メカライフな人々 No.27

CAMUI ロケット開発者
～火薬を使わないロケットの開発～

北海道大学
大学院工学研究科 教授
永田　晴紀氏

「CAMUI ロケットが実用化できたら，研究者が今より 1 桁増えるかもしれません」

CAMUI ロケットについてそう語る，北海道大学の永田晴紀先生にお話をうかがった．

図 1　インタビュー中の永田先生

経歴

・原点

1970 年代，東大の衛星打上げを見て，宇宙に興味を持つ．中学生の頃は，花火で遊んでいた．

・研究

博士論文のテーマは，点火のメカニズムについてであった．

1994 年，日産自動車宇宙航空事業部に入り，固体ロケットの浸食燃焼の研究を行っていた．このとき，手伝いで宇宙研に半年通っており，そこでハイブリッドロケットに出会う．

1996 年，北海道大学の大学院重点化に伴う組織改編時に赴任する．北海道上砂川町の無重力実験施設で燃焼実験をやっていた経緯もあり，人脈があったためである．ハイブリッドロケットの研究を開始する．

1998 年，CAMUI ロケットの研究を開始する．

ロケットについて

まず，インタビュー本編の事前知識として，ロケットの種類について簡単に解説する．

・ロケット（化学ロケット）について

ロケットの推進剤には燃料と酸化剤の 2 種類があり，これらを燃焼させることで推進力を得る．この燃料と酸化剤が両方とも固体であるものを固体ロケット，両方とも液体のものを液体ロケット，固体と液体を組み合わせているものをハイブリッドロケットと呼んでいる．

固体ロケット……部品数が少ないため小型化しやすい（燃料と酸化剤を混合している）．点火後に火力の調整ができない．

液体ロケット……液体の燃料と酸化剤を別々にタンクに貯蔵しているため，燃焼制御機能を持つ．構造が複雑で小型化が困難．

ハイブリッドロケット……液体酸化剤を用いることで固体燃料の燃焼制御を可能としている．液体ロケットに比べ構造が簡単であるが，固体燃料の気化が遅いため，固体ロケットに比べて低推力である．

・CAMUI の意味

縦列多段衝突噴流という意味の Cascaded Multistage Impinging-jet の略である．

通常のハイブリッドロケットは**図２**のような境界層燃焼であるため，燃料表面への入熱が小さく，燃料の気化が遅い．そのため，低推力の原因となってしまう．

それに対し，CAMUI（**図３**）は燃焼ガスが次段の燃料ブロック表面に衝突するため，燃料表面への入熱不足が改善され，固体燃料の気化が促される．

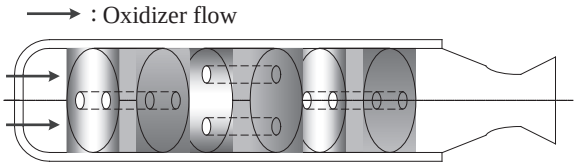

図２　従来型ハイブリッドロケットの概念図

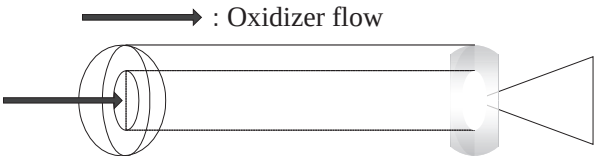

図３　CAMUI 型ハイブリッドロケットの概念図

CAMUI ロケット開発の経緯

メカライフ編修委員（以下，**メカ**）　CAMUI ロケットを開発しようと思ったのはなぜですか？

永田先生（以下，敬称略）　低コストで打上げられる小型ロケットが必要だと考えているからです．技術開発というのは数多く試行錯誤をこなしていく中で進んでいくので，実験の初期段階で手軽に実験ができないと効率が上がらないんです．ところが，ちょっとした部分の実験に使えるような小型ロケットが無いんですよ．そこで，コストの問題を解決した小規模ロケットの開発を行っています．

図４　インタビュー風景

メカ　コストの問題について，具体的にどういうものにコストがかかっていたんですか？　やっぱり機体ですか？

永田　確かに，機体価格はハイブリッドの方が高いです．推進剤に関して言えば，火薬が 1kg あたり 3 000 円から 1 万円に対して，プラスチックが 1kg 当たり 100 円か 200 円，液体酸素も 1L 当たり 300 円以下と安いです．しかし，ロケット打上げで機体以上にコストの掛かるのが，実は射場のレンタル費なんです．

