



特集

研究  
開発

数値シミュレーション技術で  
高い信頼性を持つ  
ロケットエンジンを効率よく開発

化学反応を伴う流体の解析を  
大幅に時間短縮するERENA

## 宇宙太陽光発電システム(SSPS) 研究開発の現状と未来

宇宙で太陽光発電を行い、その電力を地球に無線送電する。  
そんな革新的なミッションを行う「宇宙太陽光発電システム」を  
実現させるため、SSPS研究チームは、  
研究開発構想の検討や地上での技術実証試験に取り組んでいます。

### 昼夜も天候も問わず安定的に電力供給が可能

宇宙太陽光発電システム(SSPS:Space Solar Power Systems)は、宇宙空間で太陽光発電を行い、その電力をマイクロ波やレーザーに変換して地上に向けて無線送電し、地上の電力系統網と連系する、言わば「宇宙に浮かぶ発電所」です。再生可能エネルギーでありながら、システム的设计次第では、昼夜も天候も問わず安定的な電力供給が可能になります。研究開発部門SSPS研究チームは、世界をリードしてSSPSの研究開発を進めています。

話を聞いた人



牧野克省

MAKINO Katsumi  
SSPS研究チーム  
主任研究員



### 2015年2月実施の屋内試験

パイロット信号を受信して、その方向にマイクロ波を放射。送電側装置の4枚の送電アンテナパネルは宇宙環境の影響による変形を模擬して段差や傾きを与えた。



## 地上の受電サイトに 宇宙からピンポイントに無線送電

同チームの牧野克省主任研究員は、構想中のSSPSをこう説明します。「いくつかある構想の一つが、太陽電池と送電用アンテナを一体化させた『発送電一体型パネルモジュール』を地球から約36,000kmの静止軌道に無数に並べ(アンテナの素子数にして数十億オーダー)、約2.5km四方の巨大パネルとして組み立てるシステムです(表紙図参照)。発送電一体型パネルモジュールは、各々が独立(自立)して発電し、その電力をマイクロ波に変換するのですが、各モジュールから放射されるマイクロ波のタイミング等(位相や振幅)をシステム全体として統制をとってコントロールすることにより、無線送電のためのマイクロ波ビームを形成します。発電も送電も行える、同じ機能を持つパネルモジュールを無数に並べ、できるだけシンプルで組み立てやすく、かつ、そう簡単に発電所としての機能が損なわれることのない強靱なシステムにすることを考えています。形成したマイクロ波ビームにより、安全かつ効率良く、直径2~3km程度の地上の受電サイトに無線送電するため、極めて高精度にその方向をコントロールします」。

要求される方向精度は0.001度(分度器の1目盛の1000分の1)。この高い精度でマイクロ波を伝送するにあたっては、まず、受電サイト側から軌道上のSSPSに向けてパイロット信号(ガイド信号)を発信し、軌道上の送電アンテナパネル内に搭載したパイロット信号受信アンテナにて、その信号の到来方向を「振幅モノパルス法」という手法を用いて高精度に検出します。このパイロット信号の到来方向と同じ方向にマイクロ波を打ち返すよう各送電アンテナに正確な指示を出すのですが、宇宙空間にあるSSPSを構成する各送電アンテナパネルは、太陽熱や重力の影響を受けて、僅かながら並べた位置からずれてしまいます。この状態では地上の受電サイトに正確にマイクロ波を伝送することはできません。そこで、「素子電界ベクトル回転(REV:Rotating-element Electric-field Vector)法」という手法を用いて、これらの

位置ズレがどのくらいかを放射した送電マイクロ波の位相差(波と波とのズレ)として受電サイト側において検出し、この位相差をゼロにするよう制御、結果として地上での受電電力が最大になります。

