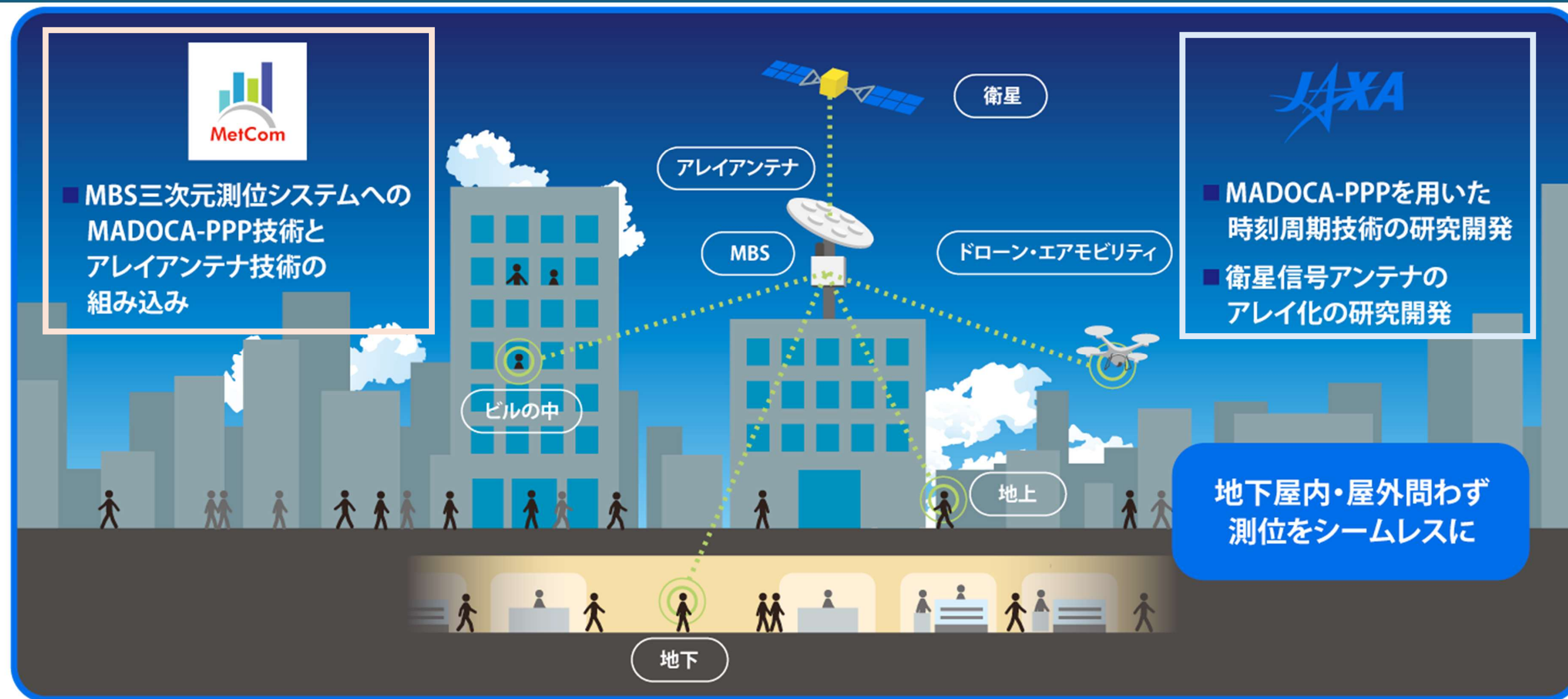


地上波測位システム向けの基地局時刻同期システム

レジリエントPNTワークショップ
JAXAにおけるPNTこうたん性強化に関する研究開発
2026/7/29

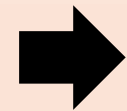
宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門
衛星測位システム技術ユニット
成田秀樹

J-SPARC における MetCom × JAXA の事業共創



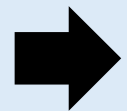
J-SPARCの枠組みのもと、2023年10月より「地上波方式測位システム」に関する共創活動を開始

