

## セラミックエンジンの開発の軌跡と展望

河村英男\*

セラミックエンジンの最も大きな問題であった材料の強度と設計法に関する課題が解決され、耐久性の優れたエンジンを運転出来るようになった。次の課題は、断熱エンジン的高温燃焼下に発生するNOx生成と性能低下を改善する手法、排気ガスから動力を取り出すエネルギー回収法の開発であり、現在その完成を急いでいる。これらの問題解決には創造的技術革新を取り入れることが必要である。このエンジンが完成すれば工業界への波及効果は大きい。

### A History and View in the Development of Ceramics Engine

Hideo KAWAMURA\*

The problems of the strength and designing methods in ceramics materials and components which is the largest items for ceramics engine have been solved, and the engine made by ceramics parts can operated with an excellent durability. Next items are establishments of methods to improve NOx and performance in a heat insulated engine which is operated in high temperature combustion, and develop an energy recovering methods which produce a power force from an exhaust gas. We are now making efforts to develop the ceramics engine, however, in order to solve the problems, we should introduce innovative technologies. When we succeed in the development of the engine, we will have a very big effects on the industrial field.

#### 1. まえがき

数年前までSAE、ASME国際会議で多く発表されたセラミックエンジンに関する論文が、本年度は極端に少なくなり、世界の先端技術開発の潮流から消え去ろうとしている。

セラミックエンジンの可能性は無いのか、1970年代に多くの技術者が開発に鎊を削った断熱ターボコンパウンドエンジンは幻であったのか。このような質問を筆者はあらゆる機会に受けて来た。その度に、新技術開発の難しさについて説明するのだが、特にセラミックターボコンパウンドエンジンの開発は余りにも未解決な問題を抱えていて、その内容が理解しにくい。

筆者はこのエンジン開発の成功のためには以下の3ステップの研究を確実に実行しなければならない

と考え、開発の促進を急いでいる<sup>1,2)</sup>。

1段階は耐熱性、断熱性、及び耐摩耗性に優れた材料の開発と評価で、特にセラミックスに限られるものではない。2段階は耐熱性を有する材料を燃焼室壁に使った時上昇する筒内温度と圧力によって大幅に変化する燃焼の改良である。特に性能向上と排気ガス低減を目指した高温燃焼の最適化は冷却エンジンの延長線上にはない。3段階は排気ガスエネルギーを有効に動力変換するコンパウンドシステムの開発で、熱効率の向上とエンジン出力の大幅な増加を目指す。

以上の3段階の技術開発が終了した時、内燃機関の著しい変化がもたらされる。本文ではこれまで経験してきた多くの問題と今後の展望について明らかにしたい。

#### 2. セラミックエンジン開発の経過

1973年に発生したオイルショックを契機に、省エネルギーエンジンの開発が提案され、ガスタービン、スターリングエンジンと共に断熱ターボコンパウン

\*いすゞセラミック研究所代表取締役常務  
Executive Director,  
Isuzu Ceramics Research Institute Co., LTD.  
原稿受理 1990年7月16日

ドエンジンの開発が進められた。米国の陸軍研究所を中心とした開発チームは、断熱材としてファイナセラミックスを利用した新しいエンジンの開発構想をまとめ、1976年に発表した<sup>9)</sup>。

エンジンの燃焼室に断熱材を使用したエンジンでは、冷却系へ廃棄される熱量が動力に変換し熱効率が50%を超える、とする論文は世界中の反響を呼び、ダイムラー、ベンツ等の先人達が開発した内燃機関の改良を続けて来た技術者達に少なからぬショックを与えた。このエンジン構造の要は断熱材であり、燃焼室壁をどのような素材で構成するかが成否を握っていた。アルミナ ( $Al_2O_3$ )、炭化珪素 ( $SiC$ )、ジルコニア ( $ZrO_2$ )、窒化珪素と次々に変えて行った過程は<sup>4)</sup>エンジン開発より材料開発の観を呈していた。

その内容について詳述すると、往復動型ディーゼルエンジンの燃焼室を断熱すると、燃焼による熱量が外壁を通して逃げないため、シリンダー内の上死点付近の仕事量はエントロピーと温度が高まるので大幅に増加するとの予想であった。この理論はその後十年間に出たいくつかの反論<sup>5,6)</sup>によってほぼ否定されているが、燃焼室壁を構成する材料が理想的であればあながち誤りとは言えないであろう。断熱構造を持つエンジンの燃焼室は壁温度が高くなり吸入行程時の空気温度を上昇させ、体積効率を著しく低下させる。そのため圧縮端の温度も著しく上昇し、高温空気の充満した燃焼室に噴射した燃料は着火が早くなり混合気生成が不十分のまま燃焼するので、燃焼効率がかえって悪化する<sup>7)</sup>。

