

# 宇宙機の時刻管理 ～運用と解析～

宇宙航空研究開発機構

○山本幸生、大原万里奈、真鍋友林、松崎恵一、三村恭子

# 本発表の背景と目的

- 背景
  - 近年の宇宙機では時刻精度要求の高いプロジェクトが見られる
    - OMOTENASHI … 減速マヌーバ(絶対時刻とのずれ~100ms精度)
    - SLIM … ピンポイント着陸(<100ms)
    - MMX … MIRS観測(~60ms)
  - JAXAの科学衛星/探査機では時刻校正に関する共通システムを整備しており、共通システムを前提としたプロジェクトが増大中である
- 目的
  - 共通システムの仕組みと限界を理解した上で、ミッション検討に役立てて欲しい
  - 精度向上のためのノウハウを共有したい

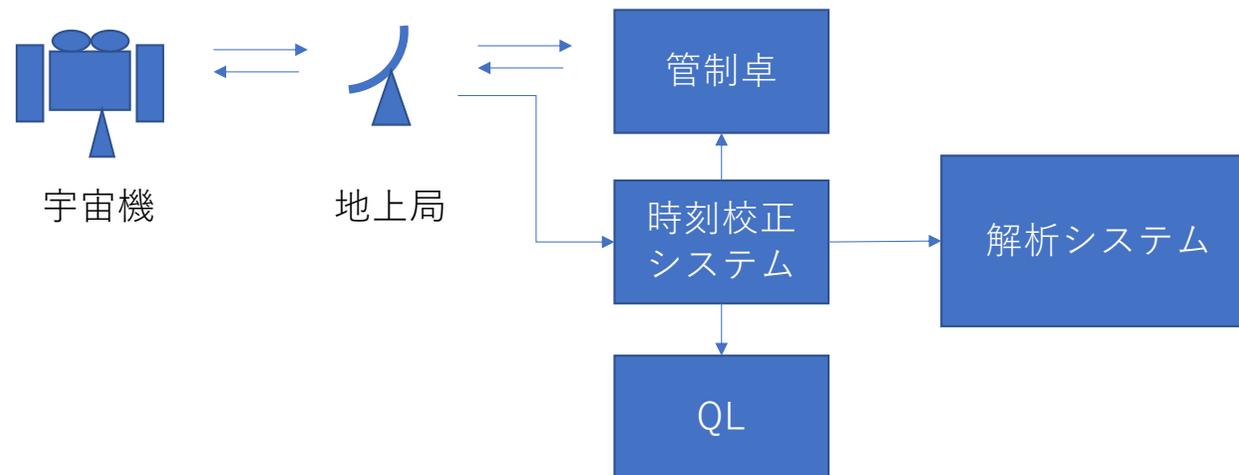
