

ガス燃料エンジン用バルブシート材の開発

Development of Valve Seat Material for Gas Fueled Engine

佐藤 克明*

Katsuaki SATO

山崎 安弘*

Yasuhiro YAMASAKI

緑川 輝明*

Teruaki MIDORIKAWA

高橋 輝夫**

Teruo TAKAHASHI

要 旨

従来、CNG、LPGなどのガス燃料使用下においては、バルブシート材の摩耗が大きく、ガソリンエンジン並みの耐摩耗性を持たせることは困難であった。そこで、ガス燃料使用下におけるバルブシート材の摩耗メカニズムを解析し合金設計を行った。

マトリックスの合金化を図ると共に硬質粒子に自己潤滑効果を有する、Co-Mo-Cr系を採用した。また、耐摩耗性と相反する被削性の向上を図るため、MnSを添加した焼結合金製バルブシート材を開発した。その結果、ガソリンエンジンと同等の耐摩耗性を得ることができた。

ABSTRACT

CNG or LPG fueled engines typically have less valve seat wear resistance than gasoline powered engines.

An analysis of the valve seat wear mechanism was performed and various designs of alloys were studied. A Co-Mo-Cr type alloy, that has a self-lubricating effect against wear, was employed. Also, MnS addition improved the alloy's machinability, which is typically counter to a materials wear resistance characteristics.

In the end, a robust CNG/LPG engine valve seat material specification was successfully developed that exhibits equivalent wear properties to that of gasoline powered engines.

1. まえがき

近年、大気汚染や石油エネルギー資源枯渇の観点から、自動車の排気有害物質低減や代替燃料への社会的要求が高まっている。そして、圧縮天然ガス(以下、CNG)はこれらの要求にふさわしい燃料として期待されている。

こうした情勢をふまえて、ホンダにおいてもCNG燃料用エンジンの開発を行って来たが、燃料をガソリンからCNGに変えることによって、未経験の問題がいくつか発生した。そのうち、エンジン本体で最大の問題は、バルブシート材の摩耗であった。

エンジンのバルブシート材は吸排気バルブとの組み合わせにより、高温高压の燃焼ガスをシールする役目を持っている。このことから、バルブシート材には、自身の耐摩耗性、耐熱性以外に、相手バルブへの低攻撃性も要求されることになる。

したがって、従来のガソリンエンジンにおいても、高負荷条件下での耐摩耗性と低攻撃性の両立は難問であった

が、今回、燃料をCNGに代えることによって、従来の知見では解決できない問題がさらに追加されてきた。

そこで、このCNG燃料下における摩耗メカニズムを解析し、CNG燃料用のバルブシート材を開発したので報告する。

2. 試験方法

2. 1. 単体リグ摩耗試験

バルブシートとバルブの摩耗特性を確認するため、Fig.1に示すリグ摩耗試験機による試験を行った。従来のガソリンエンジン用バルブシート材の試験条件に対して、温度、空燃比を変更し、実機における試験結果と単体の試験結果の相関を求めた。

2. 2. 実機耐久試験

実機におけるバルブシートとバルブの摩耗特性を確認するため実機耐久試験を行った。Table 1にエンジン諸元を示す。

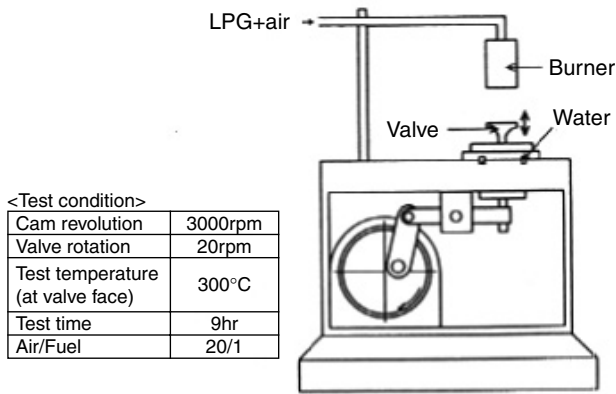


Fig.1 Valve seat testing machine

Table 1 Engine specification

Type of engine	L4 SOHC VTEC
Bore × Stroke (mm)	Ø75 × 90
Displacement (cc)	1590
Compression ratio	12.5
Number of valves	Intake 2 Exhaust 2
Valve head dia. / stem dia. (mm)	Intake 30/5.5 Exhaust 26/5.5
Output (kW/rpm)	81.0/6500rpm
Torque (N·m/rpm)	130/5500rpm
Fuel	CNG

