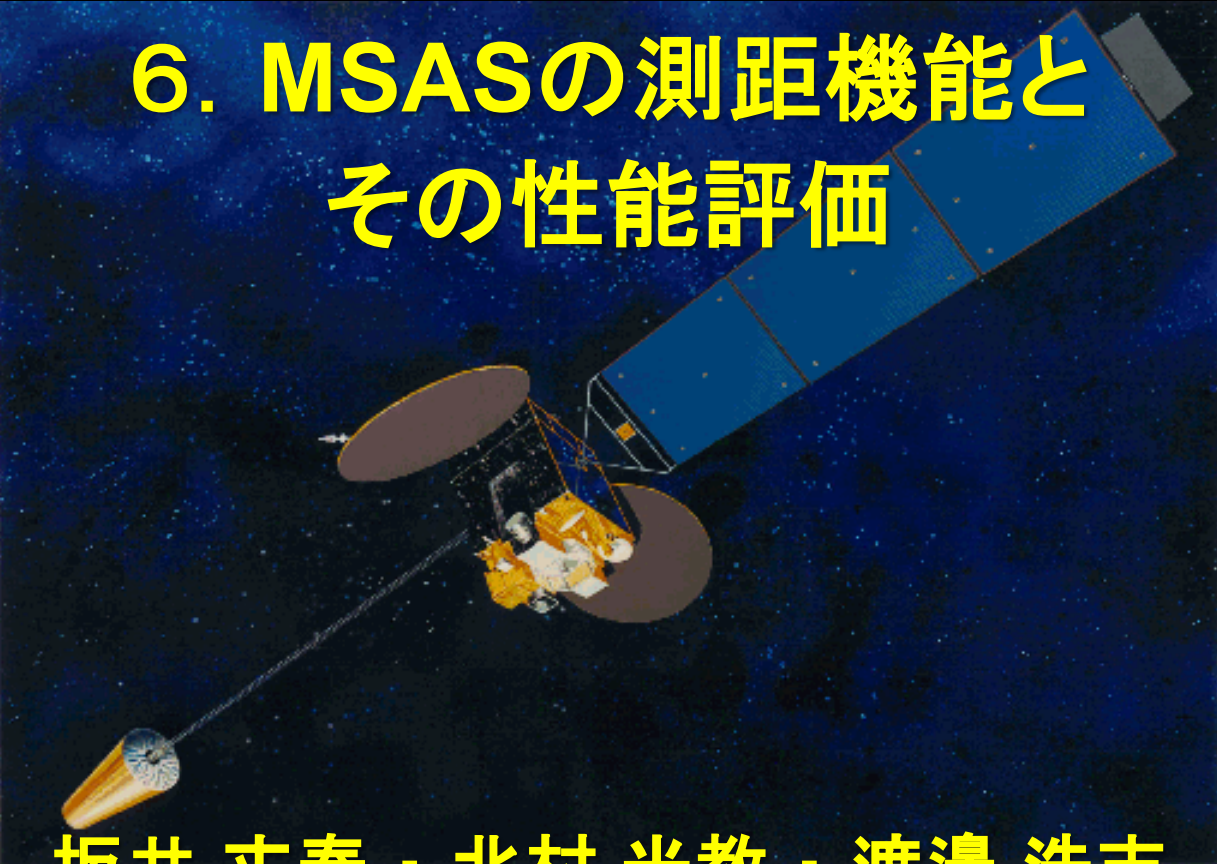


6. MSASの測距機能と その性能評価

An illustration of a satellite in space. The satellite has a central body with various instruments and a large, flat, rectangular panel extending from it. A long, thin tether is attached to the satellite and extends downwards to a conical, orange-colored payload. The background is a dark blue space filled with stars.

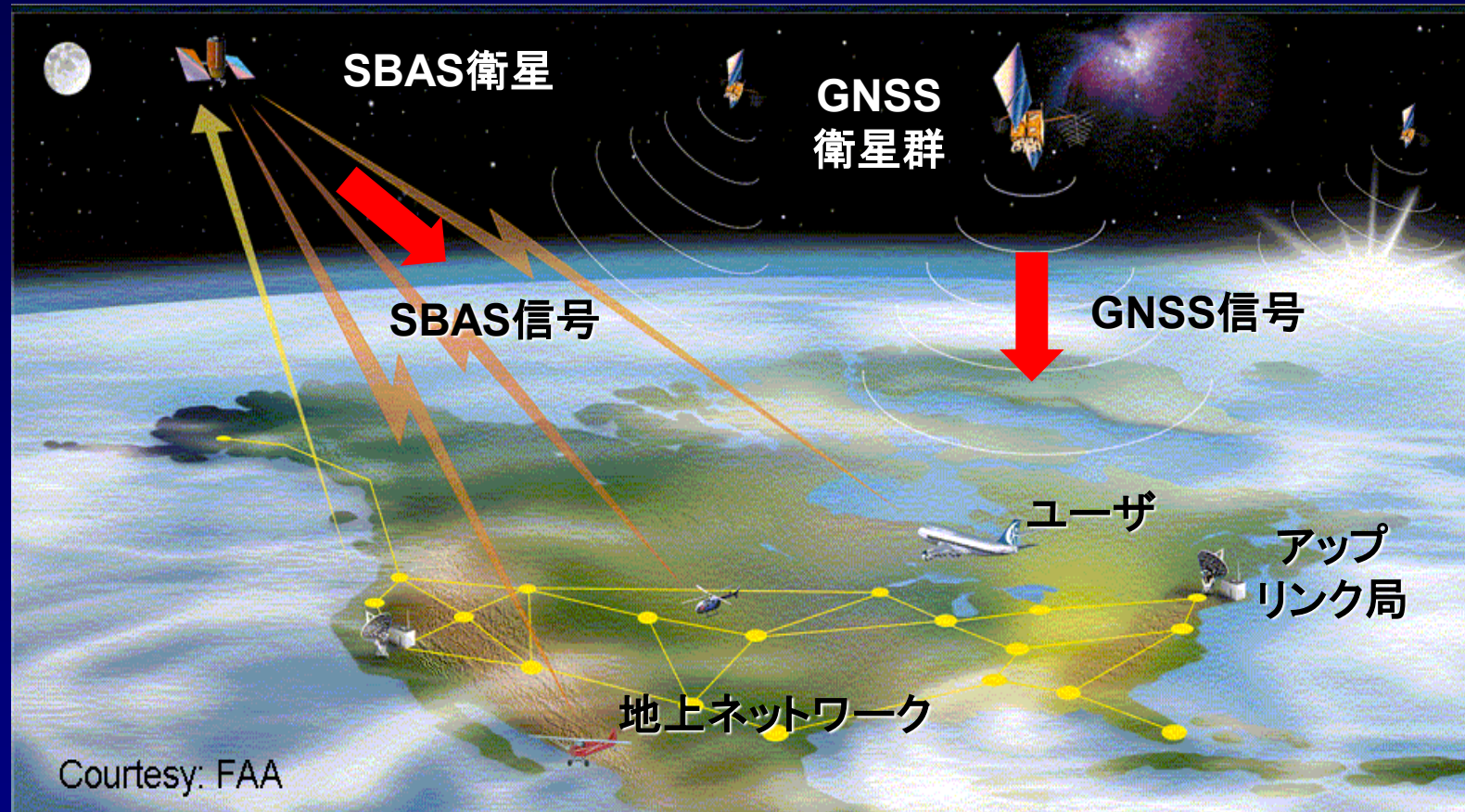
坂井 文泰・北村 光教・渡邊 浩志
航法システム領域

Introduction

- **静止衛星型衛星航法補強システム(SBAS) :**
 - 静止衛星によるGPS補強システムのICAO(国際民間航空機関)標準規格。
 - 目的:GNSSによる航法の安全確保。測位精度はサブメータ級。
 - 測距機能:GPSと同様に距離を測定して位置の計算に使用できる。
- **日本のSBASサービス:MSASの測距性能**
 - MSASは以前は測距機能を提供していたが、現在は提供していない。
 - 2015.9:MTSAT-1R退役
 - 2020.4:QZS-3への切替え、地上施設の全面更新、測距機能はなし
 - 今後の測距機能の活用のため、新旧のMSASの測距性能を評価した。
 - 2023年頃の性能向上にあわせて、静止衛星の追加が予定されている。
 - QZS-3ではSBAS信号が広帯域化されており、以前より測距性能が改善していると思われる。
- **本日の内容:**
 - (1) SBASの概要 補強システム、SBAS規格
 - (2) SBASの測距機能 SBAS信号、測距機能のためのメッセージ
 - (3) MSASの測距性能 MSASの変遷、時期別の測距性能評価

