

超小型深宇宙探査機PROCYONの軌道上姿勢外乱解析

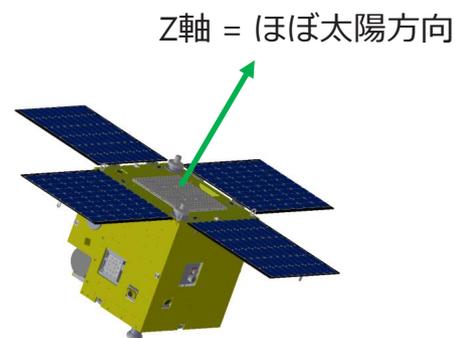
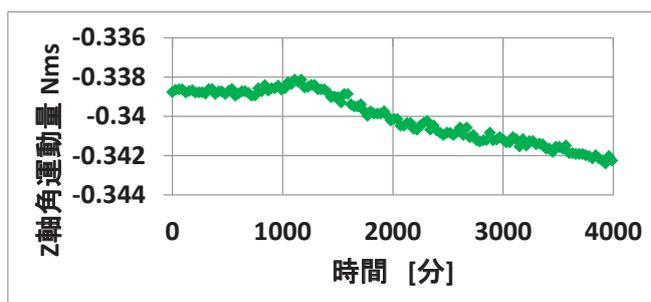
○五十里哲(いかりさとし), 阪上遼, 松下周平, 船瀬龍(東大)
伊藤琢博(JAXA), 稲守孝哉(名古屋大)

2017年11月06日 第14回宇宙環境シンポジウム @ 神戸

1

目的

- ▶ 超小型深宇宙探査機PROCYONで予期しない外乱トルクが観測された
- ▶ このトルクの原因について、**宇宙環境**の観点からアドバイスをいただきたい



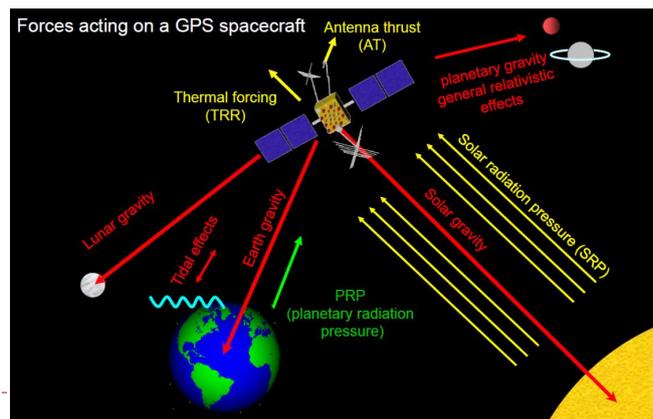
▶ 2

軌道上外乱とは？

3

宇宙機に加わる軌道上外乱

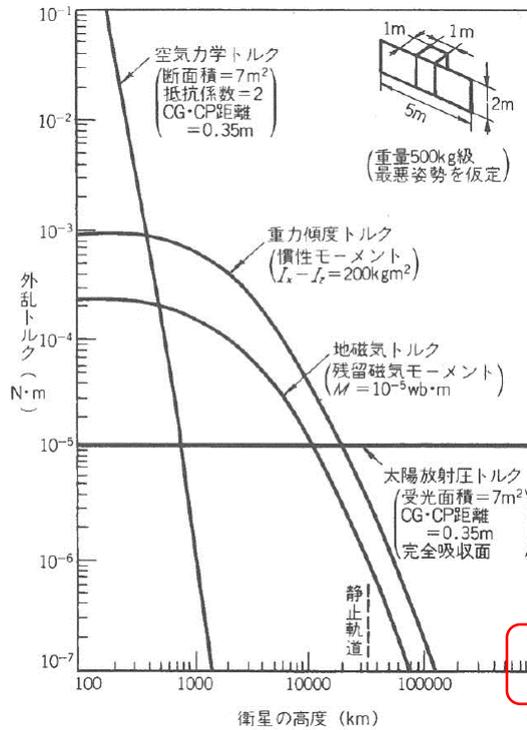
- ▶ 軌道上外乱 = 「**宇宙環境**と宇宙機の相互作用」
- ▶ 宇宙環境
 - ▶ 重力場, 太陽光, 磁場, ダスト, 宇宙線, etc...
- ▶ 宇宙機
 - ▶ 質量, 形状, 表面熱光学特性, 温度, 残留磁気, etc...
 - ▶ アウトガス, 帯・放電, etc...
- ▶ 代表的なもの
 - ▶ 重力(地球重力場, 他の星), 磁気外乱, 空力外乱, 太陽輻射圧外乱
- ▶ マイナーなもの
 - ▶ 熱輻射圧, プロトン衝突, アンテナからの電波放射
- ▶ 人工的なもの
 - ▶ ガスリーク, アウトガス



