

# 低軌道衛星の測位用衛星としての 利用に関する調査研究

海事システム工学科 1721012 金森寛厳

指導教員 久保信明 教授

# 目次

---

1. 研究背景・目的
2. LEOとは
3. Almanacデータを用いたシミュレーション
4. 低軌道衛星自体の位置推定
5. ドップラー周波数による位置推定
6. まとめ及び考察

## GPSの抱える問題点

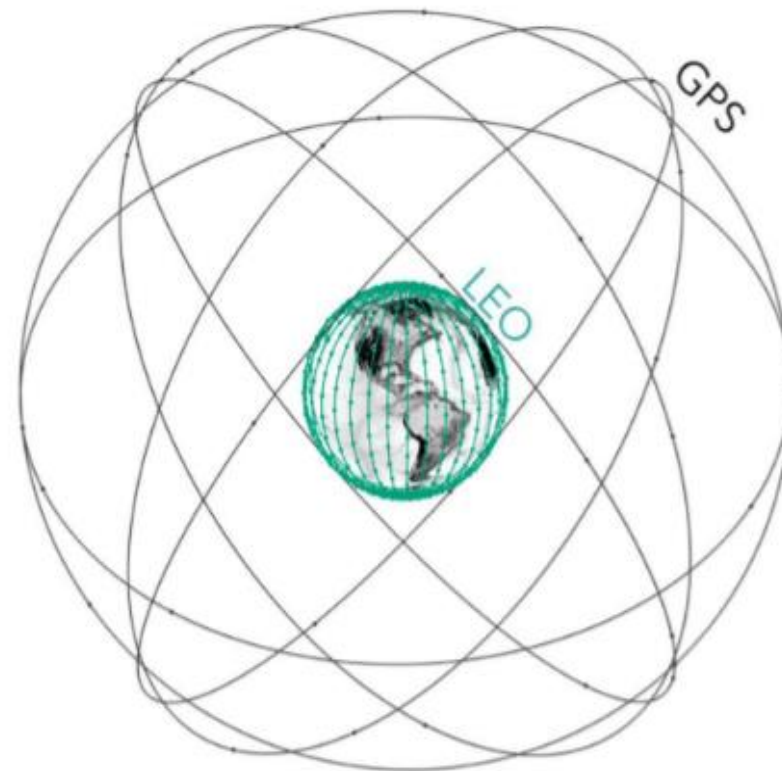
衛星の軌道配置または衛星の故障により測位精度が劣化する一部の地域も存在する。

 これらの解決策として、LEOの活用が見込まれている

本研究では、フィンガープリント的位置推定から発想を得て、LEO衛星からのドップラー周波数を利用して位置を推定するということについて調査していく。

# LEOとは

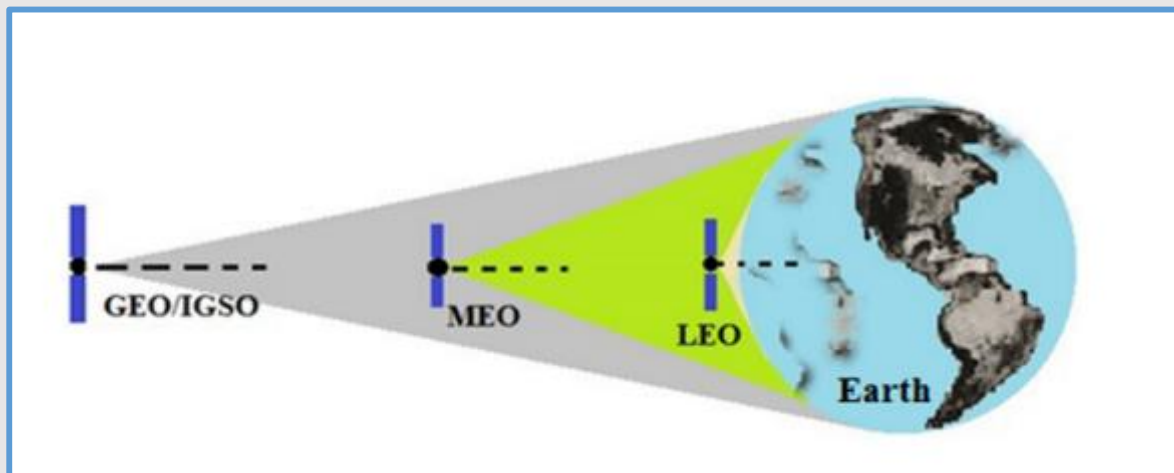
- ◆ 高度2,000kmまでの地球周回軌道のこと。  
(Low Earth Orbit)の略
- ◆ 軌道周期が短く (約90~120分)  
リモートセンシング、データ通信などに利用  
されている。
- ◆ 地球全体をカバーするにはGPS衛星より  
多くの衛星が必要となる。



