

---

② **SPICAのハロー軌道での軌道保持解析**

# 背景

## SPICA ミッション

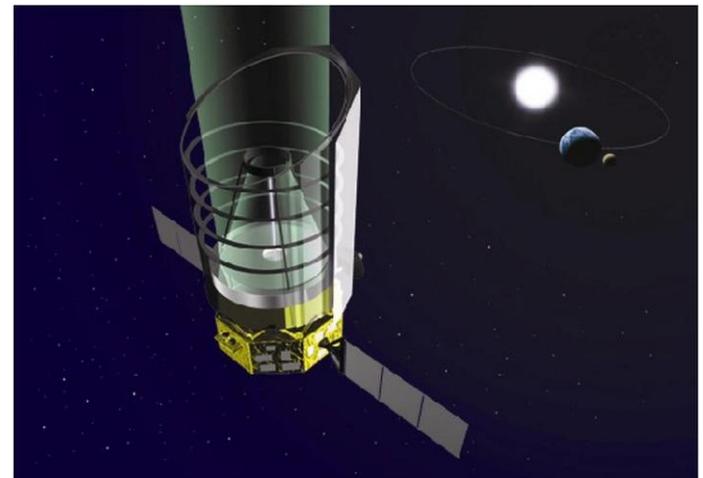
### 次世代赤外線天文衛星SPICA

(Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)

#### <ミッション目的>

原始銀河など宇宙初期に誕生したばかりの天体からの放射は、赤方偏移によって赤外線～サブミリ波領域に偏っている。

- ・銀河の誕生と進化
- ・星と惑星系の誕生と進化
- ・物質の進化



# 背景

## SPICA ミッション

### <高感度・高分解能>

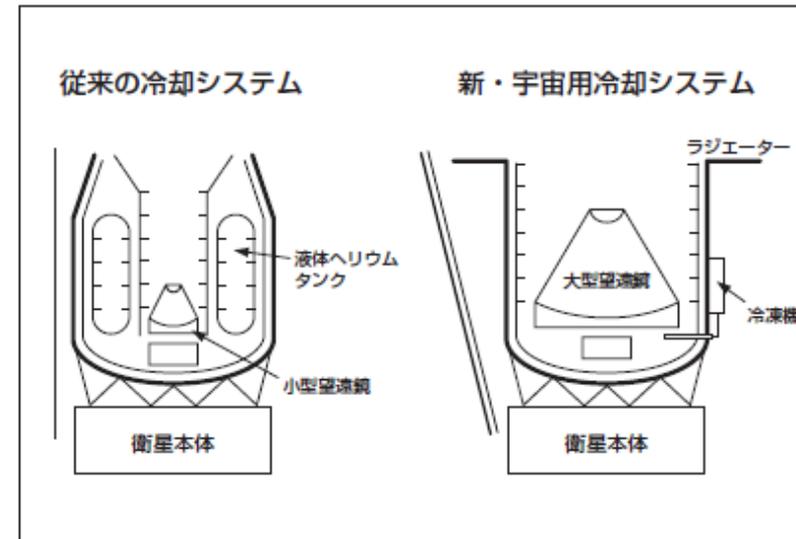
液体ヘリウムではなく、打ち上げ後宇宙空間で放射により望遠鏡を冷却(絶対温度5K)



巨大タンクが不要



大望遠鏡の搭載(口径3.5m)



### <ノミナル軌道>

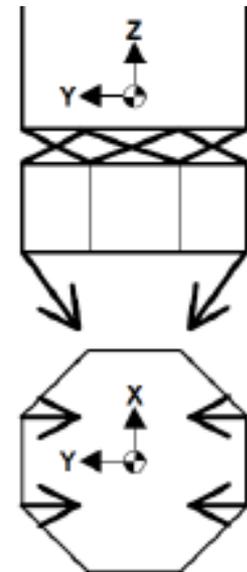
2018年にH2Aロケットで種子島から打ち上げ、  
太陽-地球系L2のハロー軌道に投入して飛翔観測(地球から約150万km)  
ミッション期間=5年

# 問題点(軌道保持)

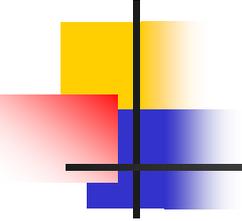
## SPICA ミッション

- 飛翔観測を予定しているハロー軌道は不安定軌道
- アンローディング(宇宙機の姿勢制御でリアクションホイールの蓄積される角運動量の解放)を磁気トルカでなくスラスタで行なう
  - 鏡面の汚染を防ぐためにスラスタ方向に制約(-z方向)
  - 余剰並進 $\Delta V$ が発生

