

This article was translated and reprinted with permission. Copyright ©2014 The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All other rights reserved. Originally published as Gary Oleson, "Advice to Satellite Designers: 'CARPE DIEM,'" Aerospace America, April 2014, www.aerospaceamerica.org

衛星設計者への助言 「目の前の新たな可能性を享受せよ」

ゲイリー・オールスン

衛星打ち上げコストの変化が、衛星設計者および製造者に、ダイナミックなコストダウンの機会を創りだしつつある。過去 10 年間にユナイテッド・ローンチ・アライアンス社は、デルタ 4 型およびアトラス 5 型ロケットのシリーズでの打ち上げ性能の向上を提案したが、これによれば、顧客は 1 本あたり約 10M\$にてストラップオン固体ロケットブースターを追加するオプションを持てる。このオプションを用いれば、衛星のミッション計画者は多くの衛星について、大幅に許容重量を増加させることができるわけだ。一方スペース X 社は、中型、中大型、大型にわたる衛星を、従来よりはるかに安価に打ち上げることのできるロケットを市場に投入しつつある。さらにオービタル・サイエンス社も、新型のアンタレスロケットを用いて小型打ち上げロケットをさらに低価格で提供する構えだ。

これら、より低価格の打ち上げオファーは、衛星ユーザの打ち上げコスト計算に重大な変化をもたらす。衛星設計技術者は、最小の打ち上げロケットですませるため如何にして衛星重量を減らすかの検討に、もはや多大の時間とお金を費やす必要がない。何しろ予算からのプレッシャーを受けずに衛星重量を増すことができるのだから。これは実質的に、少なくとも米国については、新たなコスト削減戦略となるものだ。

設計技術者は一般に、厳しい重量マージンの中で仕事をせねばならないが、この重量マージンは、打ち上げロケットの最大許容重量から、現設計で想定される衛星最大重量を引いたものである。重量マージンが確保されていれば、衛星開発中に部品重量が増えてしまっても、衛星は同じロケットで打ち上げ可能となる。

重量マージンは、多くの衛星技術者の座右の書である"SMAD"(衛星ミッション解析と設計)マニュアル新板によれば、実績のあるハードウェアならば約 5%から、新設計の場合で約 25%までに及ぶとされている。設計者は伝統的に、重量限度内にとどまるために大変な努力を強いられるので、不用意にマージンを取り崩すようなことはしない。

しかし今や、当初計画したロケットと同コストで、より強力なロケットが使えることとなり、設計者は衛星の最大重量制限をゆるめても、マージンを同じに保つか、拡大することすら可能となる。もし 5,000kg 打ち上げ可能なロケットで、重量マージン 25%の衛星を計画したら、衛星の最大重量は 4,000kg となる。しかし、もし顧客がロケットを変えるか、ストラップオンブースターの追加で 6,000kg の打ち上げ能力を手に入れば、重量マージンは 50%に跳ね上がり、当初の 25%マージンを変えなくとも、衛星最大重量は 4,800kg まで緩和される。以前の最大重量では、重すぎて使えなかった低価格コンポーネントも考慮の対象となってくる。一例として、アトラス 5 型 501 で LEO 軌道へ 10%重量マージンつき 8,210kg で打ち上げる衛星の場合、\$10M のコスト増で、11,000kg 打ち上げ可能なアトラス 5 型 511 にアップグレードすることで、マージンを 47%まで増加できる。

これは、ロケット市場の変化によって開かれつつある新たなパラダイムの、ほんの一部にすぎないのである。

衛星コストの低減

新たなパラダイムによれば、衛星設計者とミッション計画者は、つぎの三通りの方法でのコスト低減を確実に実行できる。

- 従来高くなっている重量節減および電力節減の出費の低減
- 現行設計を、重量は大だが低コストのコンポーネントに置き換えることによる低減
- 打ち上げ費用自体の低減

