

論文・解説

22

新型5速 自動変速機の紹介 Introduction of New 5-AT

丸末敏久^{*1} 石山貴士^{*2} 大山 一^{*3} 本瓦成人^{*4}
 Toshihisa Marusue Takashi Ishiyama Hajime Ohyama Narihito Hongawara
 岩下典生^{*5} 仲岸 優^{*6} 坂木民司^{*7}
 Norio Iwashita Masaru Nakagishi Minji Sakaki

要 約

環境問題から社会的に燃費改善への要求が高まる一方で、マツダのブランドDNAである「反応の優れたハンドリングと性能」を体現すべく動力性能の進化も求められている。この燃費と動力性能の厳しい要求を満足させるため、新たにFS5A-EL型FF-5速自動変速機(AT)の開発を行った。

この新型ATでは、アテンザ他に搭載されているFN4A-EL型FF-4速ATをベースに、副変速機とそれを制御する油圧システムを追加して多段化することで、ワイドギヤレシオを実現して燃費と動力性能の高次元での両立を目指した。追加部品点数を最小限に抑え部品サイズの適正化を図ることで、多段化による重量増・サイズアップを抑制し、軽量・コンパクトを実現した。加えて、制御系の改善により高いシフトクオリティを達成している。また、各部品のフリクション低減を図るとともに、トルクコンバータや油圧回路を改良してスリップロックアップ制御の進化を図り、ロックアップ状態で走行可能な領域を拡大させた。これにより、多段化本来の高車速域でのエンジン低回転化による効果とともに、燃費を最大限に改善させることができた。

Summary

There is a growing need for improvement of fuel economy to deal with environmental issues. On the other hand, dynamic performance should be improved to embody the Mazda's DNA "Responsive Handling and Performance". We developed a new FS5A-EL FF 5-AT (5-speed automatic transmission) which can meet the stringent demand on fuel economy and dynamic performance.

A sub-transmission and oil-hydraulic system were added to the FN4A-EL FF 4-AT, which is currently installed in Atenza, etc.. The new 5-AT has a wider gear ratio which can lead to better fuel economy and dynamic performance. Such moves ordinarily increase weight and size, however the new 5-AT achieved "light-weight" and "compact" through the reduction of the number of parts and our efforts to repress the size-increase. The control system was also modified to improve shift quality. Moreover, the friction among parts was reduced and the lock-up slip range was widened by modifying the torque converter and oil-hydraulic circuit. All these improvements enabled to keep the low engine speed at high vehicle velocities, resulted in an improved fuel economy.

*1~6 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*7 技術研究所
Technical Research Center

1. はじめに

各社とも燃費や動力性能の改善のため、ATをより多段化する傾向にあるが、一般に多段化を行うことで、ワイドなギヤレシオの設定が可能となり、高車速域でのエンジン低回転化による燃費改善を実現しつつ、発進性能の改善が可能となる。しかし、単純なギヤ段追加は、重量増や抵抗増による上記改善効果の減少を招く場合がある。また、変速頻度も増加し、より高いシフトクオリティが必要となる。

新開発のFS5A-EL型5速AT(以下FNR5)は、このような多段化に伴う問題を克服し、重量、サイズ、性能において、クラストップレベルのポテンシャルを実現した。

本稿では、新型AT開発の狙い、構造、及び採用技術について紹介する。

2. 開発の狙い

多段化による効果を最大限発揮させるため、以下をFNR5開発の狙いとした。

- (1) 軽量・コンパクト化
- (2) 燃費改善技術の進化
- (3) 高シフトクオリティ

3. 構造

FNR5の構造をFig.1に示す。

FNR5では、1軸目の基本構成をFN4A-EL型4速AT⁽¹⁾(以下FNR)と同一配置としている。

1軸目のパワートレイン機構は、3組の湿式多板クラッチ(フォワード①、リバース③、3-4④)、1組の湿式多板ブレーキ(ローアンドリバース⑧)、1組のバンドブレーキ(②)、1組のワンウェイクラッチ(⑦)及び、2組のシングルプラネタリギヤ(フロント⑤、リヤ⑥)から構成されており、動力をプライマリギヤ(⑬)から、セカンダリギヤ(⑭)を介して2軸目に伝達する。