# 概要

- 衛星時刻校正システム
- 時刻校正テレメトリ
- 遅延量の見積もり
- 立案における時刻精度

# 衛星時刻校正システム

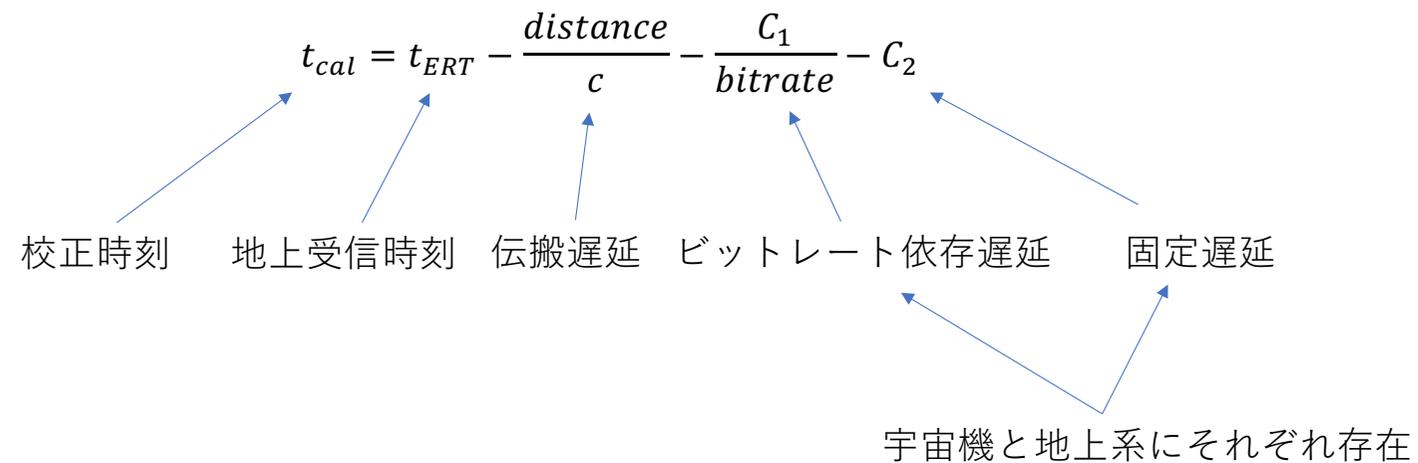
# 科学衛星・探査機と地球観測衛星の違い

- 地球観測衛星はGPSを搭載し、位置決定や時刻はGPSを利用可能
- 科学衛星・探査機はGPSを搭載せず、宇宙機が独自に保有するクロックをUTCへと対応つけるための時刻校正テレメトリを出力する
- 衛星時刻校正システムは、時刻校正テレメトリを利用してUTCとTIの対応表を作成する



# 衛星時刻校正システムの時刻校正とは？

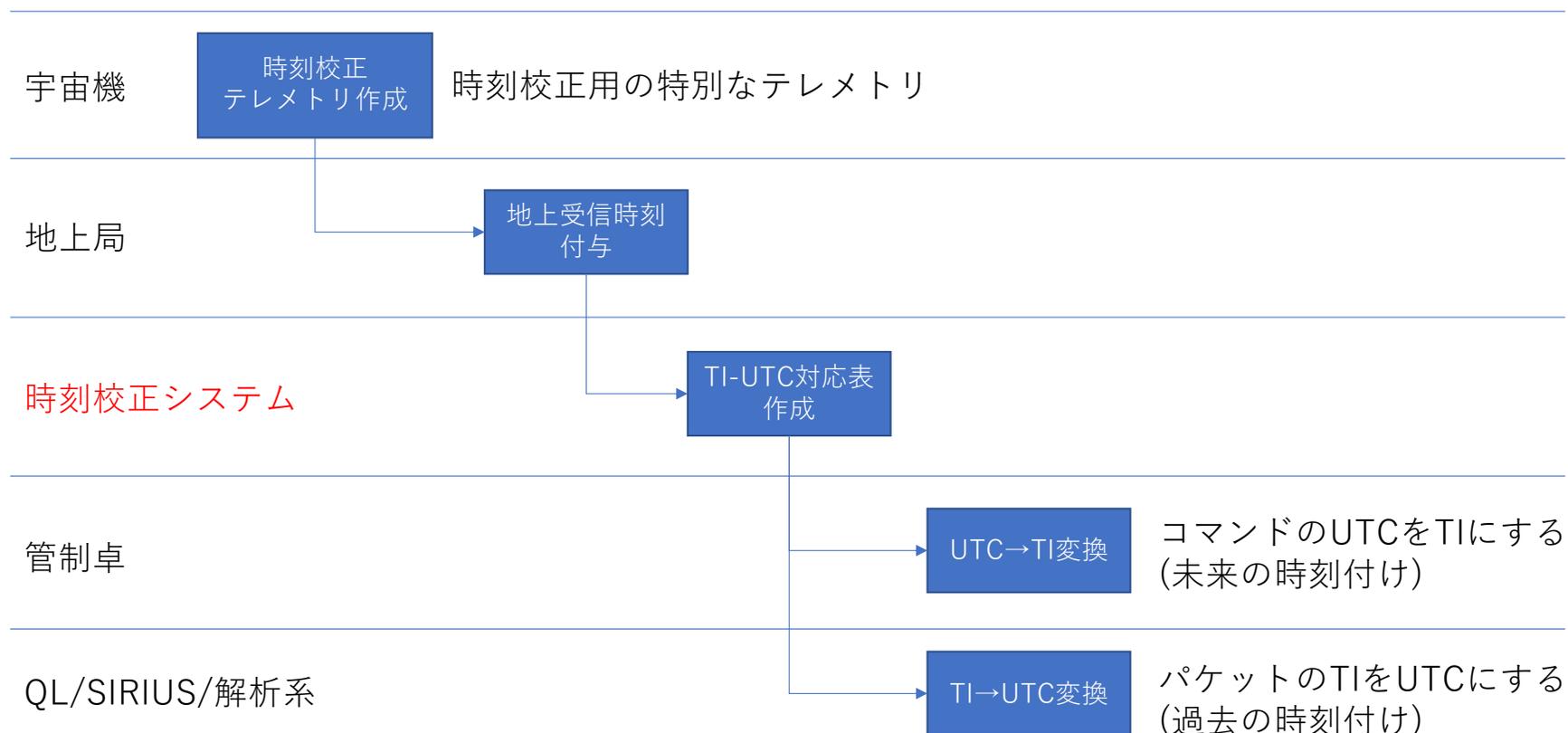
- 宇宙機に搭載されたクロック (Time Indicator; TI) と地上の時刻 (UTC) を対応づけること

