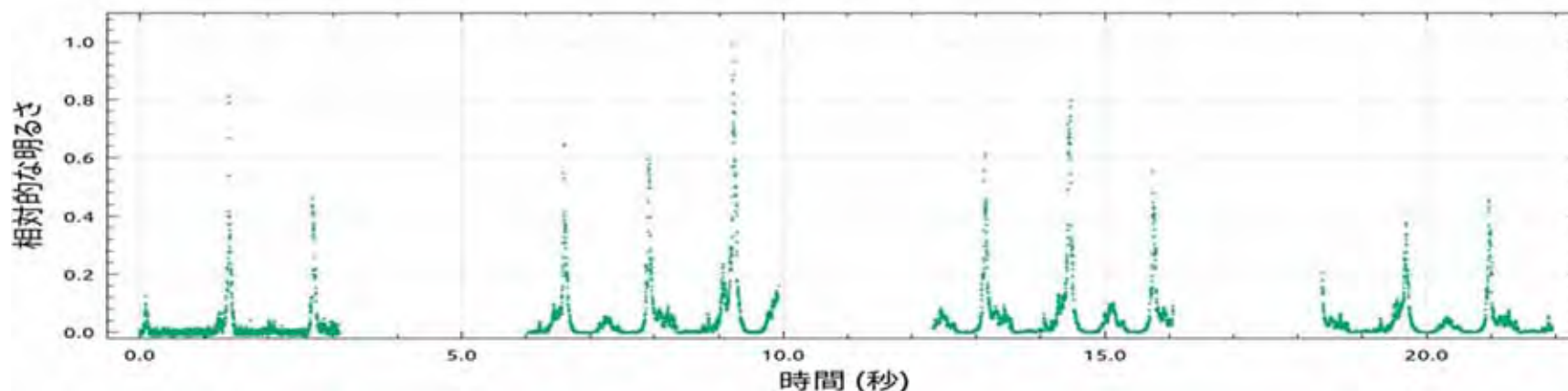


3.4 事象発生後の地上観測の状況(2/3)

