

宇宙輸送は メタンエンジンにおまかせ！

ロケットの再使用と長期間軌道上運用を可能にする メタンエンジンの開発

メタンエンジンは、再使用打ち上げロケットや軌道上輸送システムのエンジンとして有望視され、世界で研究や開発が開始されている。IHI は、いち早くエンジン試作試験を実施し、メタンエンジンの実用化研究を行っており、将来、軌道上で長期運用するために必要となる新規技術を開発している。

株式会社 IHI
航空・宇宙・防衛事業領域
宇宙開発事業推進部

坂口 裕之



スペースプレーン ©Ariane Group



有人・再使用対応 1 軸式ターボポンプ ©Ariane Group

宇宙開発の動向

これまで宇宙開発は、国家プロジェクトとして国主導で進められてきたが、インターネットのネットワーク事業や交通・物流・農業などの分野で、衛星を利用した位置情報や気象情報などを提供するサービスへの民間企業の参入が活発になってきている。

一方、国際宇宙ステーション (ISS) の活動終了後、次世代の宇宙利用プロジェクトとして、月着陸や火星探査など、有人を含めた宇宙活動の検討が国家レベルのプロジェクト案件として各国協同で始まっており、

この分野でも民間企業の参入が検討されている。

次世代の宇宙利用においては、まず、打ち上げロケットで地上から低軌道上にある宇宙基地まで材料や機器を輸送し、宇宙基地を拠点として衛星の製造や組み立てを行い、これを宇宙基地から所定の軌道へ投入するという構想がある。

民間ベースの事業化においては、従来にも増して衛星を打ち上げるロケットや打ち上げサービスにもコストパフォーマンスの向上が求められており、スペース X 社 (アメリカ) の Falcon などの再使用ロケットの開発が精力的に進められている。

推進薬	密度 (kg/m ³)	密度比推力 (kg-s/m ³)	沸点 (°C)	最適混合比コスト (円/kg)	すす	環境負荷	宇宙空間での貯蔵
液体水素	71	31 950	約 -253	約 1 042	なし	燃焼時はクリーンだが、製造・液化時に大量のエネルギーを要し CO ₂ も発生	蒸発率 50.8 (%/月)
液化メタン	425	157 250	約 -161	約 306	なし	良好、ただし液化にエネルギーが必要	蒸発率 10.6 (%/月)
ケロシン	807	288 906	182 ~ 268	約 479	大量に発生	精製にエネルギーが必要で、燃焼においても CO ₂ 、窒素化合物が多め	ヒータが必要 (約 -45°C で凝固)

宇宙用推進薬比較

地球から低軌道上の宇宙基地までの輸送にはコスト面から再使用ロケットが数多く用いられると考えられる。また、宇宙基地から宇宙空間での輸送においてはミッションの長期化が予想され、これに対応したエンジンが必要となる。

再使用打ち上げロケットや長期ミッション 宇宙空間輸送に有望なメタンエンジン

IHI は、以前からメタンエンジンの研究を続けてきた。メタンエンジンは燃料に液化メタンを使用し、燃料を燃やすための酸化剤に液体酸素を使用する。

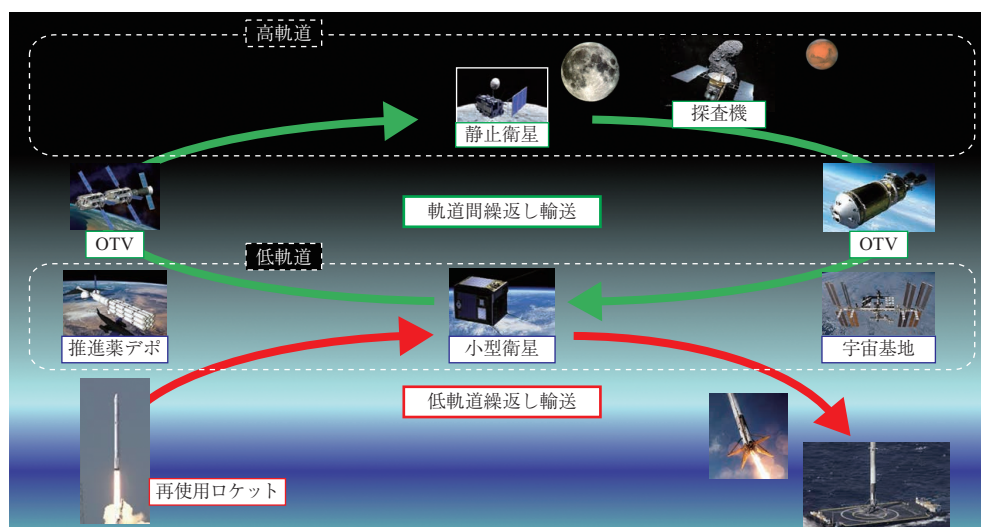
液化メタンはこれまで使われてきたケロシンや液体水素などに代表されるロケット燃料に比べ、次のような特長をもつ。