↓  
余剰並進 $\Delta V$ が軌道保持に  
影響を及ぼさないか懸念

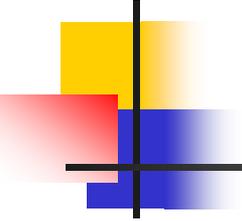


# 目的



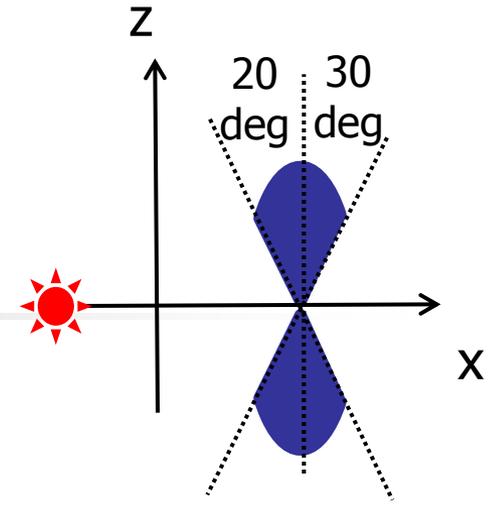
---

- i. アンローディング時に発生する余剰並進 $\Delta V$ の基準ハロー軌道保持への影響を調査
- ii. その影響を抑制する方策の提案
  - Local approach
  - Global approach

- 
- 
1. アンローディング時に発生する  
余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価

# 余剰並進 $\Delta V$ の影響

## 検討仮定



### 1. SPICA ミッション要件

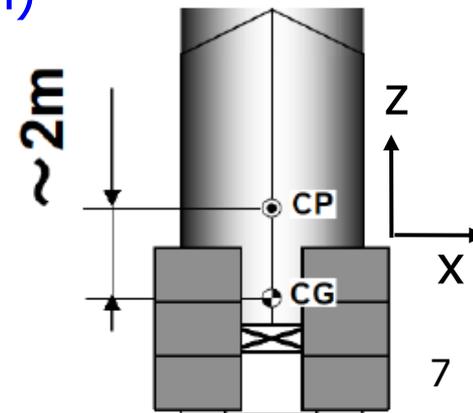
- 運用ハロー軌道の大きさ:  $Az = 35$  万 km (暫定)
- 許容観測方向: 太陽方向に直交する大円を基準に $+20^\circ$  (太陽側)  $\sim -30^\circ$  (反太陽側)に範囲内(一様方向に観測)

### 2. アンローディング運用要件

- 頻度: 毎日
- 発生する余剰並進  $\Delta V$ : 6 mm/s (衛星固定座標系の $-z$ 軸方向)
- 姿勢: 制約範囲内で特に拘束なし (Origin approach)

### 3. モデル

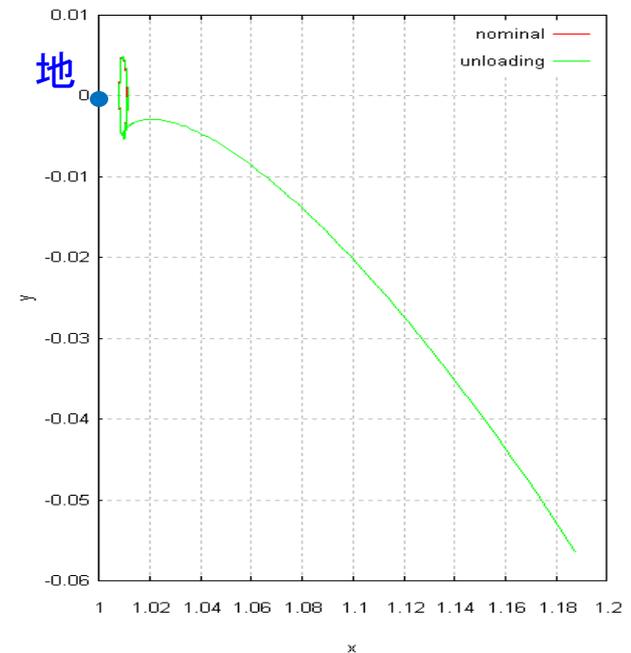
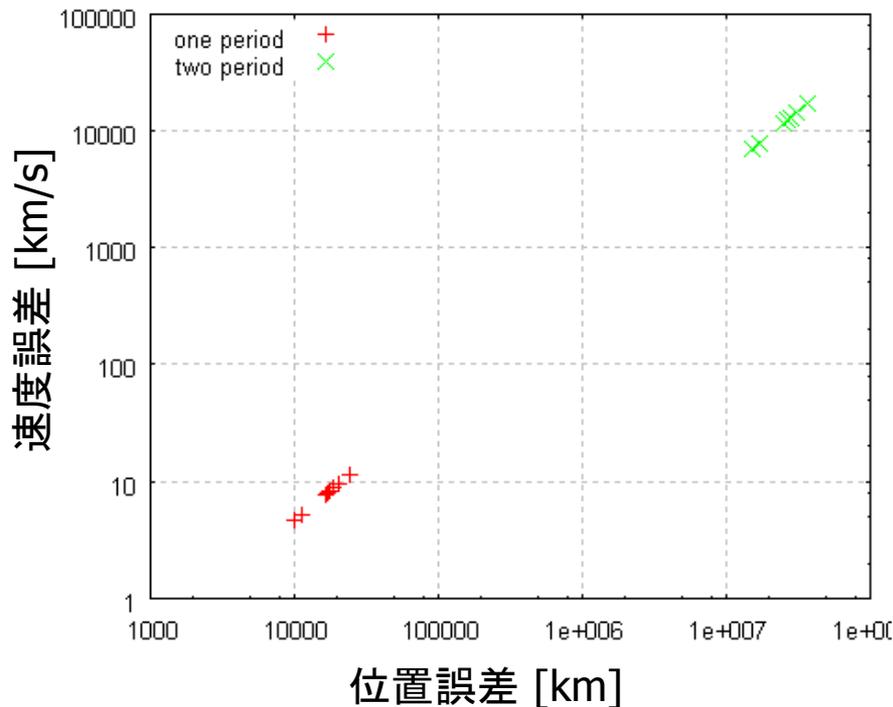
- 太陽-地球-宇宙機の円制限三体問題の簡易モデル