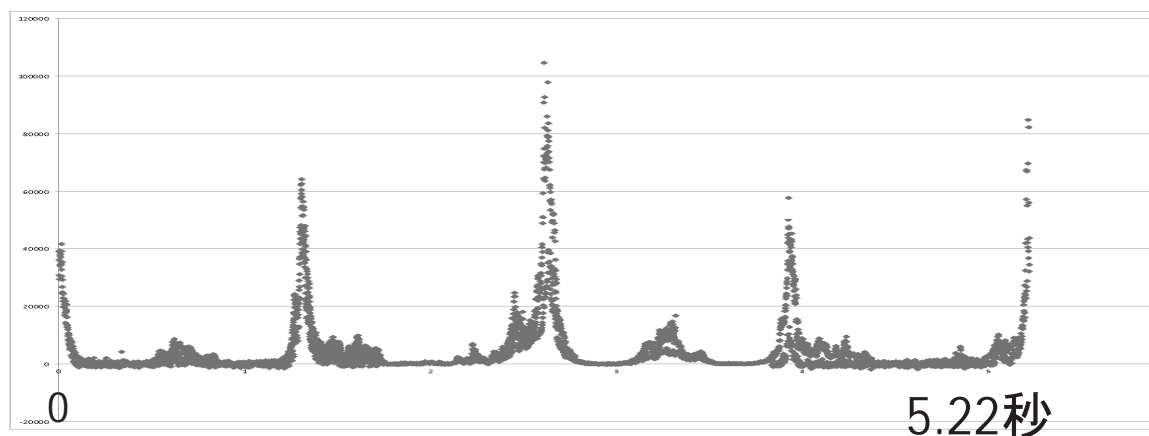
木曾観測所による41337の光度曲線



3/31 11:24:11.3 からの経過秒数

上図：木曾広視野高速カメラ
Tomo-e Gozenプロトタイプ機
による光度曲線

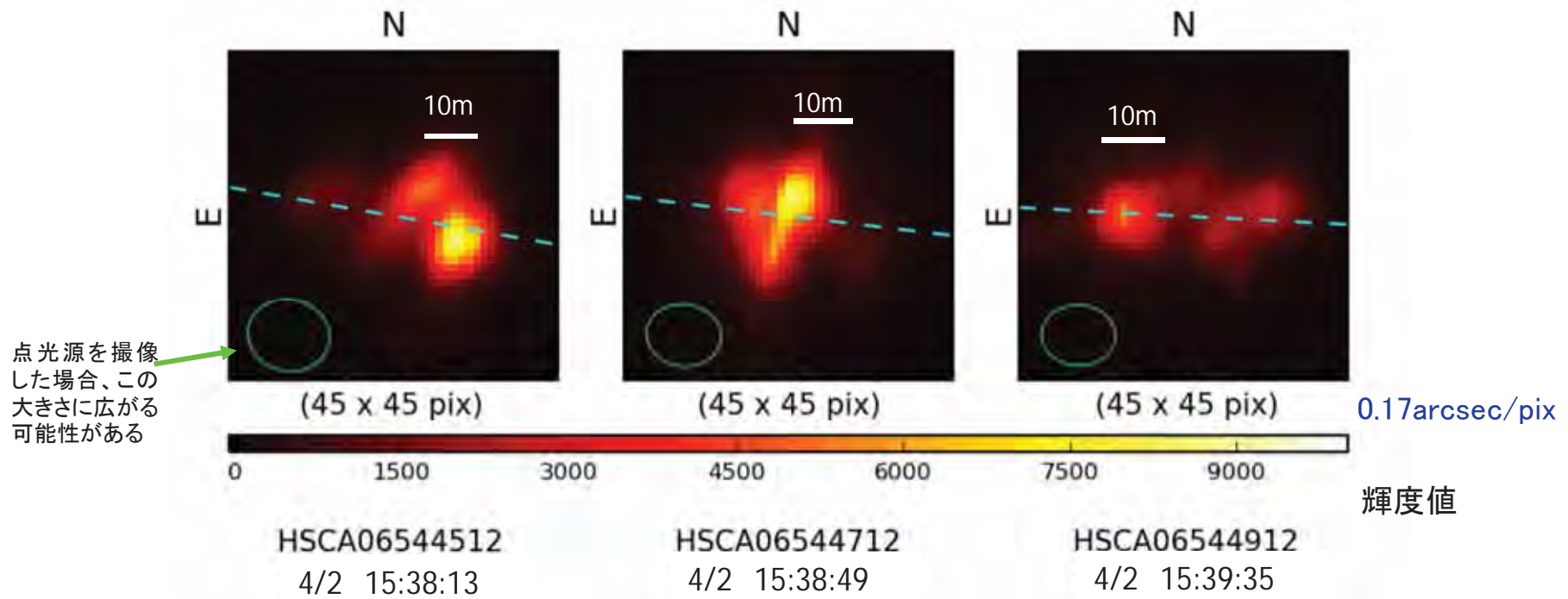
右図：上記データを元にJAXA
で光度曲線を周期5.22秒で折
り重ねたもの。



元図は東京大学の提供による

3.4 事象発生後の地上観測の状況(3/3)

すばる望遠鏡による41337の観測画像



画像は国立天文台の提供による

追尾誤差と大気のゆらぎによる像の広がりがあるものの、明るい部分の広がりから数m以上の物体であると推定される。

3.5 ASTRO-Hの運用について

以下の状況、及び複数の海外機関から太陽電池パドルの両翼分離を示唆する情報を得たことを踏まえ、今後衛星が機能回復することは期待できない状態にあるとの判断に至り、復旧に向けた活動は取りやめ原因究明に専念することとした。(4月28日)

- 物体の分離に至る異常発生メカニズムについてシミュレーションを含めた解析の結果がほぼ確定し、構造的に弱い部位である太陽電池パドルが両翼とも根元から分離した可能性が高いと考えられること。
- 物体が分離した後も電波を受信できていたことを根拠とし、通信の復旧の可能性があると考えていたが、得られた電波の周波数が技術的に説明できないこと等から、受信した電波はASTRO-Hのものではなかったと判断されること。

4. 異常発生メカニズム

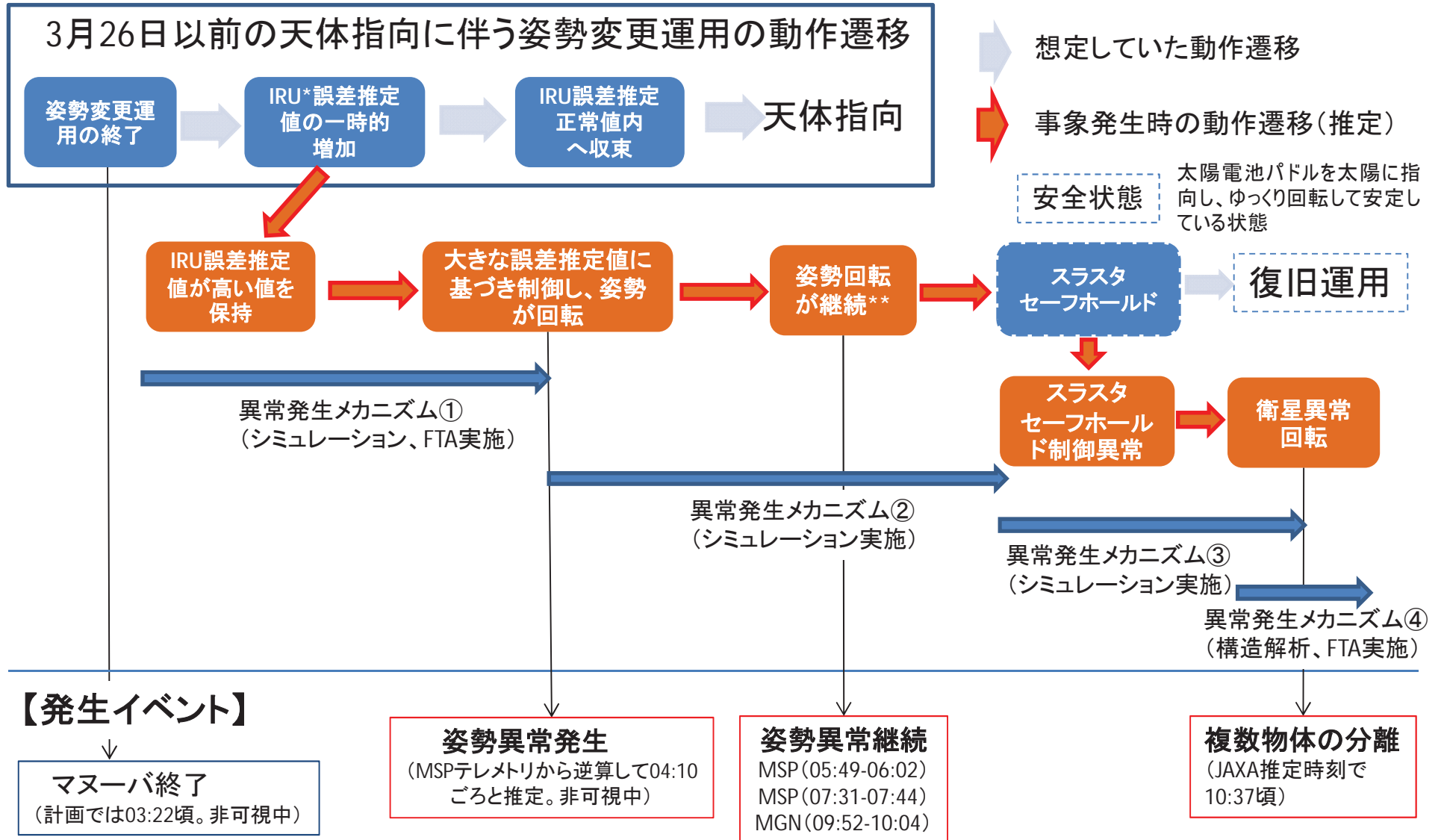
「衛星正常状態」から「姿勢異常」が発生し、「物体の分離」に至るまでのメカニズムを記載する。

