

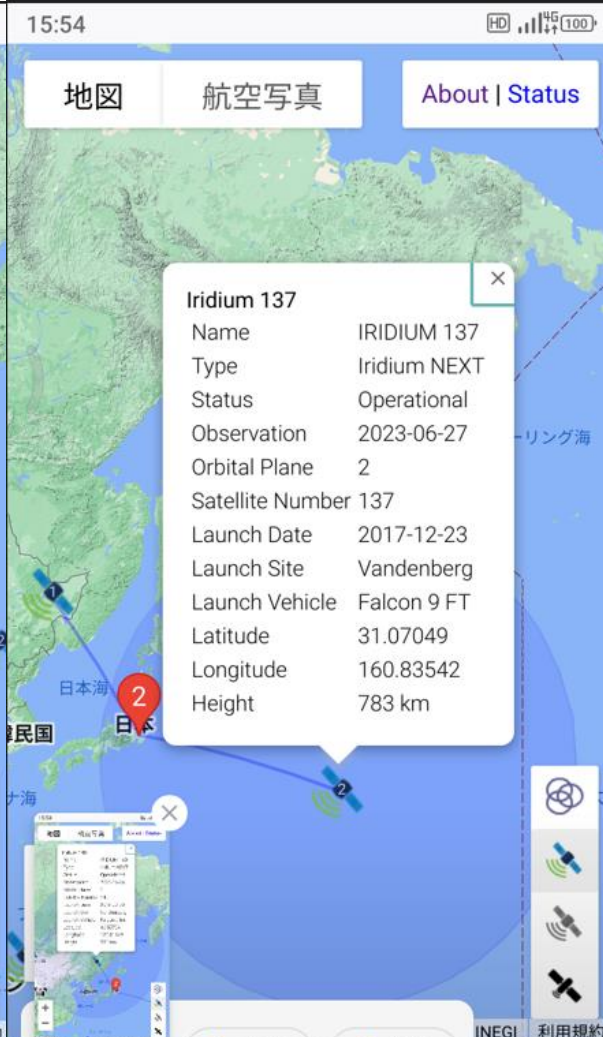
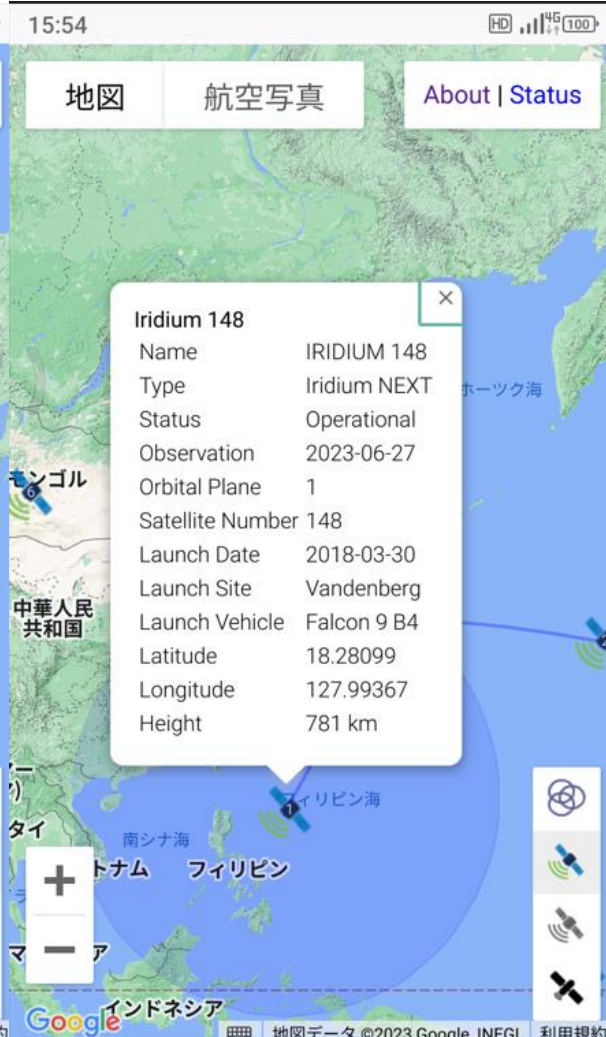
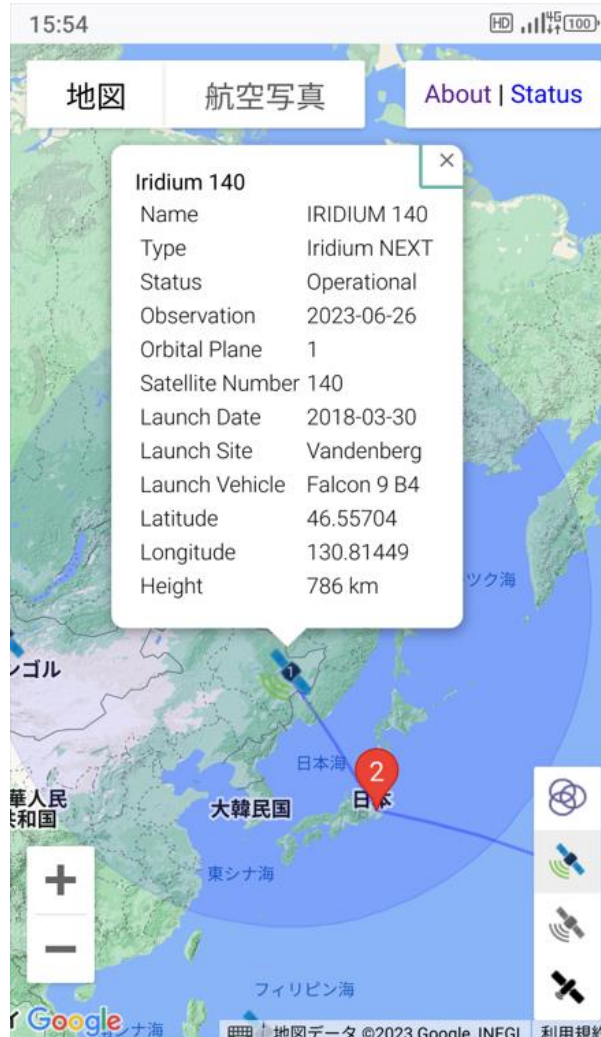
Iridium NEXTを利用した 測位実証実験

(後半より卒論発表時の内容)

