F1用シームレスシフトの開発

Development of Seamless Shift for Formula One Car

吉岡　尚*　内山　威*
Takashi YOSHIOKA　Takeshi UCHIYAMA
久保勝巳*　松井　亮*
Katsumi KUBO　Ryo MATSUI

要　旨

第３期F1参戦に際しギヤボックスの開発に着手した．常時噛合い式７段変速のレギュレーション内で最大限競争力を向上させるためにはシフト時間の短縮が有効である．通常の変速プロセスは前段アウトギヤ，ニュートラル，そして次段インギヤだが，本開発のシームレスシフトは，次段インギヤ，前段アウトギヤとすることでアップシフト時の伝達トルク損失時間ゼロのシフトを実現した．通常このプロセスの場合，共噛みによる破損に至るが従来の機構とロック機能を付加したワンウェイクラッチを組み合わせ，共噛みを回避すると同時に減速トルク伝達にも対応した．この機構をギヤハブとメインシャフトの間に配置し選択的にワンウェイクラッチを使うことと，エンジンとの協調制御により，全段シームレス化を実現した．その結果１ラップあたり0.4秒の短縮を達成し，F1 業界初の機構として 2005 年からレースに投入した．

また，シームレス機能を確保しながら，シフトフォーク，シフトリングを廃止し，ギヤ選択機構をメインシャフト内に収めることで全長短縮と軽量化を実現するシフト機構の開発についても紹介する．

ABSTRACT

Honda focused on gearbox development during its third Formula One era. The reduction of shift time is an effective means of maximally increasing race competitiveness within the constant-mesh 7-speed gearbox regulations. In the standard shift process, the current gear was disengaged, the system went into a neutral state, and the following gear was engaged. Honda's seamless shift realized up-shift with a torque loss time of zero, by engaging the following gear and then disengaging the current gear. Normally, this process would lead to damage due to double engagement, but in the developed system double engagement was prevented and transmission of deceleration torque was enabled by adding one-way clutches with a locking function to the conventional shift mechanism. The selective use of these one-way clutches, positioned between the gear hubs and the mainshaft, and the use of cooperative control with the engine, enabled the realization of seamless shift across the entire shift range. As a result, lap time was reduced by 0.4 sec per lap, and the system was used in races from 2005 as the first shift mechanism of its type in the Formula One world.

This paper will also discuss the removal of the shift forks and shift rings as well as the fitting of the gear selection mechanism inside the mainshaft in order to reduce the total length and weight of the mechanism while maintaining its seamless shift performance.

１．まえがき

F1の変速機構は常時噛み合い式平行二軸でモータサイクルに多く使用されるドグクラッチによるギヤ段の変更をおこなう構造としている．初期のギヤボックス開発においては競争力に寄与するためにシフト機構の改良をおこなった．このための目標として早いシフト（シフト時間短縮）と確実なシフト（耐久信頼性）の両立を目指した．早いシフトを実現するために，ドグチャンファ形状の鋭角化，バレルイナーシャ低減，シフト系の作動速度向上をおこなった．シフトを早くするに従ってシフトフォークのオーバーシュート，シフトリングの倒れに起因する作動不良などが発生した．これらを防止し，作動の安定化をねらいとしたバレルカム形状や，シフトフォーク形状の最適化をおこなった．これらにより他チーム同等の競争力を持つようになったが，日進月歩のレースの世界で勝利するためには革新的な技術が必要であった．従来のシフト機構では，アップシフト時はいったんエンジントルクをゼロ付近まで低減する必要があり，車

＊四輪R&Dセンター

輌の空気抵抗による減速時間が発生しパフォーマンスへの影響が大きかった．しかし，この機構ではこれ以上シフト時間の短縮が見込めない限界に達していた．シフト時間の短縮の行き着く先はトルク抜け時間の無いシフトの実現である．レギュレーションの中でこれを成立させるには，さまざまな課題が予想されたが，対他競争力を向上する大きなチャンスと捉え開発を開始した．

