

# 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 -

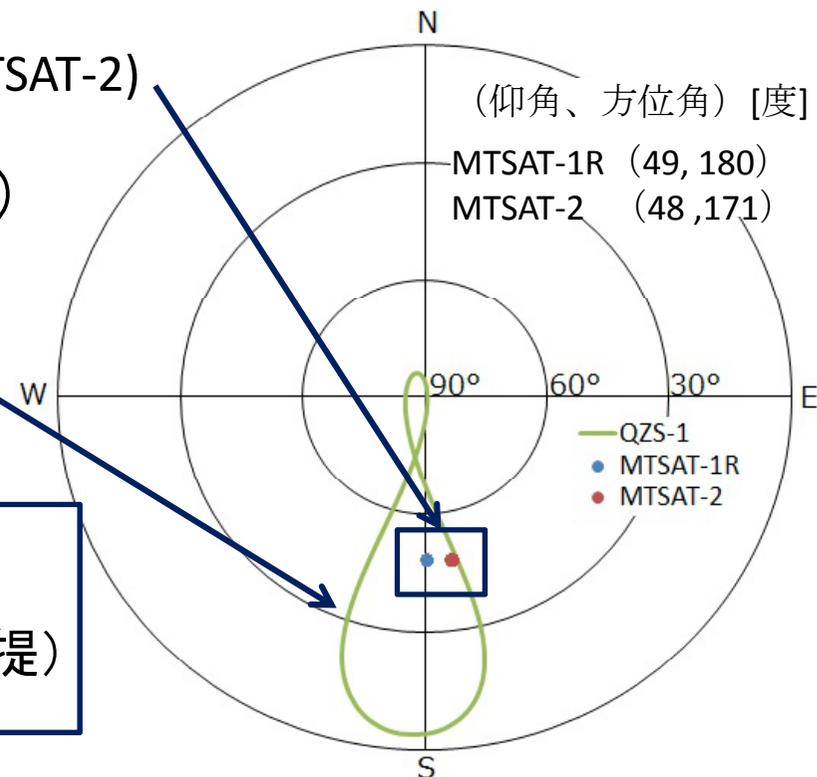
### -MSAS (運輸多目的衛星用航法補強システム)

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)

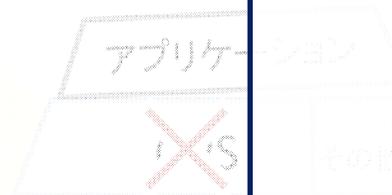


大学キャンパス屋上を基準とした  
上空図

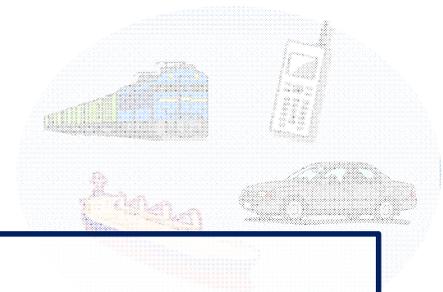
# 1. 背景と目的

## - 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

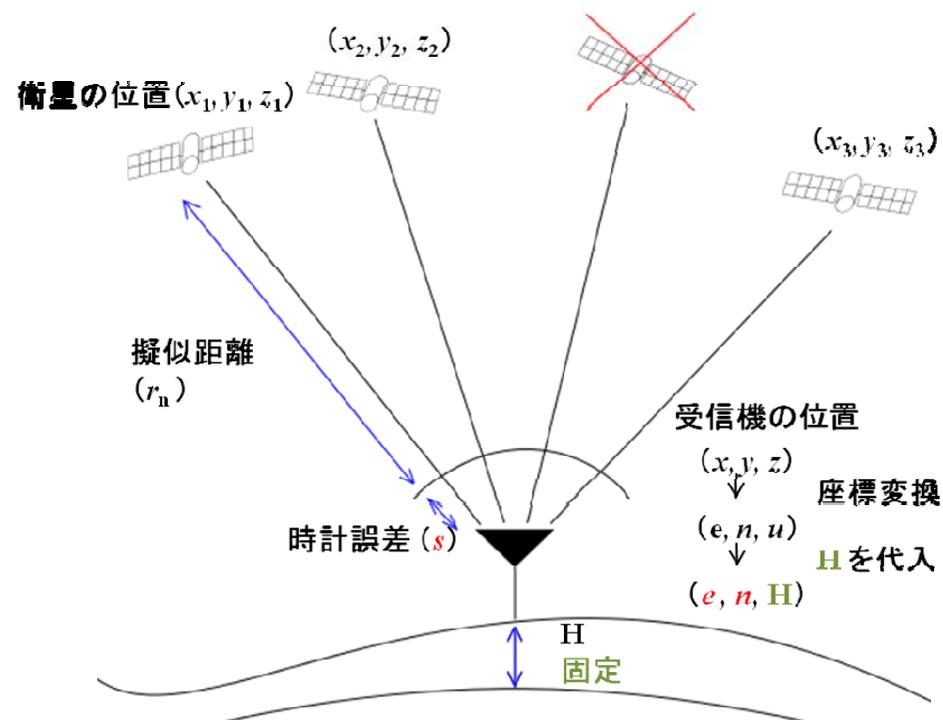
- QZSSの測距性能 → GPSとほぼ同等
- MSASの測位機能 → 帯域が狭いためあまり推奨されていない
- MSASの測距性能の評価

## 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( $\phi, \lambda, h$ )、時計誤差( $s$ )
3衛星測位	<b>3</b>	2次元位置( $\phi, \lambda$ )、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