利用した実験機材



実験時に対象とするイリジウムネクスト
がどこにあるか



IRA

- **2023/12/14** 6:53:54.80(UTC)から取得開始
- 経過時間、受信周波数、衛星番号

77	IDA: p-1701665283	000003662.3603	1623760640	92%	-56.71 -110.76 18.91	179	DL	LCW(2,T:hdof,C:ha
78	ISY: p-1701665283	000003662.3611	1623719040	98%	-53.72 -110.68 23.77	179	DL	LCW(7,T:acchl,C:ac
79	I38: p-1701665283	000003685.6131	1623323520	84%	-62.62 -110.68 20.92	179	DL	LCW(3,T:hndof,C:ha
80	IRA: p-1701665283	000003696.8125	1626240256	98%	-51.73 -110.24 20.04	120	DL	sat:043 beam:35 x
81	IDA: p-1701665283	000003932.3538	1623719040	91%	-56.89 -110.88 21.06	179	DL	LCW(2,T:maint,C:ma
82	ISY: p-1701665283	000003932.3543	1623760640	86%	-58.34 -110.67 20.12	179	DL	LCW(7,T:maint,C:ma
83	IRA: p-1701665283	000003966.8193	1626240128	99%	-45.90 -110.43 33.52	157	DL	sat:043 beam:37 x
84	IDA: p-1701665283	000004022.3537	1623719040	89%	-57.27 -110.93 21.97	179	DL	LCW(2,T:hndof,C:ha
85	IU3: p-1701665283	000004585.6340	1623323520	73%	-63.35 -110.29 18.81	179	DL	LCW(3,T:maint,C:ma
86	IBC: p-1701665283	000005129.3924	1625885696	88%	-56.95 -111.33 24.39	135	DL	bc:0 sat:039 cell
87	IBC: p-1701665283	000005309.3891	1625885696	91%	-56.14 -111.24 25.06	135	DL	bc:0 sat:039 cell
88	IBC: p-1701665283	000005669.3829	1625885696	95%	-55.76 -110.86 19.29	135	DL	bc:0 sat:039 cell
89	IBC: p-1701665283	000005849.3773	1625885696	89%	-55.60 -110.97 24.40	135	DL	bc:0 sat:039 cell
90	IBC: p-1701665283	000006389.3678	1625885696	86%	-57.33 -110.71 21.67	143	DL	bc:0 sat:039 cell
91	IBC: p-1701665283	000006569.3617	1625885696	97%	-54.80 -110.61 26.01	134	DL	bc:0 sat:039 cell
92	IBC: p-1701665283	000006749.3591	1625885696	85%	-56.89 -110.51 23.13	136	DL	bc:0 sat:039 cell
93	IDA: p-1701665283	000007105.6786	1623531776	100%	-50.90 -110.64 30.42	179	DL	LCW(2,T:maint,C:s
94	IDA: p-1701665283	000007195.6782	1623531776	99%	-51.28 -110.70 29.67	179	DL	LCW(2,T:maint,C:s
95	IBC: p-1701665283	000007289.3489	1625885696	84%	-57.72 -110.70 23.75	134	DL	bc:0 sat:039 cell
96	ISY: p-1701665283	000007375.6841	1623531776	100%	-51.24 -110.94 24.84	179	DL	LCW(7,T:maint,C:ma
97	ISY: p-1701665283	000007465.6850	1623531776	100%	-50.93 -110.45 22.70	179	DL	LCW(7,T:maint,C:q

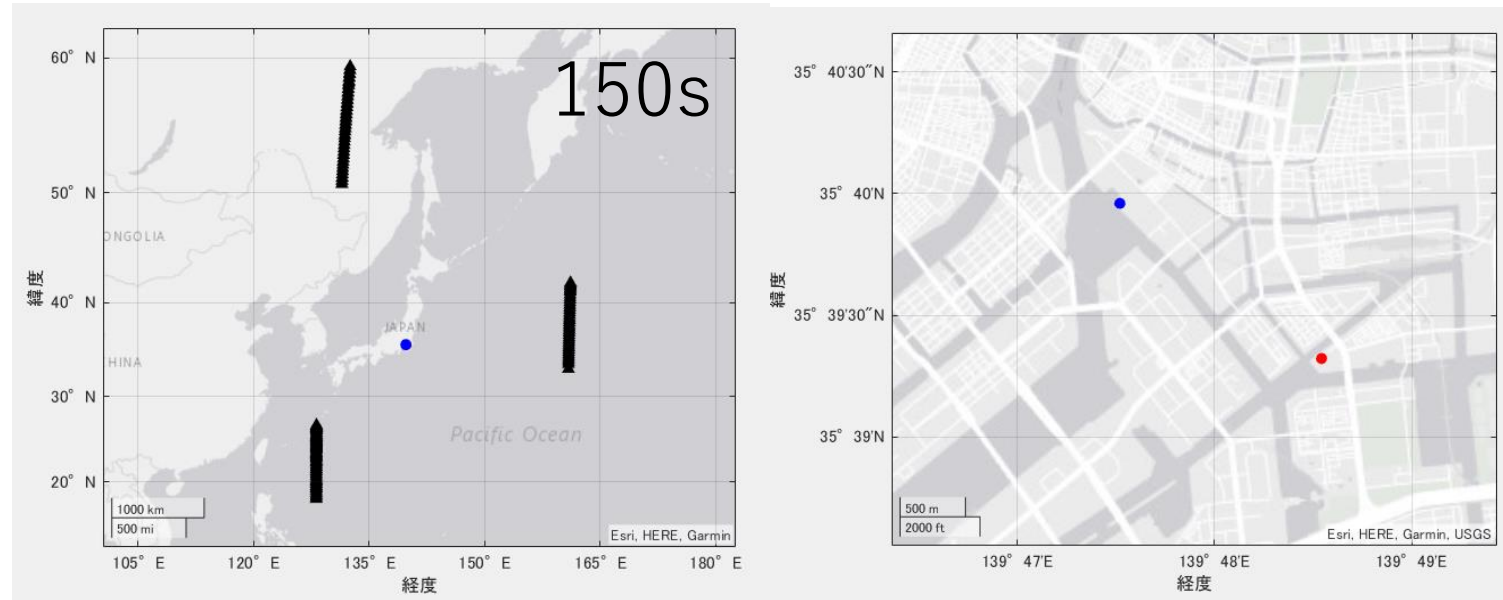
TLE（衛星の軌道情報）

- 衛星位置・速度は0.1ms単位でTLEから求めたものを利用
- 初期位置は北緯35.666度、東経139.792度、楕円体高46.71mをECEF座標系に変換した(x,y,z)に+20km
- 周波数の初期値は1.62627GHz

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	3.6087	212.5741	6.782944	-4221663	5373444	2122913	1377.494	-1741.93	7111.119	17.3555	128.1551	779386.2	1626302336	140
2	3.6968	339.9181	14.8436	-3037787	3441720	5481562	3476.727	-4538.12	4764.338	50.2237	131.4328	784357.7	1626240256	143
3	3.9668	339.9467	14.81816	-3036849	3440495	5482848	3477.436	-4539.27	4762.723	50.23976	131.4341	784361.2	1626240128	143
4	7.9286	212.9083	7.081045	-4215672	5365862	2153610	1396.133	-1767.94	7101.036	17.61446	128.1548	779393.5	1626302336	140
5	8.0169	340.3698	14.4391	-3022743	3422075	5502089	3488.032	-4556.37	4738.463	50.48067	131.4544	784413.2	1626240000	143
6	8.2869	340.3976	14.414	-3021801	3420845	5503368	3488.736	-4557.5	4736.842	50.49673	131.4558	784416.7	1626240000	143
7	12.2485	213.2496	7.381971	-4209601	5358169	2184264	1414.726	-1793.92	7090.809	17.87341	128.1547	779401.4	1626302080	140
8	12.337	340.8095	14.04001	-3007650	3402352	5522503	3499.256	-4574.53	4712.491	50.73762	131.4764	784468.7	1626239872	143
9	12.4275	92.35567	11.6514	-5674967	1964596	3886150	3791.582	-1440.59	6245.115	33.06379	160.9048	781308.3	1626278912	141
10	12.5185	213.2711	7.400874	-4209219	5357684	2186179	1415.887	-1795.54	7090.165	17.88959	128.1546	779401.9	1626302208	140
11	12.607	340.8366	14.01524	-3006705	3401117	5523776	3499.955	-4575.66	4710.865	50.75368	131.4778	784472.2	1626239872	143
12	16.5685	213.598	7.685776	-4203449	5350363	2214874	1433.276	-1819.87	7080.437	18.13235	128.1545	779409.9	1626302080	140
13	16.6571	341.2378	13.64621	-2992509	3382551	5542806	3510.397	-4592.6	4686.425	50.99455	131.4989	784524.2	1626239744	143
14	16.8384	213.62	7.704853	-4203062	5349872	2216785	1434.433	-1821.49	7079.785	18.14853	128.1545	779410.5	1626301952	140
15	16.9271	341.2642	13.62178	-2991561	3381311	5544071	3511.091	-4593.72	4684.792	51.0106	131.5003	784527.7	1626239744	143