M.Ziebart, Current Status of Non-conservative Force Modeling, 2012, IGS Workshop

▶ 4

外乱大きさ



本発表で取り扱うのは、
 ・ 深宇宙軌道
 ・ 超小型衛星
 ⇒ 太陽輻射圧のみで、その大きさは 10^{-7} Nm

▶ 5

培風館, 人工衛星の力学と姿勢ハンドブック, 第5章 人工衛星の環境モデル

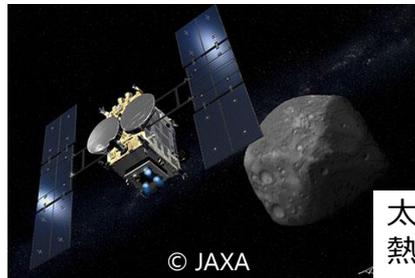
研究意義

- ▶ 軌道外乱の精密計算は、高精度軌道決定・予測
姿勢解析のために重要な技術となる



© JAXA

太陽輻射
熱輻射
アルベド輻射



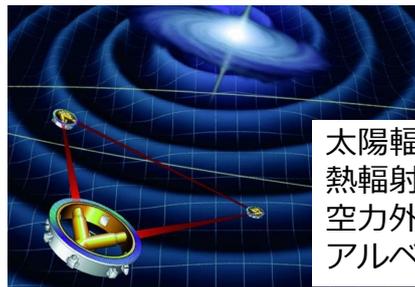
© JAXA

太陽輻射
熱輻射



© ESA

空力外乱



太陽輻射
熱輻射
空力外乱
アルベド輻射

▶ 6

研究意義

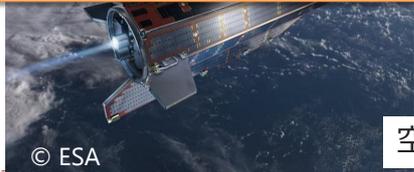
- ▶ 軌道外乱の精密計算は、高精度軌道決定・予測
姿勢解析のために重要な技術となる



太陽輻射

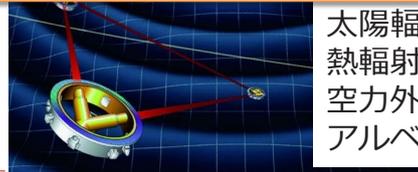


- フライトデータから得られた知見をフィードバックすることが重要
 - 特に、超小型衛星級の小さな力・トルクを解析することで、新たな知見を得ることができるかもしれない
- ⇒世界初の超小型深宇宙探査機PROCYONのデータ解析が重要



© ESA

空力外乱



太陽輻射
熱輻射
空力外乱
アルベド輻射

▶ 7

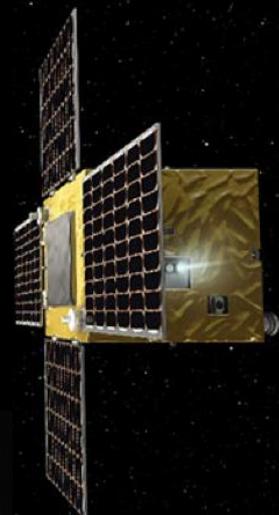
PROCYONで観測された謎の外乱トルク

研究背景：PROCYONとは

- Proximate Object Close flyby with Optical Navigation

2014/12/3 はやぶさ2相乗り副ペイロードとして、深宇宙軌道へ打ち上げ
ミッション目的

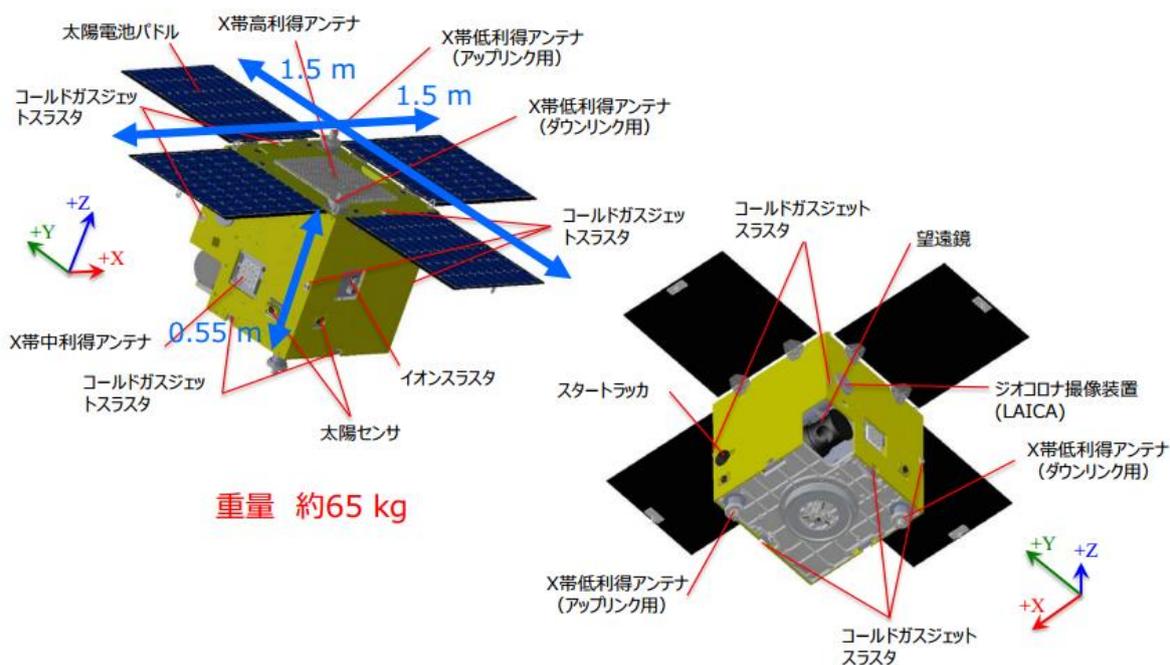
- ◎ 50kg級超小型深宇宙探査機バスの実証
- △ 深宇宙探査技術の実証
- ◎ サイエンス観測



