

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 4 No. 5 2014

JSAE エンジンレビュー

## 特集:模型エンジンからロケットエンジンまで

・模型からロケットエンジンまで

From a model engine to a rocket engine

・模型用エンジンの種類と特徴

A kind and characteristic of the engine for models

・発電機用エンジンの特徴

Characteristic of the engine for generators

・船舶用・発電用大型エンジンの技術動向

Technical trend of the large engine for marine application, generation

・ロケット用エンジン

Commentary of the rocket engine



公益社団法人

自動車技術会

- コラム：●商用車用ディーゼルエンジンの排出ガス清浄化：下田 正敏（編集委員） 1  
Systematic Development of Clean Heavy Duty Diesel Engines for Commercial Vehicle

特集：模型エンジンからロケットエンジンまで

- ・模型からロケットエンジンまで：菊池 勉（編集委員） 4  
From a model engine to a rocket engine：  
NISSAN MOTOR CORPORATION & Editing committee
- ・模型用エンジンの種類と特徴：小川精機株式会社 開発グループ 8  
A kind and characteristic of the engine for models：O.S.ENGINES MFG.CO,LTD.
- ・発電機用エンジンの特徴：布川 剛史（本田技術研究所） 11  
Characteristic of the engine for generators：Honda R&D Co.,LTD
- ・船舶用・発電用大型エンジンの技術動向：遠藤 浩之（編集委員） 14  
Technical trend of the large engine for marine application, generation：  
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. & Editing committee
- ・ロケット用エンジン：香河 英史（宇宙航空研究開発機構） 22  
Commentary of the rocket engine：  
Aerospace Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長： 飯田 訓正（慶應義塾大学）

副委員長： 村中 重夫（元日産自動車）

幹事： 飯島 晃良（日本大学）

委員： 遠藤 浩之（三菱重工業）

金子 タカシ（JX 日鉱日石エネルギー）

菊池 勉（日産自動車）

小池 誠（豊田中央研究所）

小酒 英範（東京工業大学）

佐藤 唯史（ケーヒン）

清水 健一（元産業技術総合研究所）

下田 正敏（日野自動車）

鈴木 央一（交通安全環境研究所）

西村 知江子（堀場製作所）

野口 勝三（本田技術研究所）

平井 洋（日本自動車研究所）

山崎 敏司（編集）

発行所： 公益社団法人 自動車技術会

発行日： 2014 年 12 月 30 日

発行人： 竹村 純（三菱自動車工業）

〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2

電話：03-3262-8211

●コラム

## 商用車用ディーゼルエンジンの排出ガス清浄化 — 若いエンジン技術者の提案にどこまで答えていただけたか？ —

*Systematic Development of Clean Heavy Duty Diesel Engines for Commercial Vehicle*



下田 正敏  
Masatoshi SHIMODA

日野自動車（株） 技術研究所  
Hino Motors, Ltd. Technical Research Center

当時の石原都知事がペットボトルを振ってディーゼル車の排出ガス規制の強化を訴えられたのが1999年(平成11年)である。筆者は1975年(昭和50年)に入社以来、研究において排出ガス対策を担当してきた。大型商業車用ディーゼルエンジンであり、かつ研究を主体としたごく限られた経験ではあるが、その時々々に技術的に何を考えながら仕事をしてきたかを振り返ってみたい。

### 1 1975~1985

担当者として三度の規制対策を経験した。初期のころはDI(直接噴射式)の燃焼過程自体がまだ不明確であり、燃焼の基礎研究(高速度撮影、空気流動、噴霧、混合気形成の解析等)を実施しながら燃焼の最適化を提案し、実施してきた。基礎研究をやりながらの排出ガス対策を若手に任せることは会社として大胆な計画であったと思うが、当時の鈴木孝部長に予算と「必要性を感じた者がやるのが一番良い」との励ましを頂いて着手した。基礎研究は東京工業大学(松岡、神本先生)、京都大学(長尾、池上先生)、九州大学(村上先生)、慶応大学(佐藤、川口、藤本、飯田先生)より、研究の目の付け所、解析の方法、実験等多くのご指導をいただいた。また、鈴木孝部長にはSAEの論文作成を休日返上で指導して頂いた。しかし、NA(自然吸気)エンジンが主力であり、各ノズル噴口より噴射された噴霧の燃焼室壁への衝突を均等にして、同時にスワールによる噴霧の相互干渉を考慮して均一な燃焼を試行したり、吸気系の乱れの効果を追及したが、「NO<sub>x</sub>」vs.「黒煙」のトレードオフから大きく脱却できなかった。スキツシュリップの燃焼室が黒煙低減には効果が大きかったが、燃焼室のリップ部の温度低減のためクーリングチャンネルまでつけたが信頼性の面より実用化ができなかった。そこで、「NO<sub>x</sub>」vs.「黒煙」のトレードオフ改善のため、着火遅れが短く、比較的NO<sub>x</sub>が低く、空気過剰率が高く、黒煙が低く、燃費の良いTI(ターボインタークーラ)エンジンに研究の中心を移していった。

また、燃料噴射系が列型噴射系とメカニカルタイマの組合せであり、高圧化および制御の自由度からはほど遠いものであり、電子制御化された次世代の高圧噴射系が非常に望まれた。

### 2 1986~1995

最初のTIエンジンの市場投入が1981年であったが、その後規制適合、燃費の面より排出ガス規制が強化される毎にNAエンジンがTIエンジンに代替され、ダウンサイジング化が進んだ。このTI化の最大の問題点はターボ過給が十分に効かないエンジン極低速領域とゼロブースト時のトルクの確保である。これに最適の噴射系がコモンレール噴射系であった。

当時の将来の燃料噴射系としては、列型噴射系のスリーブコントロール、電磁弁を用いたUI(ユニットインジェクタ)、UP(ユニットポンプ)、コモンレールが祖上に載っていた。しかし、日本ではこれらの正確な情報が十分に入手できず欧州、米国に多くの出張をさせていただいた。それにより、直接コンペティタでない自動車、エンジンメーカー、大学、研究機関、各種部品のサプライヤに多くの友人を得ることができた。このネットワークからの情報、討論はその後の意思決定に非常に参考になった。このネットワークの構築は、特に研究においては大事であり、先輩から引継ぎそれを次世代に受け継ぐ大きな財産の一つである。

コモンレール噴射系の最大の利点は

- ・車両としての発進時のトルク(エンジン極低速回転時とゼロブーストルク)
- ・エンジンの再設計の容易さ(UIに比較して)
- ・駆動トルクの低さ
- ・エンジンメーカー、噴射系サプライヤがエンジンと噴射系をそれぞれ分担して同時開発が可能

であり、エンジンのTI化と相まって、コモンレール噴射系が他の噴射系を駆逐していくことになる。当初のコモンレール噴射系には燃料リークの多さ、燃焼騒音とNOxの高さなど多くの問題点があり、エンジン性能における完成度は他の噴射系に対して良いとはいえなかったが、噴射系サプライヤの技術陣の地道な改善により、燃料リークの低減、高圧化、多段噴射の自由度の拡大、噴射量の経時変化の防止等が図られ、最初の市場導入が1995年となる。

この時期にはもう一つディーゼルの後処理をどうするかという大きな問題点があった。他の自動車メーカーはガソリンエンジン部門があるので後処理部隊がいるが、弊社にはディーゼル専門のため後処理部隊がなく、大きな不安を抱えていた。当時、宮崎大学の岩本先生よりリーンNOx触媒の研究が発表され始めたのが1985~1986年であり、また同時に高圧NH<sub>3</sub>ポンペをエンジン実験室に持込み、発電所用のV系のSCR触媒でSCRのエンジン実験を始めたのが1988年ごろであった。これによりなんとかディーゼル後処理の感触をつかみ、当時の鈴木孝副社長、茂森政専務に直話し後処理グループをエンジン研究室内に1991年に立ち上げた。もとより専門家がいないので、岩本先生の研究室(宮崎大学から北海道大学)に留学生を送り込み、同時に多くの触媒サプライヤのご協力、ご指導をいただいた。しかし技術的ハードルが高く、このグループが潰されないようにリーダーを兼任し、最初の製品化にこぎつけたのが米国1998年規制対応用酸化触媒であった。その間、後処理グループの精神的飢餓感が高く、深夜まで仕事をする悪癖を生んでしまった。リーンNOx触媒が市場投入できたのが2010年である。担当者の眼の輝きがある限りはと思ひ、20年間にわたり予算をつけた。

### 3 1996~2005

最初のコモンレール付エンジンを1995年に市場投入したが「NOx」vs.「黒煙」のトレードオフ、「NOx」vs.「燃費」のトレードオフを大きく改善できない状態が続いた。この状態を脱却するため多くの燃焼解析、実験、シミュレーション等を実施し、得られた結論は以下の通りである。

- ・黒煙は噴射の初期に噴射された燃料が空気導入不十分で発生する寄与度が高い。
- ・コモンレール噴射系で黒煙を大きく低減するには初期噴射率の高い矩形型の噴射率にならざるを得ない。
- ・そのためNOxは高くならざるを得ないのでほかの方法、即ちEGRと組み合わせる。その後、更にNOx後処理と組み合わせる。
- ・そのためには燃料中の硫黄(S)を下げてサルファーフリーまでもっていく必要がある。

この燃料中の硫黄の低減は、自動車業界内部ではどうしようもなく、石油連盟にお願いするしかない。自工会と石連はお互いに持ちつ持たれつに関係にありながら、ある面では利害が反する。燃料中の低硫黄化の必要性の論文を多く発表し始めたころ、東京工業大学の神本先生に「低硫黄化は自工会-石連の間ではなく、まず技術ベースで自工会-石油活性化センターの間で討議を始めましょう」と声をかけていただき、JCAP(Japan Clean Air Program)の前身の委員会に参加させていただいた。米国においてAuto Oil Programが先行していたが、国内においては本委員会がJCAPに発展し、1997年500ppm、2005年50ppm、2007年(2005年に前倒し)10ppmのサルファーフリー燃料の実現につながったのは記憶に新しい。これによりクールEGRとコモンレール噴射系の高圧化が、到達できた時々のサルファー濃度に合わせて使えるようになり、シリンダ内の燃焼改善で大幅な「NOx」vs.「黒煙」と「NOx」vs.「燃費」の各トレードオフの改善につなげることができた。EGRの信頼性の確保には研究・開発の総力をあげた努力と協力会社の多大な尽力を頂きなんとか達成することができた。また、その後の後処理技術の発展につなげることが可能になった。これらはひとえに神本先生をはじめJCAPに参加いただいた大学の委員の方々、石油会社、自動車会社の委員の方々と石油会社のご尽力の賜物である。

### 4 2005~2008

技術研究所長として:

- ・若い技術者の提案は必ず聞く。
- ・一緒に考える。やらせてみる。
- ・眼の輝いているうちは予算をつける。

・更に高い目標に挑戦させる。

というサイクルを、開発の効率は必ずしも高くはなかったかもしれないが、回してきたつもりである。

排出ガス対策の研究として、自分の最後の仕事になったのが米国 2010 年規制と国内ポスト新長期規制である。両者ともに研究と開発の密接な協力と、多くの協力会社のご尽力により、前者においては米国 2010 年排出ガス規制だけでなく、CO<sub>2</sub>(GHG)の 2014 年、2017 年規制を同時達成したこと、後者においては尿素水を必要としないマフラー内に DPF と一体化したリーン NO<sub>x</sub> 触媒システムが、機械学会賞、自動車技術会賞等をいただいたことは望外の喜びであった。

## 5 まとめ

自分の経験から言えることは

- ・若い技術者にとって自分の提案を聞いてくれる人間、協力してくれる人間が社内、社外に必ずいることを自覚すべきであり、積極的姿勢が望まれる。
- ・技術は必然であることしか積みあげることができないが、当事者にとっては現状が必然であるか必然でないかは認識し難いものである。そのために背中を押す人間が必ず必要であることをリーダーは肝に銘じるべきである。

# 模型からロケットエンジンまで

*From a model engine to a rocket engine*

菊池 勉

Tsutomu KIKUCHI

JSAE エンジンレビュー編集委員

JSAE engine review editing committee

## 1 はじめに

今回の特集は、排気量/重量の範囲で、2 cc/0.14 kg の模型エンジンから 2808 万 cc (28 m<sup>3</sup>)/238 万 kg (2380 t) のレシプロエンジン、ロケットまで用途が異なる各種エンジンの最前線を紹介する。

本稿は、21 世紀以降の新しいエンジンと生物の比較、各種エンジンの寸法や性能を比較し、物理的な関係があるかを考察した。学術的に厳密な比較を行っているわけではないので気軽に読んでいただければと思う。

## 2 エンジンとは

そもそも、“エンジンレビュー”に冠する“エンジン”とは何か？ 語源<sup>1)</sup>を調べてみると、ingenium (古典ラテン語、natural quality。精巧なという ingenious も同じ語源)から engin(旧フランス語)を経て engine になった。蒸気機関が広範に普及した 19 世紀には engine は蒸気機関を示した。その後、各種の原動機が開発されて、それらを総称してエンジンと呼んだ。

現在内燃機関はガソリン、ディーゼル、ガスタービン、ロケット機関等、外燃機関は蒸気タービン等が様々な分野で活躍しており、我々の生活に欠かせないものとなっている。

## 3 生物とエンジンの比較

熱機関についての古い文書によると、紀元 75 年に作られたといわれるヘロンの汽力計<sup>2)</sup>が有名で 18 世紀の蒸気機関、19 世紀のガス機関等を経て、効率を改善し使う用途に合わせて進歩してきた。生物も地球の誕生以降、約 40 億年かけて様々な環境変化に対応して進化してきた。このように環境に対して変化を続ける無機質なエンジンと、有機質な生命体の類似点とその理由を考察した。

