

# セラミックスの技術革新：窒化ケイ素と自動車技術

## Technological Innovation in Ceramics: Silicon Nitride for Automotive Technology

岡田 明\*・亀山 哲也\*\*・北條 純一\*\*\*  
OKADA Akira・KAMEYAMA Tetsuya・HOJO Junichi

セラミックス, 技術革新, アーカイブズ, 自動車技術, 窒化ケイ素  
Ceramics, Technological innovation, Archives, Automotive technology, Silicon nitride

### 要旨

窒化ケイ素セラミックスの自動車への応用が 1980 年代の日本で急速に進んだ。これはセラミックガスタービン等の開発を目指した研究の副産物であり、脆性材料を構造部材として使いこなす大きな技術革新であったことには間違いないが、当時のセラミックフィーバーも駆動力の一端を担った。本稿ではその背景であるエンジン開発の潮流、非酸化物系セラミックスの焼結と破壊力学の進化等についても触れながら、セラミックターボチャージャー等の自動車部品が実用化に至った経緯を紹介する。

### はじめに

自動車の骨格であるフレームや外板およびエンジン動力をタイヤの回転に伝えるまでの駆動系部品などの多くの構造部品には鉄鋼材料が用いられている。これらの鉄鋼材料のなかで床下や外板のような油膜で保護されない部位には腐食防止のため亜鉛被覆や樹脂塗装がなされ、動弁系のような耐摩耗性の要求される部位には硬質材料の採用や表面処理が施される。また、排気バルブやターボチャージャロータは高温に曝されるので耐熱性に優れた合金(Ni 基超合金など)が用いられている。このように要求される材料仕様に応じて適正な材料が選定され、同時にコストを抑えながら材料特性を高める技術開発が進められてきた。材料開発のもう一つの方向は軽量化であり、軽量材料の採用によるコストアップを燃料消費率の低減によって回収することが主な狙いであった。エンジンのシリンダーブロックは鋳鉄からアルミ合金へと変更され、内装、バンパーや燃料タンクなどの低応力部位には樹脂材料が採用されている。

構造用セラミックスは硬く、耐熱性と耐食性に優れ、鉄鋼に比べて軽量であるから自動車用の構造材料として優れた可能性を秘めているが、加工性に乏しく、脆くて信頼性が低いため 1980 年ごろまでの応用は極めて限定されていた。しかし、1980 年代になるとグロープラグ、動弁系部品、渦流室、ターボチャージャロータなどのセラミックス部品が

次々と実用化されるようになった<sup>1)</sup>。これらはいずれも窒化ケイ素を用いた自動車部品であり、日本のセラミックスメーカーと自動車会社の共同開発で実用化された。しかし、本来の狙いはガソリンエンジンを凌駕するセラミックエンジンの開発にあったから、本質的に副産物としての位置付けにある。これらのセラミックス部品の実用化によって脆いセラミックスが高い信頼性を要求する自動車部品として十分に使用可能であることを実証した意義はあるが、市場規模がセラミックエンジンへの期待を下回ったために、その後の開発意欲は減退に向かった。本稿では窒化ケイ素を用いた自動車エンジン部品開発とそれによって実現した技術革新について紹介する。

### エンジン技術と構造用セラミックス

セラミックス<sup>注1)</sup>が構造部品として本格的に着目されたのは第二次大戦中のドイツであった。ドイツはジェットエンジンを開発し戦闘機に応用したが、ニッケルなどの耐熱材料の入手は困難であった。そこで、磁器を用いた高温構造材料の研究開発<sup>注2)</sup>が戦争末期に集中的に行われた<sup>2)</sup>。戦後、アメリカはドイツでの開発を調査して、窯業系構造材料の研究を開始し、炭化チタンとニッケルの組合せをはじめとする優れたサーメットを開発した。英国では反応焼結窒化ケイ素<sup>注3)</sup>に注目した研究が行われたが<sup>3)</sup>、多孔質のために強度が低く使用に耐えないことが