地球最接近時にPROCYONが撮影した地球

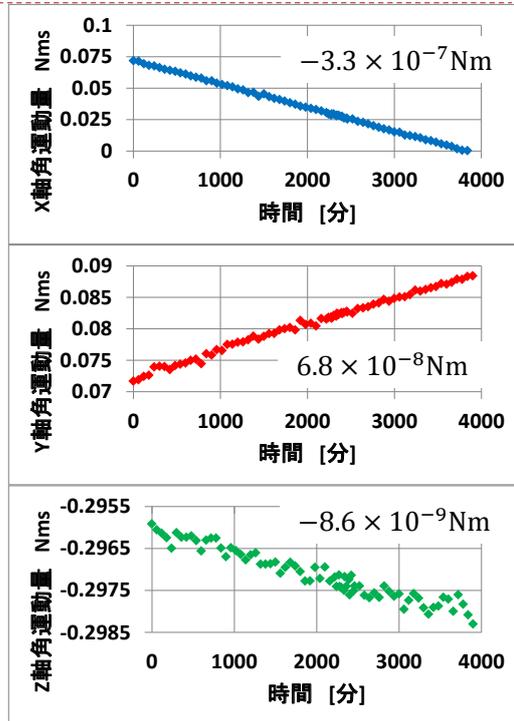


PROCYONの外観



PROCYONフライトデータ：角運動量

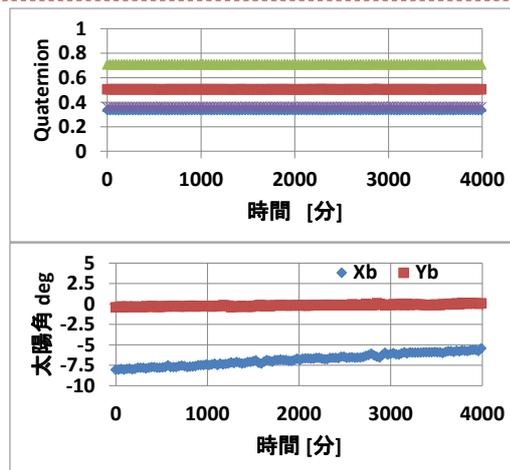
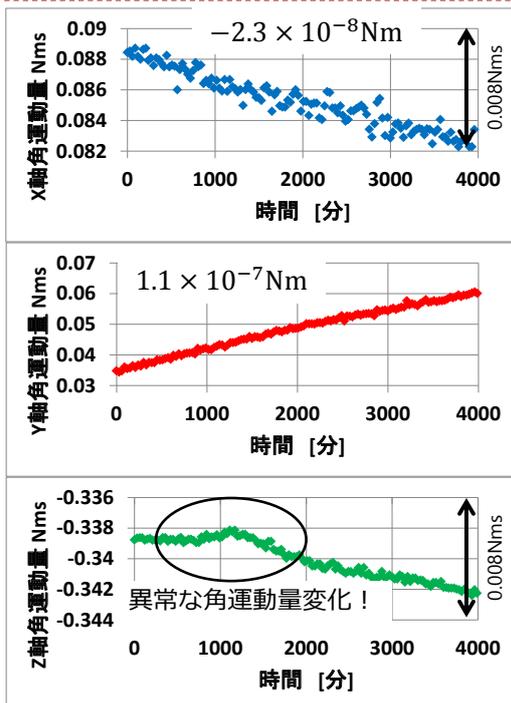
- ▶ 機体固定座標系角運動量を3日弱の非可視運用中に観測
- ▶ 観測条件
 - ▶ スラスト運用は行わない
 - ▶ 姿勢は慣性空間固定
 - ▶ 太陽角は1deg/day程度で変動
 - ▶ 角運動量はRW回転数から推算
- ▶ 支配外乱は太陽輻射圧
 - ▶ X軸, Y軸は太陽角に応じて角運動量が単調変化
 - ▶ Z軸はほとんど角運動量は変化しない