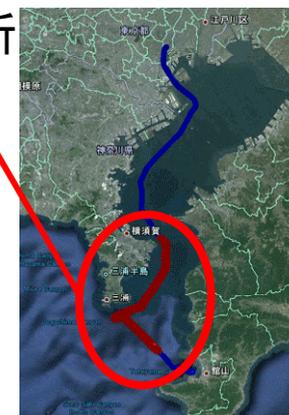
### 移動体実験 データ取得場所

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

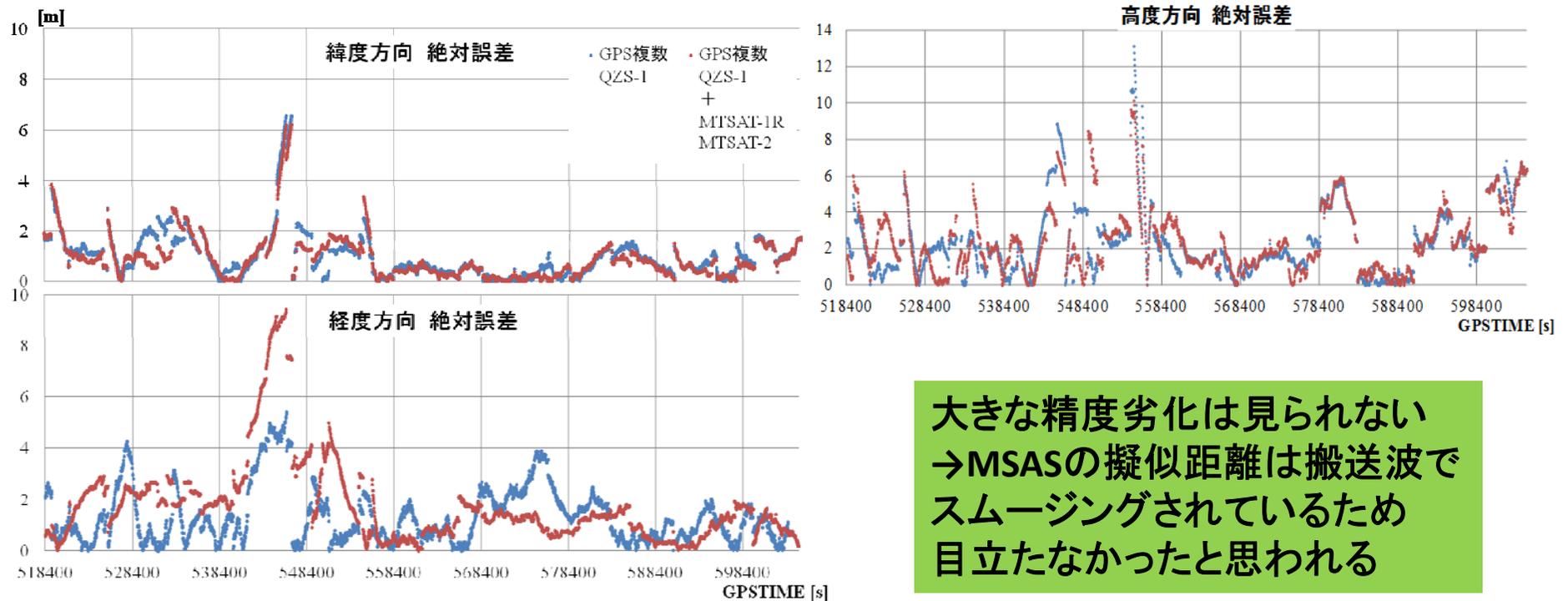
- 結果

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



大きな精度劣化は見られない  
→MSASの擬似距離は搬送波で  
スムージングされているため  
目立たなかったと思われる

# 4. 静止実験 解析結果

## - 3衛星測位 -

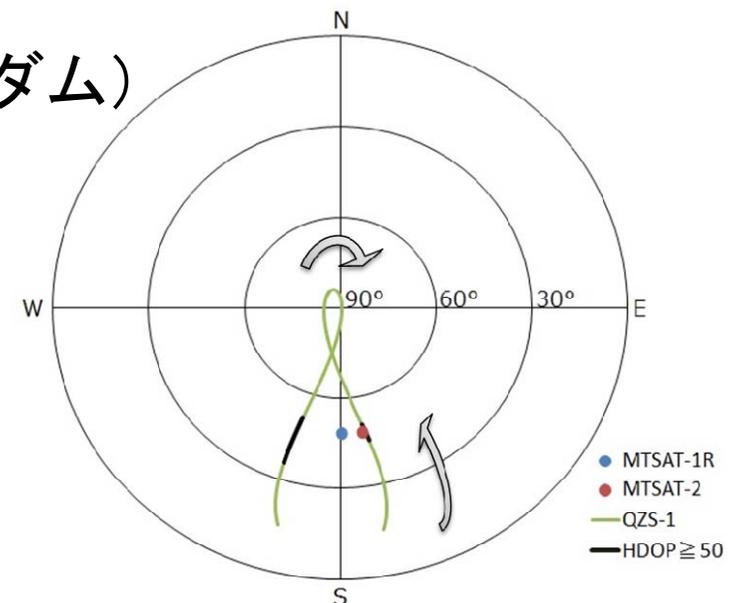
- 比較方法

- 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

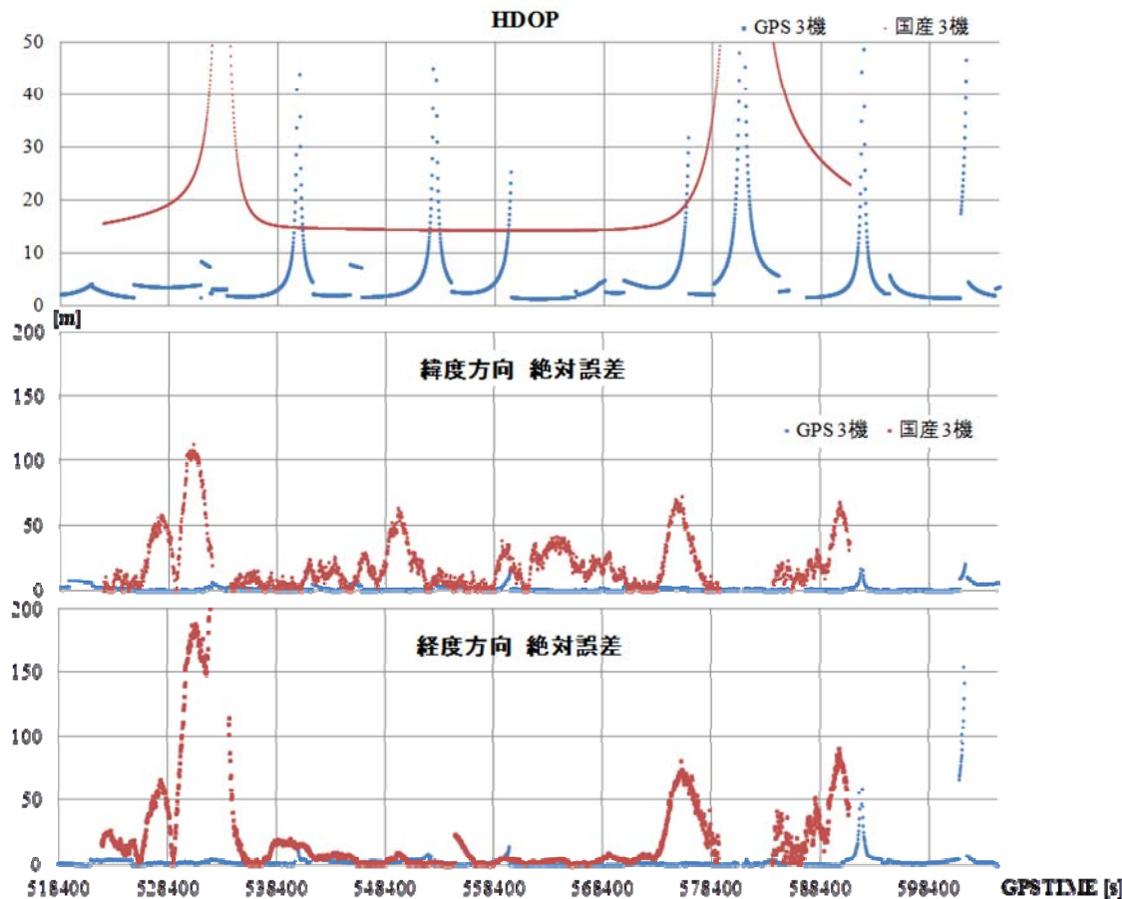
- HDOPが50未満の場合のみ測位を行うよう制限



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

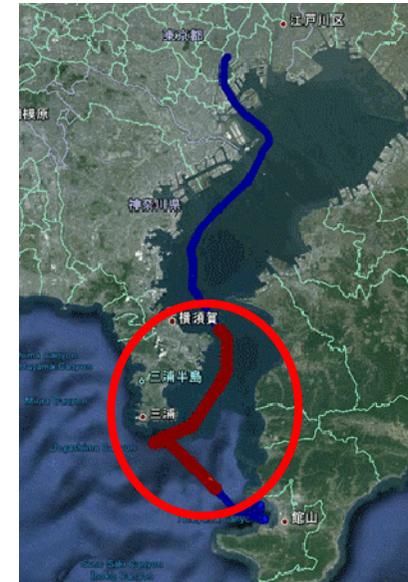
# 5. 移動体実験 解析結果

## - 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

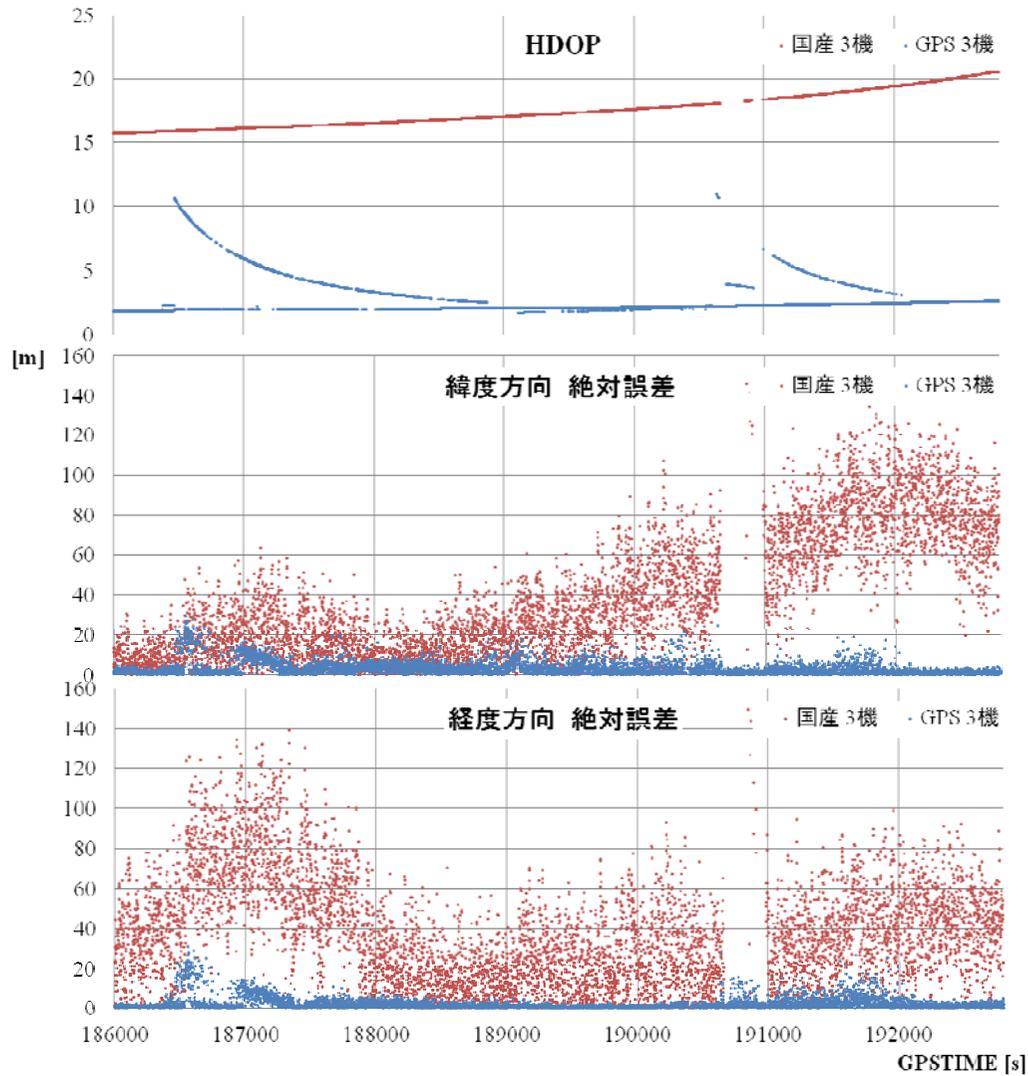
- 結果



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)