### 3.1 体格の比較

両者の体格の関係性を考察するために、哺乳類と恐竜の全長と質量の関係性を比較した<sup>3)</sup>(図 1)。この図から生物もエンジンも重い種ほど、全長が長くなる。回帰線の傾きを示す、べき数は約 -2.5 と同じ値であった。この図で見ると同じ全長では哺乳類はレシプロエンジンと比較して約 10 倍重く、恐竜とロケットエンジンはほぼ同じ線上にあり、若干右側に位置しているのは興味深い。なぜ哺乳類は重いのかを考察するため、さらに体積と質量を比較した(図 2)。哺乳動物の体積は、主要成分は水なので、水の比重と仮定して計算した。乗用車用ガソリンエンジンとトラック用ディーゼルエンジンの体積は外形最大寸法から計算した。エンジンの回帰線の傾きは、哺乳動物と比較して傾きが小さい。図中エンジンの平均密度を計算すると 0.52g/cm<sup>3</sup> となり、哺乳動物の約 1/2 となった。エンジンは比重の重い鉄やアルミニウム等でできているが、シリンダブロック、吸気管、排気管等内部には空間が多く存在するので、平均密度は哺乳動物よりも低い値になっていると思われる。

### 3.2 呼吸とガス交換

生命活動の基本である呼吸能力と、エンジン作動の基本であるガス交換の関係性を考察するために、少し仮定に無理があるが、機関回転速度≡呼吸数、総行程容積≡肺活量として哺乳動物と比較した(図 3)。いずれも大型になるほど、機関回転速度≡呼吸数が小さい値となり、総行程容積≡肺活量が大きくなった。回帰線の傾きを示す、べき数は図 1 と同じように約 -2.5 であった。

この理由について考察すると、エンジンは総行程容積が大きくなると行程が大きくなるが、平均ピストン速度には限界値があるので必然的に回転速度が制限される。同時に燃料が燃焼するには時間が必要なので、最高回転速度にも限界がある。

同様に哺乳動物の場合は、肺がポンプのように収縮と拡張を繰り返して、空気を吸い込んだり吐き出したりする動きを行うので、肺が大きくなるとそれを動かす筋肉等の器官の運動速度が律速になり呼吸回数が制限されるものと推定する。

生物の間では、アロメトリー(生物の体の大きさにかかわらず、二つの指標間に成立する両対数線形関係)があるといわれているが、今回の検討範囲ではエンジンと生物で回帰線のべき数が約 -2.5 という同じ値を示した。

生命の無いエンジンが、人間の手で開発されることによって生物的な傾向を帯びてくるということは、ただの偶然であろうか。

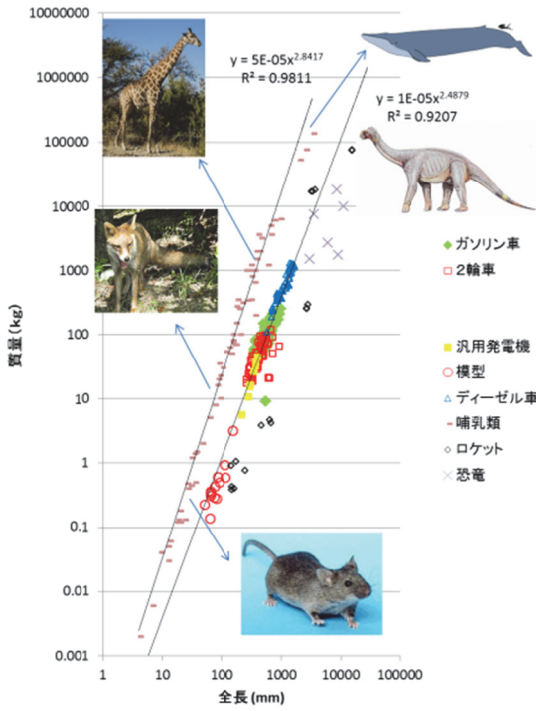


Fig.1

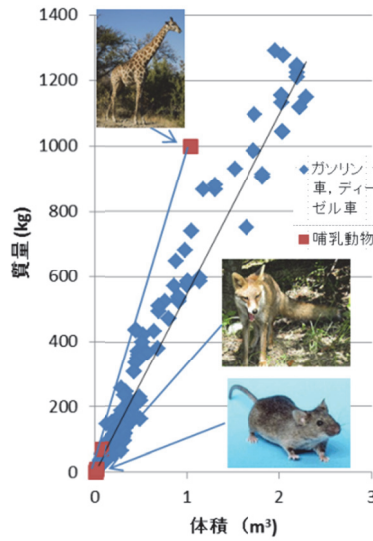


Fig.2

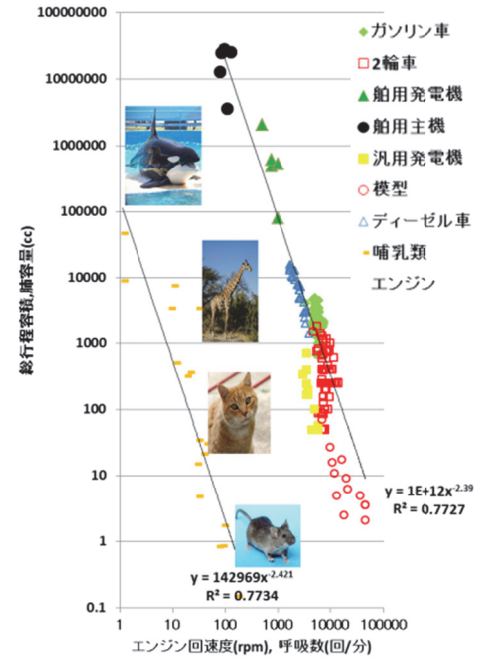


Fig.3

## 4 各種エンジンの比較

次に各種エンジン間の関係性を検討した。比較に用いているエンジンスペックの概略を表1に示す。モデル用は4ストロークと2ストロークサイクルのグロー点火エンジン、発電用は4ストロークサイクルガソリンエンジン、船用発電機は4ストロークサイクルガスエンジン、船用主機は2ストロークサイクル低速ディーゼルエンジンであり、それぞれ特集記事に掲載されている数字を用いた。乗用車(ガソリン車)と2輪車は4ストロークサイクルのガソリンエンジン、トラック(ディーゼル車)は4ストロークサイクルのディーゼルエンジンの既販車のスペックを用いた。表中の数字は、エンジン種類毎の最少と最大値の範囲を表し、青字は各項目の最小値、赤字は最大値を表す。

Table.1

エンジン種類	総行程容積(cc)	出力(kW)	回転速度(rpm)	シリンダ内径(mm)	行程(mm)	質量(kg)	
モデル用	航空機	4.49-69.67	0.302-1.25	7000-21000	15.2-33.6	13.7-29.6	0.138-3.167
	自動車	2.09-4.89	1.287-2.207	36000-45000	13.8-18.5	14.0-18.2	0.225-0.360
発電用	ガソリン	49.4-688	0.7-10	3600-6000	41-88	36-72	5.5-44
	ディーゼル	49-5000	1.5-245	3600-14000	36-102	33.1-100	18.2-295
船用	発電機	1362-15684	53-382	2900-3600	73-147	81.4-154	110-1245
	主機	79897-2049889.2	1030-18693.9	500-1000	170-500	220-580	7950-123000
ロケット用	3612831-28089997.8	10480-732000	84-127	500-980	2300-3260	289000-2380000	
							0.35-75500

### 4.1 基本諸元について

各種エンジンの基本諸元の関係を見るために、エンジン質量と総行程容積を比較した(図4)。エンジンの種類に関係なくエンジンの質量と総行程容積は比例し、1cc当たり約83gの値であった。更に機構の異なるロータリエンジンと比較してみると、自動車用は90~94g/cc、モデル用84g/ccであり、レシプロとほぼ同じ値となった。

このようにほぼ一定の関係となっている理由としては、エンジンが使われる用途、要求される耐久性等は異なっても、近年のエンジンでは全体を構成する要素(シリンダヘッド、シリンダブロック、ピストン、クランク等)と、その材質(アルミニウム、鉄等)は概略同じであるからと考える。

次にエンジン性能に影響を与える諸元として、シリンダ内径と行程を比較した(図5) 図中の直線は行程内径比が1:1を示す。シリンダ内径と行程それぞれの寸法はエンジン種で大きく異なるが、行程内径比は船用主機を除くと約1近辺の値となっている。行程内径比を大きく取ろうとするとシリンダ下端部とコネクティングロッドの干渉を避けるためにコネクティングロッドが非常に長くなり、エンジン全高が高くなることや、ピストンの横圧があがり摩擦損失が増える等の不都合が生じるので制限される。今回比較に用いた船用用低速ディーゼルエンジンはクロスヘッドを用いており、行程内径比が約3~4.5と非常に大きな値である。

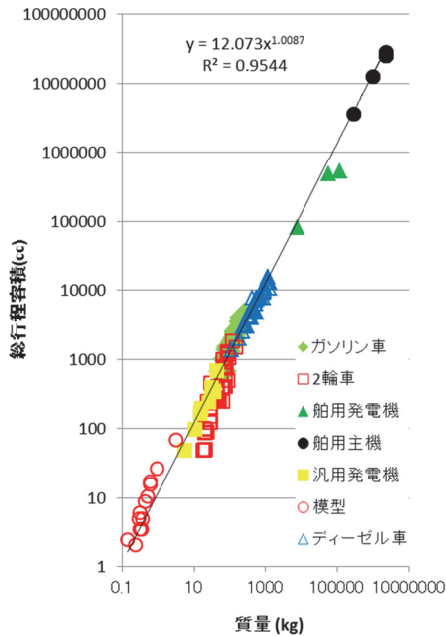


Fig.4

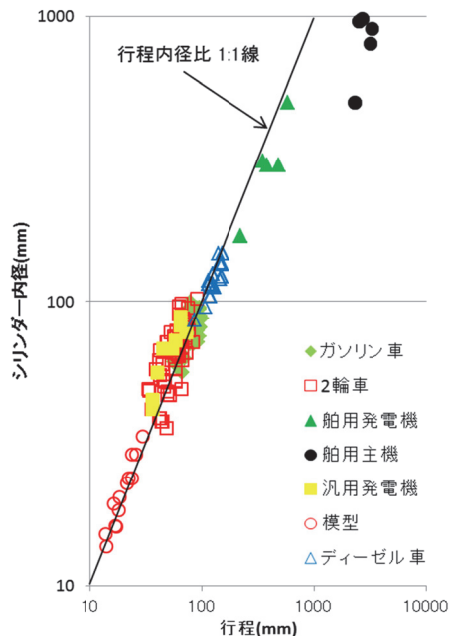


Fig.5

4.2 性能について

エンジンの重要な特性である比出力をエンジン質量との関係で比較した(図 6)。質量が大きいエンジンほど比出力が低い値を示す傾向があり、エンジン毎に特徴が見られる。

特徴の一点目は、模型エンジンのとびぬけた比出力である。これは表 1 に示すように、100kW/L を遥かに超えるエンジンは最高回転速度が 4 万 5000 rpm と極めて高い。模型用エンジンは総行程容積が 2.1~3.49 cc と小さく、行程は 14.0~16.8 mm と短いので、回転速度が 4 万 5000 rpm における平均ピストン速度は 21~25.8 m/sec であり、高速機関の代表であるガソリン車、二輪車の 11~24 m/sec の範囲に収まっている。

特徴の 2 点目は、発電用の汎用エンジンは同じ比出力でも質量が軽い所に位置していることである。これは可搬性を考慮し軽量化に注力した結果と推測する。

次に、熱効率を総行程容積との関係で比較した(図 7)。船用発電用エンジン、船用主機エンジンの熱効率の値には、今回の特集に記載されている値を用いた。汎用発電機用エンジン、模型用エンジンの熱効率の値は、今回の特集記事に記載されている燃料消費量と出力から概算した。ガソリンエンジンの熱効率は量産エンジンの概略値を用いた。図 7 は総行程容積が大きいエンジンになると高い熱効率になる傾向を示す。この関係を考察するために上死点時における概算の燃焼室面積と体積の比率(S/V 比)と、熱効率を比較した(図 8)。総行程容積が大きい大型エンジンになるほど燃焼室容積が大きく、S/V 比が小さな値となる。S/V 比は冷却損失と未燃率の二つの素質を表しており、この図から熱効率に対しては、S/V 比低下による冷却損失の影響が大半を占めていると思われる。

比出力が高いエンジンを作る場合、模型エンジンの例のように、行程容積を小さくする必要があるが、図 8 に示されるように S/V 比が大きくなり熱効率が低下してしまう。このように、エンジンの出力と燃費はトレードオフ関係となり使われる用途に合わせて設計される。

