# PS-30　電子制御機関筒内ガス交換に関する研究

環境・エネルギー領域　大気環境保全研究グループ　　＊石村恵以子、張潔、高杉喜雄、菅進

## 1．はじめに

当所ではディーゼル機関の電子制御化により、大気汚染物質および燃料消費率の同時低減を目指してきた。燃料噴射系の電子制御化では限られた範囲であるが同時低減が可能であることを実証した。それに続く吸排気弁系でも、いくつかの範囲で同時低減が可能なことが分かった。しかし、これらの範囲を組み合わせて相乗的に同時低減をはかることは難しい。従って、電子制御化の特長を引き出すためには同時低減のメカニズムを明らかにし対処する必要がある。本報告では筒内ガス交換がこのメカニズムの重要な要素であると考え、電子制御化に伴う実験結果に対し種々検討を行ってきたが、それらの中で代表的な方法について報告する。

## 2．今までの経過

本実験に使用された機関はマツイ鉄工所Mu323型ディーゼル機関であるが、燃料噴射系および吸排気弁系の電子制御化により、現在までに着火時期および吸排気弁開閉時期をそれぞれ単独で図1に示すような範囲で実験を行ってきた。この実験から、燃料消費率とNOxの同時に低減する範囲、燃料消費率は低減するがNOxは増加する範囲、あるいはその逆の範囲があることが分かった。

しかし、これに続く着火時期および吸排気弁開閉時期を組み合わせた実験、即ち、単独では同時低減が行われる着火時期の遅延とオーバラップ短縮の組み合わせでは相乗効果が得られなかった。これは着火時期を遅らせると燃焼速度が増加するに対して、オーバラップの短縮では内部EGR効果が高まるため燃焼速度が低下するので両者の関係が逆になり、相乗効果が得られなかったと考えられる。

この着火時期あるいは吸排気弁開閉時期の変更とは別に、電子制御化そのものがNOxあるいは燃料消費率の低減に影響を与える。それは電子制御により弁の揚程曲線の形状は変化し、また、弁速度にも変化が起こり、これらが筒内ガス交換に影響し、更に燃焼へ関係し、NOxおよび燃料消費率に影響を与え