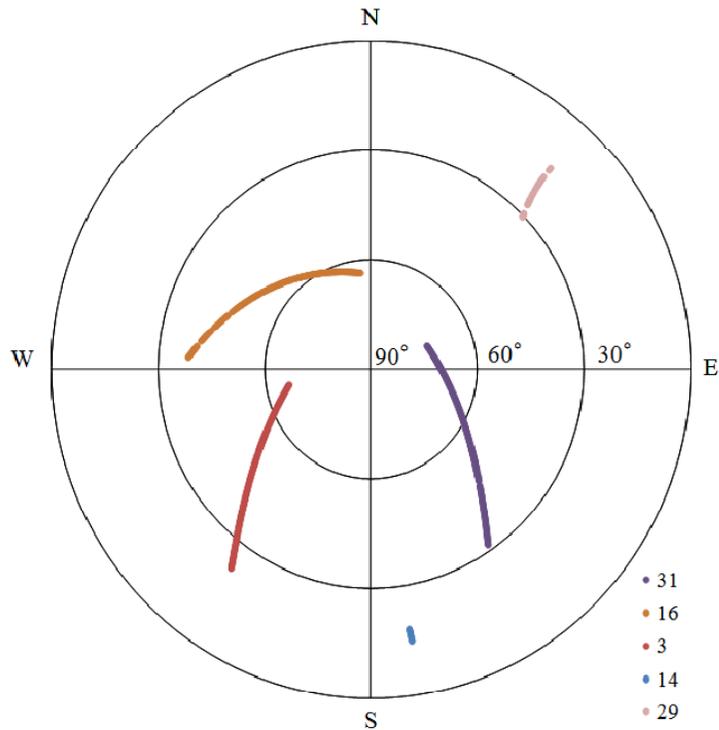
$$\text{HDOP} : 17.5/2.6 = 6.7$$

$$\text{水平精度} : 34.6/4.5 = 8.2$$

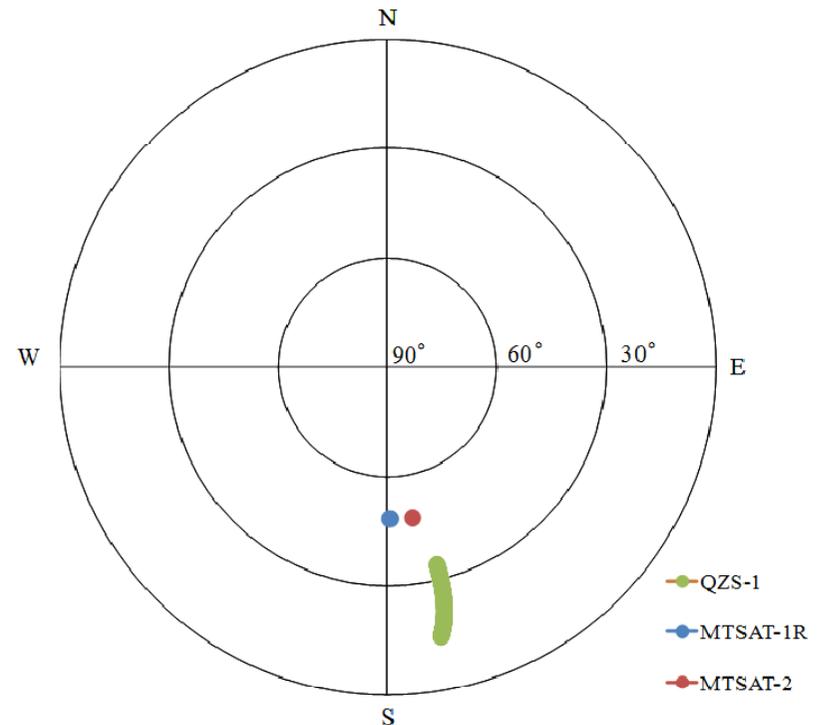
# 5. 移動体実験 解析結果

## - 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	-
<b>測距精度</b>	① / ② ≒ 2.1m	<b>2.1m</b> 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

$8.63 / 4.64 \div 1.9m$

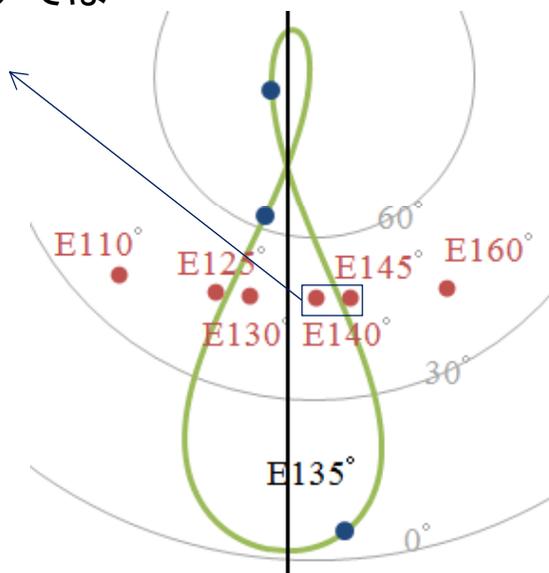
よって今後打ち上げのQZSSの性能もGPSと同等であると考えると測距精度は1.9mだが、今回はより悪い条件の2.1mを利用した。

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



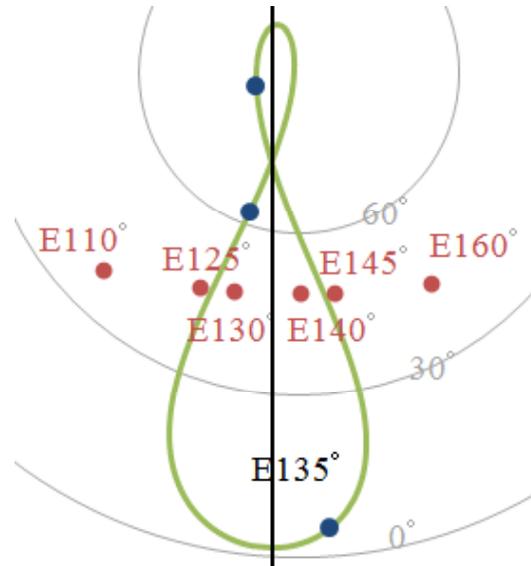
3QZSとGEO

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

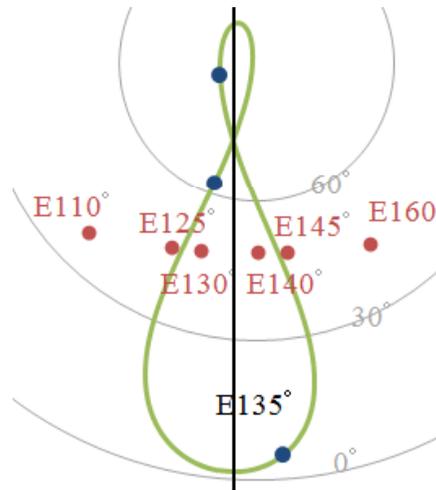
### - ① 衛星数 4機 ( 3QZS + 1GEO ) -



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

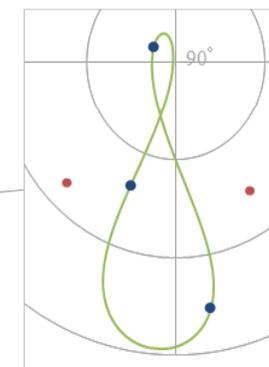
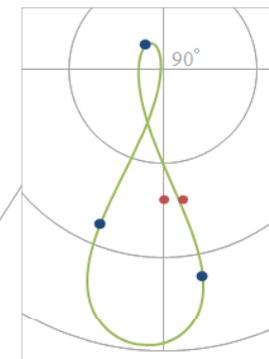
# 8. シミュレーション結果