## 宇宙からの無線送電を想定し 地上の屋内と屋外で実証試験

同チームは、これらのビーム方向制御方式の有効性を評価するため、地上での実証試験を行いました。

2015年2月、京都大学宇治キャンパスにある電波暗室において、宇宙空間のSSPSに相当する送電側装置の10m前方に地上の受電サイト中央に相当するパイロット信号送信部を設置し、そこから発信されるパイロット信号に対して送電用マイクロ波ビームが高精度に送り返されていることをパイロット信号送信部の中央にあるモニタアンテナを使って検証しました。「宇宙空間における送電アンテナ面の変形を想定して、送電アンテナ面にシステム要求として整理されている最大40mmの段差や±5°の傾きを設定できるようにしました。その結果、振幅モノパルス法とREV法を組み合わせた独自の制御方式により、受電側中央にマイクロ波ビームが正確に向いていることを確認し、開発したビーム方向制御方式の有効性を実証しました」。

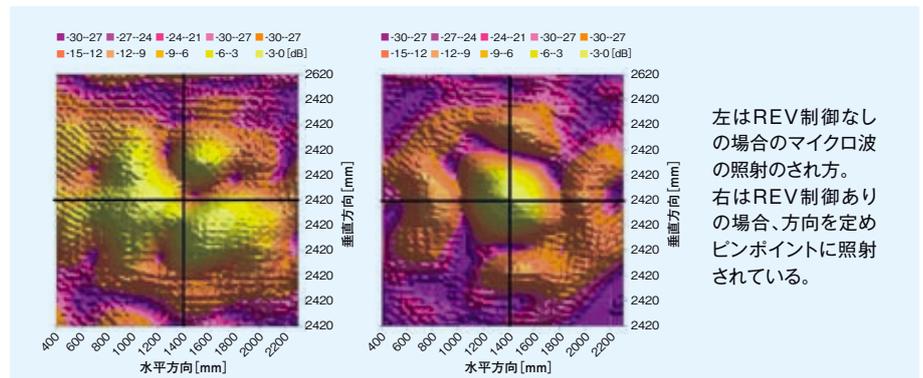
また、2015年3月には兵庫県内の屋外試験場で、無線による電力伝送の実証試験も行いました。送電側装置から約55m離れた受電側装置に向けて約1.8kWの高出力マイクロ波を放射、それを受電側装置において約340Wの電力に変換し、実用化実証としてアマチュア無線の交信に電源供給しました。

## SSPSだからこそできる エネルギー供給方法で 電源としての価値を高めたい

SSPSが実用化できる技術レベルに至ったとしても、はじめのうちは発電コストが高額になる可能性は否めません。しかしながら、「SSPSは地球上のどこであろうと瞬時にしてエネルギー供給先を切り替えられるという強みがあります。無線だからこそ可能なことであり、その強みを活かし、コストに見合った高付加価値のエネルギー供給サービスはないか考えています。例えば、地上送電網が絶たれた被災地などに素早く電力供給することなどを検討しています」。

米欧では現在、SSPSの研究開発は下火の状態です。そのような中でも、「エネルギー自給率の低い日本がSSPSの研究を進めることには意味があります。エネルギー源は多様であればあるほど、あらゆるリスクに対して対処しやすくなります。そういう意味でSSPSという新たなエネルギー源の確立(選択肢の拡大)は、非常に重要であると考えています。こうしたシステムを他国に供給することは、ある意味でエネルギーの輸出にもなります。地球環境問題に貢献するだけでなく、政策的に日本に様々な利点をもたらす可能性をSSPSは秘めていると思います」。

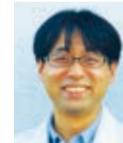
研究は長期にわたるため、無線電力伝送技術などの研究開発成果を航空分野をはじめ他分野にでも応用できるよう、社会還元していくことも重視しています。「いかにSSPSを実現させるか、絶えず考え続け、今後も地道に研究開発に取り組んでいきたいと思っています」。