MetCom



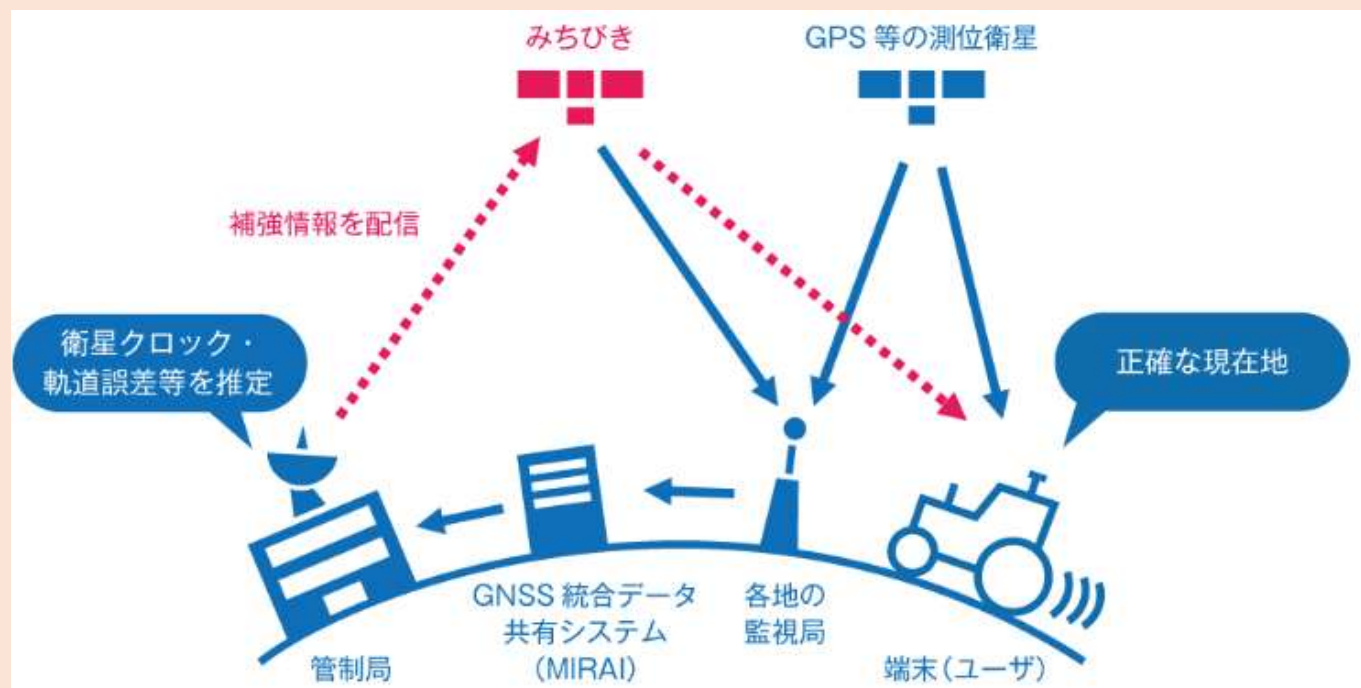
衛星測位システムの弱点を補完し、屋内外でシームレスな三次元測位サービスを提供

JAXA



MADOCA-PPPを用いた、高精度かつジャミング・スプーフィング耐性を有する時刻同期システムの研究開発

ユーザー測位ソフトウェアMALIBへの時刻同期機能実装(MALIB-T)



MADOCA-PPP概要図

MALIB

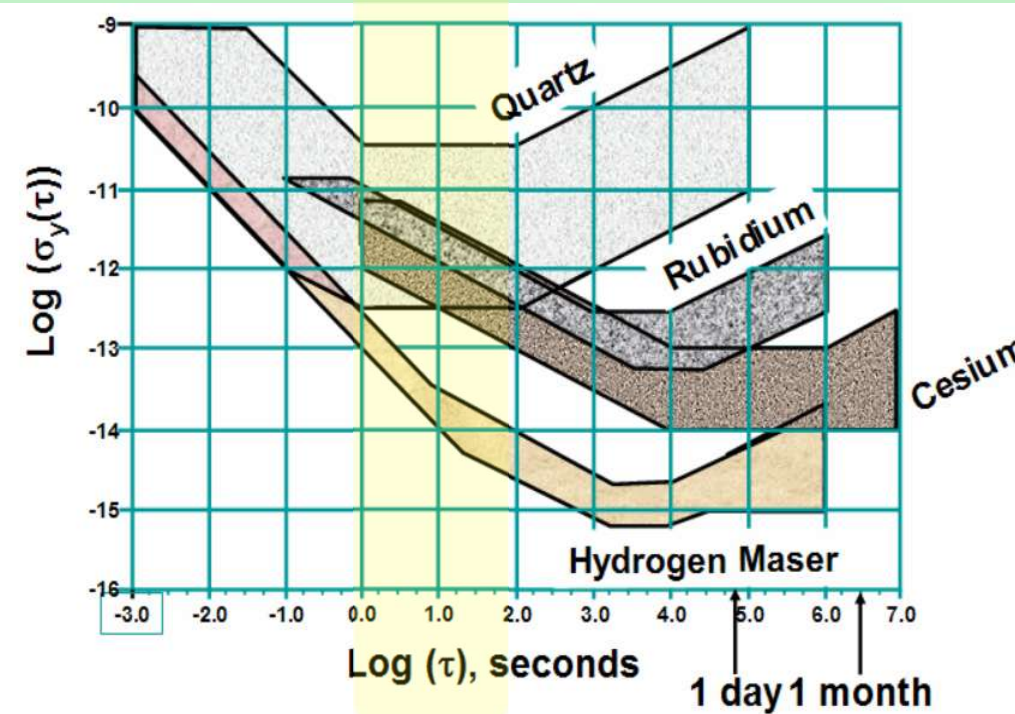
みちびきの高精度測位補強サービス(MADOCA-PPP)を用いたオープンソースの単独高精度測位プログラムパッケージ

MALIB-T

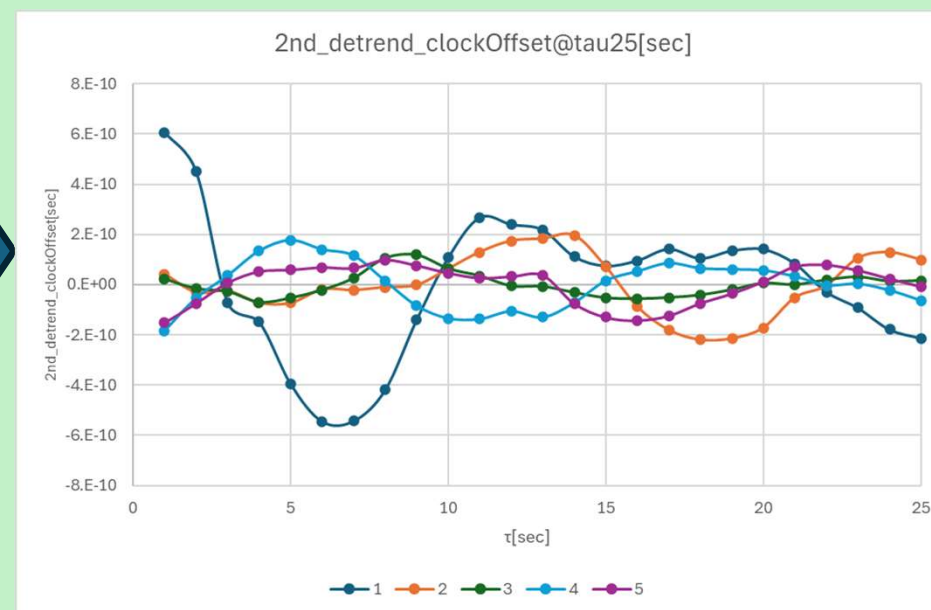
MALIBの測位解から得られるクロックオフセットを入力とし、クォーツ時計の周波数安定度を考慮したアルゴリズムにより、約 1×10^{-11} 秒の高安定なペーパークロックを生成する。生成したペーパークロックを基準として、リアルクロック制御および各装置との時刻同期を行う。