\* 日産自動車 総合研究所 シニアエンジニア

\*\* 名古屋都市産業振興公社 産学連携コーディネータ

\*\*\* 九州大学 大学院工学研究院 教授

\* Nissan Research Center, Nissan Motor Co. Ltd., Senior Engineer

\*\* Nagoya Urban Industries Promotion Corporation, Coordinator for R & D

\*\*\* Kyushu University, Faculty of Engineering, Professor

判明した。1961年に英国で少量のマグネシアを添加した窒化ケイ素をホットプレスする方法が開発された<sup>4)</sup>。1971年に始まる米国のセラミックガスタービン開発計画<sup>注4)</sup>では、このホットプレス窒化ケイ素が主要な材料として取り上げられた<sup>5)</sup>。このプロジェクトに関連して、複雑形状のセラミック部品の製造技術、非酸化物系セラミックスの焼結技術、セラミックスの破壊力学<sup>注5)</sup>などの進化が起こった。

1980年ごろから欧州や日本でもセラミックエンジンの開発が本格化し<sup>注6)</sup>、ガスタービン以外にも断熱ターボコンパウンドディーゼルの開発も進められるようになった。日本の技術開発も明治から高度成長時代まで続いた海外の進んだ技術の導入によって経済発展をはかる時代から、世界のトップランナーとなって自前の技術開発への転換が迫られる時期にさしかかっていた。技術革新を推進するメカトロニクスや新素材への期待が高まり、新素材ブームからセラミックファイバーの熱狂が社会現象として発生した。セラミックファイバーによって夢のセラミックエンジンと喧伝され、自動車用セラミック部品の商品化が自動車会社の技術力の尺度のようにもみなされるようになった。自動車会社の開発意欲はこれによって高まり、セラミック部品を搭載した自動車はある種のステータスシンボルともみなされるようにもなった。これは日本固有の現象であったから、窒化ケイ素自動車部品の大部分は日本のみでの商品化が進むこととなった。

セラミックエンジンに至る流れとして、自動車エンジン技術についても簡単に触れておこう。現在のガソリンエンジンは1876年にオットーが製作した4サイクルガスエンジンと基本的に同じ構造である<sup>注7)</sup>。これを凌ぐ熱効率の高いエンジンとしてはディーゼルエンジン<sup>注8)</sup>とガスタービンが候補となる。前者は、トラックや船舶の動力として普及が進んでいたもので、後者は航空機で成功を取めたが、自動車エンジンは小型のため熱効率を高くできない問題があった<sup>6)</sup>。ガスタービンの熱効率は燃焼ガス温度を高めると向上するから、耐熱性に優れる材料が必要である。大型のガスタービンでは部材温度を低く保つ冷却構造が可能であるが<sup>注9)</sup>、自動車エンジンでは部材の冷却機構を設けることは困難なので、当時はセラミックガスタービンが唯一の解決手段と考えられるようになっていた。

## 窒化ケイ素セラミックスと破壊力学

20世紀も終わりに近づくとも非酸化物系セラミックス<sup>注10)</sup>の焼結に関心がもたれるようになった。非酸化物系セラミックスは共有結合性が強いために焼結による緻密化が困難であるが、逆に耐熱性に優れ、構造用セラミックスとして可能性があると考えられていた。このうち窒化ケイ素はアルミナなどとの間にサイアロンに代表される新規な化合物を形成することが明らかになり、とくに大きな関心を集めた<sup>7)</sup>。炭化ケイ素の焼結<sup>8)</sup>には微量の炭素とホウ素を添加すると緻密で粒界相を含まない焼結体の製造方法が発見されたが、窒化ケイ素の場合には酸化物を添加して高温で液相を発生させる必要がある。焼結後に結晶粒界に存在するガラス相によって高温での強度の低下やクリープ変形をもたらすことになる。そのため、焼結による緻密化を達成するが、高温での機械的特性の劣化の少ない添加成分と製造技術の研究開発が盛んに行われた。焼結を促進した酸化物は結晶粒界に集まってガラス相を形成し、それが高温の機械的特性の低下をもたらす。これは二律相反であるが、良好な添加成分としてイットリアとアルミナの同時添加と酸化ルテチウムの添加が知られている。前者は東芝が開発したもので、ホットプレスや常圧焼結で強度の高い焼結体を得ることができる。後者は京セラによるもので、ガス圧焼結のような高圧窒素ガス雰囲気での高温焼結で緻密化可能であり、焼結体は耐クリープ性や耐酸化性などの高温特性に優れる。

