

国産の衛星のみを利用した 測位精度検証について

東京海洋大学
土倉 弘子、久保信明

文部科学省宇宙利用促進による電子航法研究所殿からの委託研究

2012年 電子情報通信学会ソサイエティ大会

発表の内容

1. 背景と目的
2. 3衛星測位の手法
3. 実験概要
4. 静止実験 解析結果
5. 移動体実験 解析結果
6. 実験まとめ
7. シミュレーション概要
8. シミュレーション結果
9. まとめ

1. 背景と目的

- 現在の衛星測位システム -

- GNSS : 全地球航法衛星システム
GPS(米), GLONASS(露), Galileo(EU),
Compass(中), etc...

→ これらを利用するアプリケーションは生活に
必要不可欠
- 日本における衛星測位(現状)
GPS(米), GLONASS(露) etc...
+ 国産衛星(QZSS: 準天頂衛星システム)

1. 背景と目的

- 日本の衛星測位システム -

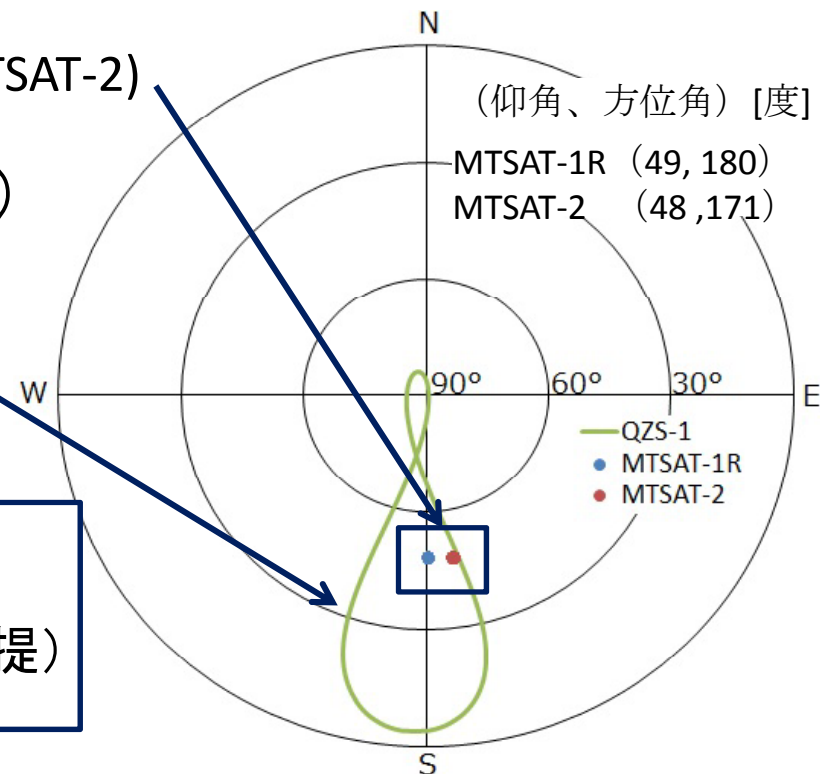
-MSAS (運輸多目的衛星用航法補強システム)

静止衛星 : 2機 (MTSAT-1R, MTSAT-2)

-QZSS (準天頂衛星システム)

準天頂衛星 : 1機 (QZS-1)

- 地域的衛星測位システム
- GPSの補完と補強 (併用が前提)

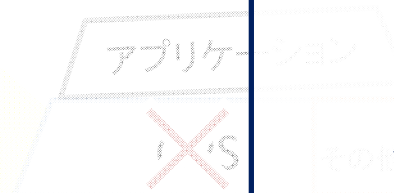


大学キャンパス屋上を基準とした
上空図

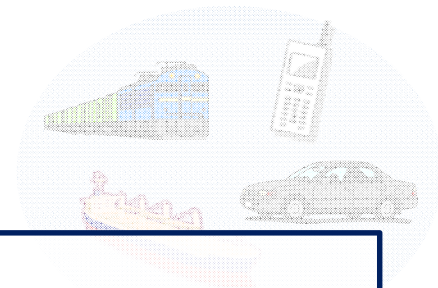
1. 背景と目的

- 問題点と目的-

- 日本の測位システムが米国のGPSに依存
- バックアップシステムがない



国産衛星のみによる測位
(QZS-1, MTSAT-1R, MTSAT-2の**3機**)



2.3 衛星測位の手法

- 国産衛星の測距性能 -

	GPS	QZSS	MSAS
目的	測位	測位	補正(広域)
測距性能	1m以内	1m以内	?
衛星位置精度	1m以内	1m以内?	?
運用中衛星数	31機	1機	2機

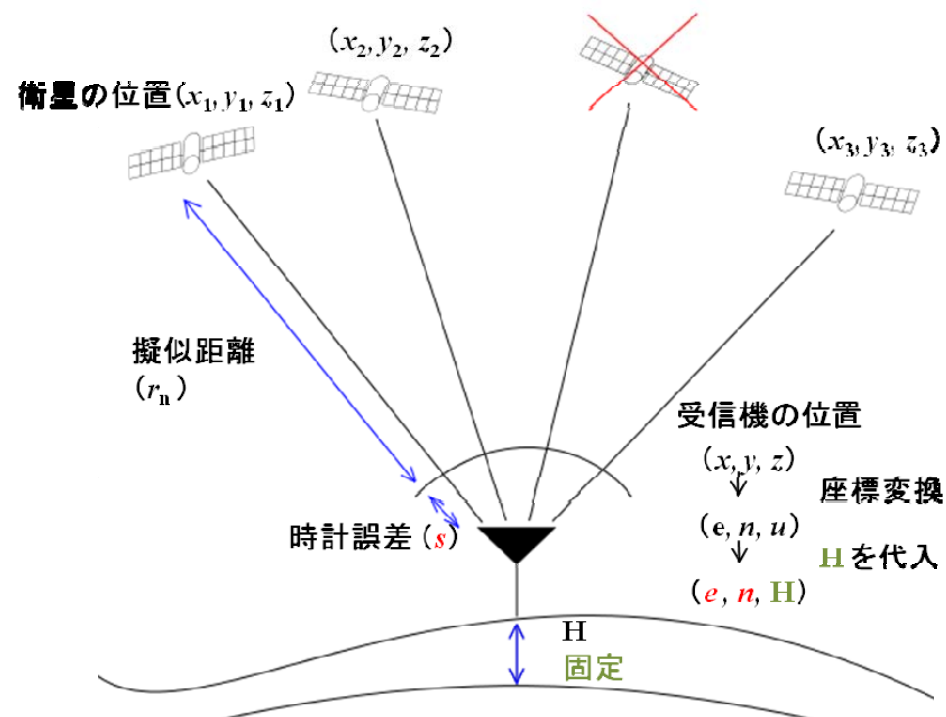
- QZSSの測距性能 → GPSとほぼ同等
- MSASの測位機能 → 帯域が狭いためあまり推奨されていない
- MSASの測距性能の評価

2.3 衛星測位の手法

- 単独測位による二次元測位 -

単独測位	未知数=最小可視衛星数	
通常	4	3次元位置(ϕ, λ, h)、時計誤差(s)
3衛星測位	3	2次元位置(ϕ, λ)、時計誤差(s)

- 未知数を3個に
→ 高度を固定
- 高度の変化が乏しい
→ 海上利用を検証



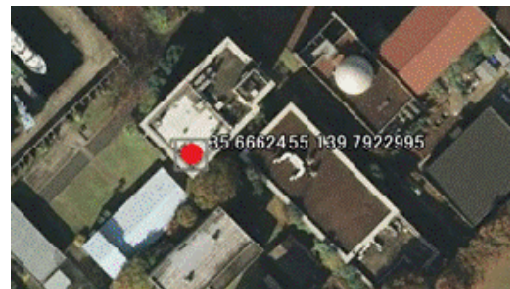
3. 実験概要

- 静止実験と移動体実験 -

	静止実験	移動体実験
実験場所	大学 (東京)	東京湾 (海上)
実施日時	2011/9/3 9:00~	2011/7/26 9:00~
解析周期	30秒	1秒
解析時間	24時間	6800秒
レファレンス	真値	DGPSによる 結果
受信機	JAVAD社製Delta受信機 擬似距離スムージング:100秒	
仰角マスク	15度	
HDOP 閾値	50未満	
固定高度	真値	※

静止実験 データ取得場所

東京海洋大学越中島キャンパス 第4実験棟屋上



- ・開けている
- ・マルチパス影響少

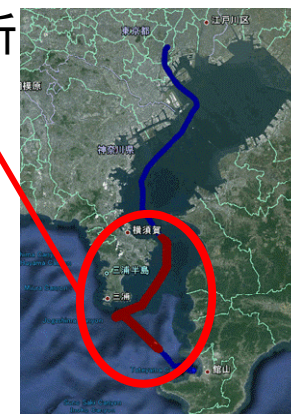
移動体実験 データ取得場所

東京湾航行中

海洋大保有の練習船



アンテナ



※ジオイド平均+コンパスデッキの高さ
(潮汐は無視)