※GPS衛星とLEO衛星の概略図

出典) InsideGNSS

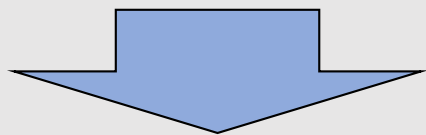
# LEOとは



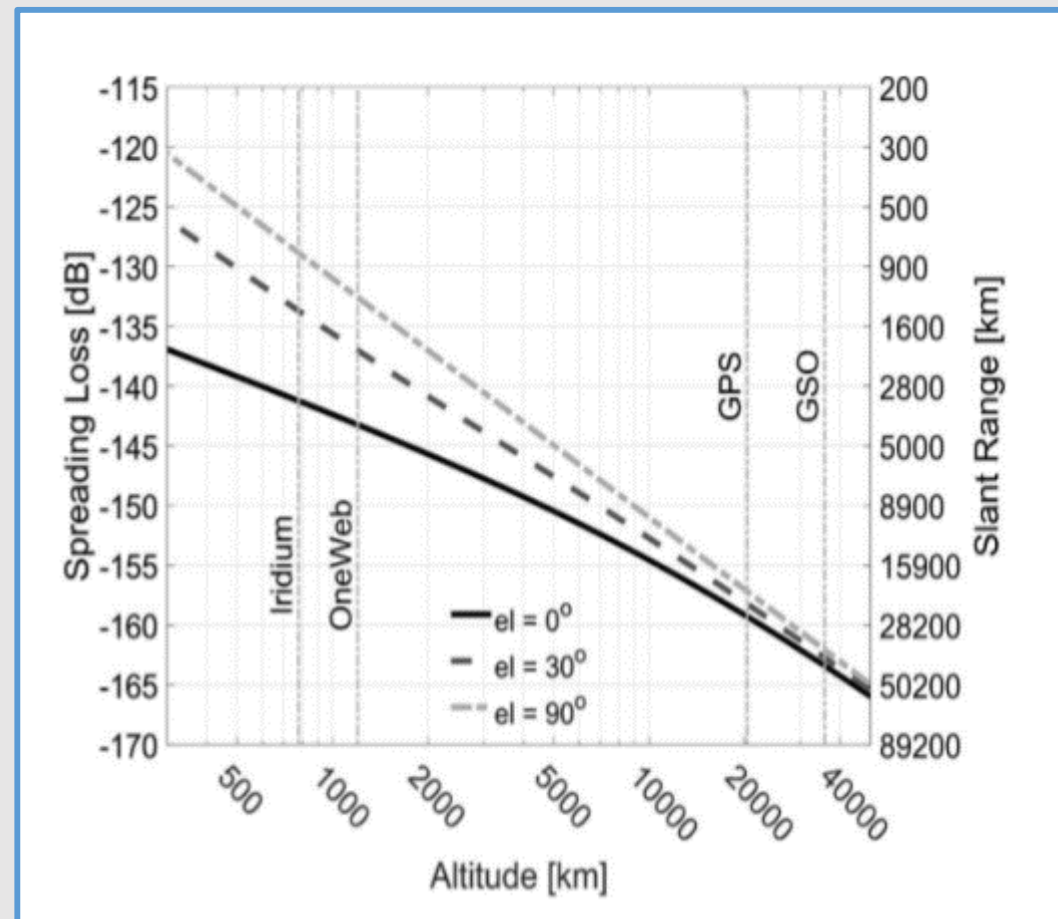
※照射範囲比較イメージ図

出典) InsideGNSS

Iridium , OneWebなどのLEO衛星は  
照射範囲は小さく、信号強度は強い。



信号エネルギーの損失が大幅に少ない



※信号強度比較のグラフ 出典) InsideGNSS

# LEOとは

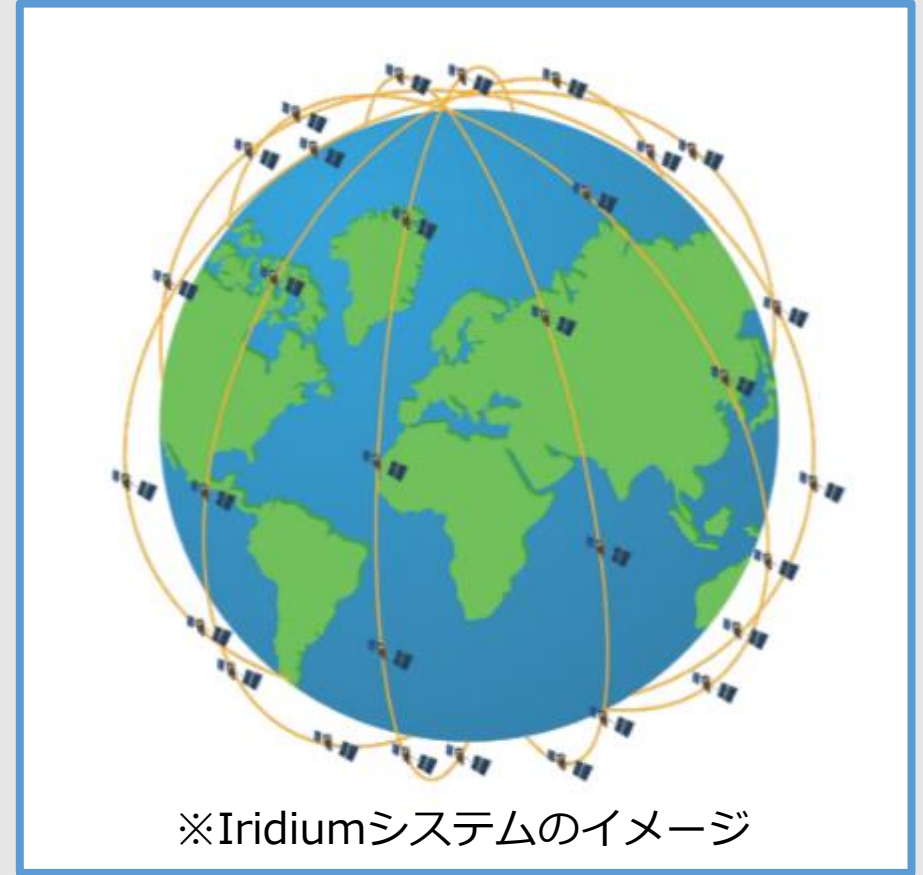
コンステレーション	最終目標衛星数	軌道上衛星数	高度[km]	周波数帯
OneWeb	600 ~ 900	74	1,200	Ka , Ku
SpaceX	800 ~ 42,000	422	340 ~ 1,150	Ka , Ku , V
Telesat	300	1	1,000 ~ 1,200	Ka
Amazon	3,236	-	590 ~ 610	Ka
Iridium	-	66	780	Ka