これらの構造用セラミックスの材料開発と利用技術の開発にはすでに触れたように破壊力学による取り扱いが効果的であった。ここでは破壊力学の進化について簡単に触れておこう。破壊力学は材料に含まれる微細なき裂によって脆性破壊の起こることが認識されるようになり、弾性体力学を発展させたき裂先端の応力場の算出や破壊のクライテリアに関する研究を取り込んだ学問へと発展した。これは脆性材料の強度が微細なき裂によって支配され、エネルギーがそのクライテリアであることを見出したグリフィスの研究<sup>注11)</sup>に始まる<sup>9)</sup>。脆性破壊の条件が応力ではなくエネルギーによるとの考えは直感的には理解しがたいが、この考え方はさまざまな脆性破壊に応用され成功を取めた。金属の低温脆性、疲労破壊、応力腐食割れなどに適用された破壊力学はき裂先端の降伏現象を取り込んで修正された<sup>10)</sup>。1970年ごろからはガラスやセラミックスへの適用<sup>注12)</sup>が盛んになり、使用中のセラミックスの

破壊確率を抑制して信頼性を確保する技術が進化した。脆性材料の破壊強度が材料固有の特性値ではなく、製造工程や使用中に発生する最大の欠陥寸法に依存する確率・統計的な現象として認識され、このような概念を基礎にセラミックスの信頼性保証にかかわる技術が構築された<sup>11)</sup>。

### 窒化ケイ素自動車部品の実用化

1982年の正月にセラミックエンジンの自動車の走行試験がNHKで放映された(図1)。これによってセラミックエンジンが少数の専門家の研究分野からセラミックフィーバーと呼ばれる一般大衆の興味の対象へと大きく変化する契機となった。この走行試験は京セラといすゞが共同開発したセラミック部品を用いた無冷却ディーゼルエンジン<sup>注13)</sup>であり<sup>12)</sup>、セラミックスで自動車エンジンを作ることができることを実証した意義はあるが、自動車の性能としては実用に耐えるものではなかった。しかし、セラミックスによってエンジンの革新が起こり、構造用セラミックスの市場も急速に成長するとの強い期待が定着した。



図1 オールセラミックエンジン車の走行試験<sup>12)</sup>  
(1982年正月にNHKで放映された)

当時の技術レベルはセラミックガスタービンや断熱ターボコンパウンドディーゼル<sup>注14)</sup>で高いエンジン性能を発現する段階からは遠く、部品の評価試験で問題点が山積する状況であった。これは1987年に終了した米国のプロジェクト<sup>注15)</sup>の総括でも、セラミック部品の機械的な締結部からガスが漏れ、ロータに異物の粒子が衝突してロータの羽根が破損するなどの多くの技術課題が指摘<sup>13)</sup>されているように、脆性材料であるセラミックスを使いこなす技術はまったく未成熟であった。

表1に示すように1980年代の日本では多くの窒化ケイ素の自動車部品<sup>注16)</sup>が実用化された<sup>1)</sup>。これは多分にセラミックフィーバーに後押しされた観

は拭い去れないが、日本では優れた窒化ケイ素粉末の製造が進められ、成形と焼結に係わる製造技術に優れる窯業メーカーが存在したこと、窒化ケイ素の材料研究と破壊力学による材料評価の研究が盛んに行われたことなどが構造用セラミックスの製造と利用技術の発展に貢献した。このような幅広い研究開発の基盤に支えられて、セラミックスが高い信頼性の要求される自動車部品として実用化されたようである。

