油圧駆動式電子制御噴射システム (KOMPICS-II) の開発*

平木彦三郎** ・ 里見 裕***
佐藤文秀*** ・ 木沢宏史***

Development of a Hydraulic Powered Electronic Control
Fuel Injection System (KOMPICS-II)

By Hikosaburo Hiraki, Yu Satomi, Fumihide Sato, Hirofumi Kizawa

The electronically controlled high pressure injection system (KOMPICS) for heavy duty diesel engines was developed at Komatsu Ltd. in 1981. Although it was an innovation in the concept that both fuel quantity and injection timing were controlled electronically by solenoid valves, its complicated fuel lines needed improvements. The authors have developed the new hydraulically driven fuel injection system, KOMPICS-II, which has simplified fuel lines, still retains the abilities of high injection pressure and wide range of variable injection timing. This paper describes the experimental investigation of fuel pump characteristics of KOMPICS-II and its effect on the performance of diesel engines.

1. ま え が き

これまでの噴射系への要求として、燃焼改善によりディーゼルエンジンの燃料消費率低減ならびに排気対策を施すことを目的として多くの試みがなされてきた。しかし、最近のエレクトロニクスの進歩につれ噴射システムの基本パラメータである噴射量と噴射タイミングが自由にコントロールできるようになると共に、噴射系への要求はもっと幅広いものとなってきた。例えば車両のトルコン・トランスミッション等のパワーラインとの同時制御とか、環境条件の変化に対応した最適制御とか、あるいは操作機器の自動化等においても噴射系が、その一端の役割を果たすことによってシステム全体の効率や使いやすさが、大幅に改善されることがわかってきた。こうした状況のもとに小松製作所は、1981年に重負荷ディーゼルエンジン用電子制御式高圧噴射システム (KOMPICS) を開発した¹⁾。

KOMPICSは、調量および噴射タイミング制御とともに、ソレノイドバルブを用いて制御しようとするものであり噴射システムとしてのフレキシビリティに富んだ点では画期的なものであった。しかし、そのフレキシビリティが逆にそれぞれの配管を独立に存在させることになり、ヘッドまわりの配管類の複雑さの故、中小形エンジンへの適用には問題が残った。筆者らは、これら配管

類を簡略化する目的で噴射工程と調量工程を切り替えるロータリーバルブを用いたKOMPICS-IIの開発に着手した。機能としては、これまでのKOMPICSの優れた面（全域で高い噴射圧と広い噴射タイミング作動角）をそのまま残し、搭載面での配管を大幅に削減することをねらっている。開発されたKOMPICS-IIは単体の噴射圧特性テスト、単筒エンジンでの燃焼テスト、多気筒エンジンでの性能テストおよび当社の製品であるダンプトラックを使っている車載テストを実施してきた。特に車載テストでは、車両側のニーズに基づいて、他のコンポーネントと情報交換をしながら、最適制御を行う、いわゆるトータル制御の考えを織り込んだテストも実施中であり、ここにKOMPICS-IIの開発のねらいと結果を報告する。

2. 噴射系への要求品質

図1に噴射系への要求品質をまとめた。

二つの大きな噴射系への要求特性があり、一つは高圧化であり、もう一つは電子化である。噴射の能力としてはできるだけ高い噴射圧を得られるに越したことはないが、キャビテーション・エロージョンその他機械的摩擦等からくる制約とポンプ駆動馬力の増大からある程度の噴射圧でマッチングさせることになる。噴霧のペネトレーションのピストンキャビティに対する比を一定（0.8程度がベスト）にするという観点で各ボア径に対する、噴射圧力を求めると図2のようになり、ボア径が大きくなるに従って要求噴射圧も高くなる。

低速時での噴射圧については、熱効率よりもむしろス

* 原稿受付 昭和62年2月14日

第22回特別基金講演（昭和61年11月25日）

** 正会員 小松製作所（石川県小松市符津町1-23）

*** 小松製作所（栃木県小山市横倉新田400）

図1 噴射系への要求品質・機能展開

図2 ボア径に対する要求噴射圧特性

モーク限界により決定されるべきである。これについては後述するが、KOMPICS-IIの単簡テスト結果より約1000 kg/cm²の噴射圧では理論空燃比近くまでスモークがでない。加速時も含めて低速で1000 kg/cm²程度の噴射圧があれば、理想的である。電子化では噴射タイミングに関して回転速度のパラメータのみならず負荷に対しても制御できるようにすることまた、始動時、加速時における制御も考慮すると早い応答性が必要である。以上のような観点のもとにKOMPICS-IIの主要諸元を表1にまとめた。