# 余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価(1/2)

## 終端誤差(Original approach)

- ・アンローディング運用をハロー軌道の1周期(約180日)、2周期(約360日)行なった後の基準ハロー軌道からの終端位置 & 速度誤差(モンテカルロ法)



(2周後の軌道図例)

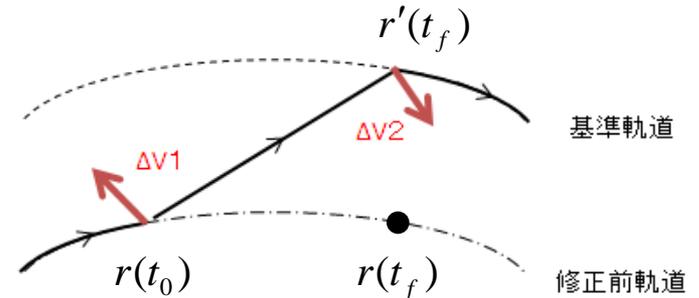
誤差が発散的に拡大

# 余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価(2/2)

## 軌道修正 $\Delta V$ (Original approach)

- 一般的な軌道修正法FTA(Fixed Time of Arrival)を用いて、1周後の終端誤差を基準ハロ一軌道に戻すのに必要な修正 $\Delta V$ 量

$$\left\{ \begin{array}{l} r(t_f) = \Phi_{rr}(t_f, t_0)r(t_0) + \Phi_{rv}(t_f, t_0)v(t_0) \\ r'(t_f) = \Phi_{rr}(t_f, t_0)r(t_0) + \Phi_{rv}(t_f, t_0)(v(t_0) + \Delta V_1) \end{array} \right.$$



制御間隔 ( $t_f - t_0$ )	$\Delta V_1$ [m/s]	$\Delta V_2$ [m/s]	Total $\Delta V$ [m/s]
約1ヶ月	19.3	6.3	25.6

(一般的なハロ一軌道保持に必要な $\Delta V$ は年間3 m/s 以下)

誤差の修正には大きな $\Delta V$ が必要

# 余剰並進 $\Delta V$ の影響のまとめ

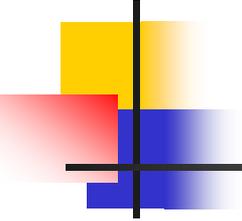
拘束しないケース (Original approach)