3. CNG燃料における摩耗現象

3. 1. 台上耐久試験における摩耗

Fig.2に全開全負荷運転時における四つのシリンダのバルブおよびバルブシートの平均摩耗量を示す。ガソリン用バルブフェースとバルブシートをCNG燃料で運転した場合のバルブシート摩耗は、ガソリンで運転した場合と比較して、吸気側で90倍、排気側で30倍大きい摩耗を示した。これは、短時間でバルブが突き上げるほどの摩耗量であった。また、LPG用市販バルブシート材を用いても、耐摩耗性は不十分であった。

3. 2. 実走耐久試験における摩耗

Fig.3に台上耐久試験と実走耐久試験の単位走行距離当たりのバルブシート摩耗量を示す。ガソリンエンジンの場合、実走耐久試験におけるバルブシートの摩耗量は、台上耐久試験の摩耗量よりも少ない。しかし、CNGエンジンの場合、逆に実走耐久試験での摩耗量の方が大きいことがわかった。ガソリンエンジン開発の経験によると、高回転・高負荷で連続運転される台上耐久試験で問題のないシートは実走耐久試験でも問題を起こさなかった。それに対し、CNGエンジンではこの経験が通用せず、摩耗メカニズムを根本的に解明する必要がある。

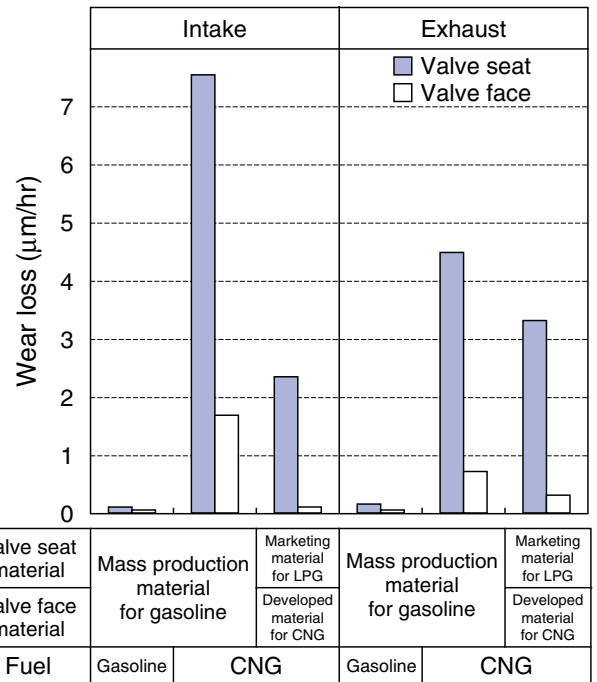


Fig.2 Wear loss of valve seats and valve faces in bench tests

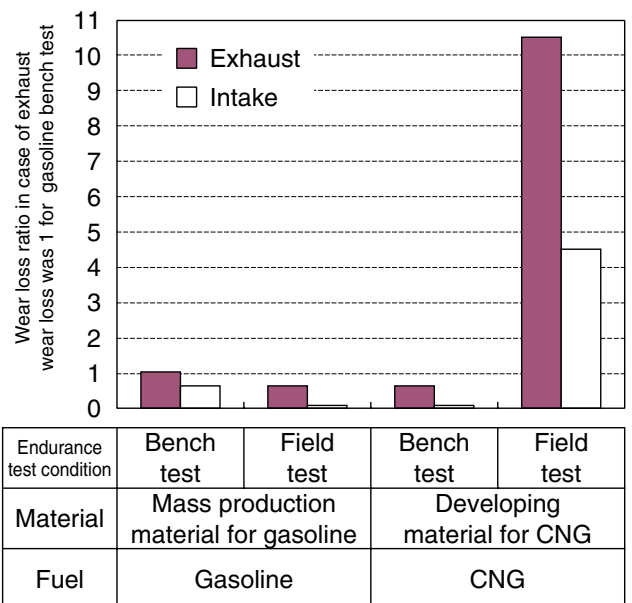


Fig.3 Compare of bench test and field test for valve seats wear loss

4. CNG燃料における摩耗メカニズム

4. 1. バルブシートの摩耗要因

一般に、バルブシートの摩耗に対して以下の要因があげられる。

(1) エンジンの条件から

- ・エンジン回転数

- ・ シート面圧
- ・ バルブの回転
- ・ シート温度
- ・ 使用燃料

(2) バルブシートの材質面から

- ・ 潤滑性
- ・ 耐熱性
- ・ 剛性
- ・ 相手バルブ材の攻撃性

などがあげられる。実際には、これらの要因が相互に影響し合った摩耗の機構となる。

Table 2にCNG, LPG, ガソリンの燃料特性を示す。Table 2の各項目のうち、上記の摩耗の要因との関連で注目されるのは、バルブシート温度への影響として気化潜熱による冷却の有無とバルブシート潤滑への影響として実在ガム分の有無である。