4.1 異常発生メカニズム(サマリ)

(「衛星正常状態」から「姿勢異常」が発生し、「物体の分離」に至るまで)

- (1) 3月26日に、活動銀河核指向での初期機能確認を行う為の姿勢変更運用を計画通り実施した。
- (2) 姿勢変更運用終了後、姿勢制御系の想定と異なる動作により、実際には衛星が回転していないにもかかわらず、姿勢制御系は衛星が回転していると自己判断した。その結果、回転を止めようとする向きにリアクションホイール(RW)を作動させ、衛星を回転させるという姿勢異常が発生した。【異常発生メカニズム①】
- (3) 加えて、姿勢制御系が実施する磁気トルカによる角運動量のアンローディングが姿勢異常のため正常に働かず、RWに角運動量が蓄積し続けたと考える。【異常発生メカニズム②】
- (4) 姿勢制御系はこの状況を危険と判断し、衛星を安全な状態とするためセーフホールド(SH)に移行し、スラスタを噴射したと推定される。この際、姿勢制御系は不適切なスラスタ制御パラメータにより、想定と異なる指示をスラスタに与えたと推定される。その結果、スラスタは想定と異なる噴射を行い、衛星の回転が加速する作用を与えたと考える。【異常発生メカニズム③】
- (5) 衛星の想定以上の回転運動により、太陽電池パドル、伸展式光学ベンチ(EOB)など、回転状態で発生する力に対して構造的に弱い部位が破断し分離したと推定される。特に太陽電池パドルについては、取付部周辺で破損し、両翼とも分離した可能性が高い。【異常発生メカニズム④】