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$


校正時刻    地上受信時刻    伝搬遅延    ビットレート依存遅延    固定遅延

宇宙機と地上系にそれぞれ存在

# 時刻付けの流れ



# 時刻校正テレメトリ

# Time Indicator



衛星時刻校正システム

打ち上げ	宇宙機	内部ビット数	セカンダリヘッダTIの単位	最下位ビットの単位
2006年9月2日	ひので (Solar-B)	36 bits	$2^{-5}$ 秒 ~ 31.25ms	$2^{-9}$ 秒 ~ 1.9531ms
2010年5月21日	あかつき (PLANET-C)	40 bits	$2^{-5}$ 秒 ~ 31.25ms	$2^{-13}$ 秒 ~ 122.07us
2013年9月14日	ひさき (SPRINT-A)	32+6 bits	1秒	$2^{-6}$ 秒 ~ 15.625ms
2014年12月3日	はやぶさ2	40 bits	$2^{-5}$ 秒 ~ 31.25ms	$2^{-13}$ 秒 ~ 122.07us
2016年2月17日	ひとみ (ASTRO-H)	30+20 bits	1秒	1us
2016年12月20日	あらせ (ERG)	40+20 bits	$2^{-6}$ 秒 ~ 15.625ms	1us
2018年10月20日	みお (MMO)	40 bits	$2^{-5}$ 秒 ~ 31.25ms	$2^{-13}$ 秒 ~ 122.07us
2022年度予定	OMOTENASHI	32 bits	$2^{-7}$ 秒 ~ 7.8125ms	$2^{-7}$ 秒 ~ 7.8125ms
2022年度予定	SLIM	32+16 bits	1秒	$2^{-16}$ 秒 ~ 15.258us
2024年度予定	MMX	32+16 bits	1秒	$2^{-16}$ 秒 ~ 15.258us

※内部ビット数の「+」はカウンタが2つを意味する  
 ※衛星時刻校正システムが導入されたのは「ひさき」以降

# 時刻校正テレメトリの方式

## 1段階方式 (MELCO方式:SLIM, MMX)

時刻校正用の情報(TI) を時刻校正専用のフレームとして出力



## 2段階方式 (NEC方式:Hisaki,Hitomi,Hayabusa2,ERG,等)

時刻校正用の情報(TI, VCDU\_CNT)を一旦記憶し、別のテレメトリとして出力



# 2つの標準：CCSDSとSCDHA

## The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS)

世界の宇宙機全体の推奨をまとめる団体

- フォーマットの分類
  - Level 1 … だけで解釈可能なフォーマット (絶対時刻)
  - Level 2 … 付加情報を必要とする部分的に解釈可能なフォーマット (相対時刻)
  - Level 3 … 単調増加のみを保証
  - Level 4 … 解釈不可 (独自のフォーマット)
- P-fieldとT-field
  - Preamble field (P-Field) … T-fieldの記述方式等を含むフィールド
  - Time specification field (T-field) … 実際の時刻を表すフィールド
- フォーマット
  - CCSDS UNSEGMENTED TIME CODE (CUC)
  - CCSDS DAY SEGMENTED TIME CODE (CDS)
  - CCSDS CALENDAR SEGMENTED TIME CODE (CCS)
  - CCSDS ASCII CALENDAR SEGMENTED TIME CODE (ASCII)
  - AGENCY-DEFINED CODE

## Standard of Communications and Data-Handling Architecture (SCDHA)

JAXAの科学衛星への推奨をまとめた標準

- フォーマットにはCUCを推奨
- P-fieldは1バイトで拡張なし
- T-fieldには1秒単位のTIを含める
- エポックはGPS epoch推奨(1980/1/6)
- 時刻計測タイミングは同期符号先頭を推奨

