

技術資料



Technical Data

自動車用中空エンジンバルブの最新技術

熊谷隆暁*¹, 土山宏幸*¹, 高野雄次*²

The Newest Technology of Hollow Engine Valves for Automobile

Takaaki Kumagai, Hiroyuki Tsuchiyama, and Yuji Takano

Synopsis

Although a high compression ratio raises thermal efficiency, it is difficult to apply a high compression ratio to a gasoline engine. One of the barriers is the occurrence of knocking caused by combustion temperature rise leading to serious torque down. As one of the measures, the necessity of a high efficient engine part using of sodium filled hollow valve is increasing.

This article shows the influences of the hollow form (diameter of a stem hollow and head hollow, etc.), the amount of sodium, and the size and amount of getter material on the valve surface temperature.

As a result, the following things became clear.

- 1) The valve temperature decreases by enlarging the diameter of stem hollow.
- 2) The valve temperature decreases by reducing the amount of sodium from 55 % to 30 % in the hollow capacity.
- 3) The getter material adsorbs the gas and it improves the effect of valve temperature by cooling it down, furthermore, stabilizing this effect.

1. 緒言

近年、地球温暖化防止の観点から自動車における燃費・排出ガス規制は年々厳しくなっている。そこで、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車などの次世代自動車の開発が活発に行われているが、世界の自動車生産台数は2020年に年間1億台を超え、約9割はエンジン車という予測¹⁾から今後も主流は内燃機関であり、更なる改良が必要である。燃費改良技術として高圧縮比化による熱効率向上を狙った場合、燃焼温度が上昇しエンジンバルブにとっては過酷な使用環境となり、より耐熱性のあるニッケル基材などを使用して対応してきた。しかし、過給ダウンサイジングなどにより更なる高圧縮比化を狙うと異常燃焼（ノッキング）が発生^{2), 3)}するため、燃焼室内を冷やさなければならなかった。そこで燃焼室内を燃料の気化熱を利用して冷やすために、より

多くの燃料が消費されてしまい燃費は悪化してしまう。よって、高圧縮化には限界があると考えられていた。

本報では燃費改良技術として、自動車用内燃機関の熱効率向上へつながる部品として注目されている中空エンジンバルブの開発・設計をしてきた経緯を踏まえ、最新技術を報告する。

2. 中空エンジンバルブとは

Fig. 1に代表的な中空バルブを示す。主な材質はSUH35で排気バルブに使用されることが多い。軸内部が中空になっており、金属ナトリウムを封入している。金属ナトリウムの融点は98℃と低く、また熱伝導率も良いことから、エンジン実動時は液体となり、バルブの動きに合わせて上下運動（シェイキング）することで燃焼室側から受けた熱を効率よくバルブガイドへ伝熱する

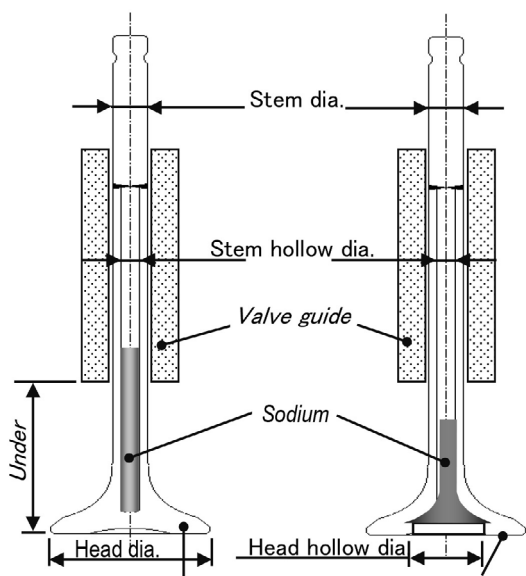
2014年10月31日受付

* 1 フジオーゼックス(株)技術開発部(Engineering Development Div. FUJI OOZX Inc.)

* 2 フジオーゼックス(株)CS推進部(CS promotion Div. FUJI OOZX Inc.)