2軸目のパワートレイン機構は、1組の湿式多板クラッチ(ダイレクト⑫)、1組の湿式多板ブレーキ(リダクション⑪)、1組のワンウェイクラッチ(⑩)及び、1組のシングルプラネタリギヤ(⑨)から構成されており、セカンダリギヤ(⑭)から入力された動力は、カウンタシャフト(⑰)、アウトプットギヤ(⑯)、リングギヤ(⑮)、ディファレンシャル(⑱)を介して車軸に伝達する。

1速～4速間の変速は1軸目の主変速機で行い、今回追加した2軸目の副変速機で4速～5速の変速を行う。

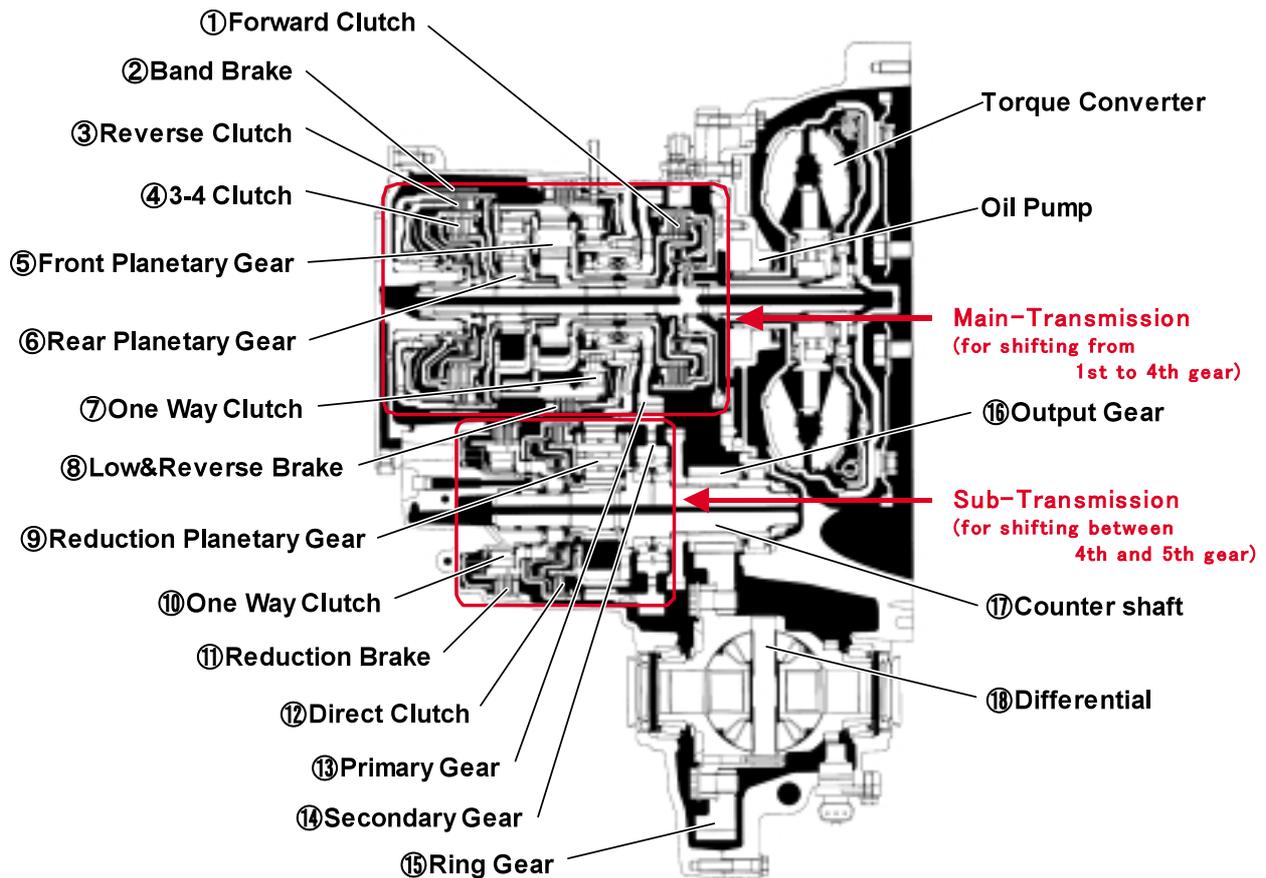


Fig.1 Sectional View of FNR5

4. 採用技術と効果

4.1 軽量・コンパクト化

副変速機の追加によるサイズアップや重量増を最小限にするため、各部品品のコンパクト化を図り、ミッション全長や3つの回転軸の各距離（軸間距離）をFNRから変更することなく5速化を実現させた。以下にその具体的な5つの内容について説明する。

(1) カウンタシャフト強度向上 (Fig.1 ⑰部)

2軸目部分のコンパクト化と強度確保を両立するため、カウンタシャフトの熱処理を浸炭焼入れとし、更にハードショットピーニングを施すことで疲労強度を高めた。また、Fig.2に示すように2軸目部分への入出力ギヤ（セカンダリギヤ、アウトプットギヤ）のレイアウトをFNRと共通化しながら、プラネタリギヤを配置した。これにより、アウトプットギヤの噛合いにより発生する曲げ荷重に対しても十分な強度を確保できるレイアウトを確立しつつ、FNRと共通の軸間距離も実現した。