4.1 異常発生メカニズム(図解) 衛星正常状態から物体の分離に至るまで



MSP: JAXAマスパロマス局
MGN: JAXAミンゲニュー局

表示時刻は
全て日本時間3/26

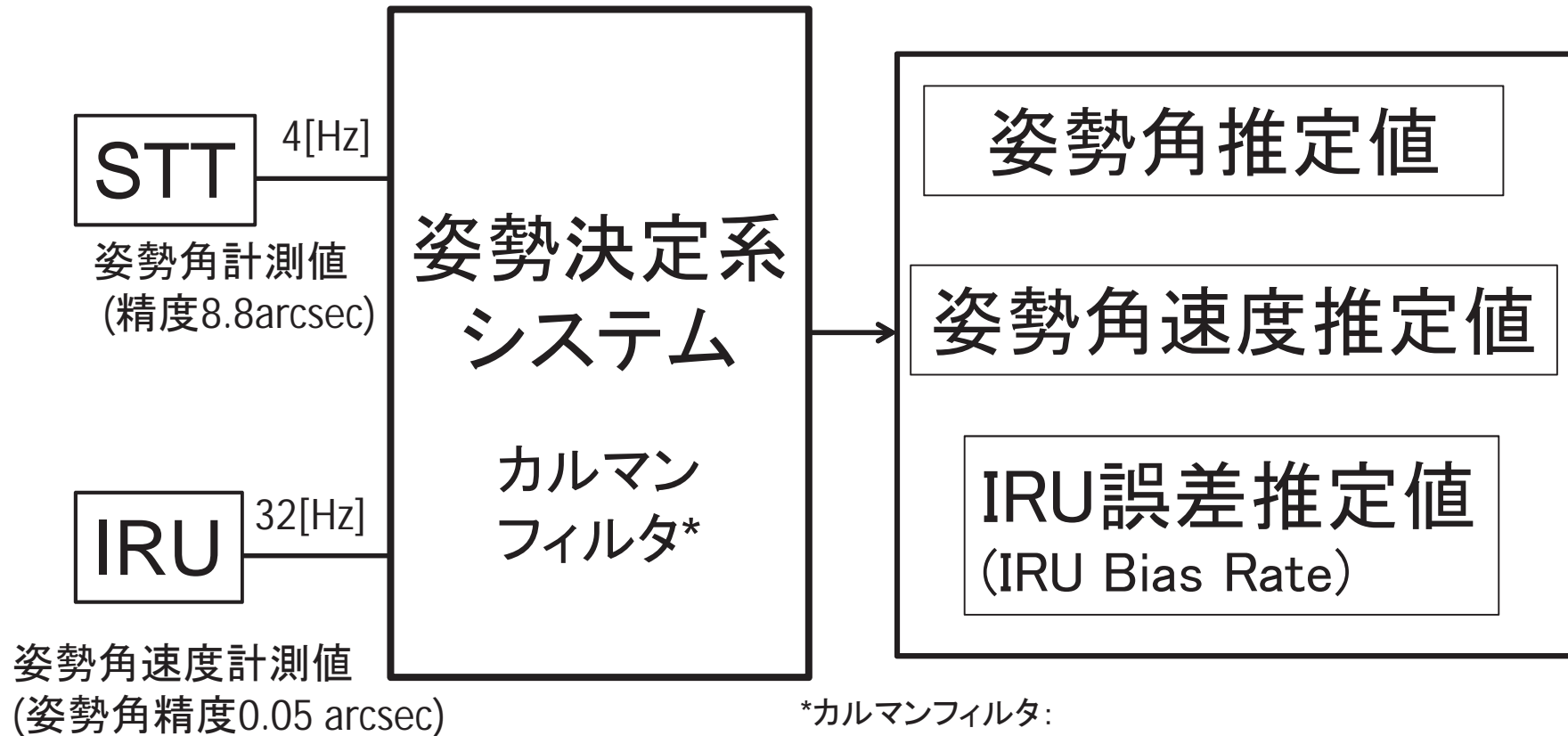
* IRU: Inertial Reference Unit、慣性基準装置
**ASTRO-Hの姿勢制御系は、姿勢異常判断に太陽センサを使用せず、姿勢制御系ソフトウェアによる推定値をもとに姿勢異常を判断している。

4.2 【異常発生メカニズム①】 衛星正常状態から姿勢異常発生まで

- ASTRO-Hは通常時、慣性基準装置(IRU)とスタートラッカ(STT)の情報をもとに姿勢決定を行う。【補足A参照】
- 3/26の姿勢変更運用は、姿勢変更中はSTTデータの取り込みを一時的に停止し、姿勢変更運用終了後にSTTデータの取り込みを再開する運用としていた。STTデータの取り込み再開の際、IRU誤差推定値【補足B参照】が一時的に実際の誤差推定値よりも大きな値となり、その後、STTデータによる補正により正常値範囲内に収束する動作を行うことを想定していた。
- しかしながら、3/26の姿勢変更運用終了後、IRU誤差推定値が実際とは異なる高い値を保持し続け、その結果、MSP局のテレメトリとして21.7[deg/h]という高いIRU誤差推定値が確認されたと考えている。
- この場合、実際には衛星が回転していないにもかかわらず、姿勢制御系が衛星が回転していると自己判断し、その結果、回転を止めようとする向きにリアクションホイール(RW)を作動させたと判断している。
- IRU誤差推定値が高い値を保持する要因について、搭載ソフトウェアを用いてSTTのモード遷移をインプットしてシミュレーションしたところ、次ページに示すSTTの動作においてIRU誤差推定値が高い値のまま保持されることを確認した。
- なお、IRU誤差推定値が高い値に保持された件についてFTAを行い、IRUの異常や搭載コンピュータのハードウェア異常といったその他の要因により、高い値に保持される可能性は低いと判断している。

【補足A】 ASTRO-H姿勢決定方法

補足A



*カルマンフィルタ:

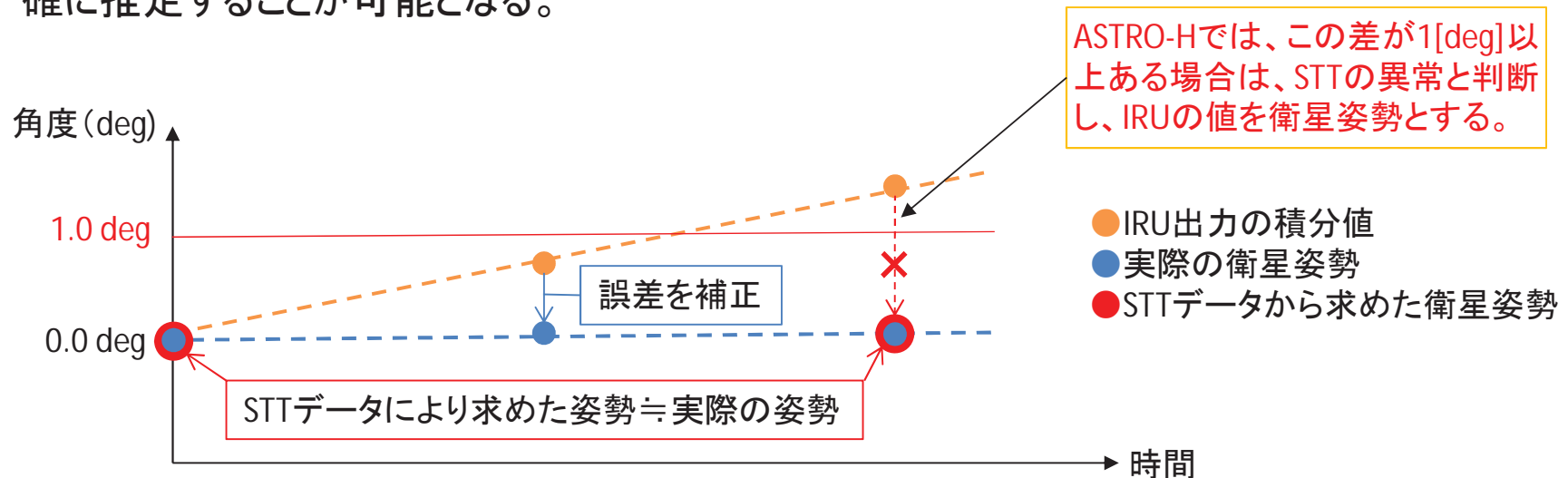
これまで推定してきた運動情報に新規に取得したセンサ計測値を統合し、センサ特性や過去の推移に基づき、センサのノイズを除去しながら合理的に運動状態を推定する方法。

姿勢制御系への要求

- 姿勢決定精度要求 (X・Y: 3[arcsec]、Z:12[arcsec])