表1 実用化された各種の窒化ケイ素自動車部品<sup>1)</sup>

部品名	目的	開始時期
グロープラグ	低温始動性の改善	1981年
ホットプラグ	未燃焼ガスと騒音の低減	1983年
ロッカーアームチップ	耐磨耗性向上	1984年
ターボチャージャー	加速応答性の向上	1985年
ロングリンク	摺動部の耐磨耗性向上	1989年
カムローラ	摺動部の耐磨耗性向上	1992年
タペット	耐磨耗性向上	1993年
排気制御弁	漏れ量の低減による過渡特性向上	1993年

#### (1) セラミックグロープラグ

最初に実用化された窒化ケイ素部品は1981年のグロープラグであった<sup>12, 14)</sup>。これはディーゼル車の始動を補助する部品である。ディーゼルエンジンはシリンダー内の空気を圧縮して断熱圧縮によって高温となった空気のなかに燃料を噴射して燃焼爆発させる。しかし、冷えたエンジンでは断熱圧縮によって十分に温度が上がらないので、補助的にエンジンを加熱する装置が必要となる。

ディーゼルエンジンの始動を早めるにはグロープラグを急速に高温にまで加熱する必要があるから、発熱体の周囲を熱伝導率の大きな絶縁体で覆うことが有効となる。従来の金属グロープラグは発熱体の周囲をマグネシア粉末で覆い、それを金属カバーで覆ったものであったが、セラミックグロープラグでは発熱体のタングステン線を埋め込んで窒化ケイ素でホットプレスして、一体化したものである。そのため、従来のマグネシア粉末に対してホットプレスした緻密な窒化ケイ素の熱伝導率が高いため

に急速加熱が可能となった。なお、その後のグロープラグは進化して、発熱体にセラミックスを用いた製品(図2)も開発された<sup>15)</sup>。



図2 セラミック抵抗体を用いたグロープラグ<sup>15)</sup>



図3 窒化ケイ素ホットプラグ<sup>12)</sup>

## (2) セラミックホットプラグ<sup>16,17)</sup>

ディーゼルエンジンでは噴射した燃料が空気と均一に混合されることが重要で、そのために小型のディーゼルエンジンでは間接噴射式が採用されていた。これは燃焼室に付随した渦流室や予備燃焼室などの副室を設けて空気の流動を促進する方法である。

ホットプラグは渦流室を形成する部品である。すでに述べたように始動時にはエンジンの燃焼室の温度を高める必要があるから、渦流室の断熱性を高めると始動時に温度が高まって始動性が改善される。1983年に実用化された窒化ケイ素ホットプラグを図3に示す<sup>12)</sup>。これは従来の耐熱合金に比べて熱伝導率の低い窒化ケイ素を採用し、薄い空気層を介してゆるく保持することにより断熱性を改善した。

## (3) 動弁系部品<sup>18)</sup>

給排気バルブの開閉方法にはさまざまな方式があるが、いずれもクランクシャフトの回転と連動させるものである。現在の乗用車の主流はクランクシャフトの回転をエンジン上部のカムシャフトの回

転に伝え、カムの回転運動をバルブ開閉の往復運動に変換するシステムである。DOHCエンジンではシムを介してカムシャフトの回転を直下のバルブに伝えるので2本のカムシャフトが必要であるが、SOHCエンジンではロッカーアームを介するため1本のカムシャフトを必要とする。SOHCエンジンのロッカーアームでカムに接する部分は摺動によって摩耗するので、摩耗の厳しい条件で使用する際にはセラミックスが用いられる。摩耗による部品交換が不要になるメンテナンスフリー化がセラミックスを用いる利点であった。図4にトラックの動弁系に用いるタペットを示す<sup>1)</sup>。カムとの摺動による摩耗を防止するために表面にセラミックスが貼り付けられている。