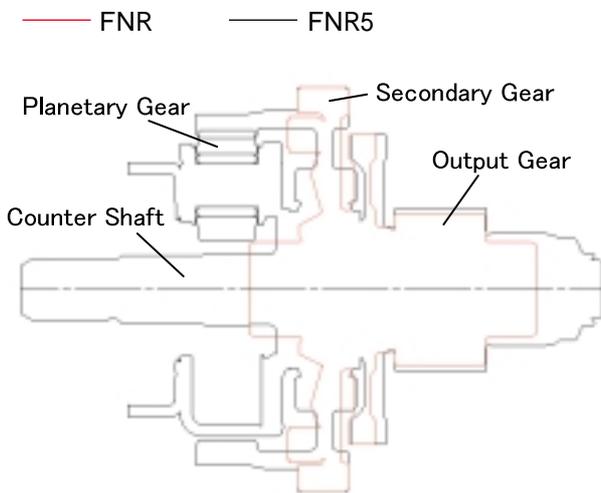


Fig.2 Counter Shaft Layout

また、通常シャフト部材の潤滑穴部分には上記の曲げ荷重により応力集中が発生するため、強度上、潤滑穴配置には制約がある場合が多いが、上記の強度向上策を織り込むことで配置の自由度を高めることができた。これにより、Fig.3に示すようにプラネタリをはじめ、最適な位置に適正な潤滑流量を分配することが可能となった。

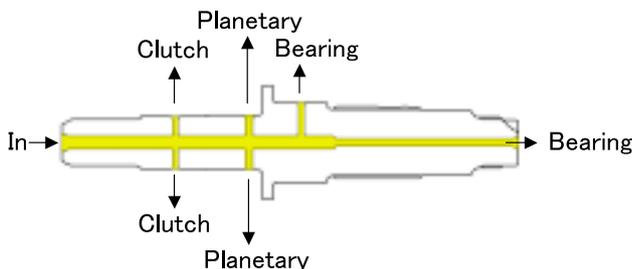


Fig.3 Counter Shaft Lubrication System

(2) ワンウェイクラッチ小径化 (Fig.1 ⑩部)

2軸目に副変速機構造を持つATでは、ワンウェイクラッチ（以下OWC）と湿式多板ブレーキを軸方向に配置する例が多い。FNR5では、FEM解析による形状の最適化を行い、OWCの容量を確保しつつ径方向の小径化を実現した。これにより、OWCとブレーキを径方向に配置することを可能とし、ミッション全長のコンパクト化を実現した。

(3) オイルポンプサイズの最適化

副変速機の油圧制御部の追加及びカウンタシャフト周辺の潤滑確保のため、従来のFNR用で実績のあるロータ形状を流用しつつ、ロータ幅を拡大することでオイルポンプ容量アップを行った。この際、ロータのクリアランス及びポート形状を最適化することでリーク量を抑えけるとともに、吐出効率を向上させることでオイルポンプ全長アップを最小限とした。また、同時に周辺部品とのレイアウトを最適化することで、ミッション全長に影響を及ぼすことなく10%の容量アップを実現した。