(1) SBASの概要

ICAO SBAS

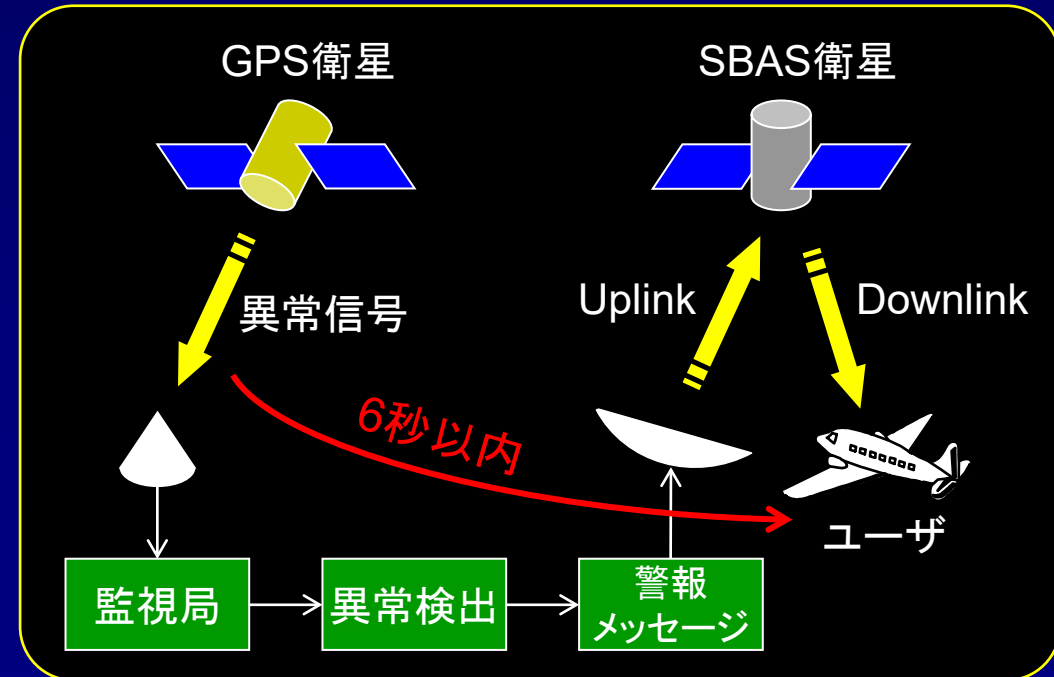


- 地上ネットワークによりGNSS信号を監視(異常の有無・測距誤差)
- ディファレンシャル補正情報及び完全性情報をSBAS衛星経由で送信
- L1 C/Aコード信号を使用:GPSとアンテナ・RF回路を共用

SBASの機能(1)

インテグリティ(完全性)の確保

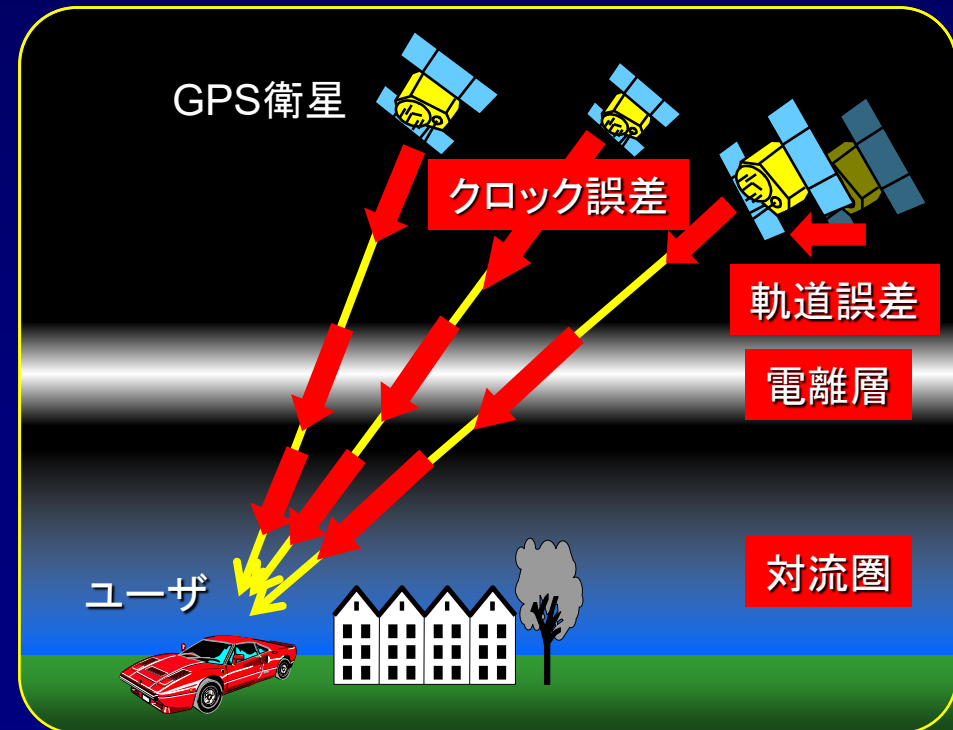
- GPS衛星が放送する信号の品質に関する情報を提供する。
- GPSが誤った信号を送信したとき、受信機が誤って使用しないようにするのが目的。
→ 航法の安全を確保するための機能。
- 警報時間(TTA: time to alert) = 情報が提供されるまでの時間: 航空路・ターミナル空域では5分~15秒以内、非精密進入では10秒以内、精密進入では6秒以内。
- 十分なアベイラビリティのサービス
→ RAIM予測のような措置は不要。
- 基本的な仕組み:
 - 地上監視局でGPS信号をモニタ。
 - GPS信号の品質に関する情報を生成・伝送。
 - 異常検出時は、警報メッセージを送信。



SBASの機能(2)

測位精度の改善(ディファレンシャル補正)