# LEOとは



※Iridium衛星イメージ図

出典) iridium社Webサイト



※Iridiumシステムのイメージ

出典) iridium社Webサイト

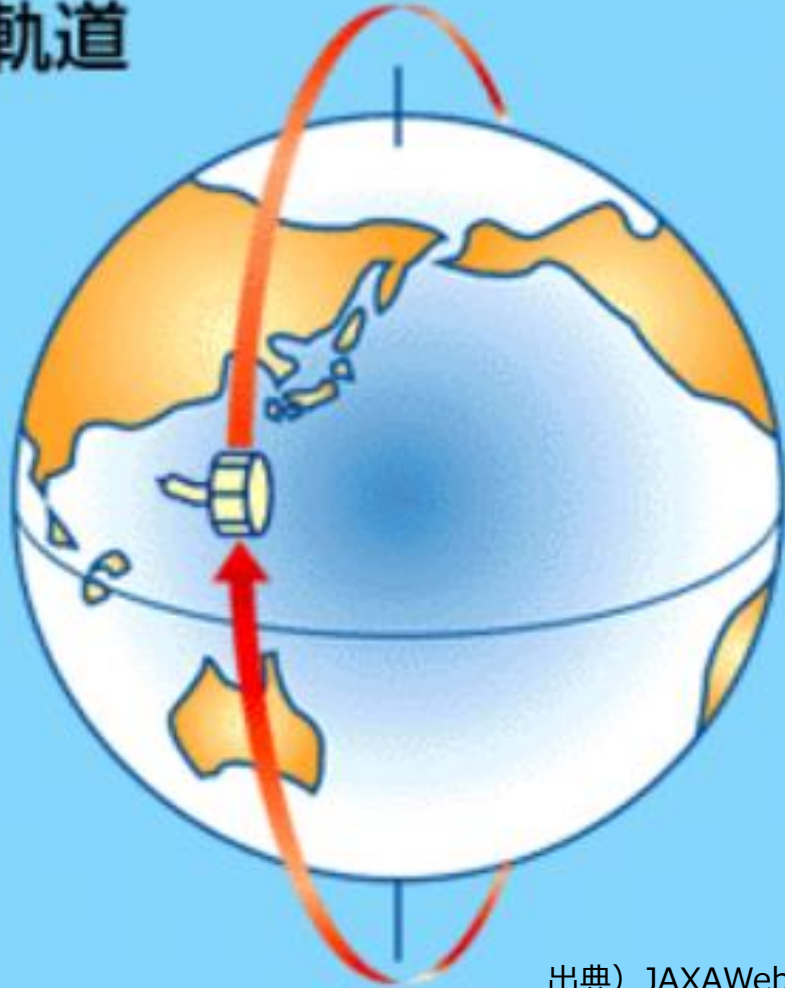
1軌道、11個の衛星が6グループある

6軌道、66機の衛星からなるLEO衛星のコンステレーション

Iridium衛星は、最大4つの衛星にリンクされており、衛星間通信が可能である。

# LEOとは

## 極軌道



出典) JAXAWebサイト

## イリジウム概念図



(C) Iridium Communications

出典) イリジウムコンステレーション

軌道傾斜角が86.4度

軌道傾斜角がほぼ90度で、  
北極・南極の上空付近を回る軌道



# Almanacデータを用いたシミュレーション

## アルマナック

記号	内容	単位
ID	衛星のPRN番号	—
HEALTH	衛星の健康状態	—
e	離心率	—
$t_{oa}$	軌道要素の元期（基準時刻）	s
$i_0$	軌道傾斜角	rad
$\Omega\text{-dot}$	昇交点赤経の時間変化率	rad/s
$\sqrt{A}$	軌道長半径の平方根	$m^{1/2}$
$\Omega_0$	昇交点赤経	rad
$\omega$	近地点引数	rad
$M_0$	平均近点離角	rad
$a_0$	衛星時計補正係数の0次項	s
$a_1$	衛星時計補正係数の1次項	—
WEEK	現在時刻のGPS週番号	—