## - ② 衛星数 5機 ( 3QZS + 2GEO ) -



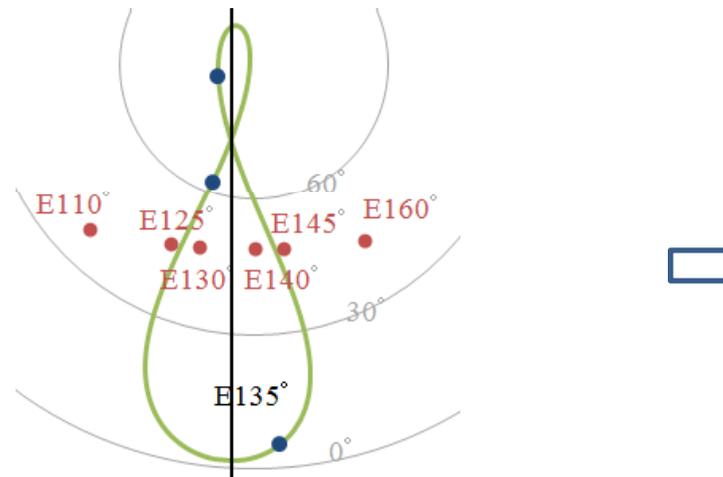
3QZS	平均			HDOP<50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+2MSAS ※	14.8	25.0	31.6	1335 / 1440	92.7
<b>+130+140</b>	<b>10.1</b>	<b>17.1</b>	<b>21.5</b>	1383 / 1440	<b>96.0</b>
<b>+125+145</b>	<b>8.3</b>	<b>14.4</b>	<b>17.6</b>	1386 / 1440	<b>96.3</b>
<b>+110+160</b>	<b>7.5</b>	<b>10.6</b>	<b>15.9</b>	1398 /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

※ +140+145



# 8. シミュレーション結果

## - ③ 衛星数 6機 ( 3QZS + 2MSAS + 1GEO ) -

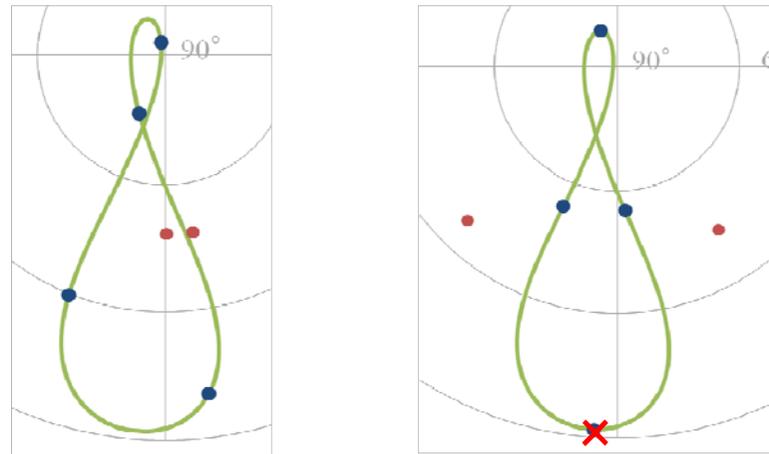


3QZS +MSAS※	平均			HDOP < 50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+110	7.5	11.6	15.9	1440 / 1440	100.0
+125	8.8	15.5	18.8	1440 / 1440	100.0
+130	9.2	16.4	19.5	1413 / 1440	98.1
+135	10.3	18.5	21.9	1390 / 1440	96.5
+160	12.2	25.5	26.0	1440 / 1440	100.0

※ +140+145

## 8. シミュレーション結果

### - ④ 衛星数 6機 ( 4QZS + 2GEO ) -

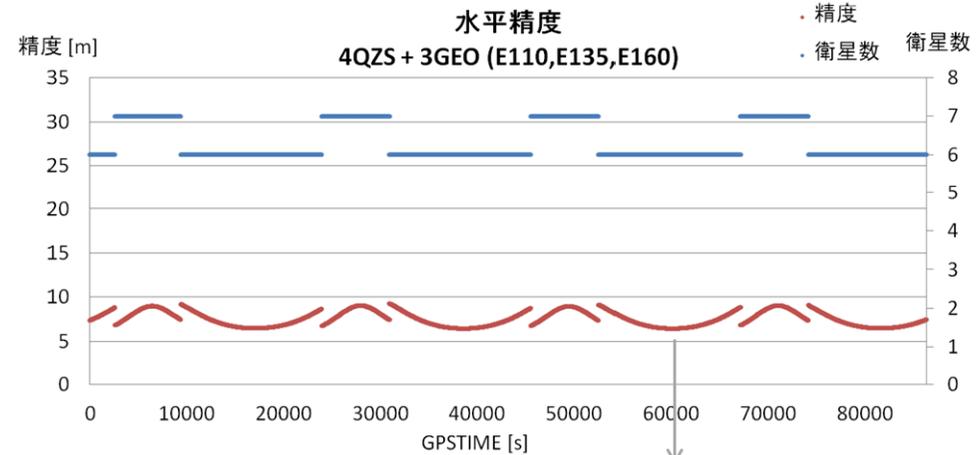
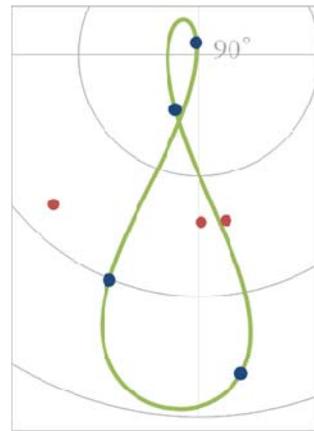


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※	9.1	15.0	19.3
<b>+110+160</b>	<b>4.9</b>	<b>7.5</b>	<b>10.5</b>

※ +140+145

# 8. シミュレーション結果

## - ⑤ 衛星数 7機 ( 4QZS + 3GEO ) -

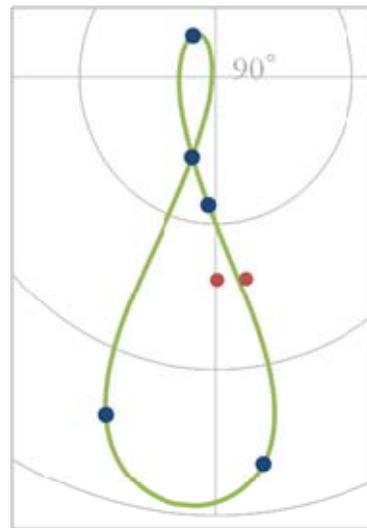


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※+110	4.5	7.5	9.6
<b>+110+135+160</b>	<b>3.6</b>	<b>5.7</b>	<b>7.6</b>

※ +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
<b>+110+160</b>	<b>4.5</b>	<b>7.0</b>	<b>9.5</b>

※ +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	<b>97.1</b>
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

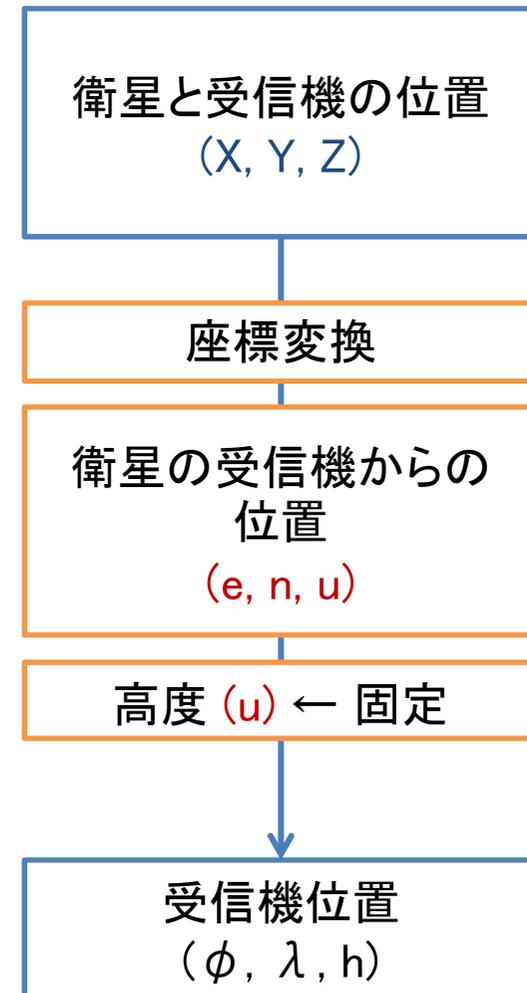
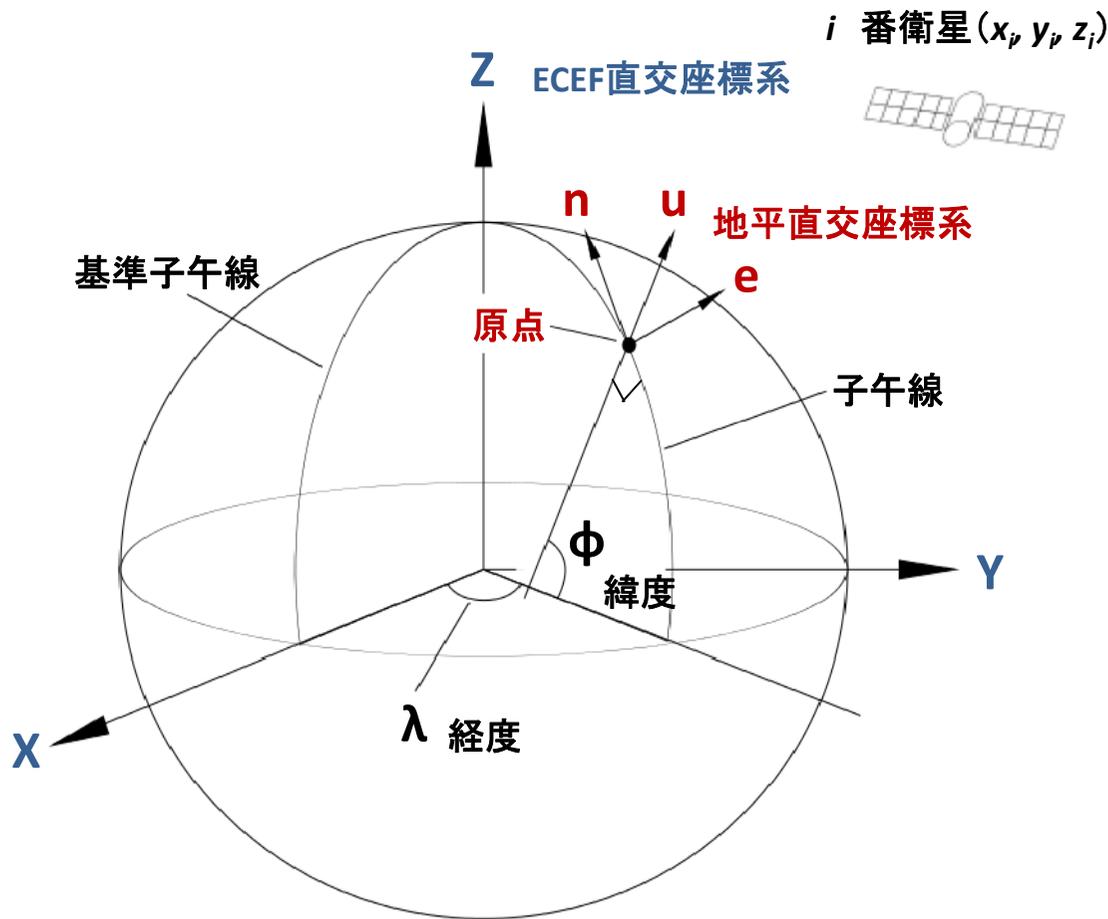
※ +140+145

