

「つばめ」空カデータベースと大気密度評価 および将来計画

小澤宇志，今村俊介
宇宙航空研究開発機構

T. Ozawa and S. Imamura
JAXA

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ
TKP新橋カンファレンスセンター
2020年1月24日 11:05-11:20

- 超低高度 (300 km以下)宇宙環境のフロンティアを開拓する試みとして、**超低高度衛星技術試験機 (SLATS: Tsubame)**が開発され、超低高度による運用が実証された。
- 高精度に空気抗力を予測することが誘導制御に重要であり、また、軌道遷移フェーズにおいてもエアロブレーキを有効に使うことにより、推進剤を節約することができる。
- **従来のSentmanモデル等の大気抗力予測では、運用・姿勢角によるCDSの20倍の変化を評価できない。→姿勢角・高度依存の空力データベースの構築が大気密度・軌道決定精度に重要**

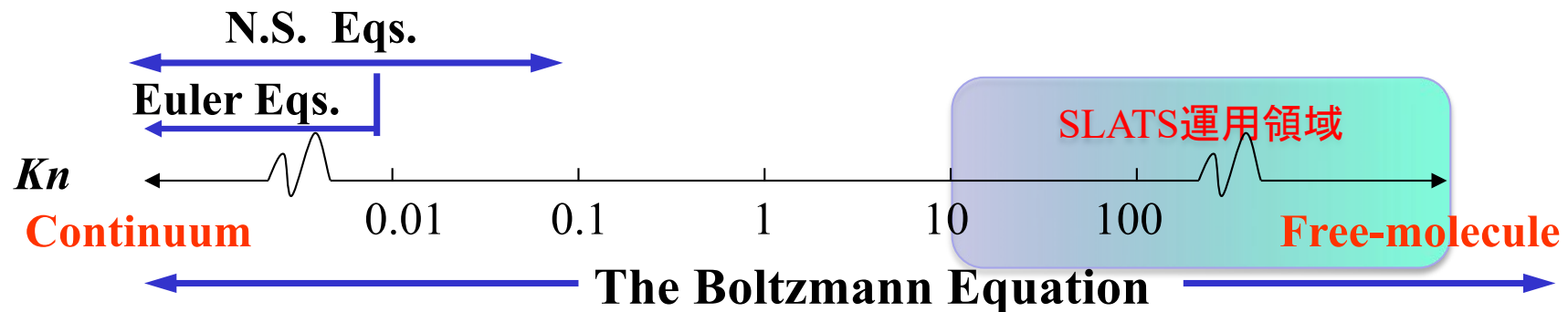
$$\rho_{TLM} = \frac{-4\pi\bar{a}\Delta t_d m}{3t_d^3 \bar{v}^2 CDS}$$

- クヌーセン数(Kn): 希薄度のパラメータ

$$Kn = \frac{\lambda(\text{mean free path})}{L(\text{characteristic length})}$$

- マッハ数(M): 速さのパラメータ

$$M = \frac{U(\text{velocity relative to the medium})}{a(\text{speed of sound})}$$



- 空力データベースの評価手法(CDS)について述べる。
- **自由分子流(Free molecular; FM)解析**を実施するとともに、**DSMC(direct simulation Monte Carlo)解析**によって比較検証を行う。SLATSの空力データベースは基本的に高度は50km刻み、迎角($\alpha=-180 - 180^\circ$), 横滑り角($\beta=-90 - 90^\circ$)は1度刻みで作成する。
- 化学種: 7種 (N, O, Ar, He, H, N₂, O₂)
- 表面モデル: Maxwell model (付着確率有)、 $\gamma=0.9$ (ノミナル)

1. 自由分子流解析

- JAXAで開発された自由分子流コード(FM_3D Ver.07)を使用
 - SLATSモデル: Standard Triangulated Language (STL) format.
 - **Ray-tracing (RT)スキーム: 暴露面の検出**
 - **各セグメントのRay数: 1~1000で変更可能。1の場合はセグメントの中心点、2以上の場合はセグメント表面上でランダムに選択**

2. DSMC (direct simulation Monte Carlo)解析

- **Modeling Of Transitional-Ionized Flows (MOTIF)コード**を使用
 - Rotational-Translational(R-T), Vibrational-Translational (V-T) エネルギー交換: Borgnakke-Larsen (BL) model
 - **FMと比べ分子間衝突も評価するより高精度な空力解析ツール**
 - **ただし、計算コストが高いため、FMの精度検証として使用**

- In the segment-fixed frame (k), the Boltzmann distribution function can be expressed as

$$f_i^F = \left(\frac{m_i}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left\{ -\frac{m_i}{2kT} \sum_j (v_j + V_j)^2 \right\}$$

$$V_{k,1} = \mathbf{V}_\infty \cdot \mathbf{i}_{k,j=1}, V_{k,2} = \mathbf{V}_\infty \cdot \mathbf{i}_{k,j=2}, V_{k,3} = \mathbf{V}_\infty \cdot \mathbf{i}_{k,j=3}$$

- The Boltzmann velocity distribution for particles diffusely reflected from the surface is given by

$$f_i^D = \left(\frac{m_i}{2\pi kT_w} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m_i v^2}{2kT_w} \right)$$