◆天体暦(almanac)のこと

◆天体暦は1週間ごとに更新される。  
衛星からの電波に情報として、  
組み込まれている。

◆天体暦は**数百m~数km**の精度である。

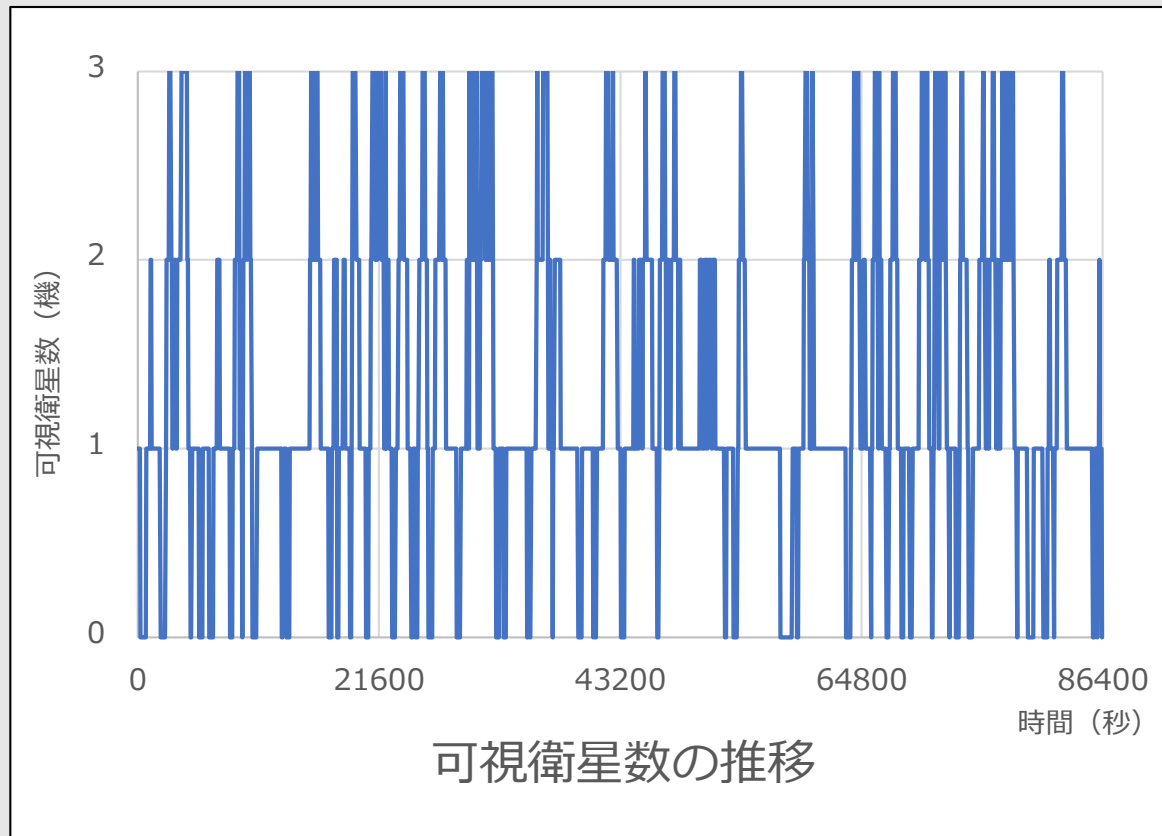
## シミュレーションの流れ

- ① 低軌道衛星そのものの位置を求める



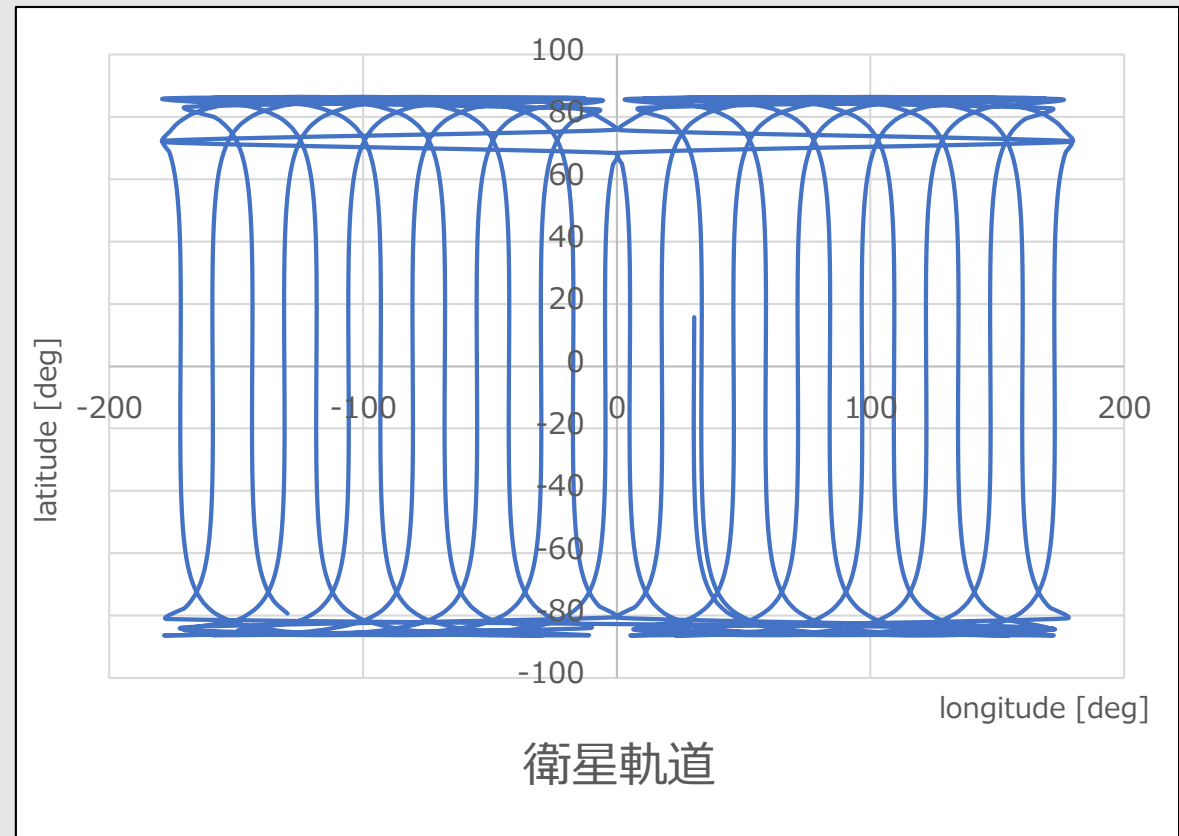
- ② 求めた位置が既知の衛星を利用して静止した受信機位置から  
観測できるドップラー周波数を利用し、フィンガープリント的位置推定を行う

# 低軌道衛星自体の位置推定



東京海洋大学第4実験棟からの可視衛星数

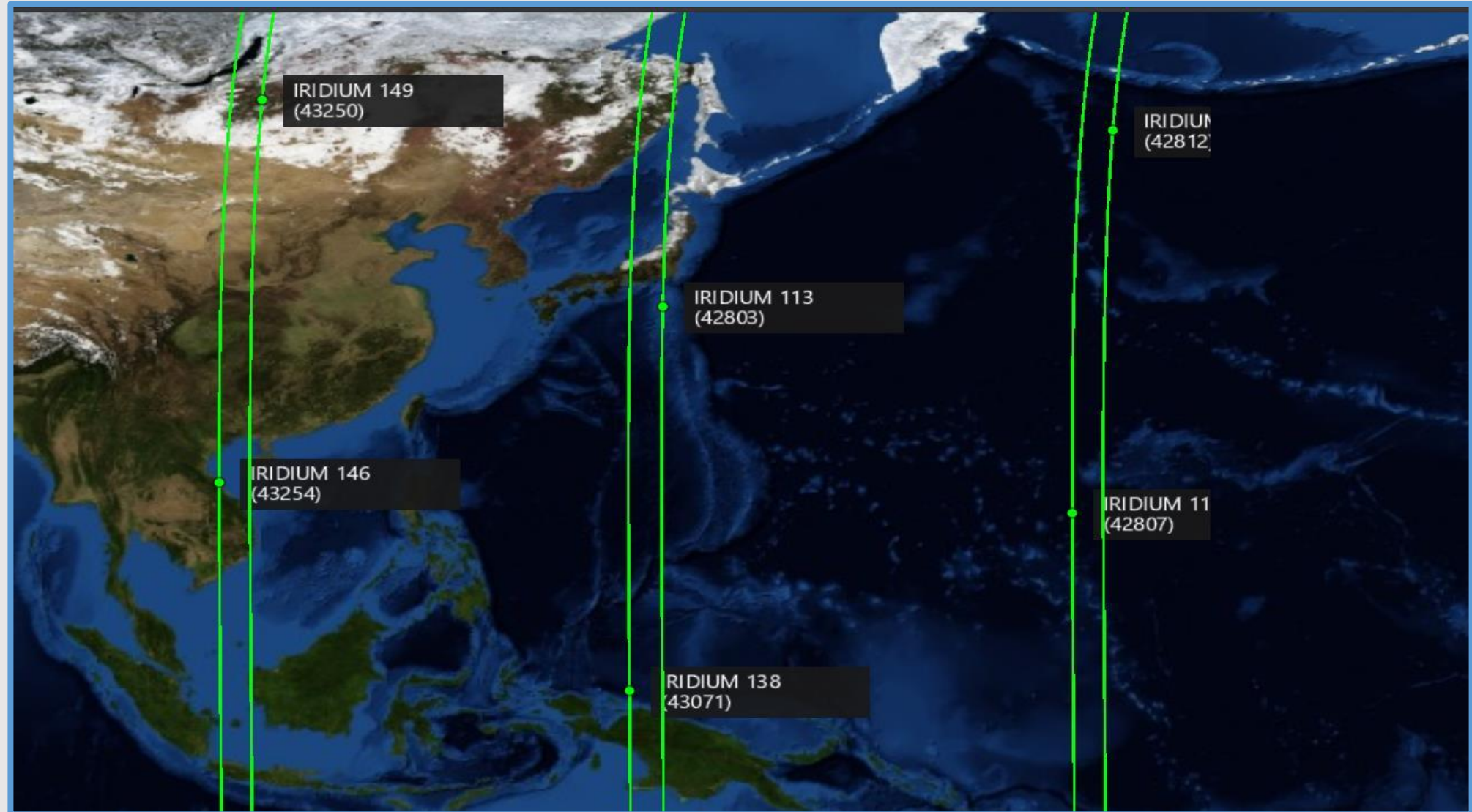
時間は24時間 (プロットは60秒刻み)



Iridium NEXTの3番衛星の24時間分の位置  
(プロットは60秒刻み)