Table 2 Characteristic of gas and gasoline fuel

	CNG (methane)	LPG (propane)	Gasoline
Raw materials	Natural gas	Crude petroleum	Crude petroleum
Molecular formula	HC(C1~C3) Mainly CH ₄	HC(C3, C4) Mainly C ₃ H ₈	HC(C4~C12)
Molecular weight	16	44	100
Octane number (RON)	130	125	90~98
Theoretical air-fuel ratio (A/F)	17.2	15.6	14.7
Inflammable range (Vol%)	5.3~15	2.4~9.5	1.0~7.5
Density ratio for air	0.555	1.548	3.4
Boiling point (°C)	-162	-42.1	25~220
Heating value (kcal/kg)	11,839	10,988	10,505
Spontaneous combustion (°C)	540	457	228
Cooling by heat of vaporization	Non	Non	Exist
Actual gum composition (mg/100ml)	—	—	<20

4. 2. 温度の影響

ガス燃料の場合、吸気時の気化潜熱による冷却効果が望めないことから、ガソリンエンジンに比べて、バルブシート温度の上昇が予測される。Table 3に台上耐久試験におけるバルブシートの硬度法による温度測定結果を示す。最大出力条件における吸気バルブシートの温度は、ガソリンに比べ平均温度で30°C高く、排気バルブシートの温度はガソリンとほぼ同等であることがわかった。

Table 3 Temperature of valve seat

Temperature of valve seat /valve face (°C)				Running condition		
		CNG	Gasoline		CNG	Gasoline
Intake	Maximum temperature	310	270	Engine	1.6L SOHC VTEC	
	Average temperature	290	260	Output	115PS	130PS
Exhaust	Maximum temperature	390	400	Revolution	6500rpm	6500rpm
	Average temperature	355	360	Compression ratio	12.5 : 1	9.6 : 1

4. 3. 燃焼生成物の影響

Fig.4にCNG燃料で運転した後の排気バルブシートの外観を示す。輝面摩耗を呈しており、金属接触していることがわかる。このような輝面摩耗は、ガソリン燃料の運転では起こらない。

次にバルブに付着した燃焼生成物を分析した結果、主成分はCa₅(PO₄)₂(リン酸カルシウム)であることが判明したが、これは、エンジンオイルに含まれる成分であり、ガソリンエンジンにおける生成物と同一であった。

これらの結果から、CNG燃料とガソリン燃料とでバルブシート面の潤滑状態が異なることが、大きく影響しているものと考ええる。すなわち、ガソリン燃料の場合、バルブシート面の潤滑に有効と考えられるガム分が含まれているのに対し、ガス燃料では、それが含まれていないためバルブとバルブシートが金属接触し易く、摩耗促進に影響しているものと考えられる。

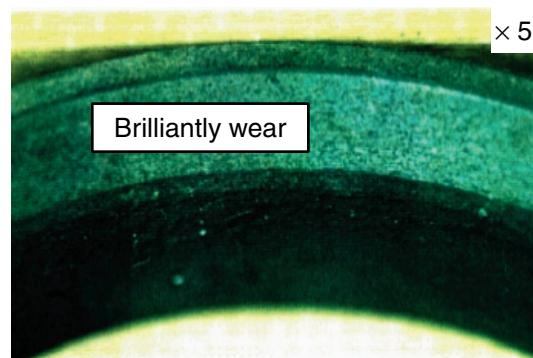


Fig.4 Appearance of valve seat on engine test with CNG fuel

4. 4. 台上耐久試験と実走耐久試験の違い

Table 4に、台上耐久試験と実走耐久試験のバルブシート温度を示す。実走耐久試験におけるバルブシートの温度は、台上耐久試験に比べて、排気側で60°C、吸気側で100°C低いことが判った。

そこで、台上耐久試験と実走耐久試験の温度差が摩耗現象にどの程度の影響を及ぼすかを確認するため、リグ摩耗

Table 4 Differences condition for bench test and field test

	Bench test	Field test	Temperature difference
Ne	6500rpm	Peak frequency 2000~3500rpm	—
Load	Full throttle	Peak frequency Pb=-100~-400mmHg	—
Valve seat temperature	Exhaust 355°C Intake 290°C	Exhaust 265~325°C Intake 170~195°C	Exhaust -60°C Intake -100°C

試験機を用いて温度の影響を調べた。Fig.5に排気バルブシートの温度と摩耗の関係を示す。同図より、台上耐久試験よりも実走耐久試験の方が、摩耗量が大きいというCNG特有の現象は、バルブシートの温度によって説明できることがわかる。