結果

- 3機が観測できている時間帯

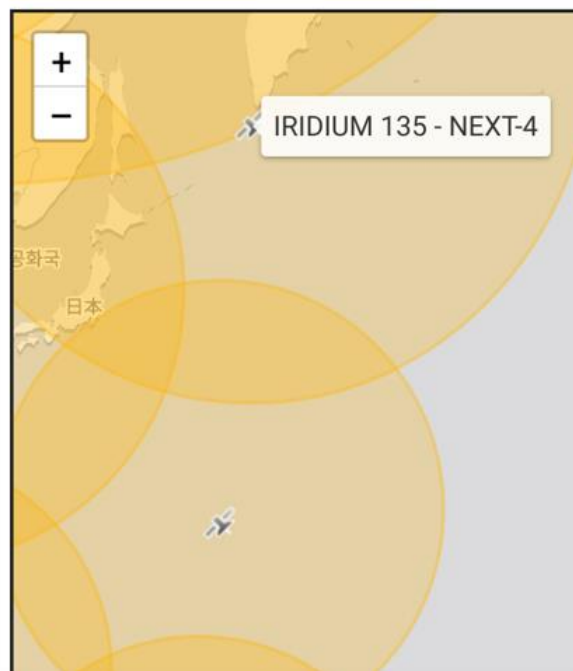


観測時間[s]	データ数	誤差[km]				誤差[Hz]
		lat	lon	hgt	水平誤差	
10	14	-24.79	181.67	202.41	183.35	712.44
20	22	-1.01	18.21	13.25	18.24	672.84
30	31	-0.45	-4.81	-7.85	4.83	692.70
60	60	-0.80	15.16	10.01	15.19	683.80
90	97	0.02	7.22	2.53	7.22	675.27
120	138	-0.68	3.92	-0.79	3.98	682.34
150	184	-1.18	1.54	-2.74	1.94	690.06

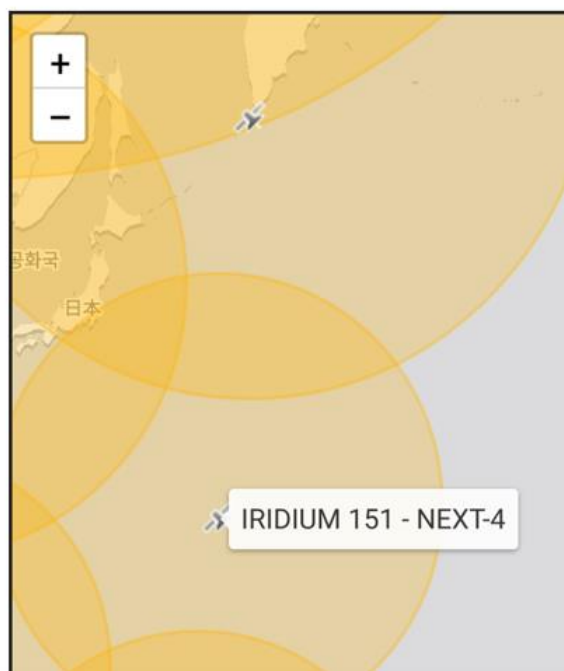
ルビジウム原子時計を接続した場合 (再実験)

- **2023/12/25** 6:18:57.46(UTC)から取得開始

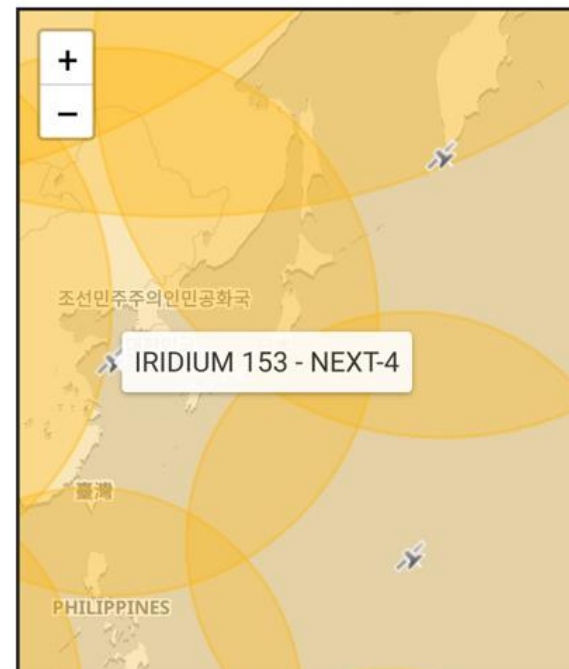
IRIDIUM COVERAGE MAP
REAL-TIME



IRIDIUM COVERAGE MAP
REAL-TIME

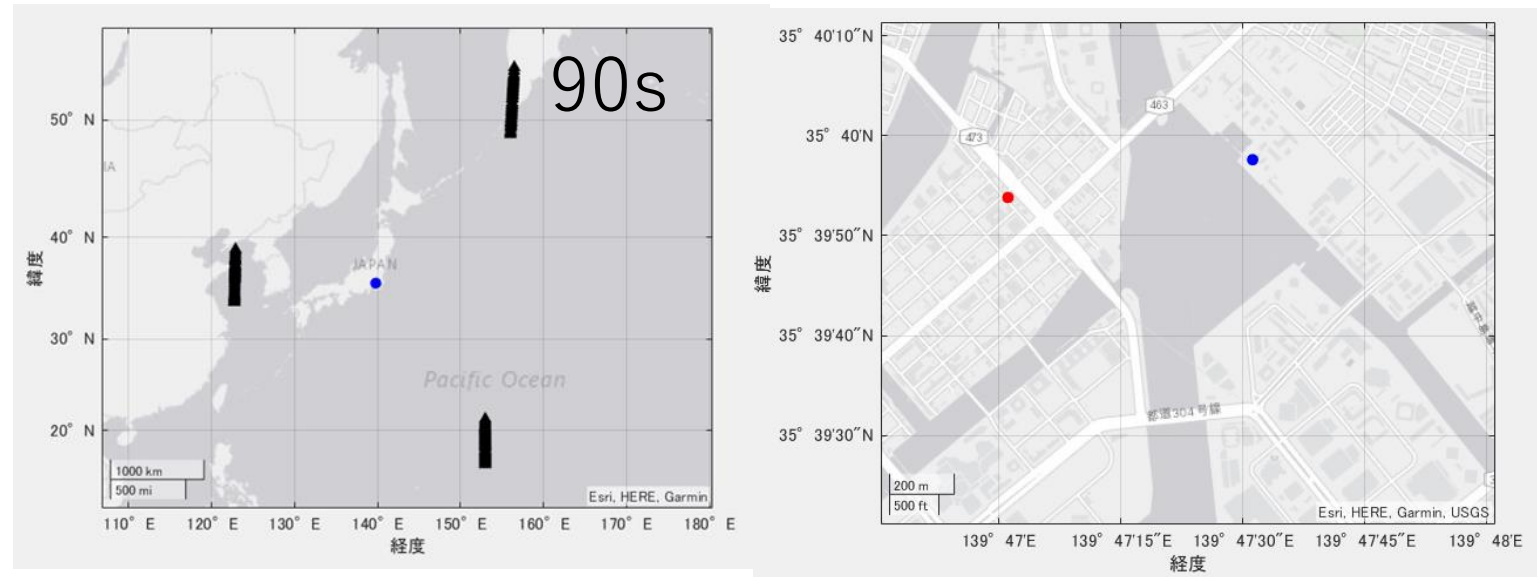


IRIDIUM COVERAGE MAP
REAL-TIME



結果

- 3機が観測できている時間帯



観測時間[s]	データ数	誤差[km]				誤差[Hz]
		lat	lon	hgt	水平誤差	
10	14	-1.9412	-38.0842	48.5789	38.1336	696.9852
20	22	-1.0127	18.2142	13.2512	18.2424	672.8404
30	39	-0.3699	-2.2356	1.3423	2.2660	781.5204
60	81	-0.2348	1.7870	-3.6920	1.8023	783.6565
90	112	-0.1166	-0.7548	-1.7449	0.7638	779.0223
120	141	0.0479	-1.4002	-0.5590	1.4010	776.4424