# パケット内のTI(時刻校正テレメトリ以外) (SCDHA Before/After)

SCDHA以前: あかつき、はやぶさ2等



↑  
LSBの単位はプロジェクト依存

SCDHA以降: SLIM, MMX



高精度な時刻が必要な場合、  
セカンダリヘッダの他に  
秒未満のTIをデータに含める

↑  
LSBの単位は1秒

- 1日~16.4bits
- 1年~24.9bits
- 32bits ~ 136年

↑  
エポックはGPS epoch推奨

- TI=0は1980年1月6日00:00:00 UTC

# 遅延量の見積もり

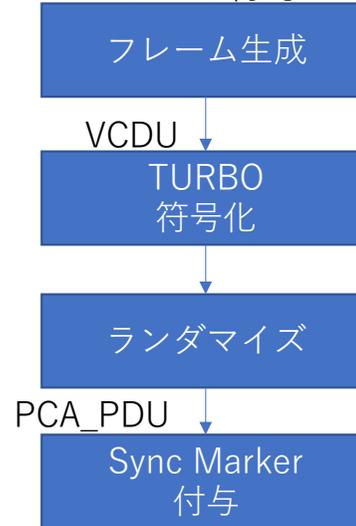
# 宇宙機内部: 符号化方式による遅延量(1)

接続符号(リードソロモン+畳み込み)



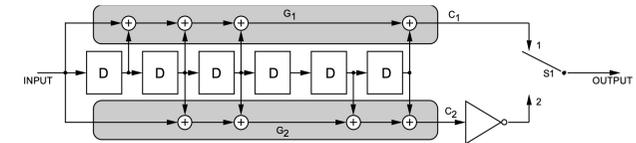
畳み込み遅延が発生

TURBO符号



畳み込み遅延はない

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$



畳み込み符号(CCSDS文書より引用)

- コードレート 1/2
- 拘束長K=7

# 宇宙機内部: 符号化方式による遅延量(2)

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$

畳み込み符号(コードレート  $r=1/2$ , 拘束長  $K=7$ )



TURBO符号



TURBO符号の同期符号のサイズ =  $32/r$   
 $r$ : コードレート (1/2, 1/3, 1/4, 1/6)