たとえば、アトラス 5 型での打ち上げを考えている設計者は、14,000kg までの LEO ミッション、11,000kg までの極軌道 LEO ミッション、さらに 6,600kg までの静止遷移軌道（最終静止軌道への移行前に投入される楕円軌道）ミッションと、それぞれのケースでの利益の可能性を検討すべきである。

実際のところ、現在の予算設定環境においては、打ち上げマーケットの変化をよく見極め、どこに最大のコスト低減を見つけられそうか、コスト低減を実現するために何が障害となり、限界となるのか、はっきり見通しを立てることが必須であろう。

打上げロケットの将来の開発

スペース X 社は現在、LEO へ 53,000kg までの衛星を打ち上げるためのファルコン・ヘビーを開発中であるが、これは比較対象となるデルタ 4 ヘビーよりも 86% 大きい能力を持つ。新型の Merlin 1D エンジンを用いたファルコン 9 型の最初のフライト V1.1 の飛しょうデータを用いて、スペース X 社は静止遷移軌道への打ち上げ能力を 21,200kg へと増加させたが、これはデルタ 4 ヘビーよりも 53% 高い数字である。もしファルコン・ヘビーが成功すると、スペース X 社は 5,500kg 以上のどんな衛星についても、さらにより軽量の衛星についても同様に、価格と打ち上げ性能の両方での優位性を提案できることになるだろう。

ファルコン・ヘビーは現在のところ、多くのアトラス 5 型やデルタ 4 型ロケットよりも価格が安いので、ファルコン 9 型のペイロード重量を超える中型衛星の多くが、ファルコン・ヘビーでの打ち上げに適すると思われる、衛星コストと打ち上げコスト両方の節減ができるだろう。

ファルコン・ヘビーは今後数年間に 3 機の打ち上げが予定されており、2015 年のテストフライト 1 号機と後続のフライトは、米空軍とインテルサットからの契約を得ている。いま現在まだ設計作業に着手していない大型衛星の設計者は、自分の衛星に対し新たなコスト・パラダイムを考え始めるべきであり、ファルコン・ヘビーの信頼性が確立された暁には即採用できるような、コンテインジェンシー・プランを用意しておくべきである。

中型衛星の設計者は、どのロケットを選び、どのパラダイムによるかについて、面倒な選択を迫られるかもしれない。ファルコン 9 型の低価格が、LEO 衛星のブレイク・イブニング・コスト・ポイントを 4,000kg 以下まで下げる可能性を作り出すのである。もしオービタル・サイエンス社の新型アンタレス中型ロケット（LEO へ 5,000kg 以上とされている）が、ファルコン 9 型より大幅に安くなると、重量制限緩和パラダイムが、もっと小型の衛星にまで広がるかもしれない。

一方で、現在信頼性の確立された中型ロケットがないため、中重量衛星の一部は、デルタ 4 型、アトラス 5 型を含む中大型ロケットを使わざるを得ない。これらの衛星は巨大な重量マーヅンを持つこととなり、重量制限緩和から恩恵を得る筆頭候補となるだろう。

ダイナミックに発展するロケット打ち上げ市場

ロケット	クラス	LEO 重量 (kg)	LEO 極軌道重量 (kg)	静止遷移軌道重量(kg)	価格(M\$)	年
アンタレス	中型	4,500~5,500		1,400	未定	
デルタ 2 型	中型	5,089		1,818	65~137	2012
アトラス 5 型	中大型	8,210~18,850	6,770~15,760	3,780~8,900	187~223	2009~2013
デルタ 4 型	中大型	9,190~13,730	7,690~11,600	4,210~6,890	100~180	2009
デルタ 4 型ヘビー	大型	28,370	23,560	13,810	370~435	2011
ファルコン 9 型 v1.1	中大型	13,150		4,850	82~97	2012
ファルコン・ヘビー	大型	53,000		21,200	165	2012