小型の低軌道衛星を利用した 新しい測位手法に関する研究

情報通信工学研究室

海事システム工学科 2021016

熊谷七星

指導教員 久保信明 教授

目次

- ・ 背景と目的
 - － 低軌道衛星とは
- ・ FOA測位
- ・ FOAシミュレーション設定
- ・ 結果
- ・ まとめ

背景と目的

GPSをはじめとする衛星測位システム(Global Navigation Satellite System : GNSS)は現在の社会システムにおいて必要不可欠

しかし、電波の妨害やなりすましに弱いなどの課題

GNSSのみに依存すると使用できない緊急事態となった場合に問題

→ **GNSSに頼らない代替測位手法が必要**

背景と目的

衛星の小型化・低コストな打ち上げが可能に

→ここ数年で低軌道衛星の規模が拡大

→代替測位手法として，低軌道衛星による測位手法の研究

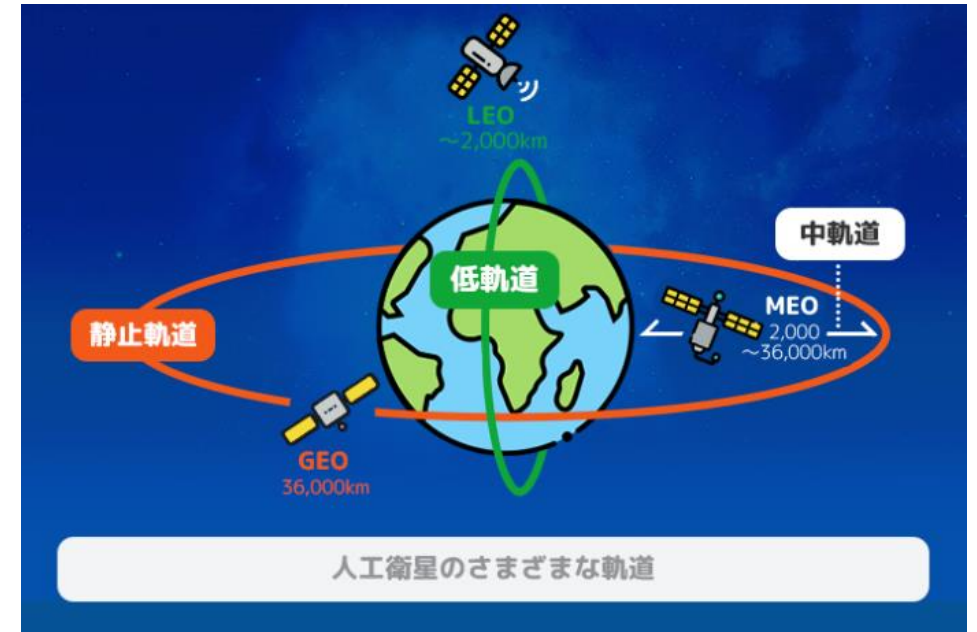
	2019 年 4 月	2020 年 4 月	2021 年 1 月	2022 年 1 月	2022 年 5 月
低軌道	1,338	1,918	2,612	4,078	4,700
中軌道	125	135	139	141	140
静止軌道	554	554	562	574	565
楕円軌道*	45	59	59	59	60
合計	2,062	2,666	3,372	4,852	5,465

出典) 清水直樹. 「第 3 章 衛星コンステレーションの可能性と課題」. 『宇宙空間の利用をめぐる動向と課題 (科学技術に関する調査プロジェクト 2022 報告書)』. 2022, p.46