ことができる。このことから、バルブ傘表（燃焼室壁面部）の温度が低下しノッキング対策として注目されており、燃焼室壁面温度を更に冷却することで燃費向上を図ることができる。

しかし、更なる高冷却バルブを開発するにあたり、その信頼性を検証するために実働時の温度を把握する必要がある。そこで、中空形状やナトリウム封入量などのバルブ温度影響について検証を行った。



Top head (Combustion chamber surface)

(a) Stem hollow valve (b) Head and stem hollow valve

Fig. 1. Stem hollow valve (a), Head and stem hollow valve(b).

3. 実験方法

排気バルブの温度計測方法の手段として硬度法を用いる。この手法は金属の硬度が焼き戻し温度によって変化する現象を利用し、試験後の表面硬度からバルブが到達した最高温度を知る方法である。

供試品材質はSUH3としバルブ完成形状に加工後、焼入れ（1050℃×0.5h）を実施した。また、供試品と同時に作製したバルブを用い焼き戻し曲線を調査し、素材成分および焼入れ条件の影響を極力最小限に抑えることとした。

比較する供試品仕様をTable 1に示す。現在、既に量産している軸中空バルブに対し、中空径変更や傘内部まで中空にした傘中空バルブでの形状比較やナトリウム封入量、およびガス吸着材（ゲッター）を同封することでのバルブ温度変化を比較実験した。実験にはTable 2の供試エンジンを使用し、Table 3に示す運転条件で実施した。また、エンジンを停止させる時は排ガス温度が試験条件温度より上昇または急激に冷却しないよう注意しながら段階的に回転数および負荷を落としていく手法を取った。

Table 1. Valve specification.

	Valve type		
	Solid valve	Stem hollow valve	Head and stem hollow valve
Head diameter	φ 25.7 mm		
Stem diameter	φ 5.5 mm		
Stem hollow diameter	/	φ 3.0 mm or φ 3.5 mm	φ 3.0 mm
Head hollow diameter		φ 10 mm or φ 12.7 mm	
Sodium filling ratio		55 % or 30 %	75 % or 55 %
Getter size		without, 15 %, 25 % (powder), one piece or two pieces (φ 2 mm sphere)	

Table 2. Engine specifications.

Items	Specifications
Engine type	Gasoline, In-line 4 cylinder (L4), Turbocharger
Displacement	1.6 L
Bore × stroke	79.7 mm × 81.1 mm
Compression ratio	10.5
Max. power	140 kW / 5600 rpm
Max. torque	240 Nm/1600~5200 rpm

Table 3. Test conditions.

Items	Conditions
Engine speed	5600 rpm
Engine load	Wide open throttle
Oil temperature	80 °C
Water temperature	80 °C
Retention time	1 hour

4. 実験結果

4. 1 中実バルブと軸中空バルブの温度分布比較

現在量産している軸中空バルブについて、比較用として温度分布データの採取を行った。軸中空径φ 3.0 mm、ナトリウム封入量は中空体積比 55 % である。エンジンは気筒毎に排ガス温度が異なるため、バルブ温度に影響をきたす。この温度分布比較では排ガス温度が最も高いシリンダ #4 の結果を代表として説明する。

Fig. 2 に中実バルブと軸中空バルブの燃焼室壁面である傘表の温度分布を示す。Fig. 3 にバルブ軸方向である傘裏の温度分布を示す。

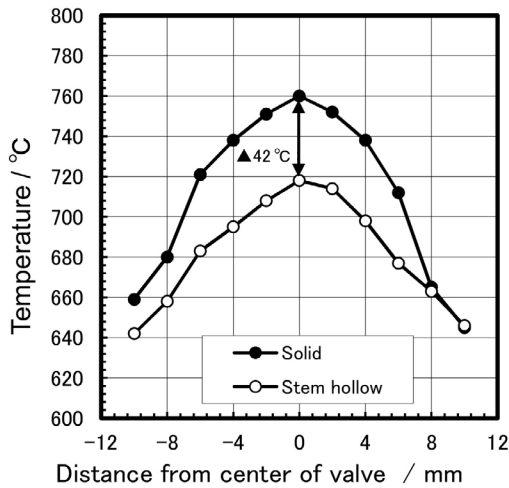


Fig. 2. Surface temperature distribution of top head portion.