24時間で地球を約**14.5周**している

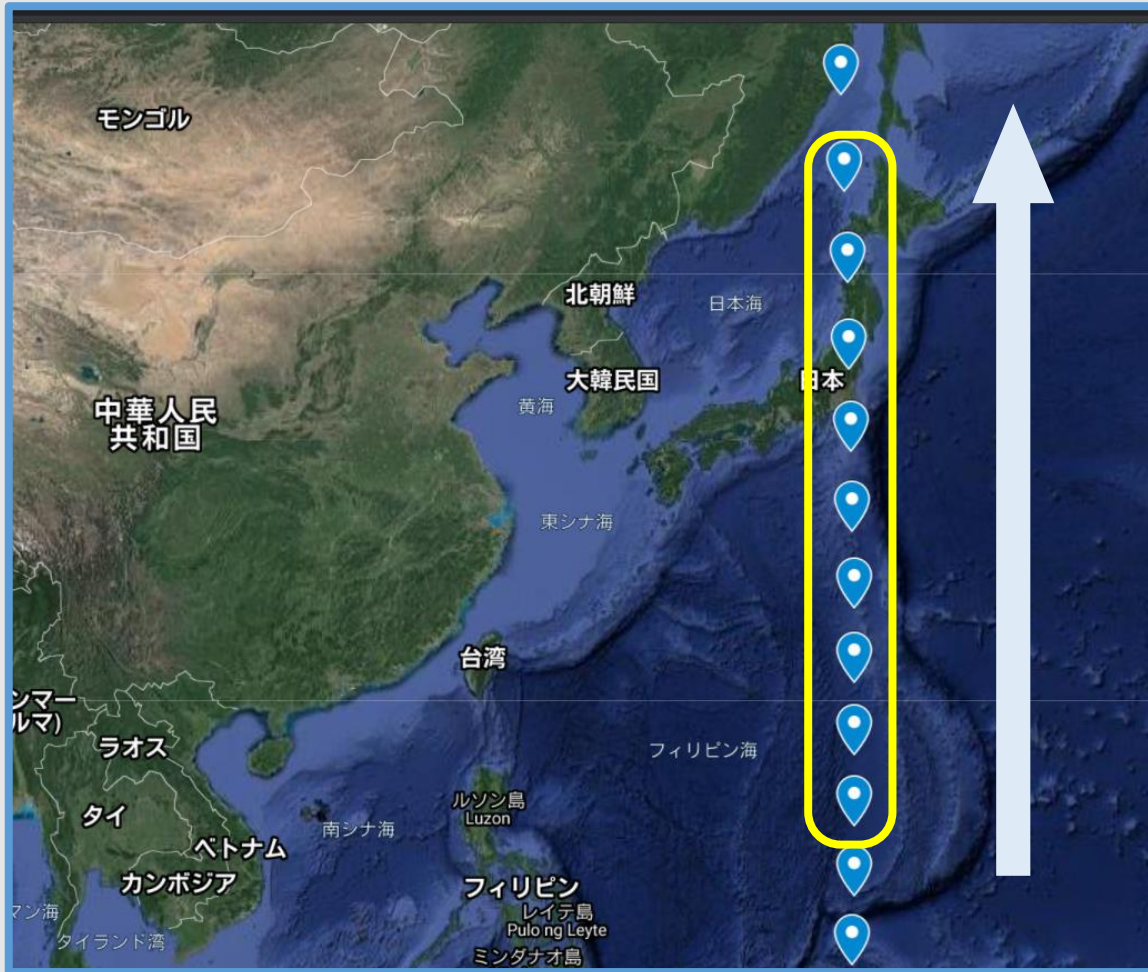
# 低軌道衛星の位置推定



← 30[deg] →

celestrack

# 衛星自体の位置推定



Googlemap

- シミュレーションした衛星のうち、日本を縦断してマスク角10度で東京から可視できるものを地図上にプロットした。
- 黄色の枠は、東京で衛星を利用できる範囲
- 可視できる時間は、約9分間
- 9分間で、約4000km移動している

$$\text{速度} : V = (398600 / (6378 + H))^{1/2}$$

約7.46 [km/s]