背景と目的－低軌道衛星とは

低軌道衛星：高度2000kmより下
周波数帯－Ku,Ka,V,L,VHF

GNSS衛星：中軌道(高度2000～
36000km)に属する
周波数帯－L



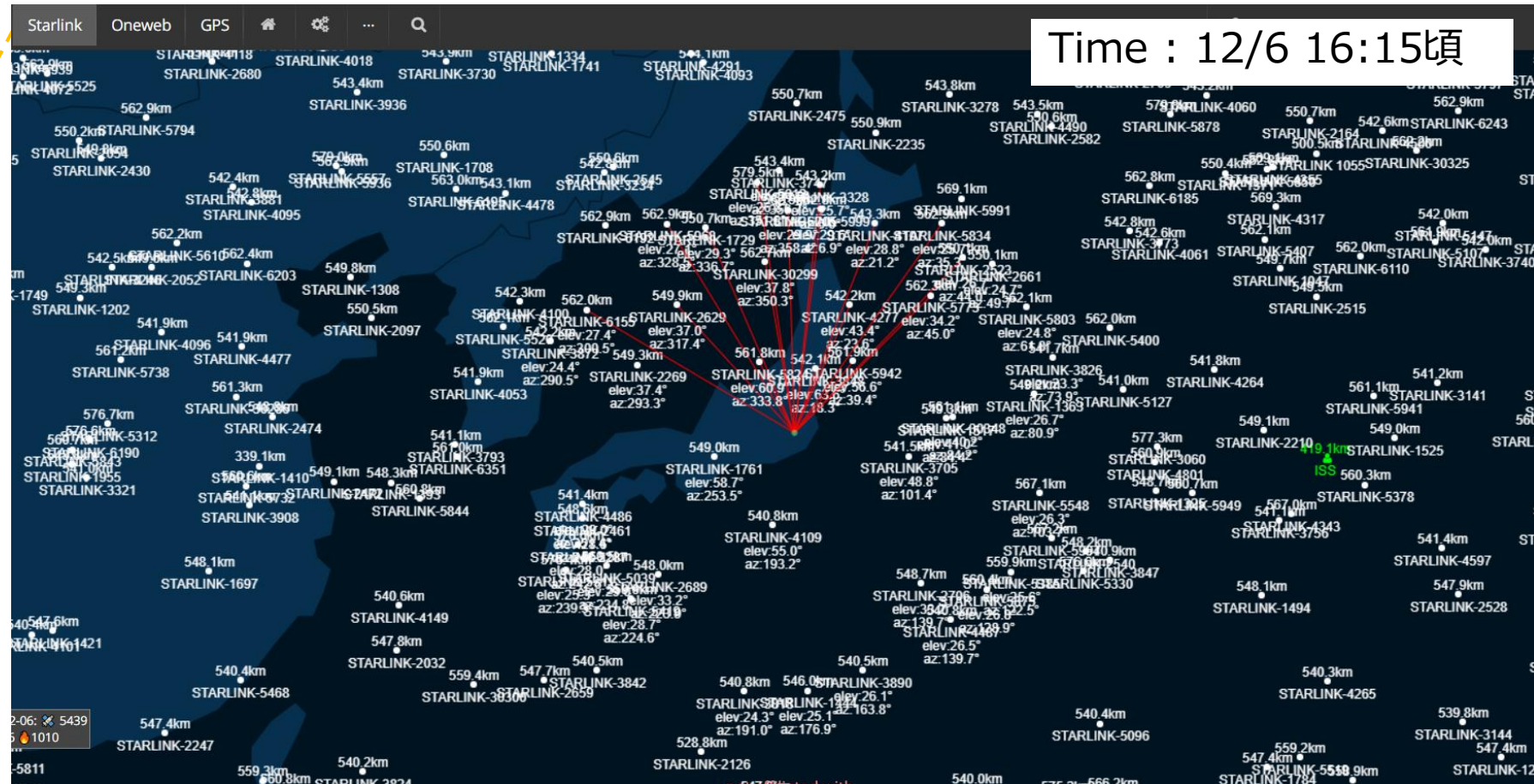
出典) JAXA Webサイト

- ・地球に近いため受信信号が非常に強力
- ・**通信サービス等**の提供のため打ち上げ数が急増，周波数も多様化

背景と目的－低軌道衛星とは

SpaceX社の
Starlinkの衛星群

既に4000機以上が
軌道上にある



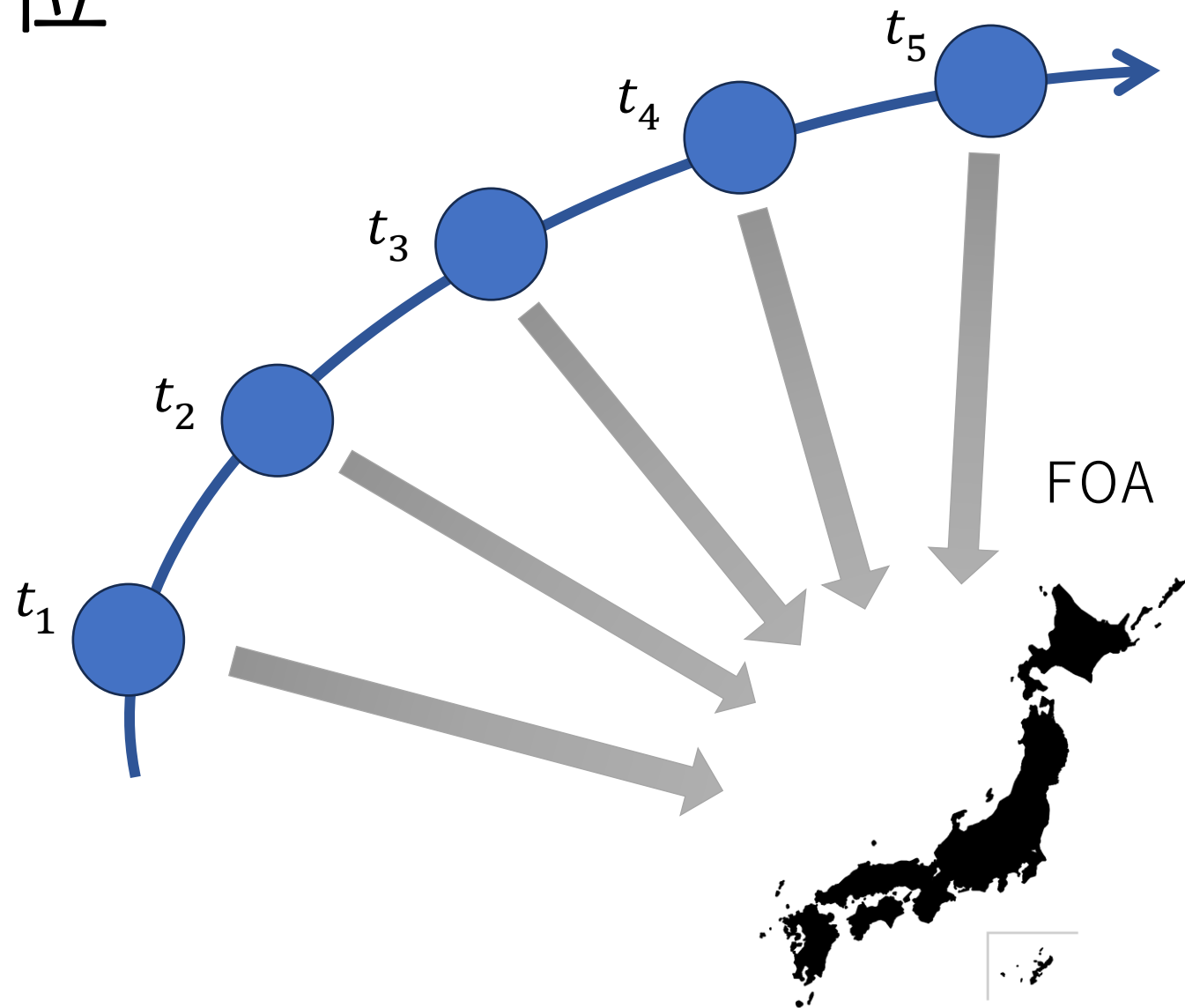
<https://satellitemap.space/?constellation=starlink>

FOA測位

移動プラットフォーム（低軌道衛星）を利用し，時系列的に複数回得られるFOA（Frequency Of Arrival：到来周波数）観測値から測位を行う。

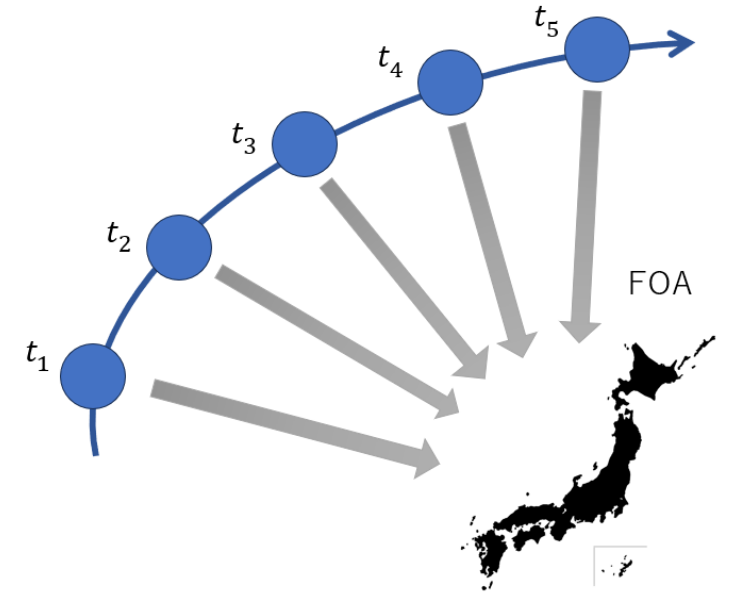
3次元位置及び送信周波数を未知変数として取り扱う。

FOA測位



FOA測位

観測時刻 t_k ($k = 1, \dots, K$) K : 観測回数



①衛星の位置 $\mathbf{p}_U(t_k)$, 速度 $\mathbf{v}_U(t_k)$

②観測した周波数 $z(t_k)$

ノイズによるランダムな観測誤差, 衛星位置誤差, 衛星速度誤差を考慮する。

求めるのは3次元位置ベクトル $\mathbf{p}_T$ と送信周波数 f_c

参考) 網嶋武. 「単一移動観測プラットフォームによる測位の測位誤差理論式及び評価」. 『電子情報通信学会論文誌B』. 2023, Vol.J106-B, No.2, pp.88-100.

FOAシミュレーション設定

衛星位置・速度はStarlink(2023/9/28)の軌道情報を利用。
誤差は各回に，正規分布に従う乱数で与える。
正規分布の標準偏差は下表の通りである。

諸元	値
シミュレーション回数	100回
ノイズ標準偏差	1Hz
衛星位置誤差	各軸1m(1σ)
衛星速度誤差	各軸0.01m/s(1σ)
初期位置誤差	真値(x,y,z)に+20km

FOAシミュレーション設定（真値）

位置：北緯35.666度，東経139.792度，楕円体高46.71m

送信周波数：12GHz(Starlink)

5GHz

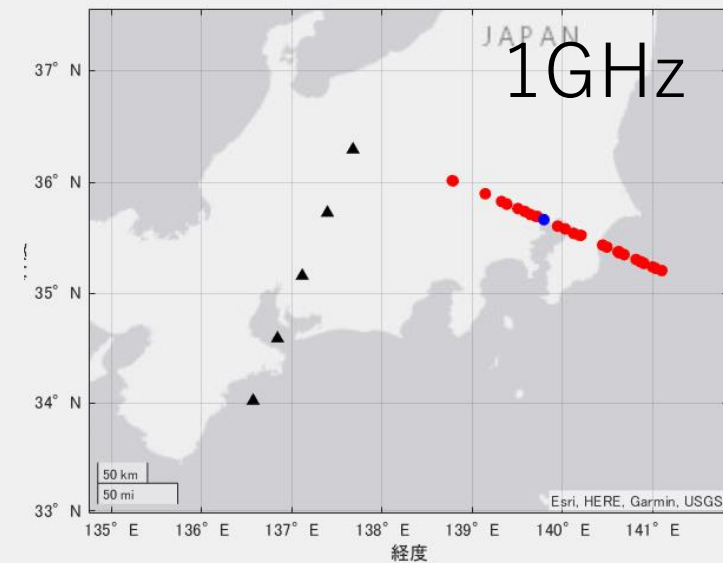
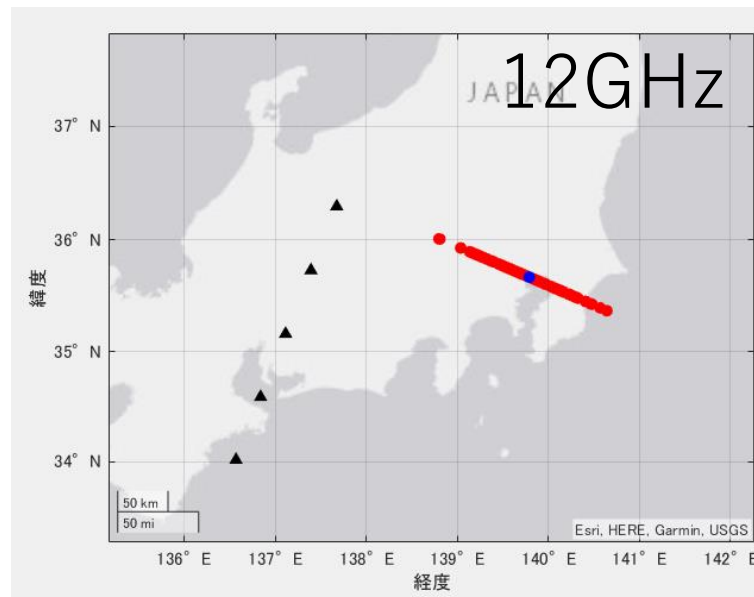
1GHz(GNSS)