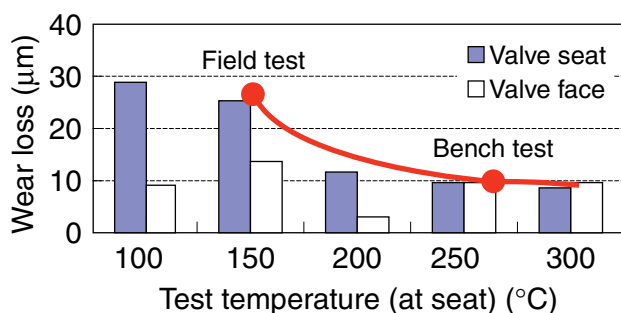


Fig.5 Relation between temperature and wear loss in exhaust valve seats

もちろん、通常のガソリン用シート材についても温度依存性を有しているものと考えられるが、ガソリンの場合は、液体燃料や燃焼生成物の潤滑作用により、温度の影響を受け難いのに対し、CNGの場合、ドライ環境で使用されるため、リグ摩耗試験による温度依存性が、顕著に現われるものと考えられる。

以上をまとめると、燃料をガソリンからCNGに変更した場合のバルブシート摩耗メカニズムの変化点は次の2つである。すなわち、①気化潜熱による冷却効果が無いために温度が高い、②燃料にガム分が含まれていないために潤滑が無いことがCNGバルブシートの摩耗の特徴である。この関係を模式的にFig.6に示す。

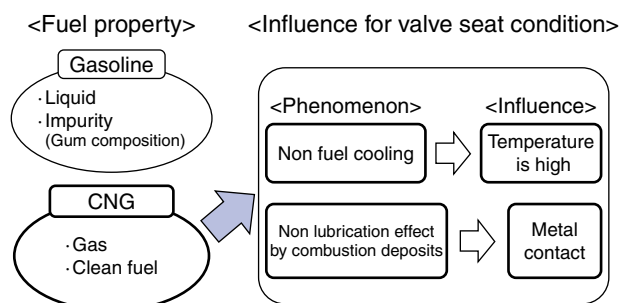


Fig.6 Influence of fuel property on valve seat wear

5. 合金設計

上記のように、CNGエンジンがガソリンエンジンに対してバルブシート温度が高いことおよび潤滑性が不足していることから、合金設計は特に耐熱性と潤滑性に着目し検討した。

5. 1. マトリックスの合金化

マトリックスは、高温強度と高温硬さの向上を狙い高合金化を図った。Fig.7にベース粉の種類と成形密度、圧環強度の関係を示す。一般に高合金化に伴い成形性が悪化するが、3%Cr合金粉は、純鉄粉に比べて若干の密度低下を示すものの、圧環強度はむしろ向上していることより、3%Cr合金粉を採用した。Fig.8に開発材のマトリックス高温硬さを示す。運転時の温度である200℃から400℃領域においてCNG用開発材は、ガソリン用量産材に対してHVで30高い硬さが得られた。

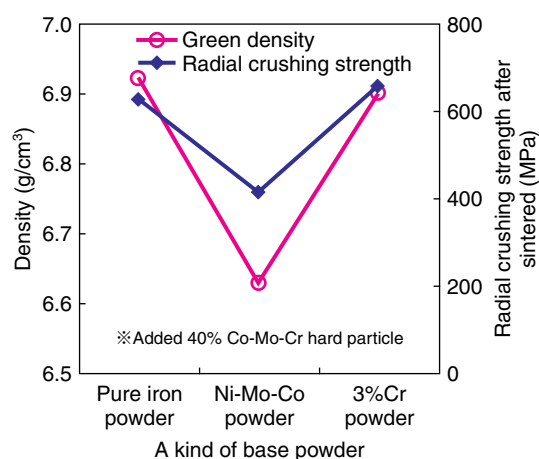


Fig.7 Relation between density and radial crushing strength at each powders

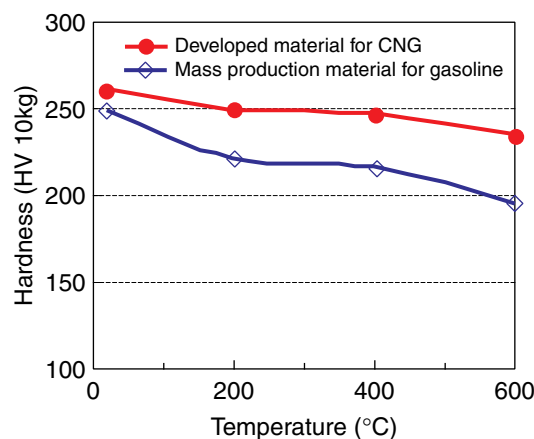


Fig.8 High temperature hardness for Matrix of developed material

5. 2. 硬質粒子種類の選定

硬質粒子は、耐摩耗性と自己潤滑性の向上を狙い、種類の変更と添加量の増加を図った。選定材としては、ガソリン用の硬質粒子に用いているCr-W-C系に変えて、潤滑効果のある硬質相を有するCo-Mo-Cr合金(トリバロイ粉)を選定した。Fig.9に硬質粒子の違いによるリグ摩耗試験における摩耗量と圧環強度を示す。Co-Mo-Cr系の硬質粒子は、他の