- The particle fluence rate on the surface element, k , is written as^[1]

$$\Gamma_i = \int_{-\infty}^{\infty} dv_2 \int_{-\infty}^{\infty} dv_3 \int_{-\infty}^0 (-n_i v_1) f_i^F dv_1$$

$$\Gamma_i = \frac{n_i v_i^T}{4} \left\{ \exp(-c_{1,i}^2) + \sqrt{\pi} c_{1,i} [1 + \operatorname{erf}(c_{1,i})] \right\}$$

$$c_{1,i} = -V_1 \sqrt{m_i / 2kT}$$

$$v_i^T = \sqrt{8kT / \pi m_i}$$

V_∞ =freestream velocity in body-fixed frame

v =particle velocity

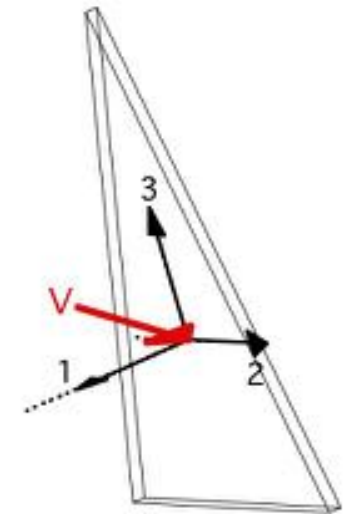
i =chemical species

j =index in segment coordinates

(1=normal direction, 2,3=transverse)

k =index of segment

n_i =number density of i



- The particle fluence rate diffusely reflected by a surface element, is [1]

$$\Gamma_i^D = \int_{-\infty}^{\infty} dv_2 \int_{-\infty}^{\infty} dv_3 \int_0^{\infty} (n_i^D v_1) f_i^D dv_1$$

n_i^D =number density of diffusely reflected particles

$$\Gamma_i^D = \frac{n_i^D v_i^{Tw}}{4} \quad v_i^{Tw} = \sqrt{8kT_w / \pi m_i}$$

$$n_i^D = 4\gamma\Gamma_i / v_i^{Tw} \quad (\Gamma_i^D = \gamma\Gamma_i)$$

γ =surface accommodation parameter

- The normal force F_1 ($j=1$) on chemical species i can be expressed as

$$F_{1,i} = m_i \left[\int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_1 (2 - \gamma) (-n_i v_1) f_i^F dv_1 dv_2 dv_3 \right. \\ \left. - \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_1 (n_i^D v_1) f_i^D dv_1 dv_2 dv_3 \right]$$

$$F_{1,i} = -\frac{m_i n_i kT}{2\sqrt{\pi}} (2 - \gamma) \left\{ 2c_{1,i} \exp(-c_{1,i}^2) + \sqrt{\pi} (1 + 2c_{1,i}) [1 + \text{erf}(c_{1,i})] \right\} - \frac{1}{2} n_i^D kT_w$$

$$F_{j,i} = m_i \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_j \gamma (-n_i v_1) f_i^F dv_1 dv_2 dv_3 \quad (j=2,3)$$

$$F_{j,i} = m_i \gamma \Gamma_i V_j$$

$$F_D = \sum_k \left[\sum_j \left(\sum_i F_{j,i} \right) \mathbf{i}_j \cdot \mathbf{i}_D \right] a_k$$

i =index of chemical species

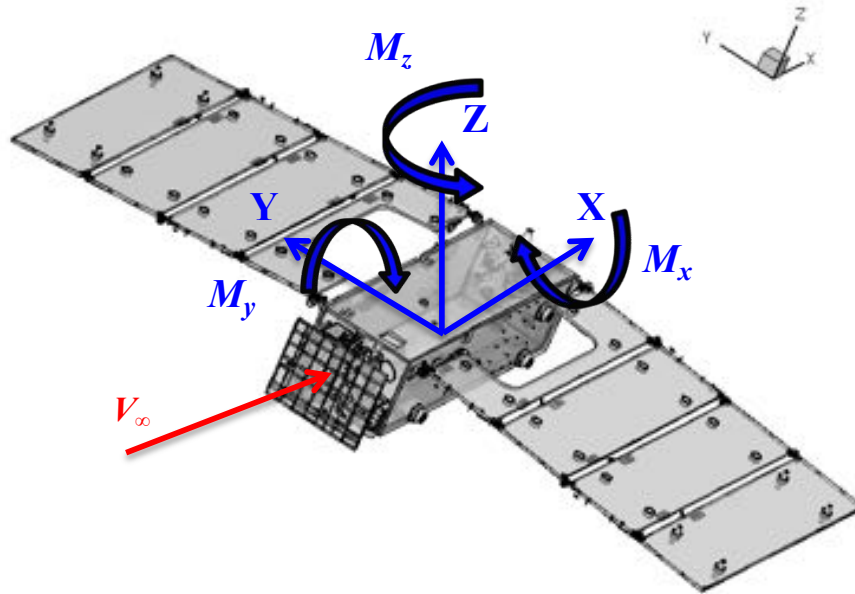
j =index of segment coordinates

k =index of each segment

\mathbf{i}_D =unit vector in drag force direction

SLATS解析モデル, 1/2

Body-fixed coordinates in FM and DSMC



$$\begin{aligned}
 V_x &= V_\infty \cos\beta \cos\alpha \\
 V_y &= V_\infty \sin\beta \\
 V_z &= V_\infty \cos\beta \sin\alpha
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 \alpha &= \text{angle of attack} \\
 \beta &= \text{sideslip angle}
 \end{aligned}$$