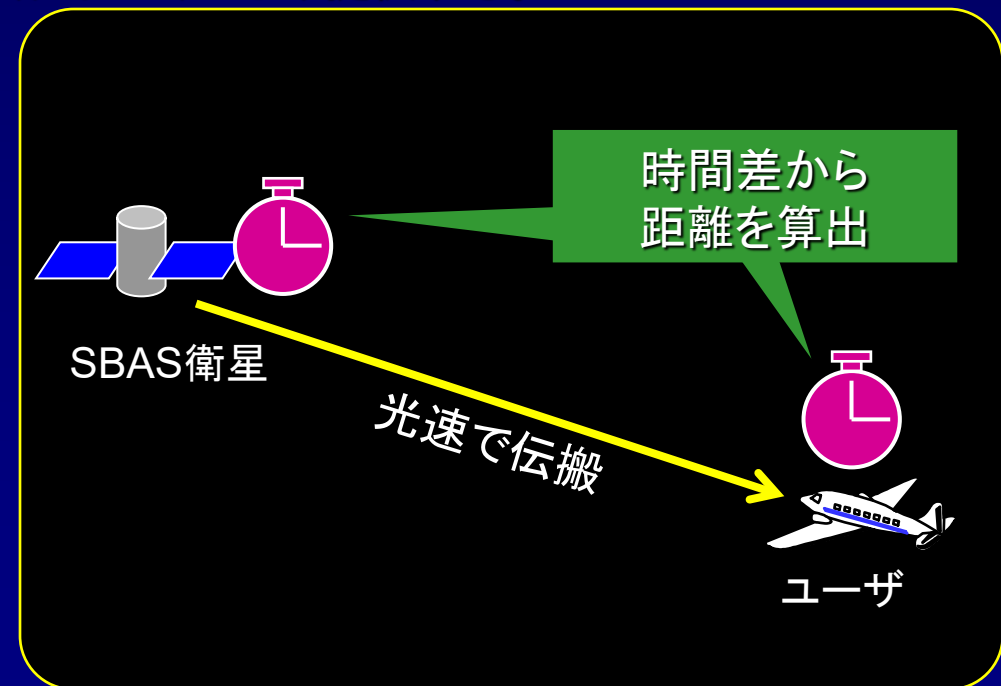
- GPS衛星の信号により測定した距離の補正情報。
- GPSによる測位精度を改善する:ディファレンシャル補正。
- 広域ディファレンシャル補正方式:衛星クロック・軌道、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延を個別に補正 → 大陸規模の広い範囲で有効な補正情報。
- 補正により、1m以下の測位精度が得られる。
- 基本的な仕組み:
 - 地上監視局でGPS信号をモニタ。
 - 距離測定のエラー要因を、衛星クロック・軌道、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延に分解。
 - エラー要因別に補正情報を生成、メッセージにして伝送。



SBASの機能(3)

測距機能(レンジング機能:オプション)

- SBAS衛星までの距離を受信機が測定し、GPSと同様に位置計算に利用するための機能(レンジング機能)。
- SBAS信号のRF特性はGPS信号と同一なので、GPSの場合と同様の方法により距離を測定できる。
- SBAS衛星の軌道情報は、SBASメッセージ(タイプ9)により提供する。
- 距離の測定精度はSBAS信号の帯域幅にもよる。
- 基本的な仕組み:
 - GPSと同期したタイミングでSBAS信号を生成・送信。
 - 複数の地上監視局で測定した擬似距離を利用して、SBAS衛星の軌道情報を生成・送信する。



(2) SBASの測距機能

測距機能の利用

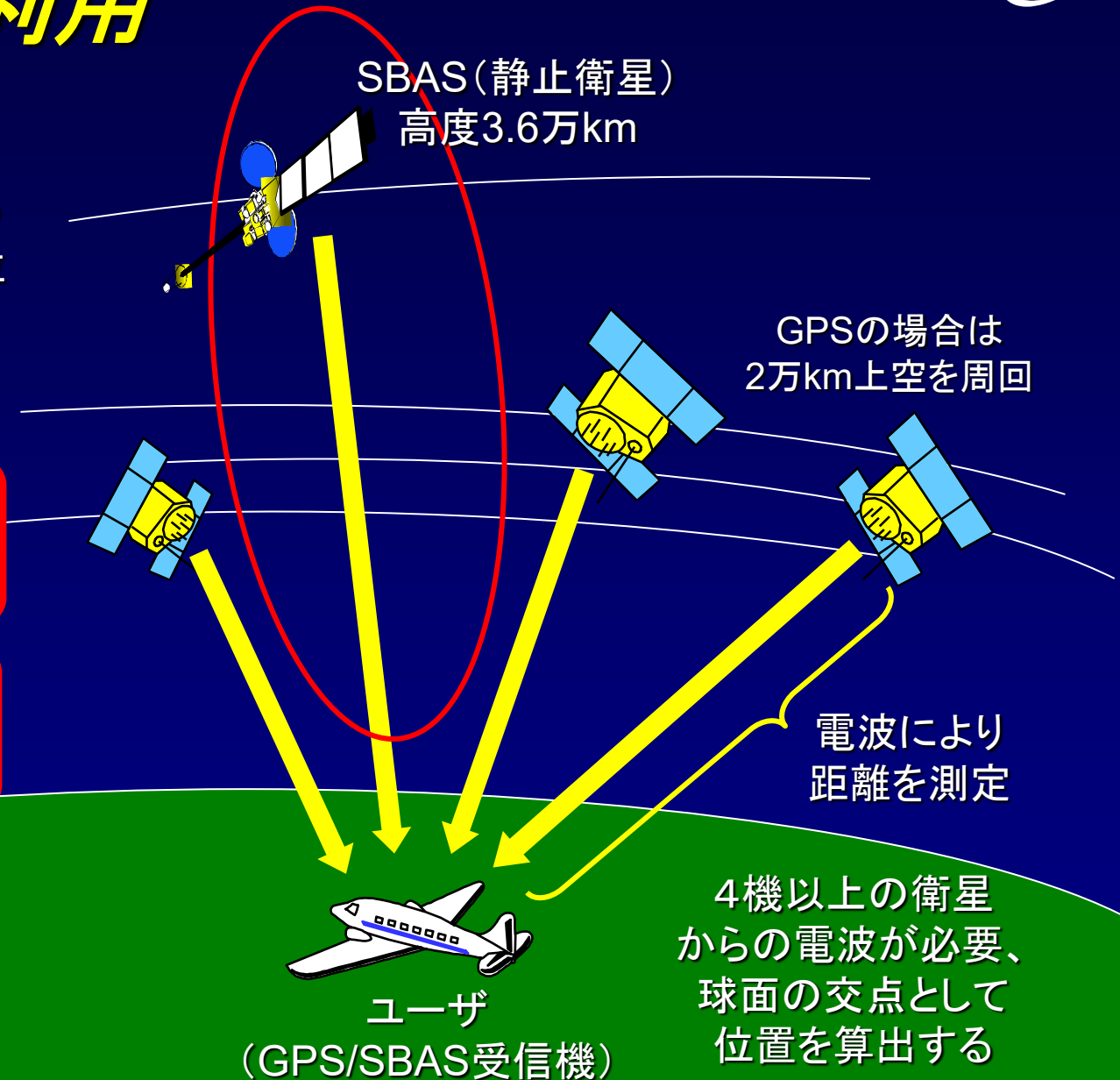
- SBAS信号の測距機能を利用して、SBAS衛星-受信機間の距離を測定し、GPSと同様に位置計算に使用する。

必要なこと

測距信号として
拡散変調されていること

GPS信号に
近い周波数であること

SBAS衛星のクロックと
位置の情報が送信されること



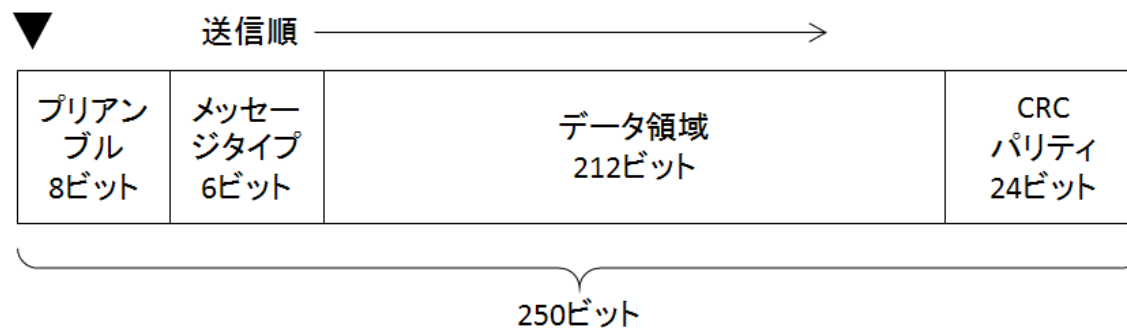
SBAS信号

- L1周波数(1575.42 MHz) C/Aコード(PRN 120~158) ←GPSと同じ
- 250ビットの固定長メッセージを每秒1個ずつ送信。
 - メッセージの先頭ビットはGPSエポックに同期
- FEC符号(拘束長 $K=7$)により每秒500シンボルになる。3dBの符号化ゲイン。
- メッセージタイプ0~63: 高速補正(2~5)、長期補正(24/25)、インテグリティ情報(2~6/25)、電離圏補強メッセージ(18/26)など