- ・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

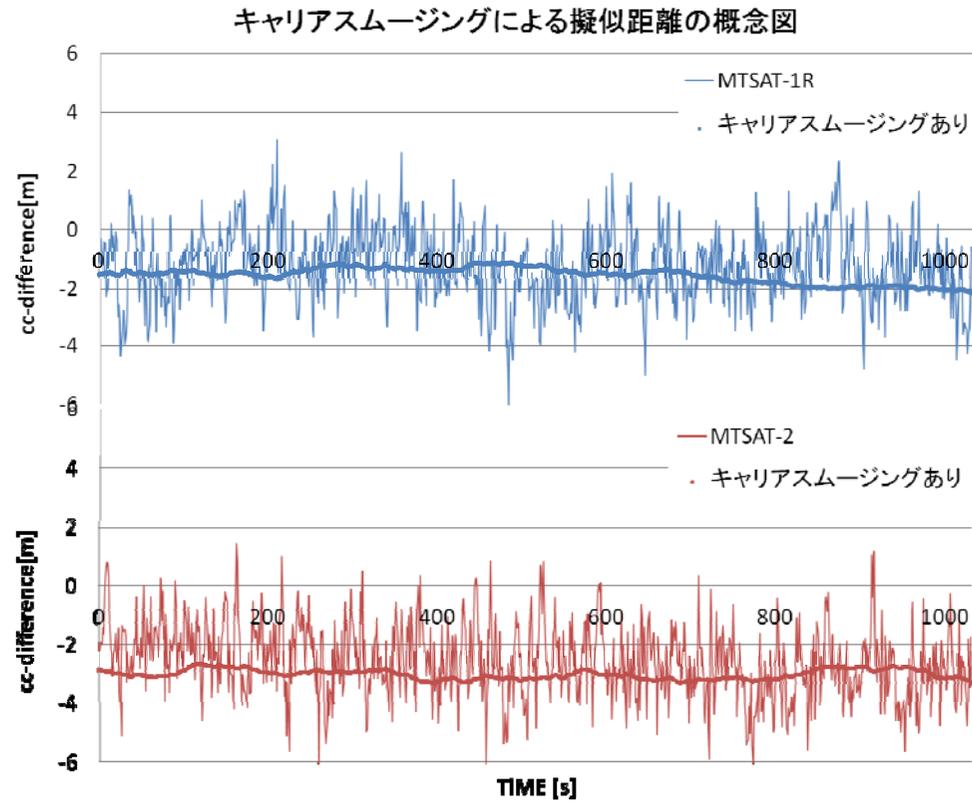
### 静止実験 3衛星測位

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

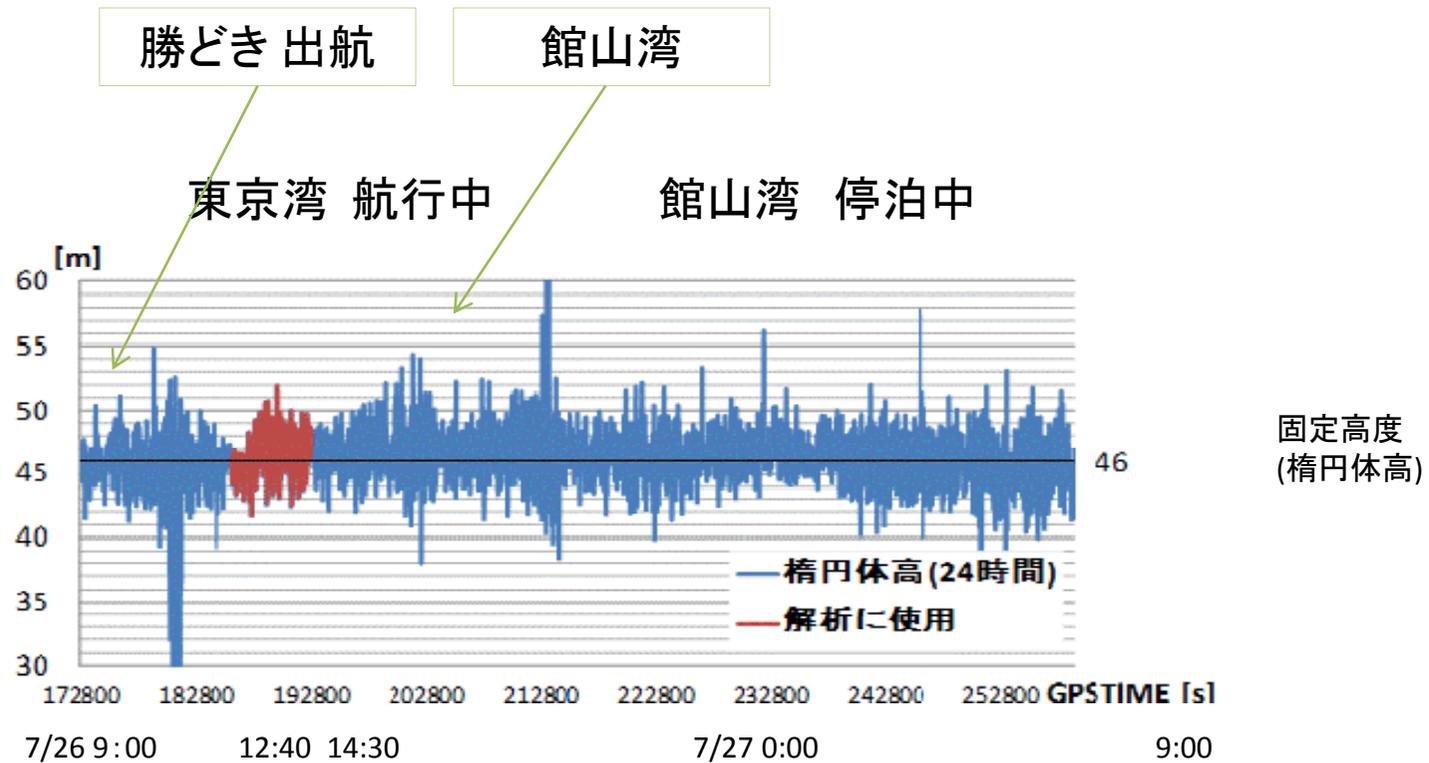
平均	HDOP	絶対誤差 [m]			標準偏差 [m]	水平方向 [m]	
		緯度	経度	水平	水平	1dRMS	2dRMS
GPS 3機	2.71	2.44	3.32	4.46	4.58	6.39	12.8
'国産 3機	17.5	38.8	37.5	58.5	33.4	67.3	134.7

