

ミッション解析書

テーマ名：Bugs' Nest-拡張性を有した有人衛星規格の提案

序論

宇宙開発において、幾度もの有人ミッションが行われてきた。その中で、宇宙ステーションは、人類が宇宙という新たなフィールドへ飛び出すための、前線基地といえる。

しかし、現行の国際宇宙ステーション(以下 ISS)は多くの国家が国際協調の下、計画に関わっているものの、その建設に必要な物資の輸送には、ごく少数の国家に頼っている状況である。これは、ISS のモジュールを打ち上げることが可能なロケットが限られているためである。このように、少数の国が主導権を握るような宇宙ステーションの建設法では、ミッションを遂行することが困難になると考えられる。

そこで、我々は、宇宙ステーションの建設を簡素化し、多くの国家、企業が参入できるような、より小型のモジュールの提案を行う。これにより、日本のみならず、ロケットを保有するあらゆる組織に対して、宇宙開発参加の機会を増やすことができると考えられる。

国際宇宙ステーション

ISS は、アメリカの呼びかけによって計画された、大型の有人宇宙実験施設である。ISS はスカイラブと同時期に計画された、大型宇宙ステーションに端を発する。その後、何度も設計を変更され、ISS として 1995 年頃から建設を始めることで合意した。その後、ロシアが参加に意欲を示したことから更に計画変更が行われ、1998 年から建設が始まった。

2000 年には、主なペイロード運搬を務めてきたスペースシャトル[コロンビア]が空中分解を起こし、ISS の建設は停滞した。また、アメリカが月や火星などに宇宙開発の方針を転換し、スペースシャトルの運用期限を 2010 年までと設定したことから、計画は大幅な見直しを迫られている。

モジュールサイズの提案

Table1 に示すとおり、ISS の構成要素は、ほとんどが質量 10t~20t を超える大型のものである。そのため、これらのペイロードを打ち上げるロケットは、必然的に限られてくる。

Table1 ISS 構成要素の各質量

モジュール	質量[t]	使用ロケット
ザーリャ	19.3	Proton(Russia)
ズヴェズダ	19.0	
S0 トラス	12.6	Space Shuttle(NASA)
P1 トラス	13.9	
Z1 トラス	8.3	
JEM	15.9	
デスティニー	14.0	
クエスト	6.1	
ユニティ	11.6	

次頁の Table2 に各国の主要なロケットの LEO 打ち上げ能力を示す。ここから、ISS のモジュールを打ち上げが可能なロケットが、数種類程度に限られていることが分かる。

使用できるロケットが限られているということは、打ち上げの頻度が低下するということである。ISS で実際に建設を主導しているのは、大規模輸送能力と有人飛行能力を持つロシアとアメリカのみである。ISS はスペースシャトルの 2 度の事故により大きく計画が停滞している。つまり、主導国での遅延がそのまま計画全体に影響を及ぼしている。また、近年ではシャトル以降の大型輸送往還機が開発されないことがほぼ確定しており、そのことから今後の宇宙開発は、既存のロケットで展開する必要がある。

Table2 各国の宇宙ロケットの能力

nation	rocket	全備質量 [t]	LEO[t]	GTO[t]
NASA	Delta 4M	250	8.1	4.2
	Delta 4	733	23.0	13.1
	Heavy lift			
	Atlas 5 401	333	12.5	5.0
	Atlas 2A	187	6.6	2.8
	Atlas 2AS	218	8.6	4.1
	Atlas 3A	218	8.6	4.1
	*Titan 4B	939	21.6	5.7
	*Space Shuttle	800	22.0	2.4
Russia	Soyuse U	310	6.9	1.4
	Soyuse 2'		7.0	2.7
	Proton K	692	19.8	4.9
Ukraine	Zenit 3SL	471	15.9	6.0
China	CZ-2F	464	8.4	3.5
	CZ-3A	240	8.5	2.3
ESA	Arian 5G	746	18.0	6.0
Japan	H-2A2020	285	10.0	4.0
	H-2B'	510	16.5	

*運用が終了、もしくは近年終了

'開発途中

サイズの適合

Table2 から、アトラス 2A、ソユーズ U、Titan、Space Shuttle、H-2B を除き、12 種類がおおよそ 10t 以上の LEO 投入能力を持っている。衛星を設計する際には質量だけでなく、これらのサイズをフェアリングに適合させる必要がある。基本的に、フェアリング長は 10m を超えるものが多いが、直径に関してはロケットの最終段に左右されるため、一律ではない。以下に、各ロケットのフェアリング径を示す。