# 宇宙機内部:TI計測タイミング

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$

TI計測タイミングがSync Markerの後ろにある場合、ビットレート依存の遅延が発生する

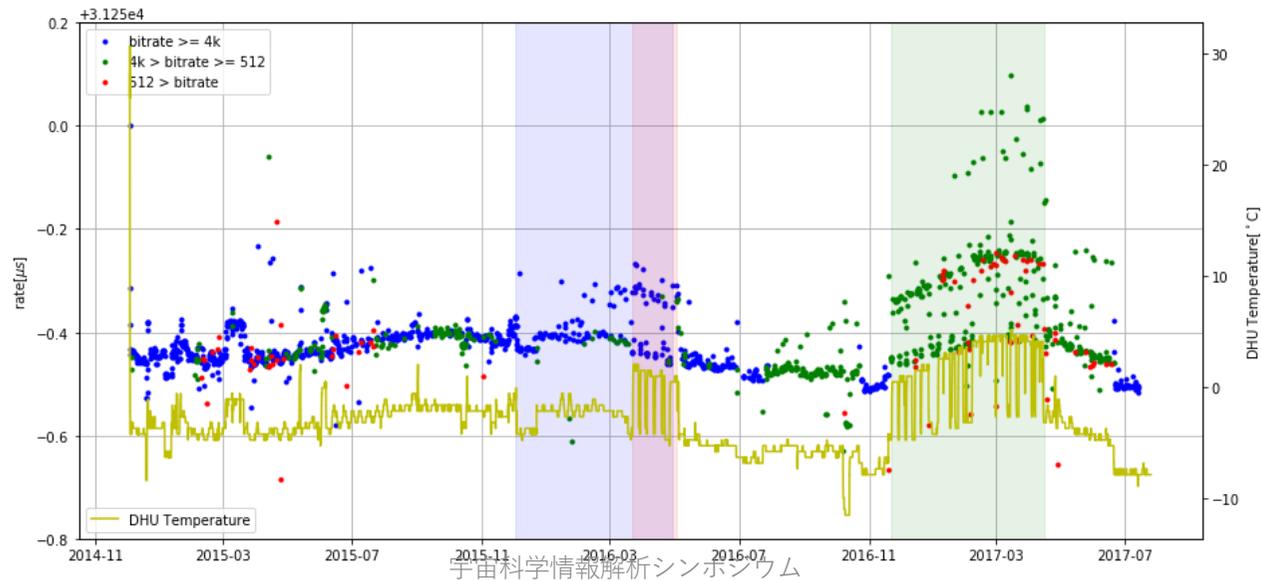
地上受信時刻はSync Markerの先頭で計測



# 宇宙機内部:その他の誤差要因

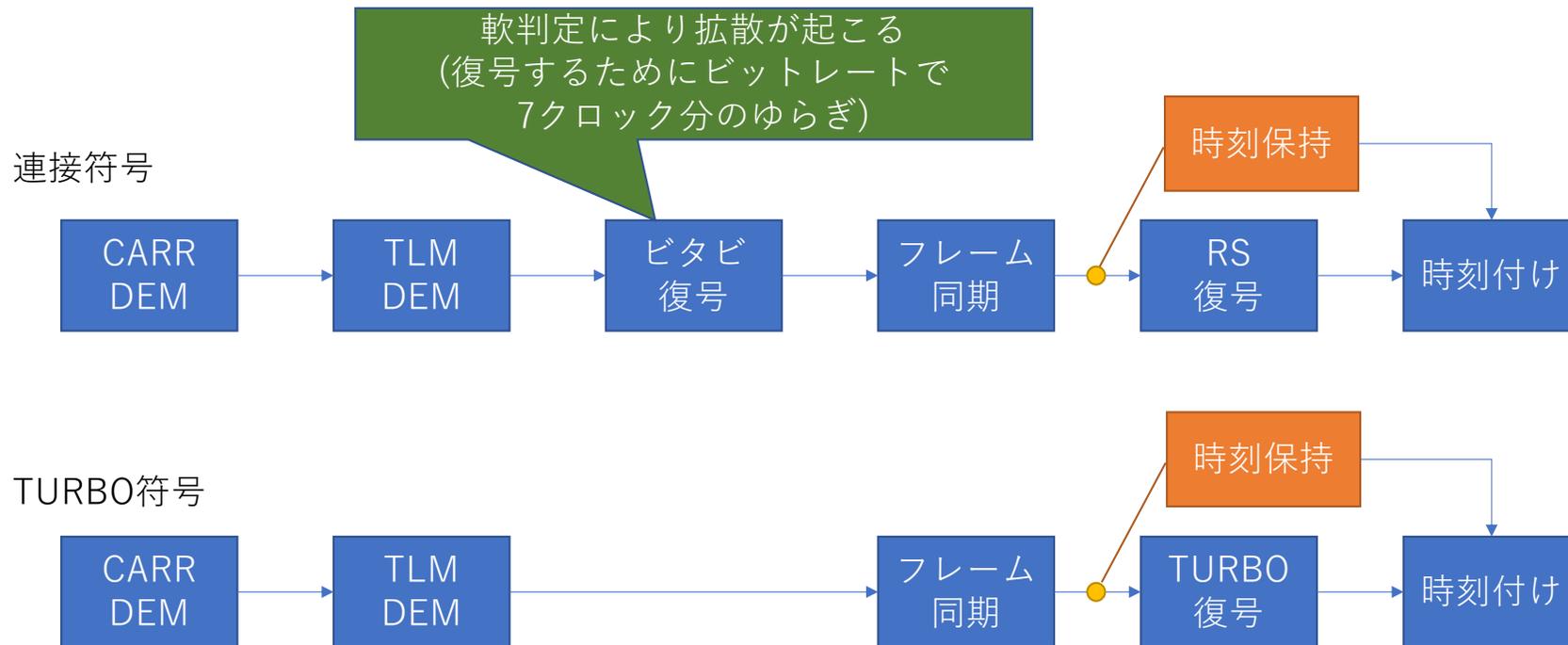
$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$

- 時刻校正テレメトリ送出時に前回のテレメトリが送信機のバッファ(FIFO)に残っている
- 時刻レートの温度依存性により誤差が生じる



# 地上局:処理フローと時刻保持

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$



# 地上局: 地上受信時刻の記録精度

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$

```

20220012223912562000 UDSC54
20220014001122190000 UDSC54
20220014015618363000 UDSC54
20220015001003674000 UDSC54
20220015015003837000 UDSC54
20220017001050607000 UDSC64
20220017013653229000 UDSC64
20220017024501872000 UDSC64
20220017201229108000 UDSC54
20220017220538032000 UDSC54
20220017231354146000 UDSC54
20220018002210263000 UDSC54
20220018023838503000 UDSC54
20220018201122637000 UDSC54
20220018215917063000 UDSC54
20220018230733184000 UDSC54
20220019001549306000 UDSC54
20220019023221553000 UDSC54
    
```