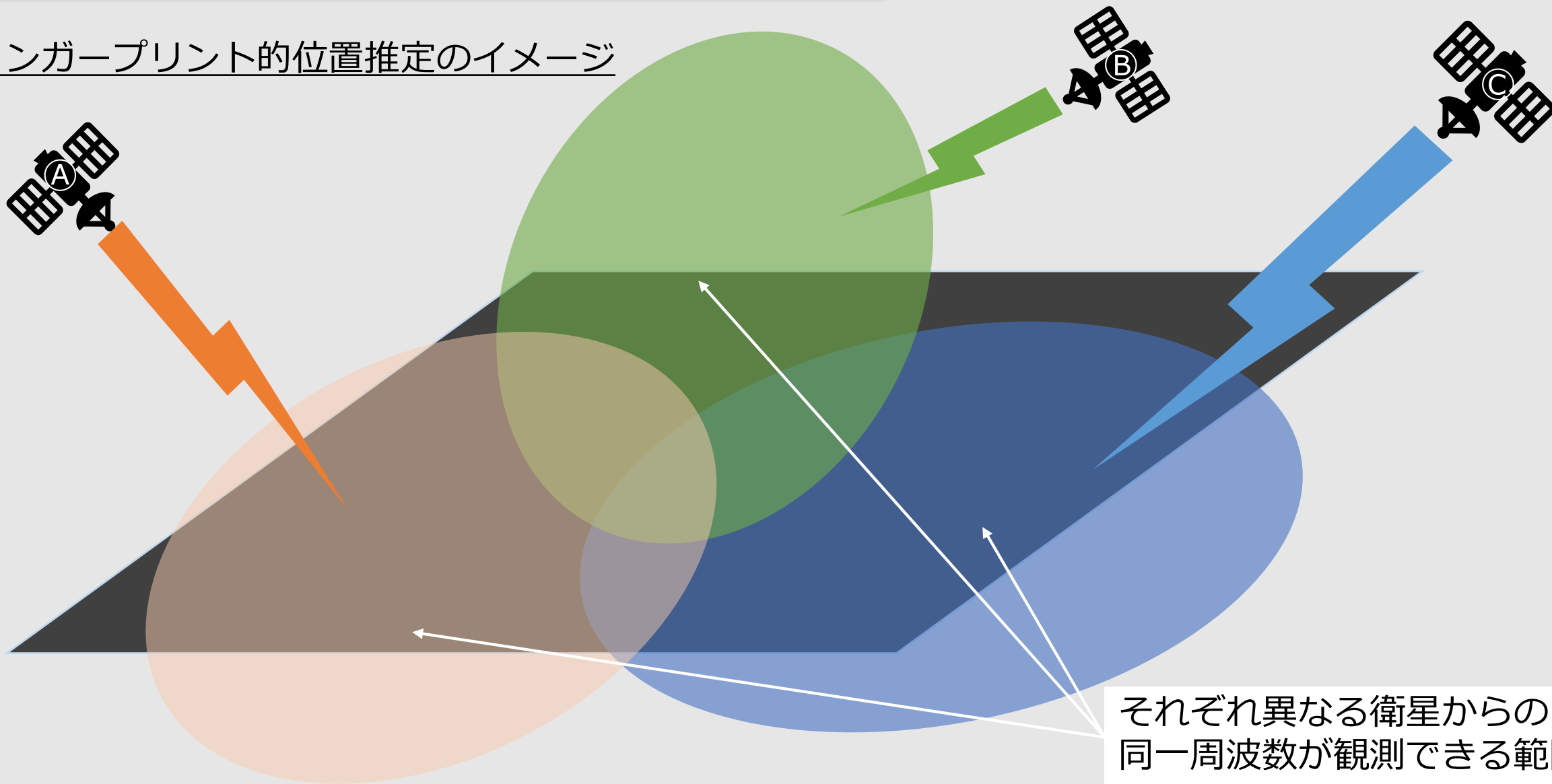
高度(H) 780kmの場合

$$\text{周期} : T = 2\pi(6378 + H) / V$$

約1時間40分

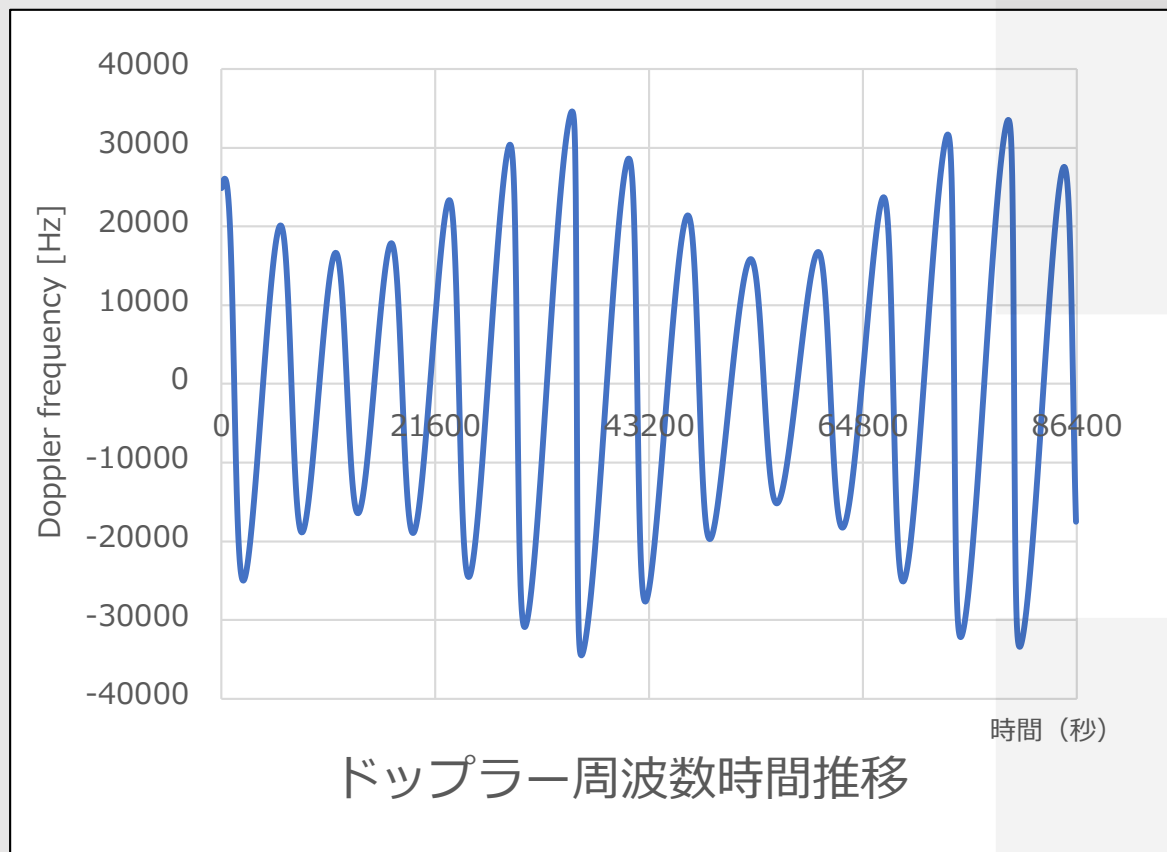