4. 静止実験 解析結果

- MSAS衛星の測距性能の評価 -

- 比較方法

- ① 全可視GPS衛星 + QZS-1

- ② 全可視GPS衛星 + QZS-1 + MTSAT-1R + MTSAT-2

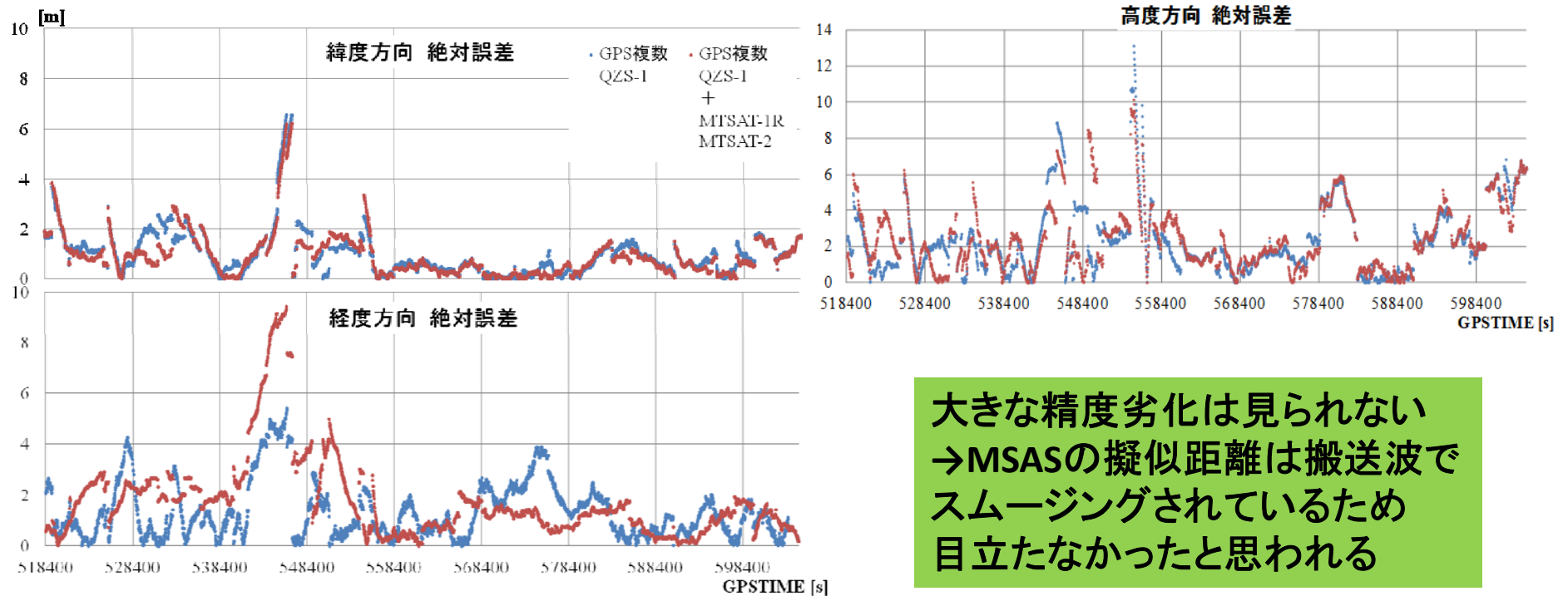
- 結果

平均	HDOP	絶対誤差 [m]				標準偏差 [m]	
		緯度	経度	水平	高度	水平	高度
GPS,QZS-1	1.15	0.99	1.33	1.84	2.38	1.18	1.95
+MSAS	0.99	0.91	1.77	2.11	2.48	1.75	1.81

4. 静止実験 解析結果

- MSAS衛星の測距性能の評価 -

• 3方向絶対誤差 グラフ



4. 静止実験 解析結果

- 3衛星測位 -

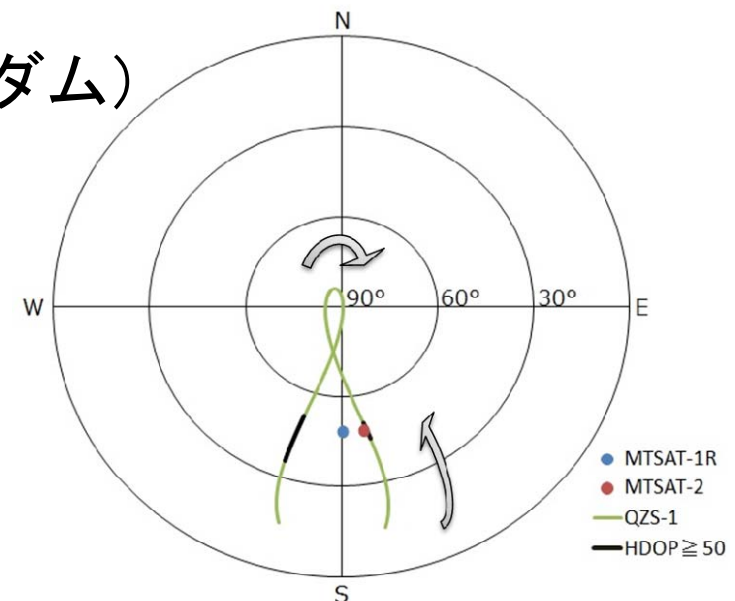
- 比較方法

- ③ GPS衛星 3機 (3機の選択はランダム)

- ④ QZS-1 + MTSAT-1R + MTSAT-2

- HDOPによる制限

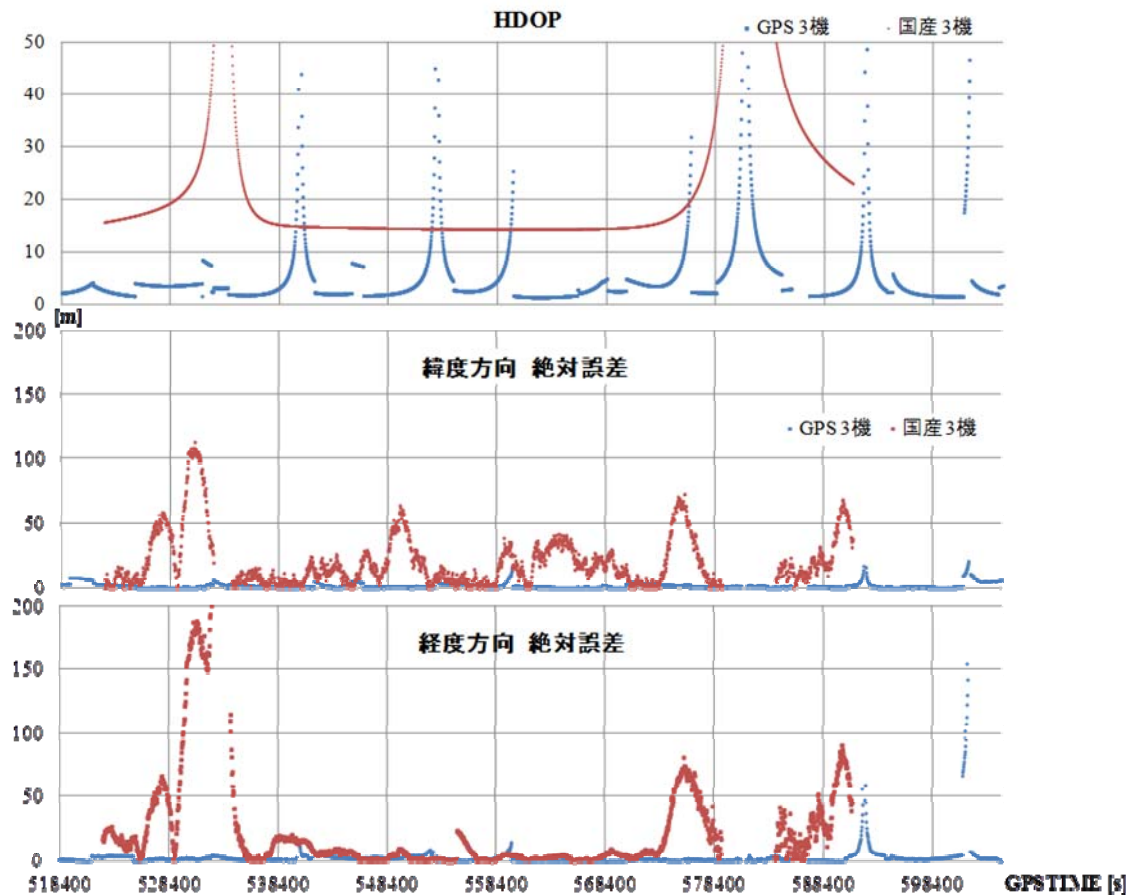
- HDOPが50未満の場合のみ測位を行うよう制限



条件		24時間中測位可能時間	
③	QZS-1の仰角マスク 15° 以上	79.6%	約19時間 /24時間
	+国産3衛星のHDOP 50 未満	72.2%	約17時間 /24時間
④	GPS3衛星のHDOP 50 未満	96.7%	約23時間 /24時間

4. 静止実験 解析結果

- 3衛星測位 -



HDOPと水平精度の関係
(国産/GPS)

$$\text{HDOP} : 18.7 / 4.64 = 4.0$$

$$\text{水平精度} : 39.9 / 8.6 = 4.6$$

平均	HDOP	絶対誤差 [m]			標準偏差 [m]
		緯度	経度	水平	水平
GPS 3機	4.64	2.04	3.04	4.05	8.63
国産3機	18.7	21.3	22.3	33.8	39.9