2015/5/24-27フライトデータ

▶ 11

PROCYONで観測された謎のトルク



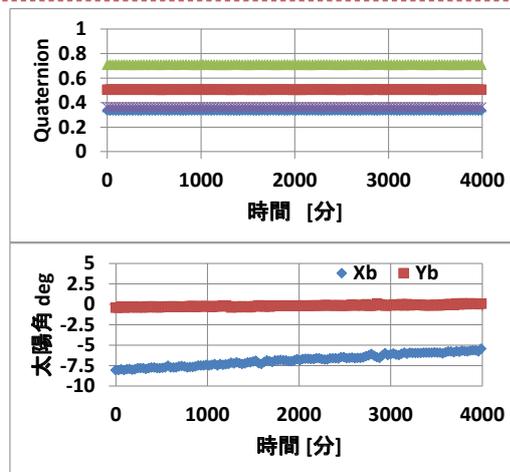
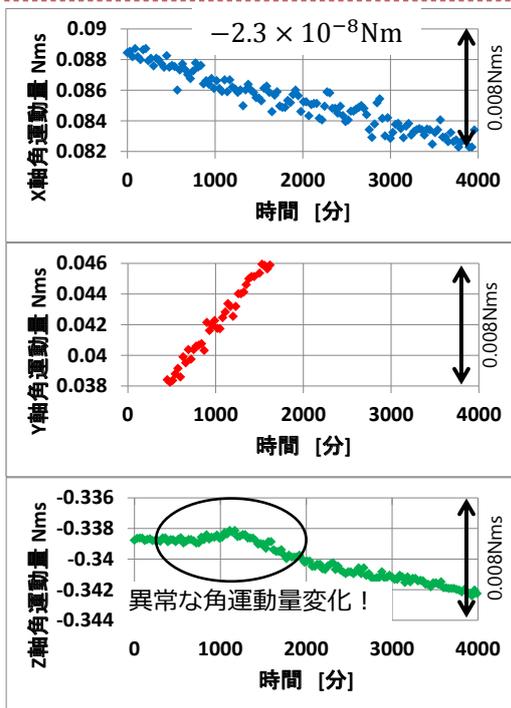
- Z軸で異常な角運動量変化
- X,Y軸は同じオーダーの角運動量変化だが、以上は確認できない
- その間、姿勢・太陽方向に異常は無い



単純な太陽輻射圧モデルでは説明できない現象. 他の外乱トルク?

▶ 1: 2015/5/6-9フライトデータ

PROCYONで観測された謎のトルク



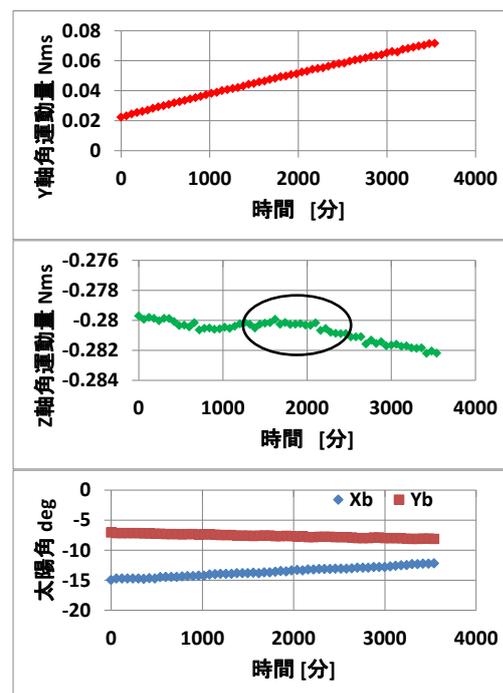
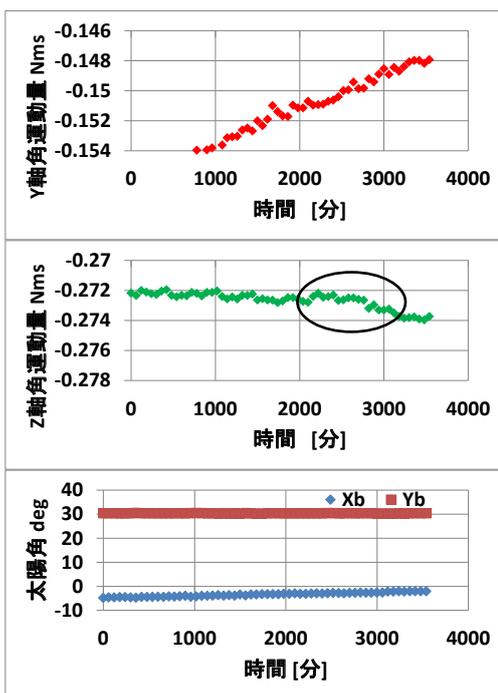
- Z軸で異常な角運動量変化
- X,Y軸は同じオーダーの角運動量変化だが、以上は確認できない
- その間、姿勢・太陽方向に異常は無い