断熱エンジンでは着火遅れが半分に減少し、そのため予混合燃焼量が減り拡散燃焼期間が増加する現象が明らかに観察できる (Fig. 1)。即ち高温空气中に噴射された燃料が十分に燃焼室内で拡散されないまま着火するので、噴射燃料に空気導入が十分なされないまま燃焼し拡散燃焼が抑制される。往復運動エンジンの熱効率は等容変化率を増加させることにより改良できるが、拡散燃焼の抑制は熱効率を極めて悪化させる。

一方、吸入効率の低下について多くの試みとシミュレーションが行われてきたが<sup>8)</sup>、断熱化による燃焼室温の上昇により10%~15%の空気量が減少する事が確認されている。しかし、これは一般的に窒化珪素等のモノリシックなセラミックスを使用した場合であり、熱伝導率が小さい材料を使用すれば吸入効率はさほど悪化はしない<sup>6)</sup>。因みに窒化珪素の熱伝導率は $0.4\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ 、上記低熱伝導材は、 $0.005$

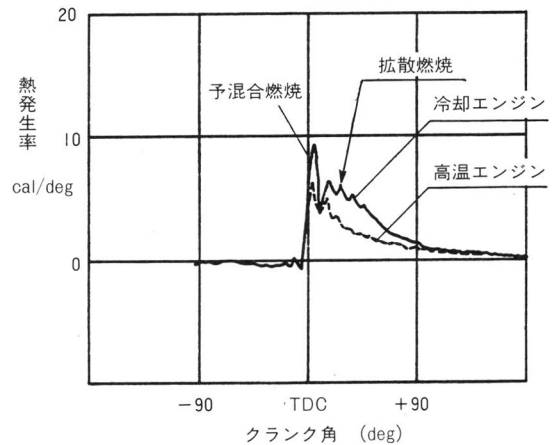


Fig. 1 冷却エンジンと断熱高温エンジンの熱発生率の比較

$\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ である。即ち、往復運動エンジンで熱発生期間に燃焼エネルギーより受熱した壁面は、熱伝導率が小さければ表面部のみ温度上昇し内側 $0.5\text{mm}$ 以降は短期間の加熱のためほとんど変化せず<sup>9)</sup>、膨張、排気行程を経過した時、元の温度に戻っているため吸入空気量の減少もなく、圧縮端温度の上昇もない理想的なエンジンが実現できる。

こうしたことから1980年代以降は燃焼室の壁面にジルコニアコーティングを施した材料が多く使用されるようになった。しかし、ジルコニアコーティングはプラズマスプレー等により金属表面に被膜されるが、結合エネルギーが小さく粒子間の組織が粗いため気孔が散在し強度的に安定しない<sup>9)</sup>。

従って、焼結され強度的に安定した熱伝導率の小さいセラミックス材料の開発が求められる。

断熱エンジンの開発過程で、アルミナは強度、靱性が余りに劣っている、炭化珪素は靱性が低く熱伝導率が高い、ジルコニアは相変態が常用使用温度域に存在し寸法変化を示す、等の問題によりいずれも諦められてきた。

窒化珪素 ( $Si_3N_4$ )のみは強度、靱性、熱伝導率等の要求特性がある程度満足されたので材料の改良が継続されている。

断熱ターボコンパウンドエンジンではディーゼルとブライトンサイクルの組合せが種々検討された<sup>10)</sup>。ターボコンパウンドシステムは、従来航空機エンジン用として開発されたもので、1930年代より散見できる。このシステムは、エンジンが高負荷で連続して運転される時、威力を発揮できるので航空機用としては適している。しかし、部分負荷での使用頻度が高い自動車用エンジンとしては不適である。ブラ

イトンサイクルは、作動空気量が少なく温度が低い場合、効率が極めて低くなる。従って、ブライトン、ディーゼル間をギヤ列を通して機械的に直列に結合するとディーゼル負荷の小さい時タービン軸から伝達される負荷はかえって負仕事になることが多い。また加速時は上記ギヤ列と2つの機関の結合は慣性力が大きくなり負担となる<sup>11)</sup>。