これらの数値はあくまでカタログ・スペック上なので、実際に打上げ可能であるかどうかは推測である。

Table 3 各ロケットのフェアリング径

nation	rocket	normal	max
NASA	Delta 4	5	
	Atlas 5(400)	3.75	4.57
	Atlas 2AS	3.3	4.4
Russia	Soyuse U	3.72	4
	Soyuse ST		4.11
	Proton M	3.87	4.7
Ukraine	Zenit 3SL	3.9	
China	CZ-2F	3.35	
	CZ-3A	3	3.7
ESA	Ariane 5	4.57	
Japan	H-2A	3.7	4.6

提案

各国には、能力は限られているが優秀なロケットが多数存在する。仮に打ち上げるモジュールの質量を 6t として限定すると、運搬可能なロケットは Table2 中でも 12 種類に該当している。今後の宇宙開発を考えた場合、これらのロケットをいかに利用できるかが課題となる。

本提案では、既存の一定の能力を持った全てのロケットに適合する、有人モジュールを提案する。通常、打上げロケットはペイロードに合わせて選定されるが、本提案の場合は逆に、どのロケットにも適合できるモジュールの質量を固定化する。いわば、有人モジュールの規格化である。

狙い

例えば、200t 規模の宇宙ステーションの建設を行うとする。1 基あたり 20t 規模のモジュールならば、プロトンロケット 10 回程度で完成できる。プロトンの平均年間打上げ回数は 14 回程度であり、全て打上げに振り向けて 10 ヶ月程度になる。

一方、これを 6t クラスのモジュールとした場合、打上げ回数は 34 回程度である。その代わり、使用できるロケットが多国のありとあらゆるロケットにわたる。そのため、同時期に複数の発射場を使ってモジュールを打ち上げることができ

る。例えば、ソユーズ、H-2A、長征、デルタロケットを用いるとすると、1ヶ月にこれらを連続して打ち上げることで、34回の打上げを8.3ヶ月で終了する。多くの機関が参加することで、ステーションの建設期間を短縮できる。

世界中の発射基地を用いることは、宇宙ステーションの建設を早めるだけでなく、各国のロケット打ち上げ技術の進歩にもつながるという利点もある。

プロトンを単一で使用した場合には、商業衛星の打上げなどがスケジュールに組み込まれているため、全てを建設にまわすことが出来ない。だがこの方法ならば、何処かのスケジュールが滞っても、他の発射基地は問題なく打ち上げることが出来る。

アイディアの条件

本提案で提示する衛星を Bugs' Nest と呼ぶことにする。Bugs' Nest で鍵となるのは、いかに現行のロケットの大半に規格を当てはめることができるか、である。これにはペイロードに適合した構造重量、サイズを検討しなければならない。構造物をロケットのペイロードに搭載するという事は、必然的に小型化、内部容量の減少に他ならない。本提案では、これをモジュールの数によってカバーするが、それには同一の規格であることが望ましい。そのためには、小型化によるコストの上昇や、打上げコストの増大も考慮しなければならない。

また、[現場]での建設を担当してきたスペースシャトルが退役することから、飛行士による建設作業が出来なくなる。即ち、自らランデブー、結合し、組み立てを行っていくための装備が必要である。このための装備を現行の技術でいかに実現できるかということが重要である。

本提案では、現在 ISS などで用いられている技術を参考に、どのようにしてこのアイディアを実現できるか考察した。

衛星概要

Bugs' Nest は様々な運用形態を想定している。その中では、単体での使用や、集合した状態での運用などが考えられる。そのため、個々のモジュールには、共通した機能を搭載する。例として生命維持装置や通信機器、電力発生のためのバッテリー、ソーラーパネルなどである。

Bugs' Nest に中枢は存在しないため、必要不可欠なシステムを全体的に分散することになる。電力は全体で発電され、大気循環はモジュールごとに行われる。この形態の利点は、特定のモジュールが機能不全に陥った場合に、当該部分を切り離すことが出来る点である。単位モジュールが小さいため、より限定した隔離が可能となる。また、老朽化したモジュールは閉鎖、切り離して投棄することが出来る。

このように、中央制御無しで、資源を流動的に全体と共有することができる。これには昆虫のとする生態システムが参考になると考えている。

1) 材質、寸法

モジュールの材質はアルミニウム合金のほか、PMC(Polymer Matrix Composite)などの、ハニカム構造が用いられている。アルミニウム合金は宇宙開発の当初から使われている素材である。また、PMC は金属と同等以上の強度と数分の1の質量を持ち、太陽電池パネルなどに使われている。