単純な太陽輻射圧モデルでは説明できない現象。他の外乱トルク？

▶ 1: 2015/5/6-9フライトデータ

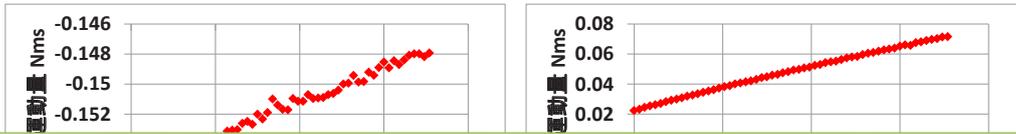
同様の現象は何度も観測されている



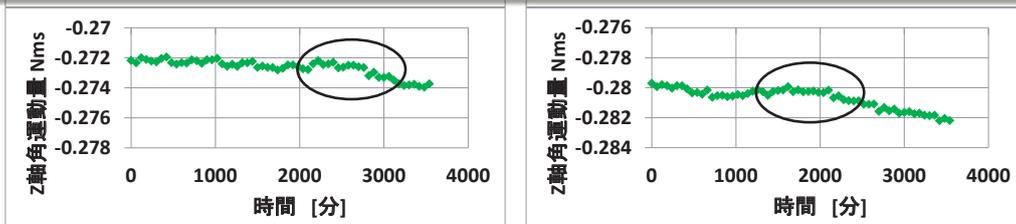
▶ 14 2015/5/30-6/2フライトデータ

2015/8/10-13フライトデータ

同様の現象は何度も観測されている



2015年5月から11月の約半年間で10回程度確認されている



極々小さな力であり、運用全体に大きな影響を及ぼすものではないが、原因を調べ、今後の宇宙航行に役立てたい

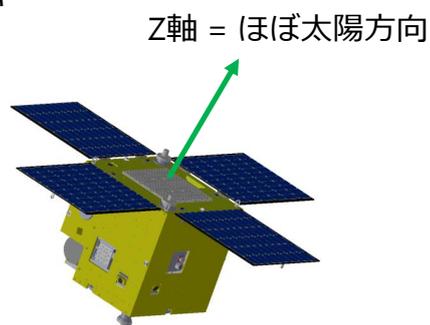
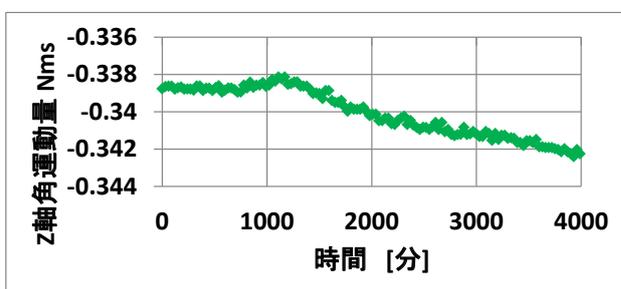


▶ 15 2015/5/30-6/2フライトデータ 2015/8/10-13フライトデータ

PROCYON謎トルクの原因調査

PROCYON謎トルクの特徴

- ▶ Z軸にのみ発生
 - ▶ トルクの大きさは、 10^{-8} Nmオーダー
 - ▶ 半年間で10回程度発生
 - ▶ 太陽角に依存しない
 - ▶ 突発的なトルクではなく、数日間継続している
- ▶ 太陽輻射圧が原因ではない
- ▶ ダストの衝突など突発現象ではない