こうした多くの問題点を抱えた断熱ターボコンパウンドエンジンの開発は、石油の供給が安定化した現在、徐々に忘れられ、筆者等を中心とした開発チームが存在するのみとなったが、このエンジンの開発は、単に燃費の改良だけではなく、自動車用パワープラントの材料の変革を含んだ次世代への技術開発アイテムのひとつとして位置付けられるべきものである。

3. セラミックス部品の開発の経過

断熱エンジン用材料としてセラミックスを利用するにあたっては、米国と日本の材料メーカーが先行した。その理由は、米国は軍事的目的であるタンク用として断熱エンジンの開発を急いできたためであ

り、またセラミックスメーカーは世界で12兆円といわれる自動車用エンジンの市場で新しい地位を築きたいと考えたためと思われる。

自動車エンジンの技術者はセラミックス材料の優れた特性を利用した従来エンジンの性能向上を目的としてこの新素材の使用を考えていた。

従来ディーゼルエンジンの副燃焼室と主室との連絡口はニッケルクロム鋼でつくられていたが耐久性に問題があり、このホットプラグといわれる部品をセラミックス材に置き換えることが最も効果的であると見られていた。筆者等もホットプラグのセラミックス化に取り組んだが、エンジンへの組付け段階から悉く破壊し、開発は難行した。

当時、オイルショックの余波はディーゼル乗用車の開発を促した。ガソリン車並みのフィーリングで燃費の優れた車両を開発するため、ディーゼルの始動性の改良が急務とされた。小型ディーゼルエンジンは、燃焼室内にグロープラグを取付け (Fig. 2)、電流により赤熱させ、そこに燃料を吹き付けて起動させていた。しかし、鉄性グロープラグの赤熱時には30秒近くを要し、この加熱時間を短縮するためには耐熱性に優れ、かつ熱容量の小さい窒化珪素が最適である。

1981年に窒化珪素材のグロープラグが始動操作をガソリン並みにすることを可能とし、ファインセラミックス製自動車部品として世界で初めて量産が開始された<sup>12)</sup>。続いて1983年、苦戦を続けて来たホットプラグの開発がすすみ、自動車部品の本格的展開が始まった。ホットプラグの破損理由は熱応力にあり、金属材料のように熱伝導率が良く靱性の高い場合には、予想できなかった新しい問題点が明らかとなったのである<sup>13)</sup>。Fig. 3はホットプラグに作用する機械、熱応力を示すが、熱応力は外周に広く分布

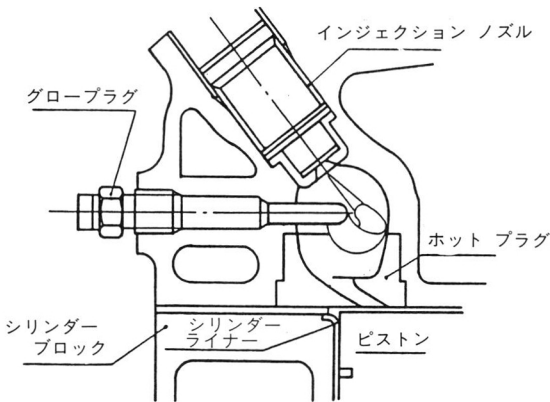


Fig.2 小型ディーゼルエンジンの燃焼室形状とグロープラグ

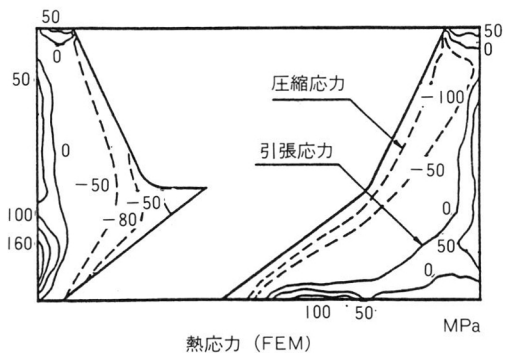
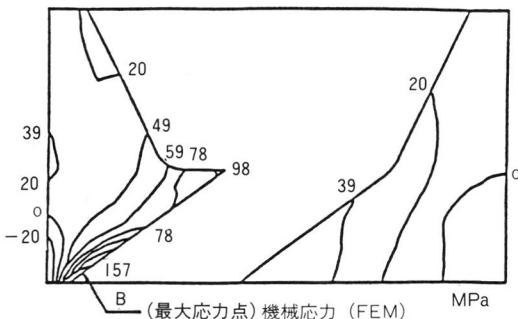