Table 1: SLATS Test configuration

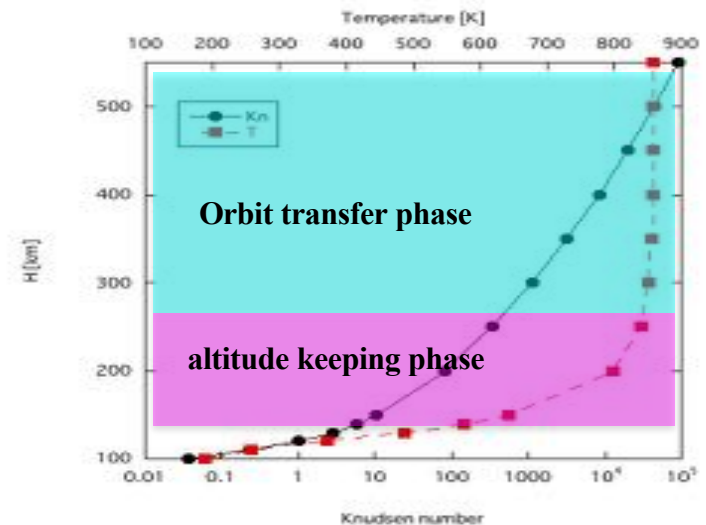
List	Symbol	Unit	Size
Height	H	m	0.54
Width	W	m	0.66
Depth	D	m	2.038
Width for solar panels	W_p	m	5.17
Thickness of solar panels	T_p	m	0.02

- The origin of body fixed frame is the center of body in the x, y direction and the bottom surface in the z direction.
- 重心位置 (CoG)
 $(x, y, z) = (-62.1, -10.5, 260.2) \text{ mm}$
- モーメントは重心周り
- 表面温度: $T_w = 300 \text{ K}$
- 参照面積: $S_{ref} = 10.093 \text{ m}^2$
- 参照長: $R_{ref} = 0.54 \text{ m}$

$$C_D = F_D / (1/2 \rho_\infty U_\infty^2 S_{ref})$$

$$C_{DS} = C_D S_{ref}$$

$$C_{M,i} = F_{M,i} / (\rho_\infty U_\infty^2 S_{ref} R_{ref})$$

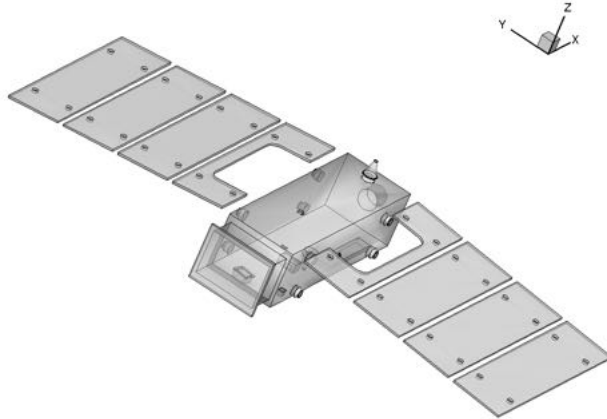


Knudsen number as a function of altitude

SLATS解析モデル, 2/2

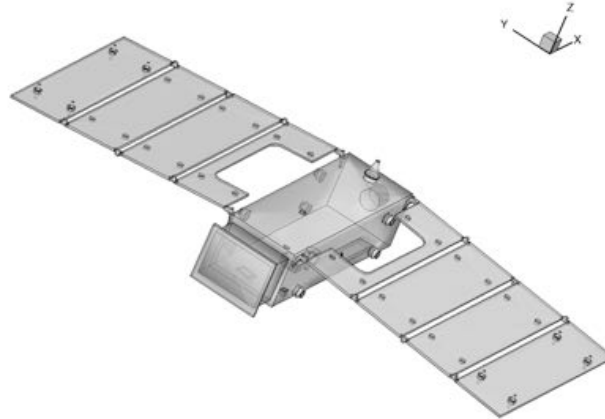
SLATS Geometry(A):

Simplified model, $N_{\text{face}}=9584$



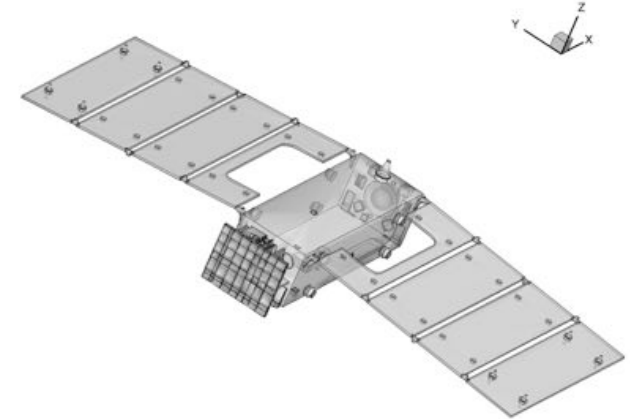
SLATS Geometry (B):