2．開発のねらい

量産車のオートマチックトランスミッションの１－２変速によく使われているワンウェイクラッチを使った変速では，少なくとも一回の変速はトルクロスの無い変速が実現できている．この機能を F1 ギヤボックスのすべての変速段に適用できる機構を開発し，シームレスシフトを実現することをねらいとした．

3．達成手法

3.1. ドグの噛合いタイミング変更

従来の構造はドグクラッチにトルクが掛かっている状態ではドグ締結部の摩擦力のために変速操作（ドグの抜き差し）ができない．このため，変速時にはエンジントルクを低減し，前段のドグを抜き，この動作が完了した後，次段のドグを噛み合わせると同時にエンジントルクを復帰していた．これを前段が伝達している状態のまま，次段のドグを噛み合い状態に作動させ，次段のトルクの伝達が開始した後にトルクの伝達がなくなった前段のドグを抜くことで，エンジントルクを落とすことなく，変速が可能となる．コンベンショナルシフトとシームレスシフトの５速から６速への変速過程を例としてドグの噛み合うタイミングの違いを Fig. 1 に示す．コンベンショナルシフトでは変速中間でいったんニュートラル状態となるが，シームレスシフトでは５速と６速の両方にドグが噛み合う状態となっていることがわかる．

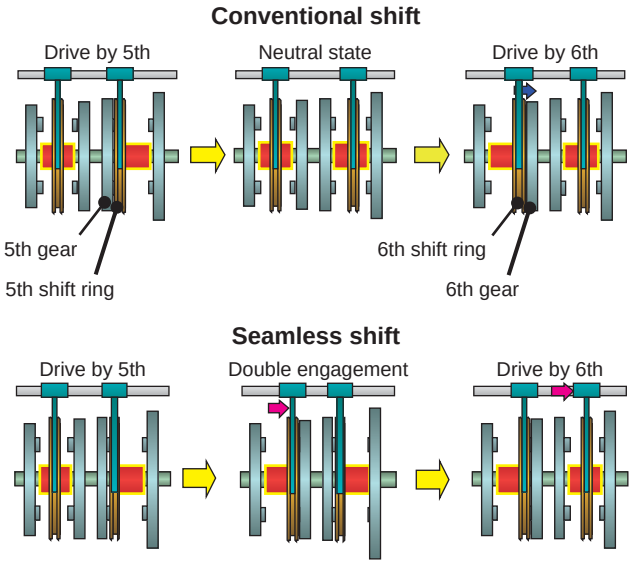


Fig. 1　Dog engagement timing

3.2. アップシフトでの共噛み回避

Fig. 1 で示すように，従来の構造でこの変速タイミングを適用すると，前段と次段が同時に噛み合ういわゆる共噛み時間が存在する．共噛みを起こすと，走行不能に陥る不具合が発生することは広く知られている．そこで本システムは共噛みを回避する機構を開発した．構成部品を Fig. 2 に示し，アップシフト時の各部品の動きと働きを Fig. 3，Fig. 4 に示す．

Fig. 3 はフロント側から見た加速時の状態を示し，回転方向は反時計回りとなる．エンジンからのトルクはクラッチ，レイシャフトギヤ，メインシャフトギヤ，シフトリン