左はREV制御なしの場合のマイクロ波の照射のざれ方。右はREV制御ありの場合、方向を定めピンポイントに照射されている。

# 数値シミュレーション技術で 高い信頼性を持つロケット エンジンを効率よく開発

話を聞いた人



**田口元**  
TAGUCHI Hajime  
第三研究ユニット  
研究領域リーダ



**河津要**  
KAWATSU Kaname  
第三研究ユニット  
研究員

液体ロケットエンジンの高信頼性と開発費用/期間低減の両立を実現する数値シミュレーションを中心とした開発プロセスを確立。H3ロケットのエンジン開発に活かされています。

## “手戻り”で費用・期間が膨大化していた従来プロセス

運用中のH-IIAやH-II-B、さらに2020年打ち上げ予定のH3などのロケットには、液体燃料を推進薬とするロケットエンジンが使われます。従来のエンジン開発プロセスは、机上で企画や設計をした後、試作、試験を経て実用化するというものでした。しかし、このプロセスでは、試験でエンジンを燃焼してみても課題が発生すると、設計段階に戻って設計を見直し、試作や試験をし直すといった繰り返しが必要でした。エンジンが実際に運用に供されてからも、改善点が見つければ設計に立ち戻って修正しなければなりません。その結果、開発や運用に要する費用と期間は膨大なものとなってしまいます。

情報・計算工学で宇宙システム開発の高信頼性化、高効率化を目指す第三研究ユニットは、この課題に対して数値シミュレーションを中心とする新たな開発プロセスを確立。試験から設計への手戻りをなくし、エンジン開発の費用と期間の大幅削減を実現しようとしています。

## 故障原因を網羅識別し、リスクを把握、シミュレーションの不確かさも評価

「これまでのエンジン開発を通して得られた知見や数値シミュレーションに代表される情報技術の進展を踏まえて、エンジン開発の方法もアップデートしていかなければなりません。そこでシミュレーションを中心とした新たなエンジン開発プロセスを確

立しました」。第三研究ユニットの田口元研究領域リーダはそう話します。

この新たなエンジン開発プロセスは、おもに三つの要素で成り立ちます。

一つ目は、「故障モード網羅」。エンジン故障の原因(故障モード)を、コンピュータの援用により網羅的に識別するものです。ロケット打ち上げ時の予冷、着火、燃焼といった一連のシーケンスにおける故障モードを「フォルトツリー解析」(FTA: Fault Tree Analysis)という解析法で細分化するとともに、JAXAが蓄積してきたエンジン関連の失敗データなどを「故障モードとその影響の解析」(FMEA: Failure Mode and Effect Analysis)という解析法に適用します。これら解析法を組み合わせ、故障モードを多様な視点から識別し、さらに誰もが評価しやすいよう可視化しました。

二つ目の要素は「確率論的評価」です。網羅的に識別された故障モードのうち、どれがどの程度のリスクであるかを把握し、重要なリスクに対して設計段階で対処します。そして最終的に、求められた信頼度に合致するエンジンになっていることを、コンピュータ上で評価します。

故障モードの網羅的識別やリスク評価ができて、「その数値シミュレーションは確かである」という確信が得られないと、それが本当に信頼に足るものなのか判断できません。そこで三つ目の要素が「不確かさ低減」となります。数値シミュレーションの解析手法やモデルが、実績のある確信度の高いものか、それと