寸法は現行の打上げロケットで投入可能なものとする。Table2 から推測すると、5,000kg から8,000kg 程度ならば、ほとんどの打上げロケットに適合できると思われる。モジュールの質量は単位面積あたりの重量で求めることが出来る。ISS 構成要素の一つである[セントリフュージ]で推測すると、全長 6.8m×直径 3.5m で 6,000kg となる。同様に、[デスティニー]で推定すると、同質量で全長 5.0m×直径 3.0m 程度となる。



Fig.1 Bugs' Nest 素体(CBM 4 基)

2) 熱制御

熱制御は既存のものを利用する。例えば、ISS に用いられている液化アンモニアの冷却システム、ヒートパイプ・ループ、ヒータなどである。現行のものを利用することで、開発期間を短縮する。これらの設備はここに独立させ、システムは自己の管理下にあるモジュールのみを制御する。

3) 電源

機体表面の外部デブリバンパに、太陽電池をオンボードする。また、標準装備として側面に、十数 m 程度の太陽電池パネルを備える。宇宙空間における太陽エネルギーは 1.35 kW/m^2 である。単体で 5 kW 程度の発電を目標とすると、発電効率を 15% として $1.5 \text{ m} \times 16.4 \text{ m}$ 程度のパネル面積が必要となる。これはあくまでピーク値であり、一定した電力供給には、これ以上の面積が必要である。また、ガリウム砒素などの高効率ソーラーを用いればより小さくできると思われる。モジュールにはそれ自体の制御系に使われる電力を供給するほか、必要に応じて他モジュールに対して電源供給を行える設備を持つ。

天体の影の部分に入った場合、太陽電池の発電量は著しく低下するために、2次電源としてバッテリーを複数搭載してこれに対処する。影の部分では電力消費を最小限とするよう電力システムを制御する。

4) 通信

現行の ISS では、小容量データとして S バンドアンテナ、大容量データとして Ku バンドアンテナを装備している。また、接近してくる宇宙船や船外活動中の宇宙飛行士とは UHF アンテナを介して交信している。これと同様のものを用いる。

現在の衛星では GPS 衛星を利用して、自立的に事故の位置を認識、補正するものが増えている。

他に、追加モジュールとして大型の通信装置を搭載したモジュールを考えている。データの中継にはデータ中継衛星(TDRS)を用いる他、必要に応じて ISS を中継して通信を確保する。

5) デブリシールド

現行の ISS のように、機体外層にはある程度のデブリ対策を施すべきである。デブリを内壁まで貫通させないための方法としては、外壁の外側に金属板を設け、衝突時の運動エネルギーを熱エネルギーに変換させ、減少させるものがある。これはホイップル・バンパと呼ばれる。さらにスタッフィング(アルミメッシュやセラミクス、ケブラーなど)を重ねて強化したものが実験されている。スタッフィング入りバンパでは、 10 mm 径のデブリが速度 16 km/s で衝突した場合まで耐えうることが確認されている。またスタッフィングを入れない場合でも、太陽電池をオンボードすることで、デブリに対する防御になることが確認されている^[4]。これらを区別して配置することで、重量を保ちつつ、耐久性を確保する。

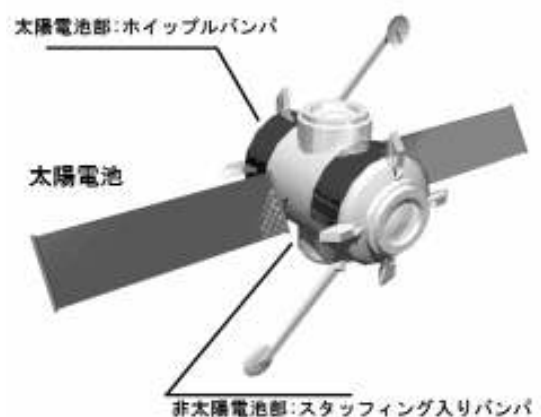


Fig.2 各種デブリシールドの装着位置

6) ランデブー、ドッキング

ISSと同様の、CBMを2基程度備える。これにより、同型の衛星による拡張性を確保する。CBMは直径が130cmあり、荷物や人の移動が従来のものに比べて容易になっている。CBMには能動側と受動側が存在するが、2基1対として常に能動受動の関係を確保する。