PRN 120~158

先頭ビット



L1 SBASメッセージ

タイプ	内 容	更新間隔(s)	説 明
0	テストモード	6	SBASは使用禁止
1	PRNマスク	120	補強対象の衛星を示すマスク情報
2~5	高速補正	6	クロック補正+インテグリティ情報(UDREI)
6	インテグリティ情報	6	インテグリティ情報(UDREI)
7	高速補正劣化係数	120	インテグリティ情報(UDREI)の時間的劣化係数
9	<i>静止衛星測距機能</i>	120	<i>SBAS衛星のクロックと位置の情報(静止衛星エフェメリス)</i>
10	劣化係数	120	保護レベルの計算で使用する係数
12	SBAS時刻情報	300	SBAS時刻とUTCの対応をあらわすパラメータ(オプション)
17	静止衛星アルマナック	300	SBAS衛星のアルマナック情報
18	IGPマスク	300	電離圏遅延量の格子点(IGP)のマスク情報
24	高速/長期補正	6/120	高速補正+長期補正(衛星数によっては送信されない)
25	長期補正	120	クロック・軌道の補正情報
26	電離圏伝搬遅延	300	格子点(IGP)における電離圏遅延量
27	SBASサービス情報	300	インテグリティ情報(UDREI)のユーザ位置による劣化係数
28	クロック・軌道共分散	120	(MT27とMT28のいずれかが送信される)
62	テストメッセージ	—	内容不定
63	ヌルメッセージ	—	空き

タイプ9: 静止衛星エフェメリス

項目	ビット数	範囲	分解能
(予約)	8	—	—
$t_{0,GEO}$	13	0 to 86384	16
URA	4	0 to 15	1
X_G	30	± 42949673 m	0.08 m
Y_G	30	± 42949673 m	0.08 m
Z_G	25	± 6710886.4 m	0.4 m
\dot{X}_G	17	± 40.96 m/s	0.625 mm/s
\dot{Y}_G	17	± 40.96 m/s	0.625 mm/s
\dot{Z}_G	18	± 524.288 m/s	4 mm/s
\ddot{X}_G	10	± 6.4 mm/s ²	1.25 mm/s ²
\ddot{Y}_G	10	± 6.4 mm/s ²	1.25 mm/s ²
\ddot{Z}_G	10	± 32 mm/s ²	6.25 mm/s ²
a_{Gf0}	12	± 0.9537 ms	2^{-31} s
a_{Gf1}	8	± 0.11642 ns/s	2^{-40} s/s

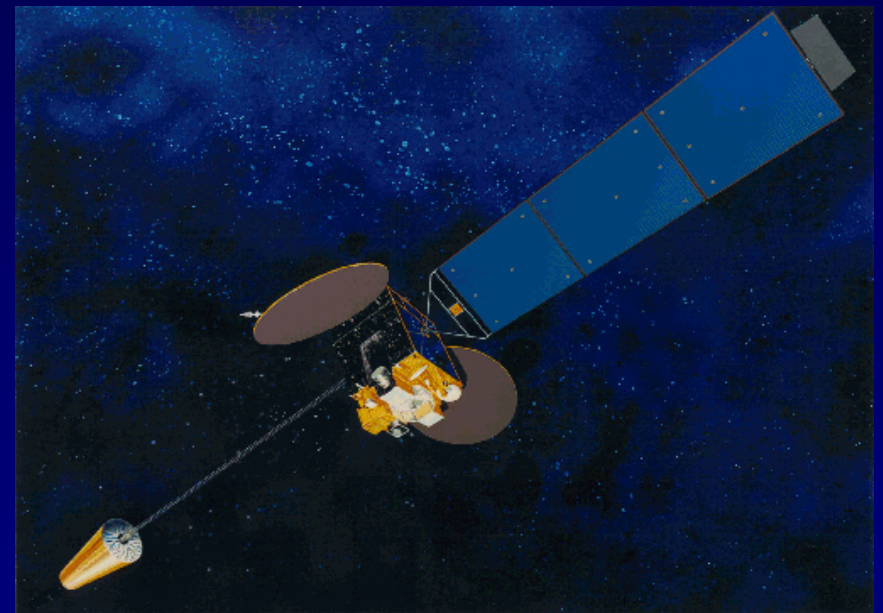
SBAS衛星の
位置
(+速度・加速度)