新規参入 2 社は、既にダイナミックに動いている米国打ち上げロケット市場を、すぐに揺さぶることとなる。ファルコン・ヘビーは 2014 年末または 2015 年に、カリフォルニア州バンデンバーグ空軍基地より初のデモフライトを行うとみられている。オービタル・サイエンス社のアンタレスは、既に 2 度の打ち上げを行っており、良好な性能を確認している。

コスト節減の機会

打ち上げロケット市場での経済変化の大きさが、衛星設計者に重要な機会を開いてくれているが、一方でこれら設計者は、搭載機器を追加して性能向上をはかったり、大電力の機器を設計したり、第二ペイロードを搭載したりという衝動から、自らを律せねばならない。重量制限の緩和を利用してコスト低減をはかるのは、あまり過去に実例の多いやり方でなく、むしろ近年の低コスト重視の風潮に対応するものである。よって設計者は性能向上に気をひかれることなく、衛星の重量制限の緩和を、全ミッションコスト低減と、コスト増およびスケジュール遅延のリスク低減にあてるのがよいとされる。

高価にして上昇し続ける打ち上げコストは歴史的に、設計者が衛星をもっとも小型のロケットで打ち上げることにインセンティブを与えてきた。コストはかかっても、衛星重量を減らすことのできる設計、材料、技術に投資するのが世界的な傾向だった。新たな打ち上げロケット市場は、衛星設計者がこのような高額な投資の全部とはいかなくとも大半を、無しで済ませられるようにする。多くのプログラムで、今までなら重量制限により使えなかった、一般商用グレードのシステムや機器を採用することでコスト節減をはかれるだろう。このようなコスト低減は、全プログラムコストの中でも大きな部分を占めることになり得るものだ。

重量節減のための投資をやめて既存のシステムを使うことは、プログラムスケジュールの短縮によってプログラム期間コストを節減し、衛星のサービス開始をも早めることとなり、時間面でのコスト節減という追加の利益を生むことにもなる。新開発のないリピートミッションでは、ミッションのテンポを早める可能性も生ずる。既設計のシステムを多く使うことは、エレン・パウリコウスキー空軍中将与共著者が "Strategic Studies Quarterly" 2012 年春号に述べたように、分布型アーキテクチャ・ストラテジーを採用したり、商用衛星バスを用いるのを容易にする可能性がある。

打上げの低コスト化は、現在の設計内容を、コスト低減の可能性にむけて再検討させる効果も持つだろう。たとえば設計者は以下の検討をなすべきだろう。

- 重くて安い材料の使用
- 重量減のための部品の機械加工廃止
- 電子機器コスト減のための放射線防護シールドを重いものに
- 重量管理プロセスの簡易化

これらのコスト低減設計変更の多くは、より頑丈で信頼度の高い衛星を生み出すこととなり、結局プロジェクトリスクを低減させる。

第一段階の重量関連コスト低減項目が明確化されれば、次の段階として比較的低コストの性能改善をはかるコスト面の余裕が生ずるかもしれない。たとえば次のような項目である。

- 衛星寿命の長期化やミッション性能向上のため推薬の追加
- 電源系性能向上のためソーラーアレイやバッテリーの大型化
- 熱制御システムの大型化
- 電力、重量の追加許容範囲での通信系帯域の増加

これらの改良はさらなるコスト低減の連鎖を作りだす。推薬追加は衛星寿命延長によるライフサイクル利潤の追加をもたらすし、発生電力の増加は、たとえば電力消費を低減するための高額の出費を抑制し、通信系の帯域増は高価なデータ処理装置の搭載を不要にする。重量に加えて電力の制限を大幅に緩和できれば、新技術開発の厄介な重荷をさらに緩和できるわけだ。

コスト低減の恩恵は、重量にとどまらず電力、熱、さらにミッションシステムまで波及する可能性がある。累積効果は個々のサブシステムでの利益の累計を上回るかもしれず、モジュール化や標準システム採用のコストを低下させることになる。重量制限の緩和は、従来重量の観点から難しかった新技術採用の可能性も開くだろうし、衛星設計上の自由度がいろいろの面で拡大されるだろう。予算が許すならば、より費用のかかる設計を使うことも、最終段階としては考慮されうるだろうが、これはあくまで、それまでのコスト減の積み重ねにより、新たなコスト基準ができたうえでの話である。

