船用低速二サイクルディーゼル機関の掃気に関する模型実験

(第3報 排気パルスと掃気)*

小松源一**・河合 彊***・東 忠則****

A Model Test on the Scavenging of Two-cycle Marine Diesel Engines.
(Report 3. The Influence of Exhaust Pulse on the Scavenging)

By Genichi Komatsu, Tsutomu Kawai, Tadanori Azuma

In the two-cycle diesel engine with constant pressure turbocharging, the deviation of the maximum pressure is observed in each cylinder. It was supposed that one of the reasons is the interference of exhaust pulse to the scavenging.

In this study the dynamic scavenging tests are conducted by using a single cylinder model in order to investigate the influence of exhaust pulse on the scavenging. By comparing the experimental results with theoretical calculation, the effect of exhaust pulse to the scavenging is discussed. The results obtained are as follows: 1) When the exhaust pulse is given during the scavenging period, the scavenging flow is obstructed and the concentration of fresh gas in the cylinder decreases. 2) The influence of exhaust pulse to the scavenging seems to be most serious when the pulse is given at the middle of the scavenging period. 3) By means of the experiment and calculation one of the characteristics of the scavenging becomes clear in regard to the interference of exhaust pulse.

1. ま え が き

静圧過給方式の二サイクルディーゼル機関では、各シリンダ間に圧縮始め圧力や最高圧力などの変動が認められており¹⁾、その変動の原因の一つに排気パルスの影響が考えられている。例えば、この種の機関の各シリンダの排気は排気本管に集められ静圧となってガスタービンに送られるが、その本管内には各シリンダからの排気流出による圧力波があり、ある特定のシリンダが掃気中に排気孔出口で本管内圧力波を受けると、シリンダ内充てんガスが増加して圧縮始め圧力が高くなり、最高圧力は上昇すると考えられ、また、パルス波を受ける時期によっても最高圧力は変動すると言われている。更にパルス波によってシリンダ内掃気の流れやガス交換にも影響が及んでいるものと考えられているが明らかにされていない。前者の最高圧力の変動については、例えば、噴射時期などの調整により最高圧力をそろえて圧力変動を少な

くしているが、後者のパルス波の掃気への影響については不明であり、掃気期間中パルス波がシリンダ内新気濃度の分布や掃気流に、そして燃焼過程にどのように影響を与えているか明らかでないのが現状のようである。

本研究は掃気への排気パルスの影響をとりあげ、実験装置は前報²⁾の模型(反転掃気式二サイクル機関の1/4縮尺)の一部を改良して用い、実験による方法とシミュレーションとによって調査を行ったものである。実験は主として模型による一サイクル掃気実験によった。これは一回の動的掃気作用を行わせ、掃気中に排気孔出口において排気パルスとの干渉を行わせ、シリンダ内ガス交換に及ぼす影響についての調査を主たる目的としている。付加実験として1/2縮尺模型による定常流掃気一回のパルス波を加えて行う定常流掃気実験をあわせて行った。上記の模型による掃気の実験的調査のほか、実験の掃気過程を計算によってシミュレートさせ、実験結果と計算結果とを比較検討し、掃気への排気パルスの影響を調査してまとめた報告である。

2. 実験方法

2.1. 一サイクル掃気実験 模型実験における掃気の実験条件が実機のそれに該当していることが望ましい。しかし、模型装置の性質上、全く実機条件に同じく

* 原稿受付 昭和54年9月27日

昭和54年春季学術講演(昭和54年5月23日)

** 正会員 姫路工業大学(姫路市書写2167)

*** 姫路工業大学(姫路市書写2167)

**** 正会員 川崎重工業(株)(神戸市生田区東川崎町2-14)

することは困難であり、ここでは掃気過程における熱的条件を省いて流体力学的条件を考慮して掃気への排気パルスの影響を実験した。流体力学的条件³⁾を合わせるには幾何学的な形状、給気比、そして、掃気とシリンダ内残留ガスとの密度比の三つを両者の間で同じにすればよい。しかし、実験装置の関係から全く同一条件とすることはできず、次のような近似条件で実験を行った。1) 幾何学的形状；模型は実機の縮尺1/4で形状は同一とした。2) 給気比；本実験では実機での給気比1.7付近を参考にして、給気比1.5~2.5の範囲で行った。その給気比条件と縮尺模型のため行程体積当りの掃気孔の時間面積の増大に伴い掃気条件として初期掃気圧200mmAqG、みかけの回転数200 rpm前後で行った。3) 掃気とシリンダ内残留ガスとの密度比；本実験では掃気として炭酸ガス約80 vol %と空気20 vol %の混合気体を用い、シリンダ内残留ガスとして圧縮空気を用いた。これら両者の密度比は各実験ごと測定されるが、その密度比は約1.43(シリンダ内残留ガスの比重量1.20に対する掃気の比重量1.72との比)であり、実機において掃気40℃、残留ガス500℃がともに空気と仮定すると、その密度比は1.83(掃気1.091、残留ガス0.596)となり、両者の密度比は近似条件となる。