SBAS信号の
クロック情報

(3) MSASの測距性能

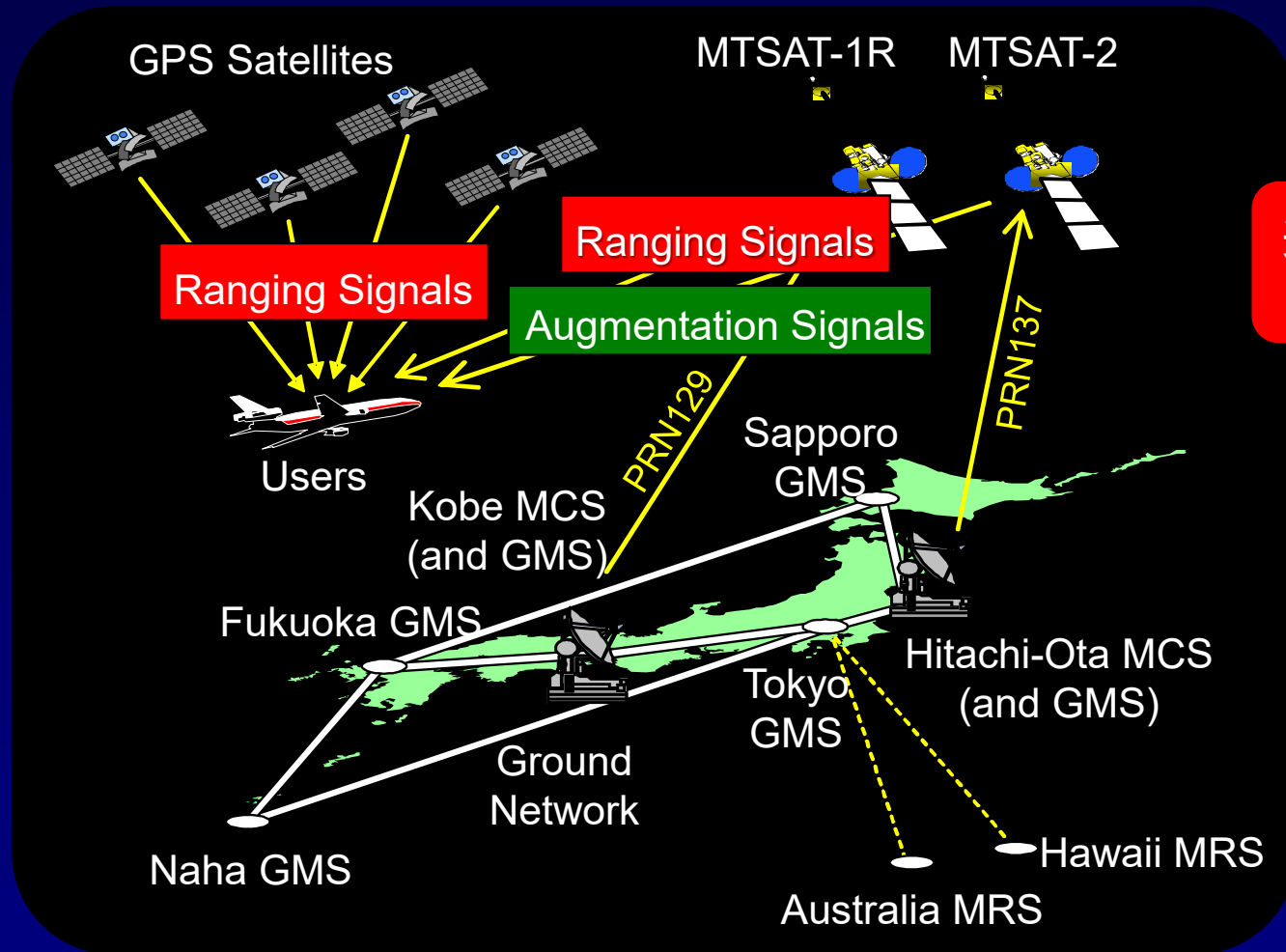
MSASの整備

- MSAS (MTSAT-based Satellite Augmentation System) : 静止衛星による広域補強システム (ICAO SBAS)。
- 運輸多目的衛星MTSAT-1R/-2を使用して、2007年9月27日に運用を開始 (MSAS V1)。
- 衛星の寿命が到来したことから、2015年9月にMTSAT-1Rの使用を停止。同時期にハワイ・オーストラリアの標定局を廃止。
 - MTSAT-2のみによる運用を継続。
- MTSAT-2も寿命を迎えたことから、2020年4月からQZS-3を使用する構成に変更 (MSAS V2)。
 - MSAS (Michibiki-based Augmentation System) : 地上設備もすべて一新した。
- 現在まで、MSASは水平方向の航法のみを提供。
 - NPA (非精密進入) モードまで。LPV (垂直誘導付き進入) モードは2023年頃に予定。



MTSAT-1R軌道上イメージ

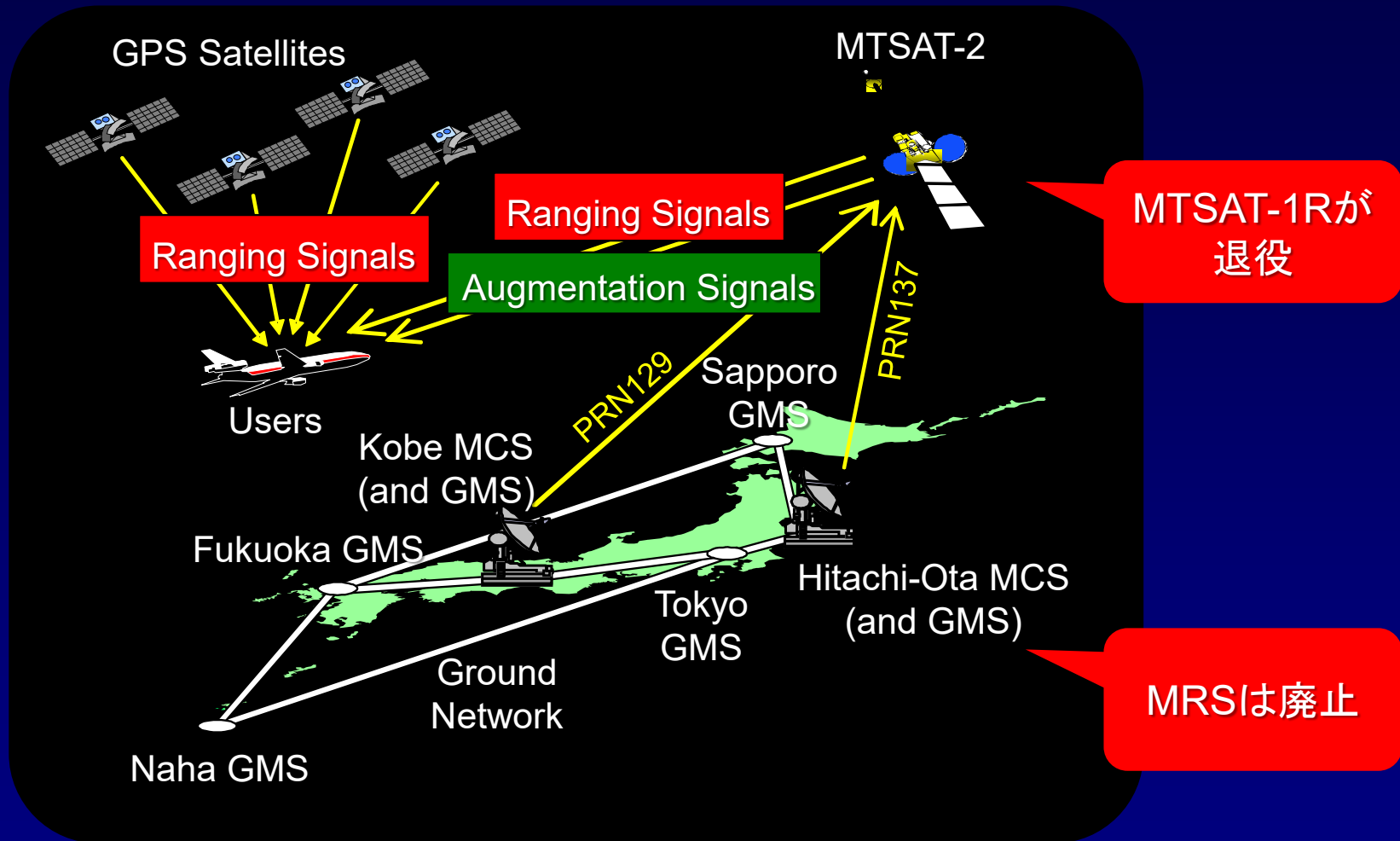
MSAS V1 (2007.9~2015.9)



運用開始当初
の構成

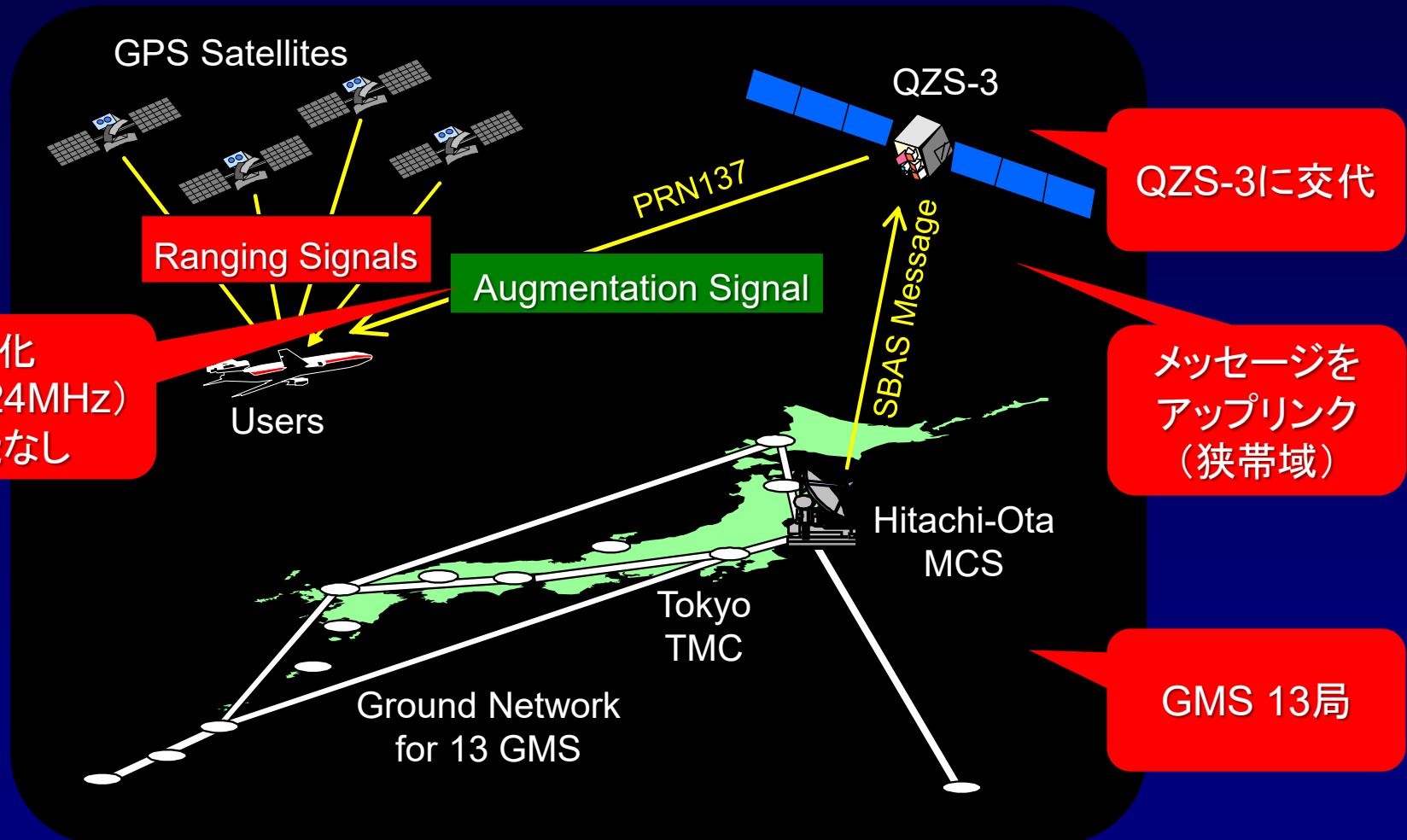
- 静止衛星 2機、航法統制局 (MCS) 2局、監視局 (GMS) 6局、標定局 (MRS) 2局。
- MCSがSBAS信号を生成、MTSAT-1RがPRN129を、MTSAT-2はPRN137を中継。
- 測距機能が提供されていた。