MALIB-T アルゴリズム概要

クォーツの安定度が良い区間でトレンド除去



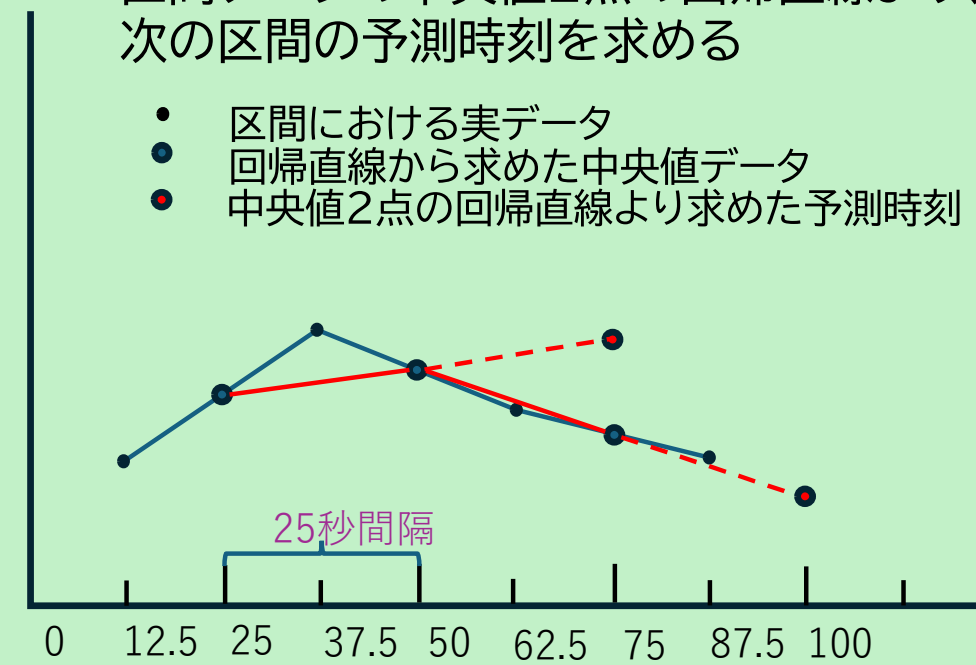
原子時計のアラン標準偏差



二次トレンド除去後のクロックオフセット

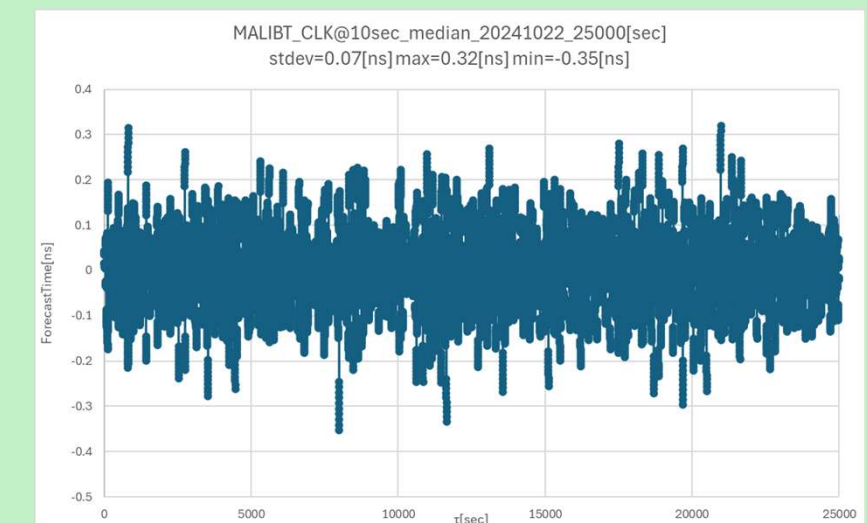
区間データの中央値2点の回帰直線より、次の区間の予測時刻を求める

- 区間における実データ
- 回帰直線から求めた中央値データ
- 中央値2点の回帰直線より求めた予測時刻



回帰直線による予測時刻生成

1 E-11秒オーダーでの時刻同期可能



10秒間隔のトレンド処理後、中央値を取ることで取得した予測時系データ
標準偏差@2500[sec]:70[ps]