# 擬似距離のスムージング



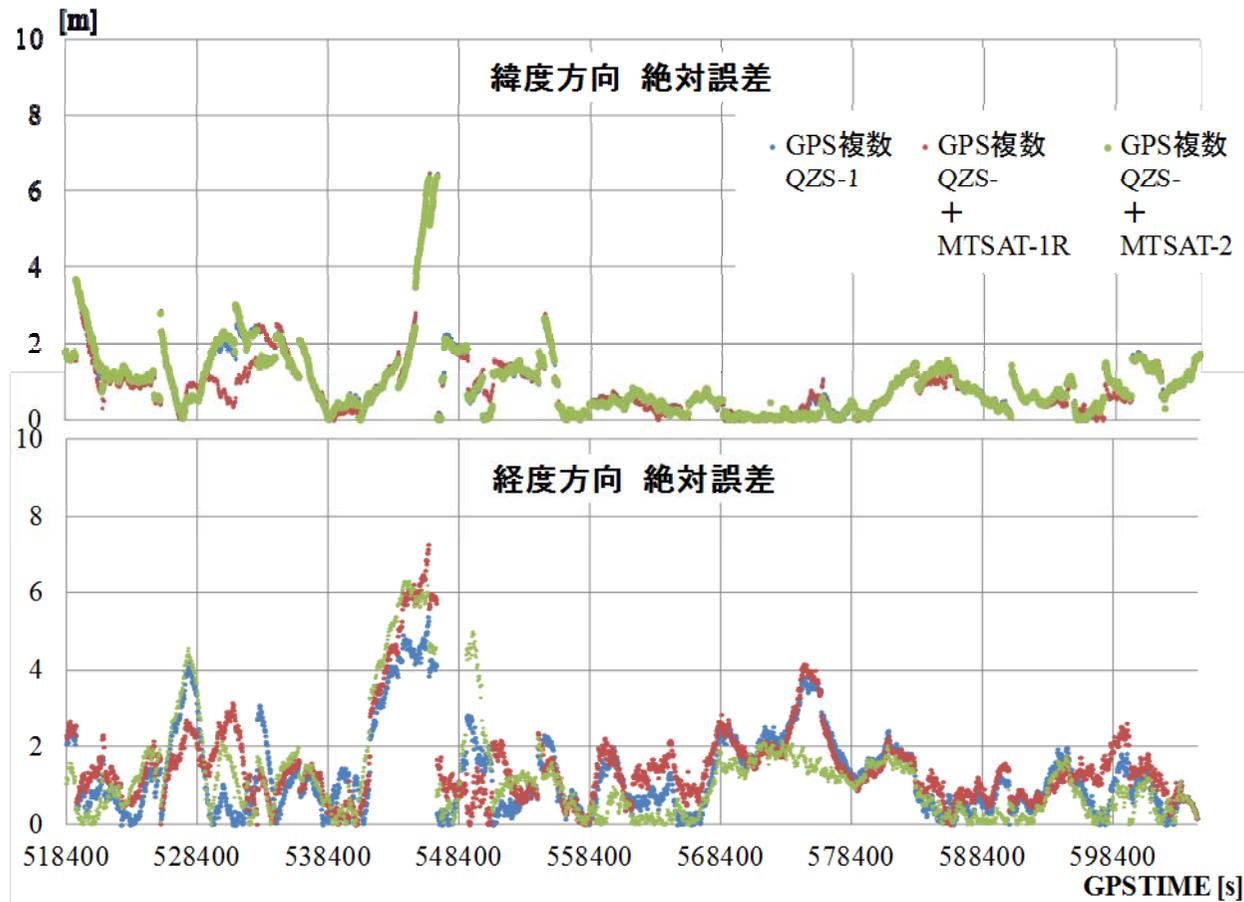
標準偏差[m]	MTSAT-1R	MTSAT-2	QZS-1	
キャリアスムージングなし	1.2	1.2	1.3	①
キャリアスムージングあり	0.26	0.17	0.07	②
改善率 ①÷②	4.8	7.6	17.3	

