高耐久性排気弁の開発*

山田武海**・関口英男***
岡本寛己****・水品正昭*****

Development of High Durability Exhaust Valves
for Marine Diesel Engines

By Takemi Yamada, Hideo Sekiguchi,
Hiromi Okamoto, Masaaki Mizushima

The exhaust valve damage simulator and the testing method have been developed to evaluate the durability at a laboratory scale in a shorter duration and at a lower cost than that by actual ship. It has been verified that the volume loss of tested valve measured by simulation test correlates the shortest life of actual valve and is taken to be the index of the durability.

Applied the simulation test to the development of exhaust valves, new metal deposited exhaust valves of PC engine have been commercialized, which have durability about four times as long as the conventional one. Development of ceramic exhaust valve is also carried out in order to meet the lower grade heavy fuel oil and higher thermal efficiency of the future diesel engine. The ceramic coated valves with durability about three times as long as the conventional one, have been already developed and the study on their improvement is now under way.

1. ま え が き

船用ディーゼル機関における排気弁は他の機関部品に比べて特に厳しい条件で使用されるために、その耐久性向上が古くからの宿命的課題であった。近年の船用燃料油の低重質化傾向や機関の高熱効率化傾向は機関の使用条件を一段と苛酷にするため、燃焼室構成部品、中でも排気弁に対する耐久性向上の要求が強くなってきた。

このような背景から、1980年より機関の高信頼性・高耐久性の研究に組織的に取り組んでいるが排気弁の開発はその中の重点項目の一つとして推進しているものである。排気弁の開発を効率よく行う上で、その耐久性を短時間で正確に評価する必要がある。このために、排気弁損傷シミュレータとそれを用いた実験室的耐久性評価試験方法を開発した。この方法を用いて、高耐久性溶接肉盛型排気弁の開発を行った。本開発は、(財)日本船用機器開発協会と共同で1981・1982年に実施したもの

である。また、将来の高熱効率化や燃料油の超低重質化に備えるために、セラミック排気弁の開発を昭和電工(株)、日鍛バルブ(株)と共同して1980年から実施している。本報では上記の一連の開発成果について述べる。

2. 排気弁損傷シミュレータ

排気弁の耐久性は従来から実船試験による評価が行われている。実船試験で得られるデータには、使用燃料油や機関運転条件などの変動によって大きなバラツキがあり、データ入手に莫大な時間と費用を必要としていた。そこで、排気弁の使用条件を再現・制御でき、耐久性を実験室的かつ迅速に評価することのできる設備を開発した。

2.1 排気弁の使用条件 排気弁損傷シミュレータの仕様を決定するため、PC2-5型機関を例にして排気弁の使用条件を調査した。その詳細は別報¹⁾に譲り、主な調査結果を表1に示した。このような条件で 사용되는排気弁の損傷過程を明らかにするため、PC2-5型機関を搭載した船で50本の排気弁を用いて実船試験を行った。その結果、排気弁に生ずる損傷はフェース面の吹抜焼損がほとんどであり、吹抜は図1に示した過程で発生する。排気弁フェース面は高温腐食雰囲気中で繰返し衝撃荷重を受けて摩耗を生じ、隙間を形成するに至る。

* 原稿受付 昭和59年5月31日

** 正会員 日本鋼管(株)中央研究所(川崎市川崎区南渡田町1-1)

*** 日本鋼管(株)中央研究所(川崎市川崎区南渡田町1-1)

**** 日本鋼管(株)重工研究所(横浜市鶴見区末広町2-1)

***** 正会員 日本鋼管(株)機械計画設計部(横浜市鶴見区末広町2-1)

表1 PC2-5型機関の主要目と排気弁の使用条件(船用)

主要目	
シリンダ当り出力	最大 650PS
毎分回転数	最大 520rpm
平均ピストン速度	最大 7.97 m/s
平均有効圧力	最大 19.5 kgf/cm ²
排気弁の使用条件	
燃焼ガス温度(弁開時)	900°C 1)
燃焼ガス流速(弁開時)	500 m/s 1)
フェース面温度	500°C 2)
フェース面負荷荷重	7 kgf/mm ²
フェース面負荷回数	150~260cpm

1) シミュレーション演算による値

2) 実測値からの推定値

表2 排気弁損傷シミュレータの総合試験性能

試験ガス組成	CO ₂ 0, 2~20% O ₂ 16~20% SO ₂ 0, 200~2000ppm N ₂ Bal
試験ガス流量 (リフト量1mmのとき)	最高 100m ³ /h 最低 10m ³ /h
試験ガス圧力	最高 3 kgf/cm ²
粉末供給量	0.9~20g/min (V ₂ O ₅ -15% Na ₂ SO ₄)
試験弁フェース部温度	600~800°C
試験弁シート部温度	600~800°C
試験ガス温度	700~900°C
最大動的圧縮荷重	10 t
繰返し周波数	最高 30Hz