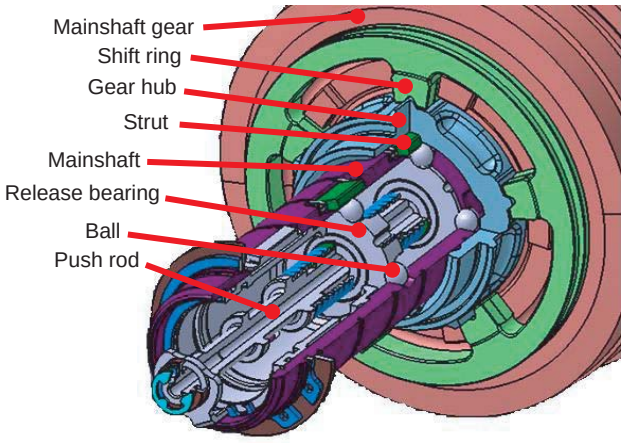


Fig. 2　Parts configuration of seamless shift mechanism

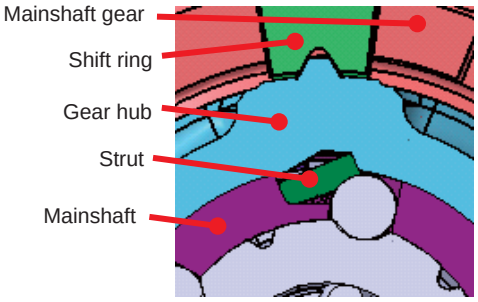


Fig. 3　Up-shift state

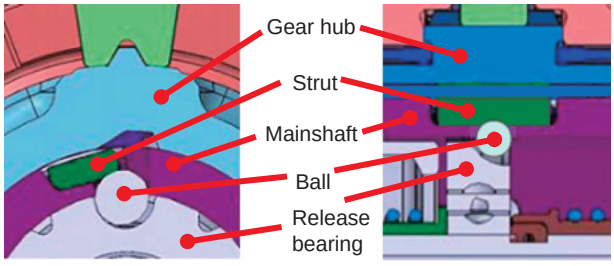


Fig. 4　Ratcheting state

グ，ギヤハブ，ストラット，そしてメインシャフトと伝達され，タイヤへと出力される．コンベンショナルシフトでは，ギヤハブとメインシャフトはスプラインで結合されているが，シームレスシフトでは，ギヤハブとメインシャフトの間にワンウェイクラッチとして機能するストラットを配置している．

Fig. 4 は，シームレスシフトの変速タイミングでのアップシフト時の次段がトルク伝達を開始し，前段のドグがまだ噛み込んでいる共噛みの状態を示す．

次段のドグが噛み，トルク伝達を開始すると，前段のギヤより次段のギヤの回転数が速くなり，前段のストラットはギヤハブ内側のメインシャフトポケットに収納され，ワンウェイクラッチの空転方向として作動し，共噛みの状態を回避できる．また前段のトルク伝達は無くなっているので，シフトリングをエンジンのトルクを落とすことなくドグから抜くことができ，シームレスシフトが達成される．

次段のストラットは遠心力によりギヤハブと自動的に噛合いワンウェイクラッチの噛み込み側として作動する．

3.3. エンジンブレーキ

ストラットによる単純なワンウェイクラッチ機能で，加速時のトルク伝達機構は成立するが，減速トルクを伝達することはできない．これを解決するために，ストラットの下にボールを挟み込みロックすることで減速トルクの伝達を可能にした．Fig. 5にエンジンブレーキ時の状態を示す．減速トルクは加速時とは反対に，タイヤからの入力が，ドライブシャフト，ディファレンシャルギヤ，ベベルギヤ，メインシャフト，ボール，ストラット，ギヤハブ，シフトリング，メインシャフトギヤ，と伝達され，最終的にエンジンに入力される．リリースベアリングはプッシュロッドにより，ロックまたは解除する機構とした．

3.4. ダウンシフト

シームレスシフトを達成するには，コンベンショナルなシフト機構に対して，下記２点の特異点がある．

（1）共噛みタイミングを得るためのシフトバレルのプロファイル

（2）共噛み回避機構

これらのアップシフトに重点をおいた機構でダウンシフトを成立させるために，リリースベアリングを解除し，前段から次段にダウンシフトが完了した後，再度リリースベアリングをロックしている．リリースベアリングを解除するにはトルクを抜く必要があり，この方法では減速トルクを抜いている時間がコンベンショナルシフトに比べて長くなる．そこでアップシフトをシームレスシフトとしながら，コンベンショナルシフトと同等の短時間ダウンシフトを達成するために，リリースベアリングを解除すること無くダウンシフトができるシフトバレルのプロファイルを考案した．Fig. 6 にアップシフト時のシフトバレルプロファイルを示す．シフトフォークが39%以上ストロークするとシフトリングとドグは噛み合うので，図中の斜線部分が共噛み状態であることがわかる．