メカ　そうなんですか．ロケット本体がいちばん高いんだと思っていました．射場のレンタルってどれくらいするものなんですか？

永田　海外の射場を 1 週間借りると 5 000 万円くらいですかね．このレンタル料は，たとえ小規模な弾道飛行実験をやるとしても，射場を何日使うのかで決まってしまいます．これがロケットの小規模化が進まないいちばんのネックでした．機体の値段や準備の時間はロケットの規模に応じて小規模化できても，射場の費用はスケールダウンできなかったんです．

メカ　それでは小規模化してもメリットがないですね．

永田　そうなんです．そのため，データ点数当たりの実験費用を下げようと思ったら，いかに実験回数を減らすかという方向に行ってしまうんですよ．

メカ　確かに，そう何回も打上げられる値段ではないですね．

永田　はい．ところが，1 回の打上げでたくさんのデータを取る方針でやっていくと，1 回の失敗でプロジェクトが頓挫してしまうということも十分起こりうるんですね．そういうのをプロジェクトの脆弱性と私は呼んでいるんですけれども……．ですので，1 回 2 回の失敗ではあまり影響を受けないような，不具合に対して強いプロジェクト進行をやりたいというニーズがあるわけです．そこで，1 回の打上げで 100 個データを取るんじゃなくて，1 回の打上げでは 10 個しかデータが取れないけれど 10 回打上げてトータルの費用では変わらない，というのを実現したいんです．

メカ　なるほど．ロケットの小規模化にはそういった意図があるんですね．小規模化して打上げ回数を多くするということで，永田先生のところでは打上げ実験のペースはどのくらいなんですか？

永田　打上げ実験は年に 3，4 回ですね．その辺の何の設備もない海岸にトラックで乗り付けて，発射台を設置して発射実験を行っているんですよ．

メカ　海岸でですか？　大丈夫なんですか？

図５　CAMUI 型燃料ブロックの外観

図６　CAMUI 型燃料グレイン（ブロックを積み重ねたもの）

永田　ええ．そこがこの CAMUI ロケットのいちばんの利点なんです．

メカ　射場を必要としないということですか．

永田　そうです．そもそも，なぜ特別な射場が必要になるかというと，理由のかなりの部分が安全管理なんですよ．固体ロケットの打上げは大量の火薬を使うので，それなりの安全管理設備を持ってないといけないんです．そのため，どこかその辺から打上げることは許されない．一方，火薬を使わない CAMUI ロケットなら，特別な射場でなくても，どこでも打上げられるんです．

メカ　CAMUI ロケットは射場にかかるコストの問題を解決したんですね．打上げの際に，許可は何か必要なんですか？

永田　発射場所の空域の使用許可くらいですね．あとは，役場や警察，消防，関連空域を使っている施設に連絡をしています．海に落とす場合は，漁協や海上保安署にも連絡しています．

メカ　海に向かって発射することがあるんですね．

永田　これまで 2 回行っています．陸上だと保安距離の問題で，高度 1km までしか打上げられないんですよ．高度 10km が次の目標なので，海に向かって発射実験を行っています．

メカ　回収はどのように行っているんですか？

永田　漁協の方に船を出していただいて，拾い上げています．そのため，機体にフロート，ビーコンやシーマーカを搭載しています．これらの技術についても現在，研究を行っているところです．

メカ　回収のための技術開発も必要なんですね．ところで，火薬を使わなくても，プラスチックを燃料にしても，ロケットを十分飛ばすことができるんですか？　プラスチックは専用のものだったりしますか？

永田　プラスチックは，普通のプラスチックですよ．プラスチックというのは，液体酸素と燃焼させたときの単位重量当たりの熱量は火薬より上なんです．2kg のプラスチック（このとき，液体酸素 4kg が別途必要です）で推力 200kgf を 8 秒間発生します．でも，プラスチックは熱量を取り出すのに時間がかかってしまうんです．そこで，燃焼速度を速くするために，燃料形状を工夫しています．現在は，燃えるのが遅い火薬くらいになりました．