# ドップラー周波数による位置推定

フィンガープリント的位置推定のイメージ

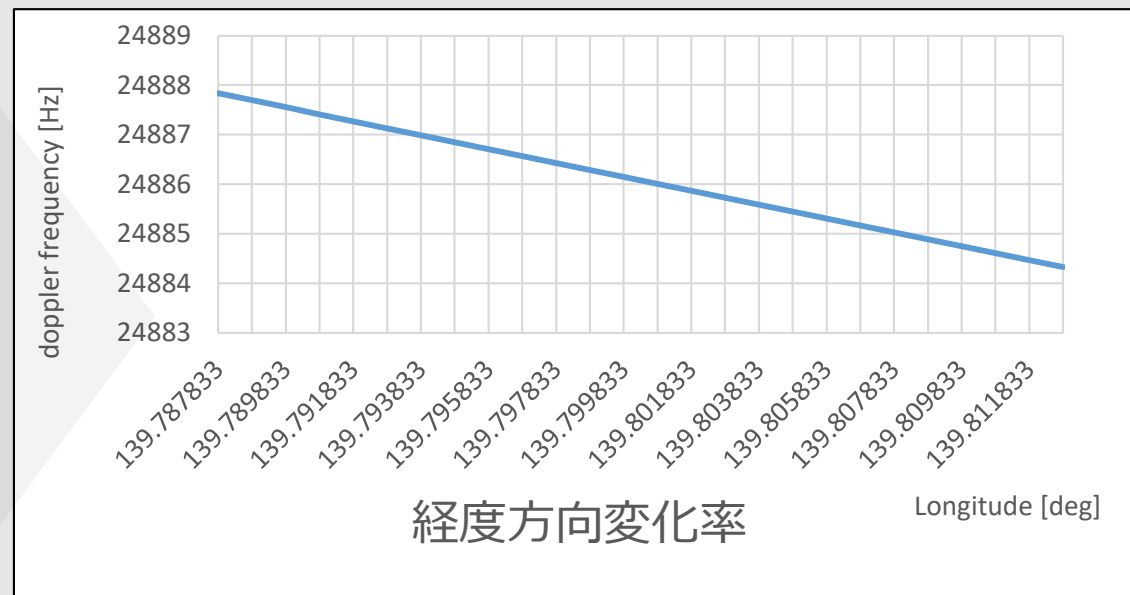
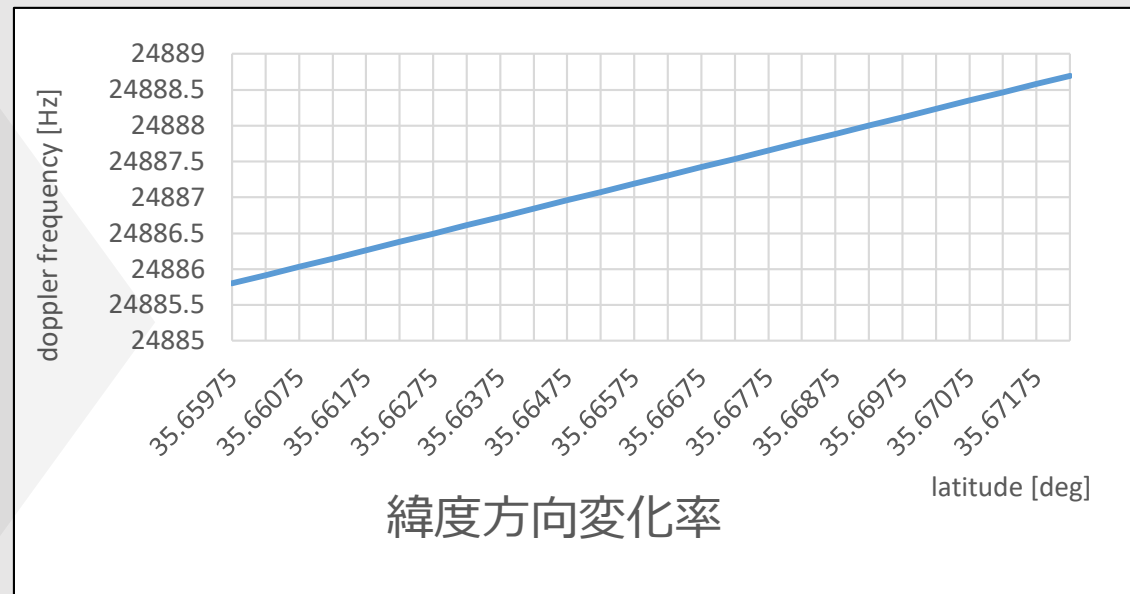