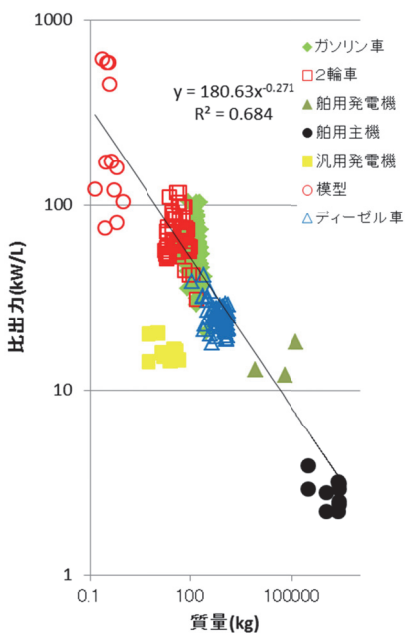


Fig.6

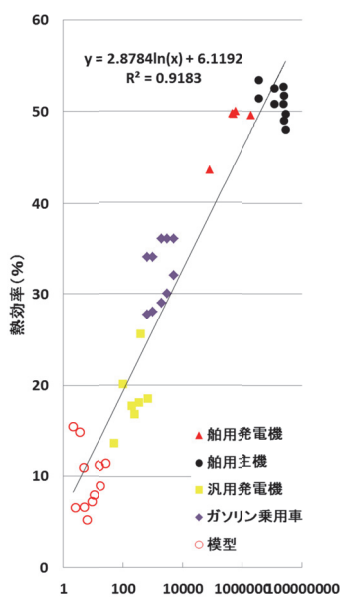


Fig.7

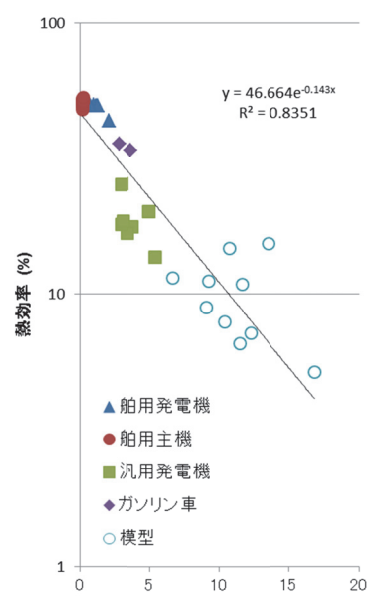


Fig.8



**5 まとめ**

自然は自ら周囲の環境とのインタラクションを通して、様々な形態を発生させてきた。一方、人間が製作するエンジンも今回比較した範囲では、自然物と同じ傾向を持つことが分かった。この理由は、エンジン、生物ともに、空気を酸化剤として取り込み、内部で炭化水素ほかを「燃焼」させて、熱・運動エネルギーを得ているという共通則によるものと思われる。

2ccの模型用エンジンから2808万cc(28m<sup>3</sup>)の船用エンジンを比較した結果、諸元寸法や、性能特性は、大きさに関係なくある程度の一定関係を持つことが分かった。

今回比較したパラメーターの線上から外れたエンジンが考案されれば、全く新しい発想のエンジンが誕生する可能性があり、将来の技術発展に期待をしたい。

比較用の貴重なデータの収集にご協力いただいた、三菱重工、本田、小川精機、JAXAの皆様には感謝いたします。

**【参考文献】**

- 1) 小口幸成, 動力発生学, 朝倉書店
- 2) John F. Sandfort, 宮島龍興/高野文彦訳, 熱機関
- 3) Flindt, 浜本哲郎訳, 数値でみる生物学

# 模型用エンジンの種類と特徴

～Max45000rpm の秘密とは～

小川精機株式会社 : 開発グループ

## 1 はじめに

模型用エンジンの種類は多岐に渡るが、弊社が製造販売しているエンジンの内、主な用途ごとにその構造と特徴を紹介する。

はじめに弊社について簡単にご紹介させていただく。昭和11年(1936)、創業者の故小川重夫が大阪市東住吉区にて小川製作所を創業。模型飛行機用エンジン(O.S.1型ピキシー)としてOSエンジンは誕生した。(図1)

同16年、資本金20万円にて小川精機株式会社を設立。同29年、模型用ラジオコントロール装置の生産開始。同32年、現在の本社工場を新築移転。同43年、世界初の模型用ロータリーエンジンの商品化に成功。同48年、日本初のシュニユール掃気方式のグローエンジンを開発。同51年、4サイクルエンジンの量産開始。同53年、ライブ・スチーム・ロコモティブの製造、販売を開始。同58年、奈良工場完成。平成2年、模型用スーパーチャージャー付4サイクルエンジンを開発。常に模型用エンジンメーカーのパイオニアとして成長してきた。模型を趣味とする人には”O.S.エンジン“というブランドで、国内外で良く知られている。

## 2 模型用エンジンの種類と基本構造

模型用のエンジンとして使われるのは、ガソリンやバイオエタノールを燃料とするものもあるが、一般的にメタノールを主成分とする燃料を用い、2及び4ストロークサイクルのグローエンジンが主流を占める。本稿では、2ストロークグローエンジンを主に述べる。

模型用グローエンジンの代表的な構造を図2に示す。2ストロークサイクルエンジンの場合、キャブレターを通った燃料はクランクシャフト(図3)の中心部を通り、クランクケース内で1次圧縮されて吸気ポートを経てシリンダ内に入る。

シリンダヘッドに取り付けられたグロープラグに電流を流し、フィラメントを赤熱させてエンジンを始動させる。その後通電を止めてもフィラメントは、燃焼熱と触媒熱によって焼玉として働きエンジンは回転を継続する。エンジンが高回転で運転されれば、フィラメントは冷える間もなく高温になり、点火時期は自動的に進角される。点火時期の調整はフィラメント材料である、複数の白金族の配合量などで調整する。プラグが持つ熱価ごとに、ホットタイプとコールドタイプに位置づけられる。それぞれの使い分けは、プラグのフィラメントの熱が高温になり、断線やノッキングによるオーバーヒートが発生する場合、コールドタイプを使って適温に下げ、トラブルを防ぎ、逆に始動後いつまでも温度が上がらず、レスポンスが今ひとつの時にはホットタイプを使用し適正な点火タイミングを得るといように使い分ける。(図4)

シリンダーは真鍮、炭素鋼鋼管で無電解NiPメッキやハードクロムメッキを施している。シリンダー自体は単純なパーツだが2サイクルエンジンの場合ポート(穴あけ)加工形状、切削角度等が性能追求の要となる。その為5軸同時加工などを駆使して加工している。(図5)

ピストンは、ピストンリング仕様のエンジンでは実物のエンジンと近いAC8A相当を用い、コンプレッションリングが1本ついている。(図6)

ピストンリング径φ19.5以下のピストンでは、特殊なハイシリコンアルミのピストンと、真鍮製シリンダーを組み合わせることにより、ピストンリングを使用せず気密を保つ。この為にサブミクロンレベルでのマッチングとミクロンレベルで管理されたテーパ加工を施している。

クランクピンとピストンピンはすべり軸受けで、強度と軽量化の為コンロッドは超ジュラルミン製で両端には銅合金のブッシュがはめ込まれている。クランクシャフトが片持ちであることが構造上の特徴である。

空気と燃料の混合比率はキャブレターによって調整され、通常は4～7位の間で運転される。

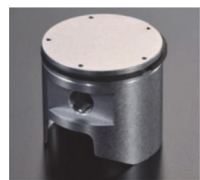
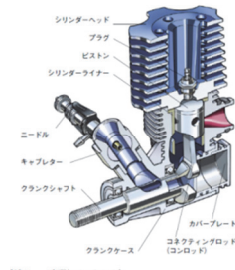


Fig.1 O.S.1型ピキシー Fig.2 エンジン断面図 Fig.3 シャフト外観 Fig.4 グロープラグ外観 Fig.5 シリンダー外観 Fig.6 ピストン外観

## 3 各種エンジンの用途別特徴について

一口に模型用エンジンといっても、搭載する模型が飛行機であったり、車やヘリコプターであったりとその形態や使用する目的は様々で、中には安定した回転が求められるものもあれば、高出力が求められるものもある。

表1に代表的な用途と基本諸元に示す。

Table 1 模型用エンジンの代表的な用途と基本諸元

エンジン特性項目	飛行機用2st			飛行機用4st			ヘリコプター用			車用			船用	
	小	中	大	小	中	大	小	中	大	小	中	大		
品名	15LA	65AX	160FX	FS-30S	FS-95V	FR7-420	37SZ-H	55HZ-R	105HZ	12XZ Spec.3	R2101	30VG	21XZ-M	
Bore (mm)	15.2	24.0	33.6	19.5	29.0	24.0	20.5	23.0	29.0	13.8	16.1	18.5	16.27	
Stroke (mm)	13.7	23.5	29.6	16.4	23.6	22.0	18.4	21.5	26.0	14.0	17.2	18.2	16.8	
気筒数	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	
エンジン排気量(cc)	2.49	10.63	26.25	4.90	15.59	69.67	6.07	8.93	17.17	2.09	3.49	4.89	3.49	
点火形式	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	グロー	
圧縮比	7.69:1	10.28:1	8.12:1	7.74:1	9.30:1	8.79:1	13.7:1	11.4:1	10.0:1	7.47:1	7.12:1	8.65:1		
エンジン寸法(mm)	長さ	63.7	93.3	115.5	82.0	115.7	158.5	75.0	76.6	85.5	52.4	65.6	65.6	
	幅	40.0	60.0	74.0	44.0	61.0	230.0	45.0	52.0	61.0	39.0	45.0	45.0	
	高さ	61.0	99.5	123.2	86.5	119.0	230.0	76.5	90.9	100.7	82.6	94.2	113.0	
重量(kg)	ドライ	0.138	0.497	0.925	0.279	0.592	3.167	0.293	0.429	0.596	0.225	0.340	0.360	0.307
使用回転領域(rpm)	最低回転	2,500	2,000	1,800	2,500	2,100	1,500	2,000	2,000	2,000	5,000	4,000	4,000	4,000
	最高回転	18,000	12,000	10,000	13,000	11,000	7,000	21,000	20,000	16,500	45,000	45,000	36,000	45,000
燃費	常用運転時(L/H)	0.50	1.75	2.50	0.60	1.20	3.50	2.14	2.31	3.27	0.90	1.50	2.18	
出力	最大(kW)	0.302	1.287	2.721	0.368	1.250	—	1.030	1.545	2.721	1.287	2.059	2.207	2.059
トルク	最大(Nm)	0.169	0.768	2.888	0.351	1.194	—	0.546	0.868	1.733	0.351	0.596	0.753	0.596

以降用途毎に、その特徴や工夫点を述べる。

### 3.1 飛行機用

飛行機用エンジンは1936年に販売されたOS1型ピキシーが最初で、2ストロークサイクルでピストンバルブ、ピストンにデフレクタのない横断掃気エンジンで、圧縮比は4.5で、回転数はせいぜい4000rpm程度であった。その後1940年には9.35ccのOS6型が発売、当時の最高性能のエンジンで圧縮比5.2最高回転7000rpmであった。戦争中アメリカにおいてグロープラグ点火方式が実用化された。現在においては排気量は5~70ccで圧縮比は約8程度、最高回転数は13000rpmになる。飛行機用エンジンの主流であるAXシリーズエンジンを図7に示す。

飛行機用として工夫している点はロータリーバルブ方式のためキャブレター位置がプロペラ回転域に近いので、安全性から燃調ニードル部を斜め後方になるよう設定している。排気量によりシリンダーピストンは小型(5cc以下)はピストンリングレス方式とし、中・大型はリング方式を採用。

特殊な例として1970年に販売を開始したロータリーエンジンを紹介する。(図8)パンケル型ロータリーエンジンと同じ構造で、同じ原理で作動する。(図9)従来のレシプロエンジンは、シリンダー内でのピストンの往復運動をクランク軸の回転運動に変換し動力を取出しているのに対し、ロータリーエンジンはローターで発生する回転力を直接出力軸に伝えている。このためレシプロエンジンは往復運動による慣性力の不釣り合いのため振動が大きい、ロータリーエンジンは、ローターの回転運動のみなので、容易にバランスをとることができ、振動が少なく、非常に円滑に作動する高性能エンジンである。

初期はサイドポート吸気であったが、ベリフェラルポート吸気に変更され現在に至っている。



Fig.7 AXシリーズ



Fig.8 ロータリーエンジン

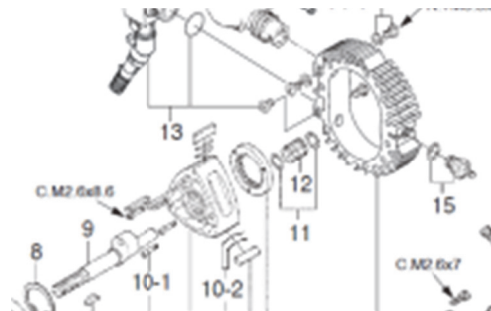


Fig.9 エンジン構造詳細

### 3.2 RCカー用エンジン

カー用エンジンは2.1ccから5.0cc、圧縮比は7程度。オンロードのレーシング用では実用回転数が45000rpmに達する。

1/10 ツーリングにおいて2011年、2013年に全日本チャンピオンに輝いたO.S.SPEED 12XZ SpecIIIの工夫点と特徴について述べる。(図10)

全回転域でトルクフルな出力特性、さらにどんな回転域からでも微妙なスロットル操作に確実に追従するレスポンスは、必要なパワーをドライバーの望む時に発生させ、その結果、過酷な走行条件下でも、ドライバーにとって運転自体が楽に感じられる自然なエンジンフィーリングを実現しています。その実現のために以下の工夫をしている。

シリンダーライナーはオーソックスな3ポート(掃気3ポート+排気1ポート)ながら、O.S.SPEED専用のポート及びインナーヘッド(燃焼室)との組み合わせにより、ベースエンジンの低燃費性能を犠牲にせずにスムーズかつ伸びの有る出力性能を実現。軽量、低重心専用アウターヘッドを採用。ボトムからあけられた多数の穴は、軽量化と抜群の冷却性能を実現する。また前モデル比約2.5mmダウンの全高を実現。低重心化がマシンの運動性能向上に大きく貢献している。

リヤボールベアリングには、転がり抵抗軽減の為にセラミックスボールベアリングを採用している。クランクシャフトにはポッティング加工を施し、カウ

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 4 No. 5 2014

ンターウェイト部には慣性マスを最適化する為にタングステンウェイトを追加している。表面処理には耐久性と滑りに貢献する DLC コーティングを施している。

図11は小川精機が管理する奈良県の R/C エンジンカーの専用サーキットです。エンジン R/C カーの普及を目指して設置しているコースで、エンジンカーを対象としたレースイベント等を定期的に行なっている。エンジン R/C カーを思う存分楽しむことが可能である。