Fig. 7 にダウンシフト時のシフトバレルプロファイルを示す．図中の斜線の部分がニュートラル状態であり，これによりリリースベアリングをロックしたままでダウンシフトすることが可能となった．

ただし，このシフトバレルプロファイルには図中の縦線部分にフリーエリアと呼ばれるシフトフォークが自由に動けるエリアが存在する．セレクターレイルとシフトフォークの間にディテントを設けることで，シフトフォークが意図しない動きをすることを防止した．アップシフト側とダウンシフト側で異なったタイミングでドグの抜き差しを可能にしたことで，アップシフトの機能とコンベンショナルシフトと同等の時間のダウンシフトの両立を達成した．

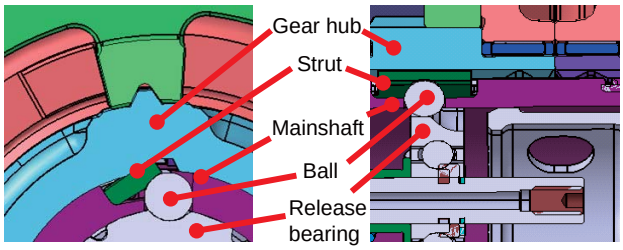


Fig. 5　Overrun state

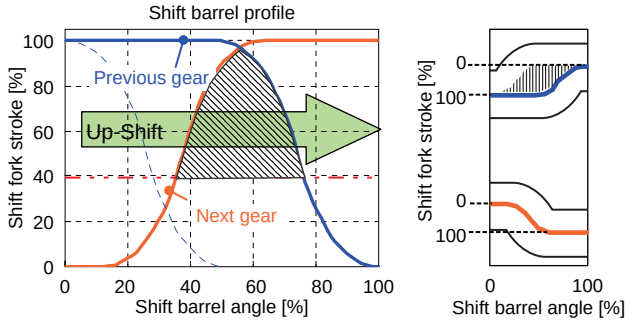


Fig. 6　Up-shift shift barrel profile

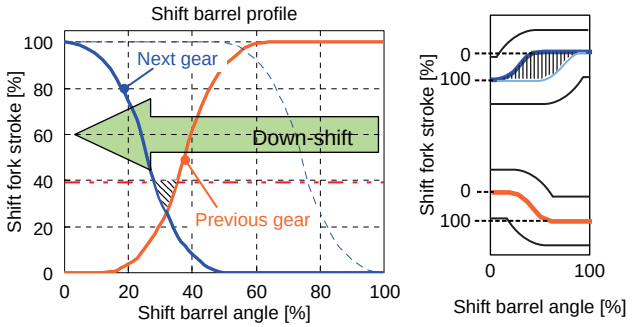


Fig. 7　Down-shift shift barrel profile

4．効果

本研究で開発したシームレスシフトを採用した場合の効果を検証するため，アップシフト中のエンジン回転数，エンジントルクおよび車輪速度の推移について比較した．コンベンショナルシフトのシフト中のデータを Fig. 8 に，シームレスシフトのシフト中のデータをFig. 9にそれぞれ示す．シームレスシフトでは，エンジントルクを維持したままでのアップシフトを実現しており，駆動力をロスすることなくシフトを完了していることがわかる．また，シルバーストーンサーキットをシミュレートした台上テストにおいて，ホームストレートエンドの速度換算で4 km/h，距離換算で7.6 mの取り分を得た．本機構は，2005年第１戦以降全レースに適用された．

