

## デブリ除去における非協力対象への接近と宇宙機システムについて

○安田国治（三菱電機）

故障した衛星やロケット上段のようなデブリへ接近し、これらを軌道上から除去するための宇宙機システムについて検討を進めている。これらデブリの除去においては軌道上にて至近距離まで安全に接近できることが前提となる。また、費用的にも安全面からも有人宇宙活動ではなく無人の宇宙機を用いるのが得策である。我が国は国際宇宙ステーションへの無人機による物資輸送を成功させており、その技術を発展させデブリ除去にも適用できる。ただし、デブリは軌道上での接近・捕獲を意図したマーカやリフレクタを待たず、予期せぬ回転運動を伴っている場合が有り得る。本講演では、このような対象への接近における特徴を明らかにし、課題を明確にする。そして課題解決に向けての接近シナリオや航法システムの検討例を示す。更に軌道上での運用の側面にも着目し、宇宙機システムとして具備すべき事項について述べる。

MITSUBISHI  
三菱電機

Changes for the Better

第3回スペースガード研究会 & 第4回スペースデブリワークショップ

## デブリ除去における非協力対象への接近と 宇宙機システムについて

○安田国治（三菱電機）

2010年12月17日

故障した衛星を軌道上から除去するミッションを想定し、課題を明らかにすると共に解決に向けての検討例を示す。

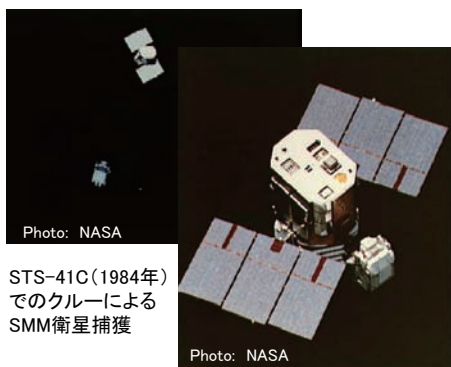
1. ミッション概要
2. 無人宇宙機での接近における課題と検討例
3. 宇宙機システムとして具備すべき機能
4. まとめ

2

## 1. ミッション概要

### (1) 有人宇宙活動の例

スペースシャトルでは故障した衛星への接近/捕獲/修理等が過去に複数回実施されている。→ 衛星の利用が目的



STS-41C(1984年)  
でのクルーによる  
SMM衛星捕獲



STS-49 (1992年)によるインテルサット  
衛星の捕獲



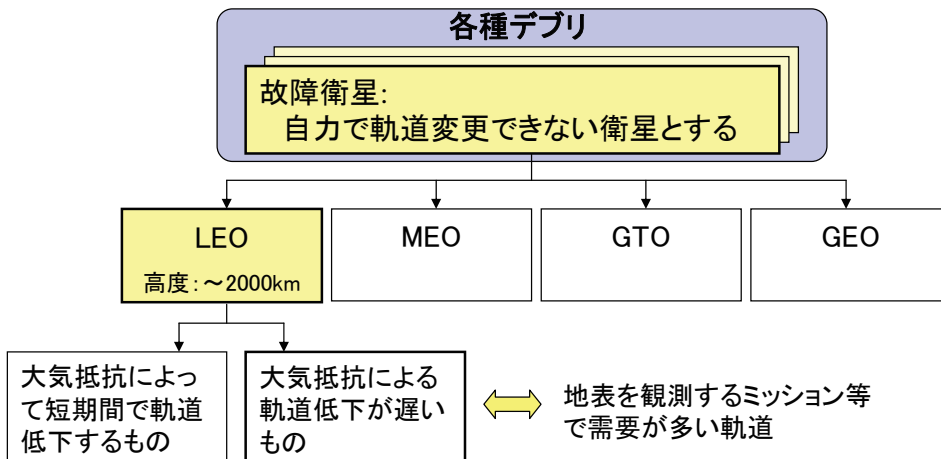
STS-103(1999年)でのハッブル宇宙  
望遠鏡の捕獲・修理(3回目)

衛星の利用を目的としない「故障した衛星を軌道上から除去するミッション」に対して有人宇宙活動が適用されないのはコスト(リスク含む)に対する利益が見込まれていないためと推測される。

3

- (2) 無人の宇宙機による故障衛星の除去  
軌道上の環境がデブリの存在によって危機的状況となる前に、  
有人宇宙活動よりも低廉で柔軟性に富む無人の宇宙機を用いた除去が望まれる。