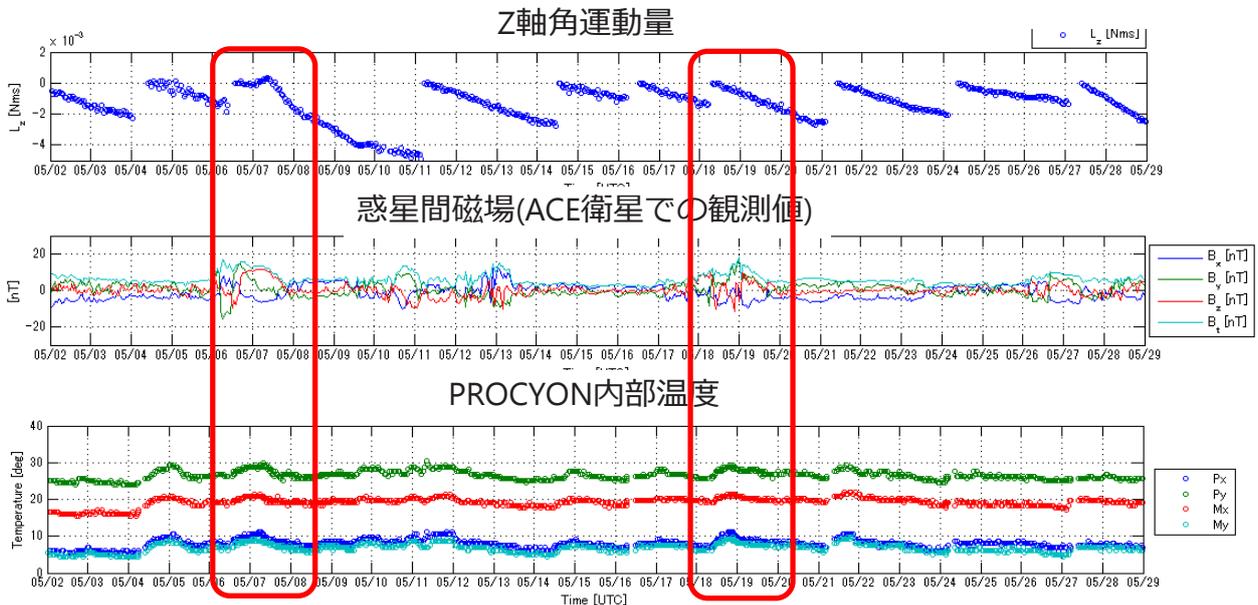
▶ 17

これまでの検討

- ▶ テレメトリ相関解析
- ▶ 高精度太陽輻射圧解析
- ▶ 熱輻射圧
- ▶ 惑星間磁場による磁気外乱
- ▶ プロトン粒子の衝突

▶ 18

テレメトリの相関解析



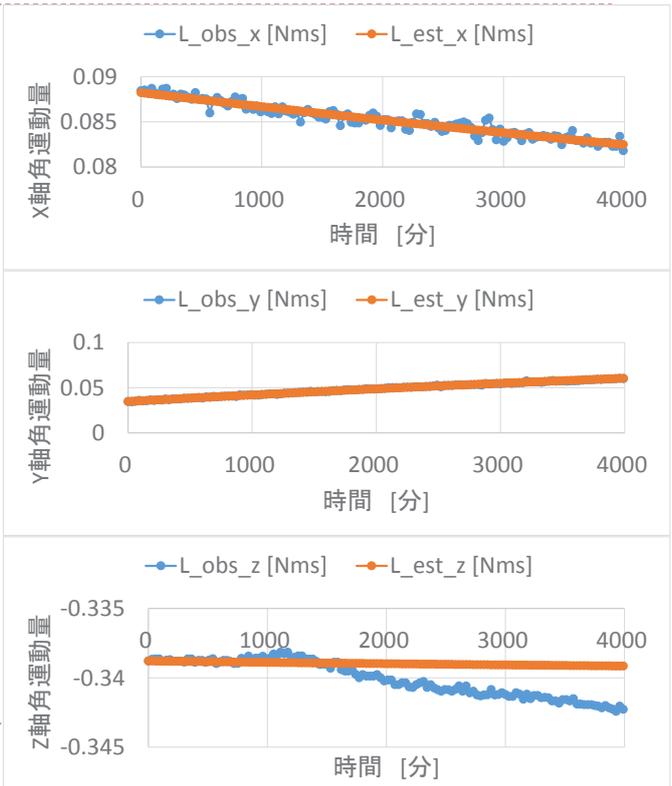
惑星間磁場の変動や、温度変動と相関がみられるときもあるが、見られない時もある

▶ 19

精密太陽輻射圧計算

- 複雑なモデルに変更
- 光学特性を推定
- ダイナミクス込みで角運動量を算出

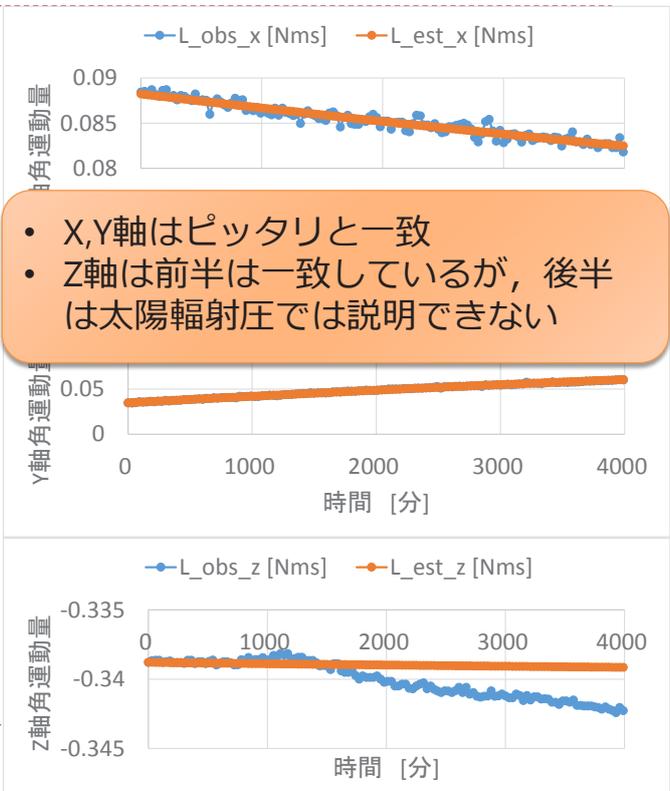
▶ 20



精密太陽輻射圧計算

- 複雑なモデルに変更
- 光学特性を推定
- ダイナミクス込みで角運動量を算出

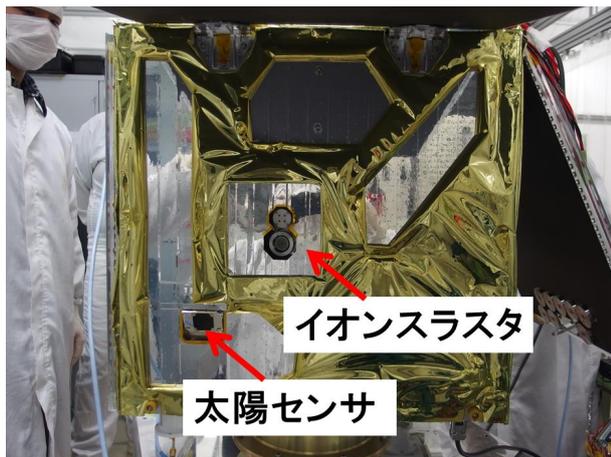
▶ 21



熱輻射圧 ~温度と外乱の関係~

- ▶ 熱の放射
 = 赤外線光子の放出