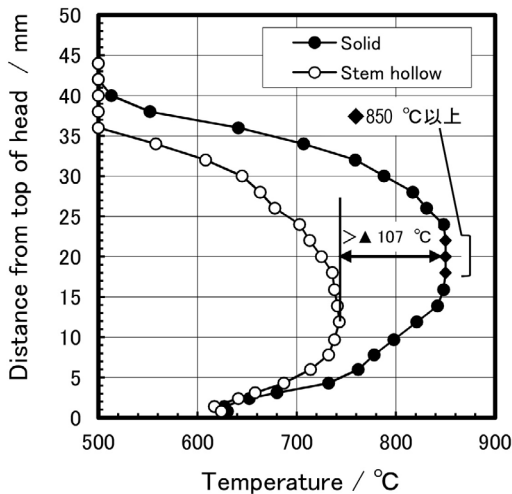


Fig. 3. Surface temperature distribution of under head portion.

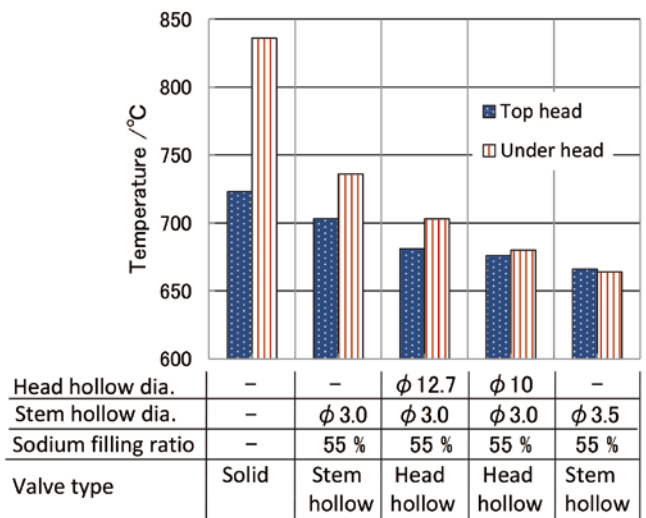
中実バルブに対し軸中空バルブの表面温度は明らかに低下していることがわかる。Fig. 2 では燃焼室壁面温度の最高温度が 42 °C も低下しており、やはりノッキング対策となりうる。

硬度法は、SUH3 材の焼き戻し曲線より 850 °C 以上になると硬度変化の温度依存性が小さくなるため、精度が良くないという弱点がある。よって、Fig. 3 からは中実バルブの傘表から 18 mm ~ 22 mm までは 850 °C 以上であるということしか判断できず、正確な温度がわかっていないが、軸中空バルブは 107 °C 以上の冷却効果があると考えられる。なお、中空形状による剛性低下は、温度低下による材料強度向上で補填できる。

4. 2 形状の違いによる温度比較

Fig. 4 に形状の違いによる最高温度比較を示す。上記した Fig. 2 および Fig. 3 と同様に温度分布を確認したのち、その範囲内にある最高温度のみを抜粋し、各気筒間のバラツキを相対的に比較するため平均したものである。

傘中空バルブにて冷却効果がみられ、傘中空内径φ 12.7 mm とφ 10.0 mm では、φ 10.0 mm の方が僅かに温度低下した。しかし、それよりも軸中空バルブにて軸中空径をφ 3.0 mm からφ 3.5 mm へ拡大させた方がより冷えることが分かった。



Head hollow: Head and stem hollow

Fig. 4. Temperature comparison by hollow form.

4. 3 ナトリウム封入量による温度比較

Fig. 5 にナトリウム封入量違いによる最高温度比較を示す。データは Fig. 4 同様に各気筒の最高温度平均値である。傘中空バルブは軸中空バルブよりも中空容積が大きいため、中空容積比率 55 % のナトリウム量を封入してもナトリウムがバルブガイドの位置まで到達しない。軸中空バルブと同様位置まで封入させるためには 75 % のナトリウムが必要になる。結果的には 75 % よりも 55 % の方が温度低下した。軸中空バルブについてはナトリウム封入量を 55 % と 30 % で比較検証した。55 % よりも 30 % の方が僅かだが温度低下した。

