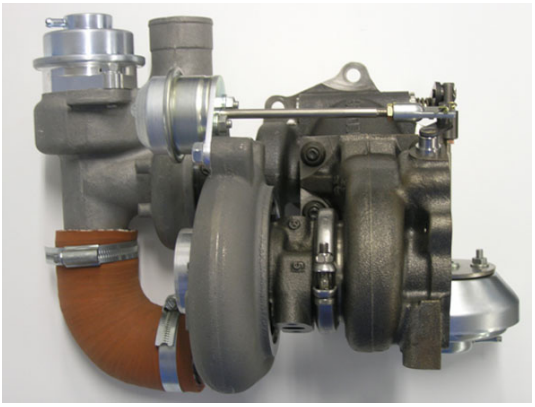
乗用ディーゼルエンジン用可変2ステージターボの開発

Development of Variable Two-stage Turbocharger for Passenger Diesel Engines



安 秉一[*1] Byeongil An
白石 隆[*2] Takashi Shiraishi

欧州を中心に年々厳しくなる排出ガス規制強化への対応として，従来のターボから VG（可変容量）ターボの装着が増加している．最近，乗用ディーゼルエンジンにおける低速トルクアップと高出力化の両立，過渡応答性向上の要求が高まっている．今回は，乗用ディーゼルエンジン向けに有望である可変2ステージターボを開発し，当社独自の設計技術を確立するとともに，性能と耐久性を確保し，客先へ展開中の技術について紹介する．

1. はじめに

欧州では燃費の良いディーゼル乗用車の人気が高く，その比率はガソリン車をしのぐ勢いである．今後の景気回復とともに欧州のみならず，新興国（BRIC`s）及びアジアにおいて，ディーゼル車の普及とターボ需要の拡大が予想される．排出ガス対策技術の進歩を背景に，欧州を中心に排出ガス規制が大幅に強化されている．乗用ディーゼルエンジン用のターボ技術では，厳しくなる燃費，排出ガス規制に対応のため，VG ターボの装着率が高まってきている．VG ターボはエンジンの全作動範囲で必要な過給圧を発生させることができ，これによりトルク，燃費が改善し，PM（粒子状物質）を減少させることができる．また，排圧制御による EGR（排気ガス再循環）の量を調整できることで NOx（窒素酸化物）低減にも有効である．

年々厳しくなる排出ガス規制に対応するためには，より高度な技術が必要であり，ターボ各社においても新しい過給システムの開発に取り込んでいる．最近，乗用ディーゼルエンジンにおける低速トルクアップと高出力化の両立，過渡応答性向上の要求が高まっている．本論文では，乗用ディーゼルエンジン向けに有望とされる可変2ステージターボの開発を行い，当社独自の技術を確立し，客先へ展開中の技術について紹介する．

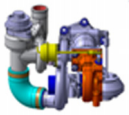
2. 可変過給システムの評価

今後の厳しい排出ガス規制に伴い，より飛躍的な性能特性の改善には新たな技術が要求される．既存のエンジンに適用可能な新しい過給システムの候補及びその特徴を表1にまとめる．また，各可変過給システムの得失評価の結果を図1に示す．評価検討の結果，既存のディーゼルエンジンに対し，大幅な改良を加えることなく，低速トルクアップと高出力を両立させ，過渡応答性向上も優れた過給システムとして可変 2 ステージターボが現時点で有効な選択肢と言える．

*1 汎用機・特車事業本部ターボ技術部 工学博士
*2 汎用機・特車事業本部ターボ技術部

表1　可変過給システムの比較

過給システム	長所	短所
可変コンプレッサ付き VG ターボ	・低速トルクの増加 (コンプレッサワイドレンジ化)	・耐久性確保が必要 ・制御が複雑
機械式過給機(S/C) ＋ターボ	・過渡応答性の向上 ・低速トルクの増加	・パッケージングが複雑 ・エンジンの改造が必要 ・制御が複雑
電動コンプレッサ ＋ターボ	・運転性/過渡特性の向上 ・低速トルクの増加 ・高出力化	・高速モータ・インバータが必要 ・騒音問題 ・パッケージングが複雑 ・制御が複雑
可変 2 ステージターボ	・過渡応答性の向上 ・低速トルクの増加 ・高出力化	・パッケージングが複雑