---

アンローディング時に発生する余剰並進 $\Delta V$ を特に拘束しない場合、生ずる軌道の擾乱は非常に大きくなることが分かった



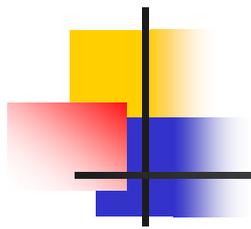
軌道擾乱を抑制するための何らかの対策が必要



---

## 2. 余剰並進 $\Delta V$ による擾乱を抑制する手法の提案

- Local suppression approach
- Global suppression approach



## Local suppression approach

# 軌道擾乱の要因

## 理論的解析

状態遷移行列 (STM) : ノミナル軌道からの誤差を線形マッピング

$$\delta\vec{q}(t_0 + t) = \Phi(t_0 + t, t_0)\delta\vec{q}(t_0)$$

例) ハロー軌道1周期後のSTMの固有値

$$\lambda_1 = \underline{1525.8}$$

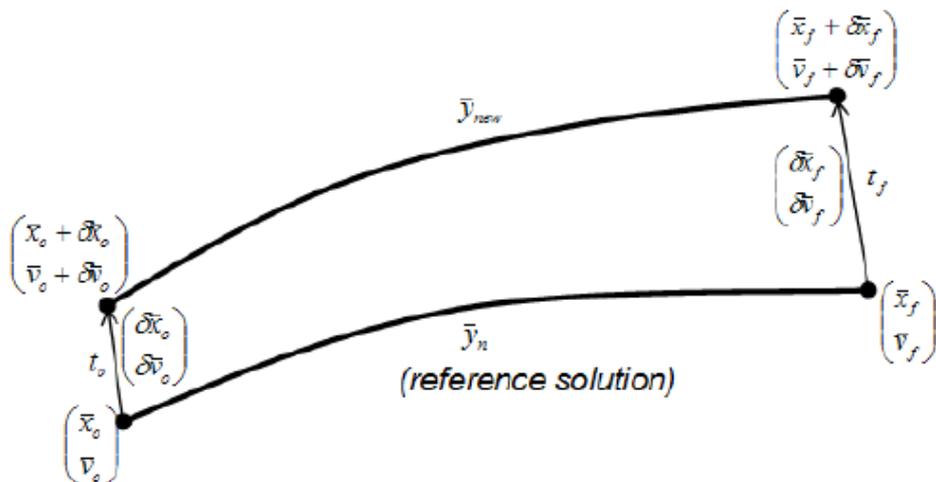
$$\lambda_2 = 0.0006555$$

$$\lambda_3 = 0.979 + 0.202i$$

$$\lambda_4 = 0.979 - 0.202i$$

$$\lambda_5 = 1.0001$$

$$\lambda_6 = 0.9999$$



誤差の発散的な拡大の要因

# 軌道擾乱を抑制する対策

## Local suppression approach

余剰並進 $\Delta V$ による初期誤差:

$$\Delta \vec{X}_{t=0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta \dot{x}_0 \\ \Delta \dot{y}_0 \\ \Delta \dot{z}_0 \end{pmatrix} = a\vec{x}_1 + b\vec{x}_2 + c\vec{x}_3 + d\vec{x}_4 + e\vec{x}_5 + f\vec{x}_6$$

$a=0$   
 $\downarrow$   
 $x_2 \sim x_6$ だけの線形結合

( $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3, \vec{x}_4, \vec{x}_5, \vec{x}_6$  は固有ベクトル)

ハロー軌道1周後の終端誤差:

$$\Delta \vec{X}_{t=T} = \Phi \Delta \vec{X}_{t=0} = \lambda_1 \cancel{a\vec{x}_1} + \lambda_2 b\vec{x}_2 + \lambda_3 c\vec{x}_3 + \lambda_4 d\vec{x}_4 + \lambda_5 e\vec{x}_5 + \lambda_6 f\vec{x}_6$$

発散成分( $\lambda_1 = 1525$ )