実験装置は図1に示す模型および付属装置から成り立っている。これにより一サイクルの掃気過程を行わせる。これはピストンヘッド面を排気吹き出しの手前の位置におきクランク軸を電磁装置Mでブレーキすることによりセットし、シリンダ内ガスとして圧縮空気を充てんし、掃気タンクBには掃気を充てんしてブローダウンから一回の掃気をおえて圧縮行程でピストンを停止させる。ここで掃気後のシリンダ内ガスは多少圧縮された状態でシリンダ内にとどまる。この掃気中の任意の定められた時期に排気パルス発生部からパルス波を与える。このパルス波はクランク軸に取り付けられた回転円板Kと電磁ピックアップLとでトリガさせ、図1のN部の銀箔膜(開口面積7 cm²)を機械的に破ることによりN部の上流のタンクT内(容積5.9 l, 圧力0.3 atg)の圧縮空気が流出して排気枝管(N部から排気流に加わるまでの管路、断面積52 cm²)内に圧力波が発生し、パルス波となって排気管内の排気流に加わる。

更にパルス波について説明すると図2のごとくである。ここでパルス波の形状は近似的に三角波でその最大波高Hは初期掃気圧力 P_{S1} を少し越える程度で約250mmAqGであり、排気圧力(ここでは大気圧力で1.033 ata)に対するパルス波高Hとの比は1:1.024であり、パルス波の幅Wはクランク角度で40°前後である。実機においてもHは P_{S1} より少し高い程度で、その排気圧力(0.75 atg)に対する排気パルス波のH(1.1 atg)との比は1:1.2程度である。上記のようなパルス波を図2に示すように掃気中の三時期に与えパルス波の影響を検討した。

初期パルス；ほぼ掃気孔開口始めSOと掃気孔全開時

- A: 1/4 reduced model of the prototype
- B: scavenging tank
- C: gas sampling tube
- D: syringe
- E: vacuum pump
- F: compression gas as the cylinder gas
- G: scavenging gas
- H: oscilloscope
- I: amplifier
- Pa, Pb, Pc: pressure transducer
- K: crank angle detector
- L: trigger generator
- M: electro-magnetic apparatus
- N: pulse generator
- Q: air for pulse
- S: cylinder
- T: tank for pulse
- U: piston

図1 実験装置(一サイクル掃気実験)の概略図

図2 一サイクル掃気実験の図式

$$\text{亜音速流 } w = \sqrt{\frac{2g\kappa}{\kappa-1} RT_1 \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right\}} \quad (15)$$

音速のとき

$$\text{音速条件 } \frac{P_2}{P_1} \leq \rho_c, \quad P_c = \rho_c P_1 \quad (16)$$

$$T_c = T_1 \left(\frac{P_c}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (17)$$

$$r = \frac{P_c}{RT_c} \quad (18)$$

$$\text{音速流 } w = \sqrt{\kappa g RT_c} \quad (19)$$

シリンダ内容積変化 ΔVZ および上死点からのピストン変位 X は図2に示す関係より次式となる.

$$\Delta VZ = VZ(\theta + \Delta\theta) - VZ(\theta) = \frac{\pi}{4} D^2 \Delta X \quad (20)$$

$$X = r(1 - \cos \theta) + \lambda r \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}} \right\} \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{l}{r} = \frac{400\text{mm}}{90\text{mm}} \div 4.44 \quad (22)$$

ここに θ ; クランク角度

l ; 連接棒長さ

r ; クランク半径

シリンダ系へのガスの流出入に伴ってシリンダ内ガスの物性値 (c_v , c_p , R など) の変化が計算され, 式(10)によりシリンダ内ガスの温度変化 ΔT を求め, 逐次シリンダ内圧力が計算されシリンダ系への流れ過程が計算される. その過程の中でシリンダ内新気濃度の変化などが計算により求められる.

シリンダ内新気濃度は瞬時新気濃度 Y_s によって定義された量によって求め, 掃気後の掃気量は給気比 L あるいは修正給気比 K を用い, その新気濃度は掃気効率 η_s によって求めた.

$$\text{定義式 掃気効率 } \eta_s = \frac{G_{n0}}{G_{z0}} \times 100 \% \quad (23)$$

$$\text{給気比 } L = G_s / G_h \quad (24)$$

$$\text{修正給気比 } K = G_s / G_z \quad (25)$$

$$\text{瞬時新気濃度 } Y_s = \frac{G_n}{G_z} \quad (26)$$

$$G_n = G_{n-1} + \Delta G_n \quad (27)$$

式(27)の掃気中のシリンダ内新気濃度 G_n は前時刻の濃度 G_{n-1} に Δt 時間後のシリンダ内新気増分 ΔG_n を加えたものとなり, ΔG_n については次の掃気モデル式(28)によって求めた.