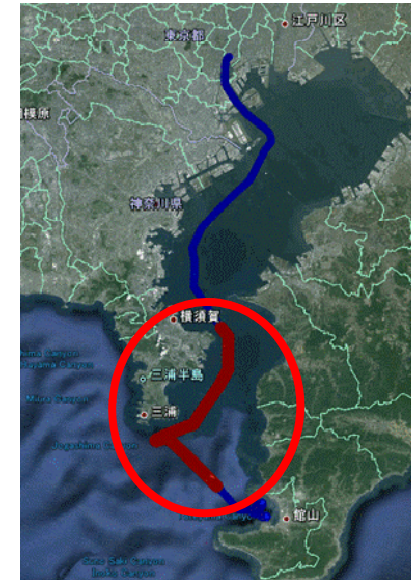
5. 移動体実験 解析結果

- 3衛星測位 -

- 比較方法

- ① GPS衛星 3機 (3機の選択はランダム)
- ② QZS-1 + MTSAT-1R + MTSAT-2

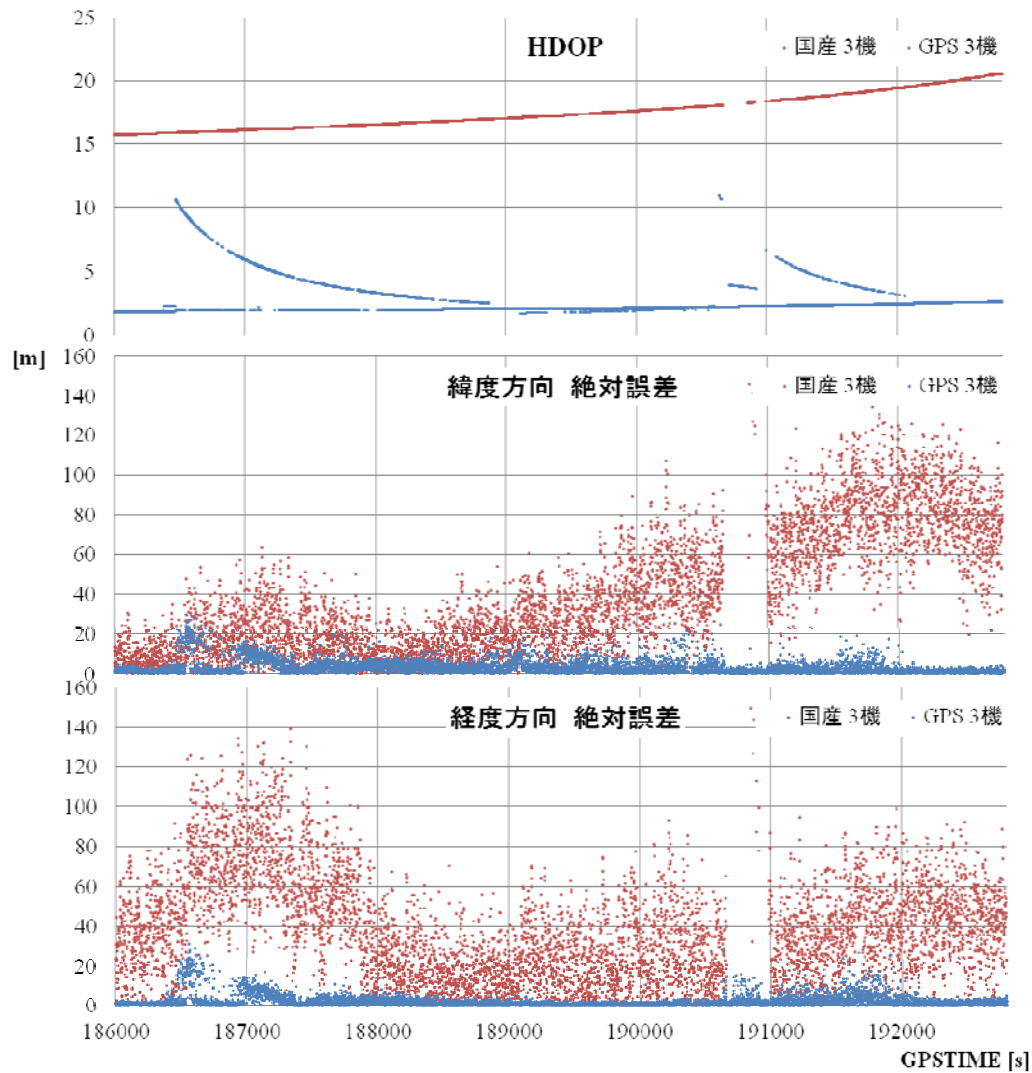
- 結果



平均	HDOP	絶対誤差 [m]			標準偏差 [m]	HDOP < 50
		緯度	経度	水平	水平	計算時間 / 6800
GPS 3機	2.64	3.23	2.39	4.32	4.54	99.0 %
国産 3機	17.5	37.2	37.6	55.2	34.6	94.9 %

5. 移動体実験 解析結果

- 3衛星測位 -



HDOPと水平精度の関係
(国産/GPS)

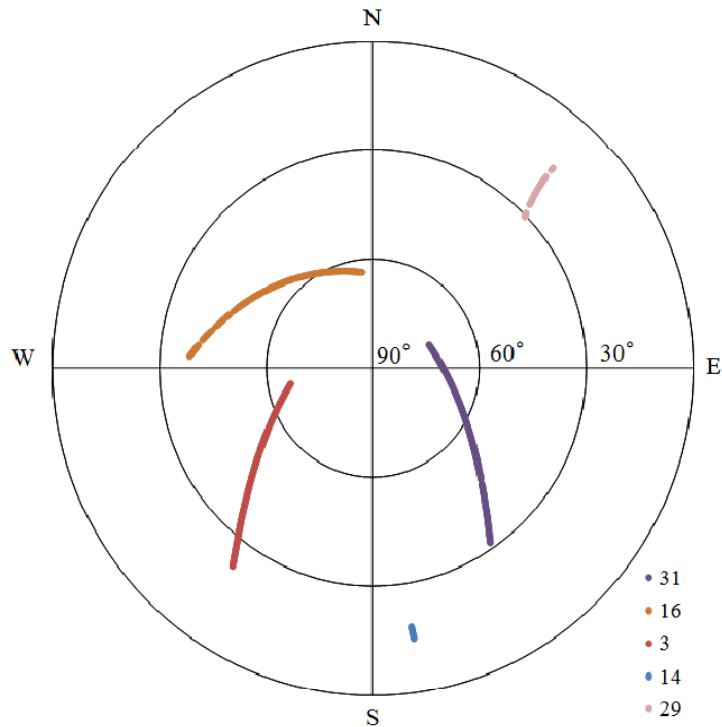
$$\text{HDOP} : 17.5/2.6 = 6.7$$

$$\text{水平精度} : 34.6/4.5 = 8.2$$

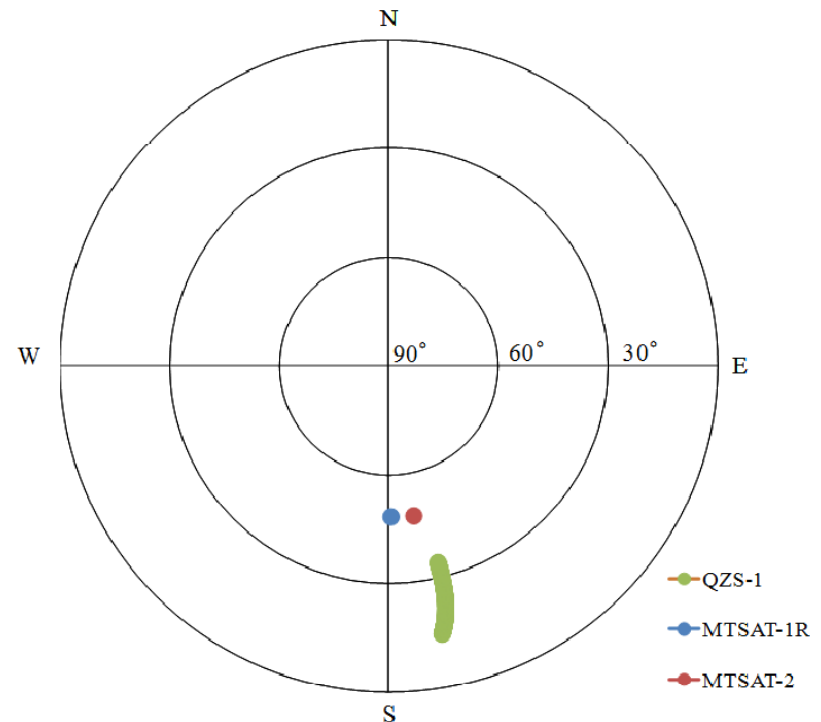
5. 移動体実験 解析結果

- 3衛星測位 衛星配置 -

GPS 3機



MSAS + QZSS 3機



HDOP	GPS 3機	国産 3機
平均	2.6	17.5

6. 実験まとめ

- 国産衛星3機のみでの測位が可能
 - 数10m～200m程度の精度
(1日の内70%以上の時間)
 - 海上などオープンスカイで有効
 - バックアップとして使用できる
- DOPと測距精度の関係性が示された
- さらなるQZSS衛星の増加(4~7機)により利便性、精度共に向上すると考えられる
 - シミュレーションを実施

7. シミュレーション概要

- QZSS衛星(国産測位衛星)の増加 1機 → 4~7機
→ 国産衛星測位の性能をシミュレーションにより検討
- 方法
 1. 準天頂軌道上と静止衛星軌道上にさまざまなパターンで衛星を複数機配置
 2. パターンごとの衛星配置によるHDOPの値を算出
 3. HDOPに測距精度(実験により算出)を乗じ、おおよその測位精度を求めた(単独測位)

$$\text{測位精度} = \text{DOP} \times \text{測距精度}$$

※今回は水平精度の評価

$$\text{水平測位精度} = \text{HDOP} \times \text{水平測距精度}$$

7. シミュレーション概要

- 測距精度と各パラメータ -

	実データ (静止実験から)	シミュレーション
基準場所	東京海洋大学 キャンパス屋上(東京)	
解析周期	30秒	60秒
解析時間	24時間	24時間
仰角マスク	15度	15度
HDOP 閾値	50未満	50未満
水平標準偏差	39.90m ①	-
HDOP平均	18.74 ②	-
測距精度	① / ② ≒ 2.1m	2.1m を使用

※静止実験のGPS3機での測位結果

・水平標準偏差 8.63m

・HDOP平均 4.64

$8.63 / 4.64 \div 1.9m$

よって今後打ち上げのQZSSの性能もGPSと同等であると考えたと測距精度は1.9mだが、今回はより悪い条件の2.1mを利用した。

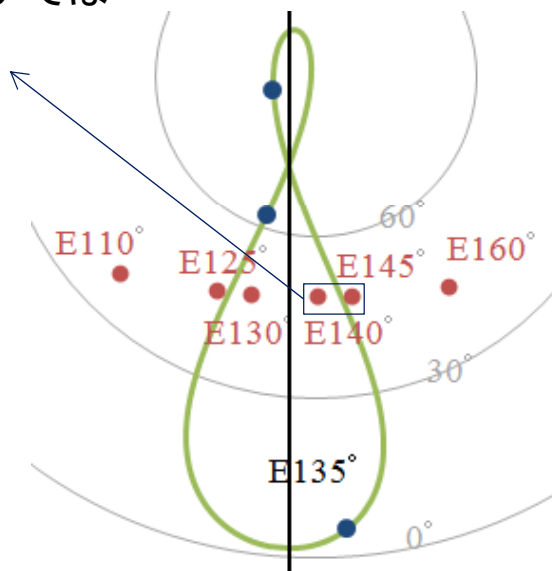
国産衛星3機による静止実験結果 → 国産衛星の測距精度
HDOP < 50 における水平標準偏差と、HDOP平均を使用 (1QZSS + 2MSAS)

7. シミュレーション概要

- 衛星の配置 -

- ・静止衛星(GEO) → 軌道上主な経度に配置
- ・準天頂衛星(QZS) → 準天頂軌道上に等間隔で配置(中心 E135°)