-利用する衛星数，周波数真値



結果（単機）

- Starlink55766を利用
- 観測回数5回，周期10s
- HDOP=63624



周波数真値	誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	fc
12GHz	16060	37435	14620	107.13
5GHz	30873	72556	26908	82.79
1GHz	29736	68488	33305	23.71

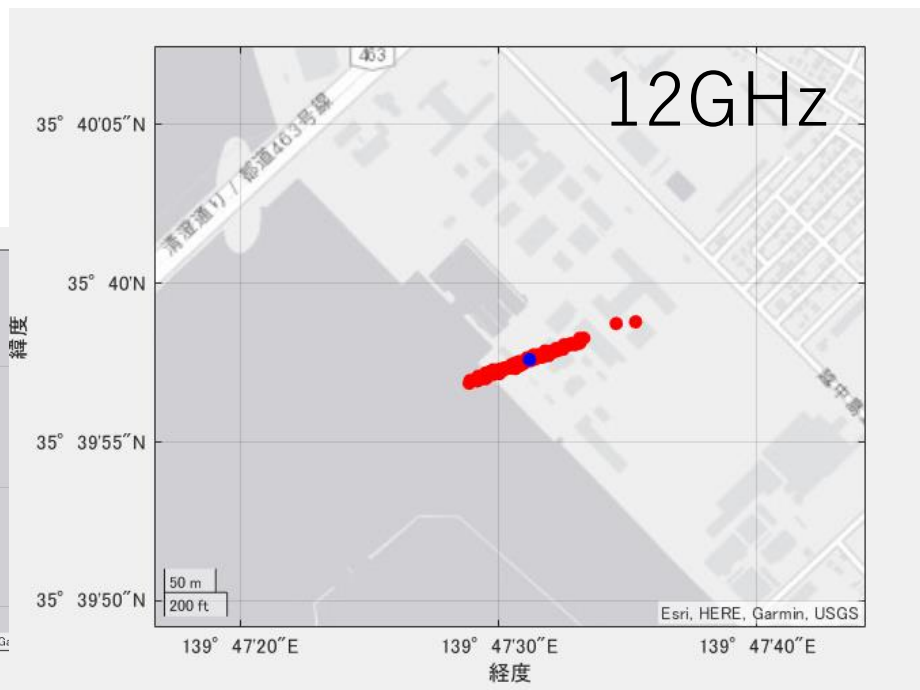
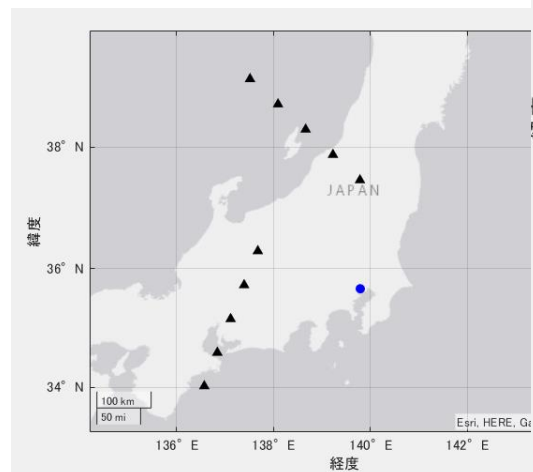
99/100

80/100

29/100

結果 (2機)

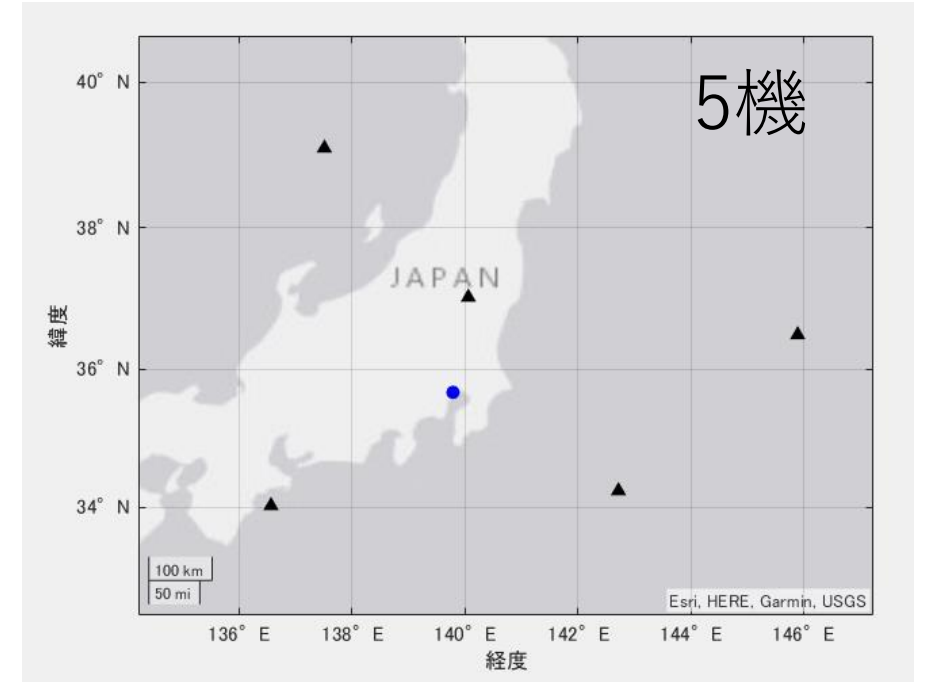
- Starlink55766と49752の2機を利用
- 観測回数5回, 周期10s
- HDOP=5.18552



周波数真値	誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	
12GHz	10.90	28.99	27.11	11.11
5GHz	23.63	62.72	58.82	10.04
1GHz	116.49	309.64	289.69	9.91

結果（4-5機・1回）

- 周波数真値：12GHz
- 多くの低軌道衛星を利用できれば、1度の観測で数mの精度



衛星数	誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	fc
4機	2.83	5.60	4.08	1.70
5機	2.66	4.34	3.02	1.14

まとめ

低軌道衛星を利用し，FOA観測値から測位するシミュレーションを行った。

- ・ 衛星の位置，速度を得られれば，**2機を10秒間隔程度で数回観測の場合100m未満の精度**で位置推定が可能
- ・ **4機以上**利用することで，**1度の観測で数mの精度**
- ・ 高周波数帯を利用している低軌道衛星は，FOA測位で比較的高精度で位置が求められる

参考スライド

観測モデルの定義

時刻 t_k における観測モデルを次式で定義する。

$$z(t_k) = h(t_k) + v(t_k) \quad (1)$$

$$h(t_k) = f_c + \frac{1}{\lambda} \frac{(\mathbf{v}_U(t_k))^T (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_U(t_k))}{\|\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_U(t_k)\|} \quad (2)$$