図4 表面に窒化ケイ素を貼ったタペット<sup>1)</sup>

## (4) ターボチャージャロータ<sup>19,20)</sup>

往復駆動型のエンジンを過給して、燃焼室内に送り込む混合ガスの圧力を高めると、小型で高出力のエンジンとなる。この過給方式には、エンジンの回転力を直接利用するスーパーチャージャと排気ガスの流れを利用するターボチャージャの2つの方式がある。このうち、ターボチャージャは機構が単純で小型であることが利点である。ターボチャージャには小型のエンジンから大きな出力を得る利点があるが、アクセルを踏み込んでからエンジン回転数の上昇までにターボラグと呼ばれる僅かな遅れの生ずることが難点であった。セラミックス化の狙いは、ロータの軽量化によってターボラグを解消することであり、軽量の窒化ケイ素を用いたセラミックターボチャージャは1985年に商品化された(図5)。

図6にセラミックターボチャージャの加速特性を金属ロータと比較して示す。セラミックロータは金属を用いた従来型と寸法は同じであるが、従来の耐熱合金の密度が約  $8.2\text{Mg}/\text{m}^3$  であるのに対し、窒化ケイ素セラミックスでは約  $3.2\text{Mg}/\text{m}^3$  に過ぎず、こ



の軽量化によって約 36%の加速性能の改善が見られた。

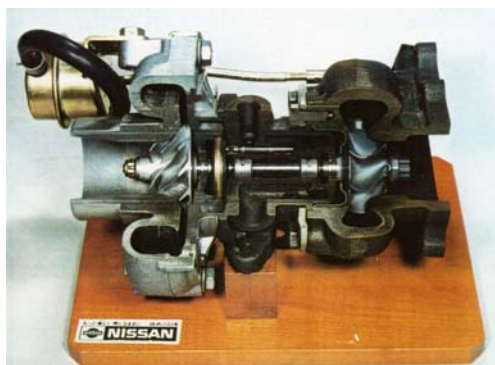


図5 セラミックターボチャージャー<sup>19)</sup>

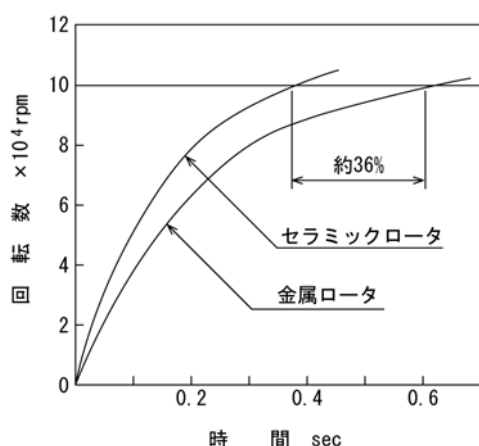


図6 金属ロータとセラミックロータの加速特性<sup>19)</sup>

## おわりに

セラミックフィーバーは 1980 年代半ばの社会現象であり、1987 年に高温超伝導の研究が盛んになると関心は構造用セラミックスから超伝導セラミックスへと移行した。米国でも脆性材料を構造材料として応用するときに解決すべき課題が明らかになると、1980 年代の米国の自動車用新動力としてセラミックエンジンの研究開発を推進してきたエネルギー省の関心は薄れ、1993 年にはディーゼルと電気ハイブリッドエンジンを中心とする PNGV 計画<sup>注17)</sup>へと移行した。その後、2002 年には燃料電池主体のフリーダムカー計画<sup>注18)</sup>へと移り変わった。

1980 年代以降に実用化された窒化ケイ素自動車部品のなかでグローブラグなどは現在でも使われているが、ほとんど使わなくなった部品もある。構造用セラミックスの市場規模の伸びは全体としてかなり高いが、セラミックフィーバーのときの市場

予測に比べればはるかに小さい規模である<sup>21)</sup>。構造用セラミックスの現在の主な用途は半導体製造装置のセラミックス部品、排ガス浄化用ハニカム触媒およびディーゼル自動車の排ガスフィルター、工作機械用の窒化ケイ素ベアリングである<sup>21)</sup>。これらの出荷額の伸びは大きい、これらの製品のほとんどが日本で製造されていることを考えると、構造用セラミックスの研究開発で培われた製造技術や脆性材料の利用技術の蓄積によって、技術革新が推進されたように思われる。