各モジュールには、ランデブー用のレーザーレーダーを搭載する。これは技術試験衛星ETS-V IIによって実証された方式で、HTV(H-2 Transfer Vehicle)に用いられる予定である^[1]。また、Bugs' Nest 同士の通信には前述のUHFアンテナを用いる。

ISSの軌道上組み立てでは、スペースシャトルか、先に取り付けられたロボットアームによって行われていた。しかし、Bugs' Nestでは単独でのランデブー、ドッキングが行われなければならない。そこでマニピュレータを取り付け、相互に保持することでドッキング時の補助とする。側方CBMへのドッキングは、能動、受動にかかわらず、ドッキングする側がマニピュレータを伸ばして保持する。リ・ドッキングの際には、逆の手順でモジュールを保持してから、開放する。

ドッキングした後にデッド・ウェイトとなることを防ぐため、マニピュレータにはISSに用いられているSSRMSと同様のものを考えている。このSSRMSは固定部がなく、ISS各所に移動することが出来る画期的なものである。これをオプションとして打上げ、後続の追加モジュールのドッキングの補助とする。SSRMSの重量はおよそ1,800kgである。

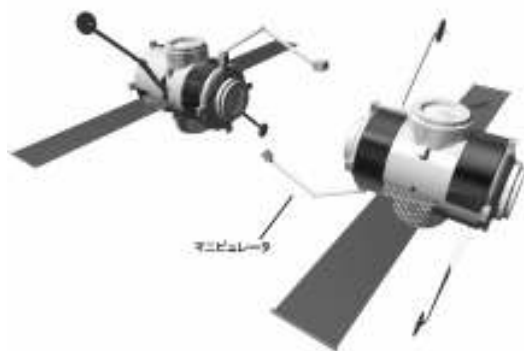


Fig.3 ドッキング用マニピュレータ

7) 物資補給、及びリブースト

能動的な姿勢制御方法としてモジュール各部にスラスターを搭載する。

基礎モジュール自体に軌道制御能力はなく、追加パーツとして軌道制御能力を付加する。現在、ESAではATV(Automated Transfer Vehicle)が開発されているが、これはISSへの物資補給のほか、スラスターによるリブーストが行えるよう設計されている。Bugs' Nestでも同様のシステムが採用されることが望ましいが、ATVやHTVよりも小規模なものでなければ、既存のロケットでは打ち上げられない。

Table4 ISS 物資補給、リブースト用モジュール

Nation	Russia	ESA	Japan
Module	Progress M	ATV	HTV
Length[m]	7.2	9.8	9.2
Diameter[m]		4.48	4.4
Dry mass[t]	4.8	10.5	10.5
Payload[t]	2.35	7.5	6.0
Thrust[kN]		490×4	

8) 生活環境

Bugs' Nestは有人滞在を念頭に置いた衛星である。そのため、物資の保存や循環装置などの設備が必要となる。前述のとおり、Bugs' Nestは集合することにより、完全な有人滞在機能を獲得する。そのため、単体に全ての機能を閉じ込める必要はない。1人に対する循環装置の重量、寸法は次のようになる。^[5]

Table5 浄化循環システムの寸法及び電力

機器	高さ [m]	幅[m]	縦 [m]	体積 [m ³]	重量 [kg]	電力 [kW]
水	2.2	0.45	0.6	0.594	330	2.4
大気	2.2	0.45	0.6	0.594	195	1.64

モジュール1基あたり2人分の能力を持たせるとすると、およそ1,050kgである。

また、人1人が1日に必要とする水と酸素、食料は総計4.53 kgである。モジュール1基あたりに人員2名1週間分を搭載すると仮定すると、63.5kgと計算できる。これらを総計すると、基礎体の重量は、前述の空虚重量6,000 kgとあわせて7,114kgである。これに人員2人分の水30kg/日×7日を考えると、これより基礎構造の全備重量は7,600kg~8,000kg程度と推定する。

コスト面の課題

小型化に際して問題となるのは、密度当たりのコストである。Bugs' Nestでは同一規格によって拡張性を確保するが、逆にそれぞれのモジュールで重複する部分が増え、機能的、重量的に不利になるという問題がある。

同じ質量のステーションを20tと10tの規格モジュールで構成すると仮定する。このとき、10tのモジュールの場合、20tモジュールの倍のモジュール数が必要であることは明白である。逆に言えば、同じコストでステーションを建造する場合、10tモジュールの単価は20tモジュールの半分以下で無ければならない。それ以上ではトータルコストの面で不利となる。

