

近年、産業界の要求と環境規制の強化を受けて自動車用エンジンメーカーの設計者は性能とは対極にある問題と向き合っています。自動車メーカーの要求は燃費の向上と排ガスの減少であり、それに応えるためにエンジンは高過給小型化へと向かっています。

しかしスポーツカーや高級車はそれなりの性能を維持しなければなりません。自動車メーカーは、規制違反のペナルティを避ける為、評判やマーケットシェアを犠牲にすることはできないのです。その解決策は小型化を図るとともにBMEP（正味平均有効圧）を最大化することです。レーシングエンジン設計者はまさに芸術的な設計を要求されているのです。

小型化における一つの制約は燃焼室の材質が、エンジン排気量に対して従来よりも高いBMEPによる高温高圧に耐える材料でなければなりません。バルブガイド、バルブシート、ピストンリングなどの材料はホットスポットから冷却液に熱を逃がす間でも間隙の精度を維持できるものでなければなりません。

マテリオンは30年以上にわたりレーシングカー用の材料を供給してきましたが、その材料を用いることによる効果をデータ化して公表することはありませんでした。この資料は設計者やレーサーに材料選択のヒントを提供することを目的としています。

マテリオンの監修のもと、GE Precision Engineering社では各種材料を調査し、CFD（計算流体力学）によるシミュレーションと単気筒エンジンのダイノテスト（ダイナモテスト）を実施しました。

CFDの目的は、マテリオンの合金を用いることによって部品、特に高熱伝導バルブシート、ガイド、圧縮リングの温度がどのように変化し、それがバルブ、シリンダーヘッド及びピストンにどのような影響を及ぼすかを調べることであります。CFDのモデルは、SAE論文 2014-01-1185 の「経済の拡大

とエンジンの限りなき小型化」に述べられている超過給エンジンです。ダイノテストでは 2500CC Moto3 エンジンを用いて、マテリオン材と一般材との機能比較が行なわれました。

背景

EUと米国では、車の排気管からの排出物を直接的または燃焼効率の改善に因って減少させるべきとの法律を施行しています。近々の課題はEUにおけるCO₂排出規制で、走行1Km当たりのCO₂排出量をミリグラム単位で規制しており、2020年以降は違反者に対して厳しいペナルティが課せられることになっています。その対応策として車両の軽量化やハイブリッド化が考えられていますが、その先は技術的な壁や価格的な制約があり、車体設計の抜本的な見直しや製造工程の大幅な変更が必要になってきます。

自動車メーカーは、この大きな改革を短時間で達成するために、エンジンの小型化に注目しています。排気量を減らし気筒数も減らすことによって軽い負担で温室効果ガスの発生を減らすことが可能と考えているのです。

エンジンを小型化すれば燃費は当然向上します。しかし、スポーツカーや高級車のメーカーは燃費の向上や排気物の減少のために性能を犠牲にすることは避けたいと考えています。それら自動車メーカーはペナルティから逃れるとともにマーケットシェアを高めることも考えています。その手段はBMEPを高めてBSFC（正味燃料消費率）を下げた小型高過給エンジンの採用です。この技術的挑戦はレースカーエンジンの設計においても同じで、燃焼システムの限界に挑む開発が行われています。

BMEPの最大化

BMEPはダイノテストで測定したエンジン単位排気量当たりのトルクに比例します。自然吸気および過給の小型エンジンの一般的なBMEPを高性能仕様車とレーシングカーで比較すると表1のようになります。

表 1

エンジン型式	高性能仕様車 (ガソリン)	レーシング
自然吸気 BMEP (bar)	12-14	>15
過給 BMEP (bar)	24 (小型化)	>35

小型過給エンジンの目標は過給レーシングエンジンの値に近い30barを超えることですが、レーシングエンジンの場合、寿命に対する要求度は高くありません。エンジンの設計者は現在、レーシングカー設計者が長年直面してきた問題と向かい合っています。

- 高いシリンダー圧とピストンへの熱負荷
- 高温、特にピストンクラウン、ピストンリング、圧縮リング、排気バルブブリッジおよびバルブ
- 高い排気温度によるノッキングと早期着火の発生