過給方式	低速トルク (応答性)	定格出力	排出ガス	コスト	搭載性	技術課題
VG ターボ	0	0	0	0	0	0
可変コンプレッサ付き VG ターボ	＋	0	0	－	0	－－
機械式過給機(S/C) ＋ターボ	＋＋＋	0	0	－－	－－	－－
電動コンプレッサ ＋ターボ	＋＋＋	＋	＋	－－	－	－－
可変 2 ステージ ターボ 	＋＋	＋	＋	－	－	0

0 ： VG ターボがベース
＋ ： ベースに比べて有利
－ ： ベースに比べて不利

図1　可変過給システムの得失評価(VG ベース)

3. 可変2ステージターボの開発

3.1 作動原理及び制御方法

本論文で扱う可変2ステージターボとは，大小2つのターボを直列に配置し，低圧段タービン入口と排気マニフォールド間に設けた排気流量制御バルブ，高圧段コンプレッサ入口に設置したバイパスバルブを制御することで1ステージと2ステージの切替えが可能な過給システムである．エンジン低速時は高圧段ターボと低圧段ターボの2ステージ過給とし，エンジン回転数の上昇に伴い排気流量制御バルブを調整し，高圧段ターボの役割を減らして最終的に低圧段ターボのみの1ステージ過給となる作動原理である．

図2に可変2ステージターボの模式図を示す．可変2ステージターボの制御法として，モード1は，極低回転の領域において全ての制御バルブを閉める完全な2ステージ過給状態である．モード2は，エンジンの低・中回転領域において，コンプレッサのバイパスバルブとウエストゲートバ

ルブを閉めた状態で，低圧段タービンの入口に設けた排気流量制御バルブを調整する可変2ステージ領域である．モード3，モード4の場合は，排気流量制御バルブとコンプレッサバイパスバルブが開き，排気ガスが直接大型タービンに流入されることで，小型ターボはアイドリング状態になる．モード3は，エンジンの高回転領域で，コンプレッサ側のバイパスバルブと排気流量制御バルブを開いて低圧段のみの1ステージである．モード4は，さらに高回転領域において，モード3でもブースト圧の調整ができない場合，ウエストゲートバルブを制御する．