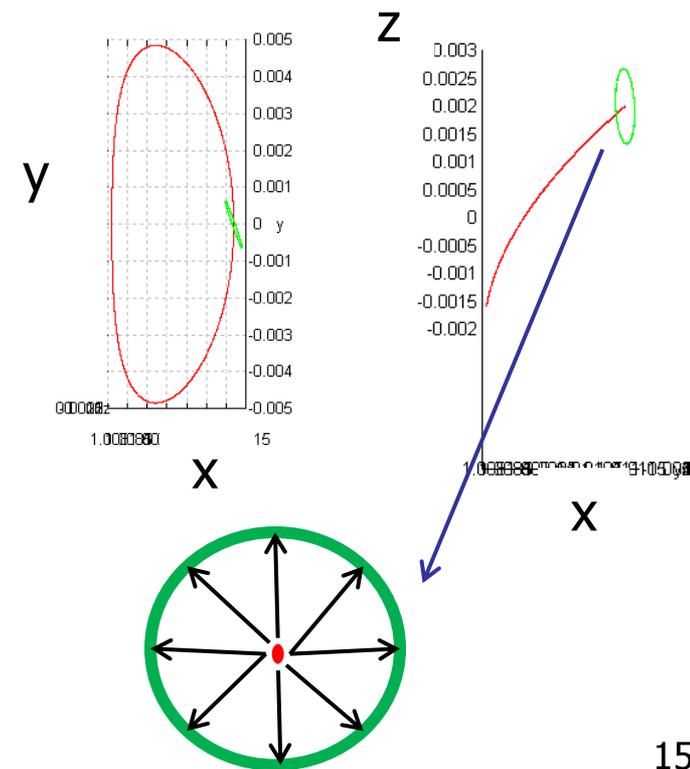
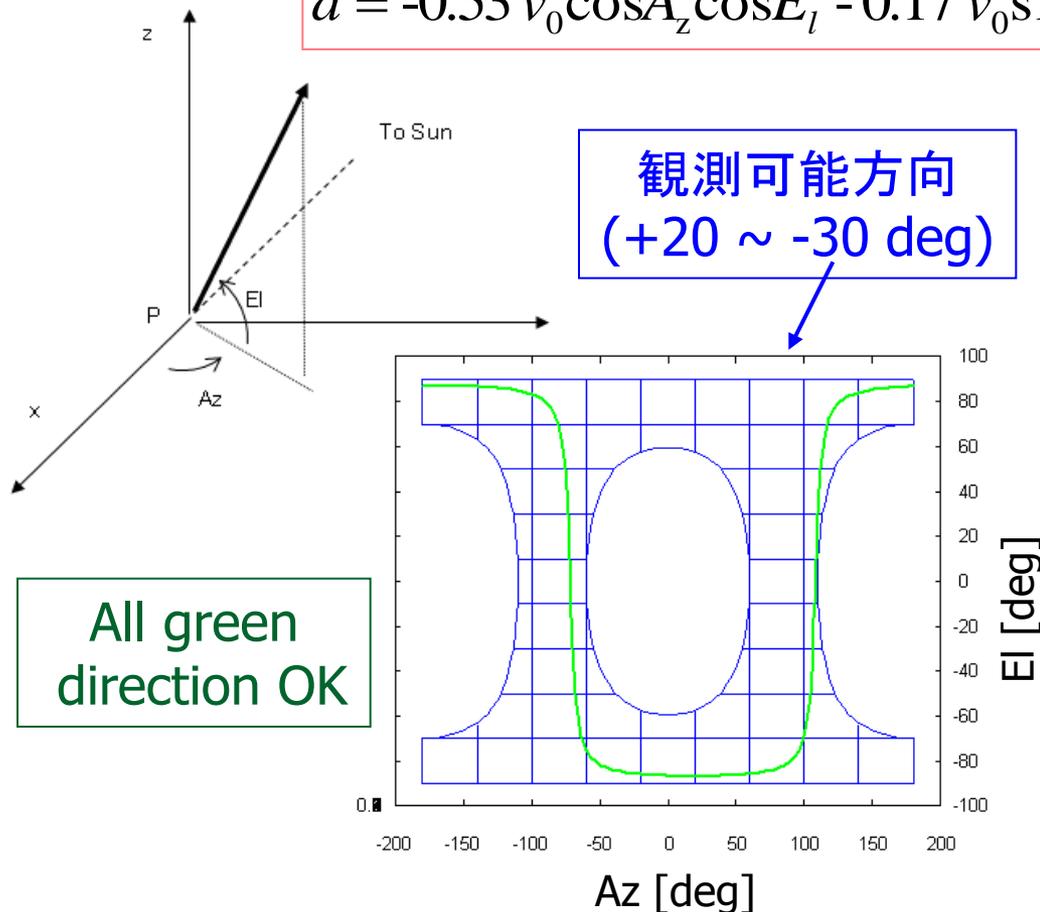
固有値 $\lambda_1$ に対応する固有ベクトル成分がゼロ( $a = 0$ )になるようにアンローディング時の姿勢(すなわち余剰並進 $\Delta V$ 方向)を選定

# 軌道擾乱を抑制する対策

## Local suppression approach

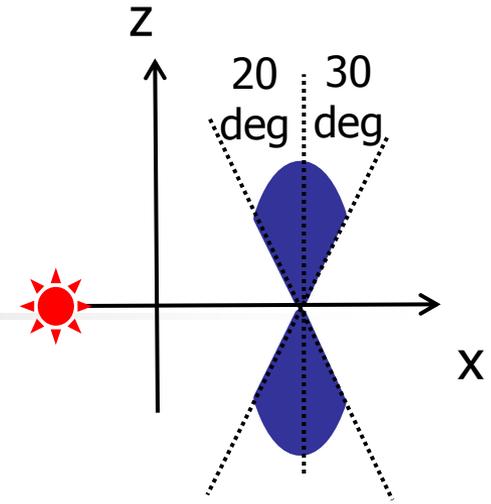
例)  $a = 0$  となる余剰並進 $\Delta V$  の方向

$$a = -0.53 v_0 \cos A_z \cos E_l - 0.17 v_0 \sin A_z \cos E_l - 0.03 v_0 \sin E_l$$



# Local approach の検証

## 検討仮定



### 1. SPICA ミッション要件

- 運用ハロー軌道の大きさ:  $Az = 35$  万 km (暫定)
- 許容観測方向: 太陽方向に直交する大円を基準に  $+20^\circ$  (太陽側)  $\sim -30^\circ$  (反太陽側) に範囲内 (一様方向に観測)