システムエンジニアリングの選択肢拡大

これらコスト低減の可能性により作りだされる、新たなエンジニアリングパラダイムは、大変異なったダイナミクスを有する二つのトレードオフ・ドメインを作りだす。

「重量制限堅持」ドメインは、比較的小型の衛星に適用されるもので、小型ロケット使用のために従来からの重量管理手法を使い続けるものである。一方「重量制限緩和」ドメインは、多くのより大型の衛星に向けたもので、積極的なコスト低減手法の適用が可能である。NASA の月や火星への有人ミッションのような超大型ミッションについても、「重量制限堅持」ドメインが適当かもしれない。

衛星技術を手がける機関は、この二つのパラダイムのどちらによるか、的確に判断する能力を養う必要があるし、宇宙分野の技術者は、どちらのパラダイムにも適応する能力を磨き、維持せねばなるまい。

さらに、広範なグローバルマーケット全体では、軽量、低電力技術へ向かう傾向は続くだろう。宇宙技術分野では引き続き、他人の行った技術投資からの利益が得られるし、得るべきである。これは、設計のある部分での軽量・低電力化が、他の部分での「重量制限緩和」パラダイムに役に立つ場

合には、尚更のことだ。

カルチャー面でのチャレンジ

以上述べたような、新たなコスト低減のパラダイムを取り入れることは、我々の宇宙航空技術のカルチャーにおいて、中心的な伝統に反することになる。ほとんどの航空宇宙技術者は教育と職務経験によって、重量配分を最適化するのには当然と考えるよう訓練されてきた。

その結果、彼等は、新しいパラダイムは直観にさからうものと思う可能性がある。中には、単にハイテクでないとの理由だけで、低コスト、ローテクの設計に抵抗し、面白くないと考える技術者も出てくるだろう。

技術の慣習が要求事項にのみ注目させ、可能性には考えが及ばぬような場合には、こうした技術者の反応は倍加するだろう。確立した要求事項というものはすべて、何が可能なのかについては明記されてもいない仮定に基づいていることが多く、その結果、周囲条件を変えることで生ずる技術的可能性については、無視してしまいがちである。

それに加えて、航空宇宙業界というのは、多大なコストリスクを受け入れ、コスト超過を許容するという悪しき風習を持っている。この風習は、いかに意識しても打ち破るのが難しい。航空宇宙業界には、性能や信頼度を落とさずに大きなコスト低減をはかるのが可能だとは信じない人もおり、コスト低減を試みることを拒否するのである。

カルチャー上の抵抗に加えて、実際上の限界や問題点も出てくるだろう。

企業によっては、ローテクソリューションを実行するのに必要な技術や設備を、もう持っていないかもしれない。必要な能力を得るには、宇宙航空業界から外へ踏み出す必要も出て来よう。新設計のための技術経費が、製造コストの低減分を上回ることもありうる。衛星によっては、重量制限は軽減されても、容積制限が問題になるケースも出てこよう。

重量制限とは切り離れた形でコスト低減戦略を実施する手法の開発が必要になるかもしれない。特に、多くの開発機関や企業では、商機拡大の機会を利用するのに必要なコスト・トレードオフを行う能力を持ちあわせないことも多い。新たなパラダイムというものは、進め方を学んだ人達がいる一方で、新しいものに抵抗したり扱いそこなう人達が必ずいるので、最初はうまく進まないものだ。

コスト算定者の用いるコストモデルには、大きな変更や拡大が必要となる。新パラダイムのもとでは、重量に関連したコスト算定方式は、ほとんどが古くて使えぬものとなり、再評価または廃棄されねばならないだろう。コンポーネントによっては、単位重量当たりコストの数値が、歴史的な上昇傾向から反転して、突然ずっと低いレベルへ下降することもある。コスト算定者は、各パラダイム用に別々の手法をセットで持つか、両方に適用できるような全く新たなフレキシブルな手法を持つようになるかもしれない。