MTSAT-1RとMTSAT-2については
東経140度、145度とした



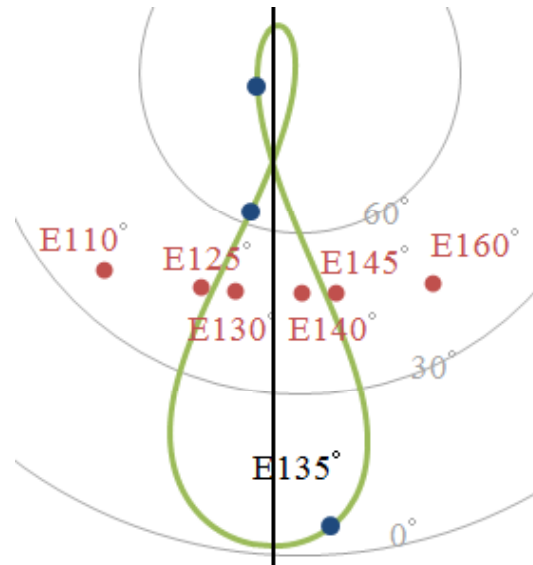
3QZSとGEO

衛星配置			
衛星数 (合計)	QZS	GEO	結果
3	1	2	実験
4	3	1	①
5	3	2	②
6	3	3	③
6	4	2	④
7	4	3	⑤
7	5	2	⑥

※GEOにはMSASも含む

8. シミュレーション結果

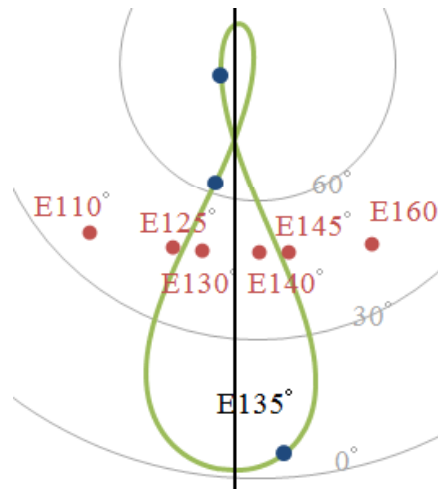
- ① 衛星数 4機 (3QZS + 1GEO) -



3QZS	平均			HDOP < 50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+110	7.5	12.7	16.0	680 / 1440	47.2
+125	10.6	13.6	22.5	649 / 1440	45.1
+130	9.0	10.1	19.1	654 / 1440	45.4
+135	7.2	7.3	15.4	707 / 1440	49.1

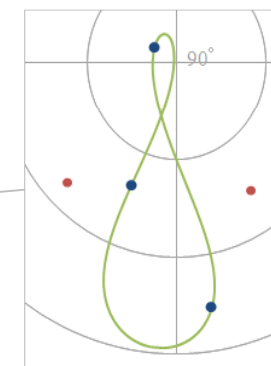
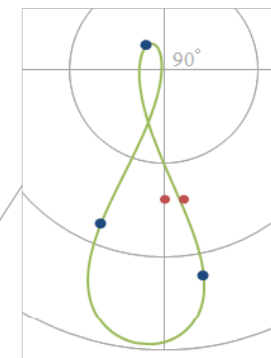
8. シミュレーション結果

- ② 衛星数 5機 (3QZS + 2GEO) -



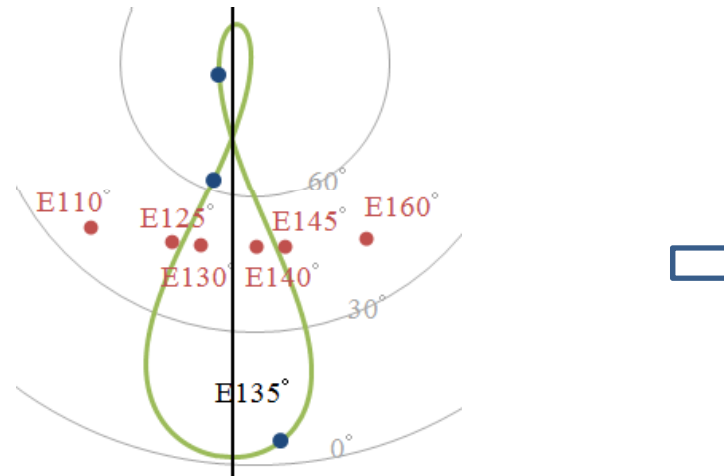
3QZS	平均			HDOP<50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+2MSAS ※	14.8	25.0	31.6	1335 / 1440	92.7
+130+140	10.1	17.1	21.5	1383 / 1440	96.0
+125+145	8.3	14.4	17.6	1386 / 1440	96.3
+110+160	7.5	10.6	15.9	1398 / 1440	97.1

※ +140+145



8. シミュレーション結果

- ③ 衛星数 6機 (3QZS + 2MSAS + 1GEO) -

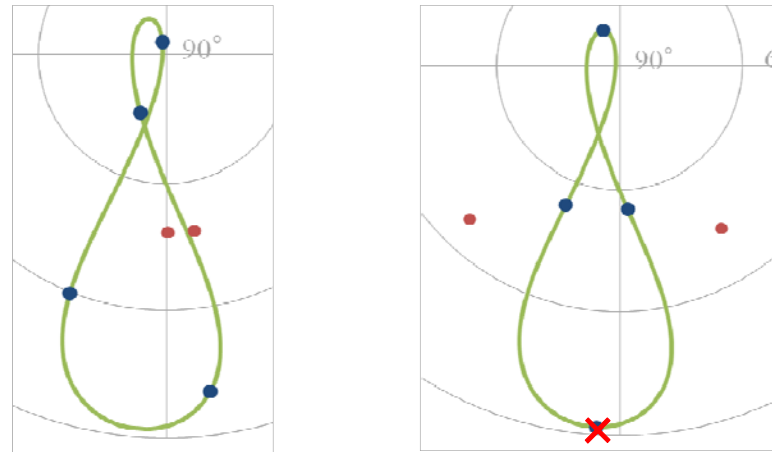


3QZS +MSAS※	平均			HDOP < 50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+110	7.5	11.6	15.9	1440 / 1440	100.0
+125	8.8	15.5	18.8	1440 / 1440	100.0
+130	9.2	16.4	19.5	1413 / 1440	98.1
+135	10.3	18.5	21.9	1390 / 1440	96.5
+160	12.2	25.5	26.0	1440 / 1440	100.0

※ +140+145

8. シミュレーション結果

- ④ 衛星数 6機 (4QZS + 2GEO) -

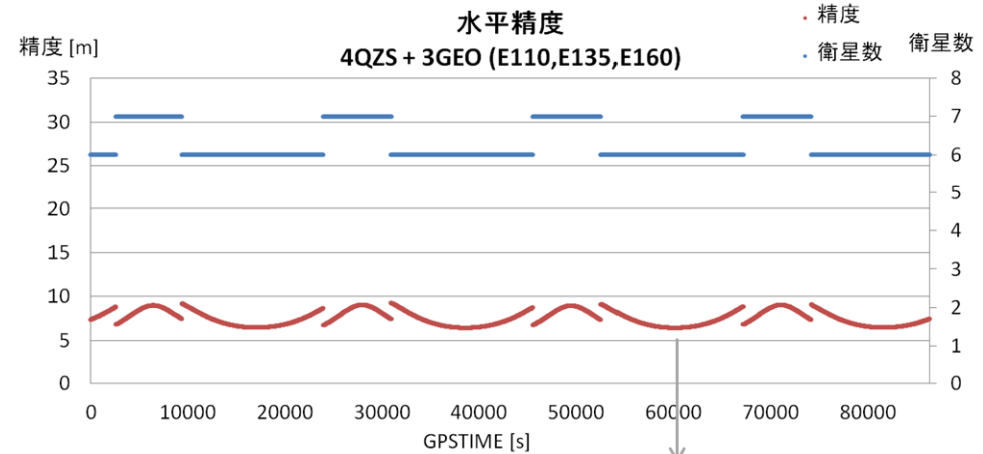
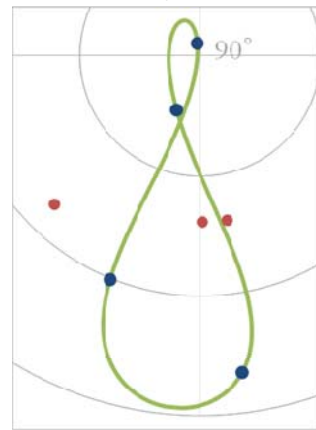


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※	9.1	15.0	19.3
+110+160	4.9	7.5	10.5

※ +140+145

8. シミュレーション結果

- ⑤ 衛星数 7機 (4QZS + 3GEO) -

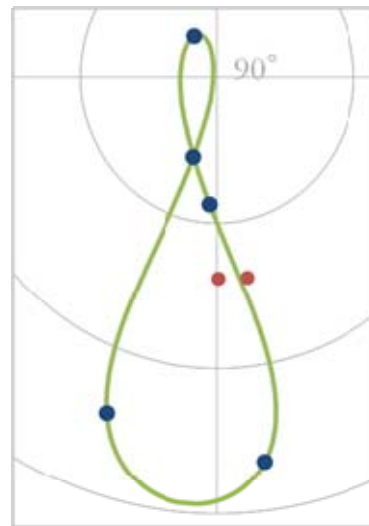


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※+110	4.5	7.5	9.6
+110+135+160	3.6	5.7	7.6

※ +140+145

8. シミュレーション結果

- ⑥ 衛星数 7機 (5QZS + 2GEO) -



5QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※	7.6	10.1	16.3
+110+160	4.5	7.0	9.5

※ +140+145

8. シミュレーション結果

- 総合 -

	衛星数	QZS	GEO	平均			計算率
				HDOP	VDOP	水平精度 [m]	%
	3	1	+2MSAS ※	18.7	-	39.9	72.2
①	4	3	+ 135	7.2	7.3	15.4	49.1
②	5	3	+ 2MSAS	14.8	25.0	31.6	92.7
			+ 110 + 160	7.5	10.6	15.9	97.1
③	6	3	+ 2MSAS + 110	7.5	11.6	15.9	100
④	6	4	+2 MSAS	9.1	15.0	19.3	100
			+ 110 + 160	4.9	7.5	10.5	100
⑤	7	4	+ 2MSAS + 110	4.5	7.5	9.6	100
			+ 110 + 135 + 160	3.6	5.7	7.6	100
⑥	7	5	+ 2MSAS	7.6	10.1	16.3	100
			+ 110 + 160	4.5	7.0	9.5	100