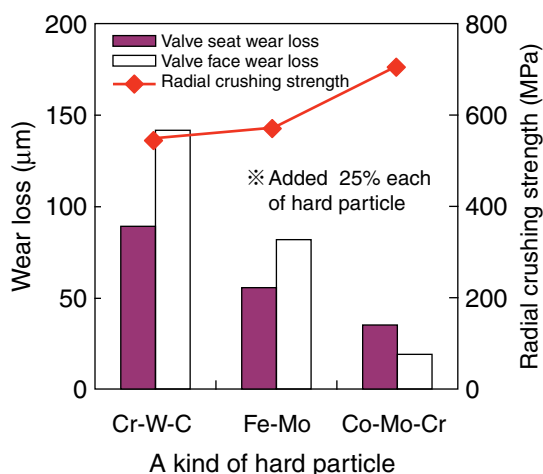


Fig.9 Relation between wear loss and radical crushing strength at each hard particle

Cr-W-C系、Fe-Mo系の硬質粒子に比較して、バルブシートと相手バルブフェースの摩耗が少ない。

また、圧環強度が高いことからマトリックスへの拡散性に優れていることがわかる。Fig.10に硬質粒子と動摩擦係数の関係を示す。Co-Mo-Cr系の硬質粒子は、Cr-W-C系に比較して、動摩擦係数が小さく、自己潤滑性に優れる。

5.3. 硬質粒子の最適添加量

Fig.11に硬質粒子の添加量と耐摩耗性、圧環強度の関係を示す。耐摩耗性は、硬質粒子の添加量増加に伴い向上するが、添加量が35%以上で飽和傾向を示す。逆に圧環強度は、硬質粒子の添加量増加に伴い減少傾向を示す。

Co-Mo-Crの添加量は、ガソリン用バルブシート材に対し大幅に増やした。実機テスト結果から吸気側は25%、排気側は製造上の限界から40%とした。

5.4. 自己潤滑性の付与

自己潤滑性を具備させるため、吸気側にはPbを封入した。一方Pb封入によるネガとしてPbの融点(327℃)よりも高い温度で使用するとPbの熱膨張によりマトリックスの脆化を引き起こす点が指摘されている¹⁾。実際に排気側にPb封

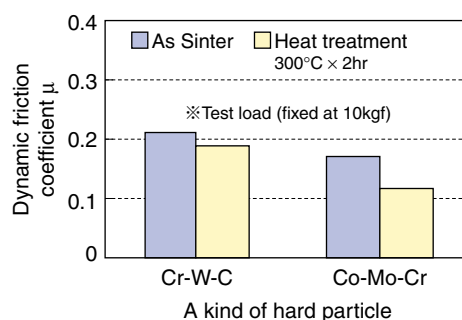


Fig.10 Coefficient of kinetic friction at each hard particle

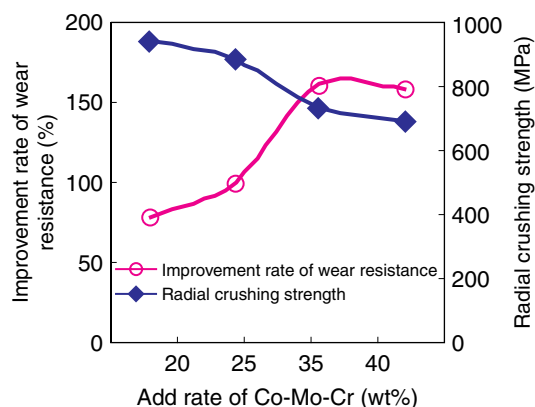


Fig.11 Relation between wear loss and radical crushing strength at amount of hard particle

入品を試したところ、空隙の粗大化が認められたため、排気側は封入なしの仕様とした。また、被削性の改善を狙いMnSを2%添加した。このMnSは、被削性以外に自己潤滑性にも寄与している。

製法としては、ベース粉の合金化と硬質粒子量増加に伴う成形性の悪化を補うため、成形は2P-2S(2回プレス-2回焼結)を採用した。また、焼結はより一層焼結の促進を図るため、真空雰囲気を採用した。