燃焼室の各部品は高温高圧に耐えるだけでなく、熱を効率よく分散し冷却液に逃がす役割も果たさなければなりません。

材料の選択

量産型自動車用のバルブ、バルブシート挿入物、バルブガイド、ピストンリングなどには、耐久性とコストの観点から鉄系材料が用いられてきました。しかしレーシングカーでは、バルブシート材やガイド材として鉄系材料は摩擦係数が高く熱伝導率が低いため効率的な高BMEPエンジンには適さないとされています。

銅系合金は伝導率が高く摩擦係数が低いのでレーシングバルブやバルブシート材として一般的に使われており、マテリオンのアロイ3 (C17510)、アロイ10X、アロイ25 (C17200)、パフォーメット、ブロンズ系のエクイメットなどが含まれています。これらの材料はいずれも強度、熱伝導率、熱膨張係数、耐摩耗性および摩擦特性、疲労強度、耐食性などにおいて前述の用途に適した性状を有しています。ピストンリングについて見ると次のような特性があります。

1. 伝導リングのグループ（溝）をクラウンにより接近させてクレビス（隙間）を小さくすることができます。
2. リング材料の摩擦が低いのでコーティングの必要がなくピストンリング部品の摩耗も減らすことができます。

表2に、上記のような検討に基づいてGEPETESTに選ばれたマテリオン材の性状を一般材と対比して示します。評価の対象として、エクイメット3 AT110 と新たに開発されたシリカ添加による強化ブロンズのパフォーメットをとりあげました。

表 2

	硬度 Hv	熱伝導率 W/m ² K	用途
1) GOE65	360 (芯)	50	ピストンリング
2) FM-3115	525	41	バルブシート
3) PMF 10	163	38	ガイド
4) GOE52	327	36	ピストンリング、バルブシート
5) アロイ 25 HT	363	105	バルブシート、ガイド
6) アロイ 3 HT	238	240	バルブシート
7) 10X HT	195	225	バルブシート
8) パフォーメット	302	160	バルブシート、ガイド
9) エクイメット 3 AT110	302	38	ガイド
10) エクイメット 3 TS95	222	38	ガイド
11) パフォーメット	324	160	ピストンリング

- 1) Goetze クロム鋼 2) Federal Mogul 3) Federal Mogul
- 4) Goetze スピノダルグラファイト鋳鉄 5)~10) マテリオン
- 11) 開発途上の推定値

熱解析

GE Precision Engineering社は部材の熱伝導率を高めるとその局所温度をかなり低く抑えることができると仮定しました。そこで熱解析モデルに表2の性状値を入力してシミュレーションを行いました。モデルの境界条件は超過給プロジェクトで用いたテスト用



図1

エンジンをベースにしています。図1のテストエンジンはジャガー/ランドローバーの5リッターV8エンジンを2リッター直列4気筒に改造したもので、図2に超過給のトルクカーブを示します。

超過給 5.0L V8 2.0L I4 →
[シリンダー内径 83mm, ストローク 92mm]