Fig.3 ホットプラグに作用する熱応力と機械応力

し、それに機械加工による残留応力、位置決め用穴等に応力集中が重なって作用すると簡単に破損することが判った。

以後、日本の自動車業界ではロッカーアームの摺動チップ、副燃焼室、ターボチャージャーローターが量産化され順調にセラミックス化が進展してきた。

一方、欧米ではシリンダーヘッドの排気ポートに断熱性の優れたチタン酸アルミニウムを利用することにより冷却水損失の低減を図った。チタン酸アルミニウム ( $Al_2TiO_5$ ) は機械的強度が40MPaと小さいが線膨張率が $1.5 \times 10^{-6}/K$ 、ヤング率13GN/m<sup>2</sup>であり、外側を金属で鑄ぐるむと安定した断熱性を持つ部材となり得る。

しかし1985年ターボチャージャーのローターが量産されて以来、新たなセラミックス部品の実用化は進められていない。エンジンの機能部材に利用するためには信頼性の向上を図らなければならない。窒化珪素を例にとると、強度、靱性と材料組織の相関が未だ十分に解明されていない。今後は、成形、焼結プロセスのコントロールによる均一組織の生成のため、焼結時の結晶成長の要因がより明らかに解明されなければならない。

#### 4. セラミックスエンジンの開発

断熱エンジンの構成部材としてセラミックス材が最適であるとは限らないが、断熱性を向上するには耐熱性に優れた材料が要求され、現時点ではセラミックスのみが諸条件を満たしている。

ここでセラミックスエンジンの開発コンセプトを整理すると、燃焼室壁とピストンの往復運動部をセラミックス材により断熱し冷却系を除去する、摺動部のセラミックス化によりエンジン摩擦力を低減す



注) 車体の下にコンパクトなエンジンをもつ。

Fig. 4 究極のセラミックビークル

る、断熱構造により上昇した燃焼ガスによる高温燃焼を実現させるとともに、排気ガス温度と圧力の増加を活用してエネルギー回収装置を作動させ熱効率の回収をはかる、等である。ではこのエンジンの開発によって何が得られるか。第1はセラミックス材料の量産化によって得られた強度、信頼性向上技術を他の構造部材に応用して、セラミックス材料の工業界への拡大に寄与を図り、さらに自由表面エネルギーの小さいセラミックス摺動材は革新的な低摩擦材料を提供することになる。第2は断熱エンジンの成功に不可欠な高温燃焼を解明して、圧縮着火エンジンの燃焼プロセスを明らかにし、多燃料機関を実現すれば、将来の燃料逼迫に対応できる。第3は熱効率の向上により燃料消費率を良くし、エネルギーの節約に貢献できる。第4は冷却系を必要とせず、高出力の可能なエンジンの実現により、従来のようにエンジンの位置が限定されることもなく、パワーはいくつかの機構を経ずにホイールに伝達されるようなロスが少なくコンパクトな設計ができることである。

Fig. 4 はセラミックスエンジンの究極の姿をモデル化した車両の概念図である。カプセル化したエンジンはどこにでも取り付けられ、車両本来の空間を最大にする目的に適っている。

##### 4-1 セラミックス材料を用いた部品の開発

窒化珪素を主体とした部品の開発はすでに10年程の歳月を要している。この間材料は飛躍的に改良された。Fig. 5 は、1970年代と最近に製造された窒化珪素の曲げ強度を比較している。当初の材料は常圧焼成で焼結助材を多く加え比較的低温で焼結され、

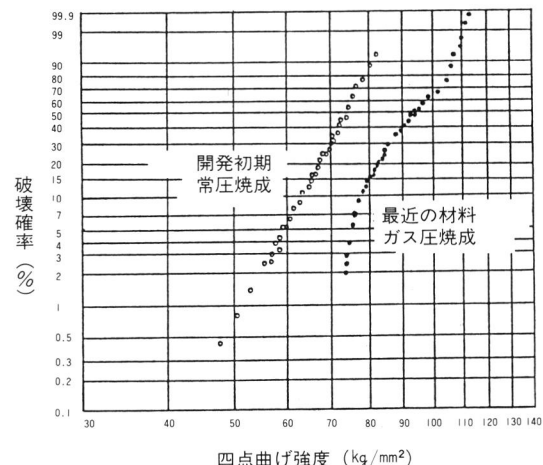


Fig. 5 窒化珪素の曲げ強度



一方最近の材料は100kg/cm<sup>2</sup>程度の高圧ガス中で焼結されているので、焼結助材を少なくし、高温で窒化珪素の結晶粒を成長させ、針状に交差させた微細組織を得ている。