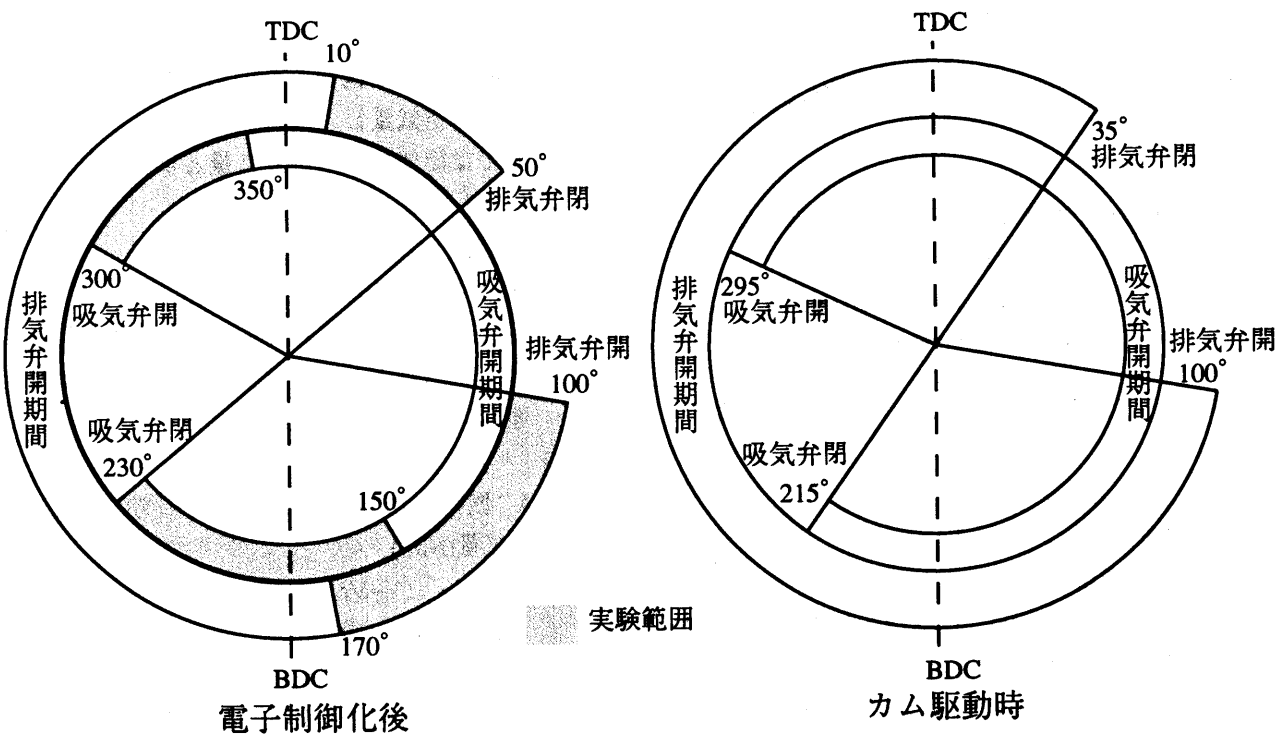


図1．弁線図

たこと考えられる。

## 3．筒内のガス交換についての検討および今後の計画

### 3．1．排気弁開時期における残留ガス量からの検討

これまで吸排気弁系電子制御化後の筒内ガス交換に関係して、排気弁開閉時期の変更により、予想を超える燃料消費率の向上があった。排気弁開時期は有効仕事とポンプ仕事に関係することから以下のような検討を行った。

カム駆動時と電子制御化後の排気弁開時期(EO)における筒内圧降下は 図2 に示すようにカム駆動の方が急激であり、電子制御の方が緩やかである。これは弁速度から考えると、一見、矛盾するが、ピストンは下死点（BDC）へと向かう影響と考えられる。

ここでは理想気体の可逆変化の関係式（1）を用いて筒内残留ガス量を求め、有効仕事とポンプ仕事への係わりを推定した。

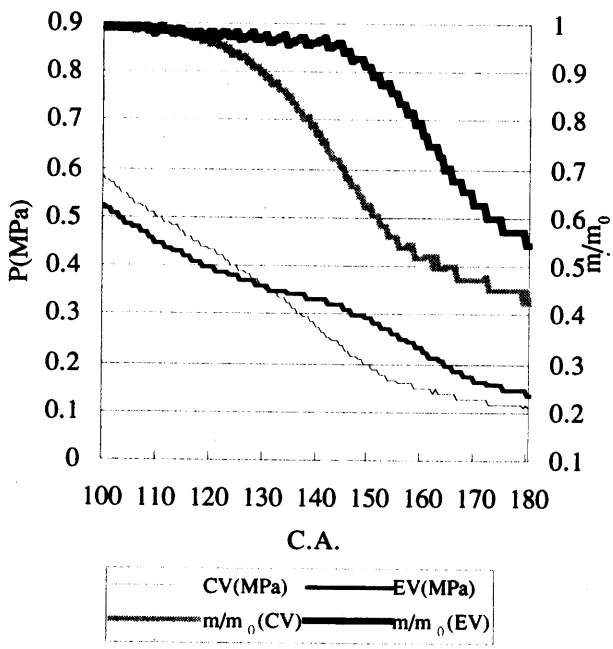


図2．排気弁開時の筒内圧および残量ガス量

$$m/m_0 = (pv/p_0v_0)(T_0/T) \qquad (1)$$

$T_0/T = (p/p_0)^{\{(1-k)/k\}}$

m：筒内残留ガス量

$m_0$：クランク角100°における筒内残留ガス量

p：クランク角で決まる筒内圧（計測値）

$p_0$：クランク角100°における筒内圧

v：クランク角で決まる筒内容積

$v_0$：クランク角100°における筒内容積

k：（定圧比熱）／（定容比熱） k=1.35 とした

上記により求めた筒内残留燃焼ガスの割合を図2に示す。この曲線の特徴はカム駆動、電子制御とも排気弁が開いた直後は緩やかな降下であり、次に直線的な降下へと移行し、最後に再び緩やかな降下となる。ここで、まず、直線的な降下に注目すると、カム駆動に対し電子制御では約20°遅れの平行線をたどる。これはEOがカム駆動では100°に対し、電子制御では140°であることから、排気弁が開いた直後の緩やかな降下部分がカム駆動は長く、電子制御は短い。換言すると、弁速度の速い電子制御では定常的な排出状態に至るまでの時間が短くなると云える。