MSAS V1 (2015.10~2020.3)



- 静止衛星 (MTSAT-2) 1機、航法統制局 (MCS) 2局、監視局 (GMS) 6局。
- MCSがSBAS信号を生成、MTSAT-2がPRN129及びPRN137を中継。
- 測距機能が提供されていた。

現在:MSAS V2 (2020.4~)



- 静止衛星 (QZS-3) 1機、主統制局 (MCS) 1局、バックアップ局 (TMC) 1局。
- 監視局 (GMS) としてはQZSS SLAS監視局 (13局) を使用。測距機能は提供しない。
- MCSはSBASメッセージを生成し、QZS-3にアップリンク。QZS3が変調・送信する。

性能評価の目的

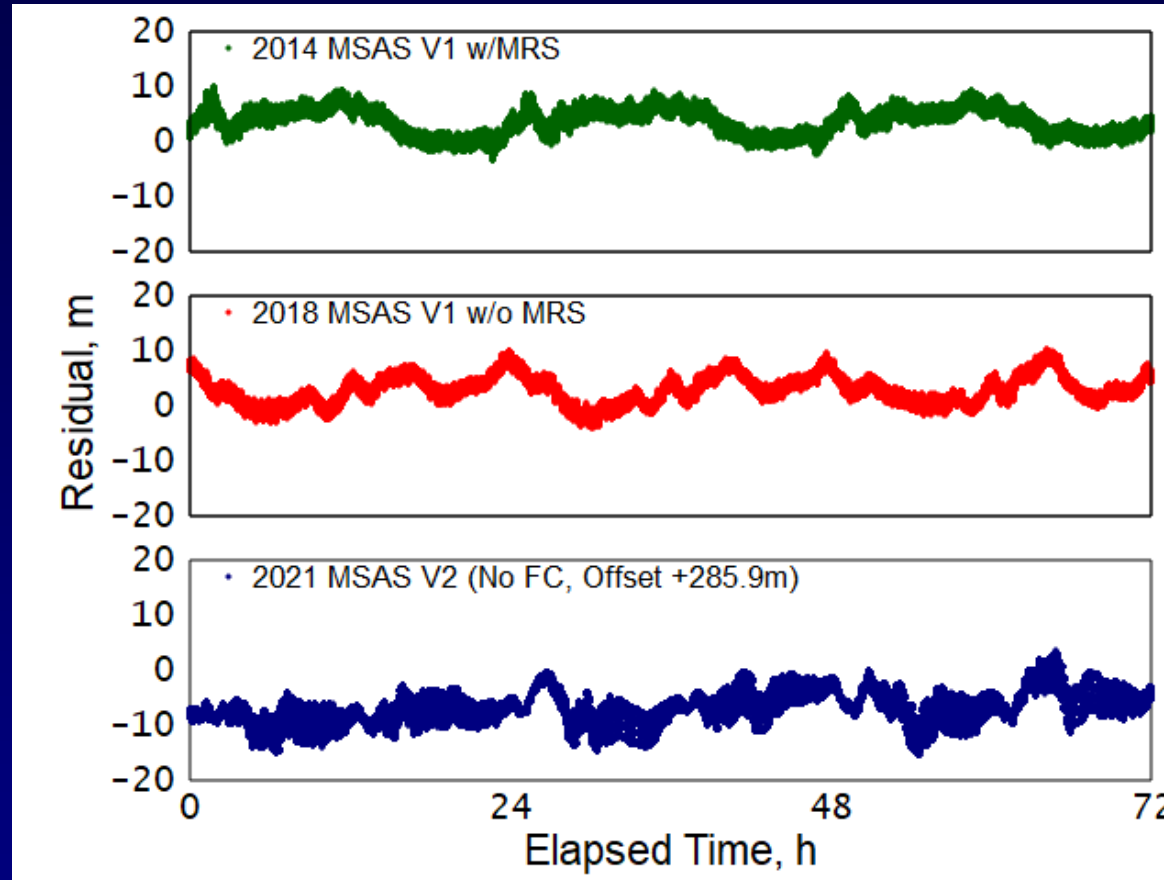
- 目的: 今後の測距機能の活用に向けた性能評価を行う。
 - MSASは以前は測距機能を提供していたが、現在は提供していない。
 - 一方でQZS-3ではSBAS信号が広帯域化されており、測距信号としての品質は改善しているものと思われる。
 - 2023年頃の性能向上にあわせて、静止衛星の追加が予定されている。
 - 複数のSBAS衛星から測距機能を提供できれば、メリットがあるのではないか。
- 測距性能は、測距信号の品質とエフェメリス情報の品質で決まる。
 - 測距信号の品質: 変調速度(早いほうがよい)、信号帯域幅(広いほうがよい)
 - ばらつき成分として評価できる。
 - 衛星の仕様により決まる=もう決まっている。
 - エフェメリス情報の品質: クロック・軌道の予測精度(精度が良いほうがよい)
 - バイアス成分として評価できる。
 - 監視局(GMS)配置と航法統制局(MCS)のソフトウェアで決まる=性能が不足する場合は改善の余地がある。
- 今回のMSASの性能評価にあたり:
 - 測距信号としての品質と、エフェメリス情報の品質に分けて評価する。

性能評価の概要

システム	MSAS V1 (MRSあり)	MSAS V1 (MRSなし)	MSAS V2
観測期間	2014年1月 16~18日	2018年1月 10~12日	2021年1月 17~19日
KP指数	$\leq 2-$	$\leq 2-$	≤ 2
PRN	137	137	137
SBAS衛星	MTSAT-2	MTSAT-2	QZS-3
メッセージタイプ9 静止衛星位置	有効	有効	有効
メッセージタイプ9 クロック補正值	有効	有効	-285.9 mに固定 (負の最大値)
受信機	NovAtel MiLLenium-STD (東京都調布市)		
アンテナ	NovAtel Model 600-L1/L2	Septentrio PolaNt-x MF	