その結果、平均強度が300MPa向上し、ワイブル係数が特に低強度域で改良された。常圧焼成では20~50μmの気孔が数多く存在したが、高圧ガス焼成では20μm以下の気孔しか点在せず、これが強度向上の主原因と考えられる。

素材強度の著しい改良にもかかわらず金属と同様の設計手法でセラミックス部品を作ることはできない。またセラミックス材の工業製品への応用の歴史はまだ20数年で、利用手法が確定していない。例えば高硬度材料の機械加工は高荷重研削を通例とするが、その加工プロセスでダメージを受けやすく強度に影響する。脆性材料の強度は応力負荷条件によって異なるのでそのレベルを十分評価した上でなければ安全設計ができない。成形、焼成条件によって部材の微細組織は微妙に変化するので、応力負荷条件と詳細な比較を必要とする等の問題が残っていると考えられる。

Fig. 6は、実際のエンジン部品について調査した曲げ強度、引張強度、疲労強度と、部品に許容される最大応力の比較である。ブルーテストは、最大応力の作用するであろう部分に荷重をかけて、材料中に含まれる異常欠陥品を除去するため実施するも

のである。

一方、部材への応力分布を検討するために、構造解析法により機械的、熱的応力を推定する。特に窒化珪素は熱応力に敏感であるので、作用部分の素材、加工変質層をチェックする必要がある<sup>14)</sup>。こうした強度チェックを十分に実施した場合、0.1%以下の確率で強度保証が可能である。

しかし、材料強度がより改良されれば設計はもっと簡単になる。Fig. 7は各種窒化珪素材の微細組織を比較している。窒化珪素は針状結晶のアスペクト比(長さ/針径)が大きく、結晶粒の成長が進ん

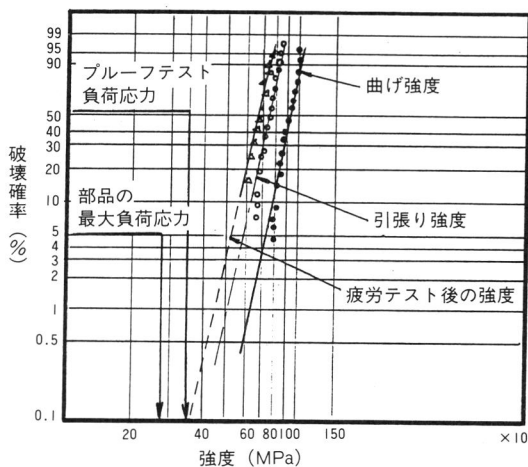
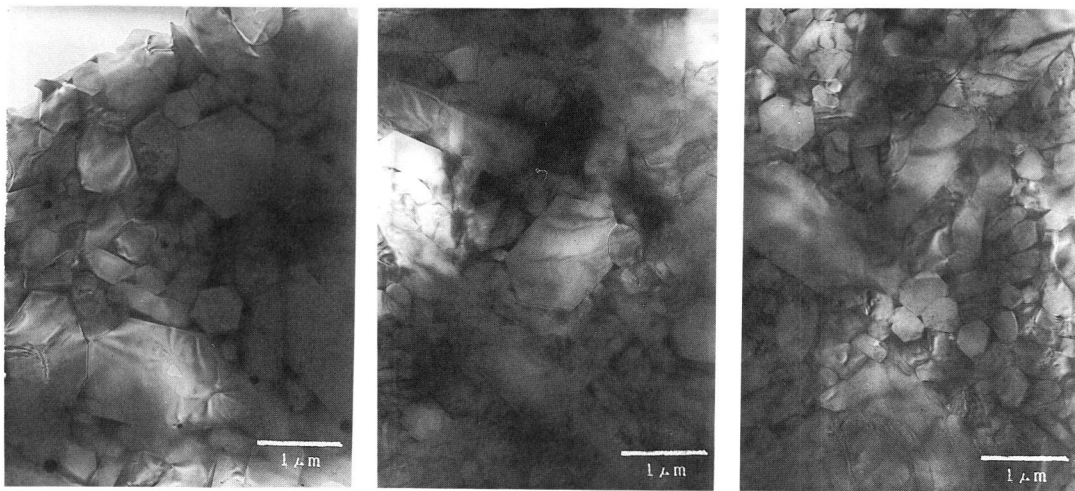