Simplified model, $N_{\text{face}}=15278$



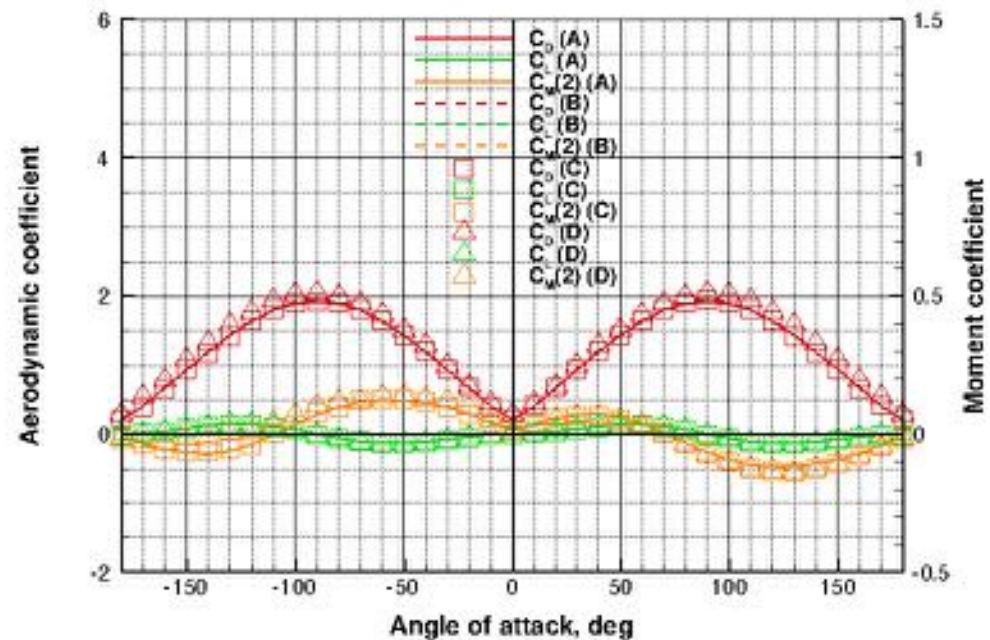
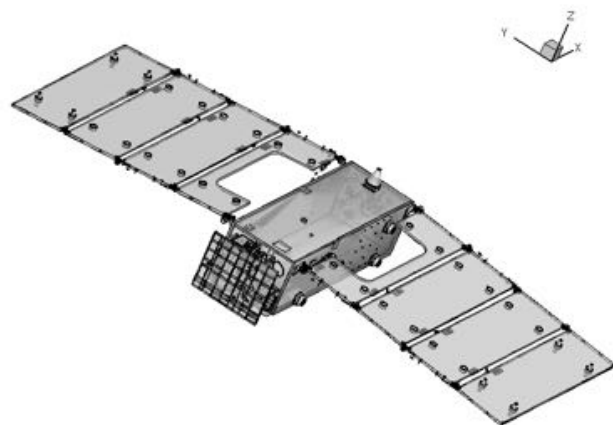
SLATS Geometry(C):

Surface near-full model, $N_{\text{face}}=31425$



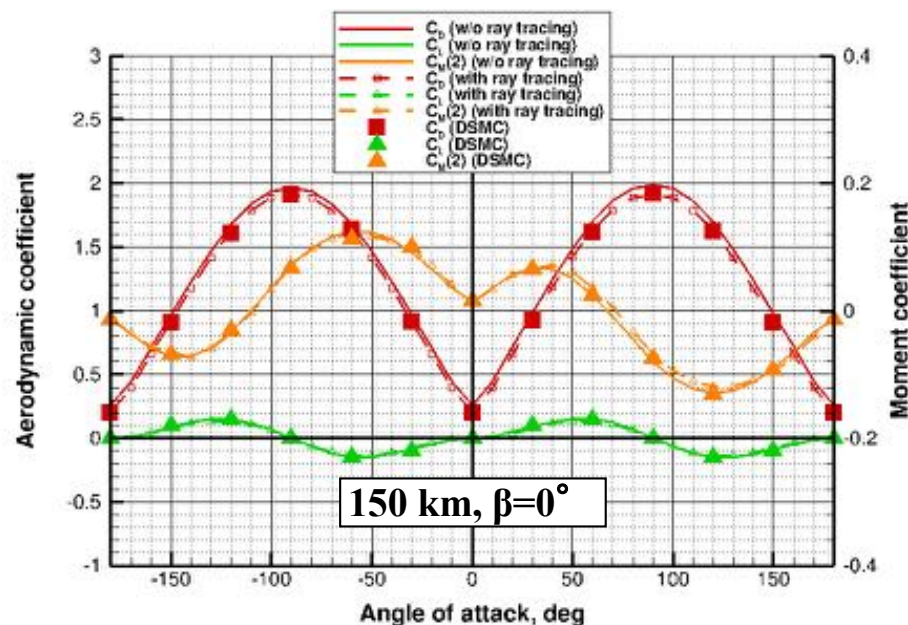
SLATS Geometry (D):

Full model, $N_{\text{face}}=1511087$

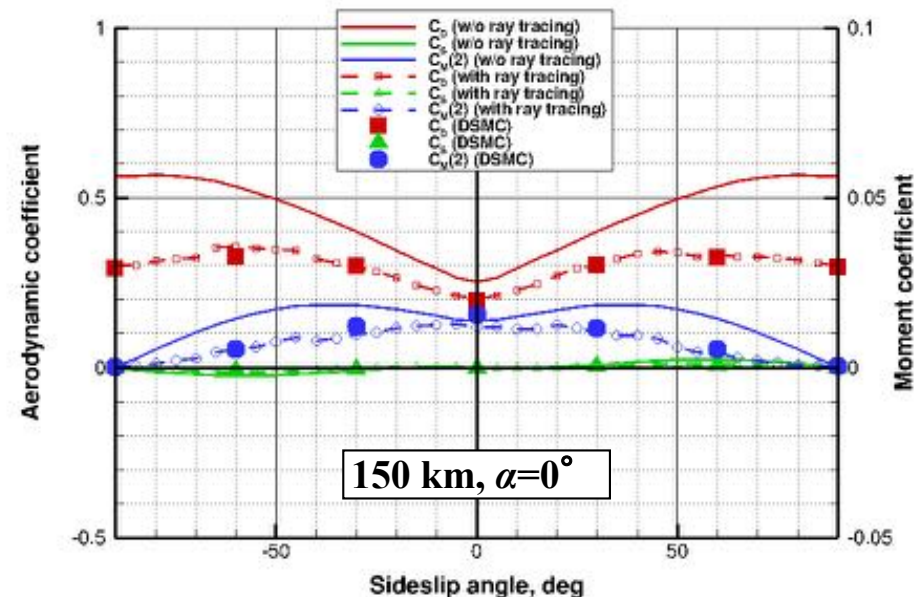


Geometry model dependence can be negligible compared to numerical model dependence.