■ 検討対象



■ 軌道変更の手段

故障衛星＝自力で軌道変更できない衛星 とした



軌道高度を下げさせるための手段

- ・ 枯渇した推進剤の補充
- ・ 軌道変更用モジュールを結合させ、動作させる
  - 推進系 + 制御系
  - EDT: ElectroDynamic Tether
- ・ サービス宇宙機が故障衛星に結合して軌道離脱
- ・ イオンビーム照射等



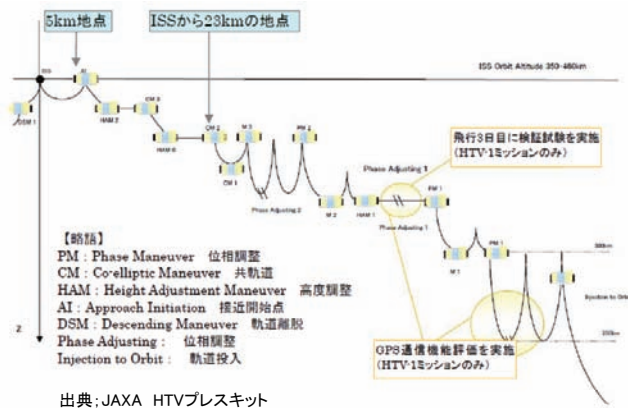
無人での故障衛星への接近が必須

もちろん、故障衛星の把持や結合も重要であるが

2. 無人宇宙機での接近における課題と検討例

(1) 実証例との違い

宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle: HTV)



技術実証機 (HTV-1) 2009年9月11日打上げ  
 2号機 (HTV-2) 2011年1月打上げ予定

- GPSを用いた航法 (ISS、HTVにGPSRを搭載)
- レーザセンサを用いた航法 (500m付近)

(1) 実証例との違い

欧州のATV (Automated Transfer Vehicle) の例



1号機 (ATV-1) 2008年3月打上げ  
 2号機 (ATV-2) 2011年2月打上げ予定

米国のCygnusの例

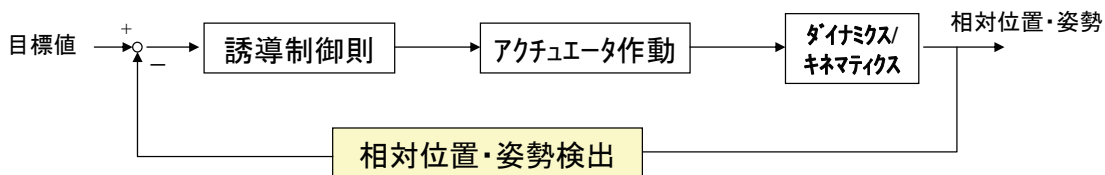


2011年~2015年に8機打上げ予定

- GPSを用いた航法 (ISSとATVにGPSRを搭載)
- GPSを用いた航法 (ISSとCygnusにGPSRを搭載)
- レーザセンサを用いた航法 (249m付近)

接近する対象がGPS信号を受信し、そこから得られた情報を利用して遠方からの接近を行う。 → 故障した衛星では期待できない

(1) 実証例との違い



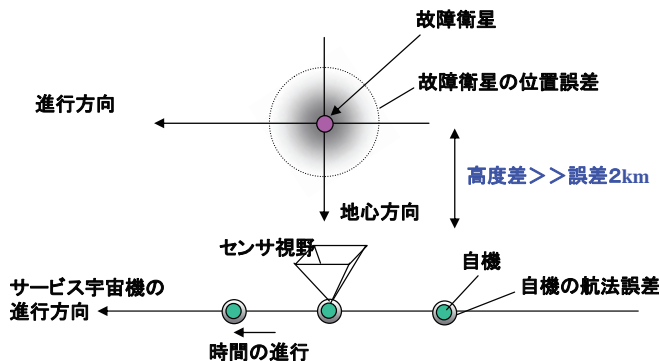
実証例

ISSへ接近するHTVの場合	故障衛星へ接近するサービス宇宙機の場合
GPSを用いたISSの軌道の情報	TLE (Two-line elements)による軌道の情報
レーザ光を発生しISSに取り付けたリフレクタからの反射にて距離と方位を計測	リフレクタやマーカが無くとも故障衛星との相対位置・姿勢を割り出す必要あり
ISSは所定の姿勢を維持	姿勢は不定であり回転している場合もある