$z(t_k)$: FOA (Frequency Of Arrival) 観測値

$h(t_k)$: FOA真値

$v(t_k)$: 熱雑音によるランダム性観測誤差

f_c : 送信周波数

λ : 波長(=光速 c/f_c)

$\mathbf{p}_T$: 求める3次元位置ベクトル

$\mathbf{p}_U(t_k)$: 低軌道衛星の3次元位置ベクトル

$\mathbf{v}_U(t_k)$: 低軌道衛星の速度ベクトル

3次元測位

$z(t_k)$: FOA (Frequency Of Arrival) 観測値
 $h(t_k)$: FOA真値
 $v(t_k)$: 熱雑音によるランダム性観測誤差
 f_c : 送信周波数
 λ : 波長(=光速 c/f_c)
 $\mathbf{p}_T$: 求める3次元位置ベクトル
 $\mathbf{p}_U(t_k)$: 低軌道衛星の3次元位置ベクトル
 $\mathbf{v}_U(t_k)$: 低軌道衛星の速度ベクトル

以下の未知変数ベクトルを定義する。

$$\mathbf{x} \doteq \begin{pmatrix} \mathbf{p}_T \\ f_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

また、重みづけ最小2乗問題は次式で定義される。

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{k=1}^K (z(t_k) - h(\mathbf{x}, t_k)) \sigma_{FOA}^{-2} (z(t_k) - h(\mathbf{x}, t_k)) \quad (4)$$

3次元測位

$z(t_k)$: FOA (Frequency Of Arrival) 観測値
 $h(t_k)$: FOA真値
 $v(t_k)$: 熱雑音によるランダム性観測誤差
 f_c : 送信周波数
 λ : 波長(=光速 c/f_c)
 $\mathbf{p}_T$: 求める3次元位置ベクトル
 $\mathbf{p}_U(t_k)$: 低軌道衛星の3次元位置ベクトル
 $\mathbf{v}_U(t_k)$: 低軌道衛星の速度ベクトル

$h(\mathbf{x}, t_k)$ を $\mathbf{x} \doteq \begin{pmatrix} \mathbf{p}_T \\ f_c \end{pmatrix}$ で偏微分した行列 $\mathbf{G}(\mathbf{x}, t_k)$ を導出すると次式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\mathbf{x}, t_k) &\doteq \nabla_{\mathbf{x}} h(\mathbf{x}, t_k) \\ &= \left(\frac{1}{\lambda} \left(\frac{\mathbf{v}_U(t_k)}{\|\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_U(t_k)\|} - \frac{\mathbf{v}_U(t_k)^T (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_U(t_k))}{\|\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_U(t_k)\|^3} (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_U(t_k)) \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

1

3次元測位

初期値 $\hat{\mathbf{x}}$ が与えられた際の収束演算式は次式となる。

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}, t_k) = \mathbf{G}(\mathbf{x}, t_k) \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \quad (6)$$

$$h(\hat{\mathbf{x}}, t_k) = h(\mathbf{x}, t_k) \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \quad (7)$$

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = \left(\sum_{k=1}^{K-1} (\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}, t_k)^T \sigma_{FOA}^{-2} \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}, t_k))^{-1} \right).$$

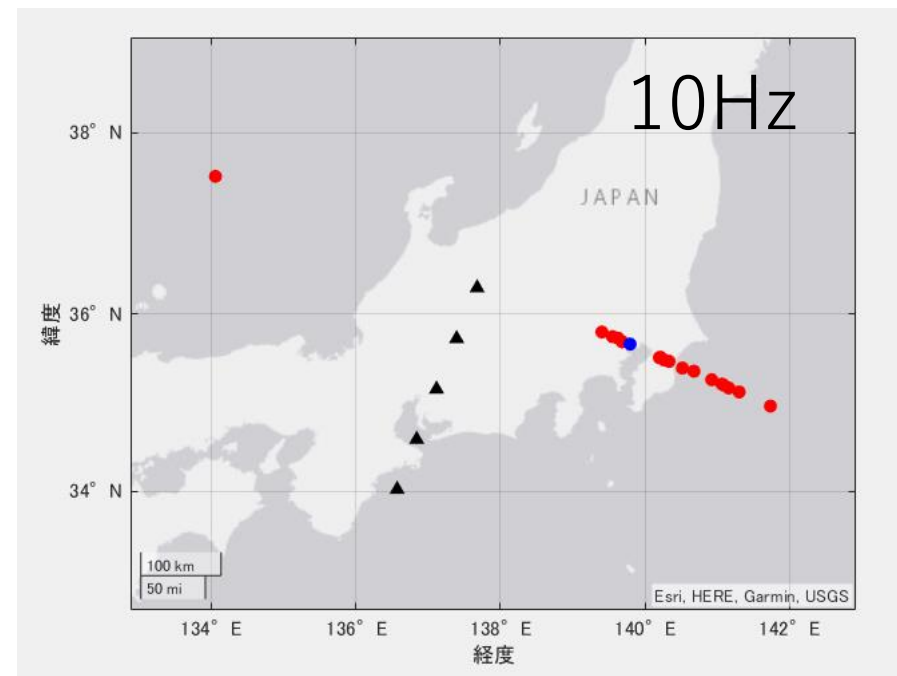
$$\sum_{k=1}^{K-1} (\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}, t_k)^T \sigma_{FOA}^{-2} (z(t_k) - h(\hat{\mathbf{x}}, t_k))) \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + \Delta\hat{\mathbf{x}} \quad (9)$$

$\Delta\hat{\mathbf{x}}$ が十分小さくなれば終了。求める解は $\hat{\mathbf{x}}$

結果（単機・10s）

- Starlink55766を利用
- 観測回数5回
- 周波数真値5GHz
- ノイズを変更

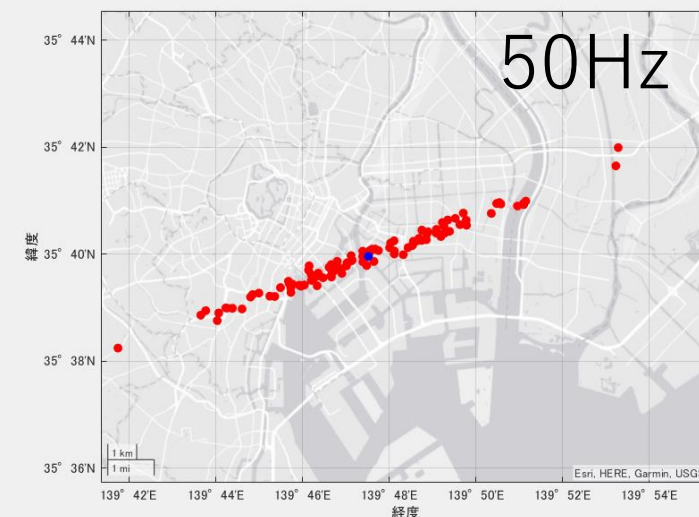
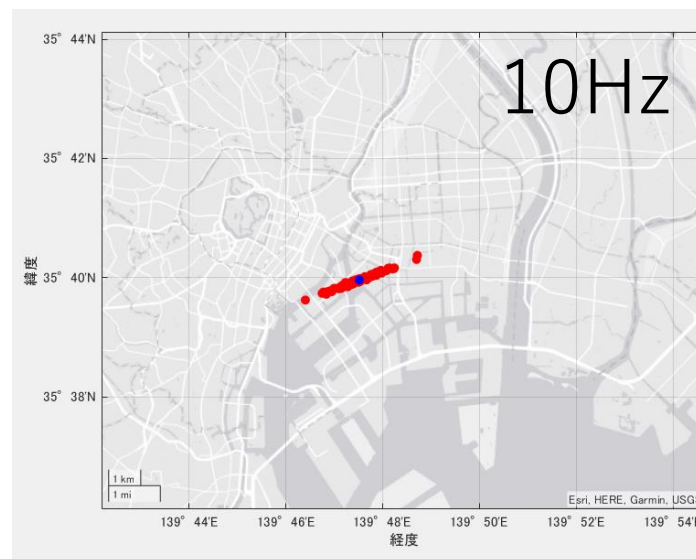