実データ

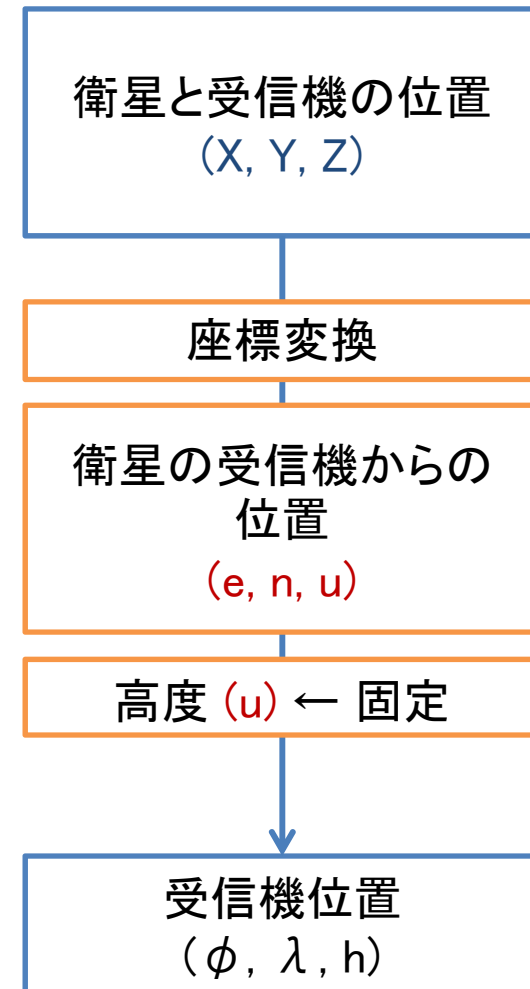
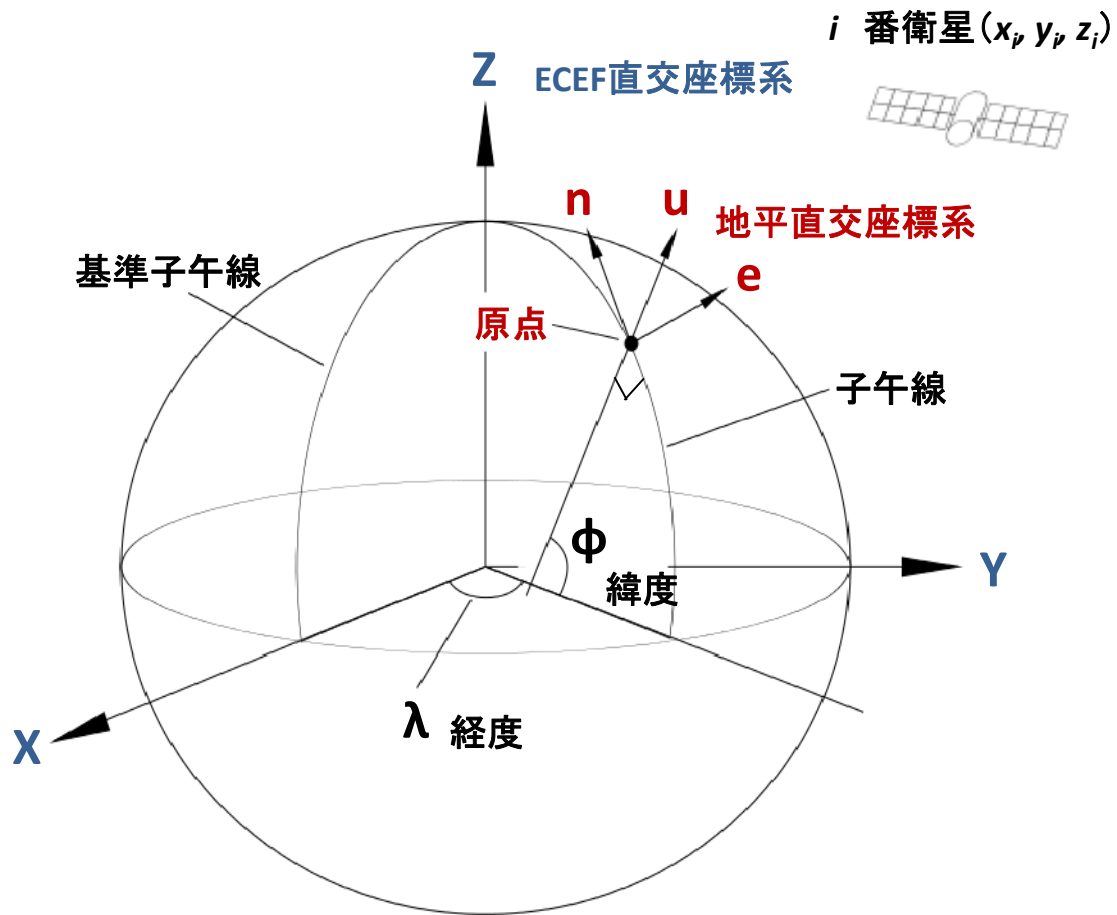
※ +140+145

- ・衛星数の増加により精度は向上する
- ・一つの準天頂軌道上に衛星を増加するよりは、さまざまな軌道上(今回は静止衛星軌道上)に衛星を配置したほうがよい
- 複数の準天頂衛星軌道上に配置してのシミュレーションの実施も必要

9. まとめ

- 国産衛星3機のみでの測位が可能
 - 数10m～200m程度の精度
(1日の内70%以上の時間)
 - 海上などオープンスカイで有効
 - バックアップとして使用できる
- QZSS衛星の増加（4機～7機）
 - 利便性向上（ほぼ100%へ）
 - 衛星配置によっては10m以下の精度で測位可能
- 複合測位への展開
 - ルビジウム発振器による時計誤差固定は検証済み

2.計算理論・概要 -3衛星測位 座標系-



静止実験 MSASの影響

平均	HDOP	絶対誤差 [m]				標準偏差 [m]		水平方向 [m]	
		緯度	経度	水平	高度	水平	高度	1dRMS	2dRMS
GPS,QZS-1	1.15	0.99	1.33	1.84	2.38	1.18	1.95	2.19	4.37
+MSAS	0.99	0.91	1.77	2.11	2.48	1.75	1.81	2.74	5.48

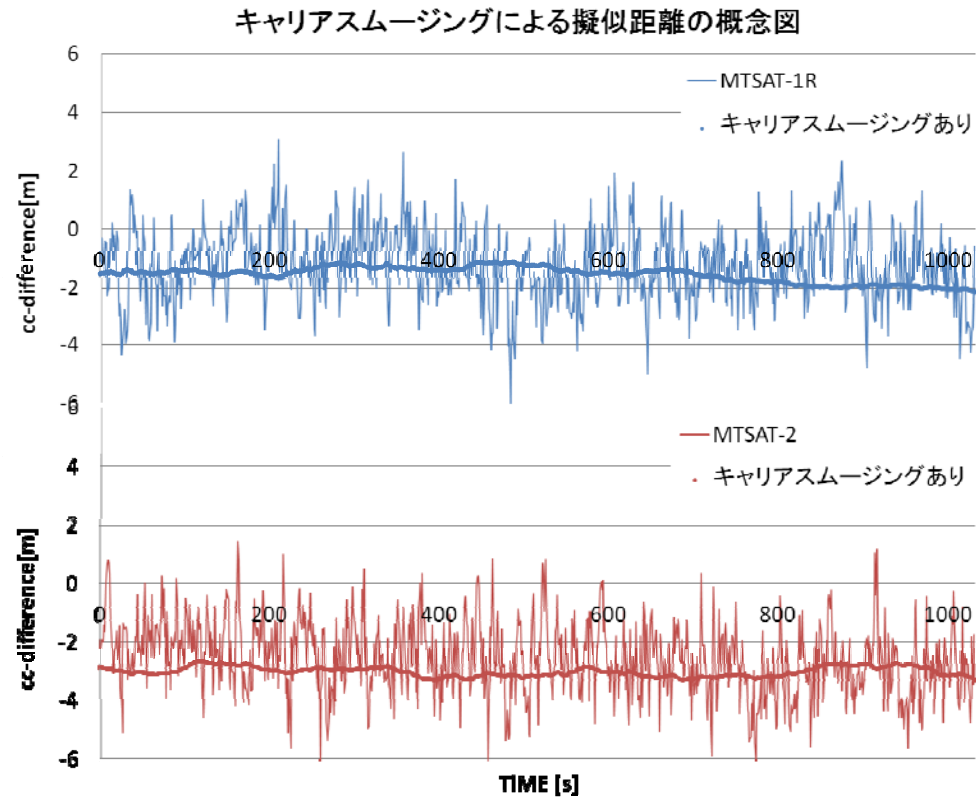
静止実験 3衛星測位

平均	HDOP	絶対誤差 [m]			標準偏差 [m]	水平方向 [m]	
		緯度	経度	水平	水平	1dRMS	2dRMS
GPS 3機	4.64	2.04	3.04	4.05	8.63	9.54	19.07
'国産 3機	18.74	21.25	22.31	33.79	39.90	52.3	104.6