## 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

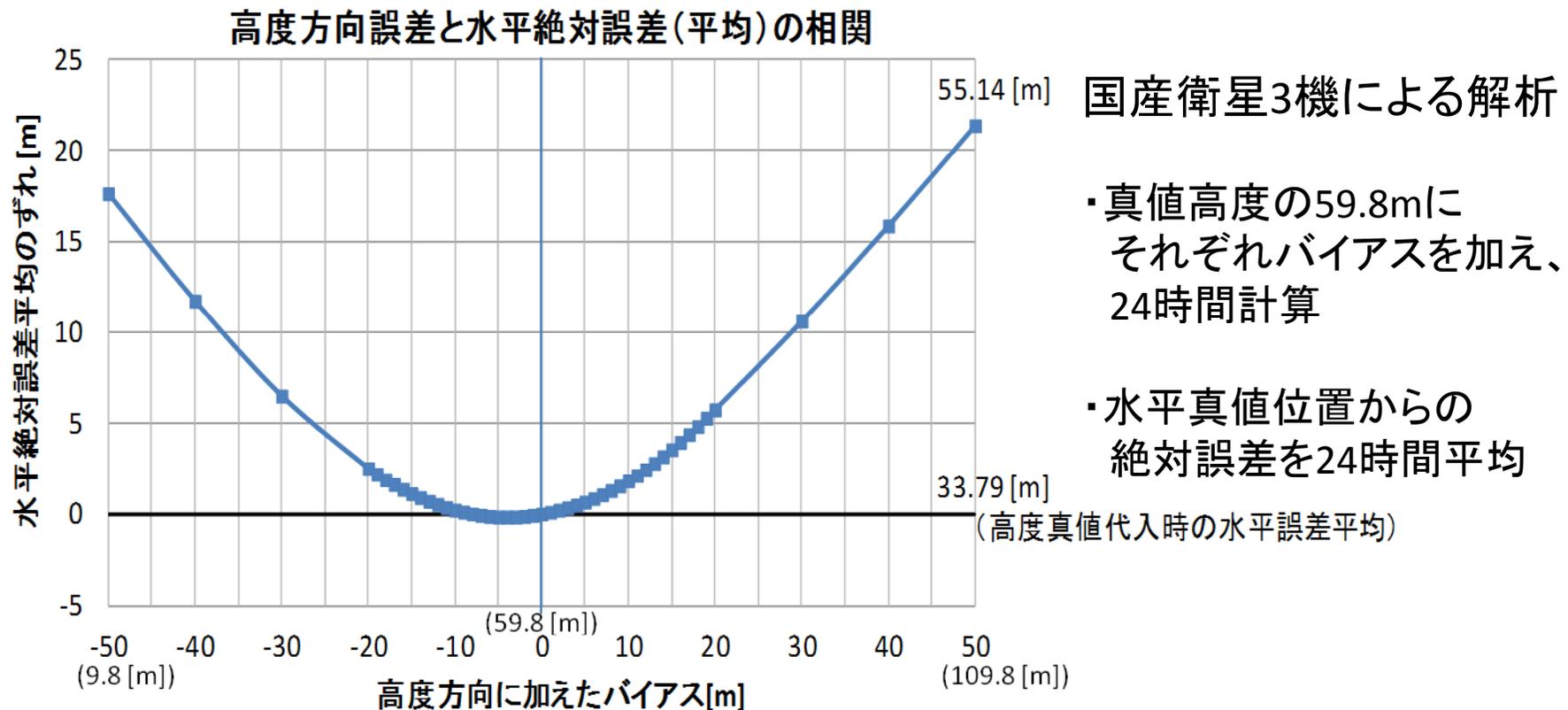
### 3. MSAS衛星の影響について 静止実験 解析結果



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

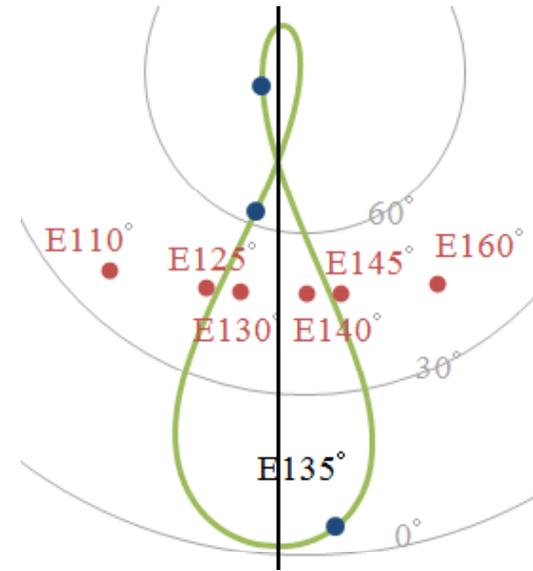
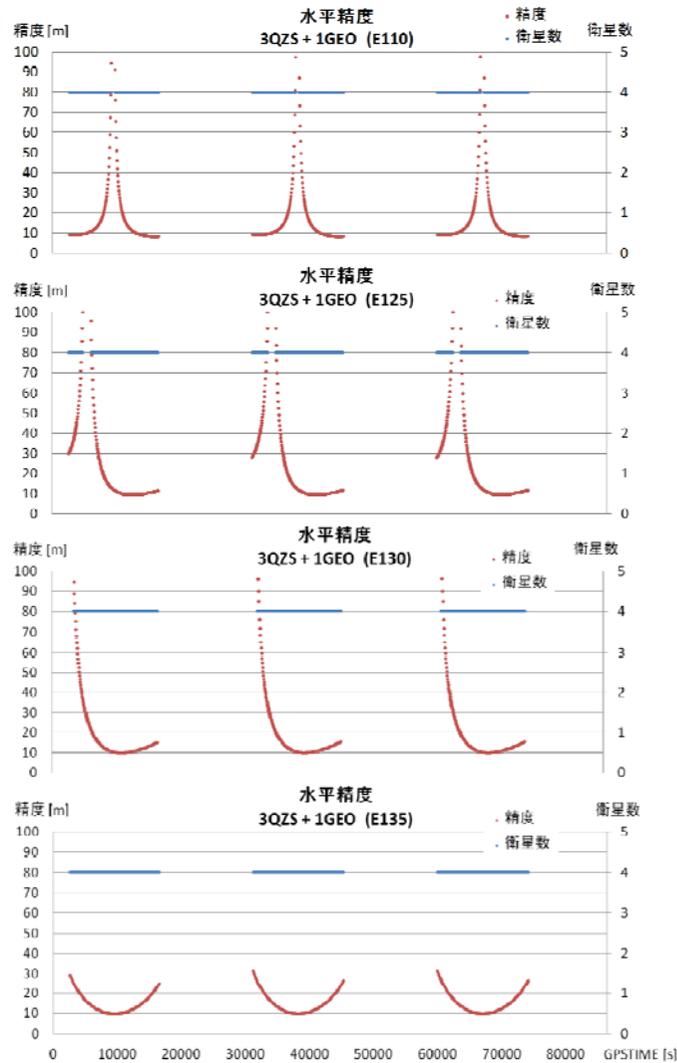
## - 高度変化と水平誤差の相関 -



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

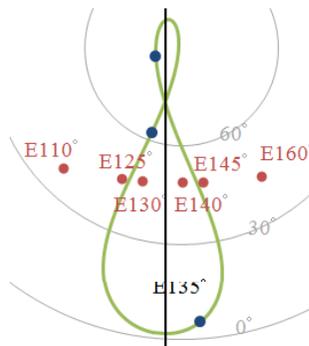
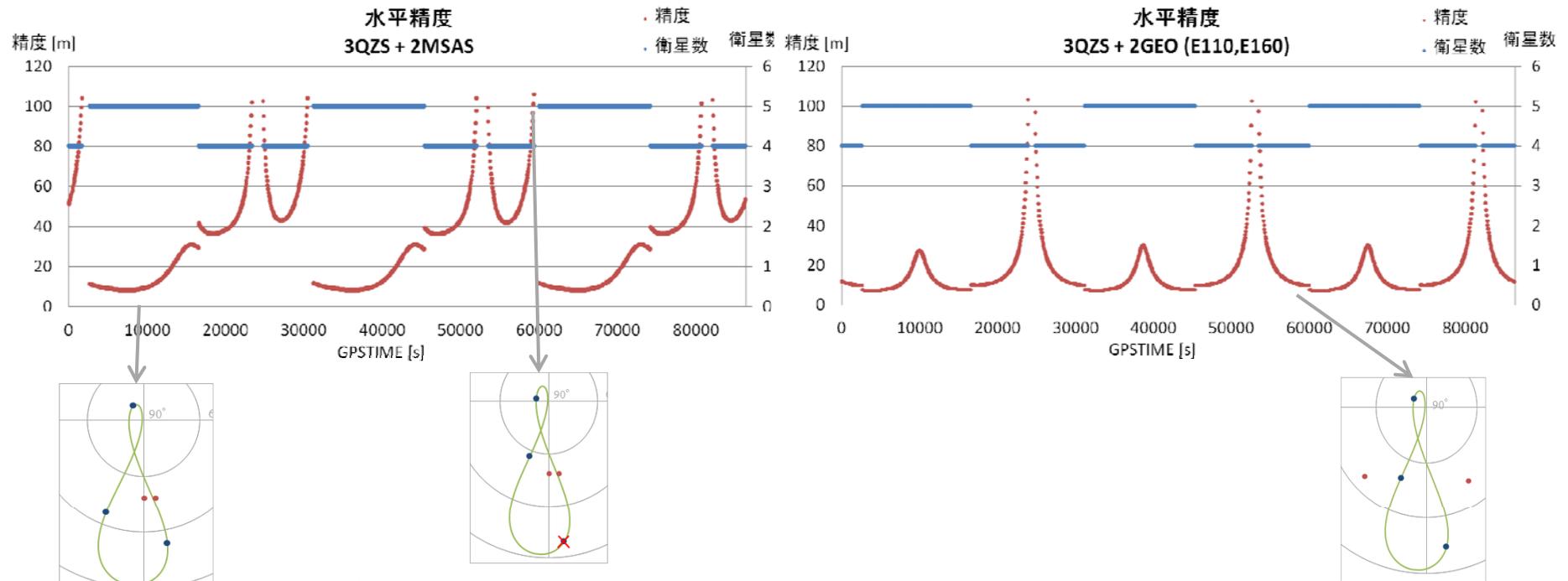
## - ① 衛星数 4機 ( 3QZS + 1GEO ) -



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 ) -

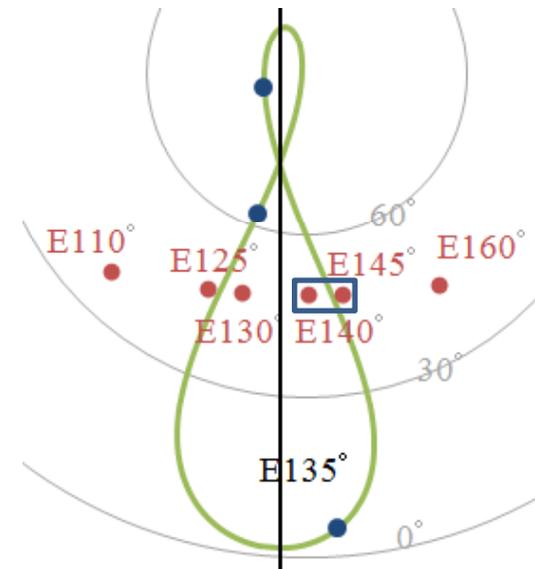
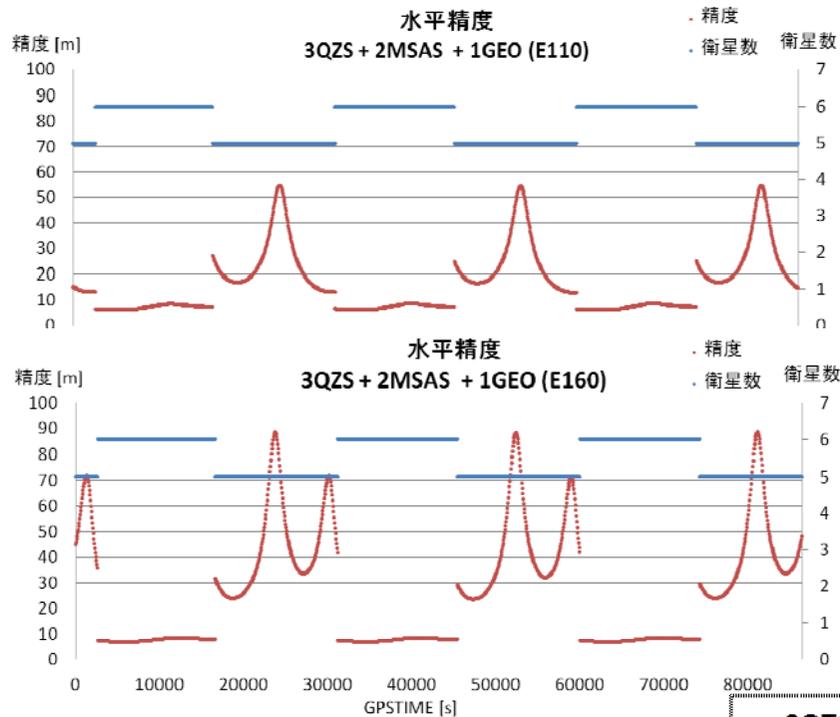


3QZS	平均			HDOP<50	
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]	計算回数 / 全回数	%
+2MSAS ※	14.8	25.0	31.6	1335 / 1440	92.7
<b>+130+140</b>	<b>10.1</b>	<b>17.1</b>	<b>21.5</b>	1383 / 1440	<b>96.0</b>
<b>+125+145</b>	<b>8.3</b>	<b>14.4</b>	<b>17.8</b>	1386 / 1440	<b>96.3</b>
<b>+110+180</b>	<b>7.5</b>	<b>10.8</b>	<b>15.9</b>	1398 / 1440	<b>97.1</b>