メカ　燃料形状というのは，あの二つ穴のことですね？

永田　そうです．あの穴が，下流のブロックを燃やすバーナになってくれるんです（**図５**）．それが重なった構造になっています（**図６**）．

メカ　穴を三つとかに増やしたら燃焼速度が上がりそうですけれども．

永田　実は，穴は 2 個でないとダメなんです．だんだん燃え広がると，穴どうし途中で繋がるので，3 個だと真中が抜け落ちてしまいます（**図７**）．それがノズルに詰まる可能性があるんですよ．抜け落ちる可能性が無いのが 2 個なんですね．バリエーションがあるとしたら，穴の形状を変えることですかね．でも，今でも均等に燃え進んでいるので，形状を変える必要はなさそうです．丸の方が加工しやすいですし．燃料の値段のほとんどが加工賃ですから．

メカ　加工の途中で，燃料のプラスチックが燃えてしまったりしないんですか？

永田　いえ，燃えないですよ．普通のプラスチックと変わりないです．旋盤，ボール盤で作れます．これも CAMUI ロケットの利点でして，火薬類の製造貯蔵設備の必要がなく，普通の工場で作れるので，設備投資がほとんど要らないです．ですので，参入リスクがすごく少ないんですよ．

メカ　なるほど．工場の段階でもコストがかからないんですね．燃料形状の話に戻るんですが，穴の大きさはどのように決めているんですか？

永田　加速に使える圧力を損したくないので，穴はできるだけ大きくしたいんですが，大きくしすぎると体積充填率が落ちるし，燃焼速度も落ちるんです．そのため，燃焼室の圧力のうちの何パーセント減るところまで許容できるかのトレードオフですね．現状は，燃焼室上流（噴射器直下流）が 33 気圧，ノズル直上流で 30 気圧というように，1 割くらいを許容しています．

メカ　圧力を一つの基準としているんですね．圧力のほか

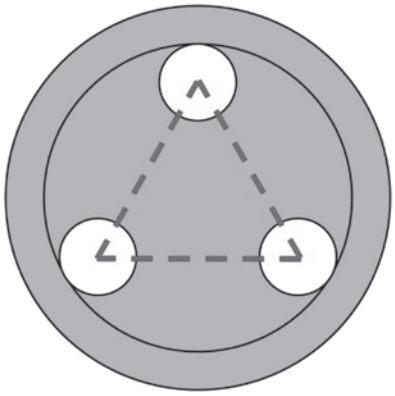

図７　燃料形状の穴が３個の場合

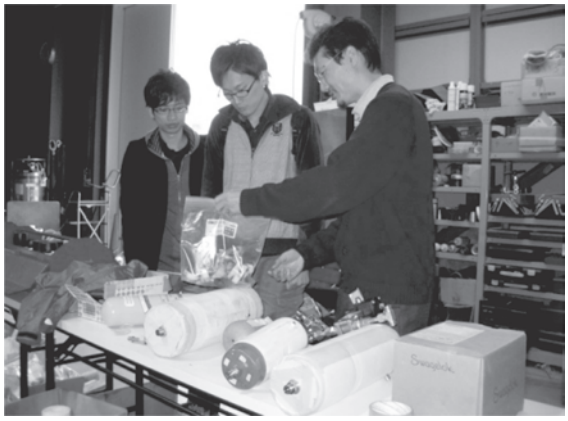

図 8　CAMUI ロケットの説明をうかがう学生委員

には，何かセンシングしているんですか？

永田　燃焼室内は温度が高すぎて，センサは入れられないですね．燃焼過程を知る方法として，1 秒，2 秒，3 秒…と途中で火を消す実験を行い，燃え残った燃料の形を見たり，重さを量ったりしています．ロケットを飛ばすときにも，燃焼室圧力を計っています．計測装置を載せて，高度，GPS の情報とともに，メモリに保存しています．