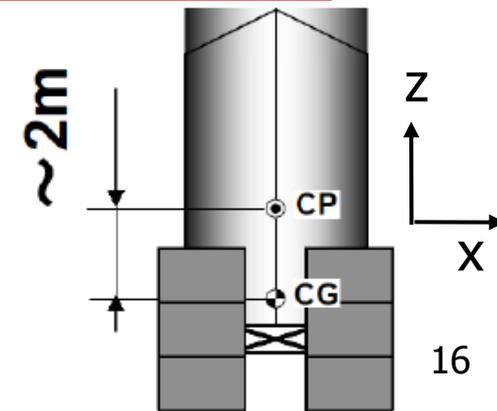
### 2. アンローディング運用要件

- 頻度: 毎日
- 発生する余剰並進  $\Delta V$ : 6 mm/s (衛星固定座標の  $-z$  軸方向)
- 姿勢: 制約範囲内で、 $a = 0$  となる方向に設定 (1週間毎に更新)

(Local approach)

### 3. モデル

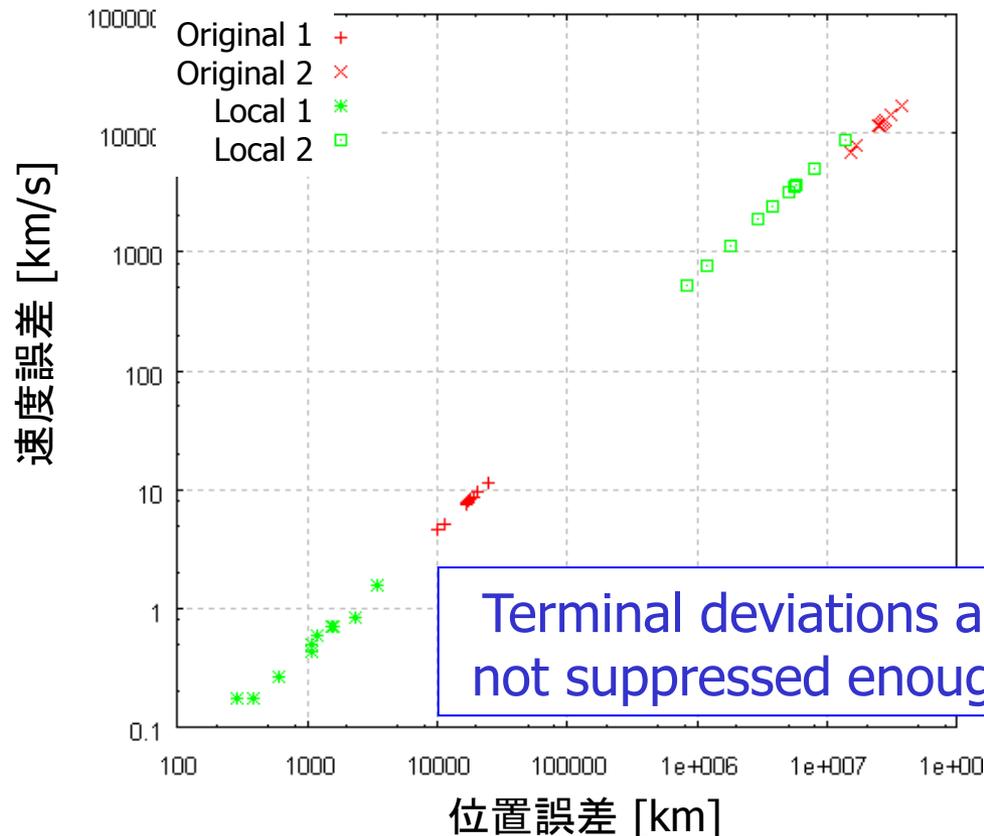
- 太陽-地球-宇宙機の円制限三体問題の簡易モデル



# 余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価(1/2)

## 終端誤差 (Local approach)

- ・アンローディング運用をハロー軌道の1周期(約180日)、2周期(約360日)行なった後の基準ハロー軌道からの終端位置 & 速度誤差(モンテカルロ法)



# 余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価(2/2)

## 軌道修正 $\Delta V$ (Local approach)

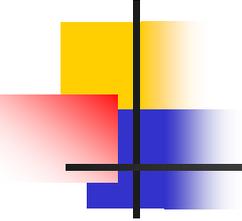
- ・1周後の終端誤差をFTAで基準ハロー軌道に戻すのに必要な修正 $\Delta V$ 量

FTAによる終端誤差の軌道修正 [m/s]

制御期間	Original	Local
One month	25.6	1.47

(一般的なハロー軌道保持に必要な $\Delta V$ は年間3 m/s以下)