Fig.6 セラミックスエンジン部品の強度とブルーテスト



- 曲げ強度：98kg/mm<sup>2</sup>
- 破壊靱性値：K<sub>1c</sub> 6
- Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Wが粒界に存在
- アスペクト比：大
- 曲げ強度：104kg/mm<sup>2</sup>
- 破壊靱性値：K<sub>1c</sub> 6.9
- Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が粒界に沢山存在
- アスペクト比：大
- 曲げ強度：93kg/mm<sup>2</sup>
- 破壊靱性値：K<sub>1c</sub> 5
- Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が粒界に微量存在
- アスペクト比：小

Fig.7 3種類の窒化珪素の微細組織(拡大倍率×1400)

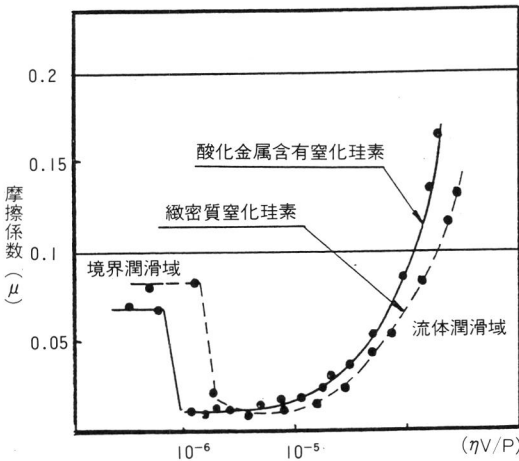


Fig. 8 窒化珪素の摩擦特性曲線

でいるが靱性値が高く、最近の材料は破壊靱性置  $K_{Ic}$  が  $10\text{MN}/\text{m}^{3/2}$  以上のものが完成されている。

こうした素材強度の確立と評価が完成されなければセラミックスエンジンの実現は有りえず、さらに摩擦、摩耗、接合、加工効率等の基本的技術について明らかにされなければならない。本稿ではそれらの内容について省略するが、セラミックスの摩擦は部材間の化学反応性、潤滑油との吸着膜成性と深く関わっている<sup>15)</sup>。

#### 4-2 セラミックスエンジンの開発

セラミックス断熱エンジンの開発のキーポイントは、断熱構造と高温燃焼の確立に集約される。断熱構造は、燃焼によって発生する熱量の伝達をどのような手段で遮断するか、燃焼室壁の素材として何を選択するかによって決定される。熱流束はシリンダー内のガス温度、流速、密度により時々刻々変化する壁面からの流出熱量で計算により、エンジンサイクル全体にわたってその変化を明らかにすることができる。こうした検討に基づいて断熱エンジンの構造を決定すると、シリンダー上部は燃焼室として高温で、下部はピストンの運動をスムーズにするよう低温で使用するため、シリンダーを上部と下部に分割し、またピストンヘッドはスカート部との間を断熱構造として、熱流をシリンダー下部に移動しないようにしている。上部断熱燃焼室は空気層と特殊断熱ガスケットにより外周を遮熱し、断熱効率70%以上の値を得ている。燃焼室材料は耐熱性と熱ショック性に優れた窒化珪素を使用している。

この構造を持つエンジンに130点の熱電対を取付けて温度測定を行い、実験値と計算値を比較した。その結果、両者は良い相関を持ち、エンジンの外壁

温度を  $130^{\circ}\text{C}$  以下とすることができた。

さて、断熱構造により燃焼室壁を構成すると壁面温度は上昇し、吸入行程時に吸気温度が上昇して圧縮端では  $800^{\circ}\text{C}$  以上の高温になる。この状態で燃料噴射すると噴霧は急速に気化し、HCの分解が進展し、可燃混合気を構成するが、混合気の空燃費は濃くなり燃焼温度が上昇し  $\text{NO}_x$  の排出につながる。通常のエンジンに比較し50%以上増加する  $\text{NO}_x$  レベルは局部的に分布する濃混合火炎に空気が導入され、ますます温度上昇するものと考えられる。神本等<sup>16)</sup>は  $\text{NO}_x$  とスート生成を温度と当量比をパラメータとして整理した結果、 $\text{NO}_x$  生成域は  $2,000^{\circ}\text{C}$  以上で当量比は0.5以下(当量比1は全負荷での燃料と空気の比)とし、これ以上の温度でも当量比が大きければ  $\text{NO}_x$  の生成は凍結されるとしている。筆者等は断熱構造を持つ副室を使って高温時でも当量比を制御すれば  $\text{NO}_x$  生成が制御されることを確認した。Fig. 8はその結果を示すものでHCと  $\text{NO}_x$  及び出力トルクを比較している。副室の断熱効果によりHCは減少し  $\text{NO}_x$  は当量比の濃い燃焼を強いられているので、広範囲に噴射タイミングを変えても抑制され出力の低下も少ない。こうした実証から考えると、断熱エンジンの  $\text{NO}_x$  低減は絶望というわけではない。