(4) リアプラネタリ潤滑強化 (Fig.1 ⑥部)

5速化に伴いFNRに対して1~4速までのミッションギヤ比が低速化したため、従来構造を流用しているリアプラネタリピニオンギヤの最高回転数が12%増加する。これに対して潤滑経路の改善を行うことでFNRに対して全長変更させることなく、高回転域での耐焼付き性を改善した。

(5) 副変速機の油圧制御装置のレイアウト

変速応答性を重視し油圧応答遅れを最小限にするため、副変速機の各クラッチ類をコントロールする油路が最短となるレイアウトを採用した。具体的には、Fig.4に示すように、副変速機に近接する車両後方側に副変速機専用の独立した油圧制御装置を配置する独自のレイアウト構成とし、各クラッチ類と制御装置間の距離を最小とした。

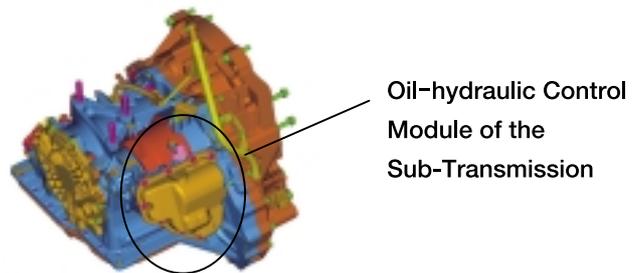


Fig.4 Externals of the Sub-Transmission

また、油圧制御の基本となるライン圧を主変速機の油圧制御装置と共用する構成とし、同時に、耐高油圧ソレノイドを採用してソレノイド用の減圧弁を削減する等、副変速機の制御に必要なバルブ類の数を最小限に抑えることで、ミッションの搭載要件を満足させるコンパクトな油圧制御装置とした。

4.2 燃費改善技術の進化

FNR5では多段化による燃費改善効果を最大限引き出すために、副変速機部分だけではなくFNRと共通部分についても抵抗低減を行った。また、スリップロックアップ制御を進化させてロックアップ状態で走行可能な領域を拡大し、燃費改善を行った。

(1) フリクション低減

(a) ローラタイプOWCの採用

OWCは空転時にドラグトルクが発生し効率低下を招くため、副変速機部のOWCを設定する上で、スプラグタイプと比較してドラグトルクが小さく高効率なローラタイプのOWCを採用した。これにより、5速走行時の効率改善を行った。Fig.5にドラグトルクの比較を示す。

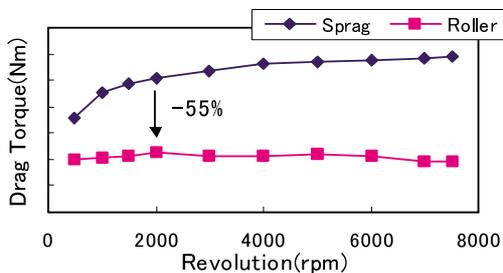


Fig.5 Drag Torque Comparison of OWC Type

(b) ディファレンシャル攪拌抵抗低減

FEMによるトランスミッションケースの強度解析を行い、Fig.6に示すようにディファレンシャル（以下デフ）周りのリブ形状の見直しと内部形状のフラット化を行った。これによりFNRと同等の剛性を確保しながら、デフとケースの間に介在するオイル量及びオイルの流れを改善し、デフ回転によるオイル攪拌抵抗を17%低減した。