$\Delta V$ はそれなりに小さいが、  
さらなる低減が可能か検証



---

## Global suppression approach

# 軌道擾乱を抑制する対策

## Global suppression approach

余剰並進 $\Delta V$ と蓄積誤差を  
考慮した初期誤差:

$$\Delta \vec{X}_{t=0} = \begin{pmatrix} 0 + \sum \Delta x_{err} \\ 0 + \sum \Delta y_{err} \\ 0 + \sum \Delta z_{err} \\ \Delta \dot{x}_0 + \sum \Delta \dot{x}_{err} \\ \Delta \dot{y}_0 + \sum \Delta \dot{y}_{err} \\ \Delta \dot{z}_0 + \sum \Delta \dot{z}_{err} \end{pmatrix} = a \vec{x}_1 + b \vec{x}_2 + c \vec{x}_3 + d \vec{x}_4 + e \vec{x}_5 + f \vec{x}_6$$

$a = \text{Min}$   $\vec{x}_1 \sim \vec{x}_6$  の線形結合  
 発散成分 ( $\lambda_1 = 1525$ )

ハロ一軌道1周後の終端誤差:

$$\Delta \vec{X}_{t=T} = \Phi \Delta \vec{X}_{t=0} = \lambda_1 a \vec{x}_1 + \lambda_2 b \vec{x}_2 + \lambda_3 c \vec{x}_3 + \lambda_4 d \vec{x}_4 + \lambda_5 e \vec{x}_5 + \lambda_6 f \vec{x}_6$$

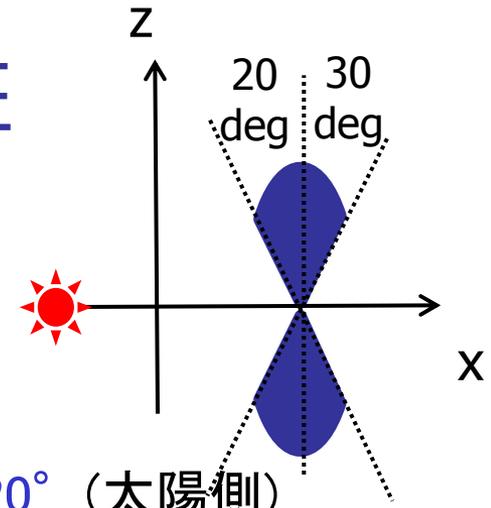
蓄積誤差が大きくなり  $a=0$  にはできなくなる

$$a = -1.51 \sum \Delta x_{err} + 0.50 \sum \Delta y_{err} - 0.16 \sum \Delta z_{err} - 0.53 (\Delta \vec{x}_0 + \sum \Delta \dot{x}_{err}) - 0.17 (\Delta \vec{y}_0 + \sum \Delta \dot{y}_{err}) - 0.03 (\Delta \vec{z}_0 + \sum \Delta \dot{z}_{err})$$

固有値 $\lambda_1$ に対応する固有ベクトル成分が最小( $a = \text{Min}$ )になるようにアンローディング時の姿勢(すなわち余剰並進 $\Delta V$ 方向)を選定

# Global approach の検証

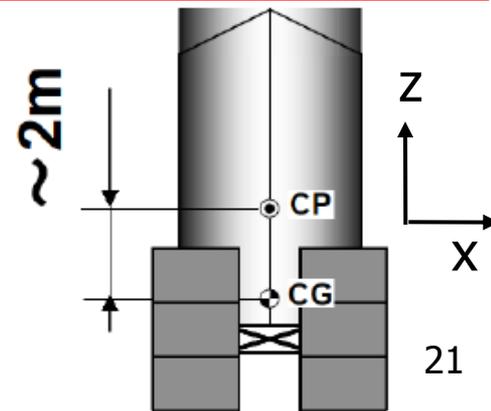
## 検討仮定



1. SPICA ミッション要件
  - 運用ハロー軌道の大きさ:  $Az = 35$  万 km (暫定)
  - 許容観測方向: 太陽方向に直交する大円を基準に  $+20^\circ$  (太陽側)  $\sim -30^\circ$  (反太陽側) に範囲内 (一様方向に観測)
2. アンローディング運用要件
  - 頻度: 毎日
  - 発生する余剰並進  $\Delta V$ : 6 mm/s (衛星固定座標の  $-z$  軸方向)
  - 姿勢: 制約範囲内で、それまでの運用で蓄積された誤差も考慮して  $a$  が最小となる方向に設定 (1週間毎に更新)

(Global approach)