CNG用バルブシートの合金設計に当たり、対応手法の考え方と具体的に対応した内容について、Fig.12に示す。

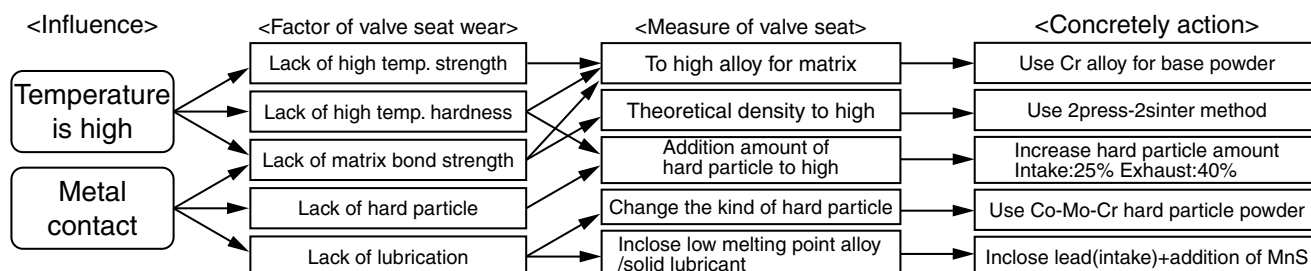


Fig.12 Way of achievement and concretely action

5.5. 開発材の仕様

Table 5に開発材の化学成分と密度、硬さを示す。

Table 5 Chemical composition, density and hardness of developed material

Chemical composition (wt%)								
	C	Ni	Cr	Mo	Co	Pb	S	Fe
Intake	0.9	5.5	3.5	6.5	17.5	11.5	0.75	Bal
Exhaust	1.0	6.0	5.0	11.5	24.0	—	0.75	Bal

	Density (g/cm ³)	Hardness (HRA)
Intake	8.0	70
Exhaust	7.15	57

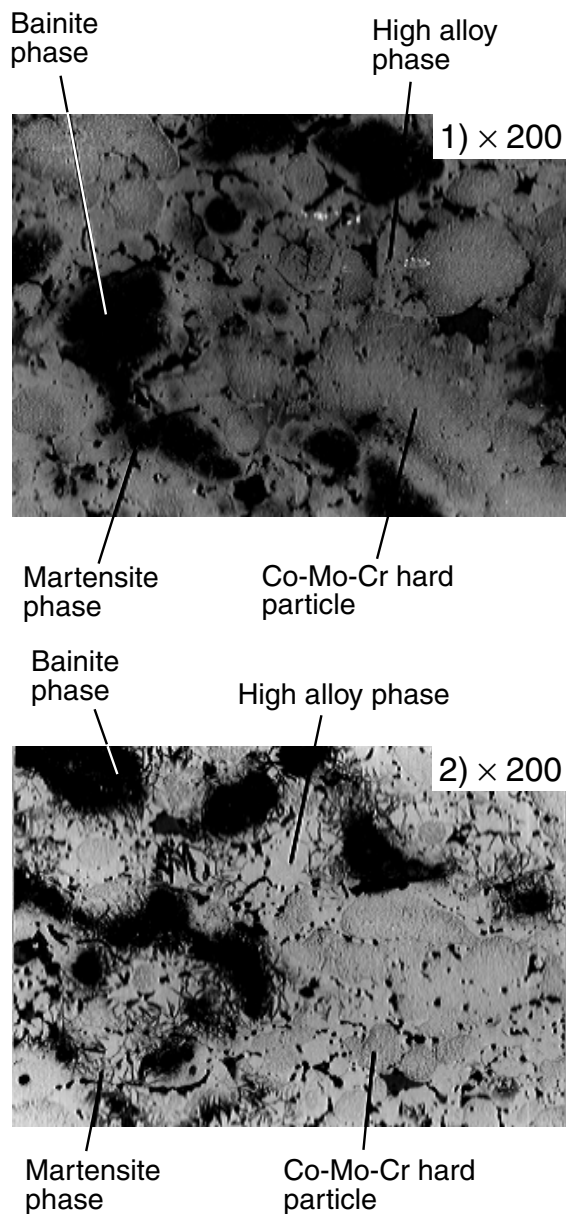


Fig.13 Microstructure of developed material for
1) Intake valve seat
2) Exhaust valve seat

Fig.13 - 1)に吸気側, 2)に排気側バルブシート材の組織写真を示す。

Fig.14にガソリン用バルブシート材とCNG用開発材の材料組成の比較を示す。吸気用開発材は、ガソリン用シート材に比較して、固体潤滑剤、硬質粒子、高合金相が大幅に増加した仕様となっている。同様に、排気用開発材は、固体潤滑剤、硬質粒子が増加しているのが特徴である。

相手のバルブ材仕様としては、バルブシートとの相性を確認し、ガソリンエンジンのバルブ仕様に対し、バルブフェース面は、吸気側に軟窒化(LCN)処理を、排気側にCo-Mo-Cr系の盛り金の追加処理を施した。