MADOCA-DOへのMALIB-T実装効果

装置仕様

分類	項目	仕様	
MADOCA-DO	補足信号	衛星システム	周波数帯
		GPS	L1,L2,L5
		QZSS	L1,L2,L5,L6
		GLONASS	L1,L2,L3
		Galileo	E1,E5a,E5b,E5 AltBoc,E6
		BeiDou	B1,B2,B3
	測位方式	SBAS	EGNOS,WAAS,GAGAN,MSAS,SDCM
		MADOCA-PPP、CLAS、DGPS、単独測位	
	TOD-IF	RS-232C	2ch(NMEA)
	外部同期	クロック入力	1ch(10MHz/50Ω/3.3V/SMA)
		1PPS入力	1ch(50Ω/3.3V/SMA)
	外部出力	クロック出力	6ch(10MHz/50Ω/3.3V/SMA)
		1PPS出力	6ch(50Ω/3.3V/SMA)
	筐体	寸法	190x300x80[mm](突起物除く)
		重量	T.B.D
		材質	金属製
電源	入力電圧	DC5V~12V	
	消費電力	T.B.D	

装置外観図(試作)



GNSSアンテナ (Tallysman Veraphase6000)

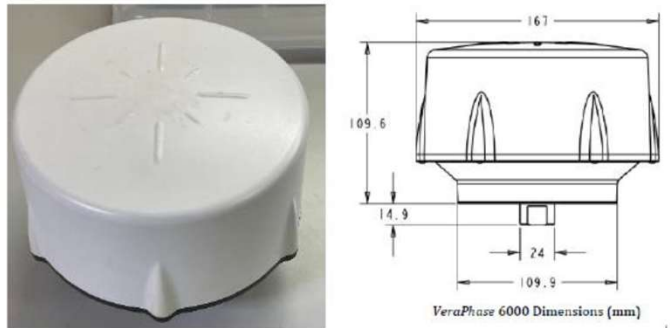


表 各装置に実装されている原振種とその価格帯

搭載装置	原振種	メーカー	価格帯
GPS board(MBS従来品)	Rubidium Atomic Clock	調査中	数百万円~数十万円
MADOCA-DO(CSAC版)	CSAC (Chip Scale Atomic Clock)	Microchip Technology	百数十万円
MADOCA-DO(OCXO版)	OCXO	Rakon社製 OCXO (STP3539LF)	十数万円

上に各装置に実装されている原振種とその価格帯を示す。価格帯は **Rb原子時計 > CSAC > OCXO** という結果になり、今回の開発により、**原振価格は既製品のMADOCA-DO(CSAC版)の1/10となる。**

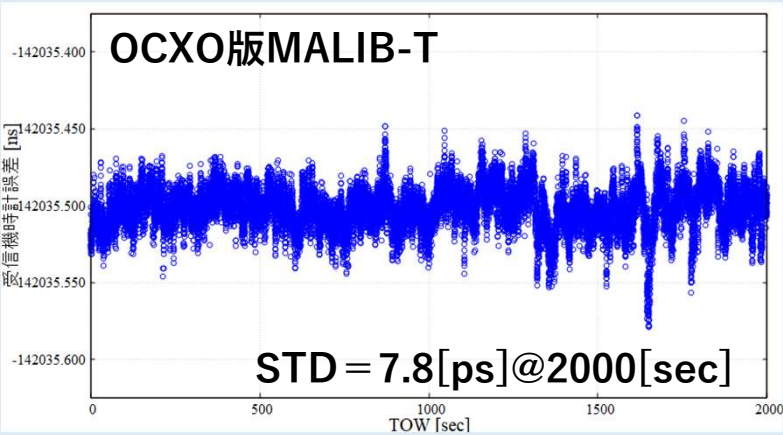
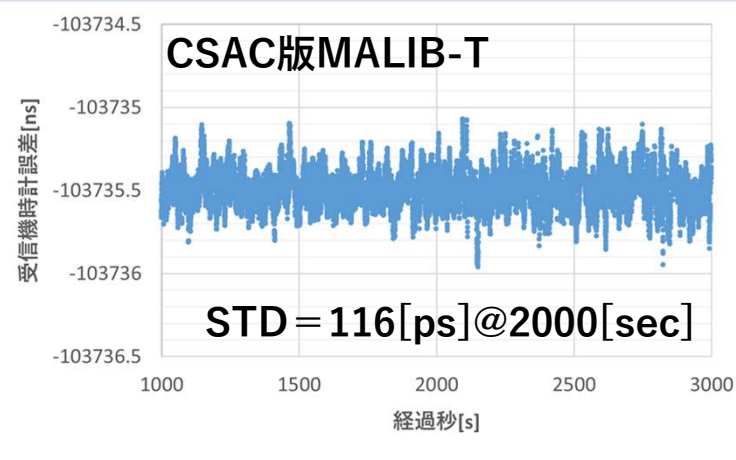
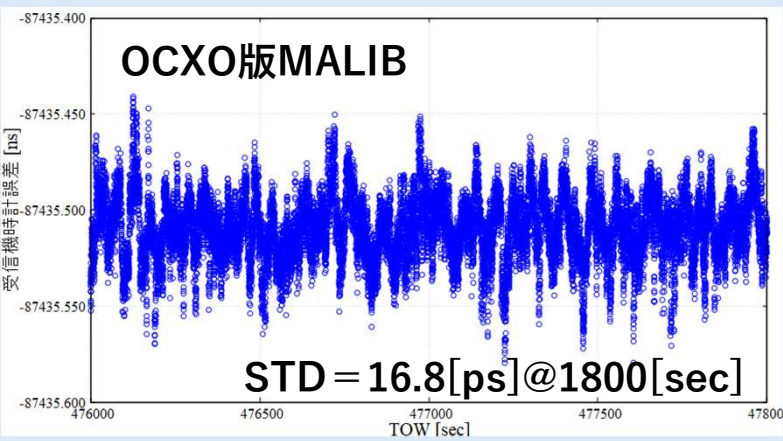
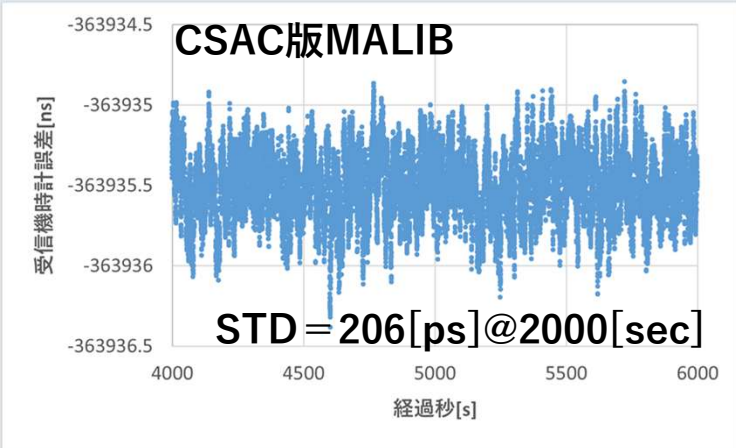
コア社開発製造品ANCHOR(MADOCA-DO(CSAC版))