3. KOMPICS-II システム概要

第3回にKOMPICS-IIの基本機能を示した。高圧ポンプで昇圧された高圧の作動油（燃料油）はいったんアキュムレータ内に貯えられる。（175 kg/cm²）

表1 KOMPICS-II 主要スペック

No	項目	諸元値
1	対象エンジン	SAGD170 総排気量 23 L (6-φ170mm ×170mm)
2	最大噴射量	400 mg/shot
3	定格噴射圧	1200 kg/cm ² (117.6 MPa)
4	低速噴射圧(1000rpm)	800 kg/cm ² (78MPa)以上
5	噴射時期制御範囲	36° C.A
6	噴射時期制御応答性	全ストローク 1sec 以内

図3 KOMPICS-II 機能図

噴射は、いったん貯えられた作動油が、ロータリーバルブを介して各気筒へ送られるとインジェクタ内のばねに付勢された増圧ピストンに押し勝って押し下げ、おおよそ増圧比（6：1）だけ昇圧され噴射が行われる。

◇調量機能 まず、噴射終了時期はインジェクタ内プランジャのスピル穴がボディ側のスピル穴と重なった時点できまるから、次の燃料噴射量はピストンおよび、プランジャがどこまで戻るかによって決定される。

このピストンの戻る位置はピストン背面に設けられたばねとピストン上面の油圧力によって決められる。なおピストン上面の圧力のコントロール法については、ロータリーバルブによって、調量側のラインに切り替えられると下流側に設けられた、可変オリフィスによって圧力が設定され、したがって噴射量が決められる。調量バルブとしては直動型のスプール弁、アクチュエータとしてリニアソレノイドを、また位置センサーとして差動トランス（LVDT）を使用した。（図4）

◇タイミングコントロール機能 噴射システムにおけるもう一つの重要なパラメータである噴射タイミングについては、ロータリーバルブを駆動する入力軸で、その位相を変更するヘリカルギアを持ったギアトレインで

図4 調量バルブASS' Y図

コントロールしている。

4. アキュムレータ型増圧式インジェクタの噴射特性

最高噴射圧はディーゼルエンジンの燃焼特性に影響を与える因子の一つである。燃料噴射装置の設計に当って作動油圧、ノズル噴孔面積、プランジャ径、増圧比、送油管長を決定する必要がある。したがって、これらの形状寸法と最高噴射圧力との関係を調査した。

図5にその結果を示す。縦軸は（作動油圧×増圧比）で最高噴射圧力を規格化したものである。横軸は、二つの概念から成立っている。一つは、プランジャの送油速度と、その時ノズルの孔を通過する燃料速度との比である。他は、噴射される燃料の質量とそれを噴射するために動かさなければならない燃料以外の質量との比である。図中の半理論式は、次のようにして求める事ができる。

1) 最高噴射圧力は、ノズル流出速度とプランジャ速

度が釣合った時である。

$$A_n U_n = A_{pl} \cdot U_{pl}$$

A_n : ノズルチップの噴孔総面積

U_n : ノズル流出速度

A_{pl} : プランジャ面積

U_{pl} : プランジャ速度

2) ベルヌーイの定理が成立すると仮定すると

$$P_{max} = 1 / 2 \rho U_n^2$$

P_{max} : 最高噴射圧力

ρ : 燃料密度

3) ピストンプランジャ送油管内の質量を作動油が押すと仮定した運動方程式

$$M_t U_{pl} = P_o A_{ps} - P_i A_{pl}$$

P_o : 作動油圧

P_i : 噴射圧力

ここで

$$M_t = M_{ps \cdot pl} + \rho L A_{pipe} \left(\frac{A_{ps}}{A_{pipe}} \right)^2$$