本稿では窒化ケイ素セラミックスが自動車部品として応用が進められた経緯を紹介した。これは自動車技術の進化の一環であるが、同時に世界の構造用セラミックスの研究開発の流れの一部でもある。ナチスドイツから戦勝国のアメリカに引き継がれたサーメット研究、英国から米国に引き継がれ日本で発展した窒化ケイ素は構造用セラミックス研究の主流であり、その基盤の上に現在の構造用セラミックスの技術革新がある。セラミックフィーバーのときの市場予測に比べると現在の市場規模ははるかに小さいが、構造用セラミックスの世界市場の大部分は日本企業によって開拓された。なお、これらの詳細は日本セラミックス協会機関誌の「セラミックスアーカイブズ」、およびインターネットの「セラミックス博物館」で公開されている<sup>22)</sup>。

## 参考文献

- 岡田 明, セラミックス, 40 [4] 256-275 (2005).
- 浜野健也, 窯協, 62 [701] 674-678 (1954).
- K. H. Jack, *Ceramics and Civilization* vol. III, Ed. by W. D. Kingery, Am. Ceram. Soc., Ohio (1986) p. 259-288.
- G. G. Deeley, J. M. Habert and N. C. Moore, *Powd. Met.* 8 145-151 (1961).
- E. C. van Reuth, *Ceramics for High Performance Applications*. Ed. by J. J. Burke, A. E. Gorum and R. N. Katz, Brook Hill, Massachusetts (1974) p. 1-5.
- 山崎慎一, 自動車技術, 38 [1] 1290-1298 (1984).
- 三友 護, セラミックス, 39 [9] 668-685 (2003).
- 田中英彦, セラミックス, 42 [5] 342-359 (2007).
- A. A. Griffith, *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A.* 221, 163-198 (1920).
- G. R. Irwin, *J. Appl. Mech.*, 24 361-364 (1957).
- 岡田 明, セラミックスの破壊学, 内田老鶴圃, (1998).
- 古賀和憲, セラミックス, 42 [9] 668-671 (2007).
- 石渡正治, 自動車技術, 43 [1] 53-61 (1989).

- 14) H. Kawamura and S. Yamamoto, SAE Paper 830580 (1983).
- 15) 藪田勝久, セラミックス, 42 [9] 672-674 (2007).
- 16) 堀内重昭, 槇本隆, いすゞ技報, 69 26-28 (1983).
- 17) H. Matsuoka, H. Kawamura and S. Toeda, SAE Paper 840426 (1984).
- 18) 田代圭介 ほか, 自動車技術, 39 [10] 1179-1185 (1985).
- 19) 岡田 明, セラミックス, 42 [9] 675-676 (2007).
- 20) 伊藤高根, セラミックターボチャージャ, 冬樹社, (1990).
- 21) A. Okada, J. Euro. Ceram. Soc., 28 [5] 1097-1104 (2008).
- 22) <http://www.ceramic.or.jp/museum/>