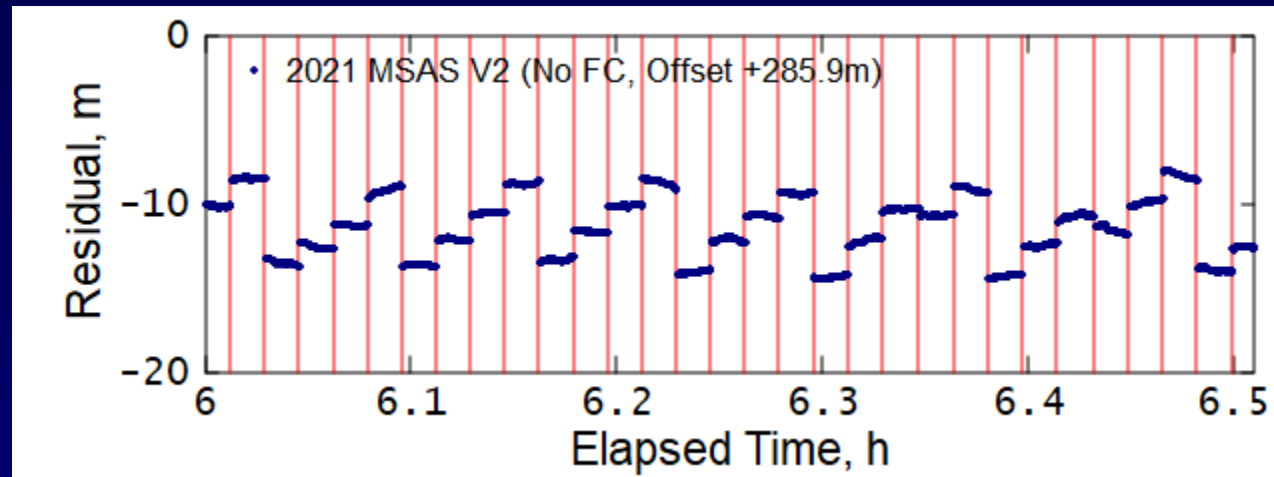
- 3つの時期のMSAS信号を観測。いずれもPRN 137で、冬場の電離圏活動静穏期。
- MSAS V2では有効なクロック情報が送信されていないので、正常なエフェメリス情報(クロック・軌道情報)がある場合を想定した評価も実施した。
 - QZSS PNTサービス(QZSS L1 C/A信号)のエフェメリス情報を使用する。

擬似距離の残差(1)



- 2014~2018年 (MSAS V1) : 大きな変化はみられない。
- 2021年 (MSAS V2) : 衛星クロックについては固定値が送信されている
→ 0になるようオフセット。それでもややばらつきが大きい？

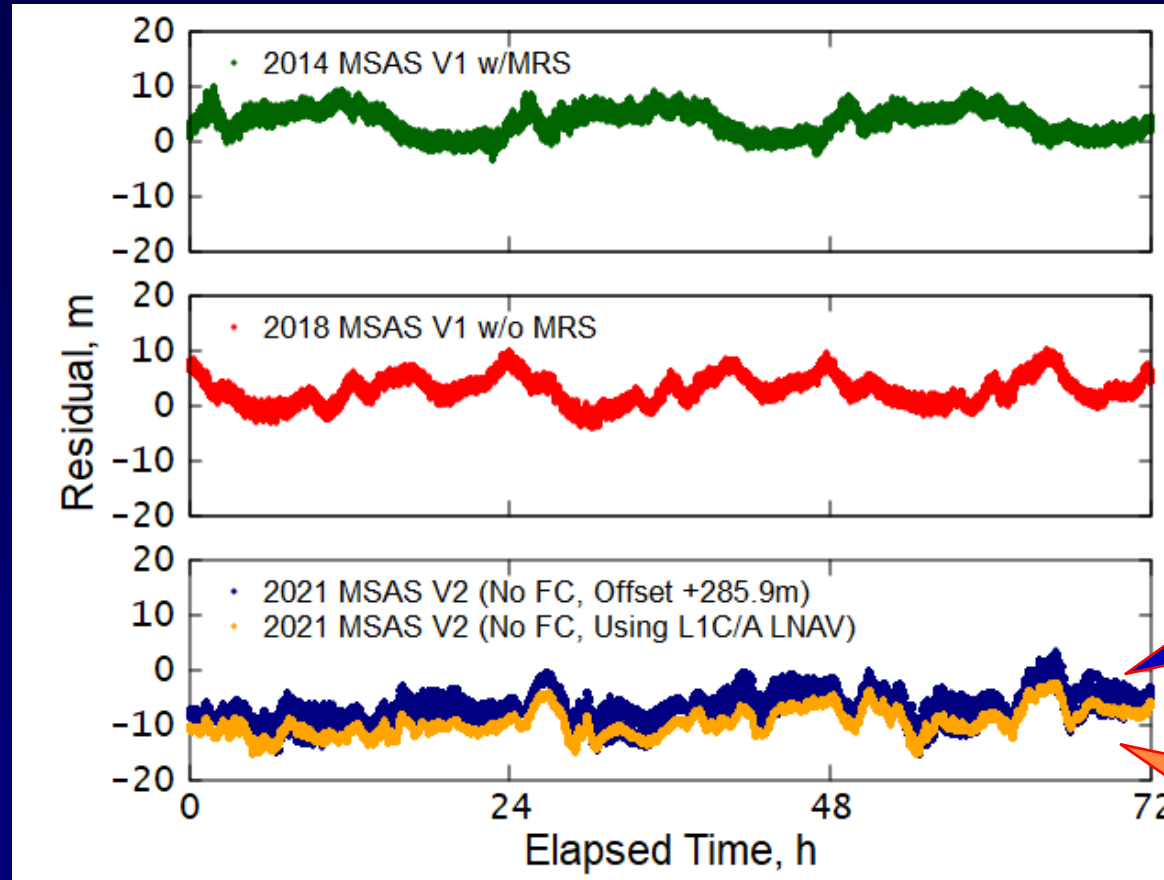
擬似距離の残差(拡大)



- 2021年(MSAS V2)について、約30分間を取り出して拡大したもの。
- 赤線:メッセージタイプ9(静止衛星エフェリス)が送信されたタイミング。
→メッセージタイプ9による衛星位置に不連続がある。

PNTサービスがL1C/A信号で送信しているエフェリス情報を使用して、
正常なエフェリス情報がある場合を想定した評価を試みる

擬似距離の残差(2)