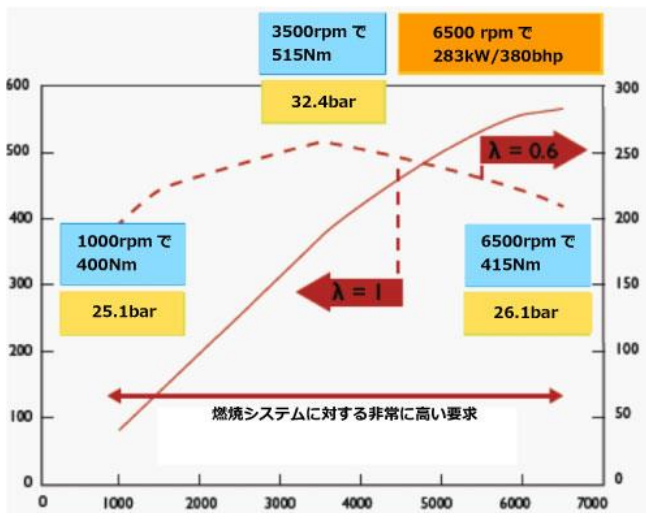


図2

CFD (計算流体力学) 解析はエンジンのバルブを閉じた状態での単純化した静的モデルで行いました。図3のモデルは一体材料のみで構成されその設定項目は

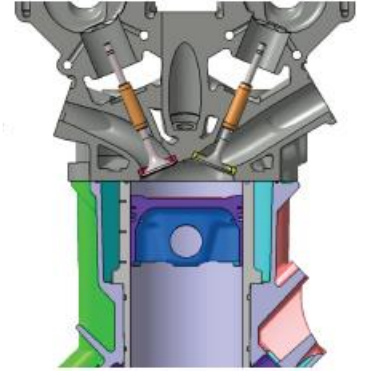


図3

- シリンダー内面からの熱入力。
- 水冷部と外表面の固定温度
- クラウン下のピストンと露出したバルブの表面の熱伝達係数 (ポートとタペットチェスト)。
- 圧縮リングとライナー間の油膜およびバルブとガイド間の空気による熱抵抗。
- 熱伝達は固体間の熱伝導のみとし、対流はないものとする。
- モデルシリンダーの一方側の分割表面は断熱状態とみなす。

流れは整流とし固体部に熱伝達が行われるものとしています。図4はステージ1のモデルのCFDメッシュをスライスしたものです。解析で用いた部品材料の熱伝導率を資料Bの表3に示します。代表的な境界条件を資料Bの表4に示します。

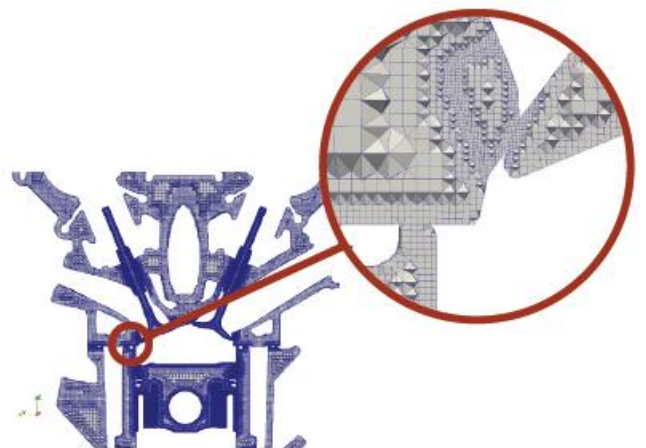


図4

各コンポーネントの平均温度および最高温度は、バルブシート、ガイド、リングの熱伝導率によって異なります。結果を資料Bの図5に示します。

結果の中で顕著なものは次の通りです。

- パフォーマンス製のトップリングと鉄製のトップリングとの比較における最も顕著な温度の低下を図5に示します。高熱伝導圧縮リングはピストンの温度を顕著に下げています。材料の耐久性を別にすればマテリオン材の使用は燃焼室の寿命を延ばすことに繋がると考えられます。その一例はピストンリンググループをピストンクラウンに近づけることができるのでクレビスを減少させることができ、さらに、ノッキングが減少して点火装置の効率を上げることも可能になります。
- パフォーマンス製の排気バルブシートと鉄製の排気バルブシートとの比較における温度の低下

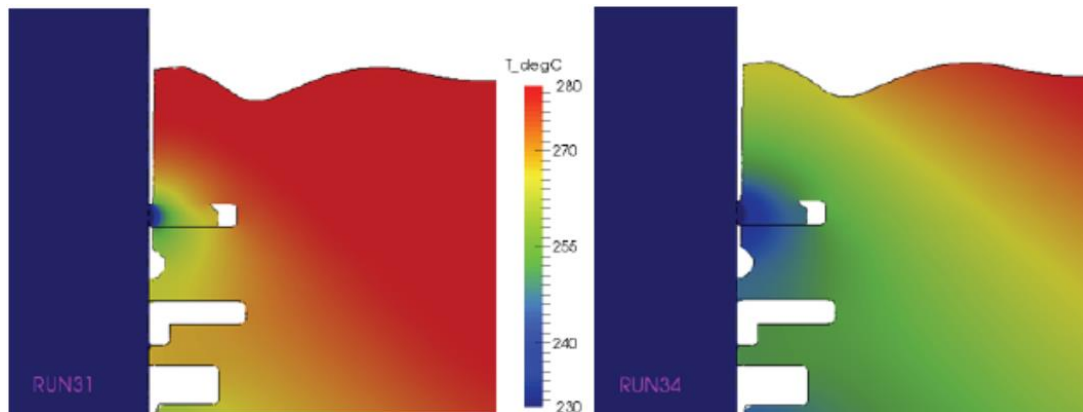
を図6に示します。バルブシートの熱伝導率の増大によってバルブシートとバルブの境界面温度は48°C低下し、バルブの最高温度も47°C低下しています。注目すべきは最大排気ブリッジ温度が70°C低下していることで、これにより大きな径のバルブシートの使用が可能になり、更に温度に起因するクラッキングを抑えてより強固なシリンダーヘッドの設計ができるようになります。