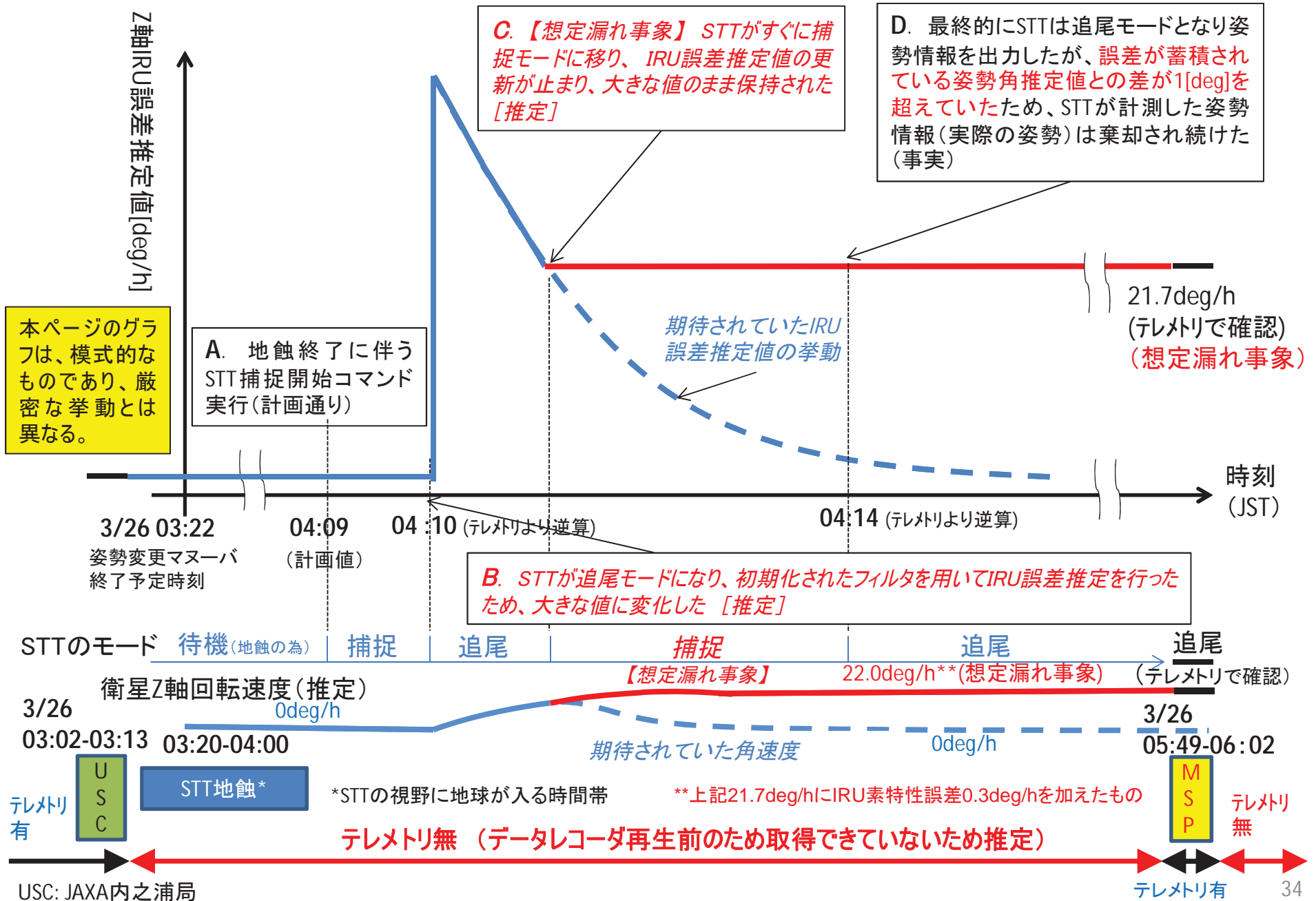
【補足B】 IRU誤差推定値について

- IRUは衛星の各軸(X、Y、Z軸)の角速度(deg/sec)を計測する機器
- IRUデータにより衛星姿勢(deg)を決定する場合、時間積分により算出する
例 計測値:0.1[deg/sec] 10秒後の姿勢:0.1×10[sec]=1.0[deg]。
- 角速度計測値には僅かな誤差があり、時間積分により誤差が蓄積する。
例 計測誤差:0.01[deg/sec] 10秒後の姿勢決定誤差:0.01×10=0.1[deg]
- 精度の高いSTTによる姿勢決定値と比較することでIRUの誤差の傾向(下図オレンジの線の傾き)を算出している。
- この誤差の傾向(IRU誤差推定値)を利用することで、STTデータの無い部分でも、姿勢を正確に推定することが可能となる。



(注)あくまでわかりやすさを重視した図であり、実際の処理とは異なる

4.2 異常発生メカニズム①: IRU誤差推定値の動き



4.3 【異常発生メカニズム②】 姿勢異常発生から姿勢回転継続まで

- ①の事象発生後、衛星はゆっくりとZ軸周りに回転を始め、太陽電池パドルが太陽方向からずれ始めたが、ASTRO-Hの姿勢制御系は、太陽センサ(CSAS)をFDIR*における姿勢異常判断に使用していないため姿勢異常が検知できず、姿勢回転が継続した。【補足C参照】
- この時、並行して実施している磁気トルカによるRW角運動量のアンローディング**処理が、姿勢異常のため正常に働かず、RWに角運動量が蓄積***された。
- 09:52-10:04 MGN局のテレメトリから、RWに蓄積された角運動量が制限値に近い値まで上昇していたことを確認している(テレメトリ:112[Nms]、制限値:120[Nms])。
- 姿勢異常状態における角運動量蓄積についてシミュレーションにて確認し、実際の値とほぼ同じ角運動量がRWに蓄積されることを確認した。

*FDIR: Fault Detection Isolation and Reconfiguration 故障検出、分離、及び再構成

**アンローディング: 磁気トルカ作動または姿勢制御用スラストの微量噴射により、リアクションホイールの回転数を正常動作範囲内に調整する運用

***角運動量の蓄積: 角運動量の蓄積は、リアクションホイールの回転数の増加に相当

【補足C】異常発生メカニズム②での衛星挙動(イメージ) 補足C

3/26 01:40ごろ【推定】～少なくとも10:04(MGN可視終了)まで

正常時

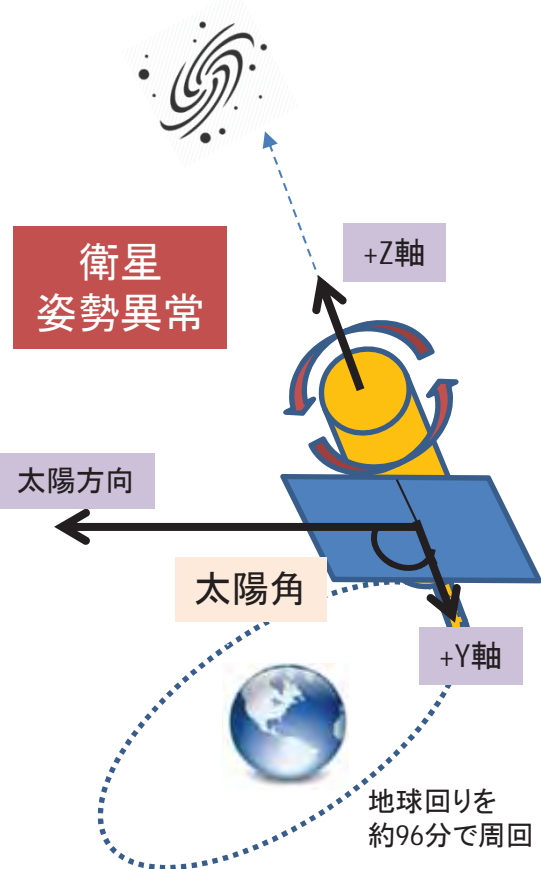
衛星は電力確保のため、SAPをほぼ太陽方向に向けながら地球回りを周回する。その上で望遠鏡を天体に向ける姿勢を取る。(地球に遮られ天体が見えない時間帯もある)



衛星+Y軸と太陽方向のなす角度(太陽角)が、プラスマイナス30度以内であれば正常

今回の姿勢異常時

(MSP、MSP、MGN可視テレメトリで確認済み)



- 姿勢制御パラメータが異常になって以降、衛星が1時間に約21.7度の割合でZ軸回りにゆっくり回転を始めた
- 最後にテレメトリを確認できたMGN局での太陽角は約123度であった(すなわち、太陽電池パドル裏面から太陽光入射していた)。