$M_{ps \cdot pl}$: ピストンとプランジャの質量

L : 送油管長さ

A_{pipe} : 送油管断面積

A_{ps} : ピストンの面積

4) 1ショット当りの噴射量

$$M_f = \int_0^t A_{pl} \cdot U_{pl} dt$$

5) 噴射圧力パターンの仮定

代表例を図6に示す。これは、油圧系の過渡状態を解いて求まるが複雑なので簡単のため観察した噴射圧力パターンを仮定する。

3) 4) 5) より最高プランジャ速度を噴射量、プランジャ径、増圧比、送油管長、管径に関係づけ、ノズル噴孔総面積に関係づけられよい。上記で求めた関係式が示すこの燃料噴射装置の噴射特性は、

① 増圧比が第1要因であるが、作動油圧×増圧

図5 アキュムレータ型噴射システムの噴射特性

図6 KOMPICS-IIの噴射圧特性

比が最高噴射圧力になるわけではない。

②①の理由は、ある燃料量を噴射するために移動させなければならない質量が付随しており、それを加速する間に噴射が終了するからである。

③ $P_{max}/\{(A_{ps}/A_{pl}) \cdot P_o\}$ が1以上になるのは、送油中に作動油全圧が大きくなるためである。

5. KOMPICS-IIの調量精度の検定

新しい噴射システムを開発する上で、重要なチェックパラメータとして、噴射システムがどの程度正確な調量能力を、持っているかを検定する必要がある。3項で説明した通り、KOMPICS-IIシステムでは噴射後インジェクタおよび配管に貯まった高压の作動油（175 kg/cm²）が、ロータリーバルブによって調量用圧力室（2～6 kg/cm²）に瞬時に切り替ると調量用圧力が乱されて、すでに調量過程に入っていた他気筒の調量に影響がでてしまう。

図7 KOMPICS-II調量メカニズム

図7に調量過程のメカニズムを示した。油圧とプランジャーのばね力のバランスによってきまるこのシステムでは、この調量の圧力をいかに安定させるかが、システムのキーであった。筆者らが、このシステムに着手したころ高压の作動油が調量室に流れ込んで、噴射のショット間のバラツキが大きくエンジン回転の安定性も十分に得られなかった。次に改善案として実施したのが、噴射後調量室に接続される前にいったん別の回路につながり、この回路内に設けられた定圧弁（約30 kg/cm²）にて、比較的低い圧力まで下げておいた後に、調量室につながるようにした。調量精度の改善効果を確認するため、ピストン上面にホール素子を貼り定常状態におけるピストン戻り位置のバラツキを測定した。図8に改善前後のピストン挙動を示したが、改善前に噴射量で±4.3%のショット間バラツキのあったものが、±0.3%まで押さえられている。図9に、改善後のレギュレーションの例を示す。

図8 改良前後のピストン挙動

図9 レギュレーション特性

6. 単筒エンジンでの性能試験

KOMPICS-IIシステムの燃焼特性試験を単筒エンジンを用いて実施した。単筒エンジンの諸元を、表2に示す。一般に燃料噴射圧力を高くする事は排気ガス中の有害物質低減に効果があると言われている。それを定量的に把握するために、定格出力点での、NO_xと燃料消費率、NO_xとスモークとの関係を、燃料噴射圧力と噴射タイミングをパラメータとして測定した。

また、過給機付エンジンでは、空気不足により低速高負荷域でスモーク排出特性が悪化するので、それに与える噴射圧の影響を測定した。

図10は、定格出力点のNO_x排出量と燃費との関係であ

表2 性能試験に用いた単筒エンジン

ボア×ストローク	φ170mm×170mm
圧縮比	13.9
スワール比	1.4
アスピレーション	T・Aをシミュレート

る、噴射圧力の高低にかかわらず噴射時期を進める事によって燃費は改善されるが、 NO_x 排出量が増すという傾向がある。しかし、 NO_x 排出量に制限を加えた場合高い噴射圧の方が良い燃費で、運転できるという結果を得た。

図10 燃費率に対する NO_x 排出濃度

図11は、定格出力点での NO_x 排出量とスモークとの関係である。噴射時期に関しては NO_x 低減の方向とスモーク低減の方向が逆になる事は、良く知られた事実である。したがって、 NO_x 排出量とスモークを両方押さえるためには、妥協点としての最適噴射時期が存在するが今回の試験の結果では噴射圧を高くする事によって、 NO_x の排出量を少なくする噴射時期を選べば良い事がわかった。