- 一体型バルブシャフトを有するバルブに用いられているバルブガイドの温度低減効果はバルブシートほどではありませんが、これはモデル中のバルブとガイド間の空隙によるものと考えられます。実際の性能は、特にナトリウム充填バルブにおいては違った結果になると考えられます。

図5 パフォーメット製トップリングによる部品温度の顕著な低下

鋼製トップリング

パフォーメット製トップリング



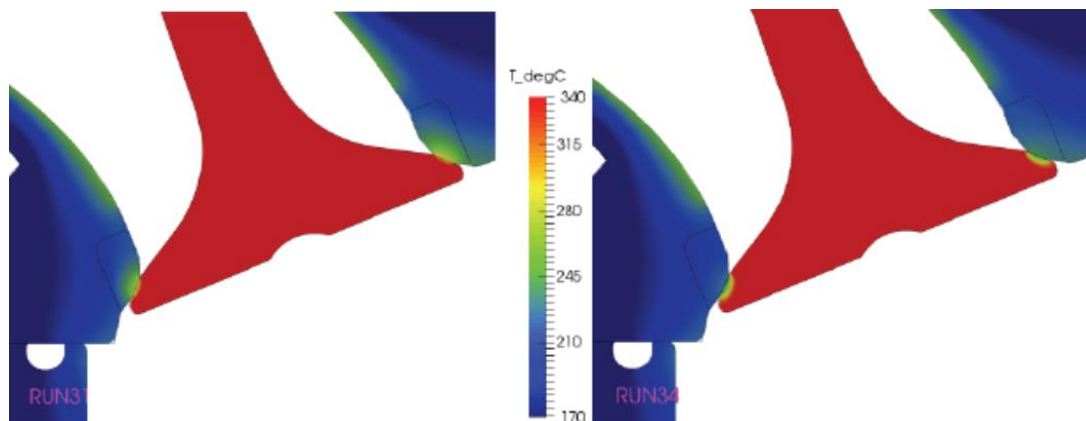
パフォーメット使用による部品温度の低下

圧縮リング最大	-22° C
ピストングループ上端平均	-21° C
ピストンクラウン最大	-19° C
ピストン平均	-17° C

図6 パフォーメット製排気バルブシートによる部品温度の顕著な低下

鋼製排気バルブシート

パフォーメット製排気バルブシート



パフォーメット使用による部品温度の低下

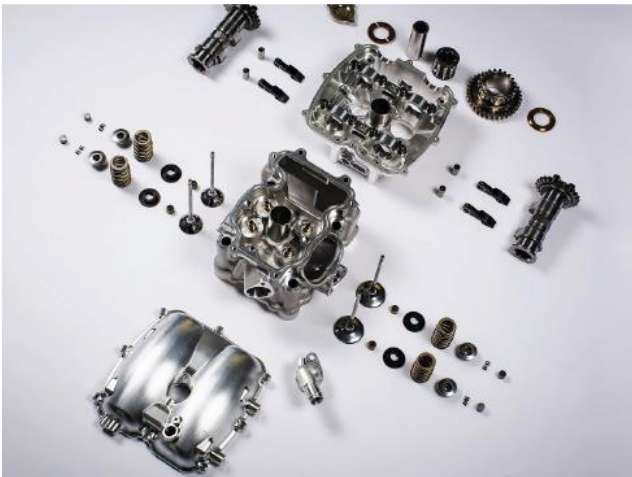
排気バルブシート平均値	-11° C
排気バルブ最大値	-47° C
排気バルブ表面平均値	-48° C
排気バルブシート最大値	-64° C
排気バルブブリッジ最大値	-70° C