Fig.10 RC 車エンジン



Fig.11 専用サーキット

### 3.3 ヘリコプター用(図12)

ヘリコプター用エンジンはホバリング時等の冷却のためシリンダヘッドが大きく作られている事が特徴である。排気量は 5.23cc~17.17cc で圧縮比は 11 程度。回転数は 15000~23000rpm 程度である。近年、模型ヘリコプターは、運動性能が格段に向上し、エンジンもその激しい飛行姿勢の変化に対応する性能が求められる。安定した燃料供給システムの開発は燃料加圧方式の領域に入っている。エンジン使用回転域は、キャブレタースロットル開度が半分のホバリング域とスロットル全開のフルパワー領域の 2 系統で安定した出力特性が要求される。ヘリコプター専用エンジンを図13に示す。このエンジンは、F3C 競技用をターゲットに開発されたものである。図のエンジンではブルーアルマイトのヒートシンクで冷却効果を高め、高回転、高出力が要求され、高めの圧縮比でありながら、熱ダレしない新設計の燃焼室形状とし、ホバリングと上空フライト時の出力域での安定した運転を可能にしている。



Fig.12 ヘリコプター



Fig.13 ヘリコプター用エンジン

### 3.4 ボート用

ボート用エンジンは、カー用や飛行機用エンジンをベースにしながらも、水上走行に欠かせないトルクフルな出力特性を得られるようなチューニングを施している。船体内部は密閉された状態になるので、確実な冷却性能を得るため、水冷ヘッドの装着を基本としている。(図14)



Fig.14 ボート用エンジン

## 4 さいごに

今まで模型用エンジンとしては様々な構造のものが存在したが、小型、軽量、低コストを基本として、複雑な構造なものは淘汰されてきた。本報が物づくりを目指す若いエンジニアや、自動車用エンジンをはじめエンジンを開発に携わる人達の一助になれば幸いである。

# 発電機用エンジンの特徴

Characteristic of the engine for generators

布川 剛史

Takeshi FUKAWA

本田技術研究所汎用 R&D センター

Honda R&D Co., LTD

## 1 はじめに

Honda 発電機の歴史は 1966 年に量産を開始した E80 (図 1) から始まる。それから約半世紀に亘り、お客様の要望に応えるべく出力の向上、小型軽量化、低騒音および低燃費化への進化を遂げてきた。

現在の Honda 発電機を発電方法から大きく分類すると

- AVR 方式: 交流発電機の電圧を自動的に一定に保つための装置、回路構成が簡単であるが、周波数はエンジンの回転数に依存する。
- サイクロコンバータ方式: 入力周波数より低い周波数の交流電圧を得られる方式。単純な回路構成でコンピュータ機器を除くほとんどの機器に供給できる電気を発生。
- インバータ方式: PWM 制御により出力周波数はエンジン回転数に依存しない。コンピュータ機器にも使用可能な高品質な電気が得られるが回路が複雑になる。

以上の 3 種類があるが、お客様の仕様用途により使い分けられている。使用できる燃料は主に無鉛ガソリンであるが、ほかにも LPG (プロパン、ブタン)、天然ガス、灯油等があり、それぞれの燃料の特性に合わせた燃料供給システムを持ち、必要に応じ各部構成部品の変更を行っている。

## 2 発電機用エンジンの特徴

### 2.1 エンジン回転数

既述の通り、AVR 方式の発電機は出力電力の周波数がエンジンの回転数に依存するため、このタイプの発電機に搭載される汎用エンジンは 3000rpm (50Hz) もしくは 3600rpm (60Hz) の一定回転数で運転されている。ただし、発電機は作業から離れた場所に設置されることが多いため、自動車やモーターサイクルのようにドライバー (オペレータ) によるエンジン回転数制御は望めず、エンジン回転数を一定に調速する機構 (ガバナ※) が必要である。近年インバータを搭載したことにより、出力周波数がエンジン回転数に依存しなくなったため、スロットルバルブ開度をモータで制御し、負荷に合わせたエンジン回転数で運転することによる燃費の向上と騒音の低減を図る発電機が増加している。

※ワットが実用化した遠心調速機が一般的である。

### 2.2 バルブ駆動形式と排気量

汎用エンジンのバルブ駆動形式としては、シリンダヘッド周りのコンパクト化と、信頼性および整備性の向上を図るために OHV 方式が一般的である (図 2)。また、排気量は発電機に求められる可搬性や発電容量に応じて Honda では 49.4cm<sup>3</sup> (0.6kVA) ~ 668cm<sup>3</sup> (10kVA) のエンジンを搭載している (表 1)。

### 2.3 燃料の種類

Honda 発電機の燃料は無鉛ガソリンのほかにガス (プロパン、ブタン、天然ガス) を用いた発電機がある。ガス燃料はガソリンに比べ長期保管しても劣化しにくい特徴がある。また、国内ではカセットコンロ等で使用するカセットガスは、交換が容易で可搬性に優れ、コンビニエンスストア等でも容易に入手できることから東日本大震災以降バックアップ発電機用燃料として注目された。一方で、燃料の価格を熱量ベースで比較した場合、LPG の方がガソリンに比べ安い地域が多いため、新興国ではガソリンエンジンをベースに、LPG 用に改造された発電機が散見される。



Fig.1 E80

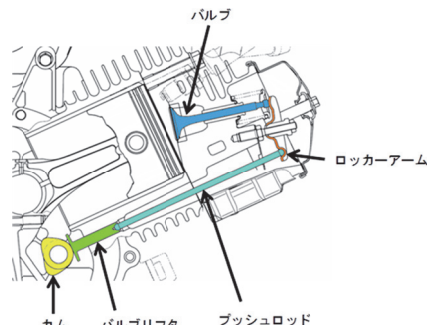


Fig.2 OHV エンジン

### 3 エミッション規制

発電機にも自動車やモーターサイクル同様、エバポエミッションや排気ガスエミッションの法規規制(国内は自主規制)があり、世界的に厳しくなる傾向にある(表 2, 3, 4)。

特に新興国は煮炊きに使われる木質バイオマスや、急速に進んだ工業化による大気汚染の対策が急務であるため、先進国の規制値を参考にして、規制発行時に段階を踏まずに突然先進国並の規制値になる事がある。

Table.1 Honda 発電機とエンジンの仕様

呼称	EX6	EU16/20i	EBR2300	EU28/30is	EG3500XK1	EM4500CX	EU7000is	EB10000
E N G	ENG排気量 [cm <sup>3</sup> ]	49.4	98.5	163	196	242	337	688
	L×W×H [mm]	225×274×353	287×304×402	304×362×335	313×376×335	355×428×418	383×484×448	405×410×438
	重量(ドライ) [kg]	5.5	10.6	15	16	25.8	36.4	44.4
	ボア [mm]	41.8	56	68	68	73	82	78
	ストローク [mm]	36	40	45	54	58	64	72
	圧縮比	8	8.5	8.5	8.5	8.2	8	8.2
	常用回転数 [rpm] (エコスロットルOFF)	4500	3000~5000 (4300~5000)	3600	2500~3800 (3500~3800)	3600	3000(50Hz)	2400~3600 (3300~3600)
最大回転数 [rpm]	4500	5000	3600	3800	3600	3000	3600	3600
完 成 機	燃費 [L/h]	0.55	1.07	1.49	1.82	2.24	3.27	2.95
	連続運転時間 [h]	3.8	3.4	8.1	7.1	2.4	7.2	6.5
	使用可能燃料	無鉛ガソリン	無鉛ガソリン	無鉛ガソリン	無鉛ガソリン	無鉛ガソリン	無鉛ガソリン	無鉛ガソリン
	定格出力 交流 [kVA]/直流[W]	0.6	1.6	2.3	2.8	3	5	5.5
最大出力 [kW]	0.7	2	3	3	3.5	5.5	7	
発 電 方 法	周波数	AC-AC変換方式 (サイクロコンバータ方式)	DC-AC変換方式 (インバータ方式)	遠心重鎮式	DC-AC変換方式 (インバータ方式)	遠心重鎮式	遠心重鎮式	DC-AC変換方式 (インバータ方式)
	電圧	サイリスタ位相制御	PWM	トランジスタAVR方式	PWM	トランジスタAVR方式	トランジスタAVR方式	PWM
	発電方式	多極界磁回転型	多極界磁回転型	2極界磁回転型	多極界磁回転型	2極界磁回転型	2極界磁回転型	多極界磁回転型

Table.2 日本国内自主規制(3次規制) [g/(kW・h)]

	排気量 [cm <sup>3</sup> ]	CO	HC+NOx	導入時期
非携帯機器用	<225	610	10	2016年1月1日
	225 ≤	610	8	2015年1月1日
携帯機器用	< 20	805	50	2014年1月1日
	20 ≤ <50	805	50	
	50 ≤	603	72	

Table.3 EPA PHASE 3 規制 [g/(kW・h)]

クラス	排気量 [cm <sup>3</sup> ]	CO	HC+NOx
I	<225	610	10
II	225 ≤	610	8
III(HH)	<20	805	50
IV(HH)	20 ≤ <50	805	50
V(HH)	50 ≤	603	72

Table.4 EU STAGE 2 規制 [g/(kW・h)]

クラス	排気量 [cm <sup>3</sup> ]	CO	HC+NOx	NOx
SH1(HH)	<20	805	50	10
SH2(HH)	20 ≤ <50	805	50	10
SH3(HH)	50 ≤	603	72	10
SN: 1	< 66	610	50	10
SN: 2	66 ≤ <100	610	40	10
SN: 3	100 ≤ <225	610	16.1	10
SN: 4	225 ≤	610	12.1	10

### 4 排気ガスエミッション規制対応技術の紹介

汎用エンジンは作業機として使われることから、自動車やモーターサイクルに比べ過酷な条件で使用されることが多く、日々の点検整備が重要である。そのため、簡略な構造と高い整備性を両立するキャブレタを用いた空冷エンジンが一般的である。しかしながらキャブレタ方式は、供給する燃料流量が主にジェットにあけた穴径で決定されるため、燃料の供給量をエンジン負荷や回転数に応じて自由に制御や補正をすることが困難である。よって、排気ガスエミッション性能を向上させることは容易ではない。

そこで Honda では電子制御スロットルを持つキャブレタを搭載した既存の発電機をベースに、自動車やモーターサイクルで培った電子制御燃料噴射システムの技術を用いて、EPA PHASE IIIをクリアしつつ、かつ、キャブレタモデルに対して定格時の燃料消費率を20%向上した EU7000is(図3)の販売を2014年2月に開始した。

当該発電機は、排気ガス浄化触媒とエンジン負荷や回転数に応じて燃料噴射量を制御する電子制御燃料噴射システムを搭載しながら、従来のキャブレタ方式の発電機と同じ販売価格を達成できた(図4)。

### 5 低燃費化

Honda では、キャブレタ方式の発電機においても電子制御スロットルとインバータ方式を採用することで負荷に応じた回転数制御を行い、低燃費化を図ってきた。しかしながら、今後ますます厳しくなる排気エミッション規制をクリアしつつ、さらなる低燃費化を進めるためには、電子制御燃料噴射システムの採用が不可欠であり、普及のためにさらなる一段のコスト低減が求められている。



Fig.3 EU7000is

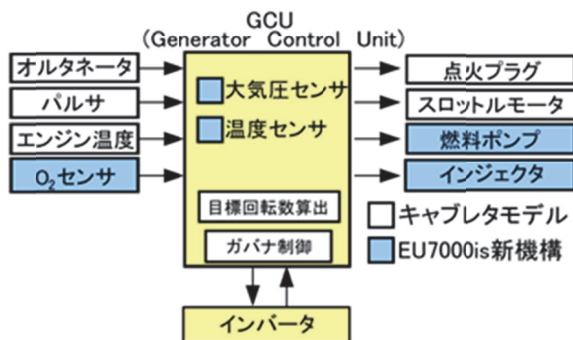
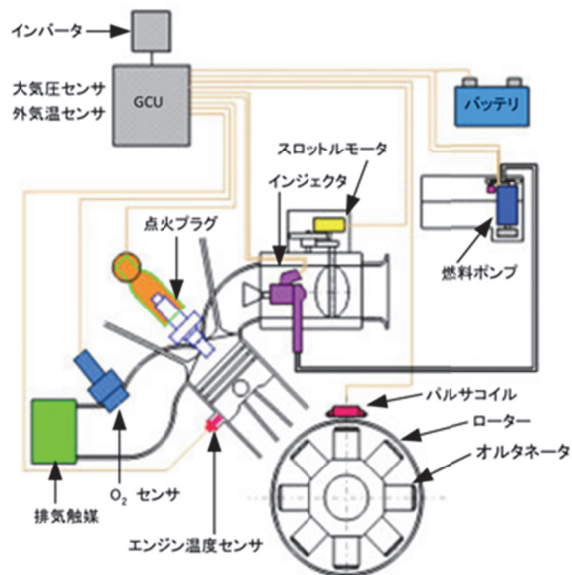


Fig.4 EU7000is 燃料燃料噴射システム概略図

6 今後の動向

汎用エンジンの排気エミッション規制は、自動車やモーターサイクル同様、先進国、新興国を問わず規制を強化する国が今後増加すると予想される。また、既出の通り発電機は作業機であるため、販売価格や燃費は自動車やモーターサイクル以上に厳しくお客様から評価される。EU7000is は Honda 発電機シリーズのハイエンドモデルであるため、排気ガス浄化触媒と電子制御燃料噴射システムを組み合わせ構築できたが、より小さいクラスに向けては、燃費と排気エミッションのバランスを最適化しつつ、お客様がより購入しやすい価格のシステムを搭載した発電機が求められている。