メカ　ロケットの姿勢は制御しているんですか？

永田　姿勢制御はまだ行っていなくて，風見安定だけです．今後行っていく予定なので，サーベイ中です．

いちばん苦労したことは？

メカ　それでは，これまででいちばん苦労したことはなんですか？

永田　2005，6 年に爆発を繰り返していたんですが，原因を特定するに至るまでがいちばん苦労したことですね．原因として，いろいろ疑わしいところがあるわけです．まず，点火というのがいちばん非定常的なところなので，点火から定常燃焼に至る過程がどうかとか．そこで，インジェクタのデザインを変えたり，加圧の部分を変えたりしました．そういうところを全部やり尽くして，最後の最後に残ったのが燃料の温度でした．そこに至るまでに，20 発以上爆発させていましたね．そのときは，液体酸素により燃焼室が冷却される構造だったんです．ハイブリッドロケットの場合，燃焼室に最初から燃料が入っているので，液体酸素によって燃料も－180℃まで冷却されていました．その状態から火をつけると，なかなか安定して火がつかないということがわかりました．今は冷却をやめて，アブレータで無冷却でやるというやり方に変えています．そこを変えてからは，爆発は 1 回もないですね．

メカ　確かに，ロケットで爆発が起こったら大変そうですね．

永田　まあ，無火薬式のハイブリッドロケットなので，爆発といっても破裂レベルですけどね．でも，爆発するとだいぶ落ち込みますよ．計測器もだんだん壊れてくるし，圧力計に繋いでいるコードは引きちぎって飛んでいきますから，その辺の修復もやらなくちゃいけなくなるし，なかなか大変です．だから爆発すると，どこが生き残っているのかのヘルスチェックから始めていました．

メカ　それは骨の折れる作業ですね……．では，CAMUI ロケットが実用化できたら，どれほどの効果がありそうですか？

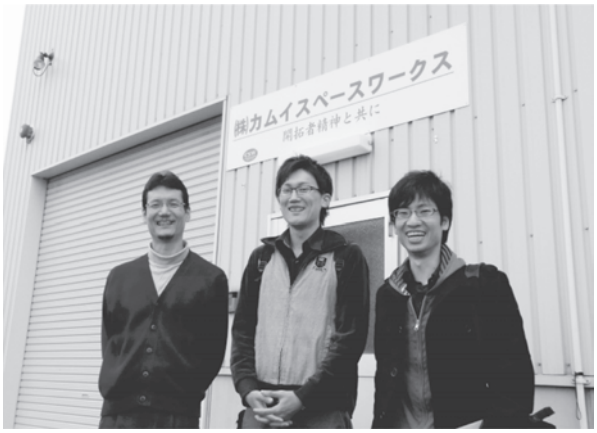

図 9　永田先生と三宅委員と妹尾委員

永田　大学の科研費レベルでできる小規模な打上げ実験手段を提供できるので，宇宙工学研究のすそ野が広がります．研究者の数が 1 桁くらい増えるかもしれませんね．日本の宇宙工学研究そのものがすごく強くなりますよ．

研究の心構えは？

メカ　永田先生の，研究に対する心構えを教えてください．

永田　Engineer は Pioneer です．これは語源が同じ所にあって，先に乗り込んで切り拓く人ということです．工学は，新たな地平を切り拓くための手段にすぎないんですよ．それよりも，いちばん大事なのは“あなたはどこを切り拓くつもりなんですか”ということです．切り拓きたいターゲットを見据えておくことが，いちばん大事ですかね．それが見えなくなると，よい研究もできなくなる気がしますね．私の場合は，“ロケットを使った研究をスケールダウンに向けて切り拓きたい”．そのために今，研究を行っています．

おわりに　―学生へのメッセージ

メカ　最後に，学生へのメッセージをお願いします．

永田　社会がどんな新しい技術を必要としているかというのは，誰も知らないんです．技術者が新たな技術を世の中に出して初めて，こういうものを我々は必要としていたんだと気づくわけです．つまり，需要を満たしてあげるという姿勢ではあまりイノベーションは出てこなくて，むしろ，技術開発の後に需要が生まれるというように，本物のイノベーションは順番が逆なんですね．成果があって，そのあと需要が生まれるような研究や仕事がたくさんできると面白いと思います．

メカ　イノベーションですか．それは難しそうですね．

永田　大丈夫ですよ．天才と凡人の差というのは，実は脳でなく心にあるんです．感情が違うということなんですが，好きである対象が多いんですね．好きであることに対しては，頭はものすごい勢いで処理してくれるんです．つまり，自分の中で，それをやりたいという方向に感情を動かせるかどうかなんです．物事に感動して，興味の範囲を広げて，頑張ってください．

メカ　とても深いお話，ありがとうございました．

（文責　メカライフ学生編修委員　妹尾俊明，三宅龍馬）