ノイズ	計算結果			誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	lat	lon	hgt	fc
1Hz	35.6269	139.8961	9950.5257	30873	72556	26908	82.79
10Hz	35.5411	140.1049	36835.8831	62378	151208	50880	187.28
50Hz	35.3147	140.7421	50875.5559	51117	112567	68909	142.85

80/100
17/100
2/100

結果（2機・10s）

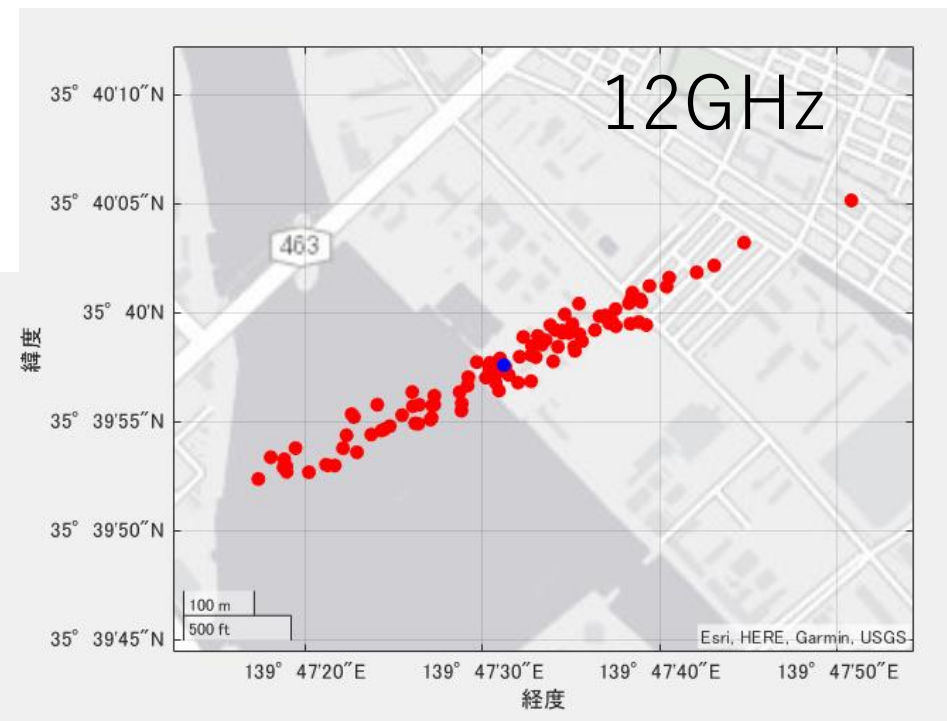
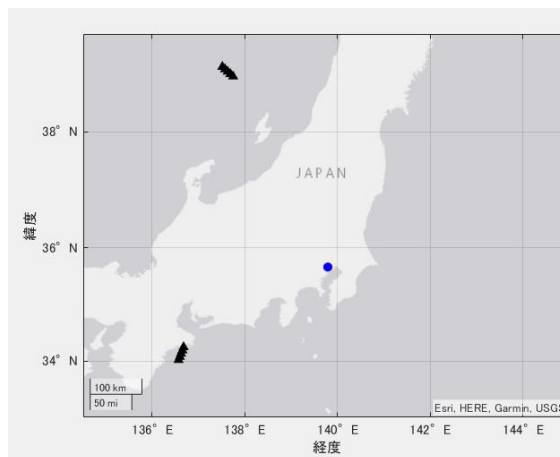
- Starlink55766と49752の2機を利用
- 観測回数5回
- 周波数真値5GHz
- **ノイズ**を変更



ノイズ	計算結果			誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	lat	lon	hgt	fc
1Hz	35.6660	139.7920	43.7966	23.63	62.72	58.82	10.04
10Hz	35.6660	139.7920	25.8667	233.16	619.87	579.79	99.15
50Hz	35.6658	139.7916	-48.7271	1165.81	3098.03	2901.77	495.85

結果 (2機・1s)

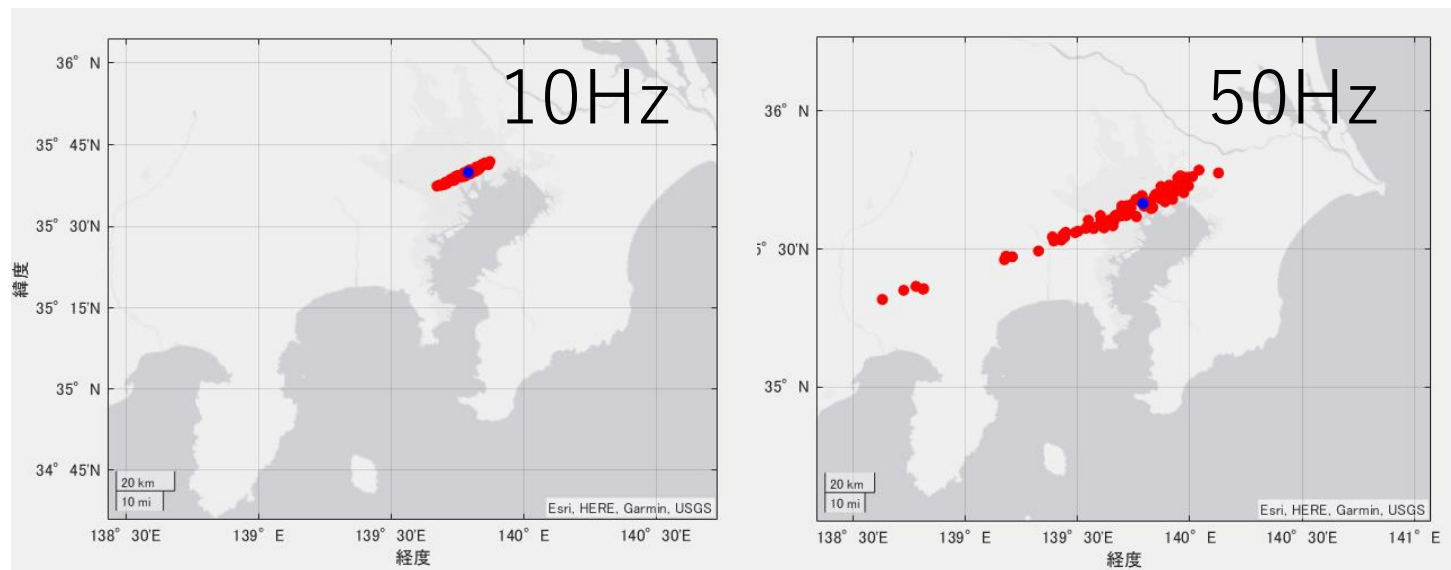
- Starlink55766と49752の2機を利用
- 観測回数5回
- HDOP=71.801799



周波数真値	計算結果			誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	lat	lon	hgt	fc
12GHz	35.6660	139.7919	6.1251	80.99	166.34	442.48	114.87
5GHz	35.6659	139.7919	-42.7332	177.18	369.31	942.36	103.25
1GHz	35.6654	139.7908	-412.2147	874.46	1840.76	4578.70	101.04

結果（2機・1s）

- Starlink55766と49752の2機を利用
- 観測回数5回
- 周波数真値5GHz
- **ノイズ**を変更



ノイズ	計算結果			誤差[m]			誤差[Hz]
	lat	lon	hgt	lat	lon	hgt	fc
1Hz	35.6659	139.7919	-42.7332	177.18	369.31	942.36	103.25
10Hz	35.6645	139.7884	-959.3881	1767.17	3748.06	9181.11	1015.89
50Hz	35.6419	139.7098	-9078.5453	11087.95	27357.54	49198.74	5802.98