移動体実験 3衛星測位

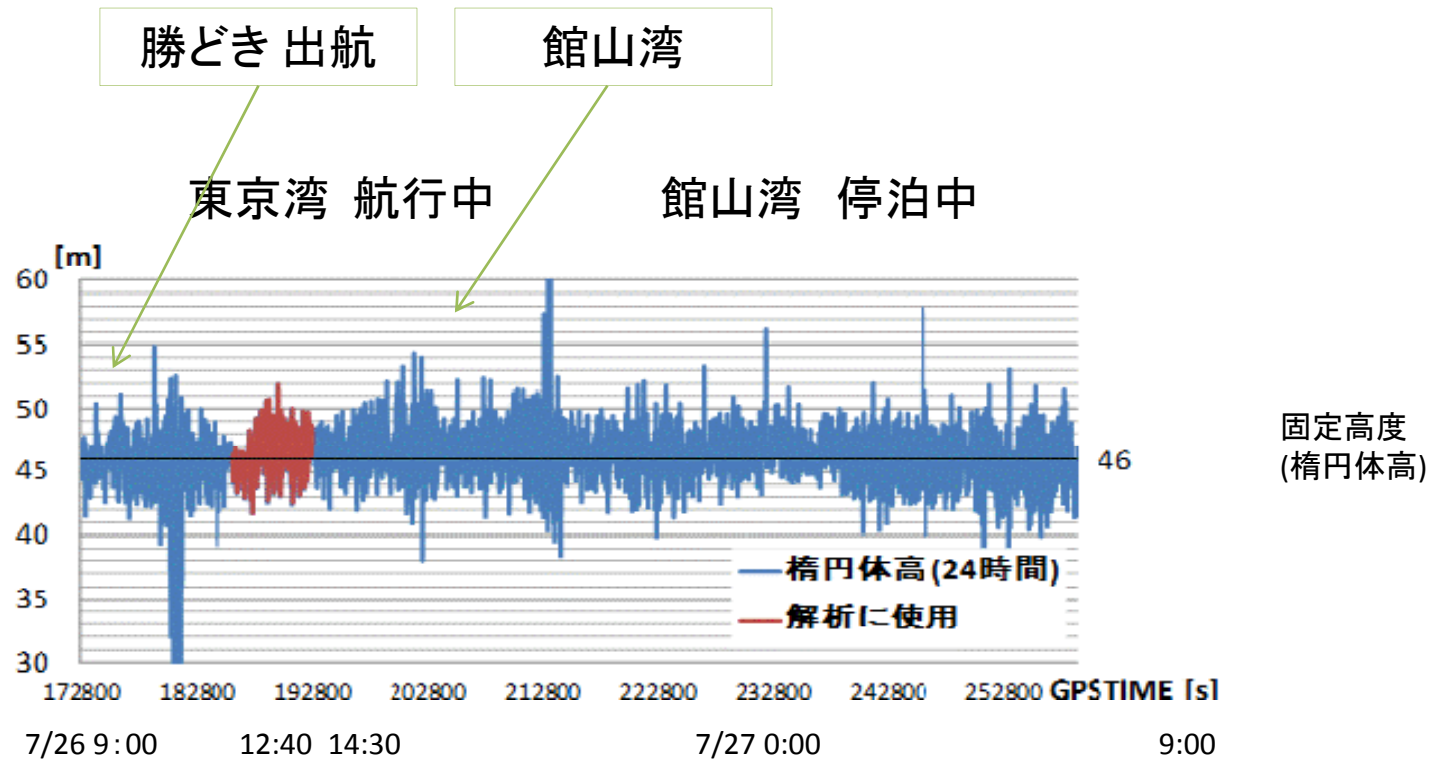
平均	HDOP	絶対誤差 [m]			標準偏差 [m]	水平方向 [m]	
		緯度	経度	水平	水平	1dRMS	2dRMS
GPS 3機	2.71	2.44	3.32	4.46	4.58	6.39	12.8
'国産 3機	17.5	38.8	37.5	58.5	33.4	67.3	134.7

擬似距離のスムージング



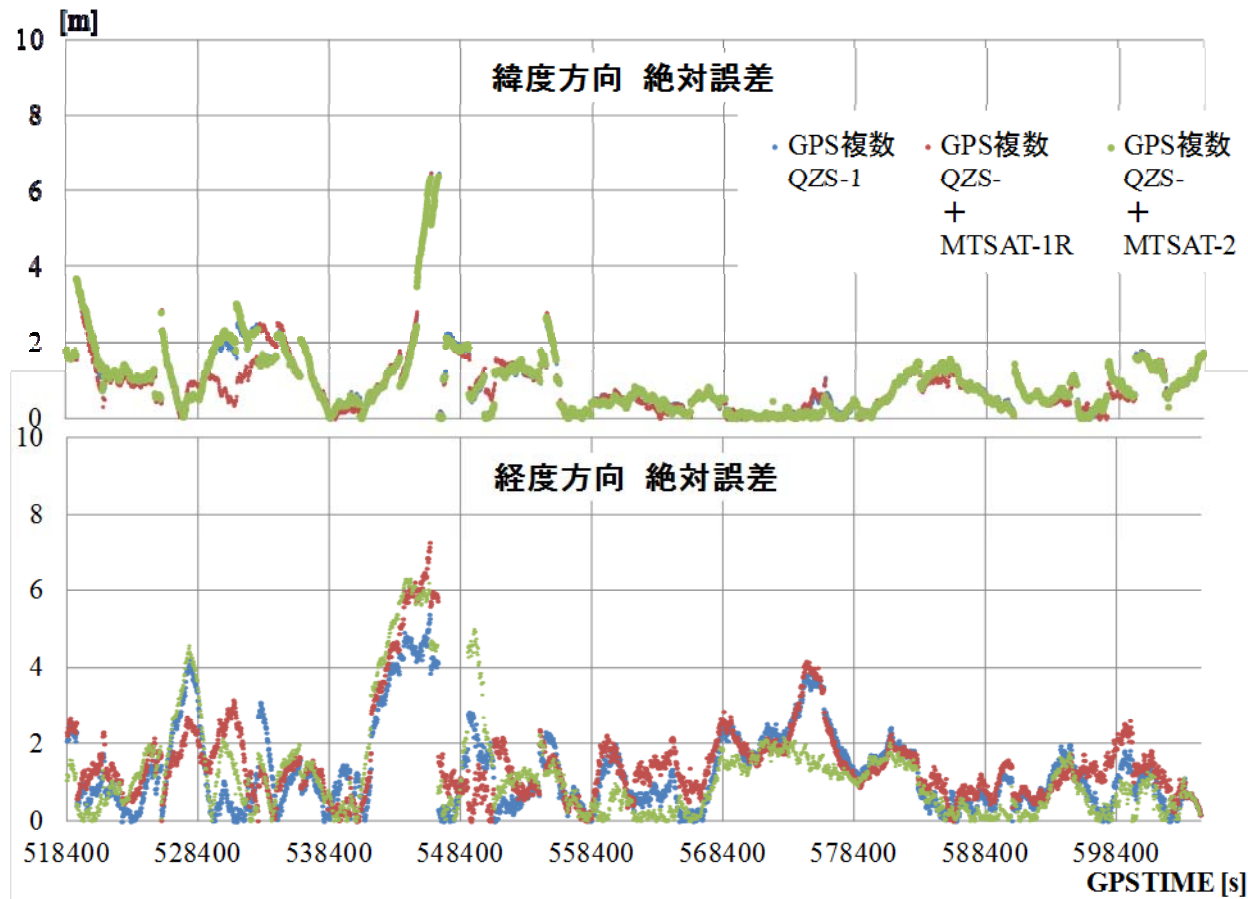
標準偏差[m]	MTSAT-1R	MTSAT-2	QZS-1	
キャリアスムージングなし	1.2	1.2	1.3	①
キャリアスムージングあり	0.26	0.17	0.07	②
改善率 ①÷②	4.8	7.6	17.3	

4. 移動体実験 -楕円体高 (DGPS測位結果より)-



	24時間	6800秒
時間内平均 [m]	46.3	46.4
標準偏差 [m]	2.7	1.8

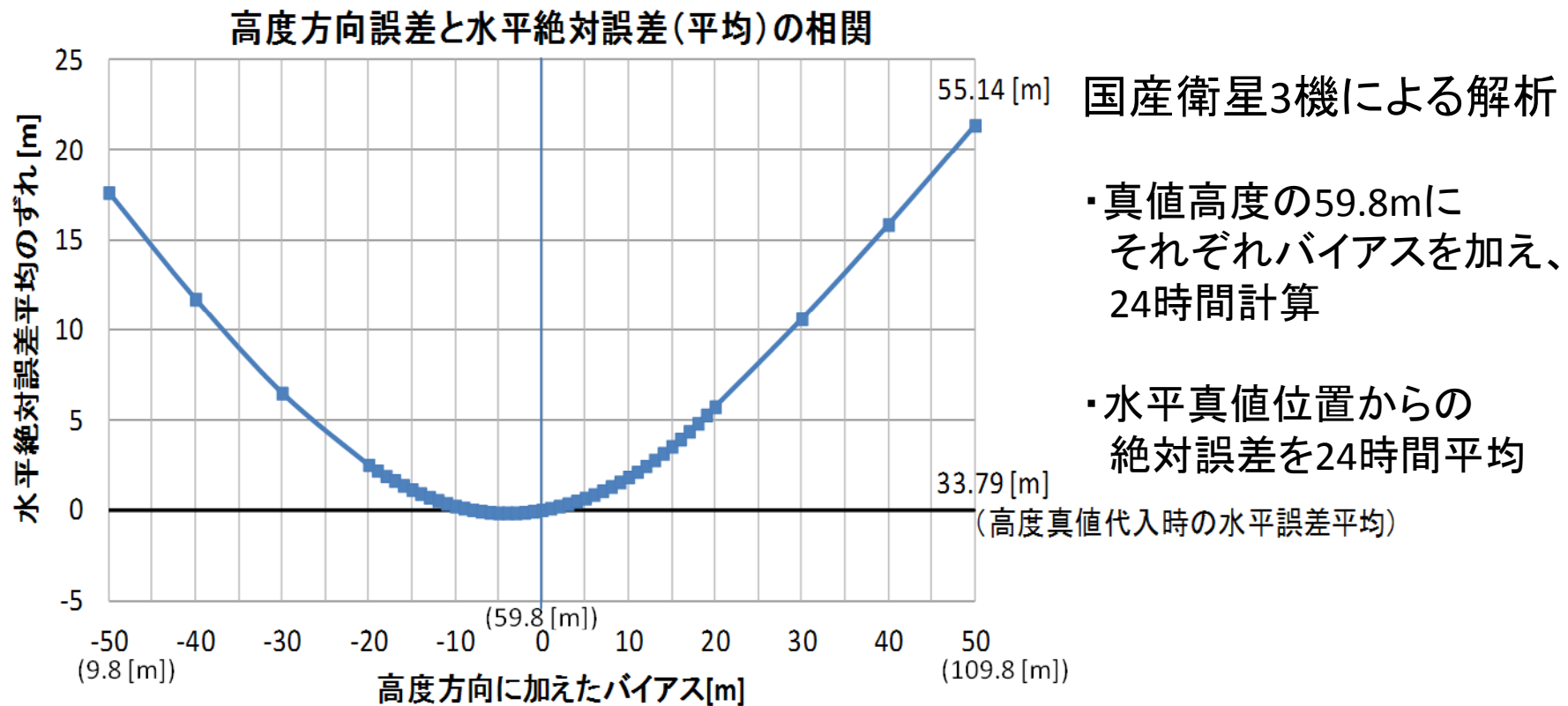
3. MSAS衛星の影響について 静止実験 解析結果



平均	HDOP	絶対誤差 [m]			標準偏差 [m]
		緯度	経度	水平	水平
GPS,QZS-1	1.15	0.99	1.33	1.84	1.18
+MTSAT-1R	1.04	0.94	1.57	1.95	1.30
+MTSAT-2	1.03	0.97	1.26	1.77	1.38
+MTSAT(2機)	0.99	0.91	1.77	2.11	1.75