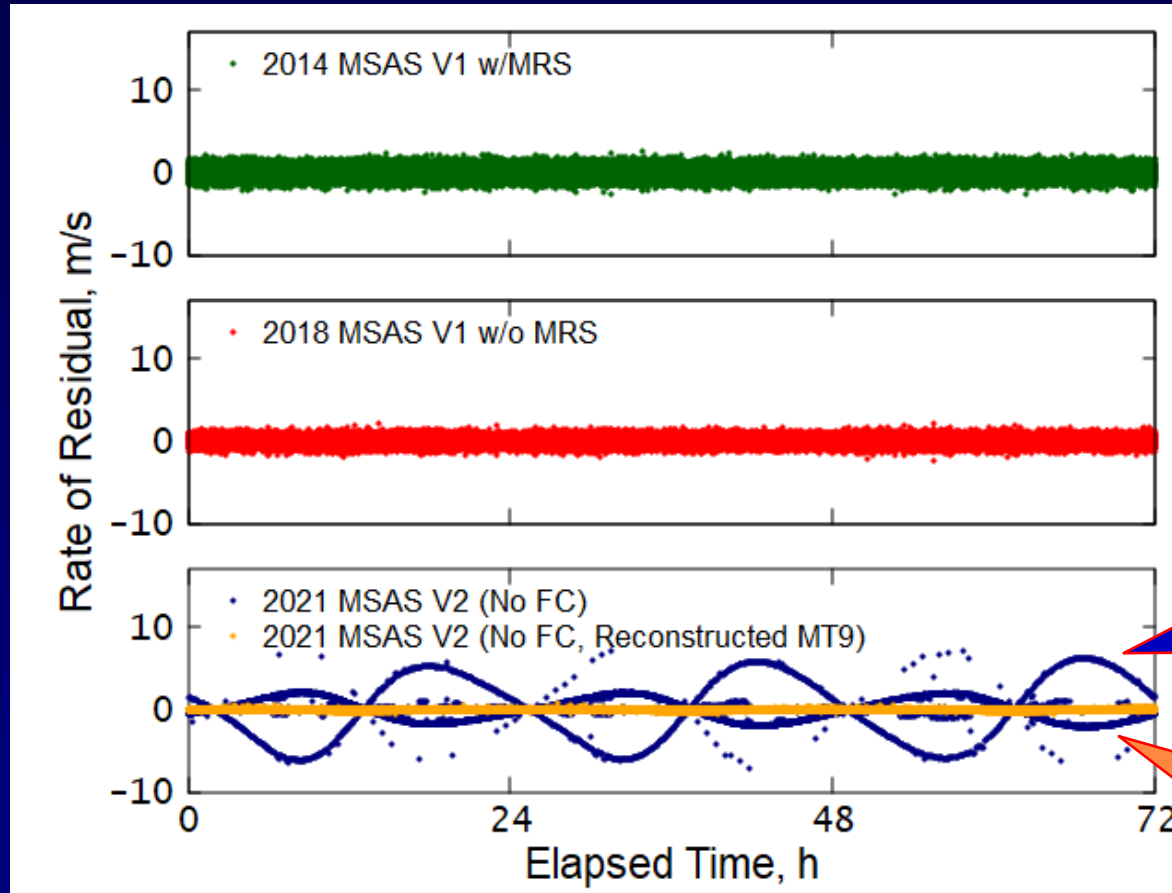
メッセージ
タイプ9を
そのまま使用

QZSS L1 C/A
の航法メッセ
ージを使用

- PNTサービス(QZSS L1 C/A)のエフェメリス情報を使用すると、ばらつきが減少した。
 - 正常なエフェメリス情報がある場合を想定した評価。
 - ばらつきのように見えていたエフェメリス情報の不連続が解消した。

擬似距離残差の差分

標準偏差 (m)
0.302
0.208
0.291
0.0272



メッセージ
タイプ9を
そのまま使用

QZSS L1 C/A
の航法メッセ
ージを使用

- エポック間の差分を求めてバイアスを除去：測距信号としての品質をみる。
- 2021年 (MSAS V2) : メッセージタイプ9には不連続があり、脈打って見える。
 - PNT サービス (QZSS L1 C/A) のエフェメリス情報を使用すると、良好な性能。

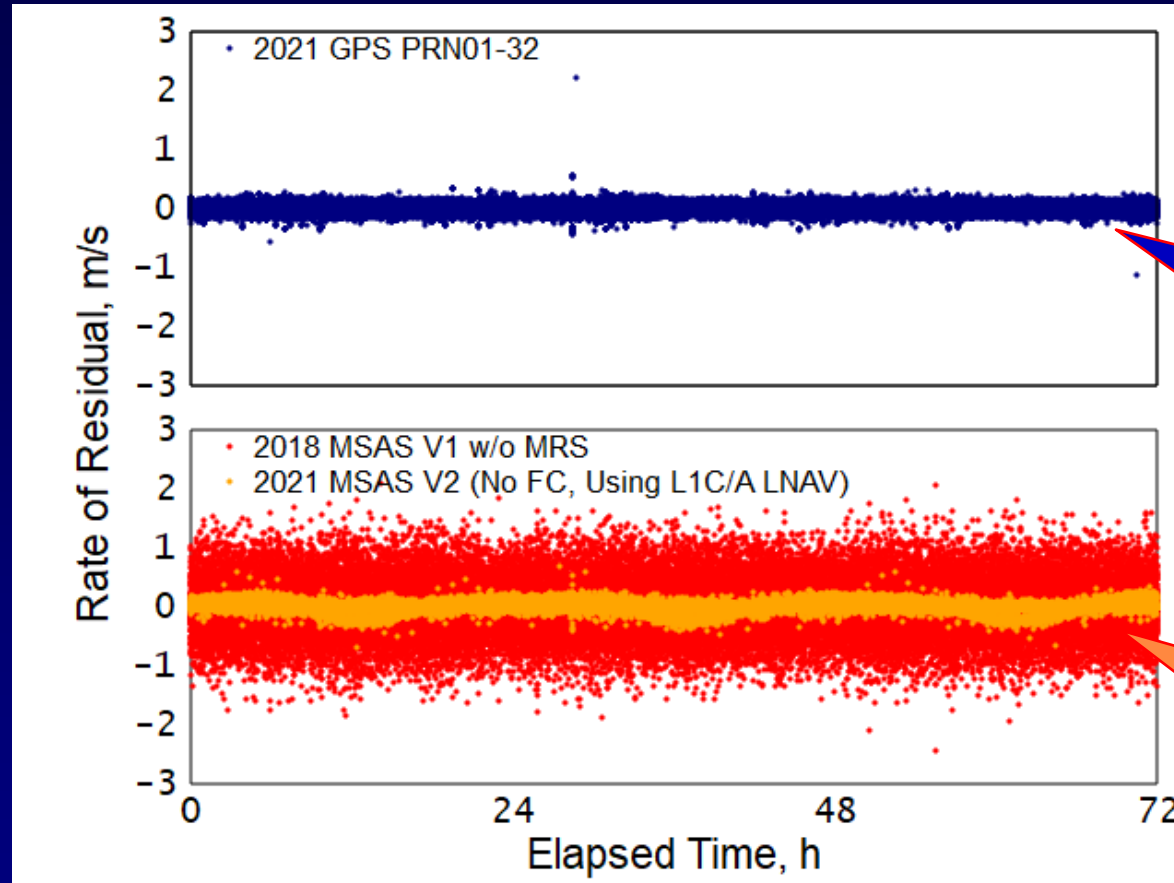
GPSとの比較

標準偏差 (m)

0.0184

0.208

0.0272



GPS
PRN 1~32

QZSS L1 C/A
の航法メッセ
ージを使用

- エポック間の差分を求めてバイアスを除去：測距信号としての品質をみる。
- 2021年 (MSAS V2) : GPSより標準偏差はやや大きいですが、ほぼ遜色ない。

Conclusion

- SBAS (Satellite-Based Augmentation System)
 - ICAO SBAS: 静止衛星による補強システムの国際標準規格。
 - 日米欧印のシステムが稼働中。航空分野以外でも広く利用されている。
 - 測距機能: GPSと同様に距離を測定して位置の計算に使用できる。
- 今後の測距機能の活用のため、MSASの測距性能を評価した。
 - MSASは以前は測距機能を提供していたが、現在は提供していない。
 - 2023年頃の性能向上にあわせて静止衛星が追加される予定がある。
 - 複数のSBAS衛星から測距機能を提供できれば、メリットがあるのではないか。
 - 新旧のMSASの測距性能を評価した結果。
 - QZS-3によるMSAS V2では信号品質が大きく改善しており、GPSと比べてもほぼ遜色ない。SBAS信号が広帯域化された効果と思われる。
 - ただし、メッセージタイプ9により送信されているSBAS衛星のエフェメリス情報については品質が十分ではない。
 - クロック情報が固定値となっている。連続したメッセージの間で不連続がある。
 - メッセージタイプ9を改善すれば、良好な性能の測距機能を提供できる見込みがある。