図1 排気弁の吹抜・焼損機構

この隙間ができると、2400°C以上の火炎がそこにさし込むようになるので、これ以降の損傷過程を抑制することは難しい。したがって、隙間形成以前の過程、特にフェース面の摩耗をいかに抑制するかが高耐久性排気弁を開発するための課題である。

2.2 排気弁損傷シミュレータ設備 表1に示した条件及び将来予想される使用条件を考慮して設備仕様を検討し、総合試験性能を表2のように決定した。これらの性能を具備した図2に示す設備を設計・製作した^{1)~3)}。本設備の特徴は、試験ガスの組成・流量・温度、V₂O₅-Na₂SO₄などの粉末供給量、試験弁フェース部・シート部の温度、繰返し接触荷重、及び荷重の繰返し周波数を広範囲に設定でき、かつ制御した状態で試験が行える点にある。これは実船試験の制約やリスクなしに、将来の燃料油の低重質化や機関の高出力化を想定した試験、セラミックなどの新素材適用の検討などを可能にするもの

である。

3. シミュレータによる耐久性評価試験方法

NKK-SEMT-Pielstick 機関の標準排気弁についてシミュレータ試験と実船試験を実施し、これらの試験結果からシミュレータを用いた排気弁の耐久性評価方法を確立した。

3.1 試験方法及び供試排気弁 供試排気弁の種類と材質を表3に示した。S-0弁は従来からの標準弁である。S-1弁は一次石油危機以降の燃料油の低重質化に起因して多発した吹抜の対策として1977年に標準化したものである⁴⁾。なお、排気弁座はいずれも標準仕様品(SUH3-Stellite 6肉盛)を用いた。

シミュレータ試験は図3に示した試験弁を用い、表4に示した条件で行った。この試験条件は実機排気弁の吹抜に関連する様々な現象を再現しうることを予備実験で確認している。この試験での試験弁の耐久性は試験後の体積減をもって評価した。これは吹抜発生が排気弁フェース面の摩耗による隙間形成に支配されたと考えたからである。

一方、実船試験は、PC2-5型機関を搭載し、S-0弁の点検間隔が700~1000時間の機関条件が比較的悪い4隻の船を選んで実施した。これは早期に試験結果を得ることを意図したためである。供試排気弁は各種8本以上装着し、それらに吹抜が発生するまでメンテナンスフリーで使用することにした。吹抜の徴候が現れた排気弁については、その時点で取外して吹抜発生の有無を調査した。吹抜が発生した排気弁の耐久性は、試験開始から取外しまでの総使用時間とした。

両試験を完了した供試弁については、フェース部の表面及び断面の組織観察、フェース部及びシート部の付着物の分析などを行った。

3.2 試験結果 S-0弁についてシミュレータ試験後と実船試験後のフェース部表面の実体顕微鏡写真と走査型電顕写真、及びその断面の拡大写真を写真1~3

写真1 S-0弁フェース面の実体顕微鏡写真

写真2 S-0弁フェース面の走査型顕微鏡写真

写真3 S-0弁フェース部断面のマクロ組織

図4 体積減測定結果

S-1が0.191 cm³であり、S-1の体積減はS-0の約1/2.7になっている。また、弁座試験片は同一仕様のものを使用したにもかかわらず、S-1の体積減はS-0より少ない。これは従来から“なじみ”という言葉で表現されている材質の組合せの影響があることを示している。

各供試弁の実船試験結果を図5に示した。S-1弁は50本の試験を行い、1255hで最初の吹抜を生じてから、約4000h経過後に合計24本が吹抜を生じ、残りの26本は健全であるという結果であった。このように実船試験結果は大幅なバラツキを持っている。排気弁の耐久性を考える上で最も重要な点は、メンテナンス間隔を何時間に設定したらよいか、すなわち吹抜を生じない最大使用時間はどの位かを知ることである。そこで、耐久性を最短吹抜発生時間で評価してみた。S-0を基準とすると、S-1はS-0の約1.8倍の耐久性を持っていることがわかる。なお、この比率はこれまでの実船における両排気弁の使用状況実績ともよく一致する。

図5 実船試験結果

上述の体積減と最短吹抜時間との間には、体積減が減少すると最短吹抜時間が増すという関係があるように思われる。そこで、この関係を定量的に検討した。図6はS-0、S-1及びこれまでに試験した供試弁について、弁棒試験片の体積減 ΔV_v (cm³)と最短吹抜時間 T_B (h)の関係をプロットした結果である。両者の間には、

$$T_B = 330 \Delta V_v^{-1.0} \quad (\text{相関係数: } -0.94) \quad (1)$$

なる実験式が成立することを見出した。(1)式を用いれば、シミュレータ試験で求めた体積減から実機排気弁の耐久性を推定することが可能になる。ただし、同じ種類の排気弁を使用しても、その耐久性は機関運転条件の影響を受けるために船ごとで異なることはよく知られている。その場合でも、対象とする船のS-0弁の寿命あるいはメンテナンス間隔がわかっているならば、(1)式の比例定