4. 静止実験 解析結果

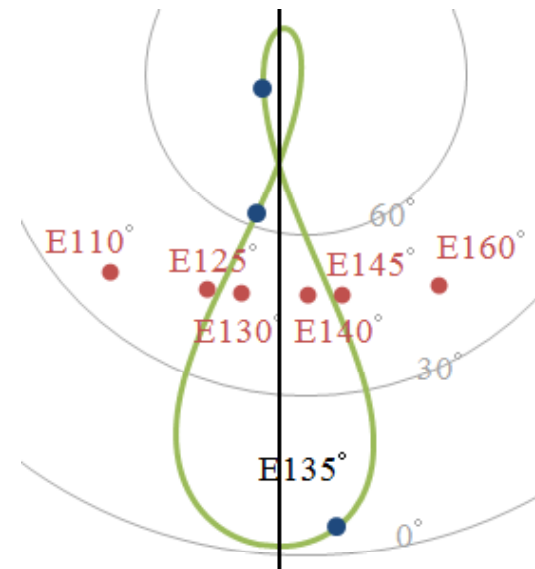
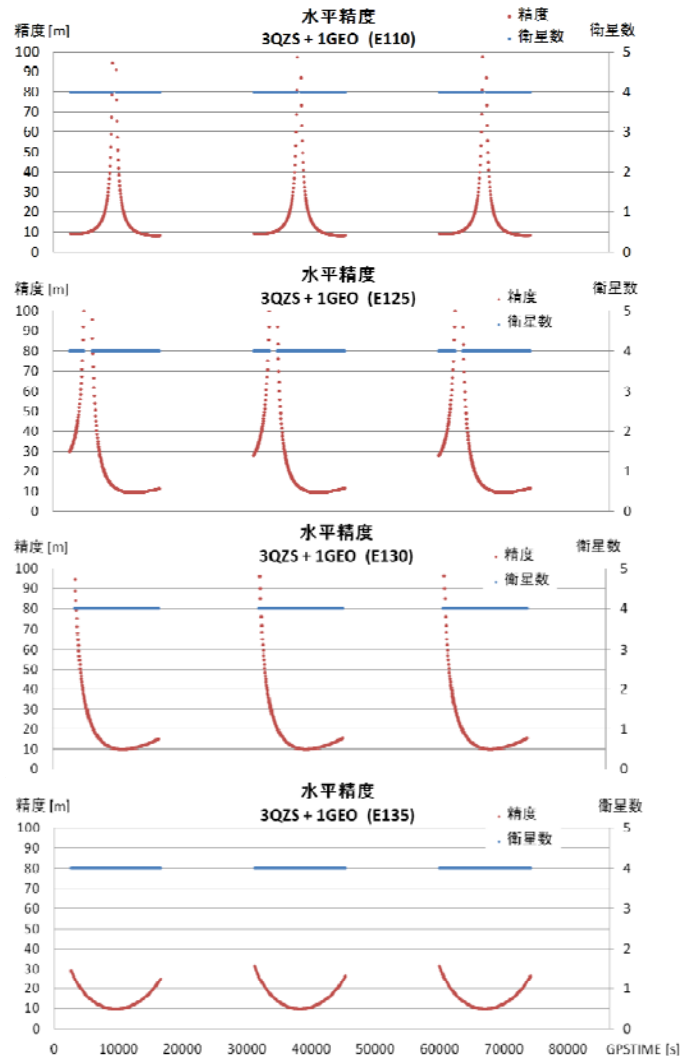
- 高度変化と水平誤差の相関 -



海上において(台風時を除いて)高度真値は2,3m以内程度で決定可能

8. シミュレーション結果

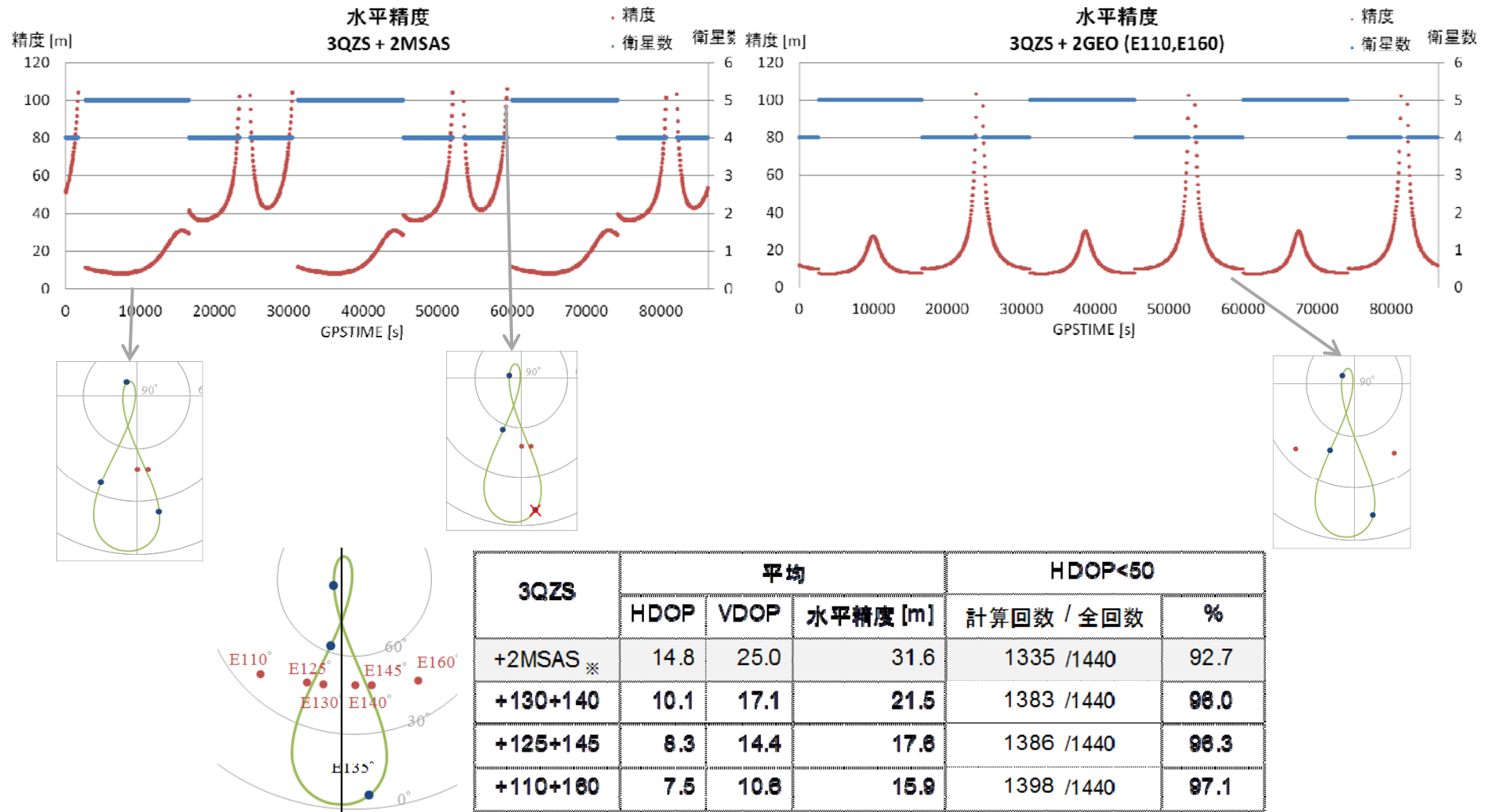
- ① 衛星数 4機 (3QZS + 1GEO) -



3QZS	平均			HDOP < 50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+110	7.5	12.7	16.0	680 / 1440	47.2
+125	10.6	13.6	22.5	649 / 1440	45.1
+130	9.0	10.1	19.1	654 / 1440	45.4
+135	7.2	7.3	15.4	707 / 1440	49.1

8. シミュレーション結果

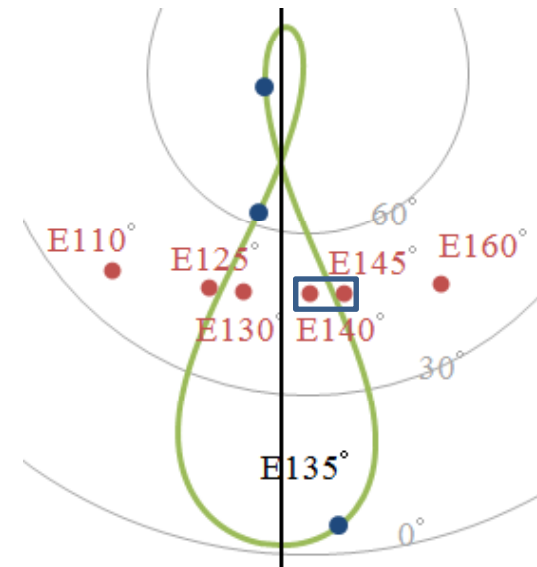
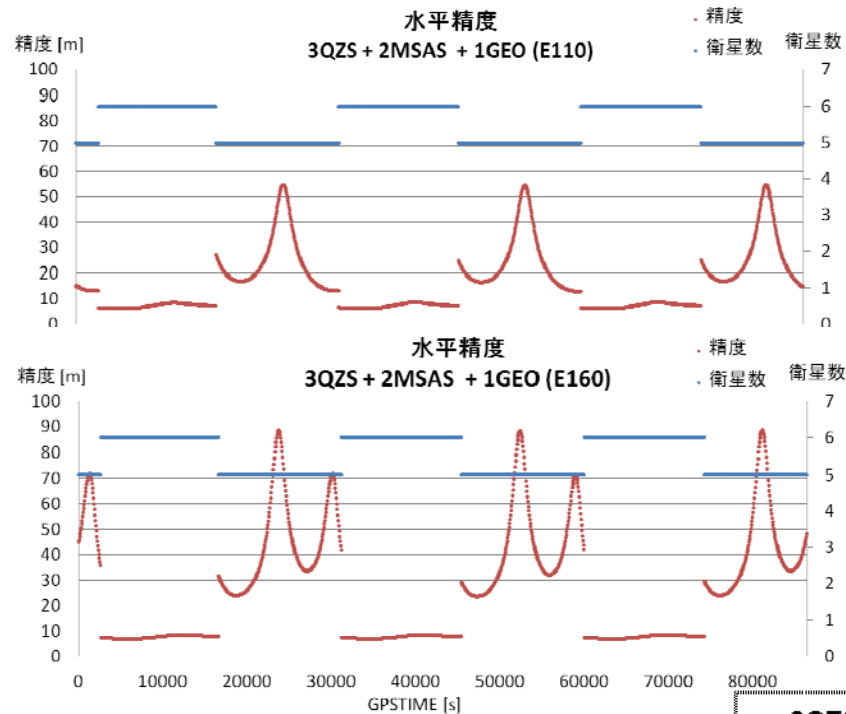
- ② 衛星数 5機 (3QZS + 2GEO) -