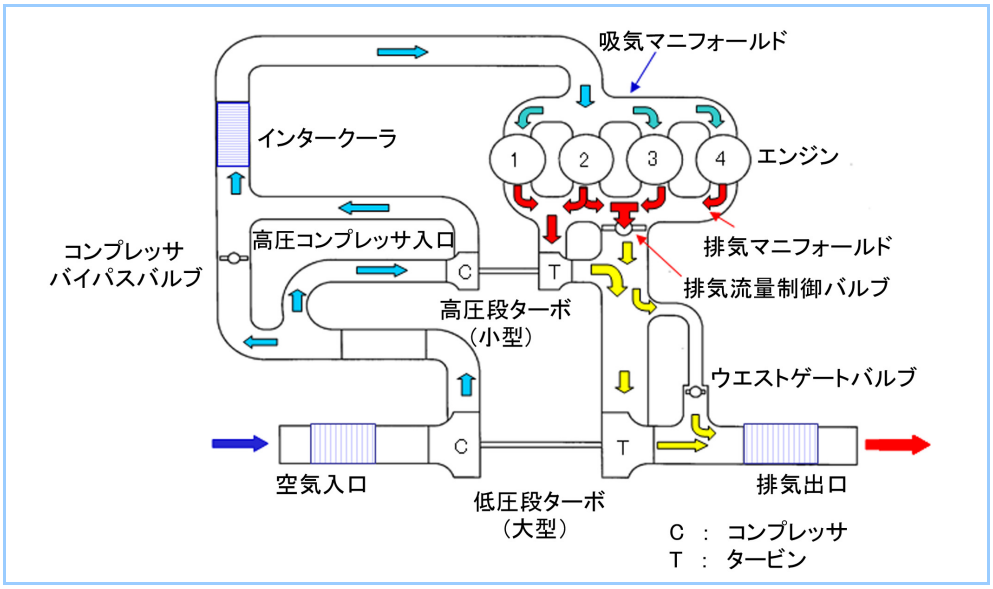


図2　可変2ステージターボの模式図

図3は可変2ステージターボのコンプレッサ作動マップを示す．　可変2ステージターボは高圧段，低圧段の2つのコンプレッサを使用することで，ワイドレンジ化が可能である．また，エンジン低・中速の領域では2ステージ，高速ではシングルステージのマッチングができ，マッチングの自由度が広がる．図4に可変2ステージターボの制御方法を示す．高圧段コンプレッサの小流量側と低圧段コンプレッサの大流量側のレンジを活用することで，コンプレッサの作動範囲を拡大することが可能になる．また，エンジン加速時では全ての排気ガスが直接小型タービンに流入し，過渡応答性の改善に大きく寄与する．エンジン高回転時には直接大型タービンを用い，適切なマッチングにより高出力の達成が可能となる．

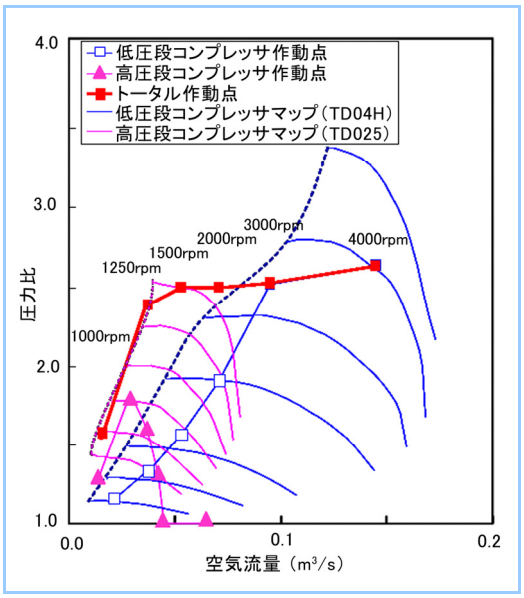
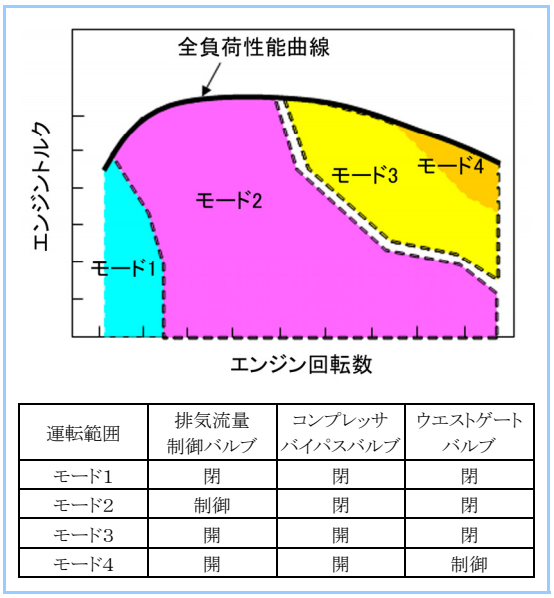


図3　可変2ステージターボのコンプレッサ作動マップ



運転範囲	排気流量制御バルブ	コンプレッサバイパスバルブ	ウエストゲートバルブ
モード1	閉	閉	閉
モード2	制御	閉	閉
モード3	開	開	閉
モード4	開	開	制御

図4　可変2ステージターボの制御方法

3.2 当社開発品の特徴

近年，エンジンの高出力化/高トルク化が進む中で，Euro5，Euro6向けの乗用ディーゼル車では 2.0L クラスのニーズが増えている．そこで，可変2ステージターボの開発に当たり，2.0L クラスエンジンに適用できるコンパクトな設計を行う必要がある．各要素部品の開発とともに，可変2ステージターボの大きな課題の一つである形状のコンパクト化，制御性の向上を目的とし，下記3つのポイントを実現すべく開発した．

(1) 可変2ステージターボの可変領域においての制御性を向上する．
(2) 高圧コンプレッサカバーにバイパス通路を設け，無駄なパイピングを排除する．
(3) 高圧タービンハウジングとバルブケースを一体化し，コンパクト化と組立性の向上を図る．