4.4 【異常発生メカニズム③】 姿勢回転継続から異常回転まで

- RWに蓄積する角運動量が最終的に制限値(120[Nms])を超えると姿勢制御系はRWによる制御に何らかの異常が発生したと判断し、スラスタにより姿勢制御を行うモード(スラスタセーフホールドモード:RCS SH)に移行する。【補足D参照】
- RCS SHでは、スラスタにより太陽を捕捉するように姿勢を立て直す動作を行う。【補足E参照】
- RCS SHに移行した場合、不適切なスラスタ制御パラメータにより、スラスタは想定と異なり、衛星の角速度が増加する方向に噴射を行う。【補足F参照】
- シミュレーションにより不適切なスラスタ制御パラメータによる噴射動作を模擬し、角速度が増加する方向に作用し、太陽電池パドルの分離に至る角速度まで到達することを確認した。【補足G参照】
- 同じくシミュレーションにより確認した、姿勢異常発生以降の衛星の姿勢角、角運動量、太陽方向についても示す。【補足H参照】

【補足D】 RCSセーフホールド

補足D

ASTRO-Hでは、以下のステップで行われる。

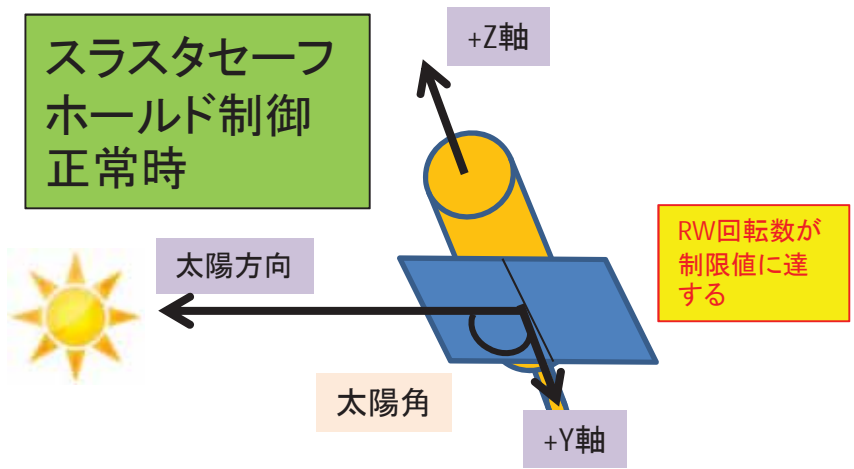
- (1) 姿勢制御系の下記の機器をA系からB系に切り替える。CSAS、IRU、AOCP、RCS
- (2) IRUで $0.08[\text{deg}/\text{sec}]$ 以上の角速度を検出した場合にはRCSを用いてレートダンプを行う。
- (3) CSAS、IRU、RCSを用いて、太陽を捕捉する。なお、CSASでサンプレゼンスが得られない場合、衛星X軸、衛星Z軸の順に衛星全体を回転させ、全天太陽探索を行う。
- (4) サンプレゼンス取得後は、IRUとCSASにより+Y軸方向に太陽を捕捉し、推薬消費が少なくなるように、Y軸回りに $0.25[\text{deg}/\text{sec}]$ で回転させる。

なお、太陽探索開始時に日陰の場合、あるいは日照時間中に探索終了できないとAOCPが判断した場合には、日陰が終了するまでX軸まわり $-0.05[\text{deg}/\text{sec}]$ のスロースピンで待機する。

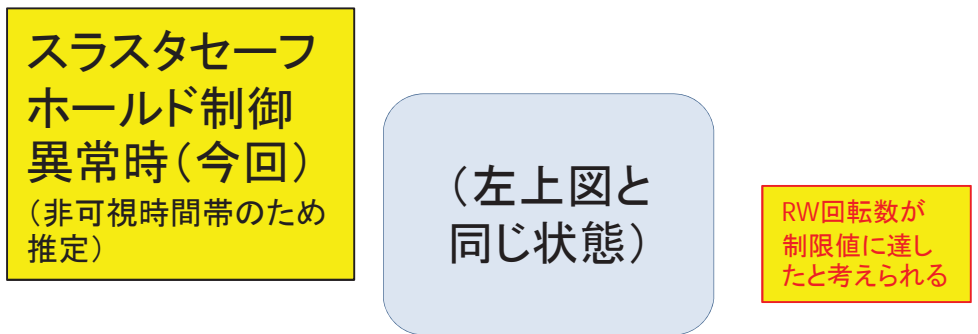
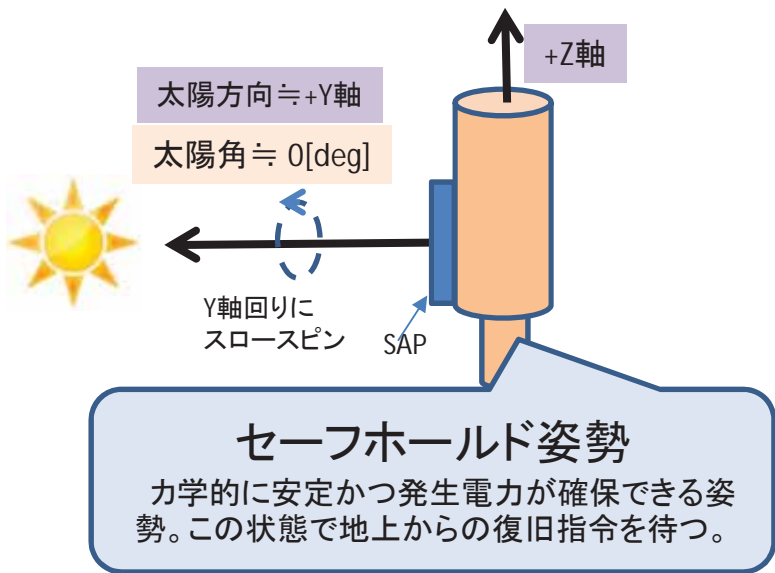
(観測装置に対する太陽光入射制限があるため)