※ +140+145

8. シミュレーション結果

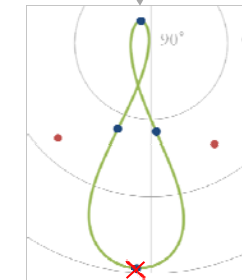
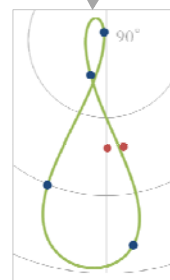
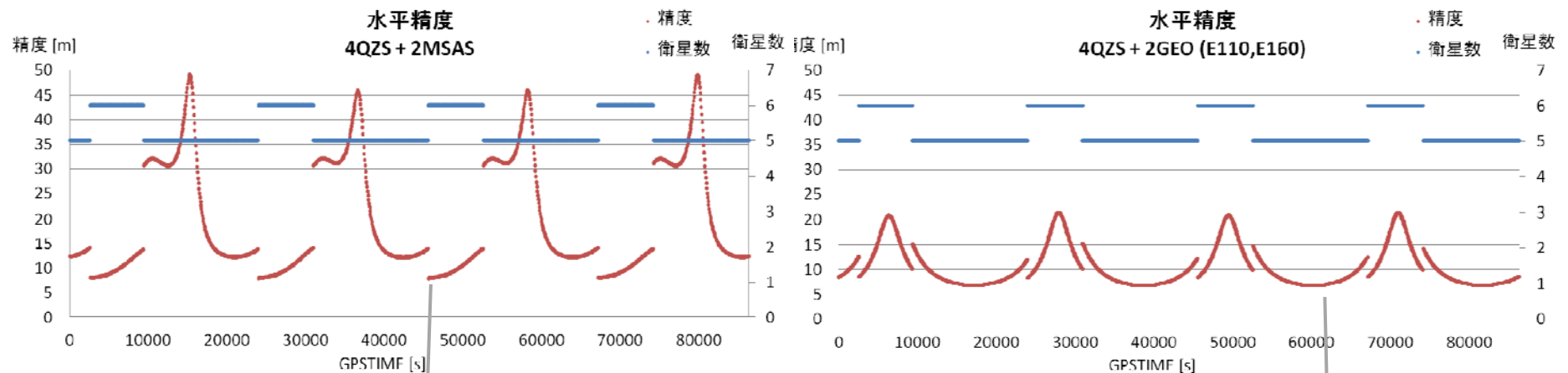
- ③ 衛星数 6機 (3QZS + 2MSAS + 1GEO) -



3QZS +MSAS※	平均			HDOP < 50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+110	7.5	11.6	15.9	1440 / 1440	100.0
+125	8.8	15.5	18.8	1440 / 1440	100.0
+130	9.2	16.4	19.5	1413 / 1440	98.1
+135	10.3	18.5	21.9	1390 / 1440	96.5
+160	12.2	25.5	26.0	1440 / 1440	100.0

8. シミュレーション結果

- ④ 衛星数 6機 (4QZS + 2GEO) -

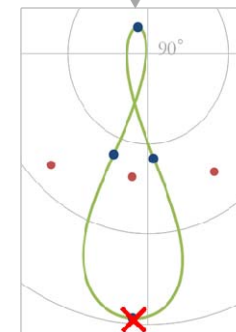
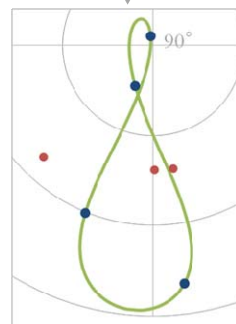
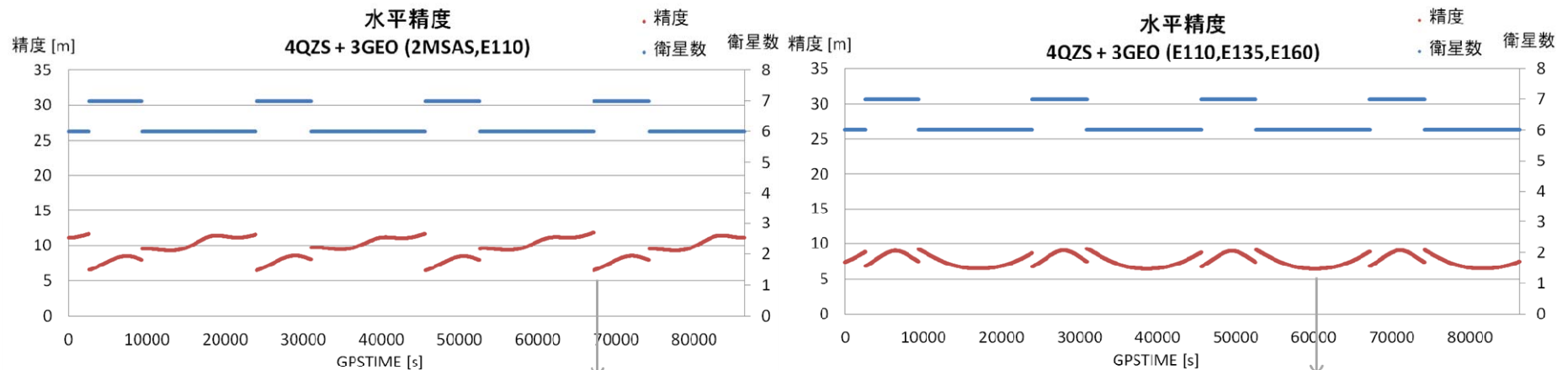


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※	9.1	15.0	19.3
+110+160	4.9	7.5	10.5

※ +140+145

8. シミュレーション結果

- ⑤ 衛星数 7機 (4QZS + 3GEO) -

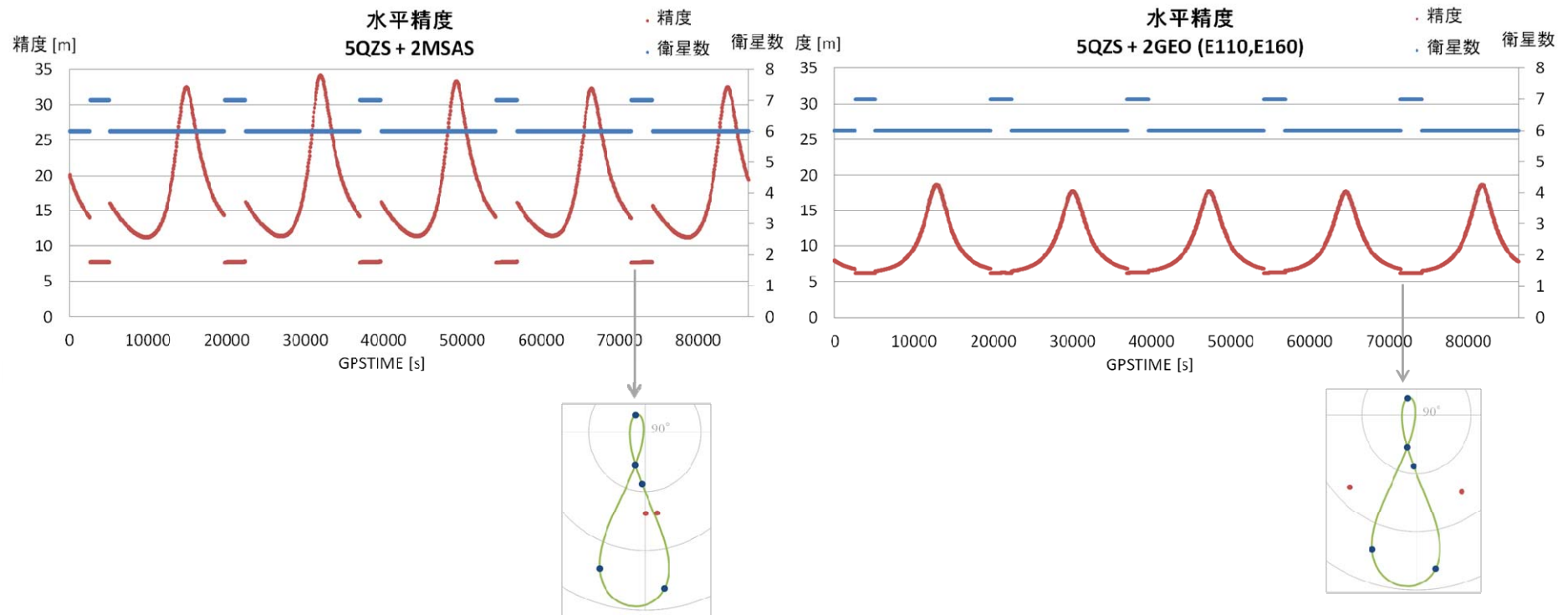


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※+110	4.5	7.5	9.6
+110+135+160	3.6	5.7	7.6

※ +140+145

8. シミュレーション結果

- ⑥ 衛星数 7機 (5QZS + 2GEO) -



5QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※	7.6	10.1	16.3
+110+160	4.5	7.0	9.5

※ +140+145