# 船舶用・発電用大型エンジンの技術動向

Technical trend of the large engine for marine application, generation

遠藤 浩之

JSAE エンジンレビュー編集委員

JSAE engine review editing committee

## 1 はじめに

1000kW以上の船用・発電用エンジンの技術動向について紹介する。船用については、主に低速2サイクルディーゼルエンジンについて、発電用については、中高速の4サイクルガスエンジンについて紹介する。

## 2 船舶用大型エンジンの技術動向

### 2.1 最近の製品開発の背景

現在、船用大型エンジンの課題となっているのは、

- ①エンジンのIMO TierⅢ排ガス規制への適合
- ②船舶のEEDI(Energy Efficiency Design Index)規制への適合
- ③デュアルフューエル化によるガス燃料への対応

である。

IMO 排ガス規制は図 1.1 に示す<sup>1)</sup>ように、現在の TierⅡ から 2016 年には TierⅢ規制に移行するため、TierⅢ規制への適合が必要である。また EEDI 規制<sup>2)</sup>は図 1.2 に示すように、一定の条件化で 1ton の貨物を 1 マイル運ぶ際に排出される CO<sub>2</sub> 量であり、2015 年、2020 年、2025 年と三段階に分けて削減率が決められている。デュアルフューエルエンジンは主に LNG 船主機用として開発されている。

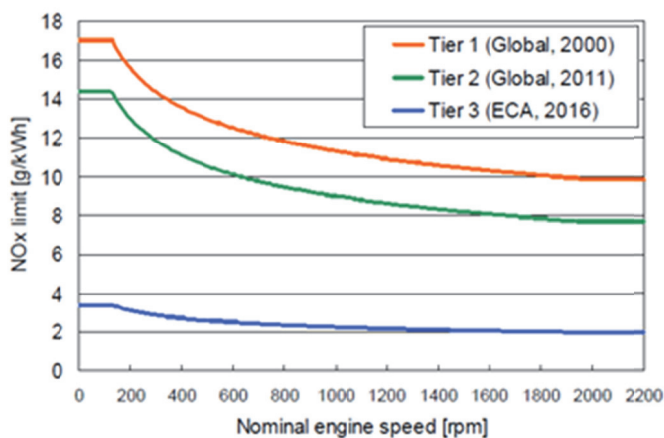


Fig.1.1 IMO 排ガス規制(文献 1 より引用)



Fig.1.2 EEDI 規制(文献 2 より引用)

### 2.2 各社の最近の船舶用大型 2 サイクルエンジン

最近の船舶用の大型 2 サイクルディーゼルエンジンの主な機種と諸元について表 1.1 に示す<sup>3-7)</sup>。

BMEP/回転数を下げた運転点(L4/R4/P4 レーティング)では、燃費率 158g/kWh、熱効率 53.4%と高い熱効率を実現している。

IMO TierⅢ排ガス規制への適合に対しては、自動車用ディーゼルと同様に、電子制御燃料噴射、EGR、SCR、VG 過給機などの技術が開発されてきている。EEDI 規制に対しては、燃料噴射や排気弁開閉時期の最適化によって、部分負荷域での燃費率改善に取り組みられている。また廃熱回収技術も各種開発されてきている。

また LNG 船においては、ディーゼル燃料とガス燃料の両方に対応できるデュアルフューエルエンジンが出現してきている。各技術について次項にて説明する。

### 2.3 船用大型エンジンに使用されている技術

#### (1) 燃料噴射装置

燃料噴射系は電子制御噴射システムの採用が拡大してきている。ワルチラ社はコモンレール方式<sup>8)</sup>、MAN および三菱重工は作動油で燃料ポンプを駆動させる方式<sup>9)</sup>を採用している。三菱重工の燃料噴射ポンプについてもう少し詳しく説明すると、クランク軸からの動力で駆動される油圧ポンプによ



て作動油を増圧しておき、この作動油を電磁油圧弁で燃料噴射ポンププランジャの駆動側に流入させることで、プランジャの駆動を制御している。詳細については文献 9) を参照いただきたい。

また各社とも燃料弁ノズルチップのサックボリュームを削減することで、排出 HC 低減を図っている。

Table 1.1 最近発表された船用2サイクルディーゼルエンジンの諸元

製造者	機種	ボア×スト ローク mm x mm	L1/R1/P1 レーティング				L4/R4/P4 レーティング			
			BMEP	回転 数	燃費 率	熱効 率	BMEP	回転 数	燃費 率	熱効 率
			MPa	min-1	g/kWh	%	MPa	min-1	g/kWh	%
MAN <sup>4</sup>	S90ME-C9.2	900x3260	2.00	84	166.0	50.8	1.60	76	160.0	52.7
	G80ME-C9.2	800x3720	2.10	68	166.0	50.8	1.68	58	160.0	52.7
	G60ME-C9.2	600x2790	2.10	97	167.0	50.2	1.68	77	161.0	52.4
	G50ME-B9.3	500x2500	2.10	100	167.0	50.2	1.68	85	161.0	52.4
	G40ME-B9.3	400x2500	2.10	125	174.0	48.5	1.68	106	170.0	49.6
ワルチラ <sup>6</sup>	W-X92	920x3468	2.00	76	166.0	50.8	1.51	70	159.0	53.0
	W-X82	820x3375	2.10	76	165.0	51.1	1.60	65	158.0	53.4
	W-X62	620x2658	2.05	97	167.0	50.5	1.54	77	160.0	52.7
	W-X40	400x1770	2.10	146	174.0	48.5	1.98	124	172.0	49.0
MHI <sup>7</sup>	UEC80LSE-Eco-B1	800x3150	2.10	80	166.0	50.8	1.68	68	160.7	52.5
	UEC60LSE-Eco-B1	600x2400	2.10	105	168.0	50.2	1.68	79	162.7	51.8
	UEC50LSH-Eco-C2	500x2300	2.19	108	164.0	51.4	1.61	85	158.0	53.4
	UEC40LSE-Eco-B1	400x1770	2.10	146	174.0	48.5	1.68	124	168.7	50.0

## (2) 排気動弁系

船用 2 サイクルディーゼルの排気弁は油圧駆動であり、電磁弁により開閉時期を可変化できる。MAN 社は ME-B シリーズより、電磁弁ではないカム + 油圧式を採用したが、図 1.3 に示すような可変機構を使用することで、75% 負荷以下で排気弁閉時期を早める可変化を行っている<sup>3)</sup>。

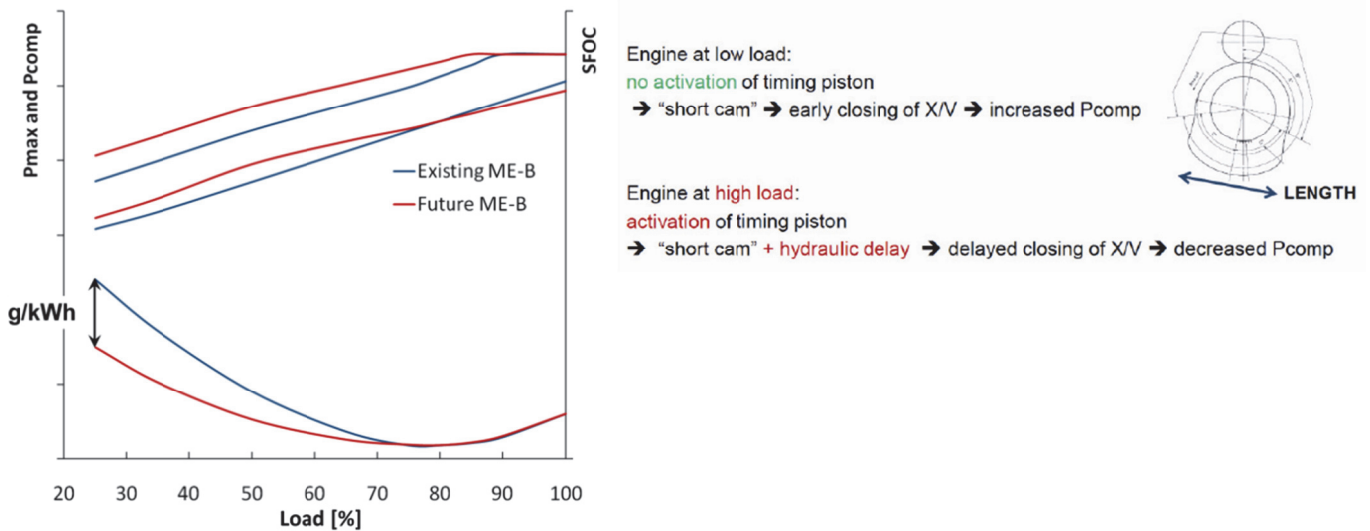


Fig.1.3 MAN 社 ME-B エンジンの可変排気バルブタイミング(文献 3 より引用)

## (3) EGR

IMO Tier III 規制への対応のため、各社とも EGR 技術の開発を行っている<sup>10,11)</sup>。船用 2 サイクルディーゼルで使用する C 重油は硫黄や残炭分の含有量が多いため、図 1.4 に示す様に、いったんスクラパーで排ガス中の微粒子や SOx を除去し、EGR プロウで加圧して給気中に再循環させている。なお、IMO Tier III 規制では ECA (Emission Control Area) のみ NOx 規制値が厳しくなるため、ECA に限定して EGR を使用する。

## (4) SCR

EGR 以外の対応策として SCR についても開発されている<sup>1,10)</sup>。2 サイクルエンジンは排ガス温度が低いため、図 1.5 に示すように、エンジン排気ボリュームと排気タービンの中に SCR 触媒を配置するのが一般的であるが、エンジン動特性への影響を考慮し、図 1.6 のように排気タービン後に SCR 触媒を配置したシステムも開発されている。

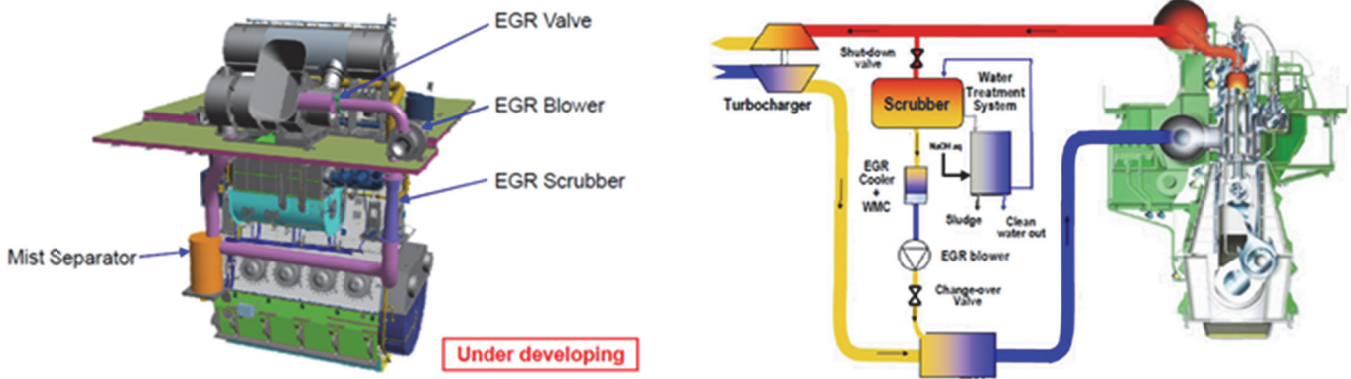


Fig.1.4 三菱重工(左)および三井造船&MAN 社(右)にて開発中の EGR システム(文献 10 および 11 より引用)

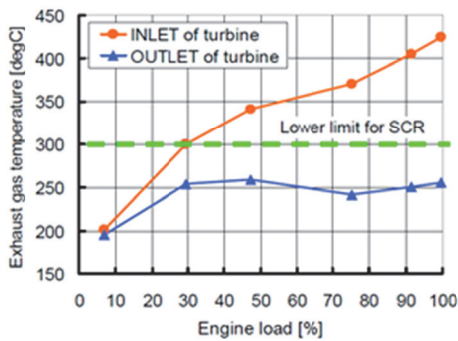


Figure 4: Exhaust gas temperature of a large two-stroke marine diesel engine

- \*1 船用 2 サイクルエンジンで使用される C 重油燃料の場合、硫黄分が 3wt% と高いため 300°C が SCR の使用下限値となる。
- \*2 触媒ブロックに堆積した Soot を圧縮空気で定期的にブローする Soot-blower を装備している。

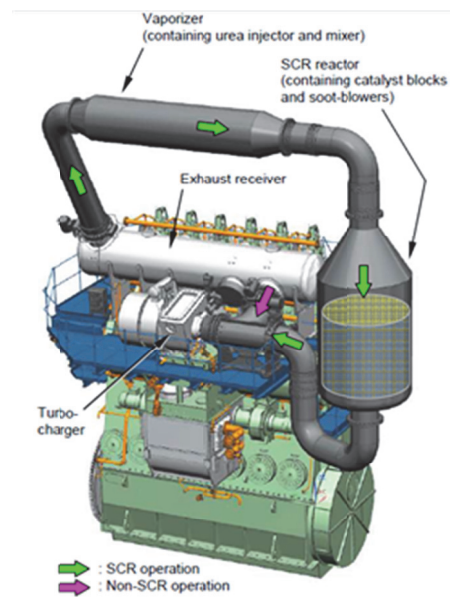


Figure 5: Large two-stroke marine diesel engine Hitachi-MAN B&W 6S46MC-C7 equipped with high pressure SCR system

Fig.1.5 日立造船&MAN 社にて開発中の SCR システム(文献 1 より引用)

