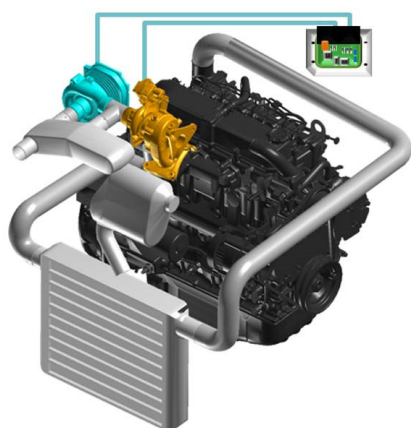


次世代過給システムを支える高速モデル予測制御技術

High Speed Model Predictive Control for Next Generation Turbocharging System



彌城 祐亮^{*1}
Yusuke Yashiro

ジワリヤウェート ウィツター^{*2}
Vissuta Jiwariyavej

山下 幸生^{*3}
Yukio Yamashita

星 徹^{*4}
Toru Hoshi

寺門 貴芳^{*5}
Kiyoshi Terakado

茨木 誠一^{*6}
Seiichi Ibaraki

近年普及が進む過給エンジンにおいて、2ステージターボに代表される過給システムの複雑化に対応した制御が課題になっている。本稿ではこの課題に対処するために開発した高速最適制御手法について説明する。エンジン・ターボモデルを内包して予測計算を行うモデル予測制御を採用し、さらにアルゴリズムを改良してリアルタイム制御を達成した。本手法を適用した自動車用過給エンジンにおいて、従来システム比で約 50%速い過給圧レスポンスが可能なことをシミュレーションで示した。また、社内エンジンを使用して制御基本動作を確認した。今後は電動2ステージターボなど、次世代製品に積極的に導入を目指す。

1. はじめに

近年乗用車用エンジンにおいて“ダウンサイジングコンセプト”がトレンドとなり、タービンとコンプレッサで構成されるターボを搭載したエンジンが増え続け、競争が激化、ますますの性能向上が要求されている。ターボ側の取り組みとしては、可変ノズルを設けた VG (Variable Geometry) ターボや、2個のターボとバイパスバルブを組み合わせた2ステージターボ等の複雑過給システムが市場投入されている。さらに次世代製品として、タービンの代わりに電動モータで駆動する電動コンプレッサの検討も進んでいる⁽¹⁾。今後過給システムのより一層の複雑化に起因するシステム内の制御箇所増加は避けられない。そこで、複数の制御箇所を同時に最適制御する、モデル予測制御 (Model Predictive Control : MPC) によるターボ制御手法を開発した。本手法は高速演算可能なモデルを内包することで最適化計算を高速化するもので、これにより複雑過給システムのリアルタイム制御を実現、従来ターボに対しては 30%以上のレスポンス改善が可能となる。また本手法はターボを制御するだけではなく、GT-Power®(*1) 等に代表されるエンジンシミュレーションや、リアルタイム計算が可能な高速演算モデルと併用して、お客様のエンジンに最適なターボを迅速に選定することも可能とする。本稿では、MPC の概要とその適用プロセス、シミュレーションと試験による制御性能の検証結果を紹介する。

*1 自動車業界で広く用いられるエンジン性能計算シミュレーションソフトウェア

*1 ICT ソリューション本部システム技術開発部

*2 総合研究所電気・応用物理研究部

*3 総合研究所電気・応用物理研究部 主席研究員 技術士(電気電子部門)

*4 総合研究所流体研究部

*5 総合研究所燃焼研究部 技術士(機械部門)

*6 総合研究所 主席プロジェクト統括 工博, 技術士(機械部門)

2. 複雑過給システム

本稿で取り扱う2種類のシステムを図1, 2に示す。図1の2ステージ VG ターボは可変ノズルを持つ VG ターボを大小2つ備える。可変ノズル2箇所と、1段過給と2段過給を切り替えるためのバイパスバルブ2つの、計4箇所の制御箇所を持つ。一方、図2の電動2ステージターボは、片方のターボを電動コンプレッサに置き換えたもので、排気ガスにより受動的に回転するターボと異なり、モータによって任意のタイミングで駆動することができる。2ステージ VG ターボよりもレスポンスに優れた次世代製品であるが、可変ノズル1箇所、電動モータのトルクとバイパスバルブ1つの、計3箇所の制御箇所を制御する必要がある。