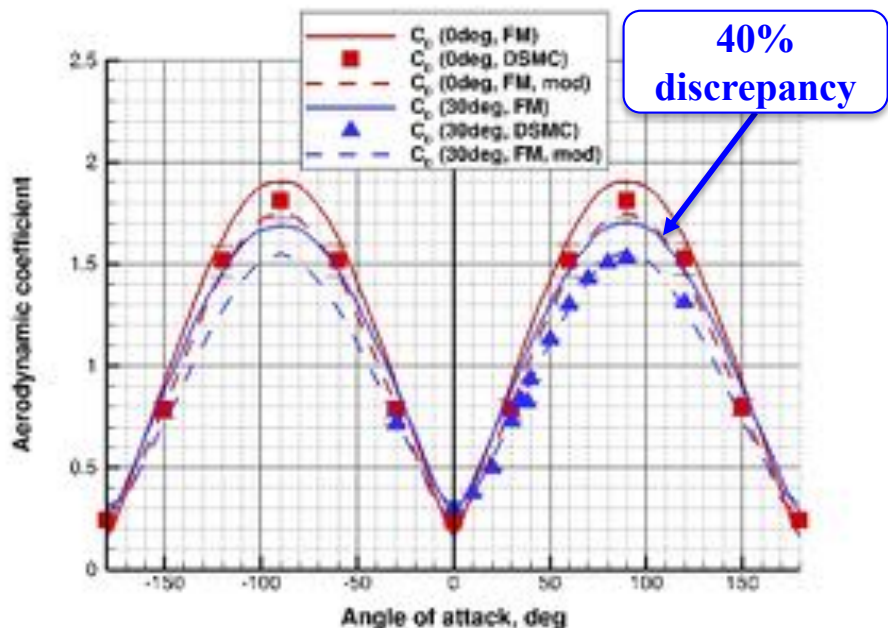
- SLATSの空力データベースの高精度化を図ることにより、SLATS大気密度算出の高精度化、姿勢モードの影響評価を行った。
 - 自由分子流解析において、分子線トレーシングスキームを使用することにより、従来法より抗力予測精度が向上した。姿勢角によって、CDSは10倍変化する。
 - 姿勢角・高度依存性のデータベースを構築することによって高精度化 (姿勢角は1度刻み、高度は基本50 km刻み)
 - 高度150kmより高高度では自由分子流解析結果はDSMC解析結果と良い一致が得られたため、自由分子流解析結果をもとにデータベースを構築した。



Comparison of C_D, C_L , and C_M ($\beta=0$) between DSMC and FM

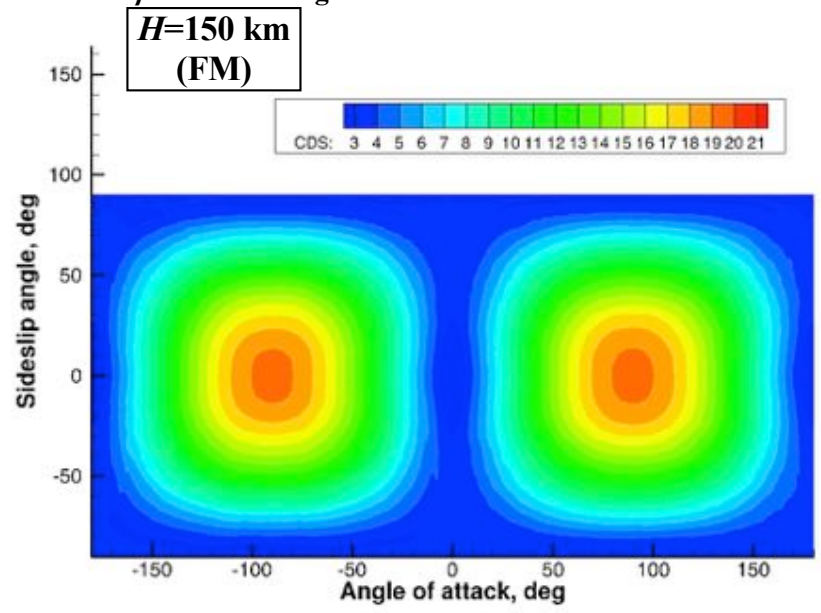


Comparison of C_D, C_L , and C_M ($\alpha=0$) between DSMC and FM

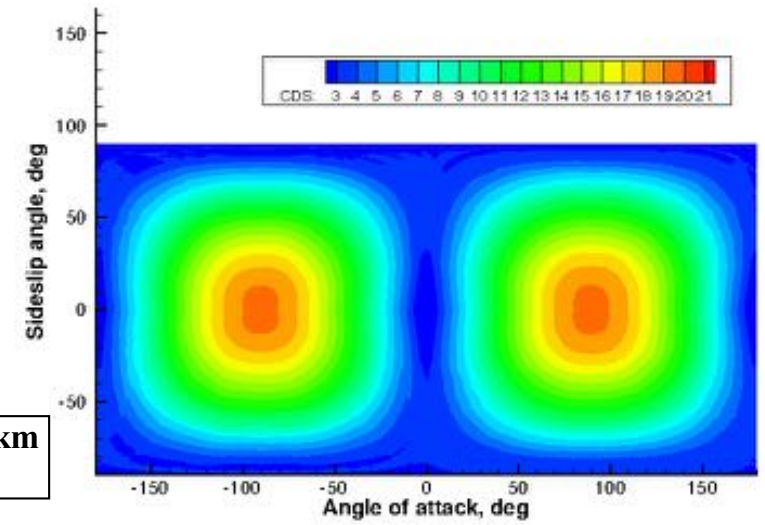


- 高度120km以下では希薄効果により、FMとDSMCの結果に差が生じる
- 高度150km以下では自由分子流解析結果に希薄効果補正パラメータを適用し、希薄効果を考慮した。