$$F = \frac{2A}{3c} \sigma \epsilon T^4$$
- ▶ 不均一な放熱により、トルクが発生し得る
- ▶ 概算結果、銀テフロンの温度が5度変わると
 $3 \times 10^{-10} \text{Nm}$
 のトルクが発生
 ⇒ 小さすぎるので、
 熱が原因ではない可能性が高い



PROCYONの側面は、放熱が非対称
 ⇒ 熱輻射圧が大きくなりやすい

惑星間磁場による磁気外乱 ～惑星間磁場と外乱の関係～

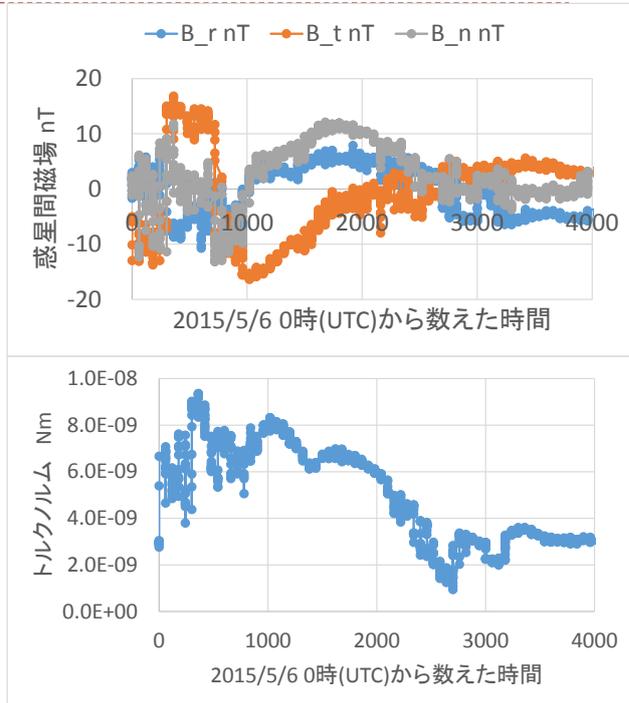
▶ 磁気外乱

$$T_{mag} = m \times B$$

m : 残留磁気モーメント Am^2

B : 磁場 T

- ▶ PROCYONの全機器電源OFF(永久磁石のみによる)残留磁気モーメント計測の結果
 $m = [-0.004 \quad 0.06 \quad -0.5]Am^2$
- ▶ トルクのオーダーとしては一致する
- ▶ しかし, 外積であることを考えると, Z軸周りのトルクは1/10程度になるはず
- ▶ 機器電源ON時の残留磁気モーメント計測が必要