いずれのシステムも、そのポテンシャルを最大化するためには、複数の制御箇所を適切に制御する必要があり、お客様であるエンジンメーカ、自動車メーカのエンジンシステム検討段階で、最適制御能力を含めてターボを評価頂きたいと考えている。お客様の開発スピードにマッチすべく開発した、ターボ選定・制御シミュレーション技術を次節以降で説明する。

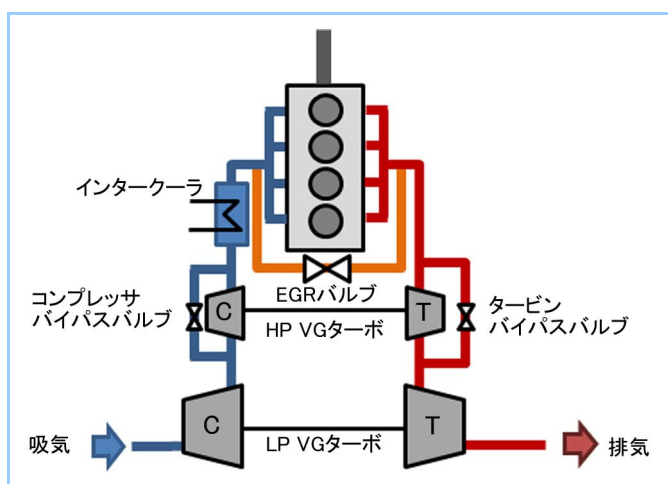


図1 2ステージ VG ターボの構成図

2つのVGターボを搭載し、バイパスバルブを組み合わせたレイアウトを示している。

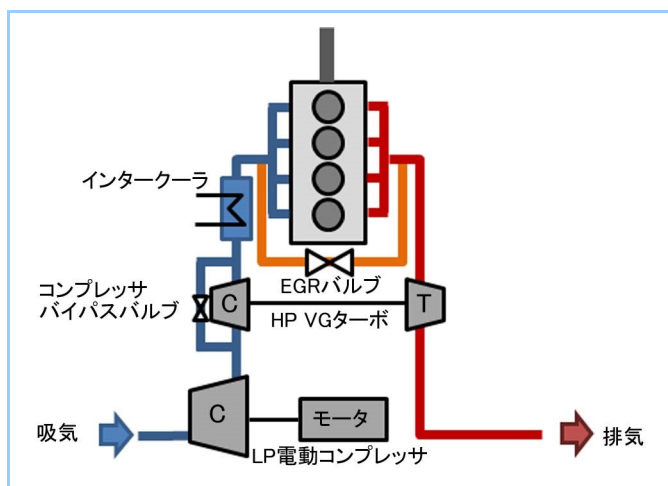


図2 電動2ステージターボの構成図

低圧段が電動コンプレッサとなり、モータで駆動するためタービンがなくなっていることを示している。

3. モデル予測制御(MPC)のターボ制御への適用

図3に、MPC を用いたターボ制御ロジックの構成図を示す。MPC には、エンジンの吸排気管各部で計測した物理量と、目標となる過給圧指令値をインプットとして与える必要がある。MPC は与えられたインプットを現在時刻の初期値として、内包したモデルにより未来時刻の物理量の予測計算を行う。予測計算した物理量と評価関数による最適化計算の結果、最適となる入力列が生

成され、これを各制御箇所の実際の制御入力(操作量)として出力する。各制御周期で最適化計算を要する MPC は演算負荷が高く、実機適用が難しい課題があったが、本手法では、内包するモデルに高速演算可能な平均値モデル (Mean Value Engine Model, MVEM) を使用することで、最適化計算を行いながらのリアルタイムでの制御と実機適用を可能とした。

本手法を採用するメリットとして、各制御箇所の個別チューニングによる個別最適化ではなく、システム全体を一括で調整する全体最適化が可能な点、最適化計算時に使用する制約条件により、設計限界値超過等のリスクをあらかじめ回避できる点が挙げられる。これらのメリットにより、複雑化する過給システムのポテンシャルを最大化して性能比較することが可能になり、お客様へ迅速かつ正確に過給システムを提案できるようになった。