図5に可変2ステージシステムの開発ポイントを示す．開発のポイント①は排気流量制御バルブと着座リングの形状を球面とし，可変２ステージターボの可変領域において従来の ON/OFF バルブ制御からバルブの開度に対する排気流量の変化が緩慢なリニア制御を実現した．また，開発ポイント②は高圧コンプレッサカバーにバイパス通路を設け，ポペット駆動式のバイパスバルブを組み合わせた．この一体化により無駄なバイパス管を排除し，コンパクト化を実現した．開発ポイント③は，高圧段のタービンハウジングと排気流量制御バルブケースを一体化し，組立性の向上を図った．

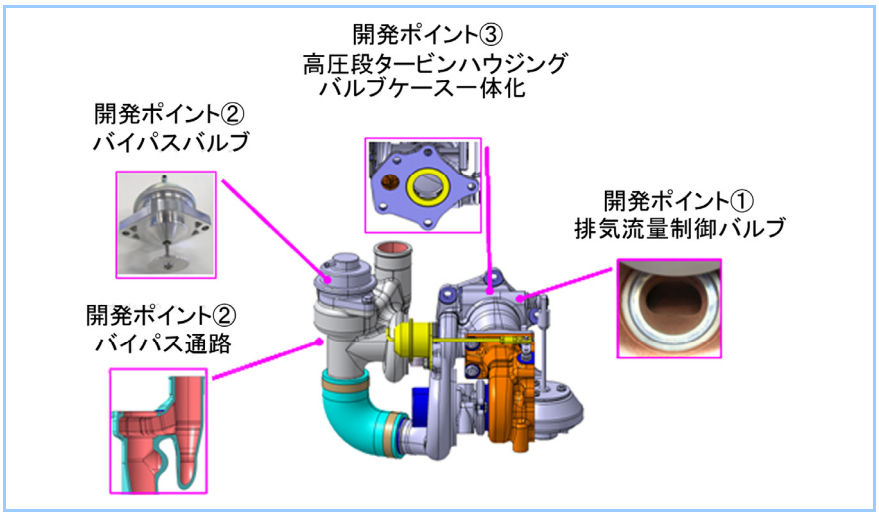


図5 可変2ステージターボ開発ポイント

3.3 エンジン性能と耐久評価

評価試験には 2.0L クラスの乗用ディーゼルエンジンを使用した．表2にエンジン及びターボの諸元を示す．図6には可変2ステージターボ付エンジン試験装置を示す．

表2 使用エンジン及びターボ諸元

エンジン仕様	2.0L クラスディーゼル	
最大トルク (N·m)	340 (@2000rpm)	
定格出力 (kW)	110 (@4000rpm)	
	高圧段ターボ	低圧段ターボ
ターボ仕様	TD025S	TD04H
ウエストゲートバルブ	なし	あり

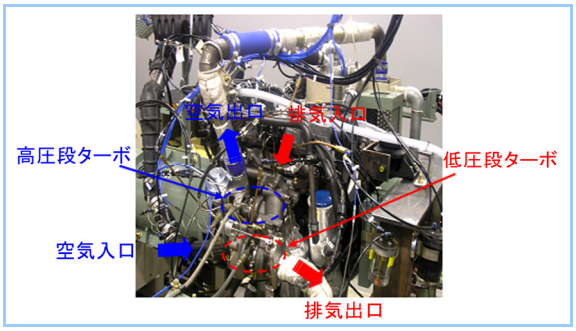


図6 可変 2 ステージターボ付きエンジン試験装置

供試機関はコモンレール噴射式の4気筒エンジンであり，高速側の出力は同等とし，どこまで低速トルクを向上させられるかを検証した．性能試験は，スロットル全開でエンジン回転数を 1000rpm から 4000rpm まで 250rpm 間隔で行った．試験の際には，排気流量制御バルブ，コン

プレッサバイパスバルブ，ウエストゲートバルブなどの3つのバルブを制御しながらエンジン性能及びターボ性能解析に必要な温度，圧力，回転数などのデータを取得した．制限条件として排気温度，圧力及び高圧段コンプレッサの出口温度，圧力の上限値を設けた．試験終了後，可変2ステージターボのエンジン性能解析及びベース VG ターボとの性能比較を実施した．図7にエンジン全負荷性能試験結果を示す．この試験結果から，可変2ステージターボはベース VG ターボに比べて極低速 1000rpm でトルク 56%の向上，1250rpm でトルク 45%向上が確認できた．また，エンジン回転数 2000rpm 以降の中高速においては ECU 側の制限もあり，その差は少ないが高速重視のマッチングにより高出力化も十分可能であると考える．図8に単体試験装置及び高温作動耐久試験後の駆動部の写真を示す．バルブ作動耐久条件は低温3秒，高温3秒を1サイクルとし，実機運転条件の想定で 30 万サイクルを実施した．作動耐久終了後，バルブ駆動部及びアクチュエータ部品には，特に問題ないことが確認できた．