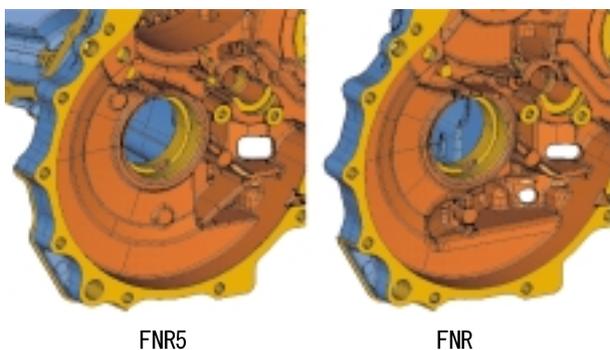


Fig.6 Transmission Case Shape Around the Differential Gear

(c) 低抵抗ベアリングの採用

デフサイドのテーパローラベアリングについて、低抵抗タイプを採用した。その抵抗比較をFig.7に示す。

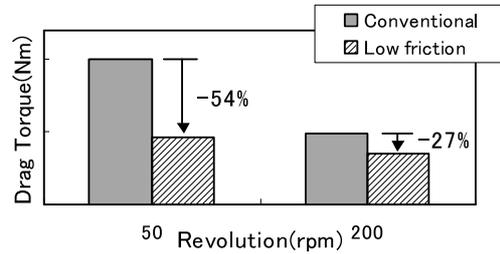


Fig.7 Drag Torque Comparison of the Taper-Roller Bearing

(d) シェル型ニードルベアリングの採用

ダイレクトクラッチアッシーの支持部に金属ブッシュに対してドラグトルクが小さく、高回転での耐焼付き性に優れたシェル型ニードルベアリングを採用した。

(e) 低抵抗クラッチフェーシング溝形状の採用

リダクションブレーキについて、フェーシング表面の溝形状を改善することでオイルの排出性を上げ、クラッチプレート間のオイルせん断力を低減した。これによりクラッチ解放時の単体のドラグトルクを従来比40%低減し、5速走行時の効率改善を行った。

以上のフリクション低減策を織り込むことで、FNR5開発初期と比較してユニット全体で17%のドラグトルクを低減し、Fig.8に示すようにFNRとほぼ同等の値を達成した。

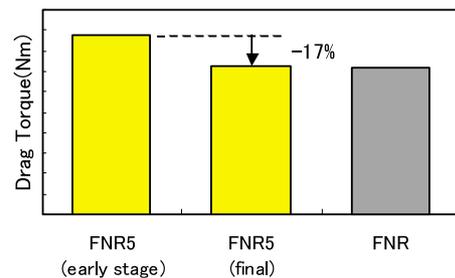


Fig.8 Drag Torque Comparison between FNR5 and FNR

(2) スリップロックアップ制御

従来のATでは、高車速時には、燃費改善のため、流体を介さずトルクを伝達するロックアップ制御を採用してきた。一方、ロックアップするとエンジン回転とAT入力回転が直結状態となるため、エンジンの回転変動がATを介して車体に伝わりやすくなり、特に低車速域において「こもり音」と呼ばれる不快なノイズや車体振動の原因となる。このため、FNRではロックアップクラッチを微小に滑らせることで振動伝達を抑制するスリップ制御を採用してきた。

FNR5では、燃費改善のためにこのロックアップ領域を更に拡大すべく、ロックアップピストンの制御性改善と制御安定性の改善（ロバスト性改善）に挑戦した。以下にその具体的な内容について説明する。

(a) ロックアップピストンの応答性改善

トルクコンバータの内部に設置されたロックアップピストンの挙動は、コンバータ内を循環するATフルードの影

響を受けるため、走行状態によっては応答性が十分ではない領域があり、ロックアップ領域拡大を困難としていた。そこで、トルクコンバータの内部流動状態を実験 (Fig.9), CFD解析 (Fig.10) の両面から明確化し、ロックアップピストンに作用する油圧挙動と応答性の関係を最適化した。

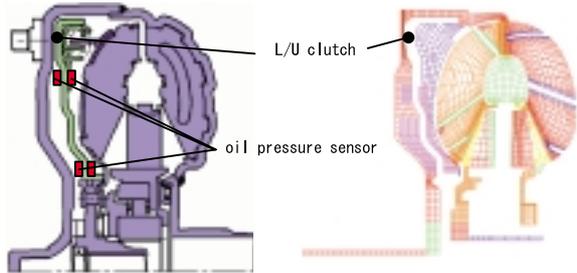


Fig.9 Oil Pressure Measurement Fig.10 CFD 3D-Model

(b) 現代制御理論の応用によるロバスト性の向上

スリップ制御では、ドライバのアクセル操作に伴う入力トルク変動に対し、スリップ量をリアルタイムに追従させてゆく必要がある。更に広い走行条件でロックアップを可能とするためには、このロバスト性改善が課題であった。そこでFNR5の電子制御では、現代制御理論 (μシセンシス) によるフィードバック制御を活用することで、スリップ制御のロバスト性を向上させ、スリップ制御領域の拡大を可能とした。Fig.11に加速時のスリップ制御の例を示す。