図6 シミュレータ試験結果と実船試験結果の関係

数を変更することによって新しい排気弁の耐久性あるいはメンテナンス間隔を知ることができる。

以上のように、シミュレータ試験での試験片の損耗状態は実機排気弁のそれをよく再現でき、試験片の体積減や割れ・脱落の発生状態から耐久性を高精度で評価できることを示した。

4. シミュレータを導入した排気弁開発の新プロセス

シミュレータ試験は実船試験と同等の耐久性評価ができ、かつ試験に要する時間・費用を実船試験より大幅に削減できる。そこで、この評価試験法を排気弁開発に導入した新プロセスを提案し、その開発効率を従来の実船試験による耐久性評価に基づいて開発を行うプロセスと比較した。

図7は、PC2-5型機関用排気弁を対象とし、20の候補技術の中から一つを開発・実用化することを仮定した場合の開発効率を新プロセスと従来プロセスについてケーススタディした結果である。従来プロセスでは、基礎実験で候補技術を20から10に絞り、それらについて排気弁を試作して実船試験による耐久性評価を行う。この結果から、さらに2種類程度を選定して実用化を進めていた。一方新プロセスでは、耐久性評価を主にシミュレータ試験で行い、実船試験はそこで選定された排気弁の耐久性を確認する程度にとどめて実用化を進める。このような新プロセスを採用することで、排気弁開発に要する費用と時間は従来プロセスに比べてそれぞれ約1/4、約1/50に低減することができる。

	従来の開発プロセス				新しい開発プロセス			
	フ ロー	候補数	金 額 (万円)	延時間 (h)	フ ロー	候補数	金 額 (万円)	延時間 (h)
開 発	基礎実験 ↓ YES ↓ 実船実験 ↓ 合 計	20 10 (各30本)	600 7,800	5×10^2 6×10^6	基礎実験 ↓ NO ↓ シミュレータ試験 ↓ YES ↓ 実船実験 ↓ 合 計	20 10 (各2本) 2 (各30本)	600 160 1,560	5×10^2 6×10^2 1.2×10^5
			8,400	$\sim 6 \times 10^6$			2,320	1.2×10^5
	実用化実験 ↓ 合 計	2 (各100本)	5,200	4×10^5	実用化実験 ↓ 合 計	2 (各100本)	5,200	4×10^5

PC 2—5 型機関を対象とした場合

図 7 排気弁の開発プロセス

5. 新プロセスに基づく排気弁の開発

新プロセスを適用して2タイプの高耐久排気弁を開発した。一つは従来から用いられている溶接肉盛型排気弁である。もう一つは将来ニーズに対応することを意図したセラミック排気弁である。これでは、セラミック溶射型と焼結セラミック型とを検討した。

5.1 シミュレータ試験

5.1.1 溶接肉盛型高耐久排気弁

15種類の候補材について高温腐食、熱衝撃、高温硬度などに関する基礎実験を行い、標準弁S-1と同等以上の特性を有するものとして、表5に示した5種類の候補材を選定した。これらについてシミュレータ試験を行って耐久性を評価した。

各供試弁の体積減測定結果を図8に示した。弁棒試験片の体積減はN-1～4が少なく、弁座試験片のそれはN-1, 2, 4, 5が少ない。それらの合計体積減はN-1, 2, 4が少なく、S-0の約1/4であった。写真4はN-2, 5のフェース部断面の光学顕微鏡写真を示す。N-5は肉盛部第一層と第二層の境界に剥離を生じ、外層の一部が脱落していた。N-2は微細な割れを生じていた。また、N-4にも盛金部と母材の境界に割れが観察された。N-1, 3には割れの発生は観察されなかった。以上のシミュレータ試験結果と(1)式から、N-1, 2, 4がS-0の約4倍の耐久

表 5 試作溶接肉盛弁の種類と仕様

種 類	母 材	肉 盛 材	施 工 法
N-1	Nimonic80A	NHX 4	TIG溶接肉盛
N-2	Nimonic80A	第1層：NHX 4 第2層：NHX 4	第1層：TIG溶接肉盛 第2層：TIG溶接肉盛
N-3	Nimonic80A	Höganäs I-60	火炎溶射肉盛
N-4	Nimonic80A	第1層：Colmonoy 6 第2層：Höganäs I-60	第1層：TIG溶接肉盛 第2層：火炎溶射肉盛
N-5	SUH31	第1層：Colmonoy 6 第2層：Höganäs I-60	第1層：TIG溶接肉盛 第2層：火炎溶射肉盛