(2) 検討例1: 位置決定精度の向上

TLEから得られた故障衛星の位置(誤差2km想定)について精度を高めることでより安全に接近したい。

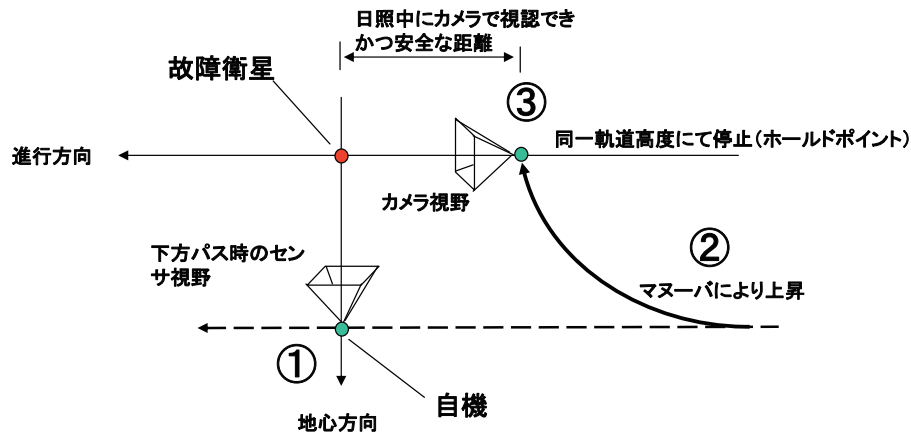
故障衛星の下方を通過する軌道へサービス宇宙機を投入することを考える。これによりスターセンサもしくは光学カメラを天頂方向に向けておくことで自動的に故障衛星をサーチできる。



地上からのデブリ観測技術を応用  
将来の宇宙監視にも適用できる

## (3) 検討例2: 光学カメラを用いた距離情報の把握

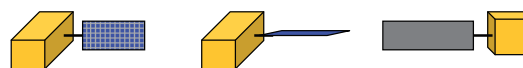
故障衛星の下方の軌道から上昇した後、徐々に故障衛星へ接近する。その際に光学カメラを用いて距離を計測する。いくつかの方法が考えられるが、故障衛星の既知の代表寸法を用いた方法が候補となる。



10

## (3) 対策案2: 光学カメラを用いた距離情報の把握 cont.

故障衛星の既知の代表寸法を用いた相対距離把握においては故障衛星の形状や姿勢角によって難易度の高いケースが考えられる。



画像データから衛星本体部分だけ抽出するか?

確実性を上げるための手段としてカメラの複数台搭載によるステレオ視が考えられる。



ステレオ視においてサービス宇宙機の機体寸法の制約からカメラ間の距離が取れないという問題に対しては、宇宙機が移動してカメラ間の距離を稼ぐ方法や、2機ペアのフォーメーションも考えられる。

11



(4) 検討例3: 光学カメラ以外での距離情報の把握

光学カメラを用いると精細度の高い画像データを得ることが出来、3次元計測を有利に進められる利点がある。しかしながら、日陰中の安全確保に当たっては光学カメラ以外の距離情報の把握手段も欲しい。



- ・リフレクタ無しで適用可能なレーザ光を用いたセンサ
- ・電波を用いたセンサ（車載ミリ波レーダからの発展）

無人宇宙機での接近において課題はあるものの  
現有の技術からの発展によって対応可能と考える。

3. 宇宙機システムとして具備すべき機能

(1) 自動化/自律化 or リアルタイム画像モニタ

軌道上でランデブドッキング実験、ロボット実験を実施した技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ、1997年打上げ)ではSバンドハイゲインアンテナを用いた高速データ通信系を搭載し中継衛星を介した画像データの伝送を行っていた(2~4Hz)。



← ターゲット衛星

← チェイサ衛星

高速データ通信系を搭載

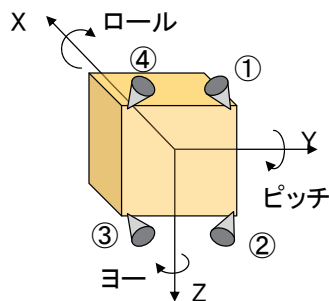
(1) 自動化/自律化 or リアルタイム画像モニタ cont.