また、このカーブのBDC付近は緩やかな降下の中にある。そしてEO140°で燃料消費率が最低となる実験結果と併せて考えると、ここで有効仕事の増加とポンプ仕事の増加がバランスし、その時の筒内残留ガス量の割合は0.55程度であることがわかる。

### 3．2．通り抜け掃気量の推定

オーバラップ短縮により内部EGR効果はNOxおよび燃料消費率の低減に有効なため、筒内ガス交換に関して、次に示す(2)式により通り抜け空気量と筒内に残る空気量の推定を行った。

$$\lambda_t = \lambda_i + \alpha \qquad (2)$$

$\lambda_t$：燃料1kgを消費するのに供給された空気量と理論空気量$L_0$との割合

ここでは簡便のため排ガス量と供給された空気量は等しいとし

$\lambda_t = 21/(21-O_2)$ とした。

21 ：空気中の酸素濃度（%）

$O_2$：排ガス中の酸素濃度(%)(計測値を用いる)

$\lambda_i$：空気過剰率：筒内で燃焼に関わる空気量と理論空気量$L_0$の割合

$\lambda_i = A/L_0$

A：燃料1kgを消費する時間内に筒内に残る空気量($Nm^3$)

$A = ntN\eta\,(V+V/\varepsilon)\,10^{-6}/2$

n：シリンダ数（3）

t：機関が燃料1kgを消費する時間（分）

（25%負荷時の1時間あたりの燃料消費量

を 15kg/hr とし、4分とする）

N：機関回転数（rpm）（25%負荷時の回転数を 265rpm とする）

$\eta = \eta_p * \eta_t * \eta_g$　$\eta$：充填効率

$\eta_p$：圧力補正（25%負荷時の吸気圧 0.2kg/cm³とし、1.2とする）

$\eta_t$：温度補正（吸気温度40℃とし、273/(273+40とする）

$\eta_g$：その他の補正

$V=S(D/2)^2\pi$　V：シリンダ容積（m³）

S：ストローク（cm）（38cm）

D：シリンダ直径（cm）（23cm）

$\varepsilon$：圧縮比（13.7）

$10^{-6}$：cm³ を m³ に換算するための係数

1/2：4サイクル機関は2回転に1回の吸入のための係数

$\alpha$：通り抜け掃気量と理論空気量 $L_0$ の割合

$L_0$：15 Nm³とする。

以上のような設定を行い、排気弁開時期（EC）30°に対して吸気弁開時期（SO）を300,320,340°と変更した時の通り抜け掃気量を推定する。それぞれの排ガス中の酸素濃度（$O_2$）は13.0,12.6,11.7%であり、$\lambda_t$を求めることができる。また、$\lambda_i$に関しては、充填効率$\eta$の中で、その他の補正$\eta_g$が決められない。$\eta_g$は筒内残留ガスの影響が大きいと考えられるが、ここでは便宜的に1とし、$\lambda_i$および$\alpha$を求め、図3に示した。図から吸気弁開時期を遅らせると通り抜け空気量が減少するのが分かる。