新パラダイムのもとで、システムエンジニアリングおよびシステムインテグレーションには難しさが増すかもしれない。新パラダイムが受容されるにつれ、技術上の規範を緩めたり破る誘惑にかられる者が出てくる。実際には、新パラダイムを採用する場合には、特に、重量緩和に対応するために高額のコストを使う誘惑に抵抗するため、規範の数は増加させる必要がある。

技術的トレードの余地が広がり、システムの規模が拡大するにつれ、システムは複雑さを増す。設計初期での設計過誤のリスクが増加するかもしれない。プログラム開始時に誤ったパラダイムを選ん

でしまうと、以後のフェーズで多大のペナルティを受けることになる。よってどのプログラムでも、スタート時のシステムエンジニアリングを確実に正しく実施することが必須となろう。

プログラムスタート時に設計パラダイムを正しく設定できれば、必要性能を大幅なコスト減で達成できるという報酬を受けられる可能性が大きい。衛星構体など基幹サブシステムのコストを最小化できれば、新技術の採用や現在の技術の改良などのための、予算的余裕を作りだすことができる。もし新パラダイムが基幹システムやインターフェースをより標準化できれば、設計プロセスの後期の段階でも新技術追加の可能性がでてくる。これらはすべて、先例のない程の予算上の制限に縛られている衛星ユーザにとって、高い価値となるはずだ。

重量制限緩和パラダイムの本質と実態について、早い段階で見当をつける一つの方法は、大学で学生のプロジェクトのテーマとして使うことである。学生達はトレードのシナリオの検討、さらに各シナリオでどの選択がより大きな利益を生み出すか、それが何故なのかの考察に、前向きにチャレンジするだろう。次のシナリオは 2 つのトレードの可能性を提示している。

- 約 5,500kg の衛星を、厳しい重量マージンにてアンタレス使用で打ち上げコスト低減をはかるか、あるいはファルコン 9 型使用 100%以上の重量マージンつきで衛星コスト低減をはかるか
 - 8,000kg の衛星について、ファルコン 9 型使用で 5,000kg の重量マージンでコスト低減をはかるか、あるいは第 2 ペイロードをのせることで打ち上げコストをカットするか
- 両ケースで、どちらの選択がより大きな利益を得られるだろうか？

必要とされる開発

重量制限緩和パラダイムを探求するための先進的努力は、航空宇宙産業に対し大きな価値をもたらすことだろう。今すぐに、新パラダイムの骨組やダイナミクスを探求するための検討に着手する必要がある。過去の衛星設計プログラムで、必要よりもはるかに大型のロケットで打ち上げたケースや、不都合なほど低い重量制限に合致させるため、高額の金を使われたケースでの経験についてのケーススタディが可能である。新パラダイムによって利益を生み出すことをもくろむ新たな衛星開発では、必ず十分な解析検討を実施すべきであろう。スケールダウンにより衛星システムのある部分のみについて、大幅に重量制限を緩和して新パラダイムをテストしてみることも可能であろう。

筆者の勤務している TASC 社（以前の The Analytic Sciences Corporation）では、システムエンジニアリングの枠組みの提供よりもさらに先を狙い、衛星開発者達が新パラダイムを探求し、しかも落とし穴に嵌らぬよう支援する目的で、重量制限緩和パラダイムの検討を行っている。特に TASC は、現在のコスト見積もり手法が重量制限緩和パラダイムや、他の主要な技術革新から開発される新しい技術標準にも適切であり続けるために、どんな変更や拡大が必要か、についての検討を進めている。

これらの検討を進めるには、新たなコスト/性能の関連付けが、単なるコスト評価だけでなくコスト低減に前向きに向けられるようなコスト解析の一部として開発されることが要求されるのである。