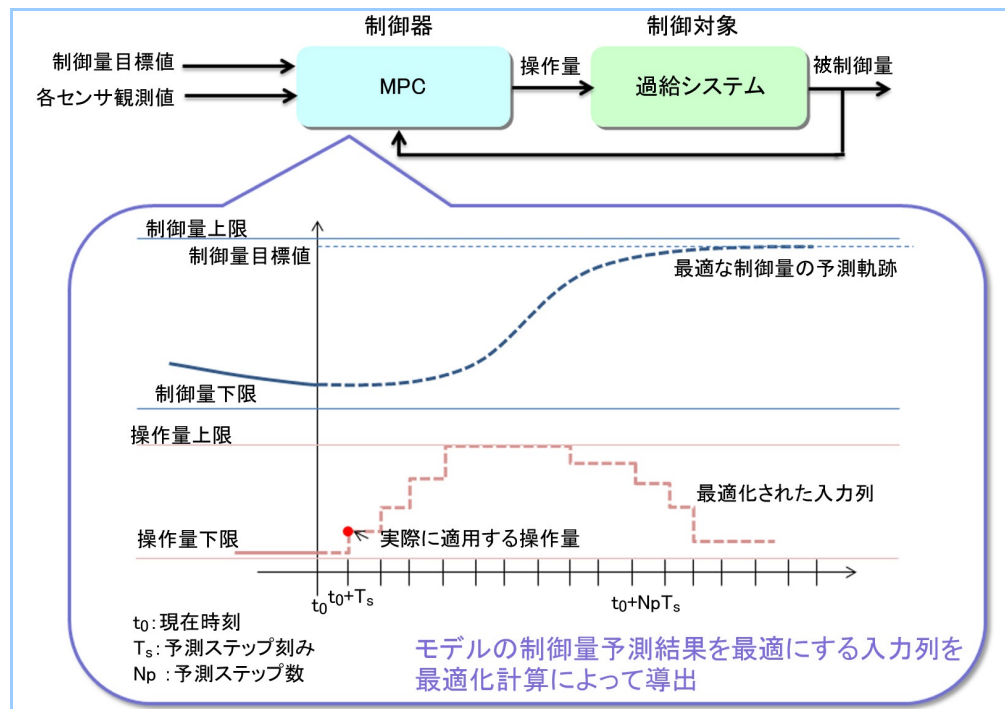


図3 MPCを使用したターボ制御

MPC が内部でどのような計算を実施しているのかを示している。

4. 検証結果

4.1 シミュレーション検証

MPC の過給レスポンス向上効果の検証のため、2.0L ディーゼルエンジンの MVEM を用いた、3速チップイン動作シミュレーションを実施した。図4に、シミュレータのブロック構成を示す。シミュレーションでは、制御対象のエンジンも MVEM でモデル化し、制御を含むシミュレーション全体をリアルタイムで実行可能とした。その結果、ターボチャージャの製品ラインアップから最適なターボを迅速に選ぶことができる。市販の詳細なエンジンモデルを用いたシミュレータに対して、MVEM と MPC を用いた場合は約 1200 倍の速さで計算が完了する。

他に、シミュレータには車両重量・ギア比などから構成された車両モデルを含み、3速ギア固定でエンジントルク目標値をステップ上に増加させる、3速チップイン動作でエンジンに要求されるトルクや、結果として生じるエンジン回転数変化を、動特性を考慮して評価可能とした。

図5にシミュレーション結果を示す。単段 VG に対して、2ステージ VG ターボでは約 30%、電動 2ステージターボでは約 50%の過給圧レスポンス時間短縮が可能となる。2ステージ VG ターボは高圧段に小型 VG ターボが追加され、これも MPC によって最適に制御されるため、単段 VG に対して優れた過給圧レスポンスを持つ。さらに電動2ステージターボでは、排気ガスによらない電動コンプレッサの回転数立ち上がりにより、2ステージ VG ターボを上回る過給圧レスポンスを実現できる。