一方、燃料を円板に衝突させて燃料フィルムを構成し、その円板状フィルムに空気をほぼ垂直に流入させるOSKA方式のディーゼルエンジンでは、低スモーク低  $\text{NO}_x$  排出の結果を得ている<sup>17)</sup>。即ちディーゼル燃焼方式でも空気と燃料の混合は均一の方が良く、エミッションの排出も制御される。こうした結果を総合すると、断熱エンジンの排気ガスの制御法は自ら明らかであり、出力性能をいかに向上させ燃費低減を図るかがポイントである。

断熱エンジンの燃焼は、着火遅れが短く混合気が十分に構成されないまま火炎が発生するため、燃料の噴射率を上昇させ予混合燃焼割合を増加させる方法が良いとされた。しかし、燃料の分解速度は通常エンジンの4分の1以下と推定され、燃料噴射圧力の極端な上昇が有効とされる。たとえば予混合燃焼の増加のため、セタン値の低い燃料を使うと冷却エンジンと同等の予混合燃焼が得られるが、空気との混合の促進が遅れるため拡散燃焼期間が長くなり、性能改善効果が表れない。

燃焼の改善は燃焼室と噴射系を変え、混合気生成スピードを増加させる事を考えなければならない。

5. ターボコンパウンドエンジンの開発

断熱構造により冷却系への熱放出を防止したので排気ガス温度が上昇しエネルギーの回収は容易となる。Fig. 9は筆者等が開発しているセラミックス断熱ターボコンパウンドエンジンの概略を示している。

燃焼室周囲の断熱構造とともに、排気ポート、排気マニホールド、タービンスクロールの断熱は、 $Al_2TiO_5$ の鑄込み構造により構成し、排気エネルギーの効率の良い回収を期待している。

一方、摩擦力の低減のためピストンリング、シリンダーライナー、バルブガイド等に低摩擦窒化珪素材を使用し、高温焼付きを防止し、かつ摺動部の温度制御を行っている。

排気マニホールドに直結されたターボチャージャーと、その出口部に連結された排気タービンが排気ガスエネルギー回収システムである。排気タービンには直結に発電ローターが接続され、タービン仕事を電気エネルギーに変換する。発電ローターは永久磁石で構成された二極同期機で、最大出力10KW、最高回転数10万回転である。従来使用されてきたギヤ式動力変換機は、多段ギヤ列によるフリクションの増大と、排気タービンとクランクシャフト間の回転

数の差を同一の比率で連動するのでタービンの性能制御が十分できないとの理由で使用を断念した。

電気式排気ガス回収装置は、エンジンの回転、負荷に応じて自在に回転を制御できるので、タービンを常に最高の効率で運転できる。

一方、発電された電気エネルギーはクランクシャフトに直結された誘導モータに送られ、動力として利用される。断熱エンジンでの最小発電電力は500W以上あるので、発電電力は車における他の用途にも利用することができ、従来のオルタネータは不要となる。

さて上記の排気ガス回収装置では、高速発電機による電気エネルギーがエンジン回転に同期するよう制御される誘導電動機に送られる。Fig. 10はその概略を示すが、いくつかの問題が存在する。まず高速発電機は、エンジンの運転状況に応じて回転数を制御して排気タービンを最高効率点に維持するような複雑な制御系を必要とする。次に発電電力を直流変換し、さらに同期誘導機の周波数を作り出し誘導機を運転する高速可変周波数インバーターの開発が必要である。これらの装置は相当レベルまで開発が進出し効率の点検が重点的に行われているが、高速発電機のローターはその高回転化による遠心力に耐える種々の工夫を必要とする。