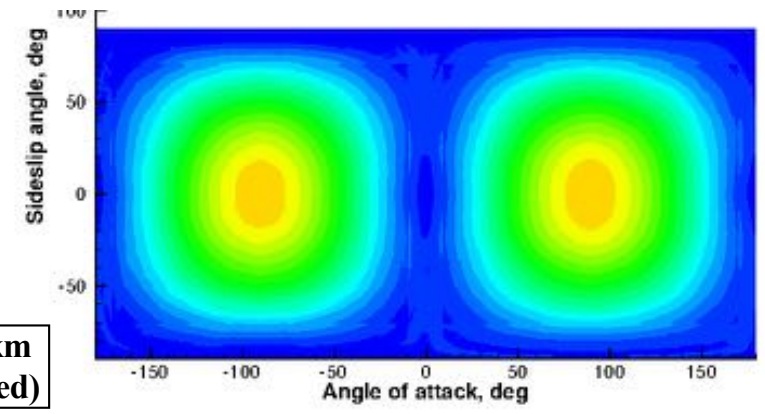
Comparison of C_D between FM(nominal and modified) and DSMC with $\beta=0$ and 30 deg. at 100 km.



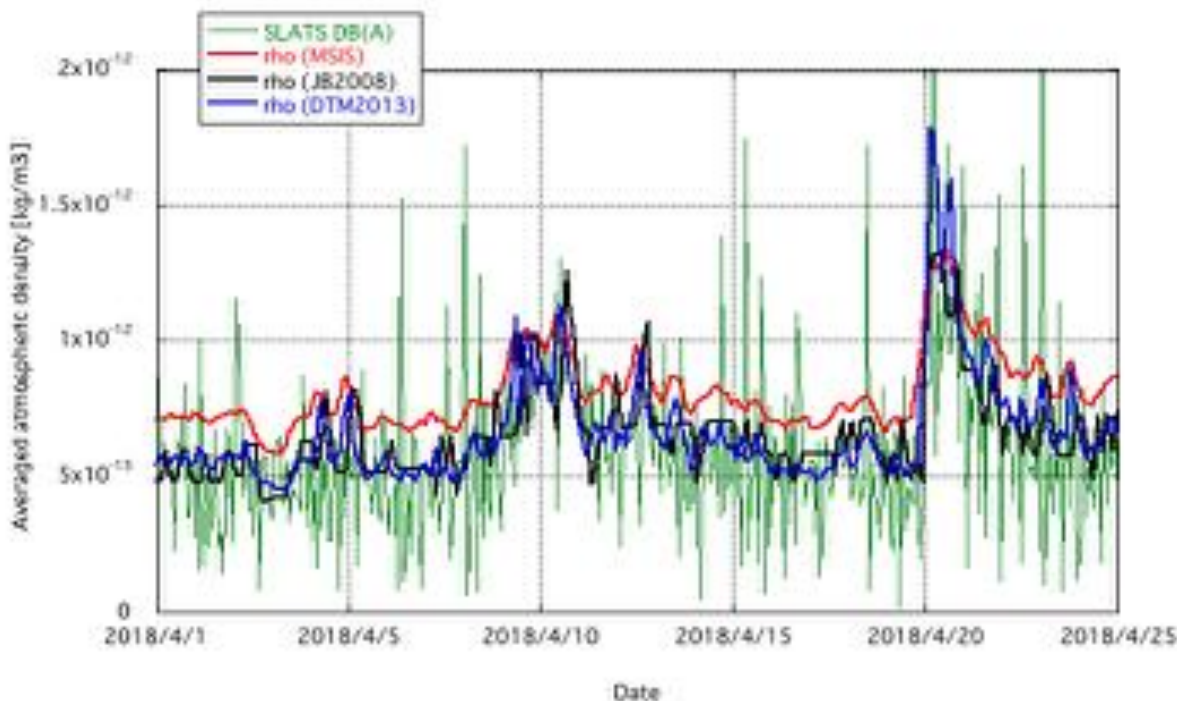
H=100 km (FM)



H=100 km (Corrected)



- まず、SPMの姿勢モードが主であった高度400kmにおける結果を下記図に示す。
- この高度におけるNRLMSISE-00の大気密度は、より新しい大気モデルであるJB2008 やDTM2013と比べて約20%高い。
- SLATSで算出された大気密度は平均的にNRLMSISE-00よりJB2008 やDTM2013とより良い一致を示している。
- 本傾向はGOCEのデータ解析と一致している。(Doornbos *et al.* used **a factor of 1.25** for the comparison between GOCE density data and several atmospheric model) (HASDM, JB2008, NRLMSISE-00, and previous DTM models).



- JB2008やDTM2013モデルは近年のCHAMP, GRACE, GOCE等の超低高度のデータを使用しており、超低高度の密度予測精度が高いと考えられる。
- SLATSでも同様の傾向であり、JB2008やDTM2013とより良い一致が得られた。

The comparison of atmospheric density at approximately 400 km in April 2018 between the SLATS data and several atmospheric models (SLA-170038参照)

Doornbos, et al.: Air density and wind retrieval using GOCE data, ESA SP-722, 2013.