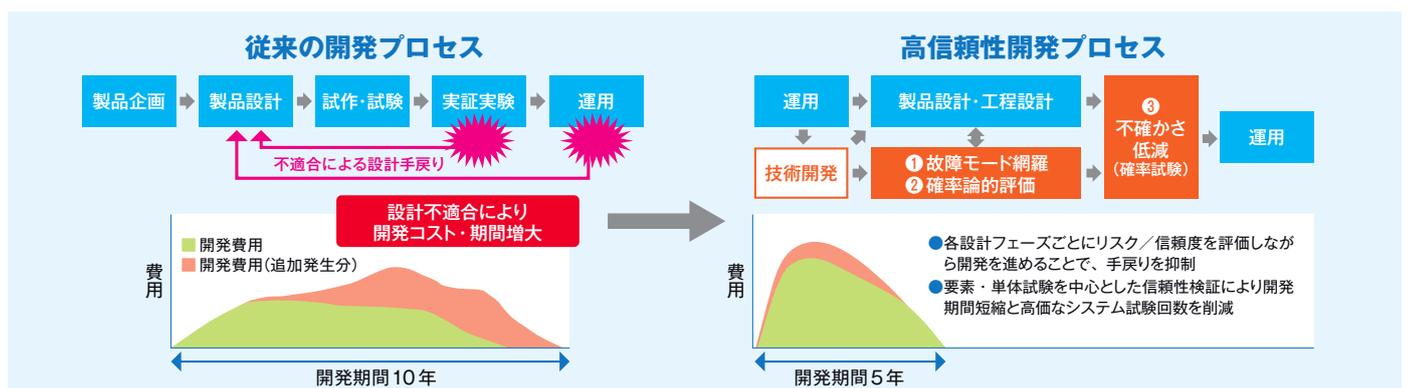
も実績の乏しい確信度の低いものかなどを「不確かさ定量化」(UQ: Uncertainty Quantification)という手法で定量化します。結果、シミュレーションの不確かさに大きく寄与する解析の部分がわかれば、そこの実績づくりを強化するなどして、不確かさを減らしていくことができます。これにより、シミュレーション結果は、エンジン開発の単なる“参考情報”でなく意思決定の真の材料になるわけです。

## H3ロケットでのエンジン開発が実績づくりの第一歩

2020年打ち上げ予定のH3ロケットに搭載されるLE-9エンジンでは、この新たなエンジン開発プロセスが採用されています。これにより、試験コストや開発期間を従来のエンジン開発に比べ大幅に抑えることを目指します。

田口リーダはコストの低減や期間の短縮とともに、「第一宇宙技術部門、それにエンジンメーカーなどのプロジェクトの現場の人たちが、シミュレーションをベースにエンジンを開発しようと思決定したこと自体が、我々の研究が実現した大きな変革だと思っています」と強調します。

LE-9エンジンへの数値シミュレーション技術を活用した開発プロセスの導入が、新たな宇宙システム開発プロセス構築の第一歩となる実績となれば、さらにエンジン以外の開発にもシミュレーション中心のプロセスが応用され、高信頼かつ高効率な宇宙システム開発が確立されていくことになります。



ロケットエンジン開発プロセスの変革。右が新たなプロセスによるもの。シミュレーションを中心としたプロセスとすることで試験や運用で浮かび上がった課題を設計段階に戻って解決する作業がほぼなくなること、及び信頼性確認のための大規模試験回数を最小限に抑えることで、費用・期間とも大幅削減が可能。

# 化学反応を伴う流体の解析を 大幅に時間短縮するERENA

ロケットエンジンなどの複雑な燃焼のしくみを解析するための、  
新たな計算法が第三研究ユニットから誕生しました。  
東京大学との社会連携講座での成果でもあります。



話を聞いた人

森井雄飛

MORII Youhi

第三研究ユニット 研究員

## 複雑な燃焼のしくみ パソコンでも計算は困難

ロケットや自動車などのエンジンは燃焼により推進力を得ます。燃焼とは化学反応を含む複雑な現象です。化学反応次第で、推進力を効率よく得られる燃焼が起きたり、あるいは逆に振動や有害物質排出などを伴う燃焼が起きてしまいます。

燃焼のメカニズムを試験により解明できればよいのですが、試験には高温により試験装置のガラスが溶けてしまうなど困難が伴います。そこで、コンピュータ・シミュレーションなどの計算法を用いて燃焼のしくみを解明することが行われていますが、化学反応だけでなく、時間経過とともに刻一刻と状態が変わっていく燃焼現象は非常に複雑で、解析にも時間がかかります。例えば、スーパーコンピュータを用いても、こうした燃焼のしくみを詳細に解明できるのは現在、縦・横・高さ数cm程度の範囲に限られます。燃焼でなにが起きているかを解明するのは至難の業なのです。