$$\Delta G_n = \Delta G_s \alpha - \frac{(\Delta G_s \alpha + G_{n-1}) J \Delta G_E}{G_z} \quad (28)$$

ここに G_{n0} ; 掃気後シリンダ内に留った新気の重量

G_{z0} ; 掃気後のシリンダ内全ガス重量

G_n ; シリンダ内新気の重量

G_z ; シリンダ内全ガス重量

G_s ; 掃気重量

G_h ; 大気状態でシリンダ行程容積を占める掃気重量

α ; シリンダ内流入掃気のうち掃気作用に有効にあずかる割合(掃気の短絡がない場合, $\alpha = 1.0$)

ΔG_s ; 微小掃気流入量

ΔG_E ; 微小排出量

J ; 掃気とシリンダ内残留ガスとの混合の割合(完全混合の場合 $J = 1.0$, 完全混合より成層状態に近い場合 $J < 1.0$)

式(28)の右辺第一項 Δt 時間内の流入掃気量 ΔG_s のうち有効に掃気作用にあずかる量を表し, 第二項はシリンダ内ガス排出に伴う新気減少量を表す. すなわち, 有効な掃気量 $\Delta G \alpha$ にその前時刻までのシリンダ内新気量 G_{n-1} を加えてシリンダ内全ガス重量 G_z で割ると, その時刻のシリンダ内ガスが完全混合とすると時の新気濃度となるが, 混合が部分的に不均一で, その J 割が完全混合として表している. したがって, その二項の差が新気増分となる.

最後に掃気効率 η_s と修正給気比 K との関係は掃気完全混合と仮定すると, 一般に式(29)で表され, 更に, 流入掃気のうち有効に掃気作用にあずかる割合 α を考慮すると式(30)となる.

$$\eta_s = 1 - e^{-K} \quad (29)$$

$$\eta_s = 1 - e^{-\alpha K} \quad (30)$$

図4 掃気過程計算のフローチャート

以上の定義式や誘導式などにもとづいて一サイクル掃気実験時の初期条件を用いて掃気過程が計算される。その掃気過程計算のフローチャートを図4に示した。

4. 結果および考察

図5は一サイクル掃気実験におけるシリンダ系各部の圧力経過と流れ状態などの計測例である。同図はパルスを与えない場合で排気流出開始EOによって、排気管内 P_E およびシリンダ内 P_Z では掃気孔開口時SOまで流出による圧力振動が続いていることを示している。一方、掃気流入はSOからSCまで行われ、 P_S は降下している。

図6は同じく一サイクル掃気実験で中期パルスを与えた一例である。パルス波の影響を受けて排気管内の流出

図7 掃気効率と修正給気比

速度 v_E などに変化を示している。

図7は排気パルスを与えた場合の掃気効率 η_s と修正給気比 K との関係である。この図は完全混合掃気時の関係式(29)に自然対数をとって K と η_s に関する表示で整理した。図の中で一般に一サイクル掃気実験結果が完全混合掃気状態であれば破線で示される直線上にあるはずであるが、実験結果によるとパルスを与えない場合でもこの線より若干下方にあり、完全混合掃気より若干低い状態となっている。これは実験条件が模型実験の性質上完全に合わせられないためと考えられる。このような条件下ではあるが、パルスを与えない場合の掃気状態(以下標準掃気と呼ぶ)を基準にして排気パルスを与えた場合の掃気(掃気量が比較的大きい範囲の修正給気比 $K=1.9$ 以上について比較)について比較考察する。一般に掃気中に排気パルスが加わると修正給気比 K (掃気量)が抑えられて掃気効率 η_s (シリンダ内新気濃度)は低下する傾向にある。前期および後期パルスを与えた場合は標準掃気に比べて K が若干抑えられ、その結果、 η_s も低下する。特に中期パルスを与えると K の減少の割合に比べて η_s の低下は著しい。同図において排気パルスを大きく与えた場合に K はより以上に抑えられて $K=1.4$ 付近の範囲に示される値となる。この場合に、 η_s はより低下するが K の減少の割合に比べて η_s の低下は少ない。この場合にも K が大きい場合の傾向と同じように排気パルスが中期に加わると他の場合よりも η_s の低下が比較的大きいことを示してい

図5 一サイクル掃気実験の計測結果(標準掃気の場合)

図6 一サイクル掃気実験の計測結果(中期パルスを与えた場合)