表 原振変更及びソフトウェア変更時の受信機時計誤差の標準偏差

	MALIB実装	MALIB-T実装
CSAC版	206[ps]	116[ps]
OCXO版	16.8[ps]	7.8[ps]

左図に、MADOCA-DOを予測時刻によりフィードバック制御した際のクロックオフセットを示し、上表にその標準偏差を示す。結果より、CSAC版と比較してOCXO版の方が高い時刻安定度を示した。また、**従来のMALIBと比較して、MALIB-T実装時のクロックオフセットの標準偏差が低減し、時刻同期精度が向上することを確認した。**

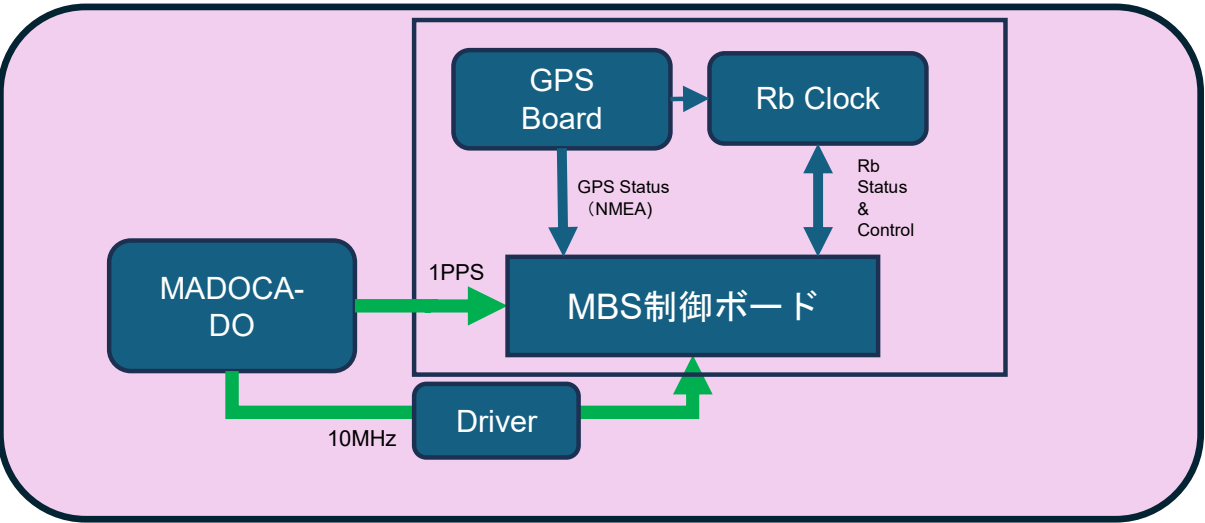
MADOCA-DO(OCXO版) + MALIB-T
➡ 低価格化 + 高精度化