往還システムの課題

前述の通り、アメリカは2010年までにスペースシャトルを退役させることを明言しており、今後、シャトルを含めない宇宙開発が進むと考えられる。一方、ロシアとESAはソユーズの改良とクリッパーの開発で合意しており、今後の有人宇宙飛行はしばらくの間ソユーズを中心にして進むと考えられる。Bugs' Nestも、ソユーズとの協調運用を取る必要がある。

また、日本では独自の宇宙船を持っていないが、技術開発も当面凍結することが決定しており、日本が単独でBugs' Nestを運用することは不可能である。当衛星を運用するには、ロシアか、中国との宇宙開発の協力が必要である。

政治的課題

Bugs' Nestの運用は、各国における協調、及び競争が必要である。しかしながら、現在の宇宙開発はほぼ別個に進められているような状況である。科学研究の分野では、世界的な協力は普通であるが、商業的宇宙開発ではロシアとESAが協力しているのみである。商業開発の上では、技術的課題よりも政治的な課題によって阻害される場合が多く、事実、日本はアメリカのスーパー301条によって商業利用を断念した経緯がある。

地球近傍におけるステーションの建設

- 1) 初回打上げ。この時、自在マニピュレータを付属させる。
- 2) レーザーレーダーにより、ドッキング・マニピュレータが保持可能な距離まで接近する
- 3) マニピュレータにより相互を保持。
- 4) 相互に引き寄せあり、CBM結合に入る。
- 5) 3回目以降ではマニピュレータを搭載せずにモジュールを軌道投入する。マニピュレータは任意のCBM付近へと移動し、ランデブーした追加モジュールは、自在マニピュレータにより保持され、ドッキングされる。

発展

Bugs' Nestは汎用性が高いことが大きな特徴である。これを利用した当衛星の発展系について述べる。

(1) 軌道作業船

Bugs' Nestは小型であり、構造上エンジンのない宇宙船に等しい。ここから、作業用のマニピュレータなどを装備し、軌道上における小型作業船として運用する。

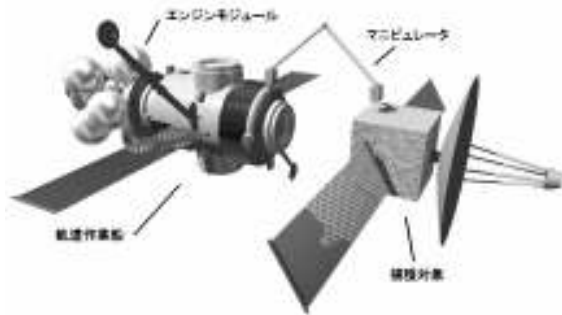


Fig.7 軌道作業船

(2) 宇宙ステーション

順次打ち上げていくことにより小規模な宇宙ステーションを構成する。多くの CBM があるため、必要になった機器を拡張モジュールとして接続することが可能である。



Fig.8 地球軌道ステーション

(3) 遠方の天体における前線基地

Bugs' Nest の能力の一つとして、自律的な組み立てが挙げられる。この機能は、地球近傍よりもむしろ、人員の派遣が困難な遠方において役立つ。

月や火星など、現在の技術では継続的な人員輸送が困難な場所において、Bugs' Nest による[前線基地]を建造する。これらの遠方の天体では、ペイロードを推進剤に比べて小さくするため、大型モジュールによるステーションが困難である。



Fig.9 Mars Station with Bugs' Nest

結論

宇宙空間の有人滞在施設を統合する規格について提案した。この Bugs' Nest は小型かつ汎用性を併せ持ち、またモジュールの組み合わせによって、目的に沿ったステーションへと建設できるものである。提案では既存の技術を用いて、モジュールを比較的小型に集約できることを確認した。同時に、重量に対するコストの増大、往還船の問題、政治的障害という課題も見つかった。Bugs' Nest の市場投入には、これら3つの課題を中心に組み込まなくてはならない。

日本ではロボット技術など、基礎的な技術研究は進んでいるため、それらを実用化の段階に移行することが重要と思われる。今後必要とされるのは、有人の往還手段の開発、及び予算である。

参考文献

- [1]日本航空宇宙開発研究機構 Web ページ 各種資料、広報 PDF
 - [2]図説宇宙工学概論: 岩崎信夫(丸善株式会社)
 - [3]宇宙航行力学: 室津 義定(共立出版社)
 - [4]宇宙工学概論: 斎藤 利生(地人書館)
 - [5]小地球を作る: 新田 慶治(丸善株式会社)
 - [6]衛星設計入門: 衛星設計コンテスト実行委員会(培風館)
- その他各種 Web ページ