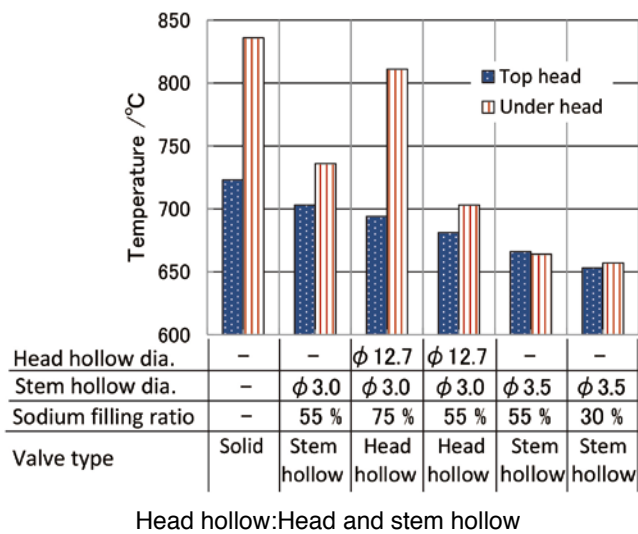


Fig. 5. Temperature comparison by sodium filling ratio.

4. 4 ガス吸着材(ゲッター)封入による温度比較

ゲッター材を封入する目的は、中空部に封入されたナトリウムと残留酸素が反応して酸化ナトリウムになることを防ぐこと、および残留ガス(酸素・窒素)を吸着して内部を負圧にすることである。酸化ナトリウムは融点が上昇することから、温度の低い軸端側へ移動した時に固着し動かなくことが懸念される。また、負圧化することでナトリウムの動きがスムーズになり、シェイキング効果をより発揮することを期待した。さらには固形物による攪拌効果⁴⁾も期待し比較検証した。ゲッター材にはチタンの粉末とφ 2 mmの球を準備し、それぞれの封入量による比較検証をした。チタンは 300 °C 付近でも酸素を幾分吸収し、500 °C 以上から吸収速度が急激に増加する。窒素についても 600 °C ~ 700 °C 付近から吸収速度が急激に増加する⁵⁾

Fig. 6 にゲッター材封入による最高温度比較を示す。データは Fig. 4 同様に各気筒の最高温度の平均値である。

軸中空バルブ、傘中空バルブともに粉末のゲッター材を封入することで温度低下した。軸中空径φ 3.5 mmの軸中空バルブでナトリウム封入量 30 %においては、ナトリウム質量比率で粉末ゲッター量を 15 %と 25 %で比較すると、粉末ゲッター 25 %封入したものが最も効果があった。傘中空バルブのゲッター材を封入していないものと比較すると傘表で 46 °C、傘裏で 68 °Cも低下した。球体のゲッター材については 1個よりは 2個封入したものが僅かに温度低下したものの、粉末ゲッター材と比較するとあまり温度が低下しなかった。また、ゲッター材を封入していないものは冷却効果のバラツキが大きいが、ゲッター材を封入したものは安定した冷却効果がみられた。

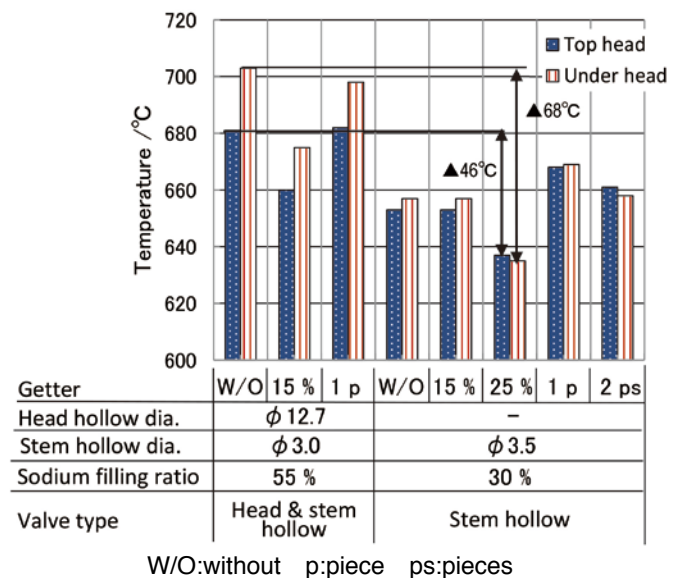


Fig. 6. Temperature comparison by getter.