図 8 試作弁の体積減測定結果

a. N-2弁

b. N-5弁

写真 4 シミュレータ試験後フェース部断面の光学顕微鏡組織

表6 試作セラミック溶射弁の種類と仕様

種類	母 材	溶 射 材	備 考
AT-1	Nimonic 80A	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 40\text{TiO}_2 - 8\text{Ni}$	NiCr アンダーコート
TO-1	Nimonic 80A	$\text{TiO}_2 - 8\text{Ni}$	NiCr アンダーコート
CR-1	Nimonic 80A	$\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$	NiCr アンダーコート
TC-1	Nimonic 80A	$\text{TiC} - 40\text{NiCr}$	NiCr アンダーコート
CR-4	Nimonic 80A	$\text{Cr}_3\text{C}_2 - (20 \sim 100) \text{NiCr}$	4層溶射
TC-4	Nimonic 80A	$\text{TiC} - (20 \sim 100) \text{NiCr}$	4層溶射

写真5 シミュレータ試験後フェース部断面の光学顕微鏡組織

性を有するものと判断された。

5.1.2 セラミック排気弁

(1) セラミック溶射型排気弁 13種類の酸化物系及び炭化物系セラミックの溶射層について基礎実験を行い、シミュレータ試験用に表6に示した6種類を選定した。これらの溶射層はいずれも靱性を向上するためにNiあるいはNi-Crを混合してある。

写真5に試験後フェース部断面の光学顕微鏡写真の一例を示した。AT-1のセラミック層は下地層からの剥離・脱落を生じたが、CR-1はセラミック層の表面がわずかに摩耗しただけであった。各供試弁の体積減測定結果を図9に示した。体積減はAT-1が最大でCR-1, 4が最小であった。なお、 TiO_2 , TiC 系はS-0と同程度、 Cr_3C_2 系はS-0の約1/2.6の体積減であった。この結果から、 Cr_3C_2 系は最も優れた耐久性を有し、それはS-0の約2.6倍であると予想される。

(2) 焼結セラミック排気弁 焼結セラミック排気弁は開発の緒についたばかりであり、現在各種焼結品についてシミュレータ試験を行っているところである。

これまでの試験結果の中で注目されるのは、 Si_3N_4 及び SiC の体積減がそれぞれS-0の約1/10及び約1/7であることである。これは図6にプロットしてあるようにS-0排気弁の7~10倍の耐久性をこれら焼結セラミック排気弁に期待できることを意味している。

ところが、焼結セラミック一体の排気弁を舶用機関のような大形ディーゼル機関に使用することは信頼性、経済性の面から難しい。これを克服する方法として排気弁のフェース部に焼結セラミックを接合する方法が考えら

図9 試作弁の体積減測定結果

れるが、既存の方法で排気弁に採用できるものはほとんどない。そこで、現在排気弁に利用できるよう信頼性の高いセラミックと金属の接合技術の開発を行っている。この技術が確立されれば、dock to dock メンテナンスフリーで使用できる焼結セラミック排気弁が実用化されるものと考えられる。

5.2 実船試験 前述のシミュレータ試験において高い耐久性が期待された溶接肉盛型のN-1, 2, 4及びセラミック溶射型のCR-1, 4について実船試験を行った。試験には前述の機関運転条件が悪い船を用いた。

試験結果を図10に示した。溶接肉盛型排気弁の最短吹抜時間で耐久性を比較すると、N-2はS-0の約4倍の耐久性、N-1, 4は約3.5倍の耐久性であった。これらの排気弁は、たとえばS-0のメンテナンス間隔が1500

図10 試作排気弁の実船試験結果

時間である通常の船においては、約6000時間無開放での使用を可能にするものである。一方、セラミック溶射型排気弁ではCR-4がS-0の約3倍の耐久性であった。セラミック排気弁は開発途上にあり、周辺技術の改良とともにその耐久性をさらに向上させることができると考

えている。

6. あとがき

最近開発した排気弁損傷シミュレータを用いた排気弁の耐久性評価試験方法、排気弁の新しい開発プロセス、および高耐久性排気弁の開発成果を紹介した。

1982年にNKK-SEMT-Pielstic機関用としてN-2, 4を標準化したがいずれは既に900本の実績があり、いくつかの船で約1年間メンテナンスフリーで使用されている。また、セラミック排気弁に関しては、焼結セラミックの適用も含めて、dock to dockメンテナンスフリーを目標に現在高耐久性化の開発を行っている。

文 献

- 1) 山田・ほか6名, 日本鋼管技報, 98(1983), 54.
- 2) NKK・JAMDA, ZŌSEN, 28-2(1983-3), 17.
- 3) 山田・ほか5名, 学振123委研究報告, 24-2, (1983-7), 323.
- 4) 水品・ほか5名, 日本鋼管技報, 89(1981), 77.