1 撤退決定に伴い，計画の実行は中止となった．

4.4. クラッチ

レーススタート時の発進性能を最大化するために，クラッチ伝達トルクを安定化させることをねらいとして開発をおこなった．従来機構はダイヤフラムスプリングによって設定されたプリロード荷重を油圧で作動するピストン力により調整することでクラッチ摩擦材に対する押し付け荷重を制御していた．この構造では，個々の組み付け状態による押し付け荷重のばらつきや，摩擦材の摩耗に伴うダイヤフラムスプリングの特性変化が生じるため，精度の高い発進トルクの制御が困難であった．そのために開発した Direct Push Clutch（DPC）を Fig. 5 に示す．これにより摩擦材の押し付け力を油圧力そのもので得ることでばらつき要素を除外し，精度良いクラッチトルクの制御を可能にした．制御性の低下を招く作動時の荷重ヒステリシスの大部分はシール部フリクションで，この低減策として油圧ピストンを小径プランジャを二ヶ所に設置するタイプとすることで，この影響を極小化した．この技術はオリジナル技術として 2006 年より適用され，以降スタンダードとなった．

4.5. デファレンシャル

デファレンシャルは，この10年で最もコンパクト化が進んだ部品のひとつであり，専門メーカが公表したデータによると，デファレンシャルアセンブリとしての重量が 1998 年仕様は 12.5 kg であったものが，2004 年仕様では，50%以下である6.1 kgにまで低減できたとされる[2]．これらは主にパッケージ技術の進化と設計安全率の最適化による．デファレンシャルの搭載位置は車両の重心位置よりも高いため，軽量化による重心高低減効果が大きい．また全幅の幅狭化は空力性能の向上に貢献するとともにドライブシャフト長を長く取れるためドライブシャフトの後退角が小さくなり，伝達効率の向上にも貢献する．差動機構としては，ベベルギヤセット方式と遊星ギヤ方式が存在するが，重量および全幅サイズにおいて遊星ギヤ方式が優れる．HGT でもデファレンシャルのコンパクト化に積極的に取り組みいくつかの独自技術を開発した．ここでは独自機構を用いて小型化を目指した Ultra Short Diff（USD）を

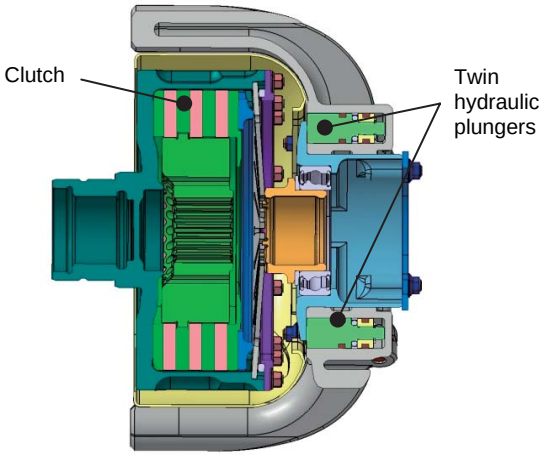

Fig. 5　Appearance of Direct Push Clutch (DPC)

Table 1　Classification of transmission losses (loaded)

Bearings	Gears	Seals	Churning	Pump
20%	62%	2%	14%	21%

紹介する．Fig. 6 に 2008 年度仕様(RA108)との断面図比較を示す．全噛みダブルピニオンプラネタリを採用することで，20%の小軸間化と 14%の軽量化を達成した．2008 年末時点で性能，耐久信頼性の見極めは完了し，2009 年よりのレース投入を目指していた．

4.6. 伝達効率改善

当初の重点開発目標であった軽量コンパクト化と変速時間の短縮に対し，独自開発による成果が得られ，競争力が向上したことから，2006年より伝達効率の改善を重点課題として取り組みを始めた．当時のギヤボックスの最大負荷時の伝達効率の測定結果を Table 1 に示す．

これから明らかなように，駆動損失の大半はギヤ歯面の伝達部分であることがわかった．そのため，ギヤ噛み合いでの摩擦損失低減を目的として，表面処理の追加をおこなった．結果としてDiamond like carbon(DLC)コーティングが良好な結果を示し，レシオギヤ，ベベルギヤ，ファイナルギヤのすべてのギヤに DLC コーティングを追加することで，3.4 kW の駆動損失低減が可能となった．コーティングの耐久性においては当初，特に接触面圧の高いベベルギヤでの剥離が課題となった．下地の面粗度向上による密着性向上と膜の緻密化による材料および製法の見直しにより解決し，2007年中盤戦より部分適用，2008年開幕戦より全ギヤへの適用を達成した．

また，ギヤボックスオイル開発による駆動損失低減にも取り組んだ．一般的にはオイルの低粘度化により，攪拌抵抗を低減することができるが，同時に油膜厚さの減少から境界潤滑状態となると歯面での摩擦が増大し，結果として伝達効率は低下することがわかった．各種基油の見直しにより攪拌抵抗と歯面での摩擦損失を両立させることで 0.4kW の駆動損失低減を達成した．

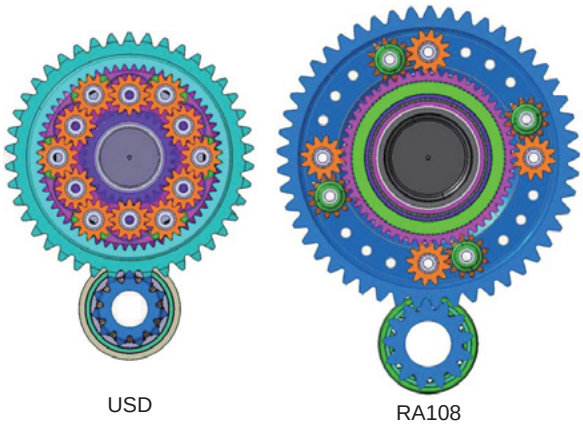

Fig. 6　Comparison between USD and RA108

5．むすび

第３期 F1 活動では，結果的にわずか１勝しか記録できなかったが，シームレスシフトを始めとする数々の業界先駆け技術を産み出せたことで，少なくともこの開発に携わった技術者は胸を張って最後を迎えることができた．失敗ばかりで始まった開発ではあったが，我々技術者は多くのことを学び成長できたといえる．これこそが F1 参戦の成果であり，今後の財産となると確信している．

参考文献

（1）眞野敦：F1 用ギヤボックスの技術開発，自動車技術，Vol. 59, No. 9, p. 8-11(2005)

（2）McBeath, S.: F1 transmission trends, Racecar Engineering, p. 34-42(2005)

■著　者■

眞野　敦