- ・ 液化メタンは液体水素に比べ単位密度当たりの推進力が大きいので燃料タンクを小さくでき、機体システム全体も小さくできる。
- ・ ケロシンなどの炭化水素燃料は、大量のすすが出るため、エンジン内の流路にすすが堆積し長期間の運用では流路が閉そくする可能性がある。一方、液化

メタンではすすが発生しないため長期運用でも流路を詰まらせることがない。

- ・ 同様にすすが出ない液体水素と比較すると液化メタンは蒸発しにくく長期保管が可能であり、軌道上での長期運用に適する。
- ・ 液化メタンは液体水素に比べ分子量が大きいので漏れにくく、爆発性が低いため安全性が高い。
- ・ 液化メタンの温度 (-161°C) は、酸化剤である液体酸素 (-183°C) と近く、必要量も酸素と同程度であるため、タンクや弁などの機器開発・製造、さらには取り扱いの面においても液体酸素との共通化が可能となり、低コスト化が図れる。

このような特長から、再使用、長寿命、低コストへの対応と機体の小型化を考慮すると液化メタンに有利な状況が出現する。海外では最近、打ち上げロケットの再使用化に向けて、メタン推進系の適用を検討する例が増えている。また、軌道上宇宙基地を拠点とする次世代宇宙利用においては、再使用、小型化、長期保管性、運用の容易さを考慮すると、輸送サービス事業のインフラとしてメタンエンジンが有望であると考えられる。



将来宇宙輸送イメージ

IHI がこれまで培ってきたメタンエンジン技術

液化メタンが燃料として優れていることは以前から知られていたが、これまでケロシンや性能重視の液体水素を燃料として使ったロケットエンジンが主流で、メタンエンジンの開発実績はなかった。

IHI はその実用化を目指して、2010 年に推力 10 t 級エンジンの試作試験を世界に先駆けて実施し、実用化のめどを付けた。

このエンジンには、液化メタンで燃焼器を冷却する再生冷却方式と、燃料を加圧するターボポンプを燃焼ガスで駆動するガスジェネレータサイクルを用いた。

JAXA（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）との研究開発では、上記研究に先んじて燃焼室の壁の表面を燃焼ガスの熱により蒸発させ、そのときに周囲から奪う熱により燃焼室の壁を冷却するアブレータ冷却方式燃焼器を用いた、推力 10 t 級ガスジェネレータサイクルエンジンの開発も行った。

現在は、再生冷却に用いた後のメタンによりターボポンプを駆動する、エキスパンダサイクルを用いた高性能化の研究を行っており、その技術実証として推力 3 t 級エンジンの地上燃焼試験を 2017 年度に行う予定である。

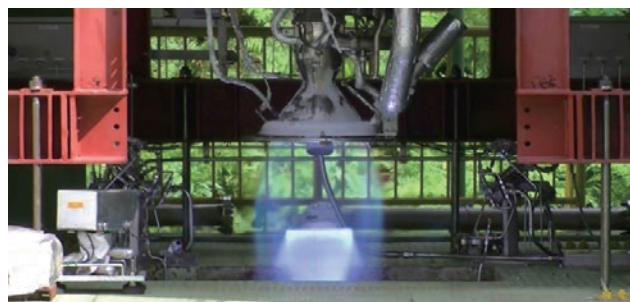
また、Ariane Group（フランス）で研究中の有人宇宙往還機スペースプレーン用推進系の推力 40 t 級メタンエンジンに用いる 1 軸式ターボポンプを試作し、作動試験に成功した。本ターボポンプは、仮に故障があっても周囲の機器やシステムに影響が及ばないようにする有人・再使用システムの安全要求へ対応することを目指している。今後エアバス社（フランス）のガスジェネレータと組み合わせた作動試験を行う予定である。

軌道上輸送システムに必要となる技術

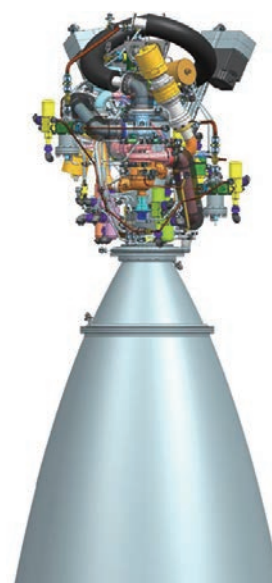
メタンエンジンの実用化に向けた研究を行ってきたが、適用先として宇宙基地を拠点とした軌道上輸送システムを考えた場合、従来の運用とは異なる次のような新たな要求がある。エンジンの実用化に対してもこれに対応した新規技術を開発することが必要となる。