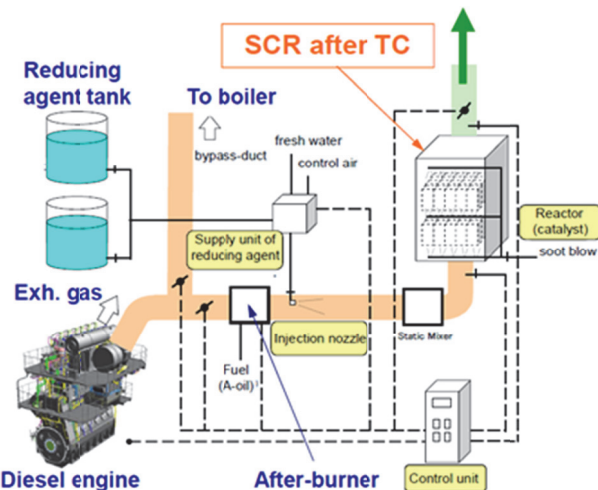


Fig.1.6 三菱重工にて開発中の SCR システム(文献 10 より引用)

### (5)デュアルフューエル化

特に LNG 船用の主機として、低速 2 サイクルディーゼルエンジンをベースに天然ガスを燃焼できるようにしたデュアルフューエルエンジンが生産化されてきている<sup>4,12,13</sup>。図 1.7 左に示すように、MAN 社および三菱重工の場合はシリンダカバーにガスインジェクタを有する高圧ガス噴射方式<sup>4</sup>)を使用しており、ガスの燃焼は拡散燃焼方式である。図 1.7 右に示すように、ワルチラ社の場合はシリンダライナ下部にガス供給弁を有する低圧ガス噴射方式を採用し<sup>13</sup>、ガスの燃焼は予混合燃焼方式である。着火方式は両社ともパイロット燃料による着火としている。

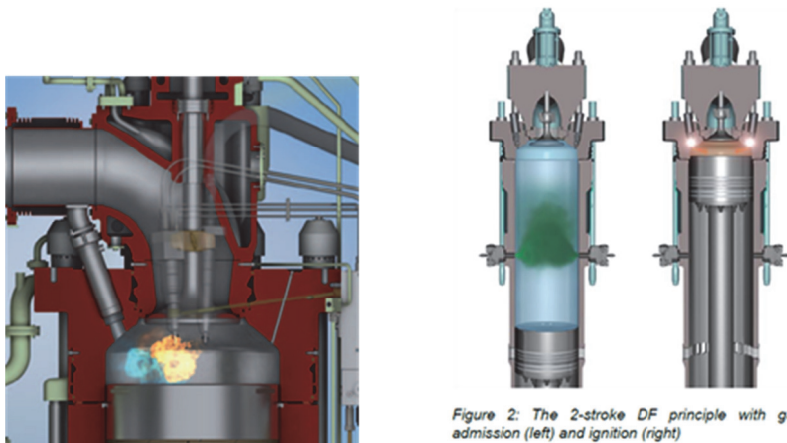


Fig.1.7 MAN 社(左)およびワルチラ社(右)のデュアルフューエルガスエンジン(文献 4 および 12 より引用)

### (6)過給技術

過給機においても、自動車用ディーゼルと同様の技術開発がなされている。即ち VTI や VTG と呼んでいる可変タービン絞り機構付き過給機およびハイブリッド過給機である<sup>14-17</sup>。ハイブリッド過給機はモーター発電機を組み込んだ過給機であり、起動時や低負荷時に電動アシストに使用する場合と排気エネルギーからエネルギーを回収するターボコンパウンドとして使用する場合がある。図 1.8 に三菱重工が開発したハイブリッド過給機の例を示す<sup>14,15</sup>。

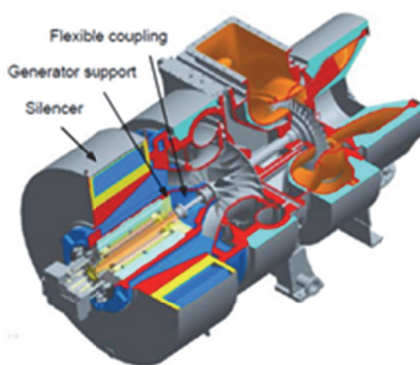


Fig. 13 MET83MAG Hybrid Turbocharger Cross-sectional View

Fig.1.8 三菱重工のモーター発電機付き過給機(文献 14 より引用)

## 2.4 船用大型エンジンまとめ

本報告で概説した通り、船用 2 サイクルディーゼルエンジンでは、50%を超える高い熱効率を維持したまま、環境適合性と経済性を高める各種の技術開発がなされている。基本的な考え方は自動車用ディーゼルと同様であるが、2 サイクルエンジン特有の低排気温度や C 重油燃料に対する対応を行っている。

## 3 発電用大型エンジンの技術動向

### 3.1 最近の製品開発の背景

電力自由化や自然エネルギーの伸長のため数百 MW 規模の集中型大規模発電設備ではなく、数十 MW 以下の分散型電源の市場が伸びてきている。また新興国では初期投資および建設期間の観点から分散電源を主要電源の一つとして取り組んでいる国も多い。また重油燃料に比較して、価格が安定し、クリーンな排ガスを実現できる天然ガスの利用が進んできている。以上の背景から発電用大型ガスエンジンの需要が拡大しており、技術開発も活発に進められている。

## 3.2 各社の高効率ガスエンジン

最近のガスエンジンの主要諸元を表 2.1 に整理する。高出力化と高発電効率化が進んできており、従来ガスタービンの市場とされてきた 10-50MW の市場についてもガスエンジンのシェアが増えてきている。ここでは各社のガスエンジンについて概説する。

Table 2.1 最近発表された発電用高効率ガスエンジンの諸元

製造者	機種	ボア × ストローク	気筒数	BMEP	出力	回転数	発電効率
		mm x mm		MPa	ekW	min <sup>-1</sup>	%
ワルチラ	50SG	500x580	18	2.2	18,320	500	48.6
川崎重工	KG18V	300x480	18	2.1	7,800	750	49.5
三菱重工	18KU30GSI	300x380	18	1.95	5,750	750	48.8
GEJ	J920	310x350	20	2.2	9,500	1,000	48.7
MWM	TCG2032V16	260x320	16	1.94	4,300	1,000	44.1
GEJ	J624GS	190x220	24	2.4	4,400	1,500	46.5
MTU	4000	170x210	20	2.18	2,520 <sup>*1</sup>	1,500	44.3
CAT	G3516H	170x215	16	2.13 <sup>*1</sup>	2,027	1,500	44.7
三菱重工	GS16R2	170x220	16	1.55	1,000	1,000	42.3

\*1: 発電機効率 97% と仮定して算出した値。

### (1) ワルチラ

ワルチラは世界最大出力となる 18.3MW のガスエンジン 50SG を発売している<sup>18)</sup>。着火燃焼方式としては、副室トーチジェット着火希薄燃焼方式を採用している(図 2.1)。ノックセンサによる気筒毎燃焼モニタリング結果に基づいて、点火時期とガス供給量が気筒毎に制御され、高 BMEP かつ希薄域での安定した燃焼を実現している。

### (2) GE Jenbacher

9500kW の J920 を発売開始した<sup>19)</sup>。採用技術を図 2.2 に示す。吸気弁早閉じによる高膨張比サイクルに二段過給を組み合わせている。図 2.3 に示すように二段過給における過給機総合効率は 75% 以上を達成しており、発電効率 48.6% の実現に寄与している。また混合気温度を上げることで、インタークーラ排熱を利用出来るようにし、総合効率を 90% まで高めている。

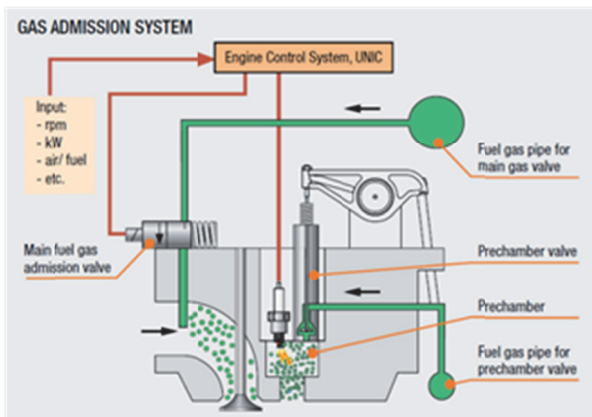


Fig.2.1 ワルチラ社 50SG のガス供給システム(文献 18 より引用)

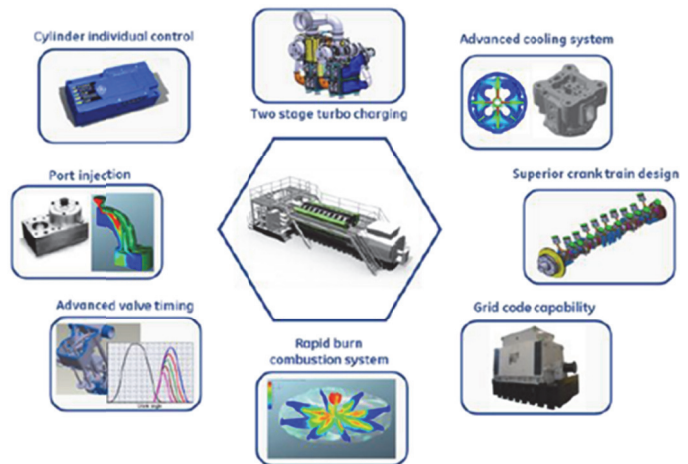


Fig.2.2 GE Jenbacher 社 J920 で採用されている技術(文献 19 より引用)

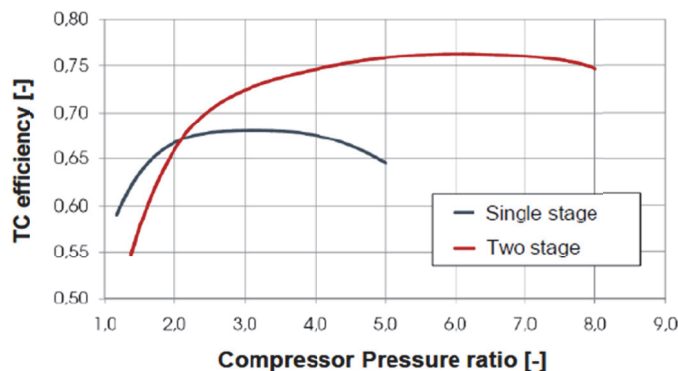


Fig.2.3 GE Jenbacher 社 J920 の過給機総合効率(文献 19 より引用)

**(3) MWM**

4300kW で 44.1% の発電効率を達成した TCG2032V16 は、シリンダ直径  $\Phi$  260mm で単室式希薄燃焼を実現しており、世界で一番大口径な単室希薄燃焼方式ガスエンジンである<sup>20)</sup>。

**(4) Caterpillar**

CAT は 2013 年に発電効率 44.7% を達成した 2027kW ガスエンジン G3516H を発売開始した<sup>21)</sup>。本エンジンも単室希薄燃焼方式を採用している。

**(5) MTU**

MTU が 2013 年の CIMAC 大会にて発表した<sup>22)</sup> 高効率ガスエンジン MTU4000 は、2014 年 4 月より 12 気筒および 16 気筒版を発売開始するとアナウンスされた<sup>23)</sup>。出力は 16 気筒で 2MW となる。発電効率は 44.3% であり、CAT3516H とほぼ同等の出力 & 性能である。なお本エンジンは単室希薄燃焼方式を採用している。

**(6) 川崎重工**

川崎重工では、世界最高効率である発電効率 49.5% を達成した 7,800kW ガスエンジンを製品化している<sup>24)</sup>。シリンダ毎個別燃焼制御、可変ノズル付き過給機の採用によって高い発電効率を実現している。

**(7) 三菱重工**

三菱重工では 2013 年 11 月に東京ガスと共同開発した 1000kW ガスエンジン GS16R2 を発売開始した<sup>25)</sup>。エンジン定格回転数を 1000rpm に抑え、BMEP(正味平均有効圧力)を増大することで機械効率を高めるとともに、高膨張比サイクル、高効率過給機などの適用によって、発電効率 42.3% を達成している。

また中速エンジンとしては、5.75MW の KU30GSI エンジンを販売している。KU30GSI では、筒内圧センサを使った燃焼制御技術を適用することで 48.8% の高い発電効率を達成している<sup>26)</sup>。

**3.3 高効率ガスエンジンに使用されている技術**

ここでは、各社高効率ガスエンジンに適用されている技術について概説する。

**(1) サイクル**

いずれのエンジンにおいても、幾何学的な膨張比より圧縮比を大きく取る高膨張比サイクルが採用されている。手法としては、吸気弁の早閉じもしくは遅閉じが採用されている。

**(2) 過給技術**

吸気弁早閉じもしくは遅閉じを採用することで、出力が低下してしまうため、過給機による圧力比を増大することで、出力を維持している。このため各社とも高膨張比サイクルに最適な高圧力比の過給機を採用している。また一部のガスエンジンでは二段過給も採用されている<sup>19)</sup>。

**(3) 着火技術**

主に国内メーカーでは、副室式が主流となっている。副室内に燃料ガスを直接供給し、主室には  $\lambda$  (空気過剰率) が 2 程度の希薄混合気を吸入する。圧縮上死点近傍で副室内の当量比がほぼ量論比近傍となり、副室内に取り付けられた火花点火栓で点火する。副室内の混合気が燃焼し、副室から主室にトーチジェットとして噴出することで、主室内の希薄混合気に着火する。

海外メーカーでは、単室式を採用した機種が多い。通常の火花点火栓では希薄混合気への点火が困難なため、主室の混合気の当量比を上記の副室式に比較すると  $\lambda$  で 1.6 程度のリッチ側に設定するとともに、点火栓を小容積キャピティで囲ったプリチャンプラグを採用している。