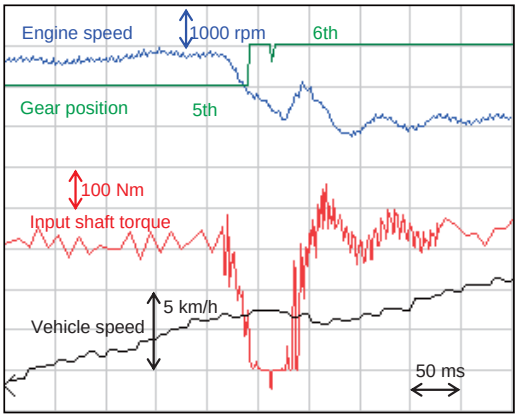


Fig. 8　Data for conventional shift

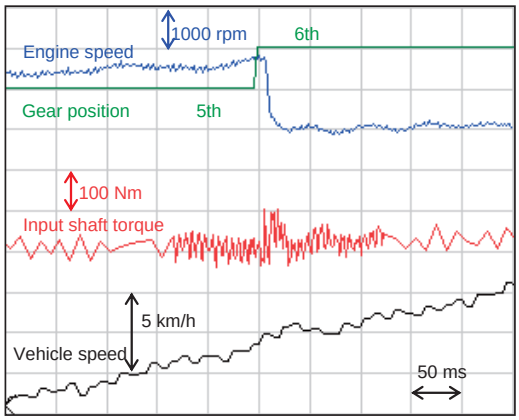


Fig. 9　Data for seamless shift

5．進化

5.1. さらなる開発のねらい

シームレスシフトを世界に先駆けて投入してから，翌シーズンの末には他チームでもほとんどのチームが同様の効果を持ったシステムを採用しており，変速性能の観点でのアドバンテージは薄れていた．加速時のトルクロスを無くすという性能の向上は前記のシステムで究極まで達成されていたが，Honda のギヤボックスは他チームに対して軽量，コンパクト性の観点で優位性は無かった．そこで現行の変速性能は維持しつつ，さらなる軽量，コンパクト化を目指して開発をおこなった．

5.2. 機構紹介

5.2.1. 特徴

トルク伝達と空転化を制御できるワンウェイクラッチ機構を全てのシフトギヤとメインシャフト間に配置し，この変速機構をメインシャフト内に収めた軸内変速機構を開発した．従来の変速機構においてシフトギヤ間に配置されているシフトフォーク，シフトリング，ギヤハブ等を省き，シフトギヤのみを直列に並べることにより，ギヤボックス全長の短縮を可能とした．また，同時にギヤボックス自体の軽量化も実現した(Fig. 10，Fig. 11)．

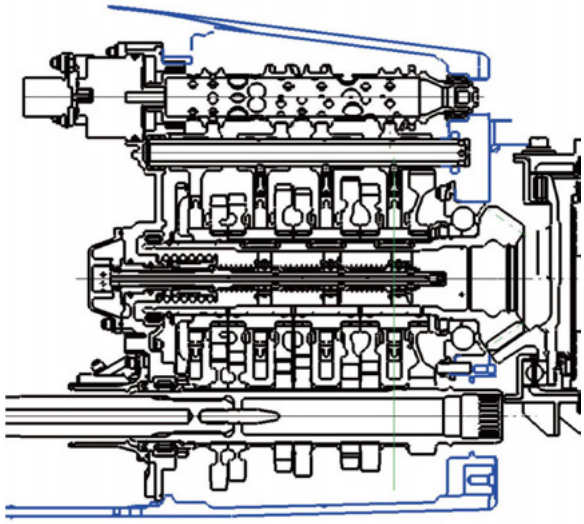


Fig. 10　Conventional seamless shift

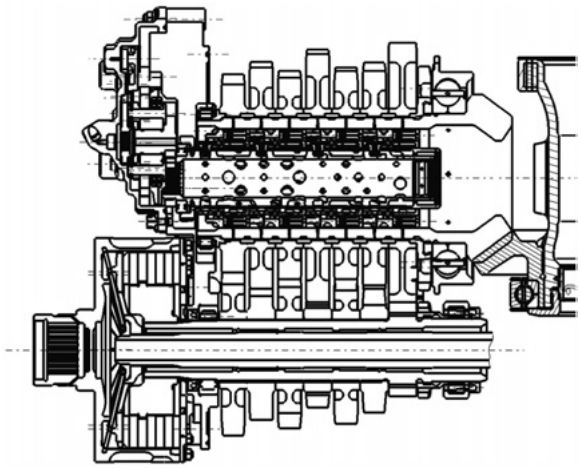


Fig. 11　In-shaft seamless shift

5.2.2. 構成

この軸内変速機構において共噛み領域を持たせることによってトルクロスを無くす原理は前述のシームレスシフトと同一である．しかし，変速機構の構成は大きく異なる．以下に構成部品およびその部品の役割を述べる．シフトギヤを含む変速機構を Fig. 12 に示す．各シフトギヤとメインシャフト間に配置されるストラットは大小２個のボールを介してシーソーの要領で作動され，変速に必要な以下の３状態を作り出す．