・再使用

従来の推進系はロケット用、衛星用どちらも使い



推力 10 t 級メタンエンジン



3 t 級 エクスパンダサイクルエンジン
©JAXA

捨てである。地球から軌道上の宇宙基地への輸送システムでは資源の制約、コストパフォーマンスの観点から再使用可能であることが肝要である。

・長期運用

軌道上での運用は長期にわたることが多い。また、火星探査などはミッション自体が数年掛かるものもある。さらに、再使用ロケットは回数を重ねると使用期間も長くなる。燃料の長期保存およびシステムの長期安定運用が重要となる。

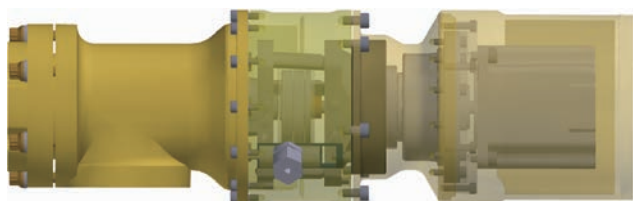
・メンテナンス

軌道上運用ではエンジンの軌道上でのメンテナンスが必要である。

IHI では前述した軌道上輸送システムが備えるべき機能・特性要求を検討し、これに対応できるエンジンシステムの実現を目指し、要素技術開発を実施している。

ここでその幾つかを紹介する。

- ・燃料流量調整弁の電動化によるエンジン制御
従来エンジンの燃料流量調整弁は、流体圧力で駆動する燃料供給の ON/OFF のみを行う遮断弁であったが、電動モータにより任意の弁開度調整を行い、連続的に流量を調整できる燃料流量調整弁を開発している。これにより単なる燃料の ON/OFF だけでなく、エンジン運転中の任意の作動点での流量調整が可能となり、推力を可変とすることや、燃料と酸化剤のバランスを考慮した残量制御なども可能となる。
- ・漏えいのないターボポンプ用シール
ターボポンプの回転系にはシールが必要で、シール部ではタービンガスや酸素の漏えいが生じる。このため酸素とタービンガスが接触しないように異なる種類のガスにより遮断している。従来よりもはるかに少ない漏えい特性をもつシールを開発し、接触防止用のガスの消費量を少なくすることで長期運用が可能となる。
- ・電動アシストターボポンプ
ターボポンプは燃焼ガスなどにより駆動されるタービンとポンプで構成される。エンジンの起動には、燃焼ガスとは別にタービン起動用のガスが必要であった。しかし、エンジン起動時に電動モータを一時的にタービンに接続して、必要な回転数まで上昇させることによりタービン起動用ガスが不要となる。これによりシステムが小型化できるだけでなく、電動モータにより起動時のターボポンプ回転数制御も容易となり、燃焼器の着火やエンジン起動も安定して実施できるようになる。
- ・燃料保管
軌道上で長期的に燃料を保管するには蒸発を極力抑える必要がある。前述の電動アシストターボポンプを低回転数で運転し、燃料を循環させ、熱交換器で冷却することにより、タンク内燃料の蒸発を抑えることができる。



電動推進薬弁 ©JAXA

- ・ヘルスマonitoring

エンジン本体や周辺機器の各部の運転状況を常時モニターするヘルスマonitoringシステムを現在開発中である。本システムは、モニターした複数の運転データが、正常な運転状態からどれだけ逸脱しているかを距離として定量的に把握できる MT (Mahalanobis Taguchi) 法を採用している。これにより、軌道上での長期間の運用時や再使用運転前の機器の健全性点検時に、異常を適切に判断して不具合を未然に防ぐことが可能となる。

メタンエンジンの将来像

以上のとおり、メタンエンジンは再使用打ち上げロケットのエンジン、スペースプレーンの再使用エンジン、また、将来の軌道上輸送システムエンジンとしての適用が有望なシステムである。

IHI ではエンジンの実用化に加えて、再使用や有人ミッション、さらには将来の軌道上ミッションに必要な技術の研究を継続している。

技術実証用の推力 3 t 級エンジンは有翼ロケット実験機 (WIRES) への適用が検討されている。その後、月サンプルリターンなどの ISS の次に来る国際共同プログラムへの適用も検討されている。そのなかでメタンエンジンの実績を積むとともに、軌道上推進系として活用されるよう、軌道上輸送システム技術の確立に貢献していく。また、スペースプレーン用エンジンの有人再使用機への適用、さらには、有人再使用機に関わる技術の確立に努めていく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

航空・宇宙・防衛事業領域

宇宙開発事業推進部

電話 (03) 6204 - 7659

<https://www.ihi.co.jp/>