【補足E】 異常発生メカニズム③④での衛星挙動(イメージ)

3/26 10:04【MGN可視終了後】以降、10:37【衛星分離のJAXA推定時刻】までの間



観測中断し(天体指向姿勢を諦めて)、
スラスタによる姿勢制御モード(RCS
SH)に遷移

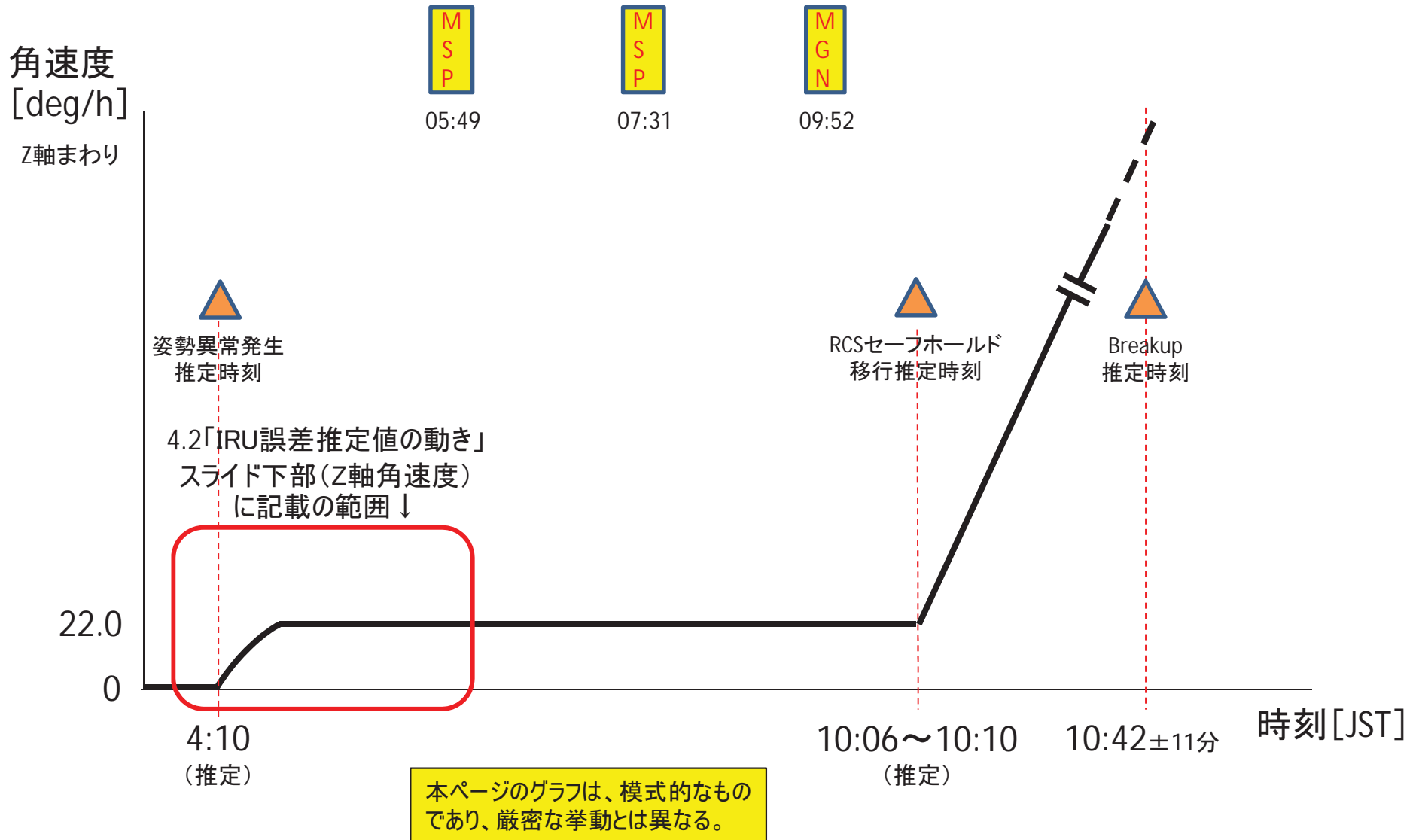


観測中断し(天体指向姿勢を諦めて)、
スラスタによる姿勢制御モード(RCS
SH)に遷移したと考えられる

不適切なスラスタ制御パラメータ設定
により、想定と異なる噴射したと考える

- 衛星の角速度が増加したと考えられる
- 回転によって大きな荷重が加わる部位(太陽電池パドル、EOB等)が破断し分離したと考えられる

【補足F】 衛星の角速度 (Z軸まわり) 推移 (姿勢変更マヌーバ終了後から)



【補足G】 ASTRO-Hの角速度（全体スケール）

補足G