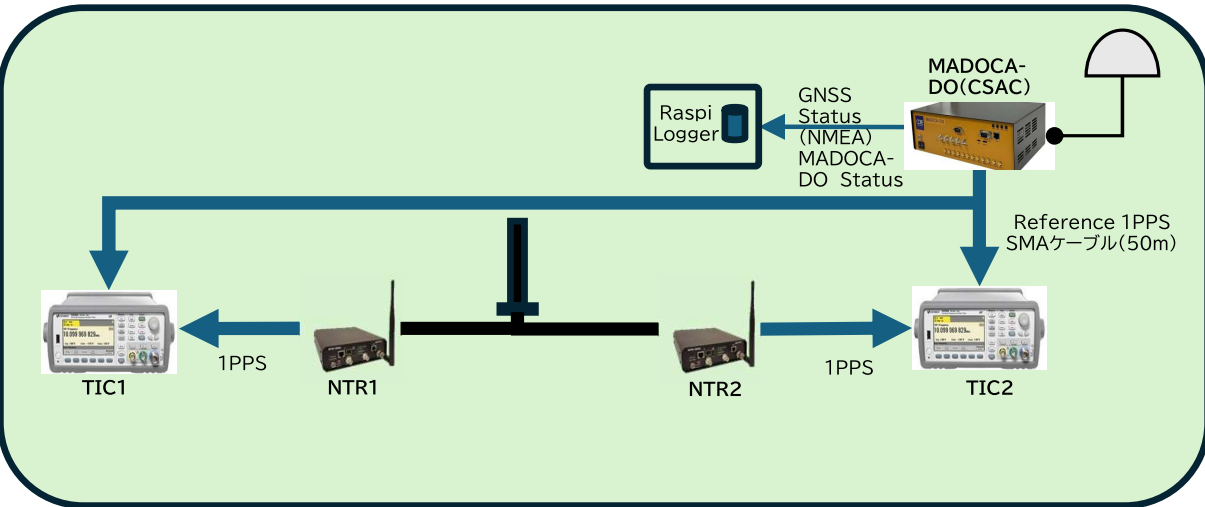
各種MADOCA-DOフィールド試験結果



立命館大学びわこ・くさつキャンパス 実験フィールド



MBS送信機システム

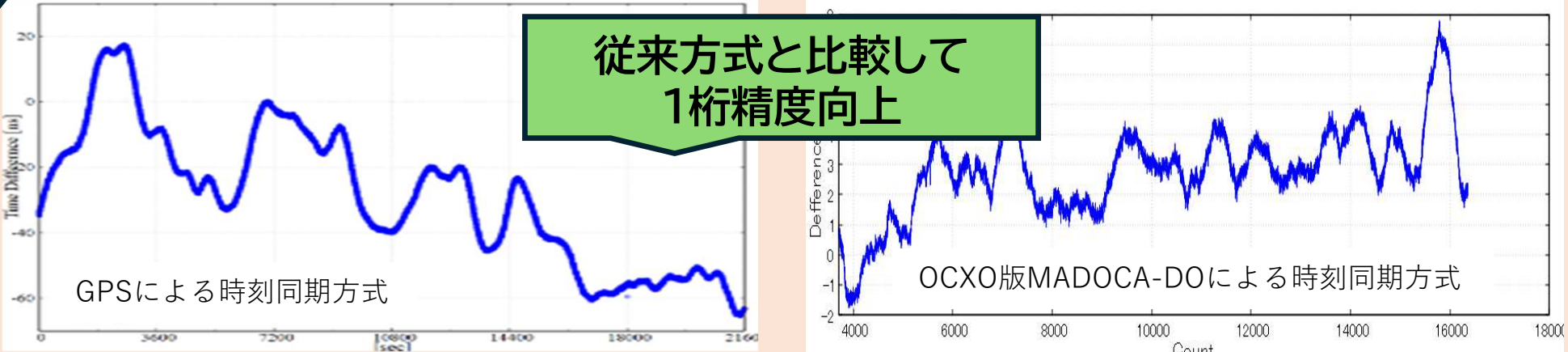


MBS受信システム及び計測系

OMBS送信機とMBS受信機の時刻比較結果(基地局間の時刻同期精度)

*リファレンス受信機はANCHOR=コア製MADOCA-DO(CSAC版)

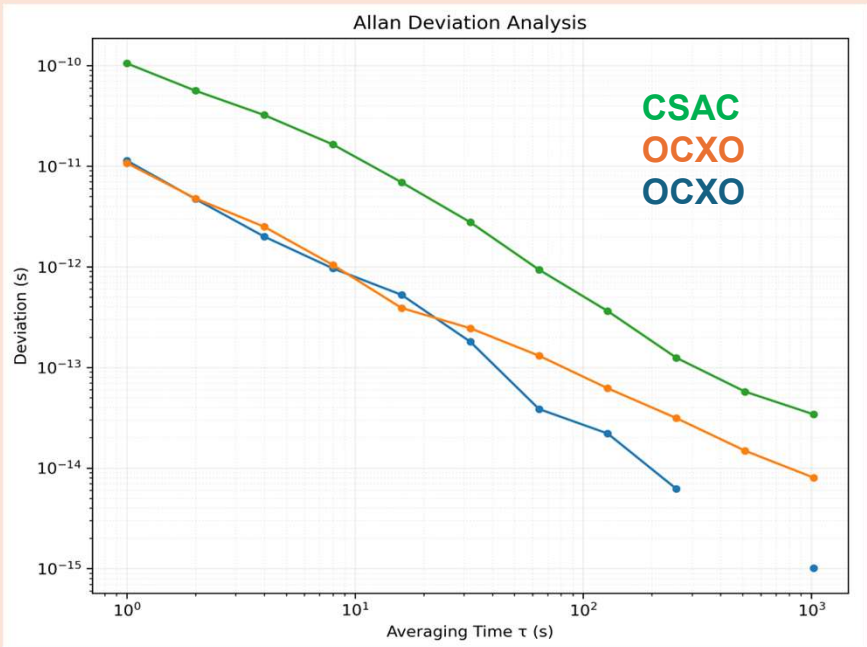
MALIB-T実装のMADOCA-DO(OCXO版)で時刻同期する方法が最も位相、安定度、共に良い精度



各方式によるMBS送信機-受信機間における時刻比較結果

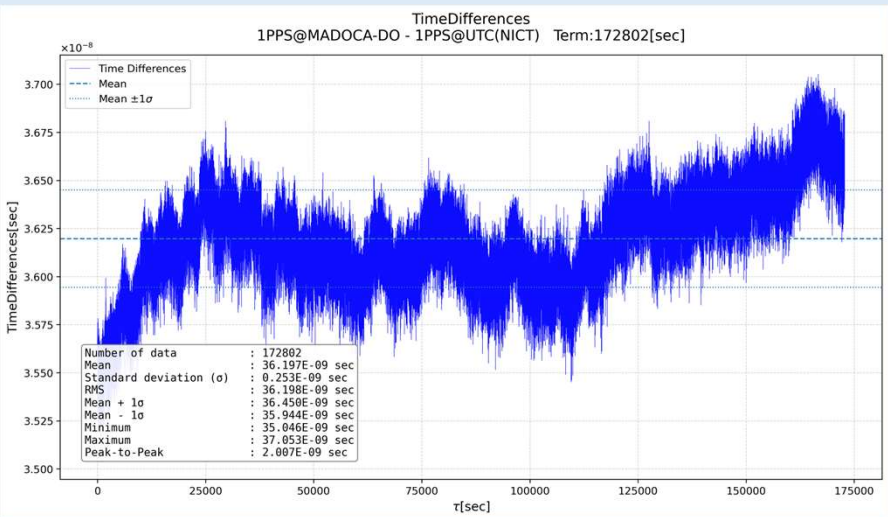
時刻同期方式	GPS board (従来方式)	CSAC版	OCXO版 (2024)	OCXO版(2025) (MALIBT実装)基地局 間同期精度
標準偏差	20.891[ns]	8.059[ns]	2.399[ns]	1.482[ns]