※ +140+145

# 8. シミュレーション結果

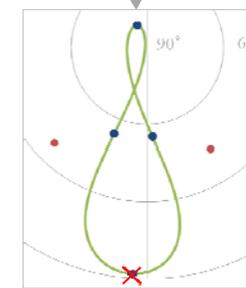
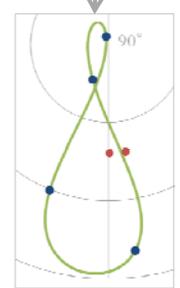
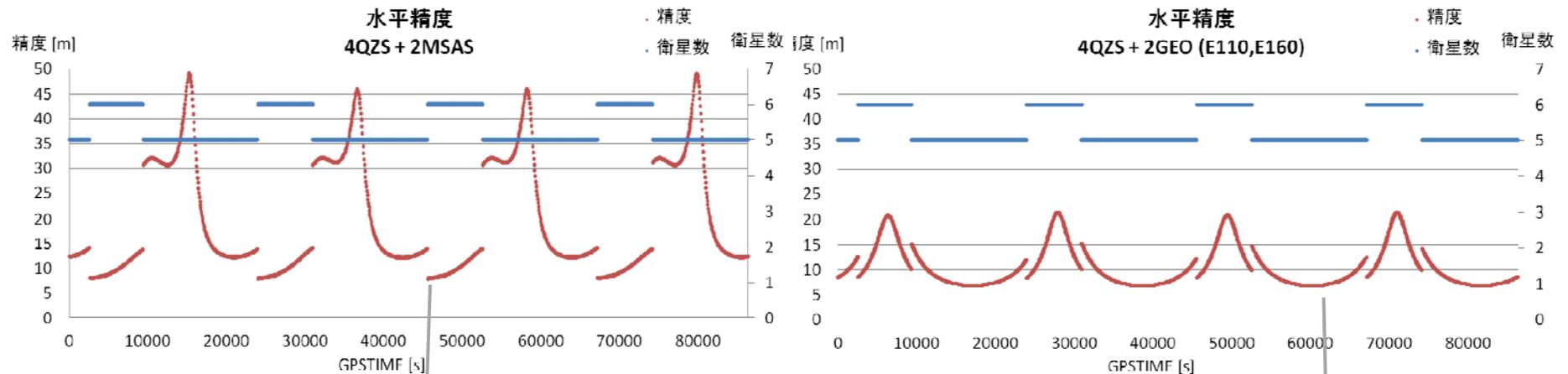
## - ③ 衛星数 6機 ( 3QZS + 2MSAS + 1GEO ) -



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 ) -

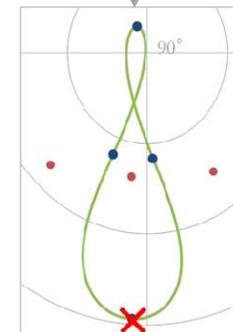
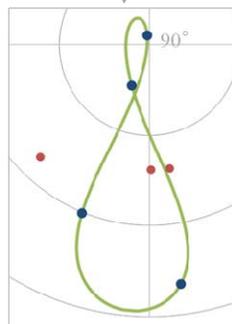
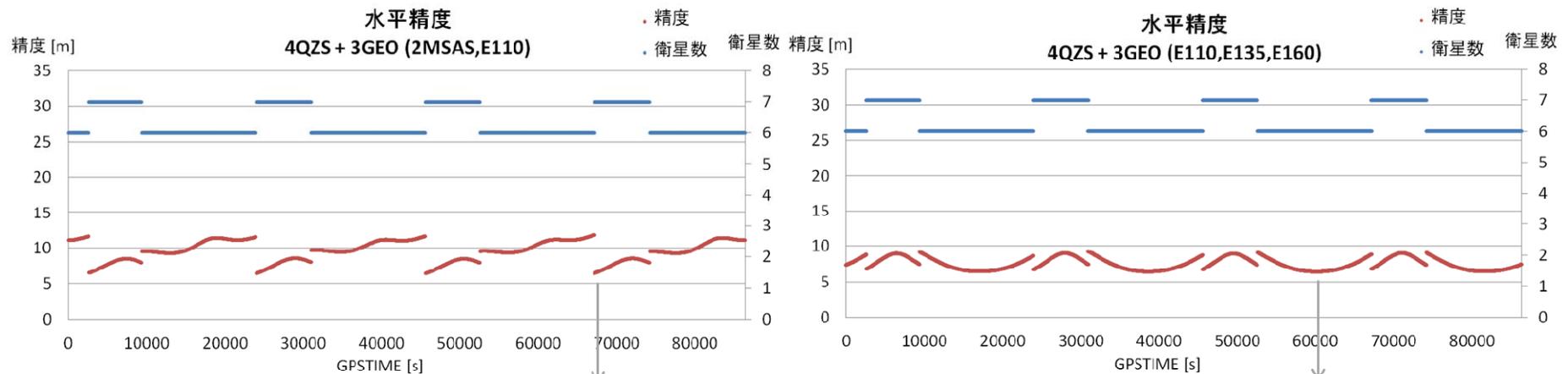


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※	9.1	15.0	19.3
<b>+110+160</b>	<b>4.9</b>	<b>7.5</b>	<b>10.5</b>

※ +140+145

# 8. シミュレーション結果

## - ⑤ 衛星数 7機 ( 4QZS + 3GEO ) -

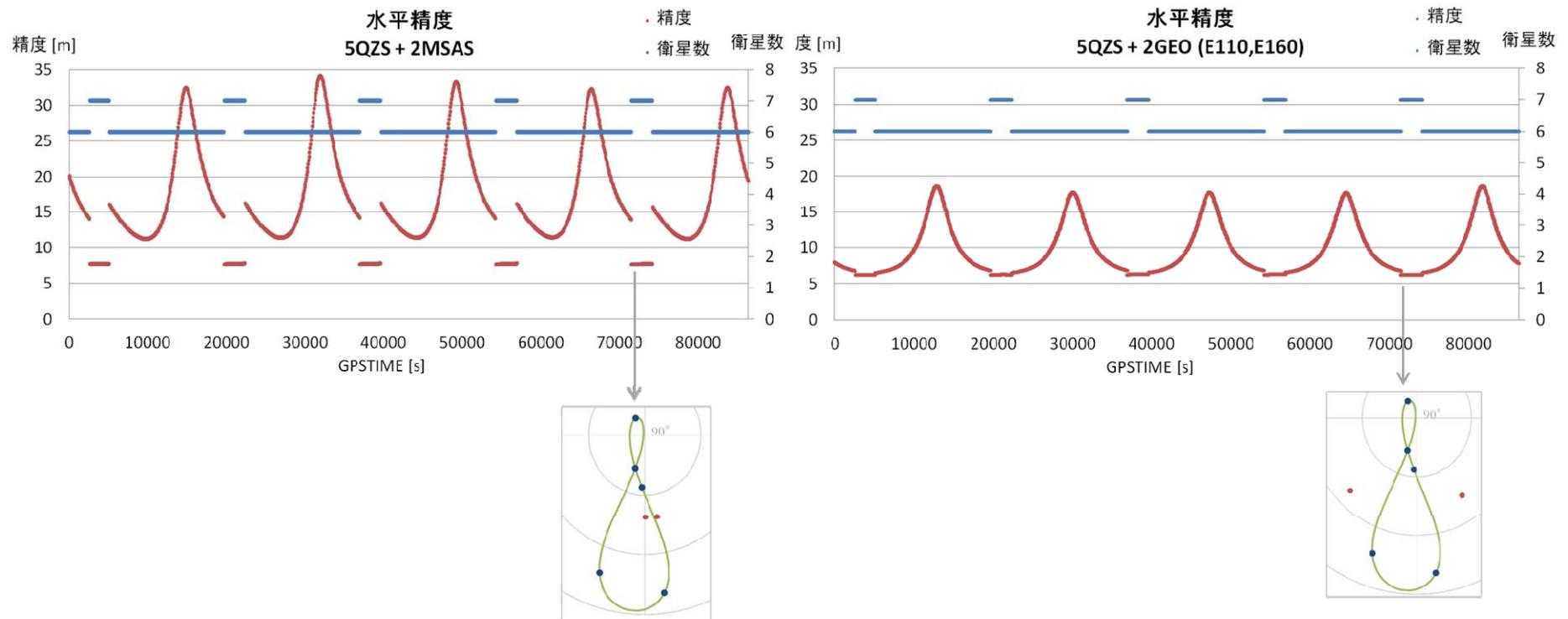


4QZS	平均		
	HDOP	VDOP	水平精度 [m]
+2MSAS ※+110	4.5	7.5	9.6
<b>+110+135+160</b>	<b>3.6</b>	<b>5.7</b>	<b>7.6</b>

※ +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