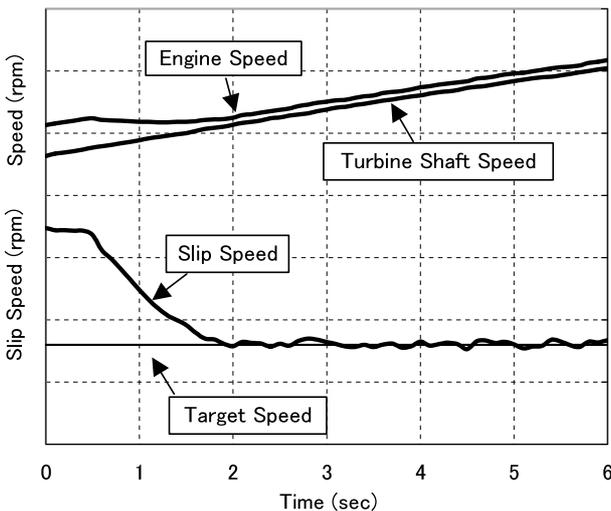


Fig.11 Slip Control

Fig.12は、国内の代表的な燃費評価モードである10-15モードにおいて、FNRとFNR5のロックアップ領域を比較したものである。前述の改善により、FNR5のロックアップ領域 (赤線) は、FNRのロックアップ領域 (青線) より拡大していることが判る。このロックアップ領域拡大により、燃費改善に大きく貢献することができた。

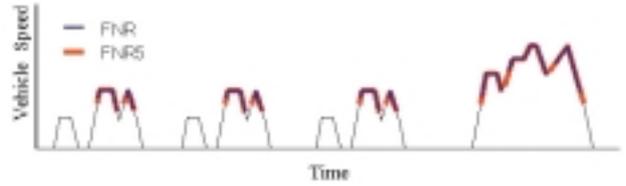


Fig.12 Comparison of the Lock Up Range

4.3 高シフトクオリティ

多段化による4-5変速を中心とした変速頻度の増加に対し、高いシフトクオリティを実現するため、副変速機の変速制御機構に制御性の高いシステムを採用するとともに、電子制御を更に進化させて対応した。

(1) 変速制御システム

主変速機の油圧制御回路構成は、FNRのDESC (Direct Electronic Shift Control) システムを流用し、1~4速までの変速については、従来の高いシフトクオリティをそのまま維持させた。今回、新たに追加された4-5変速については副変速機で制御を行うが、通常走行での変速頻度が多いことから、より高いシフトクオリティが要求され、この副変速機の油圧制御機構にも、主変速機部と同様の制御性の高いDESCシステム概念を採用し、DUTYソレノイドによるクラッチ圧の直接制御を可能とする回路構成とした。

加えて、ダイレクトクラッチには、油圧ピストン室と対抗する位置に遠心バランス室を採用した。これにより、両室の遠心油圧を相殺し、クラッチ回転数に影響されずにピストン押し力を最適状態にコントロールできる構造とし、クラッチ制御性を向上させている。Fig.13に副変速機の油圧システム概念図を示す。

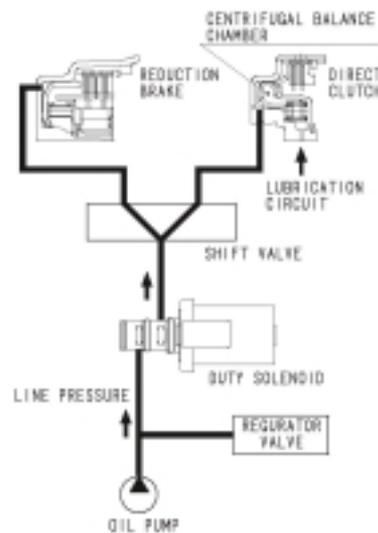


Fig.13 Hydraulic Circuit Schema Diagram

また、副変速機にはOWCを採用し、変速中の滑らかなトルク伝達を機械的に可能にしており、ばらつきの少ない高いシフトクオリティを実現している。

(2) 電子制御

FNR5の電子制御では、主変速機と副変速機を個々に変速させる基本変速制御に加えて、主変速機と副変速機を同時に変速させる主副同時変速制御で構成されている。以下に各々の制御内容について説明する。