この複雑な燃焼のしくみを解明するため、第三研究ユニットの森井雄飛研究員は新

たな計算法を開発しました。各分野でこの計算法の真価が発揮されようとしています。

## 計算時間を劇的に短縮する ERENAを開発

森井研究員は、JAXA入社以前から、燃焼の数値計算を用いて研究をしていました。大学院博士課程の研究で、従来の酸素や水素の反応に加えて、炭化水素の反応も対象に入れた数値計算を実施していました。「けれども、化学反応の計算は遅いままでした。JAXAに入社して、その計算の遅さを解決したいと考えました。」

燃焼のしくみを解析する場合、単に化学反応のしかたを計算するだけでよいなら比較的簡単ですが、現象を追うには瞬間ごとの化学反応のしかたを計算していく必要があります。

そこで森井研究員は、詳細な化学反応モデルと、流体解析の直接計算を組み合わせた場合に有効な、「ERENA (Extended Robustness-Enhanced Numerical Algorithm)」という計算法を開発したので

す。この計算法は、燃焼の過程を刻んだ時間ごとに、大域安定性を持つ計算法を導入し、質量保存則を満たしながら解を求めることのできる方法です。「これまでも何十年にもわたり使われていた計算法があったのですが、対象とする化学種の数が増えると計算時間が自乗的に長くなるものでした。私の開発した方法では、計算時間が自乗的でなく比例的に長くなるだけで済みます。」

例えば、従来の計算法で

は、扱う化学種が10種から1000種へと100倍に増えると、 $100 \times 100 = 1$ 万倍の計算時間がかかりました。一方、ERENAを使えば単に計算時間が100倍になるだけで済むのです。

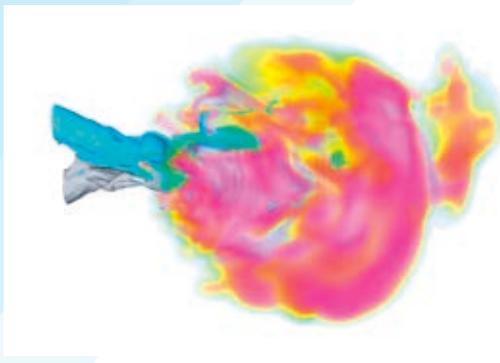
## まず自動車分野で応用 今後は宇宙開発分野にも

森井研究員は、このERENAを、JAXAと東京大学が2008年から13年まで実施していた「社会連携講座」で発表しました。同講座には自動車業界に通じた研究者も参加しており、ERENAの成果はまず自動車の研究者に注目されました。「社会連携講座で発表すると、自動車の研究者が『とても便利に使える』と言ってくれました。実際、計算スピードが数百倍になったとのことでした。」

ERENAは、燃焼解析技術に関する自動車メーカーとの共同研究や、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的燃焼技術」におけるノッキング現象のしくみ解明を目的とする研究などでも実用化され始めています。

もちろん、自動車分野だけでなく、JAXAの宇宙機開発における燃焼のしくみ解明にも、ERENAの貢献が期待されます。例えば、ロケット打ち上げ時の燃焼振動のしくみが詳細に解明されれば、試験回数を減らすことが可能となり、大幅なコストダウンが期待されます。また、人工衛星の姿勢制御を担うスラスタの高性能化などへの応用の可能性もあります。

「現段階ではERENAは一部の研究者に認知され始めたばかりですが、今後はこの成果をもとに、宇宙開発分野をはじめ、燃焼現象を精度高く予測できる解析モデルを構築していきたいと考えています。」



ERENAを用いた、衛星スラスタ推進剤「ヒドラジン」の解析実験で火炎を可視化したもの

ご愛読ありがとうございました

「宇宙開発最前線!」は今号で最終号となります。以降は当機構広報誌JAXA'sにて研究開発の最新情報を発信してまいります。