デブリ除去における故障衛星への接近、把持などの運用シーケンスをこなしていく上でリアルタイムの画像モニタが欲しくなる。しかし、これをデブリ除去の全体システムへの要求とすると最終的にはデブリ除去専用のデータ中継衛星を静止軌道上に複数配置することになる。

- 案1) 国際協調・協力の中でデブリ除去専用のデータ中継衛星を静止軌道上に複数配置する。共同運営で運用コストを低減する。サービス宇宙機にはデータ中継衛星との高速の通信機能を搭載するが、搭載機器は低廉な標準品を開発する。
- 案2) サービス宇宙機がミッションを確実に安全に進める上での、自動化/自律化を進め、究極的にはデータ中継衛星を介したデータ伝送を不要とする。
- 案3) サービス宇宙機の自動化/自律化を進めデータ中継衛星経由のデータ容量を減らし、運用コスト軽減を図る。

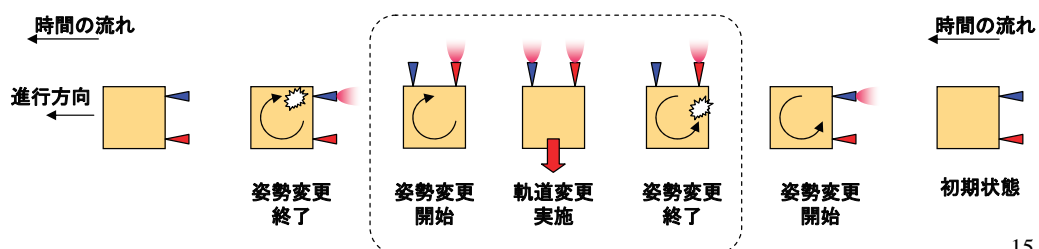
(2) 推進系の構成

3軸の姿勢制御トルクを発生し1軸の並進力を発生させるためのスラストの構成は、傾けたスラスト単系4本(×冗長数)で実現できる。空間内で任意の方向の並進力を得るためには姿勢を変更して運用する。



	①	②	③	④
ロールトルク	+ D			D
	-	D		D
ピッチトルク	+		D	D
	-	D		D
ヨートルク	+			D
	-	D	D	
並進力	F	F	F	F

D: 2本同時噴射 1F: 4本同時噴射

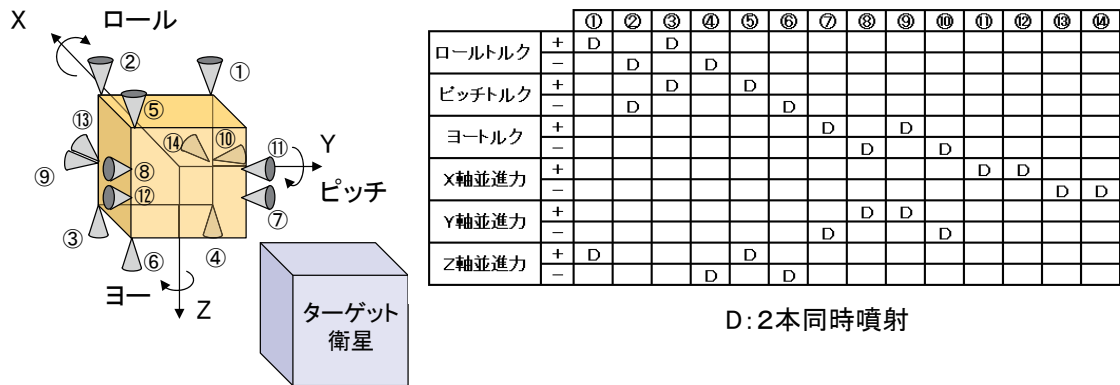




(2) 推進系の構成 cont.

デブリ除去の場合、故障衛星の近傍ではセンサが視野を外すような姿勢の変更は避けて、速やかな推力の発生が必要となる。よって、3軸の姿勢制御トルク、並進力を即座に実現できるスラスト単系14本が必要となる。また、ガスジェットの故障衛星への吹き掛けにも注意が必要となる。

冗長数については2系がベースとなる。更なるデブリ発生を抑止する観点から1部を3系とする考えも出てくる。



ETS-VIIの例を模式的に表した

まとめ

- LEOで故障した衛星を除去するミッションを想定した。
- 実証済みの技術との違いを示し、課題解決に向けての検討例を示した。
- 宇宙機システムならびにデブリ回収の全体システムに関する検討の中からリアルタイムの画像伝送についても触れた。