Hayabusa2のUDSC局  
地上受信時刻の例

```

20220040182148413106 MGN1
20220040224932517159 KSC34
20220040234044533878 KSC34
20220041040516728165 MGN1
20220041044132752036 MGN1
20220041123956982575 SNT1
20220041133349035652 SNT1
20220041143509106935 SNT1
20220041153453217147 SNT1
20220041161349161831 SNT1
20220041171333207178 SNT1
20220041181317317527 SNT1
20220041184341241873 SNT1
20220041214500954416 OKN1
20220041221453354072 OKN1
20220042070011650343 SNT1
20220042075957839074 SNT1
20220042085941889280 SNT1
    
```

ERGのUDSC局以外の  
地上受信時刻の例

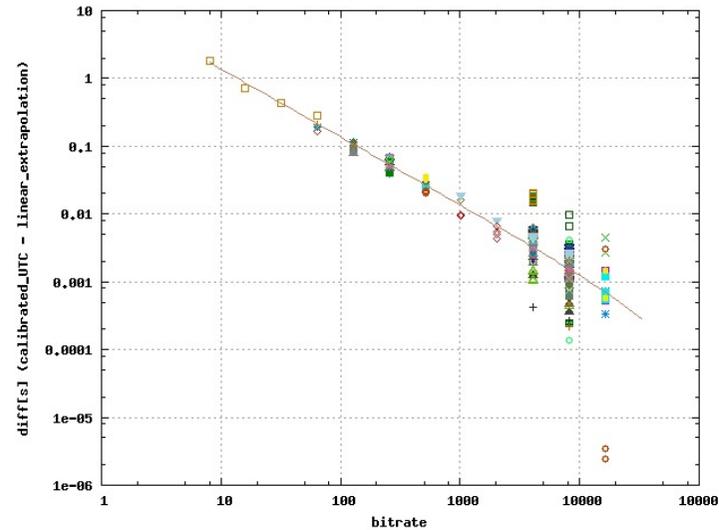
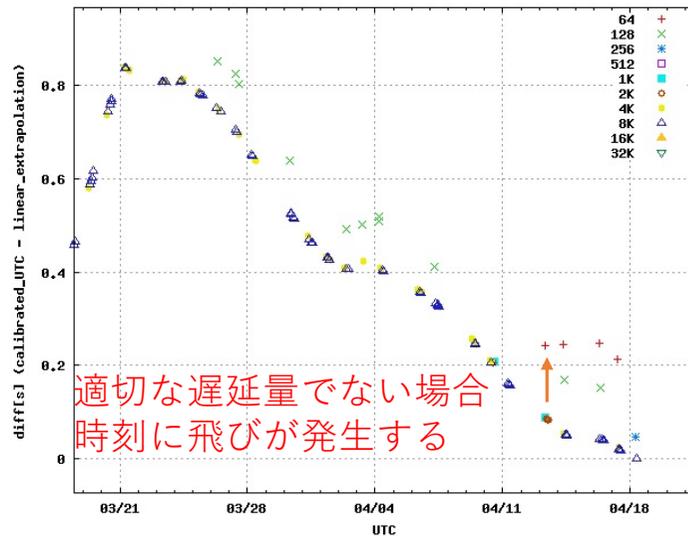
DSN-MODEM 時刻精度 ±1ms

- UDSCスペック <10ms
- USCスペック <1ms

# 遅延量決定のための試験

$$t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$$

	ビットレート依存の遅延量 $C_1$	固定の遅延量 $C_2$
打ち上げ前の試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビットレートを変化させて時刻の連続性を確認 (低ビットレート試験)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TI計測タイミングから送信機から出力されるまでの時刻を計測</li> </ul>
打ち上げ後の試験		<ul style="list-style-type: none"> <li>GPSが搭載されている場合は可能</li> <li>GPSが搭載されていない場合は不可能</li> </ul>



2022/2/18

ビットレート変更試験

宇宙科学情報解析シンポ

1501150100 +	1502140100 ◆	1503090100 ◇	1503250100 ▼	1504090100 ▽
1501190100 x	1502160100 +	1503110100 ◆	1503260100 ◇	1504100100 ▽
1501230100 *	1502180100 x	1503120100 +	1503270100 +	1504130100 ▽
1502020100 □	1502190100 *	1503130100 x	1503280100 +	1504140100 ◆
1502030100 ■	1502200100 □	1503140100 *	1503300100 *	1504160100 +