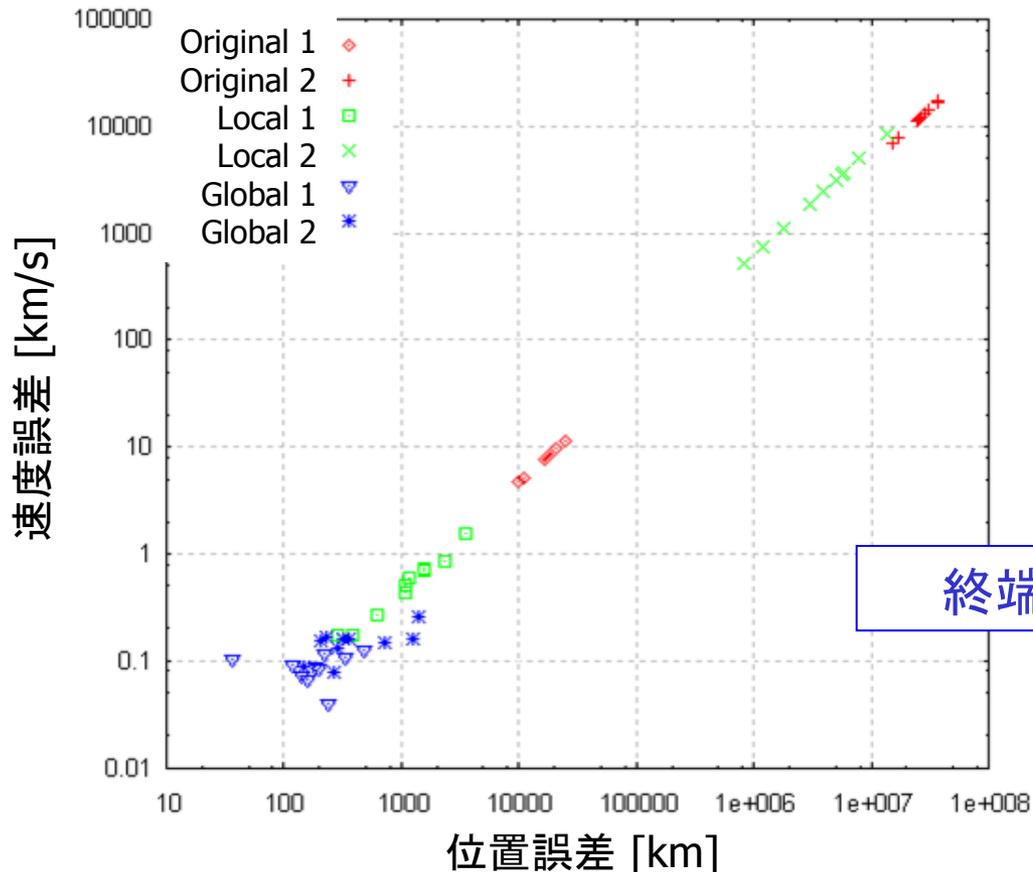
3. モデル
  - 太陽-地球-宇宙機の円制限三体問題の簡易モデル



# 余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価(1/2)

## 終端誤差 (Global approach)

- ・アンローディング運用をハロー軌道の1周期(約180日)、2周期(約360日)行なった後の基準ハロー軌道からの終端位置&速度誤差(モンテカルロ法)



終端誤差は抑制

# 余剰並進 $\Delta V$ の影響の評価(2/2)

## 軌道修正 $\Delta V$ (Global approach)

- ・1周後の終端誤差をFTAで基準ハロー軌道に戻すのに必要な修正 $\Delta V$ 量

FTAによる終端誤差の軌道修正

Maneuver interval	Original	Local	Global
One month	25.6	1.47	0.19

(一般的なハロー軌道保持に必要な $\Delta V$ は年間3 m/s以下)

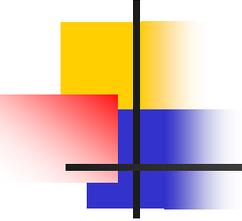
誤差の修正に必要な $\Delta V$ は少量

# 結論

SPICAの定常運用において、アンローディング時に発生する余剰並進 $\Delta V$ が軌道保持に与える影響を調査し、その影響を抑制する方策について検討した

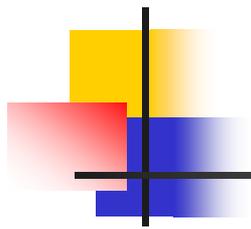
- ◆ 余剰並進 $\Delta V$ は軌道保持に対して大きな影響
- ◆ 誤差の発散を抑制することを考慮してアンローディング時の姿勢を選定すれば、軌道擾乱を許容可能な範囲内に抑制できることを確認

# 今後の課題



---

- ◆アンローディングにより発生する余剰並進 $\Delta V$ の大きさが変化する  
場合の検討(今回は6 mm/sに固定)
- ◆観測方向が一様でない場合の余剰並進 $\Delta V$ 方向の検討



完