単気筒エンジンテスト GE250R

言うまでもなく、熱伝導率が燃焼室材料選定時の唯一の要素ということではなく、材料は作動時にかかる熱、圧力、疲労に耐えるものでなければなりません。これらの耐久力はレーストラック上では数時間、一般路上では10万マイル維持される必要があります。

熱伝達解析で用いた材料が必要な機能を発揮することを示す証拠を得るために、GE250R、GPEの単気筒Moto3エンジンに装着したバルブシート、ガイド、圧縮リングでダイノテストを行ないました（このエンジンはレーシングエンジン技術誌の2016年5月号に特集されています）。エンジンの仕様は次の通りです。

- 250CC 単気筒レースエンジン（写真参照）
- Moto3 FIM（国際モーターサイクル連盟）規則
- 13500rpm ~ 55bhp (220bhp/L)



テストプログラムは1500時間のMoto3レースをシミュレーションしたもので、次のような段階で行なわれました。

- ダイナモメータ断続（B I P O）+基準負荷全パワー（X3）

- 耐久テスト（絞りバルブを90%以上開いた状態で5時間）
- 全負荷パワーの繰り返し（X3）

テストでは3種類の材料を用いました。

- 排気バルブシート材料：アロイ3、アロイ10X、パフォーメット
- バルブガイド材料：エクイメット3（AT110, TS95, TS160U 焼戻し）
- 弁材料：Ti-6242Si（CrN PVD コーティング）
- ピストンリング材料：鋼（作動面をDLCコーティング）、エクイメット、パフォーメット

各テストの前後に次の項目を測定しました。バルブの表面状態、バルブガイドの内径、真円度、円筒度、表面粗度、バルブシートの形状。各テストの前後にバルブの漏洩テストも行いました。バルブシートとしてテストされたすべての材料はエンジンに組み込まれた初期の状態から測定可能な変形は見られませんでした。バルブシートの形状は各テストの後でも変わらず、漏洩テストでも変化はありませんでした。

バルブガイド材のエクイメット3とエクイメット3 TS95には変形による摩耗は見られませんでした。またいずれも傷や変形の兆候も見られませんでした。

一方、エクイメット3 TS160U製のバルブガイドは上部と下部に楕円形の摩耗が見られました。楕円の長径は吸入排気面にあたります。エクイメット3 TS160Uはエクイメット3材の中では最も強くかつ硬い材料なので、この現象は予想外でした。スラストブッシュの摩耗テストではTS95とAT110の焼戻し材の摩耗率は、同じテスト条件下ではTS160Uより小さいものでした。GE250Rエンジンはバルブの横荷重を受けた際に他の銅系合金製のガイドにおいても同様の楕円変形を起こすことが知られています。バルブガイドに使われた各材料の寸法変化を表6に示します。

表 6 主な測定結果

合金	吸気ガイド ボア径			排気ガイド ボア径		
	上部 (-3mm)	中間	底部 (-3mm)	上部	中間	底部
TS95	4.000	4.000	4.002	4.005	4.004	4.009
	(新 3.999)			(新 4.002)		
AT110	4.000	4.000	4.001	4.010	4.004	4.011
	(新 3.999)			(新 4.003)		
TS160U	4.030	4.002	4.040	4.009	4.003	4.011
	円筒度 0.037 真直度 0.007 (新 4.000)			(新 4.002)		

注 1 : 記載がない円筒度と真直度は仕様範囲内

注 2 : バルブジャフト径の変位は新より 0.002mm 以内

ピストン（圧縮）リング

研究では銅合金製の圧縮リングも調査し、パフォーメットの熱伝達解析はリング材の熱伝導率向上のメリットを確認しました。リングは十分な耐久性がある他、次のようなメリットが認められました。

熱伝導率向上の効果	メリット
排出ガス温度の低下	ノッキング抵抗の増大 ノッキングしやすいエンジンの早期着火の減少
ピストン温度の低下	ピストンの疲労寿命の増大 ピストン質量の減少
頂部のピストンリング温度の低下	頂部のピストンリンググループをピストンクラウンに近づけることが可能 クレビスの減少 ノッキング抵抗の改善による B S F C と排出物の減少

更にエクイメットまたはパフォーメットが圧縮リングの改善につながる特性が確認されました。

特性	メリット
コーティング不要	コスト低減、破損の減少
弾性率の低下	ボア、ライナーへの適合性改善
摩擦係数が低い	リングとライナーの摩耗減少
アルミに近い熱膨張係数	リングの間隙減少によるブローバイの減少