以上の総合的システムを有するセラミックス断熱ターボコンパウンドエンジンの効率は従来エンジンに比較して30%の改良が目標である。エンジン負荷の小さい範囲ではフリクションの低減が主であり、高負荷ゾーンでは排気ガスエネルギーの回収量の寄与率が高い。

6. まとめ

セラミックスエンジンの開発上の問題点と展望についてまとめると上記のように多くの解決しなければならない問題点がある。特に材料面では分子又は粒子結合を制御する化学反応性を追求しなければならないがエンジン技術者にとって難解な分野である。しかし、21世紀に向けた新技術を展望するならば、機械技術と化学と制御系を司る電子分野がそれぞれの特長を生かしつつ複合化することがますます必要となるだろう。

参考文献

1) H. Kawamura: Study of Construction and Tribology in Heat Insulated Ceramic Engine.

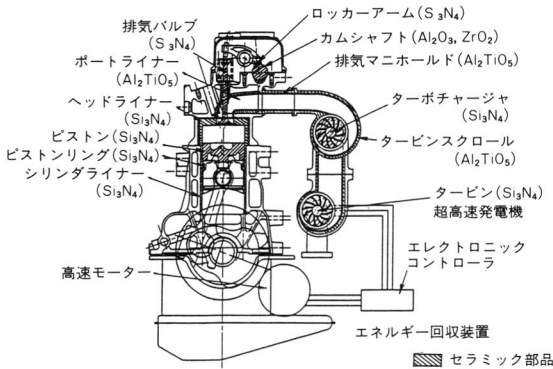


Fig.9 いすゞ断熱ターボコンパウンドエンジン

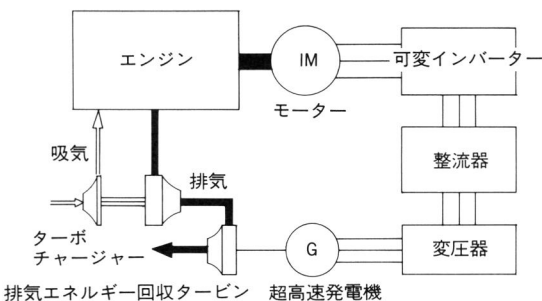


Fig.10 断熱エンジンの排気エネルギー回収装置

- SAE 900624
- 2) H. Kawamura: Development of Ceramic Engine parts for Heat Insulated Engine. 90-GT-384
  - 3) R. Kamo, W. Bryzik: Adiabatic Turbo Compound Engine Performance Prediction. SAE 780068
  - 4) R. Kamo, W. Bryzik: Cummins/TACOM, Advanced Adiabatic Engine. SAE 830314
  - 5) 松岡信「内燃機関の熱効率に関する二、三の考察」『内燃機関』Vol.23、No.291
  - 6) 石井光教、松井幸雄、伊藤高根「遮熱ディーゼルエンジンの性能予測」内燃機関合同シンポジウム、1985年2月
  - 7) K. Toyama, T. Yoshimitsu, T. Nishiyama, T. Shimauchi & T. Nakagaki: Heat Insulated Turbocompound Engine. SAE 831345
  - 8) A. Alkidas: On the Performance and Emission of an Uncooled Heavy Duty Single Cylinder Diesel Engine. SAE 880013
  - 9) P. C. Glance, W. Bryzik, J. Mahishi & J. Spehar: Engine Component Design Methodology for Ceramic and Ceramic-Matrix Composite Materials. SAE 880193
  - 10) 土佐、下田、後藤、原田、藤「排気ターボコンパウンドエンジンのエネルギー回収特性」『日本機械学会論文集』No.840-14
  - 11) H. Kawamura: Development Status of Isuzu Ceramic Engine. SAE 880011
  - 12) 河村、大坪、北川「ディーゼルエンジンの始動性とグロープラグの急速加熱制御について」『自技会論文集』No.22、1981年
  - 13) H. Matsuoka, H. Kawamura & Toeda: Development of Ceramic Pre-Combustion Chamber for Automotive Diesel Engine. SAE 840426
  - 14) 河村「セラミックエンジン部品の加工精度と強度への影響」『砥粒加工学会講演論文集』1989. 7. 28
  - 15) 河村「エンジンのトライボロジー」『トライボロジスト』34-2
  - 16) T. Kamimoto, M. Bae: High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engine. SAE 880423
  - 17) 加藤、大西「燃料の衝突噴流を利用した層状給気機関」『内燃機関』Vol.27、No.345、1988. 7