（1）ストラットが起きると同時にロックされ加減速トルクも伝達可能なインギヤ状態(Fig. 13)

（2）加速側，減速側とも空転するストラットが寝ているニュートラル状態(Fig. 14)

（3）加速トルクのみを伝達するワンウェイ状態(Fig. 15)

ストラットの状態をコントロールするのは大小２個のボールの径方向位置であり，それは軸方向に大小ボール専用のカム溝を有するスライドカムが軸方向に移動することによって調整される．スライドカムの軸方向位置はスプリングを介し，シフトベアリングが軸方向に移動することによって調整される．シフトベアリングの軸方向位置はシフトベアリングと一体化したピンが内側の周方向に形成するバレルのカム溝に沿って軸方向に移動することによって調整される．結果的にこのバレルを回転させることによりストラットの３状態機能を選択的にコントロールしていることになる．

5.2.3. 動作

前段から次段への変速過程を動作順に記す．

（1）前段で駆動中は前段はインギヤ状態，その他の段は全てニュートラル状態にする．

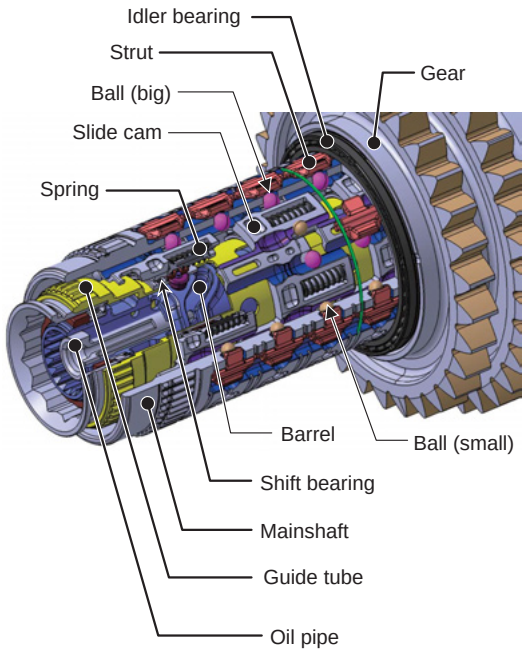


Fig. 12　Parts configuration of in-shaft seamless shift mechanism

（2）バレルを回転することで変速作動を開始し，前段のストラットをワンウェイ状態にすると同時に次段もワンウェイ状態にする．

（3）前段から次段に動力伝達が移ると，伝達が終了した前段のストラットをニュートラル状態にする．

（4）次段をインギヤ状態にして変速終了

アップシフト，ダウンシフト時のインギヤタイミングを Fig. 16 に示す．図中ａはダウンシフト時に前段が解除(Disengage)するタイミング，ｂはアップ，ダウンシフト時