5. 考察

5. 1 形状差異について

軸中空径がφ 3.0 mmよりφ 3.5 mmの方が冷却効果を得られたのは、軸中空径を大きくすることでナトリウムが摺動し易くなり、軸部肉厚が薄くなるためガイドへの熱引けが向上するためと推測している。また、傘中空内径がφ 10.0 mmよりφ 12.7 mmの温度が低下しなかったのは、傘中空内径を大きくすることで傘内部にナトリウムが滞留し、ナトリウムが軸部方向へ摺動することを阻害してしまったためと推測している。

ただし、傘中空バルブについては軸中空径をφ 3.0mmとした場合の調査のみであるため、今後は傘中空バルブにおいても軸中空径をφ 3.5 mmとした場合、ナトリウム摺動性の変化による冷却効果を確認する必要があると考える。

5. 2 ナトリウム封入量について

傘中空バルブのナトリウム封入量を75%と多くすることでガイドからの熱引けを狙ったが、逆にナトリウムの移動スペースが狭くなったため摺動性を阻害し、55%の方がナトリウムの摺動性が良く冷却効果があったと推測している。ナトリウムの物性値として熱伝導率は良いが、封入量を多くしても抜熱に寄与しなく、シェイキング効果による抜熱が寄与することが明らかとなった。

軸中空バルブのナトリウム封入量を30%と少なくしても55%と同等以上の冷却効果であった。燃焼室側からの受熱量がナトリウムのシェイキング効果による抜熱量を越えない限りはナトリウム封入量を少なく設定できると判断する。しかし、一方で残ガス量が多くなることにより、ナトリウムの摺動性の悪化や酸化影響を十分に考慮しておく必要がある。

5. 3 ゲッター封入について

ナトリウム封入量30%は封入量が減ったことで残ガスが多くなり、ナトリウムの摺動性が悪化すると考えられた。粉末ゲッター材15%より25%の冷却効果が高かったのは、ゲッター材を多く入れたことで酸素などのガスをより多く吸着したためと推測している。

粉末ゲッターが球体ゲッターより冷却効果が高かったのは、球体ゲッターに期待した攪拌作用による効果は認められず、粉末ゲッター材の方が表面積が大きく、ガス吸着に有利に働いたためと推測している。設計の信頼性を確保するためには確実に温度低下することが必要であるが、ゲッター材を封入することで安定した冷却効果を発揮することがわかった。

6. 結 論

ナトリウム封入中空バルブにおいて、中空形状、ナトリウム封入量およびゲッター材の大きさや封入量を変化させ、バルブ表面温度に及ぼす影響を調査した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 軸中空径やナトリウム封入率が同一であれば傘中空バルブの冷却効果はあるものの、軸中空径を大きくし、抜熱効果を高めた軸中空バルブの方がより優れた冷却効果を発揮した。
- 2) ナトリウム封入量を中空容積対比の55%から30%に減らすことで、シェイキング効果をより発揮し、冷却効果が大きくなる。
- 3) ガス吸着するゲッター材を同封するとナトリウムの摺動抵抗が減少し、安定した冷却効果が得られる。

最近のバルブ動向では、冷却性を更に高めるために傘内部まで中空化する動きがあるが、中空形状やナトリウム封入量などの設計条件次第では冷却性が劣ることがわかった。燃焼室壁面からの受熱を効率的にバルブガイドへ抜熱するためには、バルブ開閉の動きによりナトリウムをいかに上下にシェイキングさせるか、それぞれのパラメータを最適値に設計した方が冷却効果を向上させることがわかった。

よって、本調査において冷却効果が傘中空バルブに劣らない軸中空バルブ、『スーパー軸中空バルブ』を開発することができた。なお、量産現場においては傘中空加工の製造性に課題が多くあり、円滑で安定した製造性と加工コストの両面において、スーパー軸中空バルブの方が断然優れている。

(文 献)

- 1) IHSオートモーティブまとめ
- 2) H. Baek, S. Lee, D. Han, J. Kim, H. Aino : SAE technical paper, 2014-01-1639(2014) .
- 3) 田中宣行, 岩出純, 川田明彦: 自動車技術会学術講演会前刷集, No.137-14(2014), 13.
- 4) 原信夫: 特許第 2711301号
- 5) 岩柳秀夫: 日立評論, 38(1956) 9, 87