- SLATSで推定された大気密度は、NRLMSISE-00より低く、JB2008 やDTM2013とはより良い一致を示しているが、高度が低くなると差が生じている。原因として、主に下記3点が挙げられる。

1. 超低高度領域における大気モデルの大気密度誤差
2. CDS誤差1(表面反射モデルによる数値解析誤差)
3. CDS誤差2(大気温度によるボルツマン分布仮定による摩擦抗力の過剰な推定)

$$\rho_{TLM} = \frac{-4\pi\bar{a}\Delta t_d m}{3t_d^3 \bar{v}^2 CDS}$$

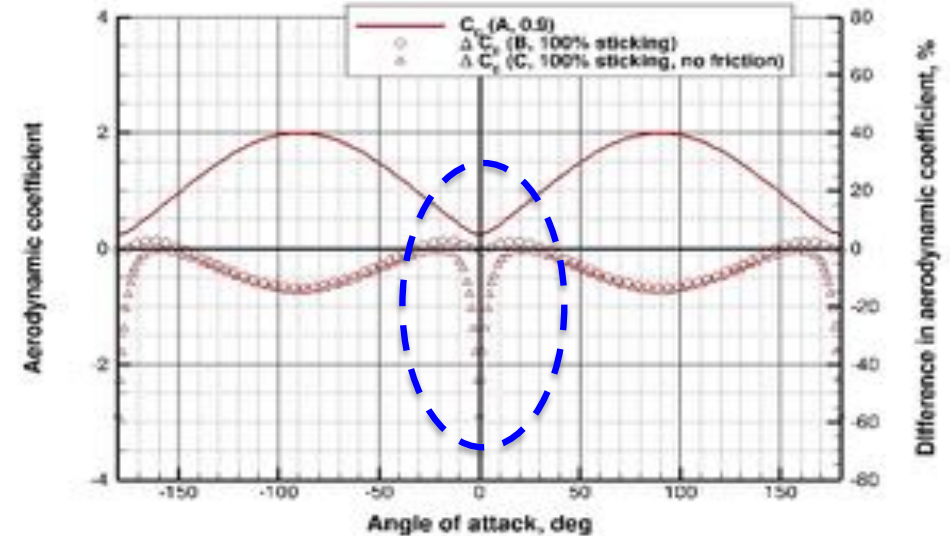
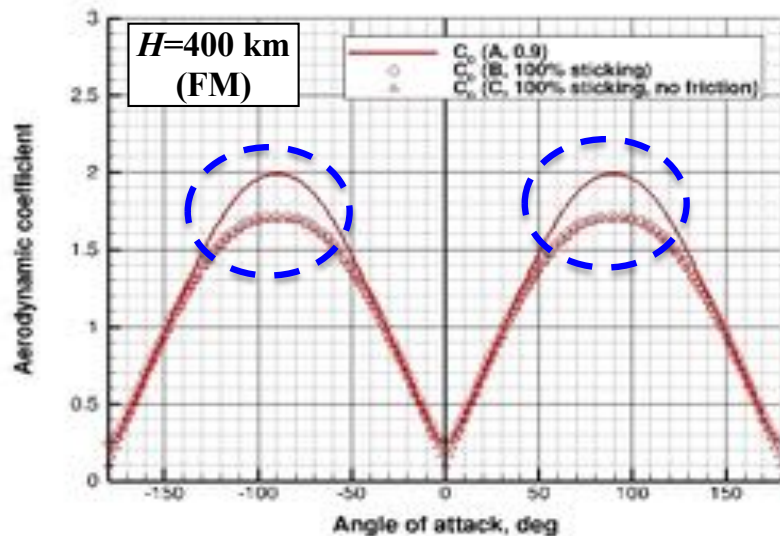
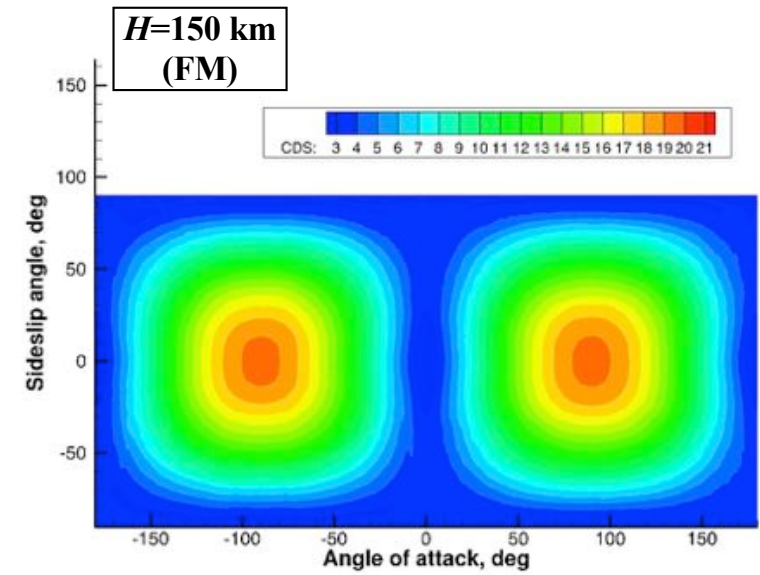
- NRLMSISE-00が正しいと仮定した場合、上記の2、3のCDS誤差により、SLATS大気密度評価が可能か、下記3種類のCDSデータベースを比較し、検証する。

(A) Nominal CDS database ($\gamma=0.9$, 0% 付着確率)