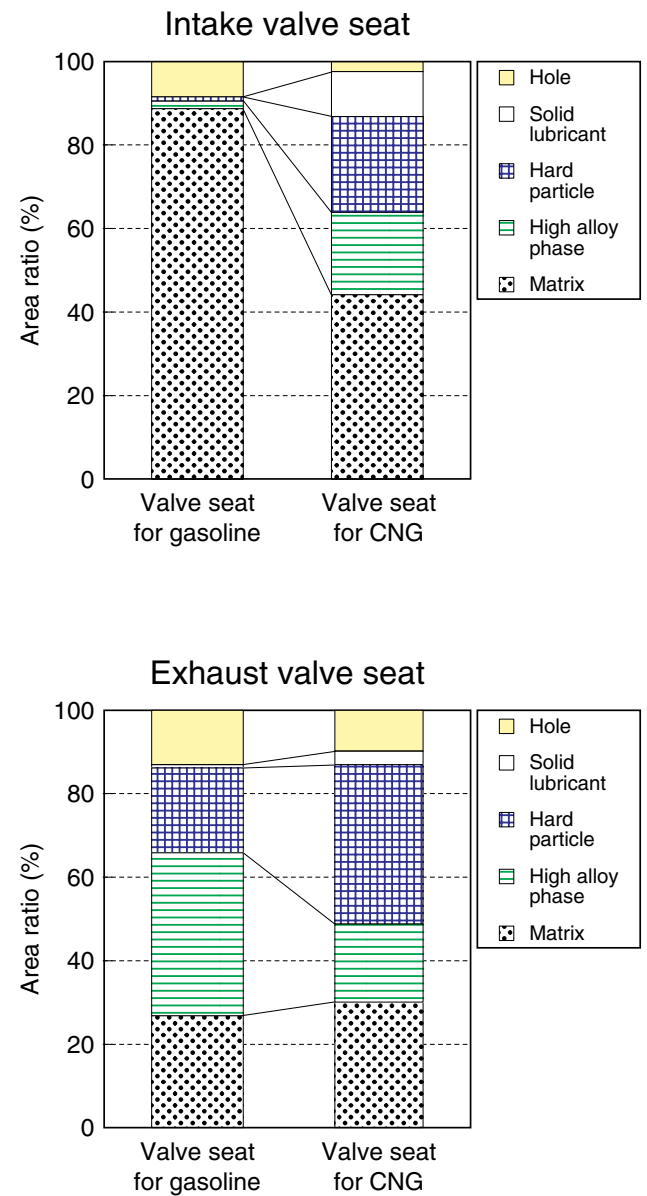


Fig.14 Compare of gasoline and CNG for material composition

6. 耐摩耗性

6. 1. 単体摩耗特性

Fig.15にリグ摩耗試験結果を示す。開発した材料は、バルブシート材の摩耗量で、ガソリン用バルブシートに比較しておよそ1/8に低減した。比較材として、高Cr鋳鉄や合金工具鋼SKD61材の摩耗結果も示すが、バルブシート、バルブフェースとも大きい摩耗量を示した。

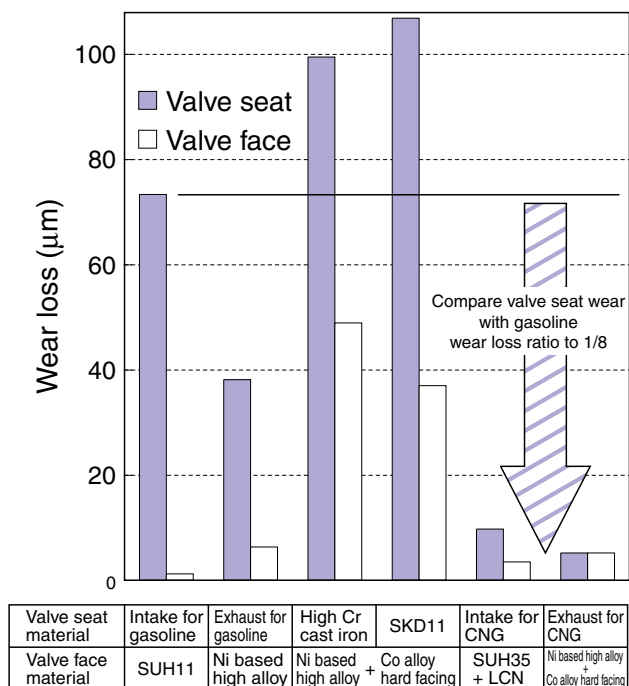


Fig.15 Wear loss of valve seats and valve faces in rig tests

6. 2. 実機台上耐久試験における摩耗特性

改良を重ねることにより、開発した材料の耐摩耗性は大幅に向上し、ガソリンエンジンの摩耗量を下回るレベルを達成した。Fig.16に全開全負荷運転時における四つのシリンダのバルブおよびバルブシート材の平均摩耗量を示す。ガソリン用シートをCNG燃料で運転した時の摩耗量に比べて、CNG用に開発した材料は、吸気側バルブシートの場合1/500に、排気側バルブシートの場合1/50に摩耗量を低減できた。