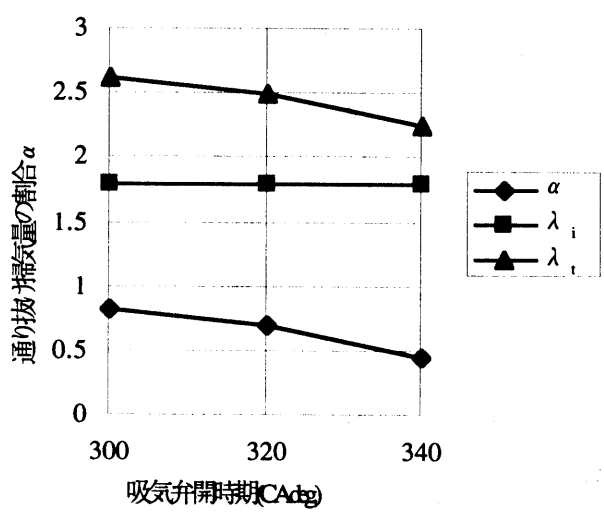


図3．通り抜け掃気量（EC30°）

一方、吸気弁開く時期（SO）が300°に対して、EC30, 40, 50°とした場合、排ガス中の酸素濃度は13.0, 12.8, 11.3%となる。これから$\lambda_i$および$\alpha$を求めると、図4のようになるが、これでは排気弁開時期を遅らせることにより、即ちオーバラップを広げると、通り抜け掃気量は減少することになる。従って、ここでは排気弁開時期を遅らせた場合、排ガス温度の上昇あるいはNOxの低下が見られることから、排ガスが筒内へ逆流していることが考えられる。そこでSO300°、EC30°時の通り抜け掃気量がEC40,50°でも保持されるとし、筒内に残る空気量を求めた。結果を図5に示すが、EC50°では筒内に残る空気量の割合$\lambda_i$は燃焼不良を起こす限界といわれる1.4となった。

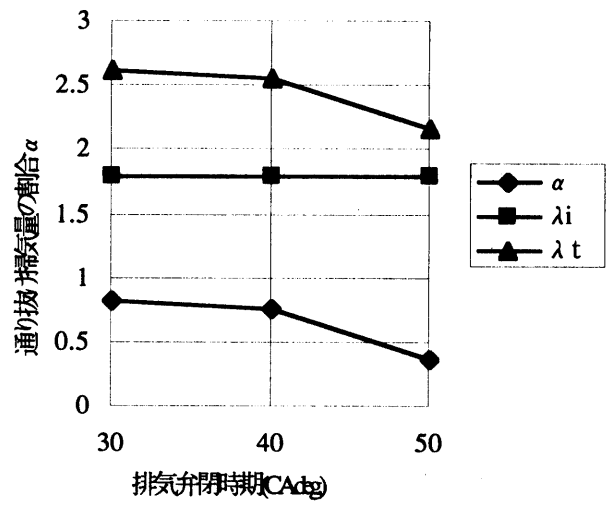


図4．通り抜け掃気量（SO300°）

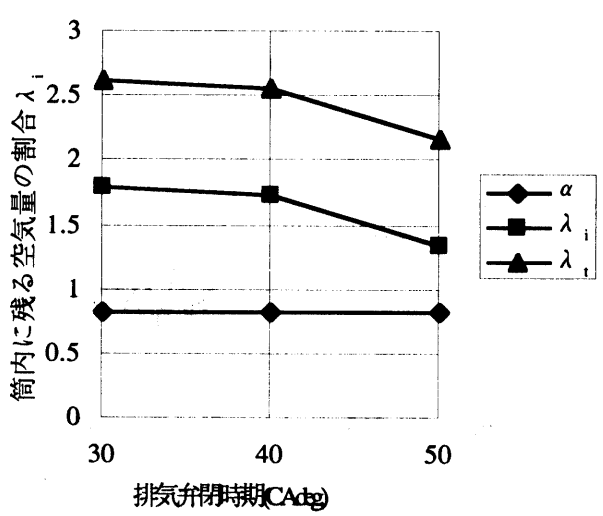


図5．通り抜け掃気量（SO300°）

以上、吸気弁開時期を変更した場合、通り抜け掃気量および排気弁開時期を変更した場合の筒内に残る空気量を（2）式を用い、それぞれに対し、大雑把な仮定を行い推定してきたが、今後より精緻なものとしたい。