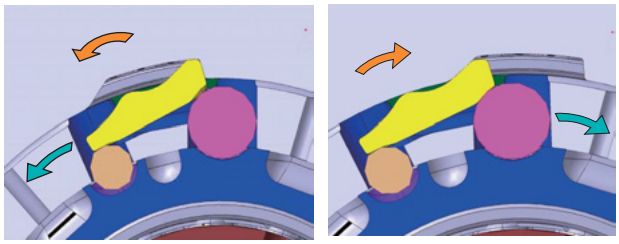


Fig. 13　In-gear state

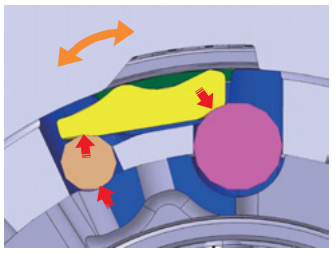


Fig. 14　Neutral state

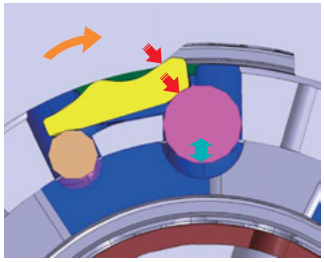


Fig. 15　One-way state

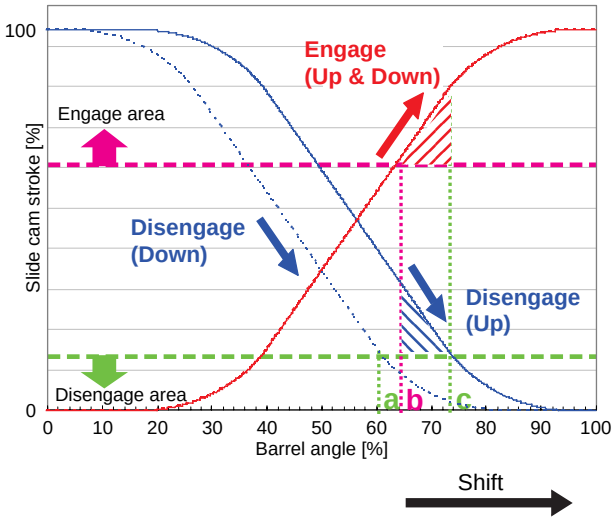


Fig. 16　Shift timings

に次段が噛み込む(Engage)するタイミング，cはアップシフト時に前段が解除するタイミングを示す．前段が解除する動作は，アップシフトとダウンシフトで異なるタイミングが要求される．これは前述のシームレスシフトと同様の理由によるが，達成手法はスペース的な理由により異なり，スライドカムとシフトベアリング間にスプリングを配置することで達成した．アップシフト時は前段のトルクが抜けるまでストラットが寝ることができず，バレルは回転してもスプリングが圧縮することで，スライドカムの動きが遅れ，結果的にニュートラル状態に移行するのが遅れることにより共噛み領域を作り出している．ダウンシフト時はストラットが寝る方向に荷重が掛かっているため，スライドカムの動きはバレルの回転に遅れることなくニュートラル状態へ移行することができ，これにより共噛みを回避することができる．

5.2.4. 効果

新開発軸内シームレス変速機構を採用することによって従来変速機構に対して全長 19%短縮(192.7 mm から 155.1 mm)と，重量 12%減(10.4 kg から 9.1 kg)の効果を得た．

5.3. 性能および信頼性の検証

本軸内シームレス変速機構のシフト性能は Fig. 9 に示すシームレスシフトと同等である．本開発では 2008 年から FIA により導入されたギヤボックスの４レース継続使用のレギュレーションに対応するため，信頼性の確保も重要であった．台上確認テストにおいて，目標 2500 km に対して 1300km までの走行を完了した時点で，F1 からの撤退発表により開発を中止した．

６．まとめ

アップシフト時の伝達トルクロスゼロ化のためにシフトシーケンス見直しと共噛み回避のためのワンウェイクラッチ機構を選択的に使用する機構を，レギュレーションの範囲内で実現した結果，次の成果を得た．

(1)F1 業界初の機構として１ラップあたり 0.4 秒の短縮を達成し，2005 年からレースに投入した．

(2)アップシフト時のトルク抜けが無く，変速時の駆動力変動が小さくなったことで，コーナリング中や，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．

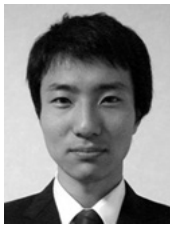
また，シームレスシフトの機能を維持した，コンパクト化の追求としてシフトフォーク，ドグリング機構の廃止とそれに代わる機構を軸内に収めることにより全長 19%短縮，重量 12%減の成果を得た．

■著　者■

吉岡　尚

内山　威

久保勝巳



松井　亮