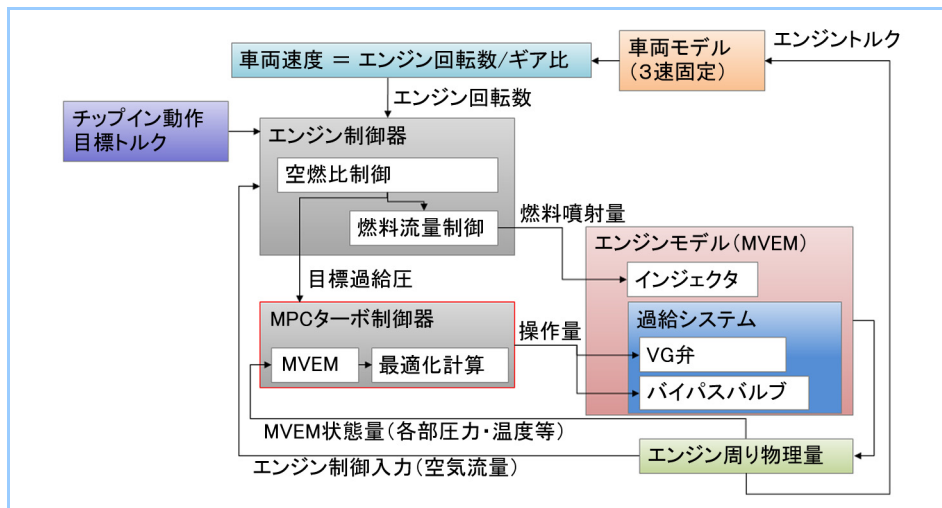


図4 シミュレータのブロック構成

本稿で扱う制御手法が、シミュレータ全体のどこに位置づけられるかを示している。

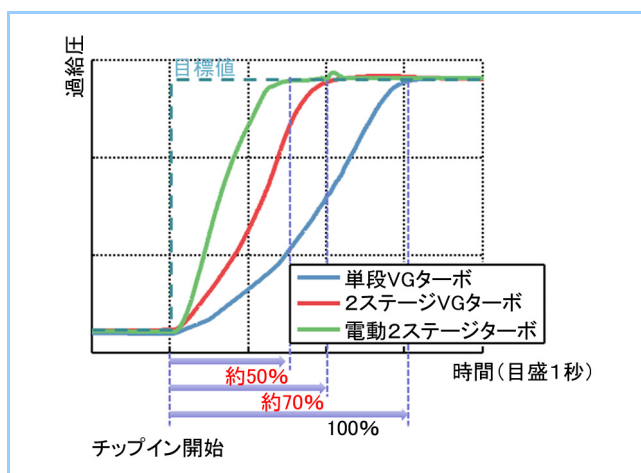


図5 3速チップインシミュレーション結果

従来の単段VGに比べて、本稿で扱った2システムがどれほどレスポンス改善効果を持つかを示している。

4.2 建機向け小型エンジンへの展開試験検証

MPCの実機での検証を行うため、エンジンベンチ試験を実施した。図6に試験設備の概要を示す。試験では、乗用車と同様に排出ガス低減が要求されている建機向け2.2Lディーゼルエンジンに2ステージVGターボを搭載した。ターボ実機の制御には、シミュレーションに使用した制御プログラムを直接実機に組み込み可能な、ラピッドプロトタイプコントローラを使用した。3節で記載の通り、組み込む制御プログラムは、MVEMによってリアルタイム計算を可能としており、試験に十分な演算速度を実現している。

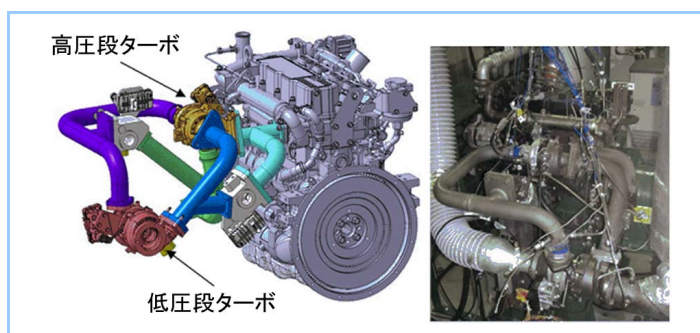


図6 試験設備と使用したエンジン図

実際に試験で使用した設備の写真と、3DCAD図を示す。

図7に試験結果を示す。負荷上げ時の回転数一定制御において、2ステージ VG ターボと MPC を適用した場合、定常燃費性能を最良とする VG 開度を並べた VG 開度マップを用いた制御に対して、約 50%の時間で目標回転数に復帰することを確認した。このときの2つの可変ノズルの制御動作を図8に示す。過給圧を上げるために、MPC により可変ノズルを最適な開度まで閉め、エンジン回転数を最短時間で復帰させている。