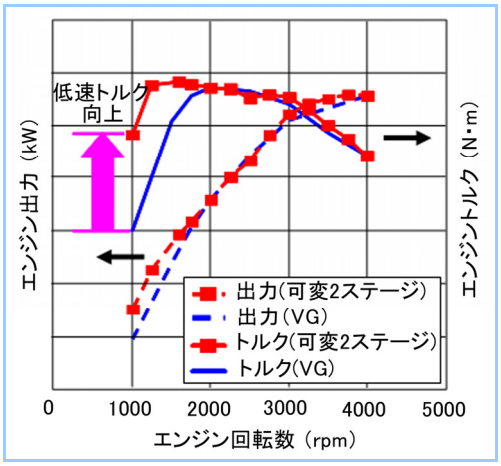


図7　全負荷性能試験結果

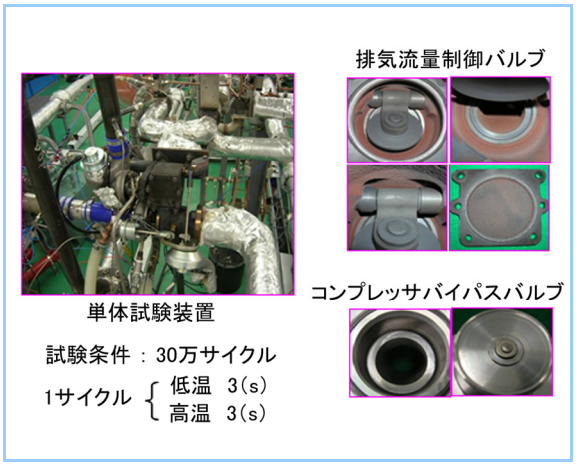


図8　単体試験装置及び作動耐久試験後の駆動部の写真

図9にはエンジン冷熱サイクル耐久後のターボの写真を示す．冷熱サイクル耐久条件は，アイドル5分，全負荷5分を1サイクルとし，実機の運転条件を想定して 1800 サイクル(300 時間)に決定した．耐久前後，性能及び機能面での不具合などは特にないことを確認した． 現在，客先にサンプルを供給し，量産化に向けて評価試験を実施中である．

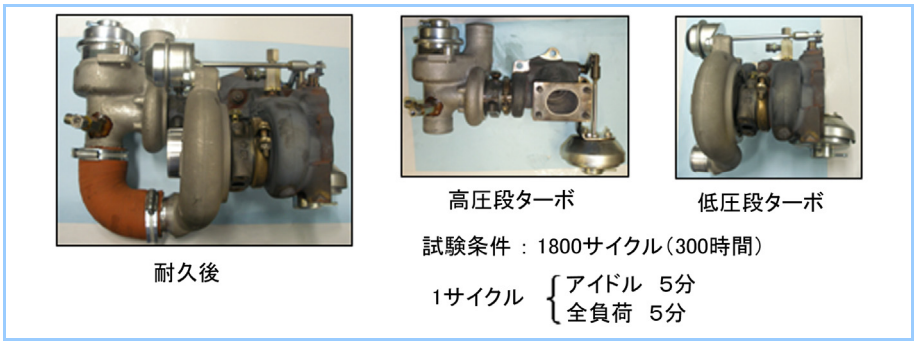


図9　エンジン冷熱サイクル耐久後の写真

4. まとめ

今後，一層厳しくなる排出ガス規制の中で，低速トルクアップと高出力化の両立，過渡応答性を満足できる有望な過給システムとして可変2ステージターボを開発した．他社との差別化可能な当社独自の設計技術を確立するとともに，2.0L クラスのディーゼルエンジン向け試作機での性能と耐久性を確認した．さらに，ほかの排気量向けにもバリエーション展開中である．

今後も技術開発のスピードを上げながら，お客様の要求に素早く的確に対応していくことで，三菱ターボの更なる製品力の向上に貢献していきたい．