(B) 100% 付着確率 : CDS誤差1を考慮したケース

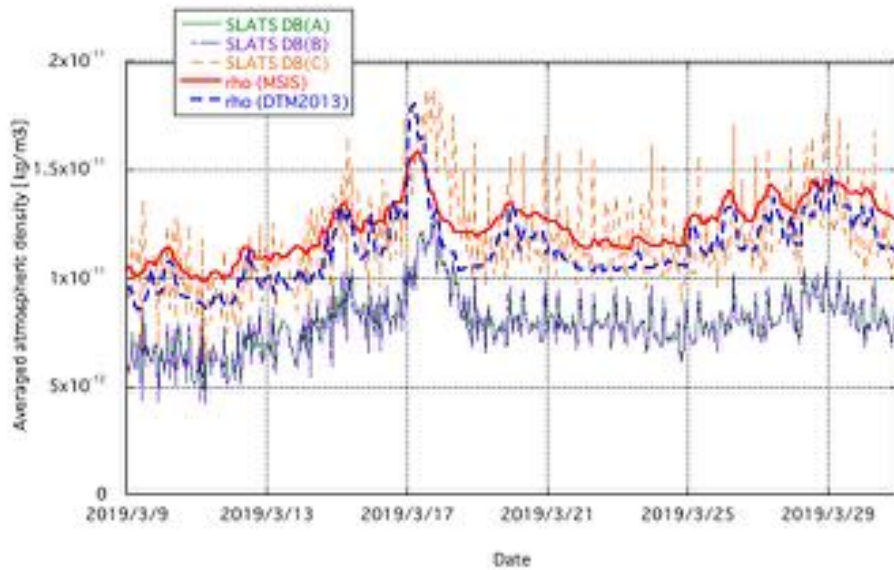
(C) 100% 付着確率および摩擦抗力を除外(極端な仮定) : CDS誤差2を考慮したケース

- 3種類の空力データベース (DBs)を構築し、比較検証した。
 - (A) Nominal CDS database ($\gamma=0.9$, 0% 付着確率)
 - (B) 100% 付着確率
 - (C) 100% 付着確率および摩擦抗力を除外(極端な仮定)
- ケース (A) と (B)の C_D の比較
 - 有効断面積が低い条件： C_D はほぼ一致する。
 - 有効断面積が高い条件： $C_D (B) < C_D (A)$ (at $|\alpha|=90$ deg., 15 % discrepancy)
- ケース (B) と (C)の C_D の比較
 - 有効断面積が低い条件： $C_D (C) < C_D (A)$ (reduced by at most 50%)
 - (圧力抗力に対する摩擦抗力の比が高いため)
 - 有効断面積が高い条件： $C_D (C) \sim C_D (B)$



Comparison of C_D for the $\beta=0$ deg. at 400 km among 3 cases.

Drag coefficient difference among three cases for the $\beta=0$ deg. at 400 km



The comparison of atmospheric density in March 2019 between the SLATS data and the atmospheric models

- 軌道保持フェーズに近い高度285~270 km(2019年3月)の比較を示す。2019年3月では抗力低減モードのNM-Yが使用された。
- SLATS(ケースA)はNRLMSISE-00と比べて双方とも25~35%低い大気密度を予測している。400 kmのケースと比べて、その差はより高くなっており、抗力の寄与が大気密度の推定により高くなっていることが一因と考えられる。
- 速度比が約10で有効断面積がそれほど高くはない($|\beta| > 60 \text{ deg}$)の条件では、ケース(A)と(B)による大気密度の差は小さい。一方、ケース(C)は、抗力低減モード(NM-Y)の場合は、約30%程度差が生じる。本モードでは全抗力に対する摩擦抗力の割合が高いためである。

Estimated density ratio in March 2019

Attitude mode	Number of orbital laps	Ratio of SLATS density to NRLMSISE-00		
		DB(A)	DB(B)	DB(C)
Total	478	0.65	0.65	0.98
NM-Y	478	0.65	0.65	0.98

NRLMSISE-00が正だと仮定すると摩擦抗力が0である必要がある。摩擦抗力の前提条件である超低高度領域におけるボルツマン分布の検証は必要であるが、非現実的と思われる。
 → NRLMSISE-00は超低高度領域において大気密度が高いのではないか？

- 本項ではSLATSの空力データベースの高精度化を図ることにより、SLATS大気密度算出の高精度化、姿勢モードの影響評価を行った。
 - 自由分子流解析において、分子線トレーシングスキームを使用することにより、抗力予測精度が向上した。
 - 高度150kmより高高度では自由分子流解析結果はDSMC解析結果と良い一致が得られたため、自由分子流解析結果をもとにデータベースを構築した。
 - 高度150km以下では自由分子流解析結果に希薄効果補正パラメータを適用し、希薄効果を考慮した。
- 3種類の空力データベースを使用し、SLATSの大気密度を推定した。
 - SLATSで推定された大気密度はNRLMSISE-00と比べて概ね65~80%であり、NRLMSISE-00は超低高度領域において高い大気密度を予測することが判明した。
 - SLATSでは、NRLMSISE-00よりもより新しい大気モデル(JB2008、DTM2013)とより良い一致が得られた。
 - 高度約400 kmではDTM2013と良い一致が得られたが、高度保持フェーズではDTM2013よりも低い密度を予測している。
 - 抗力低減モード (NM-Y)でも、SLATS とNRLMSISE-00の密度に差がみられ、摩擦抗力の影響が示唆された。

- 今後の課題

1. 超低高度領域におけるNRLMSISE-00の大気密度誤差
2. 大気温度によるボルツマン分布を仮定することによる摩擦抗力の過剰な推定
3. 表面反射モデルによる数値解析誤差

- 上記の原因を評価するためには、超低高度領域におけるさらなるデータでの検証が必要不可欠であり、SLATS・GOCE・デブリチームと協力して検証を進める。
- 超低高度領域における大気密度直接計測手法の確立が必須である。
- 希薄効果の検証のため、再突入フェーズにおける大気密度検証を行う。
- 高度保持フェーズの寿命延長に向けて、抗力低減モードにおける摩擦抗力(総抗力)低減に向けたSAP形状の最適化を検討する。