表 各時刻比較結果における、各受信機の標準偏差

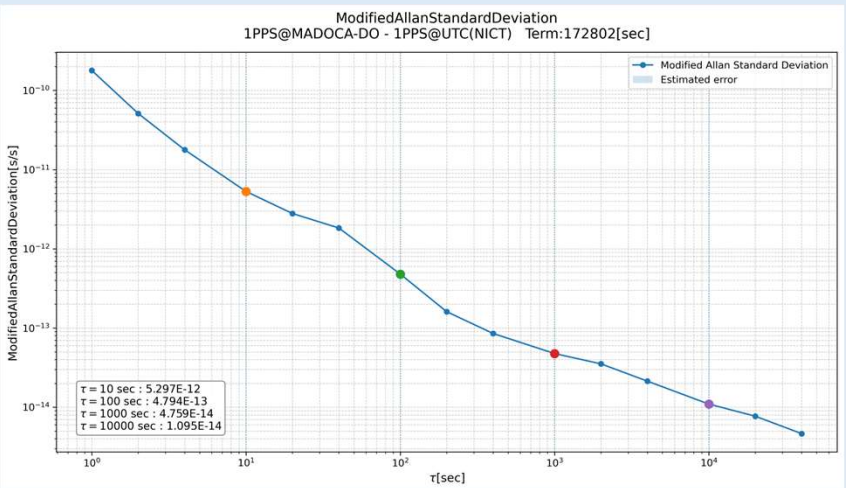


MADOCA-DOの原振別のアラン標準偏差

UTC(NICT) との評価



MALIB-T実装MADOCA-DOとUTC(NICT)の時刻比較結果@17280[sec]



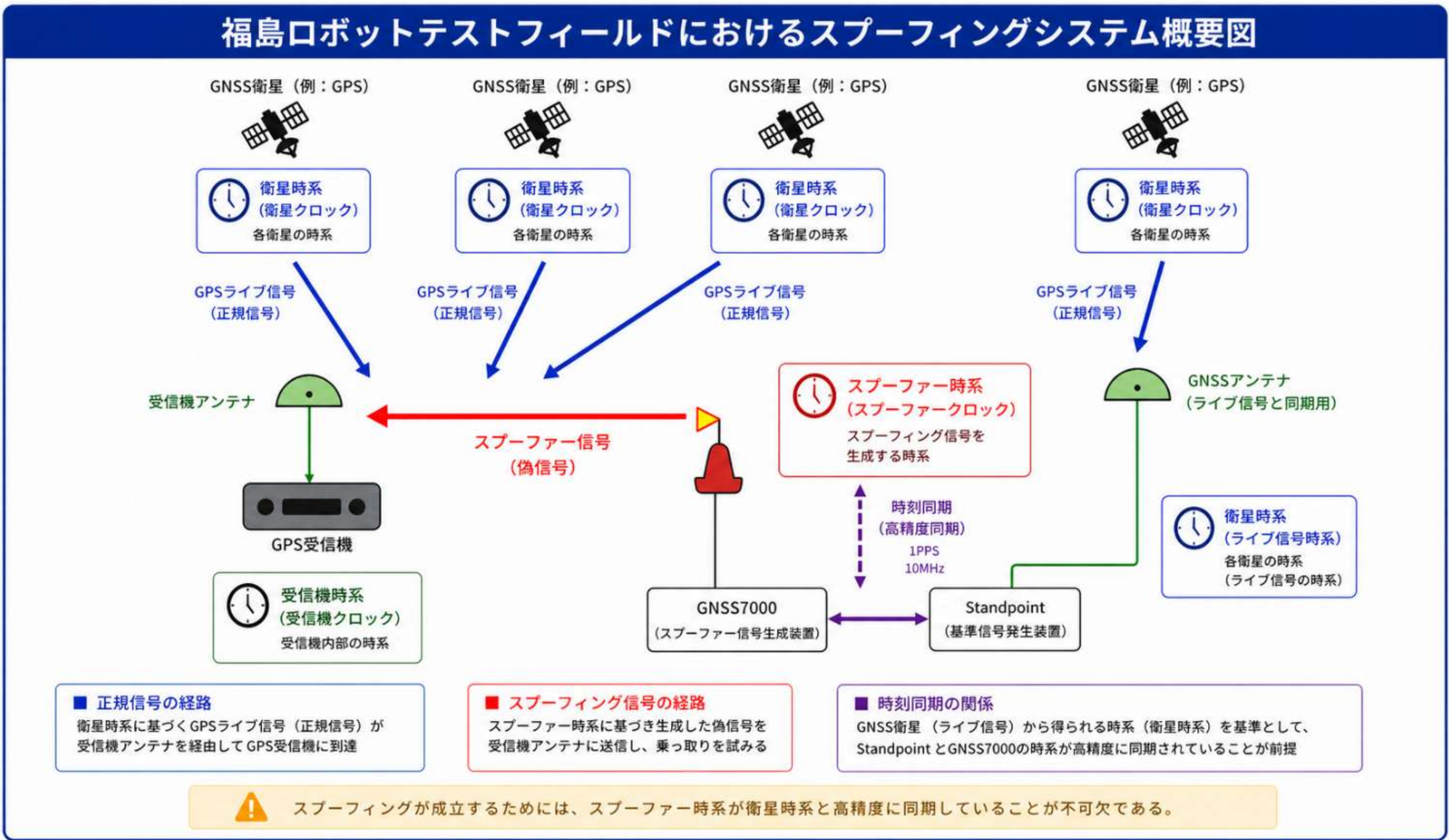
MALIB-T実装MADOCA-DOとUTC(NICT)の時刻比較結果@172800[sec]のアラン標準偏差