標準仕様材とマテリオン合金を用いたピストンリングをダイノ B I P O テストで調べ、次いで 3 通りの全負荷性能テストを行いました。エクイメットではわずかな動力損失とブローバイの増加がみられ、その傾向は以降のテストでも続きました。しかしエクイメット製のリングは他の B M E P エンジンでは良好に作動しているので、動力低下とブローバイ増加の原因は設計または製造上の問題であり材料自体の問題ではないと考えられます。エクイメットに関してはこの点についての追加テストが必要と思われる。

一方、パフォーメットでは予想以上に良好な結果が得られました。表 7 に示す通り、パフォーメットでは標準仕様材との比較において動力損失は見られません。また、1 番目と 3 番目の性能曲線の間でブローバイはわずかながら減少しています。これは最初の B I P O の後すぐにリングが固定されたためと考えられます。

表 7

合金	最大動力 (対標準材)		ブローバイ (L/min)		クランクケース 圧力 (mbar)	
	1回目	3回目	1回目	3回目	1回目	3回目
3曲線平均						
標準材	-	-	7	8	450	385
パフォー メット	変わらず	変わらず	8	7	505	445

パフォーマットについては各5時間の耐久テストを3回行い、安定した性能とブローバイを維持することが確認されました。テスト後の検査でも格段の問題は見つかりませんでした。リングの間隙と厚さには変化なし、リングの変形の兆候もなし、ピストンリングの変化も計測限界以下でした。リングの外径は0.003mm乃至0.005mm減少していました。この変化は当初の固定段階で発生したものと考えられ、標準仕様材のピストンリングでも同じ傾向が見られました。

現在までのところ、パフォーマット製のリングに対するCFDとテストの結果は非常に良好で、更に広範な性能ICエンジンでのテストを実施すべき時がきたと考えられます。しかしパフォーマットのリングへの本格的な応用には更に開発が必要で、特に、

量産型車の耐久性目標とされる300,000kmに適合できるかどうかの確認が重要です。また高過給エンジンについて、特に熱かじり抵抗およびリングと代替燃料や各種ライナー材との相性に関する追加テストも必要と思われます。これらのテストプログラムについては現在検討されています。

今後の検討課題項

この調査は、乗用車エンジンの小型化または高性能レーシングカーにおいてBMEPを最大化することに伴って発生する過剰な熱の処理に焦点を当てています。エンジンテストでは、エクイメット3TS160U合金のガイドを除いて、どの材料にも格段の問題は見られず良好な結果が得られています。

しかし材料の選択ではエンジンの型式やサイズの他に、燃料や運転条件なども考慮する必要があり、耐食性、圧縮強さ、かじり抵抗、最高運転温度などがバルブシート、ガイド、リングなどの材料を選択する際の検討事項になります。資料Aにそれら項目を示します。

材料選択については下記にお問い合わせください。

Info_mbj@Materion.com または
03-3230-4441 バルク材料営業部

高性能合金を用いたエンジン性能の向上

資料 A

合金	アロイ 3	アロイ 2 5	アロイ 1 0 X	エクイメット 3	パフォーメット
組成	CuBe	CuBe	CuBe	CuNiSn	CuNiSiCr
伝動機構					
排気バルブシート	レ		レ		レ
吸気バルブシート		レ			レ
ピストンピン / スモールエンド リストピン ブッシュ		レ		レ	レ
ピストンリング				レ	レ
バルブガイド	レ	レ	レ	レ	レ

貴社用途に適した材料の選択については技術サービス部までお問い合わせください 03-3230-4441

バルブシート合金	
性状	<ul style="list-style-type: none"> ● レーシングカーと高出力密度エンジンで実証された高熱伝導、高強度銅合金 ● 焼結鉄製のバルブシートに比べ 4 ~ 8 倍高い熱伝導率
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ● 現有の設計の制約を凌駕 ● 出力密度の向上 ● バルブおよびバルブシートの温度を低下 ● ホットスポットと早期損傷の回避 ● シリンダーヘッド内でのより均一な温度分布 ● シリンダーヘッドの変形減少 ● 交換回数の減少