20

# 立案における時刻精度

# 管制卓における時刻変換

コマンドのUTCをTIに変換する際には、従来方式と時刻校正システム方式の2種類がある。

## 管制卓における時刻変換

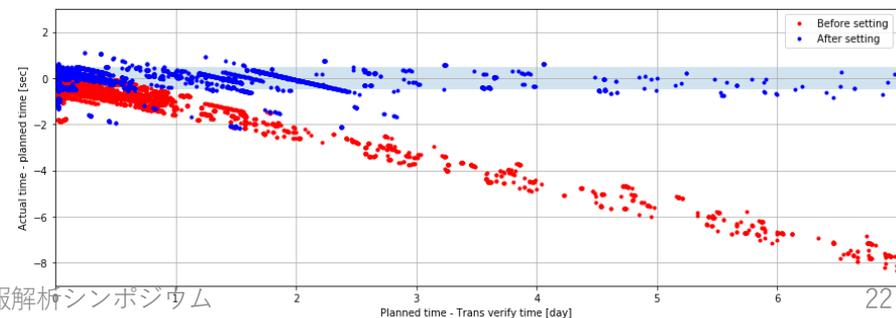
- 直近の時刻校正テレメトリにより( $TI_{直近}$ ,  $UTC_{直近}$ )を取得
- 未来のTIを算出するために時刻レート  $r$  [sec/tick]を使用
- $TI_{未来} = TI_{直近} + (UTC_{未来} - UTC_{直近}) / r$

## コマンド発行の機能として

- UTCで時刻指定した場合、1秒未満は切り捨て
- TIで指定することも可能だが、32bits TIのみ利用可
- 1秒以下の精度で実行するには標準機能とは別に実装が必要

	従来方式	時刻校正システム方式
固定の遅延量補正	なし	あり
ビットレート依存の補正	あり	あり
時刻レートの参照値	固定(管制設定で変更可)	衛星時刻校正表の最終レコード

例:はやぶさ2における時刻レートの調整(右図)  
時刻レート of 設計値そのままではなく、実測値を使用する方がよい



# 立案時の予測精度

$$\text{時刻レート } r = \frac{UTC(t_2) - UTC(t_1)}{TI(t_2) - TI(t_1)} \text{ [s/tick]}$$

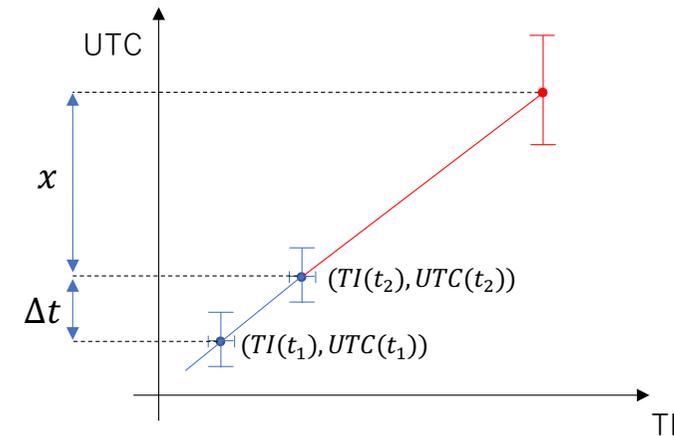
$$\text{時刻レート誤差 } \Delta r = \frac{1}{f} \left( \frac{2\varepsilon}{\Delta t} + \sigma \right) \quad \begin{array}{l} \varepsilon: \text{時刻決定精度}, \sigma: \text{周波数安定度}, f: \text{周波数 } (f = 1/\bar{r}), \\ \Delta t: \text{時刻校正テレメトリ間隔 } (\Delta t = t_2 - t_1) \end{array}$$

$$r = r \pm \Delta r$$

最終時刻校正点から  $x$  秒経過した誤差は  $\left( \frac{2\varepsilon}{\Delta t} + \sigma \right) x$  秒

例)  
時刻決定精度 1ms、周波数安定度  $\sigma = 3\text{ppm}$ 、時刻校正テレメトリ間隔  $\Delta t = 16$  秒とする。