3．3．今後の予定

前項に排気弁開時の筒内残留ガスの例を示したが、排ガスの排出には弁開閉時期は当然として弁速度も重要な要素となる。図6に当機関の弁揚程曲線を示すが、この曲線は弁速度と弁開閉時期あるいは弁開閉期間を含むものである。従って、弁揚程曲線と筒内圧降下を重ね合わせ検討することにより、排気弁の排ガスに対する抵抗を推定する可能となる。これをオーバラップにおけるガス交換に適用を試みたい。これらは筒内圧、排ガスあるいは吸気マニホールド圧が複雑に関わると思われるが、順次、適切な方法を組み立てながら研究を進めていきたい。

4．まとめ

・排気弁開時期における筒内残留ガス量の計算を行った。

・オーバラップ短縮時の通り抜け空気量と筒内に残る空気量を推定した。

・今後、弁揚程曲線を図式化し、筒内ガス交換の研究に応用したい。

5．参考文献

1)燃料噴射電子制御時の熱発生率解析（その2）、平成14年5月、第67回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、張潔他

2)電子制御化舶用ディーゼル機関の有害排ガスの変動要因、平成14年6月、日本機械学会第8回動力・エネルギー技術シンポジウム「新世紀の動力・エネルギー技術」 高杉喜雄他

3)熱機関通論、石谷清幹、コロナ社

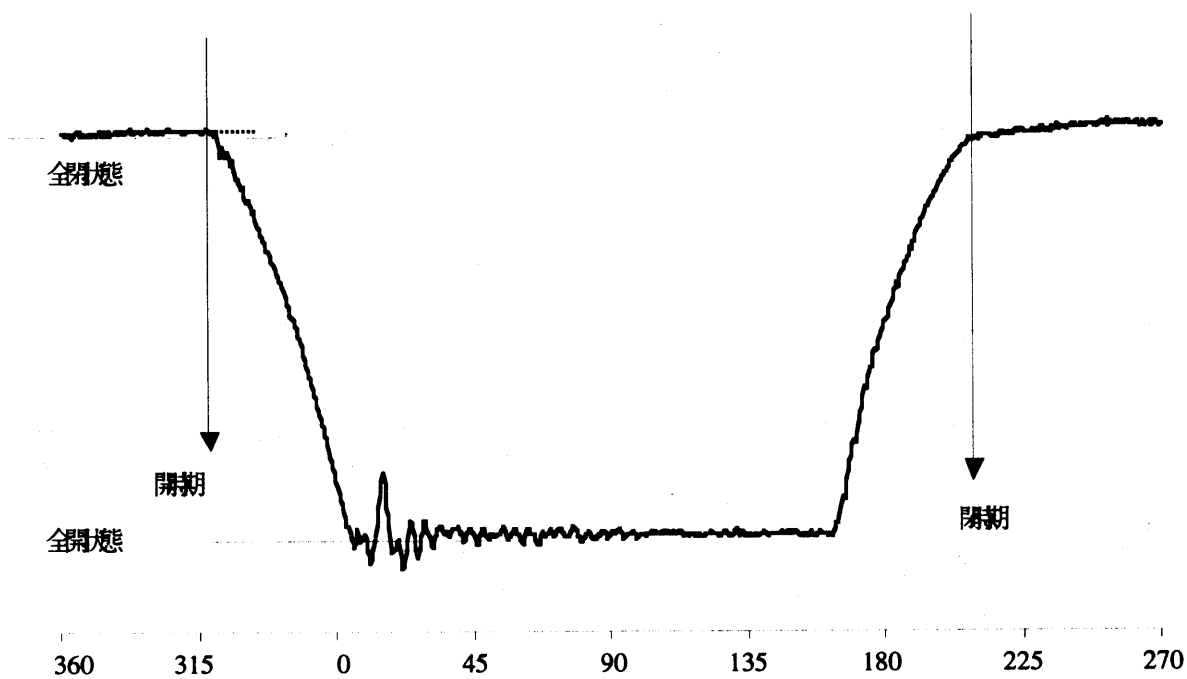


図6．弁揚程曲線（吸気弁の例）