**(4) 燃焼制御技術**

中速ガスエンジンではシリンダ内圧力を圧力センサで計測し、ノッキングや失火の状態を判定しながらリアルタイムに燃焼を制御する手法が適用されている。図 2.4 に三菱重工の中速ガスエンジンに適用されている燃焼制御システム (M-RICS) について示す。M-RICS では、各シリンダに取り付けられた筒内圧力センサの信号に基づいて、ノッキングや失火の状況を判断し、各シリンダのガス供給量と点火時期を最適制御する<sup>26)</sup>。

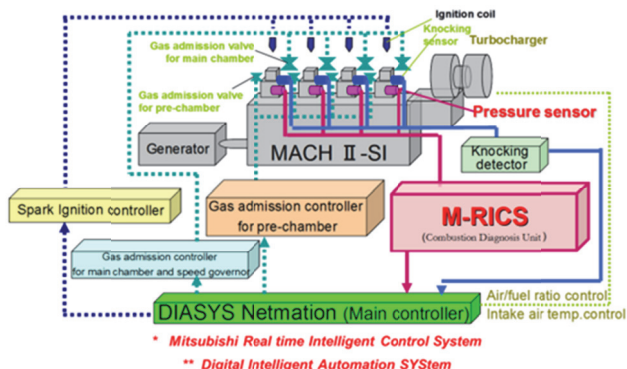


Fig.2.4 三菱重工の KU30GSI エンジンに適用されている燃焼制御システム (文献 26 より引用)

## (5) 廃熱利用技術

分散電源の場合、需要家に隣接して発電を行うため、エンジンから発生する廃熱を活用することができる。図 2.5 に示すように廃熱から、温水、蒸気を作り出したり、吸収冷凍機を駆動して冷水を得ることが出来る。このように電気だけでなく、熱を利用する方法をコージェネレーションと呼んでおり、エネルギーの総合利用効率で 70%以上に行えるため、各国で省エネルギーの観点から普及促進の政策が施行されている。

最近の技術としては、エンジン冷却水の温度を高くして、蒸気生成に利用する全蒸気回収技術や、ORC(Organic Rankine Cycle)を用いて、廃熱から発電する技術が開発されている。図 2.6 に Turboden 社の ORC<sup>27)</sup> の例を示す。

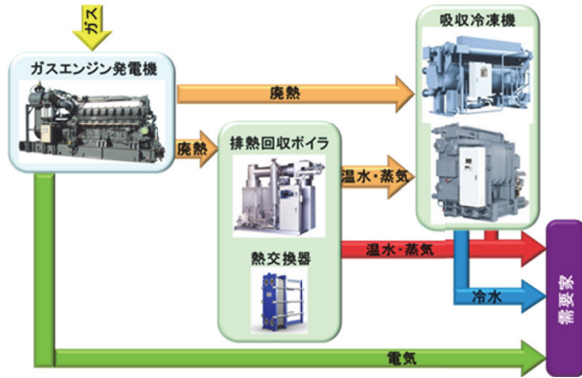
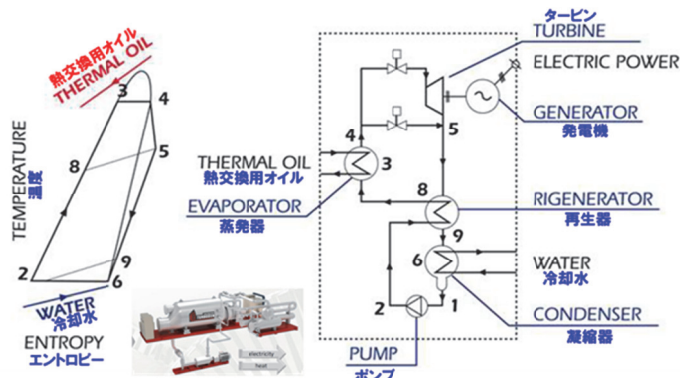


Fig.2.5 ガスエンジンコージェネレーションシステムの構成例

Fig.2.6 Turboden 社の ORC<sup>27)</sup> と作動サイクル

## 3.4 発電用大型ガスエンジンまとめ

発電用ガスエンジンは、大型エンジンの分野では、この 20 年で最も飛躍的に効率と出力が向上している。トップランナーについては、発電効率で 40%(1994 年ごろ)→49%(2014 年)、BMEP で 1.5MPa(1994 年頃)→2.4MPa(2014 年)と大幅な性能向上になっている。今後とも分散電源市場拡大の流れは続くと思われるため、当面発電用大型ガスエンジンの市場は拡大していくものと考えられる。

## 【参考文献】

- 1) Takahiro Fujibayashi, Shinji Baba, Hironaka Tanaka, "Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NOx Tier III", Paper No.29, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 2) 平岡,「船用大型低速ディーゼルエンジンの技術動向」,第 24 回内燃機関シンポジウム講演論文集,2013 年 11 月
- 3) Susanne Kindt, "State-of-the-art MAN B&W Two-stroke Super-long-stroke Engines", Paper No.71, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 4) <http://www.doosanengine.com/common/pdf/product/Doosan-MAN02.pdf>
- 5) Marc Spahni, Andreas Kyrtatos, Ronald de Jong, "The New X Generation Low-Speed Engines from Wartsilä?", Paper No.267, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 6) <http://www.wartsila.com/en/engines/generation-x-low-speed-merchant-marine-2-stroke>
- 7) [https://www.mhi.co.jp/products/expand/mitsubishi-ue\\_diesel\\_engine\\_line-up.html](https://www.mhi.co.jp/products/expand/mitsubishi-ue_diesel_engine_line-up.html)
- 8) Heinrich Brunner, Jean-Noel Constantin, Beat Schumacher, "Upgrade of Wartsilas Two-Stroke Engine Portfolio to fulfil the Changing Marine Market Requirement", Paper No.326, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 9) 阪口ほか,「環境対応ディーゼル機関"UEC-Eco-Engine"」, P.20, 三菱重工技報 Vol.41 No.1(2004)  
<http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/411/411020.pdf>
- 10) Naohiro Hiraoka, Katsumi Imanaka, "Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine", Paper No.418, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 11) Toshinori Shirai, Peter Skjoldager, Sumito Yokobe, Shoichi Ibaragi, "EGR system Development on MES Test engine 4S50ME-T9", Paper No.176, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 12) Ingemar Nylund, Marcel Ott, "Development of a Dual Fuel technology for slow-speed engines", Paper No.284, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 13) <http://www.wartsila.com/en/press-releases/lng-carrier-chooses-wartsilas-new-game-changing-2-stroke-low-pressure-dual-fuel-engine-as-main-propulsion>
- 14) Yoshihisa Ono, "Solutions for better engine performance at low load by Mitsubishi turbochargers", Paper No.15, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 15) 「省エネを追及した三菱重工船用機械エンジン株の船用製品」, P.30, 三菱重工技報 Vol.51 No.1(2014)  
<http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/511/511030.pdf>
- 16) Jacoby Pierre, Xu Henry, Wang David, "VTG turbocharging - a valuable concept for traction application", Paper No.116, CIMAC 2013, 27th CIMAC

World Congress in Shanghai, May2013

- 17) Stephan Mest, Oswald Loewlein, Dirk Balthasar, "TCS-PTG – MAN Diesel & Turbo's power turbine portfolio for waste heat recovery", Paper No.214, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 18) <http://www.wartsila.com/en/power-plants/technology/combustion-engines/gas-engines>
- 19) Christian Trapp, Andreas Birgel, Nikolaus Spyra, Herbert Kopecek, Dieter Chvatal, GE's all new J920 gas engine– a smart accretion of two-stage turbocharging, ultra lean combustion concept and intelligent controls, Paper No.289, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 20) <http://www.mwm.net/en/products/gas-engines-power-generators/tcg-2032/>
- 21) [http://www.cat.com/en\\_US/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/18485094.html](http://www.cat.com/en_US/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/18485094.html)
- 22) Udo Sander, Stephan Menzel, Markus Raindl, "The New MTU Type L64 of Series 4000 Gas Engines", Paper No.67, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 23) [http://www.mtuonsiteenergy.com/press/press-releases/detail/news/mtu\\_onsite\\_energy\\_introduces\\_further\\_developed\\_series\\_4000\\_natural\\_gas\\_engine/news\\_smode/text/](http://www.mtuonsiteenergy.com/press/press-releases/detail/news/mtu_onsite_energy_introduces_further_developed_series_4000_natural_gas_engine/news_smode/text/)
- 24) <http://www.khi.co.jp/machinery/product/power/green.html>
- 25) <http://www.mhi.co.jp/news/story/131028.html>
- 26) Hajime Suzuki, Hiroshi Yoshizumi, Michiyasu Ishida, Shoji Namekawa, Shinnosuke Osafune, MACH II-SI achieved Higher Thermal Efficiency, Paper No.421, CIMAC 2013, 27th CIMAC World Congress in Shanghai, May2013
- 27) <http://www.turboden.eu/en/public/downloads/12-COM.P-21-rev.11.pdf>

# ロケット用エンジン

Commentary of the rocket engine

香河 英史

Hideshi KAGAWA

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

研究開発本部 推進系グループ

Aerospace Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency

## 1 まえがき

エンジンにはいろいろな形式・用途のものがあるが、地上走行のみならず空の飛行、そのさらに上空の宇宙空間まで使用できるエンジンにはロケットエンジンがある。本稿では、現在日本で使用されているロケットエンジンについて、作動原理、分類やその特徴、代表的な諸元などについて述べ、ロケットエンジンも内燃機関の1ジャンルであると自動車エンジンを日々開発している方々にご紹介したいと思う。

## 2 ロケットエンジンの分類

人工衛星などを打ち上げるロケットや宇宙を飛行する宇宙機や人工衛星に使用されているエンジンがロケットエンジンです。自動車のエンジンと同様に燃料を燃焼器の内部で燃焼させてそのエネルギーを利用する基礎的な原理を利用しているものもあります。現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) で使用しているロケットエンジンの種類は、ロケットの推進剤や機構などから次のような種類に分類されています (図1)。

ロケットエンジンの力を得る原理は、エンジンから物質を噴射して、その反力を得るという単純なものです。物質を噴射するには何らかのエネルギーが必要ですが、エネルギーを力に変換する部分には自動車用エンジンのようなピストンやクランクといった複雑な機構はありません。ロケットエンジンの性能は、「噴射する物質」とその「噴射する速さ」で表すことができます。ロケットは、噴射する力をどう得るかで分類されており、化学推進と電気推進が現在使用されている主要なエンジン方式です。化学推進では、「噴射する物質」のエネルギーを、燃料と酸化剤を燃焼器内で燃やし高温高压の燃焼ガスを作りだし、そのガスを燃焼室からノズルを用いて噴出させる。この時高温ガスの熱エネルギーは、ノズル内で運動エネルギーに変換され猛スピードで噴出させています。電気推進では、「噴出する物質」をエンジン内で電離し電界を掛けて加速するという方式が採用されています。

## 3 化学推進ロケット

現在、JAXA で宇宙機からロケットまで主に使われているのが化学推進ロケットです。ロケットエンジンは、宇宙空間という空気がない環境で運転されることから、燃焼ガスを得るための燃料の他に酸化剤も運ぶ必要があります。化学推進ロケットでは、燃料と酸化剤を合わせて、推進剤と呼んでいます。推進剤の形態の違いにより、液体推進剤を使用する液体ロケットエンジン、固体推進剤を使用する固体ロケットエンジン、液体推進剤と固体推進剤を合わせて使用するハイブリッドエンジンがあります。液体ロケットエンジンの中で、推進剤の燃焼室への供給方法により、機械的にポンプを用いて推進剤を昇圧して燃焼室に押し込むポンプ式ロケットエンジンと推進剤を貯蔵するタンク自体を高压なガスで加圧して推進剤を押し出すガス押しロケットエンジンに分けられます (図2)。

ロケットエンジンの性能は、燃焼室から排気される燃焼ガスの速度で決まるため、よりノズル内で膨張させられるように高压で燃焼させる方が有利になります。この

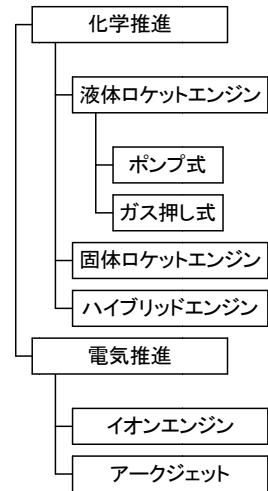


Fig.1 ロケットエンジンの分類

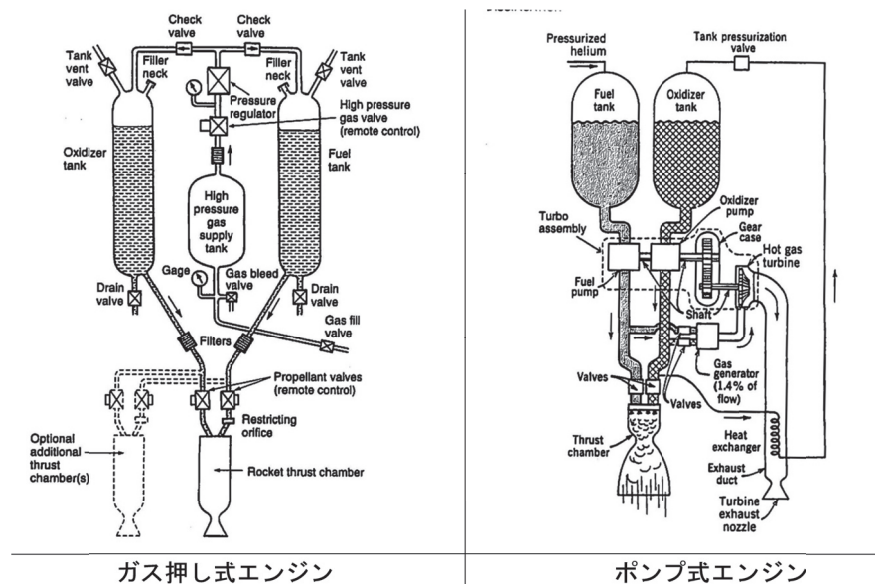


図2 液体ロケットエンジンの形式 (参考文献1)