図11 NO_x 排出濃度と汚染度との関係

図12は、噴射時期を固定した場合の特性である。噴射圧 1150 kg/cm^2 では $A/F 16.5$ でもスモーク 0% で運転できる事を示している。以上をまとめると、高圧噴射にする事により定格出力点では、 NO_x 排出を押さえる噴射時期を選んでも燃費スモークを悪化させずに済み、低速域では低い空燃費でも、スモークを出さずに運転で

きる事がわかった。

図12. A/F に対する汚染度の関係

7. 多気筒エンジンでの性能テスト

供試エンジンの諸元を表3に、またKOMPICS-IIシステムのエンジン搭載図を図13に示す。

KOMPICS-IIシステムの特長は、低速での高圧噴射(図14参照)と広作動域電子タイマを持つ事である。

表3 6気筒エンジン諸元

型式	縦型・直列・水冷
気筒数・寸法	6-170mm×170mm
燃焼室形式	直接噴射式
アスピレーション	T・A
定格出力/回転速度	740PS/2100rpm

図13 KOMPICS-II 搭載エンジン

このため、エンジンの全作動域での燃費低減と、排気色改善が可能となり、定格出力点燃費で現行ジャークポンプ付に対し、 3 g/PSh 、トルク点燃費で 5 g/PSh 低減が達成された。(図15) また、排気色についても使用域に汚染度10%以上の領域をなくす事ができた。(図16) これは、逆に現行ポンプ付と同一排気色まで許容するとすれば、低速トルクを現行に比べ30~50%向上させ得る事を示している。

図14 KOMPICS-IIの噴射特性

図15 KOMPICS-IIの燃費特性

8. 車載テスト

上記システムのメリット確認のため、現在当社のダンプトラック (HD465) にて走行テストを実施中である (図17)

9. まとめ

以上、筆者らが開発してきたアキュムレータ型増圧式噴射システム (KOMPICS-II) の構造・機能および

図16 KOMPICS-IIの汚染度特性

図17 車載テスト

性能について述べてきたが、本システムにより以下の有効性が確認された。すなわち

- (1) 全使用域での高い噴射圧力により全域で燃費低減と排気色低減が達成できた。
- (2) 特に低速域での高圧噴射により、スモーク限界を拡大することができ、大幅な低速性能向上をはかることが出来た。
- (3) さらに、広作動域電子制御タイマにより加速性向上および高トルクライズセットが可能となった。

なお、本システムとしては量産化にあたって残された問題として製造コスト低減があり、今後詰めていく必要がある

文 献

- 1) Komiyama, K. al, "Electronically Controlled High Pressure Injection System for Heavy Duty Diesel Engine -KOMPICS-", SAE Paper 810997

〔質 疑 応 答〕

質問者 鉄道総合技術研究所 永瀬和彦

〔質問〕 従来機関にそのまま適用可能なシステムを開発されたことに敬意を表します。2点お伺いします。

1. ロータリーバルブ～噴射弁の間の噴射管の長さにより、管内に衝撃波が生じたり不整噴射が生ずることはないか。また、あるとすれば、どのような対策を行っておられるのか？

2. クラッチ接続時の入出力軸回転数の同期を行うに際しての、機関回転数の制御方法（例えば、比例、微分制御の導入など）をどのように行っておられるのか、接続時の差速はどの程度か？

〔回答〕

1. 衝撃波は噴射終了時インジェクタ内の増圧ピストンが急激に止められることによって発生する。そのピーク圧は作動圧（ 175 kg/cm^2 ）の2倍以上にも達し、機

器の信頼性・耐久性上好ましくない。対象としては増圧ピストンが着座時ごく少量の液体を増圧ピストン背後に封じ込めさせてダンピング効果をねらったことと、やはり着座時、オリフィスより高圧側からドレイン側に作動油をもれるようにした、衝撃波を完全に消すことはできないが、作動圧の1.5倍程度にまで押えられる。

不整噴射の対策については本文中にも述べたとおり調量用圧力を安定させるために種々の対策を実施した。対策の結果、噴射管の長さにより調量の安定性が影響を受けることはない。

2. クラッチ接続時の入出力回転速度の同期化については比例、微分などの制御は行っていない。約0.4秒程度の時間しかないため完全な同期は無理である。特にシフトアップ時のエンジン下げる側はたとえ無噴射にしても同期させるためには1秒程度かかる。オープンループで決められた時間、最大又は無噴射にしているだけである。