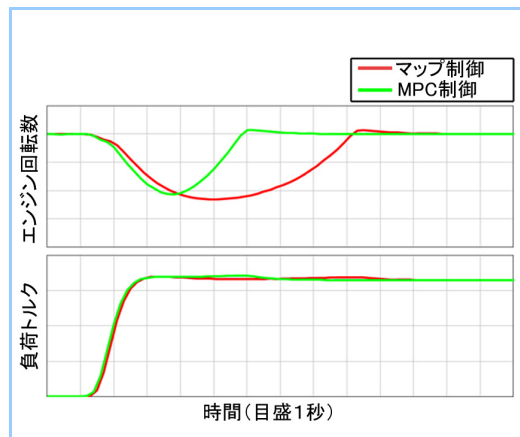


図7 実機試験結果(エンジン回転数, トルク)
実エンジンを用いた試験結果のうち、回転数とトルクの挙動を示している。負荷が上がることで一時的に回転数が落ちるが、その後復帰する時間が、制御手法で異なることがわかる。

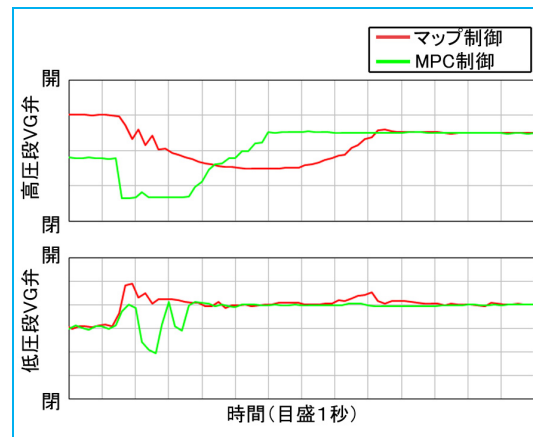


図8 実機試験結果(高圧段 VG, 低圧段 VG の制御動作)
実エンジンを用いた試験結果のうち、2つの VG の制御動作を示している。MPC と、比較相手のマップ制御の制御動作の違いを見て取れる。

5. まとめ

制御動作を含めた複雑過給システム提案のために、高速演算可能な MVEM と MPC を併用した最適制御手法を開発した。性能検証として2ステージ VG ターボ、電動2ステージターボを含むモデルでシミュレーションを行い、レスポンスの大幅改善を確認した。また建機向け小型エンジンでの実機試験において、基本的な制御動作の確認と、レスポンス向上を実現した。

本手法により、お客様のエンジンに対して最適な過給システムとその制御アイデアを提案可能となり、今後ますます複雑化するエンジンシステム開発に対して貢献できる。本稿で扱ったレスポンス以外にも、燃費や排出ガス等、他の最適化指標への対応を推進し、お客様のニーズにお応えできる提案能力を高めていきたい。また、ターボチャージャー以外の製品への適用による製品競争力向上にもつなげていきたい。

尚、本制御手法はケンブリッジ大学(イギリス)と共同開発したものであり、同大学で協力いただいた Nick Collings 名誉教授, Keith Glover 名誉教授, Paul Dickinson 博士に謝意を表す。

参考文献

- (1) 安 乗一ほか, 自動車向け電動2ステージターボシステムの開発, 三菱重工技報 Vol.52 No.1 (2015) p.76~81
- (2) Yashiro, Y. et al., Development of Model Predictive Control for Two-Stage Turbocharging System, 20th Supercharging Conference 2015 paper, p.267~288 (2015)
- (3) Paul, D. et al., On-Engine Validation of Mean Value Models for IC Engine Air-Path Control and Evaluation, The 19th IFAC World Congress paper, (2014)