ACE衛星での磁場観測値からの概算

▶ 23

プロトン粒子の衝突 ～太陽活動と外乱の関係～

- ▶ CMEなどで放出されたプロトンが衛星に衝突することで, 角運動量交換によるトルクが発生

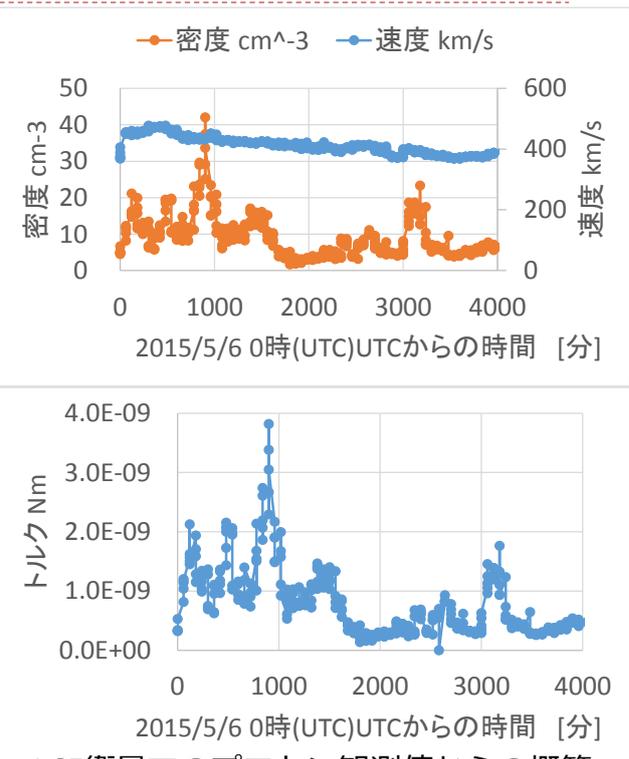
$$T_{proton} = lAmpv^2$$

m : プロトン質量

ρ : プロトン密度

v : プロトン速度

- ▶ PROCYONの面積, アームベクトルを考慮すると, 半分程度のトルクは発生する
 - ▶ 反射などを考えると倍になり, 同じオーダーと成り得る
- ▶ トルク方向などは, 詳細な検討が必要



ACE衛星でのプロトン観測値からの概算

▶ 24

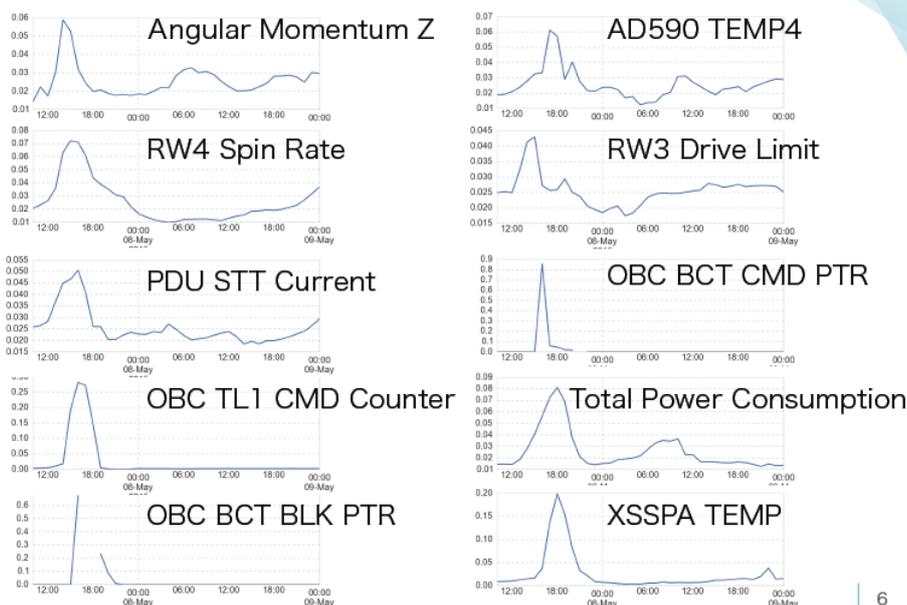
結論

- ▶ PROCYONのフライトデータにおいて、謎のZ軸トルクが観測された
 - ▶ Z軸にのみ発生，大きさは， 10^{-8} Nmオーダー
 - ▶ 半年間で10回程度発生，太陽角に依存しない
 - ▶ 突発的なトルクではなく，数日間継続している
- ▶ 考え得る外乱源について調査を行った
 - ▶ 磁気外乱とプロトン粒子外乱はオーダー的にはあり得る両者の組み合わせの可能性もある
 - ▶ より詳細な解析が必要
 - ▶ 相関解析，PROCYON軌道での惑星間磁場，電源ON時の残留磁気，プロトン衝突の方向
- ▶ 他にも原因となり得る**宇宙環境の変動**についてアドバイスをいただきたい

▶ 25

補遺：より厳密なテレメトリ相関解析

変化スコア(Sakagami,2017)を利用したテレメトリ相関解析を実施中
Z軸角運動量と，温度，電力などの相関関係が見えている



▶ 26

謝辞

- ▶ 本研究は下記の助成を受けたものです.
 - ▶ JSPS研究活動スタート支援17H06615
 - ▶ 平成29年度戦略的開発研究費(工学)
- ▶ また, PROCYONの開発・運用に携わった全ての人に謝意を表します.