(a) 基本変速制御

本制御では、変速ショックに影響を与えるばらつき因子の影響を吸収することで安定したシフトクオリティを実現するため、FNRでも採用されている以下の制御をベースとした開発を行った。

① モデル規範 エンジン・AT総合制御

エンジン・ATの作動モデルに則りクラッチ締結力をコントロールする制御(モデル規範制御)。エンジン出力トルク変動に対する安定性を向上。

② フィードバック制御

現代制御理論を応用したクラッチ締結力をリアルタイムに補正する制御。変速時の種々特性変動に対する安定性を向上。

③ 学習制御

経年劣化によるシフトクオリティ悪化を防止する制御。少ない学習回数で正確な補正を実施。また、誤学習を防止するため、学習条件の検出精度を改善。

(b) 主副同時変速制御

複数のギヤ段の飛び越し変速による変速応答性の悪化を発生させないため、主変速機制御ではFNRに対してシフトダウン時の応答性を重視した変速制御の改善を実施した。これに加えて主副同時変速では、シフトクオリティを悪化させることなく滑らかな変速が実現できるように主副の両変速機の油圧コントロールタイミングを最適化する制御を織り込んだ。

5 2ダウン変速の例をFig.14に示す。5 2変速では、副変速機を先にダウンシフト(5 4変速)させ、その後、主変速機をダウンシフト(4 2変速)させる必要があるが、上記の制御を行うことで、タービン回転、出力トルクともに、主副の両変速機を連続的にしかも滑らかに変速させており、応答性とシフトクオリティの両立を実現させている。

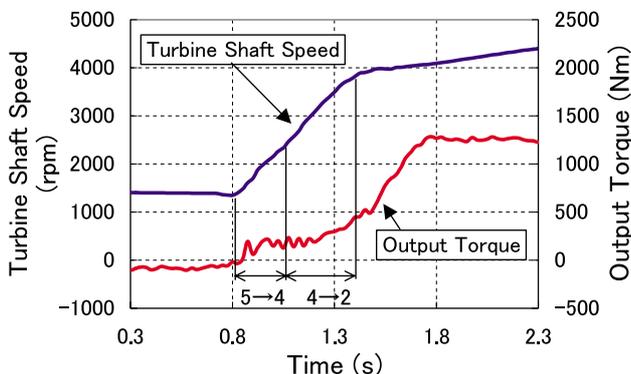


Fig.14 From 5th to 2nd Gear Down Shift

5. おわりに

FNR5開発では、ベースとなるFNRに対する新設部分のみならず、既存部分にも緻密で数多くの改善を積み重ねている。それにより、FNRの軽量・コンパクトな特徴を生かしながら多段化を実現し、あわせてATに求められる効率やシフトクオリティといった性能面の向上も達成させている。結果として、大幅に燃費を改善しながら、なおかつ、マツダのDNAでもある走りの楽しさを存分に提供できる競合力の高いATユニットとして実現することができた。

今後、本ATユニットを搭載する車両は、ハイレベルな燃費性能や動力性能を発揮することができ、マツダブランド“Zoom-Zoom”のアピールに大きく貢献できるものと確信している。

参考文献

- (1) 土井 他：FN4A-EL型 自動変速機の紹介，マツダ技報，No.17，p.154-159（1999）

著者



丸末敏久



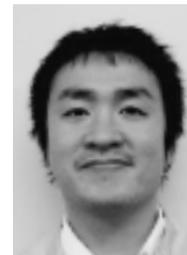
石山貴士



大山 一



本瓦成人



岩下典生



仲岸 優



坂木民司