## 注

- 1) セラミックスは磁器が進化した材料である。一般的な磁器は粉碎したカオリンと長石に粘土を配合したものを成形し、焼成した製品である。カオリンは焼成後に骨格となるムライトを形成し、粘土の配合は可塑性を高めて成形を容易とし、長石は高温で溶けてカオリンの焼結による緻密化を促進する。焼結による緻密化の促進には原料粉末に微細なものを使用し、糊のような有機質の結合材を用いて可塑性を改善すれば、耐熱性のある粉末を焼結によって緻密化することができる。また、焼結性の不足は焼結を促進する成分を微量添加して補うことができる。このようにして代表的な電気絶縁体であるアルミナ、磁気ヘッドや永久磁石に用いるフェライト、セラミックコンデンサの主要な誘電体であるチタン酸バリウム、圧電磁器のPZTなど多様なセラミックスが20世紀の半ばまでに開発された。
- 2) 戦時中のドイツの窯業研究については、連合国技術調査団の報告がある。この概要は文献2)に紹介されている。アルミナと鉄の複合材料が比較的良好的な特性を示したことが公開されると、サーメットと名付けられたセラミックスと金属の複合材料の材料研究が米英などで盛んに行われるようになった。
- 3) 成形した金属シリコン粉末を窒素との反応によって多孔質な窒化ケイ素へ転換する製造方法。
- 4) このプロジェクト(BMD: Brittle Materials Design)ではフォードが自動車用、ウェスチングハウスが発電用のセラミックガスタービンの開発を請け負って研究開発が進められた。
- 5) 破壊力学はセラミックスを高い応力のもとで使用するときの信頼性確保の指針となるとともに材料開発にも影響を及ぼし、破壊じん性や品質のばらつきの指標であるワイブル係数がセラミックス材料開発の目標値として設定されるようになった。
- 6) 日本の企業による技術開発は次第に本格化し、イタリアとアルミナを添加する窒化ケイ素の焼結方法(東芝)が見出され、微細で高純度な窒化ケイ素粉末(電気化学、宇部興産、東洋曹達など)の製造も始まった。複雑系状の窒化ケイ素セラミックスの成形および焼結技術の開発(京セラ、日本碍子、日本特殊陶業、旭硝子など)も精力的に取り組まれた。
- 7) その後のおもな進化としては、ガスに替わってガソリンが燃料に用いられるようになり、同時に気化器が導入された。さらに電気火花による点火方式、セルモータを用いた始動方式などをはじめ多くの改良がなされ、今日に至っている。オットーサイクルは基本的に混合ガスをピストンで圧縮し、断熱圧縮によって温度が上がった混合ガスに点火して燃焼爆発を起こす方式であるから、高温で発火せず、火花点火によってすみやかに燃焼爆発するようなオクタン価の高い燃料が必要である。一方、圧縮比を高めるとエンジンの熱効率には向上するから、オクタン価の高い燃料開発はガソリンエンジンの熱効率向上に直結した。
- 8) ディーゼルエンジンはピストンで圧縮した空気に燃料を吹き込んで、燃焼爆発させる方式である。高い圧縮比での運転に加えて、空気過剰の状態では燃焼が起こるから燃費に優れる。
- 9) 1000°C程度の耐熱性の超合金を用い、高温のタービンブレード内部に空気の流路を設けて空冷することにより、燃焼ガス温度より部材温度を低く保つことができる。
- 10) 炭化ケイ素、窒化ケイ素、窒化アルミニウムなどのこと。
- 11) 破壊力学の父と呼ばれる A. A. Griffith はガラスを引き伸ばした繊維の引張強さと繊維径の関係を調べ、脆性材料の強度が微細なき裂によって支配されることを提案した。弾性体の力学によれば切り欠き先端の応力は切り欠きの曲率に依存し、曲率がゼロのき裂先端の応力は無限大に発散する。グリフィスは脆性材料の破壊は引張りによってき裂が進展したときの弾性エネルギーの解放が新たに形成された表面のエネルギーを超えたときに起こると考えた。
- 12) ガラスやセラミックスへの適用が盛んになり、ガラスの水分によって加速される応力腐食割れとそれによる遅れ破壊、セラミックスの破壊じん性と組織の関係などの研究がなされた。
- 13) 無冷却といっても空冷でエンジンを冷却する方式である。水冷による冷却機構を持たないエンジンのこと。
- 14) シリンダーを熱伝導率の低いセラミックスで覆って断熱したターボコンパウンドディーゼルエンジン。エンジンシリンダーの断熱によって排気ガスの温度を高め、高温を保った排熱のエネルギーを利用してタービンを回転させる。ターボコンパウンドシステムはこの回転力をクランクシャフトに伝えて駆動力を増強するシステムのこと。
- 15) Advanced Gas Turbine
- 16) 実用化された窒化ケイ素部品はいずれも自動車メーカーとセラミックメーカーとの共同研究によって開発された。商品化後に、その技術をSAEなどで開発代表者が紹介するのが通例である。文献1)には主要文献が引用されているが、論文から実際の発明者や時期などを特定することは必ずしも容易ではない。
- 17) Partnership for a New Generation of Vehicles
- 18) Freedom CAR

(2008年9月22日原稿受理, 2008年11月15日採用決定)