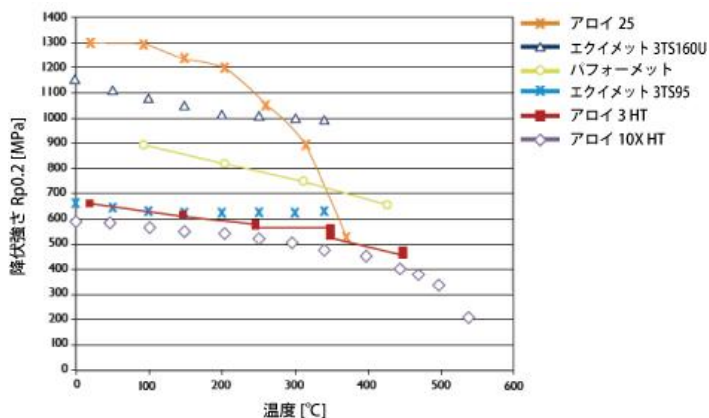
バルブガイド合金	
性状	<ul style="list-style-type: none"> ● レーシングカーと高出力エンジンで実証された高熱伝導、高強度銅合金 ● 耐摩耗特性（エアバス、ボーイング、国際レースチームでの各種ブッシング）
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ● バルブ温度の低下 ● ホットスポットの減少 ● 摩耗率の顕著な減少 ● 交換回数の減少

ピストンリング 開発中	
性状	<ul style="list-style-type: none"> ● 高強度、高熱伝導合金
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ● ピストンの設計の革命的な変革の可能性 ● ピストン温度の顕著な低下 ● 小さなクレビスを許容 ● コーティング不要 ● ブローバイの減少 ● ピストンリンググループの寿命延長

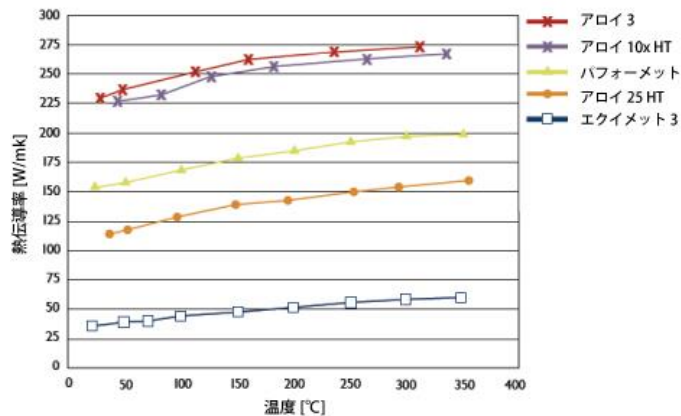
高性能合金を用いたエンジン性能の向上

資料 A

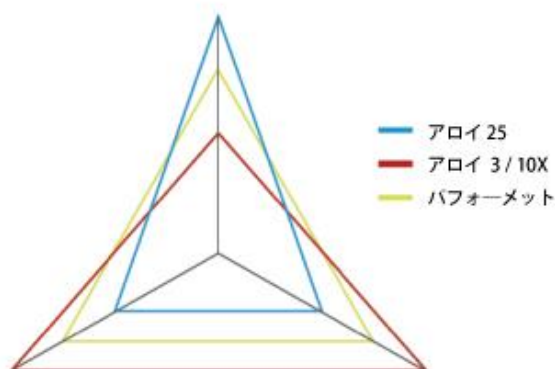
温度による降伏強さ (Rp0.2) の変化



高温熱伝導率



バルブシート特性



性状	アロイ 25 HT	パフォーメット	アロイ 3 HT	アロイ 10X HT	エクイメット 3 TS95	エクイメット 3 AT110	エクイメット 3 TS160U
CTE 室温 [I/K E-06]	17.00	17.00	17.60	17.60	16.40	16.40	16.40
密度 室温 [g/ch ³]	8.36	8.69	8.83	8.83	9	9	9
硬さ 室温 RT	40 HRC	27 HRC	100 HRB	92 HRB	97 HRB	30 HRC	32-36 HRC
熱容量 室温 [J/gK]	0.36	0.41	0.335	0.414	0.377	0.377	0.377
熱容量 100° C [J/gK]	0.406	0.41	0.381	0.414	0.389	0.389	0.389
E-Mod 室温 [GPa] 131	130	130	138	138	144	144	144
化学組成	CuBe2	CuNiSi2Cr	CuNiBe	CuCoBeZr	CuNi15Sn8	CuNi15Sn8	CuNi15Sn8
疲労 R=-1 10e7 サイクル [MPa]	350	240	280	テストせず	420	260	370