UTC(NICT) の1PPS信号とMALIB-T実装MADOCA-DO(OCXO版)の1PPS信号の時刻比較計測(172800秒)を周波数カウンタを用いて行った

その結果、標準偏差は約250[ps]、約二日間の計測でアラン標準偏差が経過時間1万秒過ぎで、-15乗台の値を確認

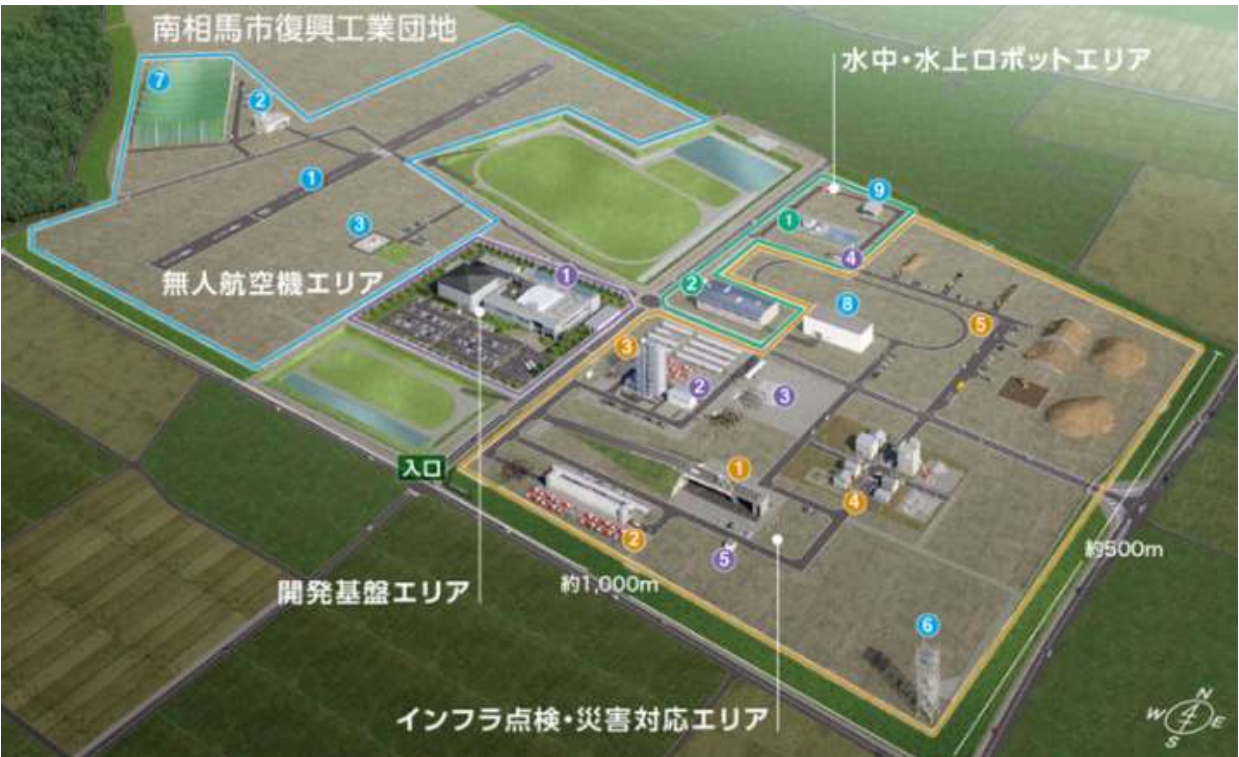
計測基準	平均値[ns]	標準偏差[ns]
UTC(NICT)	36.197	0.253

福島ロボットテストフィールド施設及びスプーフィングシステム概要



福島RTFスプーフィングシステム概要図

GNSSライブ信号と高精度に時刻同期したスプーファー信号を生成し、実環境に近いスプーフィング試験を実現するシステムを構築。



福島RTF実験施設概要

模擬市街地、橋梁・トンネルなどの模擬インフラ、水中・飛行試験エリアを備えたロボット実証試験施設。

まとめ

- MALIB-T実装MADOCA-DOについて、従来のGPS+Rb原子時計方式と比較して、MBS経由の時刻同期精度を約10倍向上したことを確認した。
- OCXO採用による低価格化とMALIB-Tによる高精度時刻同期を実現し、UTC(NICT)との約2日間の時刻比較結果において約250 psの時刻同期精度、および10,000秒で 10^{-15} 台の周波数安定度を達成した。
- スプーフィング実証試験により、MALIB-Tの異常検知・ホールドオーバー機能の有効性を実証した。今後は長期運用環境での実証を進める。

謝辞

Team Spoofing Test@福島RTF2026 powered by
IPNTJ Sponsored by LocationMind(株)、(株)AmTeches、ソ
フトバンク(株)、大阪公立大学、東京海洋大学、JAXA

Spirent社のGSS7000とStandpointはAmTechs様よりアカ
デミック条件で提供を受け使用しました。