7. 被削性

通常、バルブシートは、シリンダヘッドに圧入後、シート面に切削加工を施し使用されるため、被削性は、生産性の中でも重要な項目である。当開発材は、耐摩耗性の向上を狙い、マトリックスの強化や硬質粒子添加量の増加を

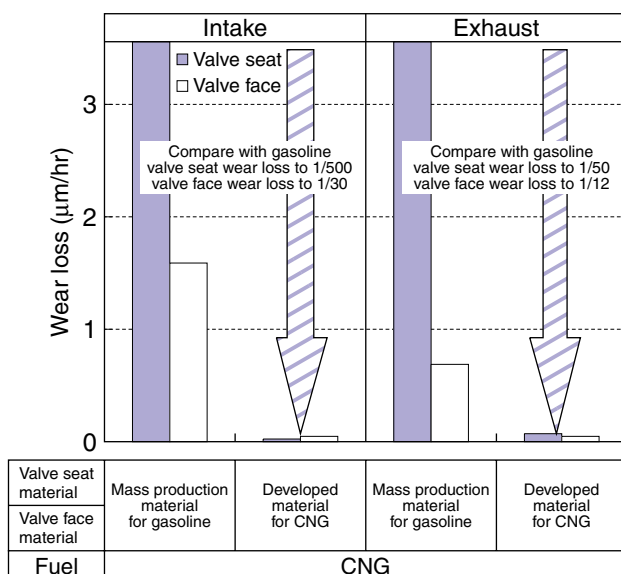
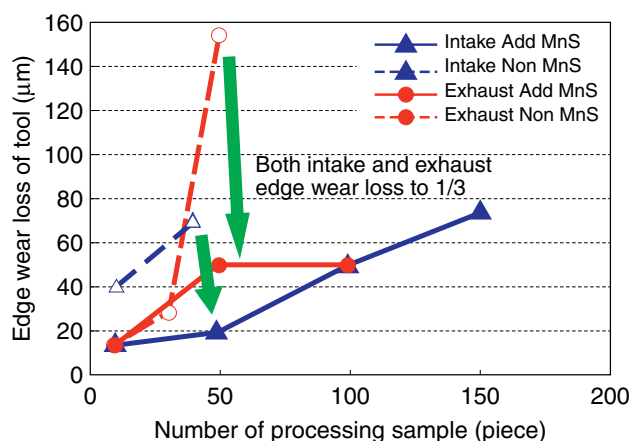


Fig.16 Wear loss of valve seats and valve faces in bench tests

行っており、被削性の低下が予測されたため、快削元素を添加することにより、被削性の改善を図った。Fig.17にシート面の切削試験結果を示す。快削元素であるMnSを2%添加することにより、刃具すくい面の摩耗量を1/3に低減できた。また、このMnSは自己潤滑性を有することから被削性の向上以外に、耐摩耗性の向上へも寄与していると考えられる。



<Test condition>

Velocity	Intake : 80m/min, Exhaust : 62m/min
Feed	f1=0.15, f2=0.13mm/rev
Cut	0.5mm × 2
Tool material	Intake : BZN, Exhaust : BNX-4

Fig.17 Evaluation of machinability for valve seats

8. まとめ

CNG用エンジンの開発を通して、ガス燃料使用下における摩耗メカニズムを解析し、ガス燃料用に適したバルブシート材を開発した。

開発した材料の特徴をまとめると以下のとおりである。

- (1) ガス燃料特有のドライ環境下での耐摩耗性を確保するため、マトリックスの合金化を図ると共に自己潤滑効果を有する硬質粒子として、Co-Mo-Crを採用した。
- (2) 耐摩耗性と相反する被削性の向上を図るため、MnSを添加した。
- (3) 本材料を適用することにより、ガソリンエンジンと同等の耐摩耗性が得られた。

なお、本合金を用いたバルブシートは、1998年式の圧縮天然ガス専用車シビックGXに適用されている²⁾。

参考文献

- 1) Fujiki A., Kano M. : New PM Valve Seat Insert Materials for High Performance Engines, SAE Paper 920570
- 2) 新井, 村石 : ホンダ圧縮天然ガス専用乗用車, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, P.17-24 (1997)

■ 著 者 ■



佐藤 克明



緑川 輝明



山崎 安弘



高橋 輝夫