24時間後 ( $x = 86400$ ) では  
 $\left( \frac{2\varepsilon}{\Delta t} + \sigma \right) x = \left( \frac{2 \times 0.001}{16} + 0.000003 \right) \times 86400 = 11.06$  秒



# 立案の時刻精度を上げるためには？

$$\text{時刻レート誤差 } \Delta r = \frac{1}{f} \left( \frac{2\varepsilon}{\Delta t} + \sigma \right) \text{ を小さくしたい}$$

- テレメトリ取得間隔 $\Delta t$ を長くし大きくし時刻決定精度 $\varepsilon$ による項を小さくする
  - 例)  $\Delta t=16 \rightarrow \Delta t=1024$ とすると64倍精度が良くなる
- 安定した温度で運用し周波数安定度 $\sigma$ の実行的な変動を小さくする
- 直近 $N$ 点を用いて最小二乗法によりフィッティングをする
  - 例)  $N=1 \rightarrow N=100$ とすると $\text{sqrt}(100)=10$ 倍精度が良くなる

# アンテナ予報値と時刻誤差 $t_{cal} = t_{ERT} - \frac{distance}{c} - \frac{C_1}{bitrate} - C_2$

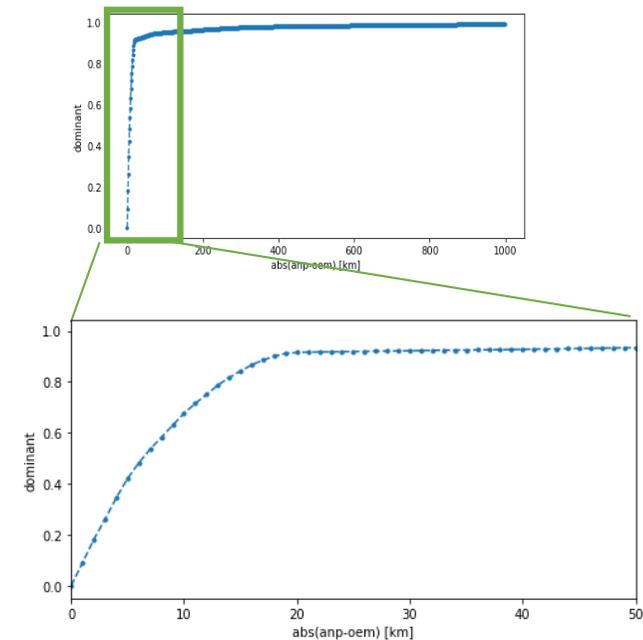
- 立案時に用いられる距離は「アンテナ予報値」を使用する
- アンテナ予報値には(未来の)宇宙機までの「距離」が含まれ、立案時の伝搬遅延の計算はこれを使用する
- この未来の距離と実際の距離の差が「時刻決定の誤差」に含まれる

例) 1msの精度 =  $0.001s \times 30万km/s = 300km$ の軌道決定精度

Hayabusa2のアンテナ予報値と軌道決定値の差

- 20km以下 91.5%
- 20~100km以下 3.7%
- 100~300km 2.4%
- 300km~ 2.4%

Hayabusa2ではアンテナ予報値の誤差は無視可能



# まとめ

## TIとUTCの対応付けの精度向上

- 宇宙機
  - 宇宙機の試験で内部遅延量を正確に計測する(固定の遅延量は打ち上げ後は計測不可能)
  - ビットレート依存項の影響を単純化するために、TI計測点をASM先頭にする
  - ビットレート依存項の影響を減少化するために、高速なビットレートを使用する
  - ビタビ復号の影響を排除するために、畳み込み符号を使わずTURBO符号を使う
  - パケット時刻向上のために、秒未満のTIをユーザデータ部に含める
  - 温度依存性を考慮するために、発信機近くの温度をテレメトリとして出力する
- 地上
  - 地上局の内部遅延量を正確に計測する
  - UDSC64の地上受信時刻についてmsec未満をゼロにしない

## 立案時の時刻精度向上

- 宇宙機
  - 時刻校正テレメトリの間隔を適切に調整する
  - 安定した温度で運用する
  - 最小二乗フィッティング等で統計的に精度向上を行う
- 地上
  - コマンド発行の時刻レートを設計値ではなく、実際に近い値を用いる
  - 1秒未満の精度で実行するためには、コマンド発行標準のタイムライン機能に頼らない
- 伝搬遅延
  - アンテナ予報値の精度が十分か確認するために、軌道決定チームと相談する