高性能合金を用いたエンジン性能の向上

資料B

表 3

固定表面温度		固定HTC表面		
部品	温度 °C	部品	HTC W/m ² K	局所温度 °C
水湿表面	115	吸気シャフト (タペットチェスト内)	100	125
ブロック外部	115	吸気シャフト (ポート内)	100	105
ヘッド内部	135	吸気ガイド (タペットチェスト内)	100	120
ライナー外部 (内表面、ピストン下)	130	吸気ガイド (ポート内)	100	105
排気ポート	250	排気シャフト (タペットチェスト内)	100	130
吸気ポート	105	排気シャフト (ポート内)	100	250
		排気ガイド (タペットチェスト内)	100	125
		排気ガイド (タペットチェスト内)	100	125
		排気ガイド (ポート内)	100	250
		アンダークラウン	100	100

表 4

シリンダー内表面の熱入力				
部品	望ましい温度 °C	熱入力 W	計算温度 °C	注記
ヘッド (シリンダー内面)	205	4541.0	207.6	平均ヘッド温度 (シリンダー内面)
ピストンクラウン	300-320	1405.0	319.9	最高ピストン温度
ライナー (シリンダー内面)	200	6624.0	199.0	平均ライナー温度 (シリンダー内面)
排気バルブ表面 (両者結合)		759.0	617.9	平均排気バルブ表面温度 (シリンダー内面)
吸気バルブ表面 (両者結合)		374.0	331.4	平均吸気バルブ表面温度 (シリンダー内面)

空隙の熱抵抗				
部品	媒体	厚 (m)	伝導率 (W/mK)	注記
ピストンリングとライナー間	油	3.00E-06	0.134	127°Cのエンジンオイル
バルブシャフトとガイド間	空気	3.00E-05	0.0371	177°Cの空気
ピストンとライナー間 (ピストンリング下)	空気	1.50E-04	0.0371	177°Cの空気

高性能合金を用いたエンジン性能の向上

資料B

表5

	熱伝導率 (W/mK)			
	吸気 バルブシート	排気 バルブシート	バルブ ガイド	圧縮 リング
RUN31	36	41	38	50
RUN32	105	240	38	38
RUN34	160	160	160	160

部品全体の平均温度 (°C)								
吸気 バルブ	吸気 バルブシート	吸気 ガイド	排気 バルブ	排気 バルブシート	排気 ガイド	ピストン	リング	ヘッド
254.8	157.9	119.4	437.4	231.3	175.5	275.4	257.8	136.8
238.9	152.9	119.3	405.0	218.2	175.4	281.7	264.1	136.7
235.0	151.5	118.7	408.4	219.7	175.4	258.4	241.5	136.7

	熱伝導率 (W/mK)			
	吸気 バルブシート	排気 バルブシート	バルブ ガイド	圧縮 リング
RUN31	36	41	38	50
RUN32	105	240	38	38
RUN34	160	160	160	160

部品内の最高温度 (°C)								
吸気 バルブ	吸気 バルブシート	吸気 ガイド	排気 バルブ	排気 バルブシート	排気 ガイド	ピストン	リング	ヘッド
393.2	228.6	127.4	825.0	340.7	245.3	320.2	273.0	282.1
369.2	198.9	127.4	772.0	267.8	245.2	326.8	281.0	269.1
363.6	194.2	125.6	777.9	277.0	235.5	302.6	251.2	273.3

	熱伝導率 (W/mK)			
	吸気 バルブシート	排気 バルブシート	バルブ ガイド	圧縮 リング
RUN31	36	41	38	50
RUN32	105	240	38	38
RUN34	160	160	160	160

シリンダー内表面温度 (°C)			
吸気バルブ 表面	排気バルブ 表面	クラウン	ヘッド
331.4	617.9	298.8	207.6
305.8	563.8	305.8	205.1
299.8	569.8	280.2	204.8

ピストン温度	
頂部 (°C)	底部 (°C)
264.9	260.7
272.7	267.6
244.4	242.8