る。

図8は標準掃気の場合の掃気タンク内圧力降下の実験値 p_s と計算値 P_s との比較および排気孔出口(図1の P_E 位置)におけるシリンダガスの流速 v_E と計算値 V_E との比較を示す。ここでは v_E 計測上の都合のためシリンダガスおよび掃気には同じ圧縮空気を用い、その他の条件は同一とした。したがって、掃気状態は若干異なるものと考えられるが、圧力など掃気の初期条件は同一としているため、 p_s や v_E にはほぼ変化はないものとして計算結果との比較に用いた。この図によると掃気期間における掃気圧力および排気流速について実験値と計算結果は比較的合っているものと考えられる。

次に標準掃気の場合の掃気後の掃気効率 η_s に掃気の初期条件をもとに計算した掃気孔閉止時のシリンダ内瞬時

新気濃度 Y_s をはば一致させるためには計算において掃気モデル式(28)で完全混合 $J=1.0$ 、掃気有効率 $\alpha=0.9$ とすることによって得られる。したがって、標準掃気では掃気中の平均として完全混合掃気、且つ、掃気有効率90%のモデルが成立しているものと言える。パルス波を与えた場合の計算においてもこの標準掃気の特性をもとにして計算され、排気パルス下の掃気過程が計算されている。図9は中期パルスの場合を示す。同図で実験結果と計算結果とが比較的合っていることを示している。ここで v_E は図1に示す P_E 位置における排気管内中央の排気の流出速度を示している。

図10は三種類のパルス波を掃気中に与えた場合について、実験時の初期条件およびパルス波をもとに計算した掃気期間におけるシリンダ内瞬時新気濃度 Y_s の遷移を示

図8 一サイクル掃気実験の実測と計算結果(標準掃気の場合)

図9 一サイクル掃気実験の実測と計算結果(中期パルスを与えた場合)

図10 掃気期間におけるシリンダ内新気濃度 Y_s の遷移と一サイクル掃気後の掃気効率 η_s

している。掃気量に大きな差異のない K が 2.3 前後の場合の Y_s の変化を比較している。図により前期パルスを与えた場合についてみると掃気初期には Y_s 値は小さいが、掃気後期には Y_s 値の増加が回復して結果として Y_s にそれ程大きな影響を受けないものと考えられる。また、後期パルスの場合にも影響は少ないことを示している。それに対して中期パルスの場合には掃気孔全開付近で受けたパルス波によってシリンダ内ガス流れが乱れて後期にまでその影響がつづき Y_s の回復が充分できないものと考えられる。つづいて掃気孔閉止時 SC のシリンダ内瞬時新気濃度 Y_s と実験後の掃気効率 η_s との対比を同図の右上に示している。それぞれの場合について比較的良好がみられる。

図11は2.2で述べた方法による定常流掃気実験結果で掃気孔開口度が1/4の場合である。掃気圧力100mmAqGで定常掃気中に一回のパルス波が排気管内 E_2 部に P_E として、シリンダヘッド C_h 部に P_h としてそれぞれ計測され、 E_2 近傍で v_E が測定された。この1/4開の場合には排気管内圧力波 P_E およびヘッド部の圧力波 P_h はほぼ同

図11 定常流掃気実験結果(掃気孔1/4開, パルス波を与える)

型の圧力波を示しているが、排気管内流出速度 v_E はパルス波通過によって抑えられることを示している。これに対して図12に示すように掃気孔全開の場合には掃気量が増加するため流出速度 v_E も増加するが、同じようにパルス波の影響を受ける。排気管内圧力波 P_E に対してヘッド部の圧力波 P_h の波幅が約1.3倍となり、シリンダ内圧力波が長く持続し影響されることを示している。このように掃気孔全開時には部分開の1/4開時よりも圧力波の影響を時間的に長く受けて掃気に影響を与えているものと考えられる。この現象は一サイクル掃気実験において中期パルスの影響が大きいことを定性的に裏付けているものと考えられる。

図12 定常流掃気実験結果(掃気孔全開, パルス波を与える)

5. 結 言

以上の結果から次のような結論を得た。

- 1) 掃気期間に排気パルスが加わると、掃気量(修正給気比)は抑えられてシリンダ内新気濃度(掃気効率)は低下する。
- 2) 掃気への排気パルス時期の影響は掃気孔全開時に排気パルスを与えた場合(中期パルスの場合)に最も大きいものと思われる。
- 3) 模型実験と計算シミュレーションとにより掃排気干渉に関する掃気現象の一面が明らかとなった。

終りに本実験を始めるに当って御教示を頂きました摂南大学・大東俊一教授に感謝の意を表します。そして、実験に御協力を頂いた53年3月姫路工業大卒業生・藤本博、武野良治の両君に感謝致します。

文 献

- 1) 日本造船研究協会, 研究資料No.258 (昭和51年3月), 5
- 2) 小松源一ほか2名, 舶機誌12-2 (昭和52-2), 34
- 3) N. Dedeoglu, MTZ (1969), 14