ため、何らかの方式で推進剤を燃焼室に高圧で押し込む必要があります。タンクを高圧にするには、巨大なタンク全体を高圧に耐えるようにする必要が生じ、非常にタンクが重くなってしまいます。これを解決するために燃焼室の手前にポンプを設置して、タンク自体の圧力は低いままで軽量なタンクを使用するのがポンプ式です。ポンプが加わることでエンジン自体の構造が複雑化し重量も増えますが、タンクは軽量で済むので、必要な燃料量とのバランスを考えて、総合的に評価検討を行いどちらの方式にするかを決定します。JAXA の打ち上げロケットでは、H-IIA/B ロケットの第一段、第二段ロケットがポンプ式を採用しています。図3に推進剤として燃料と酸化剤を使用して温度の高い燃焼ガスを得る二液式と言われる方式を示します。過去 N-I と N-II ロケットの第二段で採用していました。また、JAXA の人工衛星「きずな」「みちびき」、宇宙機「あかつき」「はやぶさ」でも採用しています。

ガス押し式ではさらに簡便な一液式と呼んでいる自己分解をする推進剤を採用しています(図4)。

一液式エンジンは、液体推進剤を推進剤の圧力で電気の通電の有無により作動を制御する電磁弁を通じて推進剤と直ちに反応する触媒層に押し込み発生した高温ガスをノズルから噴出し、熱を速度に変換する反力で推力を得るという作動をします。

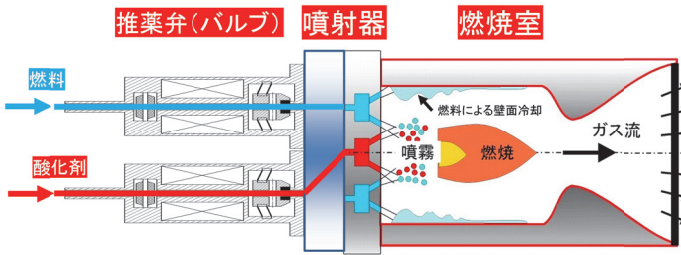


Fig.3 二液式ロケットエンジンの概念図

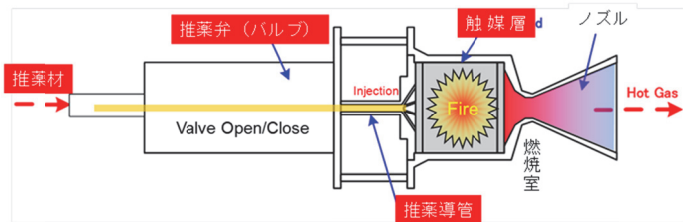


Fig.4 一液式ロケットエンジンの概念図

固体ロケットは、推進剤が固形であるところからそう呼ばれています(図 5)。貯蔵されている場所で燃焼し、貯蔵庫自体が燃焼室になります。このため、貯蔵容器そのものが燃焼に耐えられる容器にしなければなりません。しかしながら、液体ロケットに比べて構造が簡単なこと、着火が確実なこと、比較的簡単に大型化できることなどから、ロケットが地上から飛び立つ際の推力を補う目的や人工衛星で一回大きな軌道変更が必要な場合などに使われています。

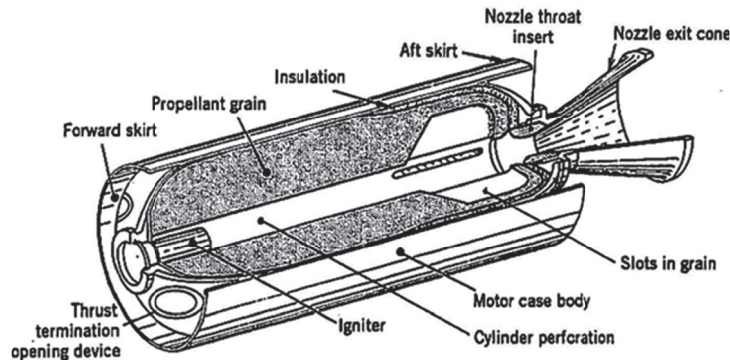


Fig.5 固体ロケットエンジン(参考文献1)

ハイブリッドロケットは、液体と固体の推進剤を組み合わせることで液体ロケット特徴である制御のしやすさと固体ロケット特徴である構造の簡単さを合わせ持つエンジンです。液体側の供給量を制御することによりロケットエンジンの動作を制御することができます(図 6)。

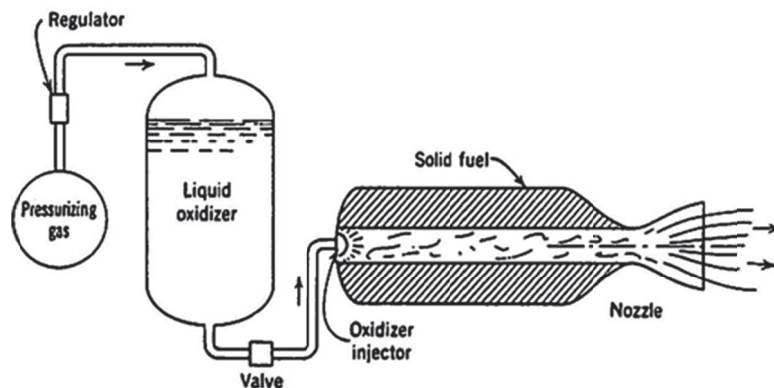


Fig.6 ハイブリッドロケットエンジン(参考文献1)

## 4 電気推進エンジン

小惑星探査機「はやぶさ」で一躍有名になったイオンエンジンをはじめとする推進剤に運動エネルギー増加に電界を使用する方式です。イオンエンジンでは、推進剤を電離してイオン化した後に電界を掛けて、推進剤を加速し噴出させます。推進剤の反応によるエネルギーではなく外部から電力を供給して加速することから、化学推進ロケットの限界を大きく超える様な非常に高速度まで推進剤を加速して噴出させることができます。このため、推進剤を節約することができ、地球から離れたところに行く用途に適しています(図7)。

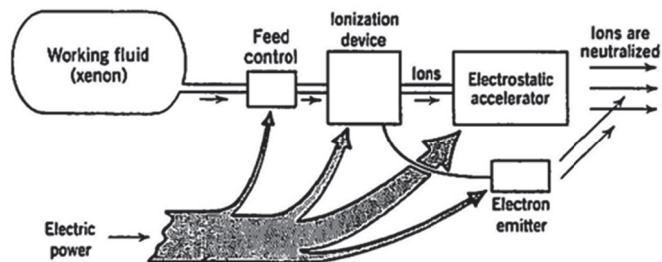


Fig.7 電気推進エンジン(参考文献1)

## 5 JAXA で使用されているエンジンの例

これまで各種のロケットエンジンを説明してきましたが、現在 JAXA で利用されているエンジンはどのようなものでしょうか。まず、国の基幹ロケットとして運用されている H-IIA/B ロケットを紹介します(表1)。液体ロケットエンジンとしては LE-7A, LE-5B, 50N スラスタが利用されています。固体ロケットとしては、SRB-A が利用されています。

Table.1 H-IIA/B ロケットに搭載されているエンジン

主要諸元	SRB-A3	LE-7A	LE-7A	LE-5B	ガスジェット
適用ロケット	H-IIA	H-IIA	H-IIA/B	H-IIA	H-IIA/B
真空中推力	2,500kN/2,305kN	1,074kN	1,098kN	137kN	50N
混合比	該当なし	5.9	5.9	5	該当なし
真空中比推力	283.6s	429s	440s	448s	221s
エンジン方式	固体	ポンプ式			ガス押し式
エンジンサイクル	該当なし	二段燃焼サイクル		エクспанダーブリードサイクル	該当なし
推進剤	コンポジット推進剤 (BP-207J)	LH2/LOX			ヒドラジン
膨張比	非公開	約 38.7	約 46.7	約 110	約 100
燃焼圧力	11.8MPa/11.1MPa	12.3MPa	12.3MPa	3.6MPa	1MPa 以下
LH2 ターボポンプ回転数	非搭載	41900rpm	41900rpm	52000rpm	非搭載
LOX ターボポンプ回転数	非搭載	18300rpm	18300rpm	18000rpm	非搭載
全長	15.1m	3.4m	3.7m	2.8m	0.176m
質量	75.5ton/76.5ton	約 1.7ton	約 1.8ton	290kg	1.06kg
推力調整	内部形状で実施	72%	72%	60%	作動時間で制御
推進薬質量	64.9ton/66.0ton	101.1ton	177.8ton	16.9ton	時間で規定
全燃焼時間	98s/116s	400s	400s	600s	3041sec

次に久しぶりの新型ロケットと脚光を浴びたイプシロンロケットですが、基本的に3段式の固体ロケットと呼ばれていますが、一段、二段、三段の固体ロケットに加え、第二段に液体ロケット、3段と人工衛星の間に PBS という液体ロケットが搭載されています(表2)。

地球を周回する人工衛星や地球から離れた宇宙空間を航行する宇宙機では、その他いろいろなロケットエンジンが利用されています(表3)。宇宙機等の軌道や姿勢を変更するのにも使用されます。打ち上げロケットの場合には、1度点火すると、そのまま燃焼させ続けることが多いですが、宇宙機用の場合は間欠運転をしながら、15年以上使用を続けるものもあります。

上述の化学推進ロケットよりも低燃費で、宇宙機をより遠くの宇宙空間に航行させる事が可能なのが、電気推進エンジンの一つのイオンエンジンで、化学推進ロケットと比べると非常に小さい推力ですが、推進剤を真空中でプラズマ化する原理を用いるものです。しかし、燃費は圧倒的に高く、より少ない推進剤で大きな速度を得られます(表4)。

Table.2 イブシロン初号機に搭載されたロケット

主要諸元	SRB-A3	SMSJ	SPM	M-34c	KM-V2b	50N	23N
仕様箇所	第1段モータ	固体モータサイドジェット	スピンモータ	第2段モータ	第3段モータ	PBS	2段 RCS
真空中推力	-	270N 以上	平均 0.85kN	平均 327kN	85.6ton	50N	23N
真空中比推力	284s	-	-	300s	301s	215s	224s
エンジン方式	固体ロケット					ガス押し式	ガス押し式
エンジンサイクル						一液式	一液式
推進剤	BP-210J	GGP-3B	BP-250JA	BP-205J	BP-205J	N2H4	N2H4
膨張比	非公開					50	55.8
燃焼圧力	最大 11.4MPa	非公開	平均 5.4MPa	最大 5.88MPa	最大 5.2MPa	1MPa 以下	0.74MPa
全長	非公開			4.3m	2.9m	0.176m	非公開
質量	74ton	非公開		12ton	3ton	1.06kg	0.74kg
推力調整	予め内孔面形状でパターンを設計					弁の開閉で実施	
推進薬質量	66ton	50kg	1.6kg	10.7ton	2.5ton	約 103kg	約 18kg
全燃焼時間	120s	171s 以上	4.8s	105s	91s	非公開	

Table.3 JAXA 衛星に搭載されたエンジン

出力	450N	4N	450N	120N	500N	23N
適用衛星	きずな、商用静止、シグナス	きずなし、ずく	こうのとりの	こうのとりの	あかつき	あかり、はやぶさ、はやぶさ2
真空中推力	450N	4.7N	478N	120N	500N	20N
混合比	0.92	非該当	1.65	1.65	0.78	非該当
真空中比推力	329s	226s	316s	275s	319s	非公開
エンジン方式	ガス押し式	ガス押し式	ガス押し式	ガス押し式	ガス押し式	ガス押し式
エンジンサイクル	二液式	一液式	二液式	二液式	二液式	二液式
推進剤	N2H4/N2O4	N2H4	MMH/N2O4	MMH/N2O4	N2H4/N2O4	N2H4/N2O4
膨張比	非公開	100	300	300	非公開	非公開
燃焼圧力	1MPa 以下	1MPa 以下	1MPa 以下	1MPa 以下	0.72MPa	非公開
全長	0.65m	0.149m	0.675m	0.675m	0.465m	非公開
質量	4.63kg	0.90kg	4.2kg	4.2kg	3.8kg	非公開

Table.4 JAXA で採用している電気推進エンジン

搭載衛星	はやぶさ はやぶさ 2	きく8号	きずな こだま
真空中推力	8mN	20mN	0.5N
混合比	該当なし		
真空中比推力	3,200sec	2,200s	302s
エンジン方式	イオンエンジン		アークジェット
エンジンサイクル	マイクロ波放電式	直流放電式	電熱加熱
推進剤	キセノン		ヒドラン
口径	10cm	12cm	非公開
燃焼圧力	ほぼ真空		
全長	非公開		20cm
質量	非公開 (4台搭載時 70kg)		0.84kg
推力調整	4段階切り替え		弁の開閉
推進薬質量	80kg	96kg	390kg
全燃焼時間	20,000h	16,000h	370h

これらのロケットエンジンを使用するには、燃料の圧力や取り扱い液ガスなどの種類により各法令（高圧ガス保安法、火薬類取締法、毒物及び劇物取締法など）を順守しなければいけません。

## 6 むすび

以上のようにロケットエンジンは、物質を噴出させてその反力を使う推進原理や空気がないので酸化剤も運搬する必要があるなど自動車用のエンジンとは異なっている点等について、またその種類を簡単に紹介しました。本稿が皆様の研究開発のお役に立てることを期待いたします。

### 【参考文献】

1) George P. Sutton, Rocket Propulsion Elements, JOHN WILEY & SONS, INC.

JAXA 公式 HP <http://www.jaxa.jp/>