それぞれ異なる衛星からの  
同一周波数が観測できる範囲

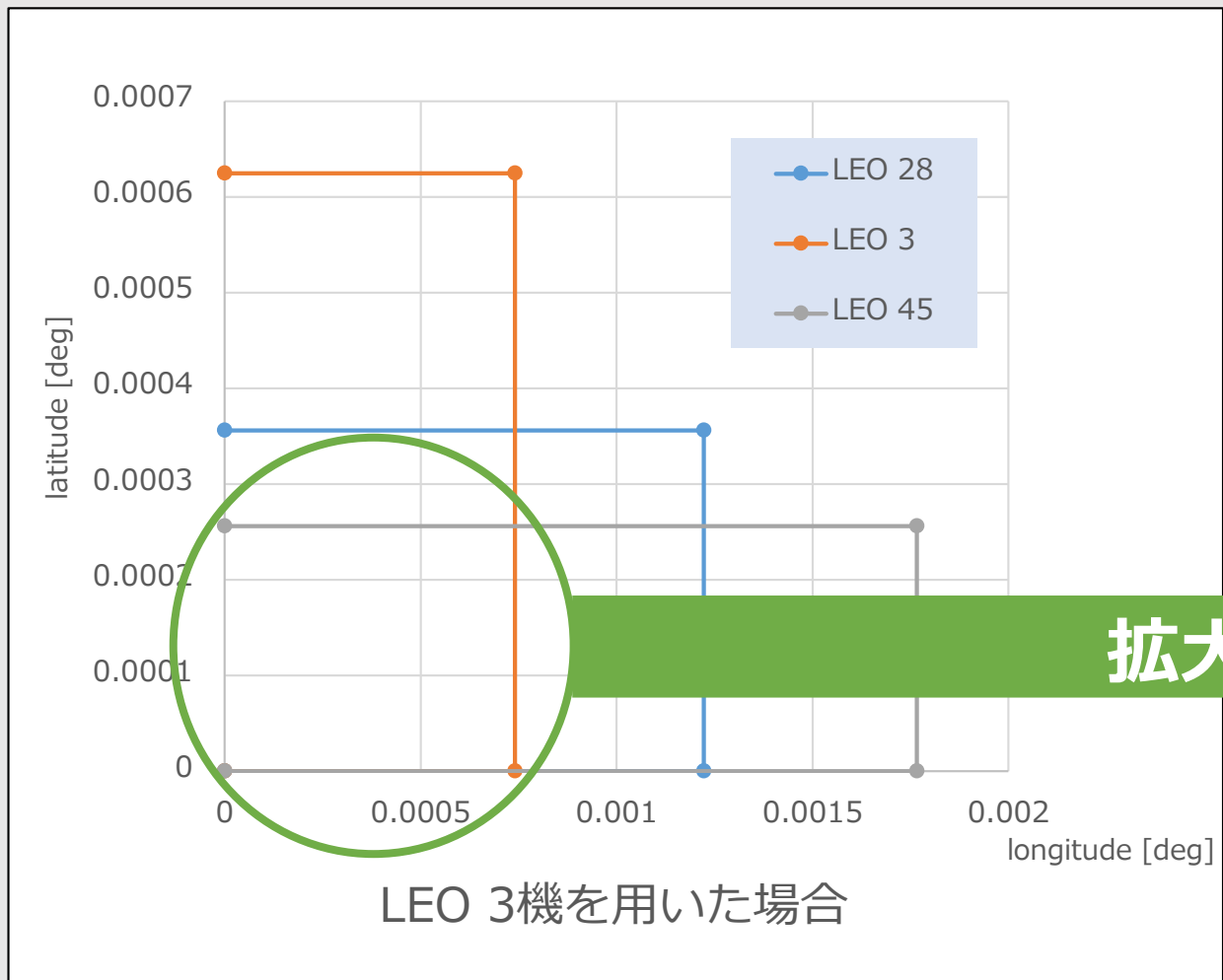
# ドップラー周波数による位置推定



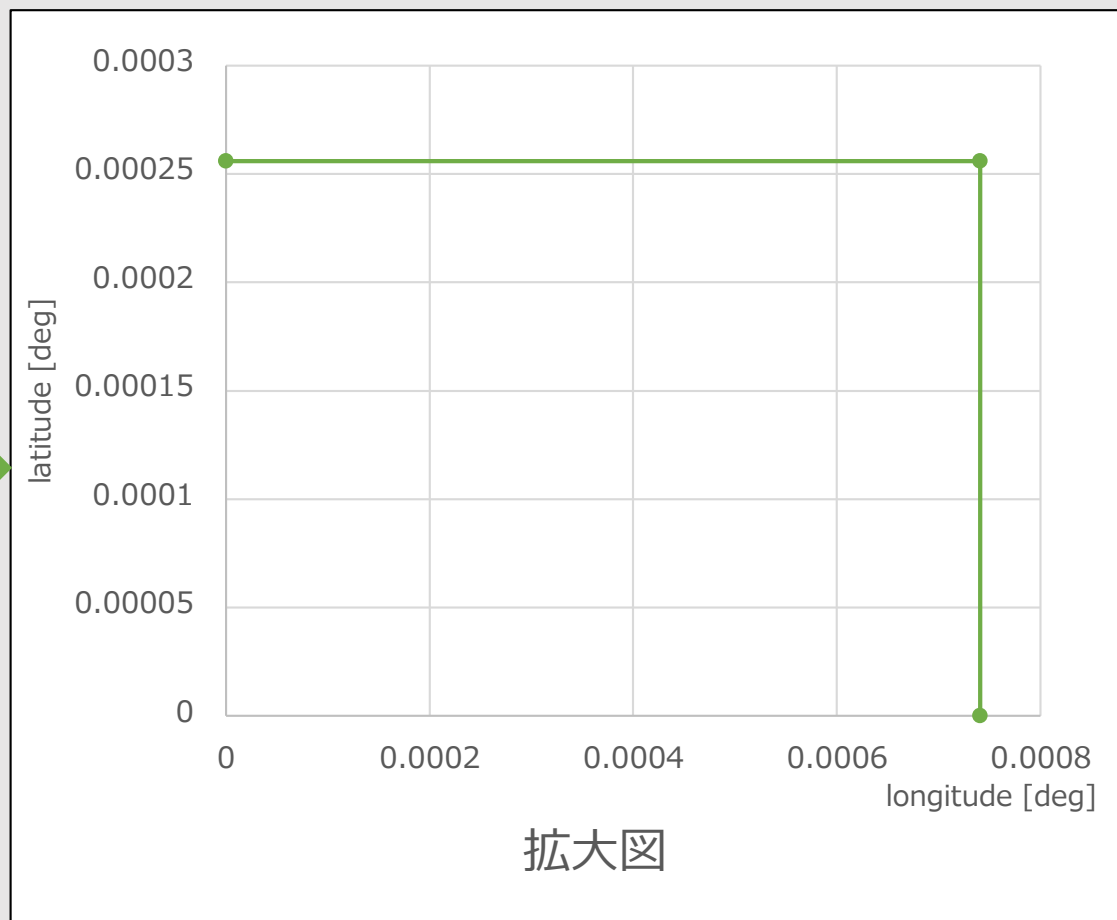
Iridium NEXT 1 番衛星  
24時間分布



# ドップラー周波数による位置推定



複数の衛星を組み合わせた場合、  
位置推定精度が高まる



ドップラー周波数による  
位置推定のイメージ

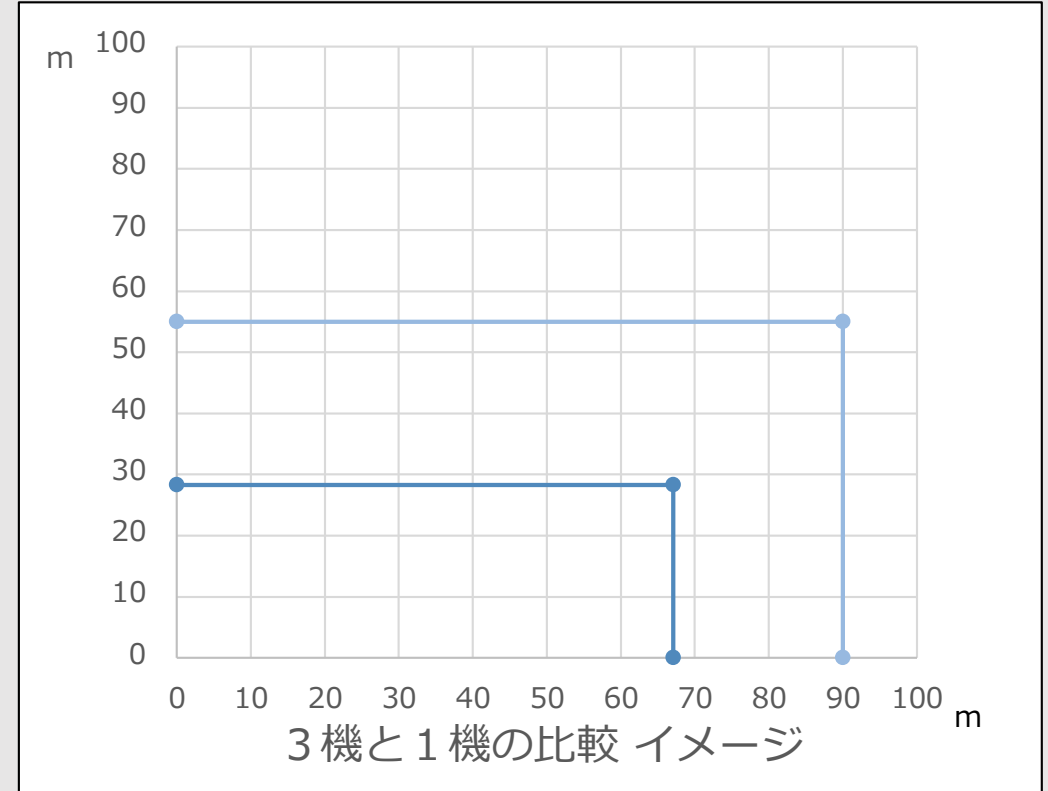


# ドップラー周波数による位置推定

衛星番号	[deg]	[m]
	1	110574.4067
	1	90551.63523
28	0.000356	39.36448548
	0.001223	110.7446483
3	0.000625	69.10900419
	0.000741	67.09876171
45	0.000256	28.30704812
	0.001767	160.0047395

緯度 1 度あたりの距離

経度 1 度あたりの距離

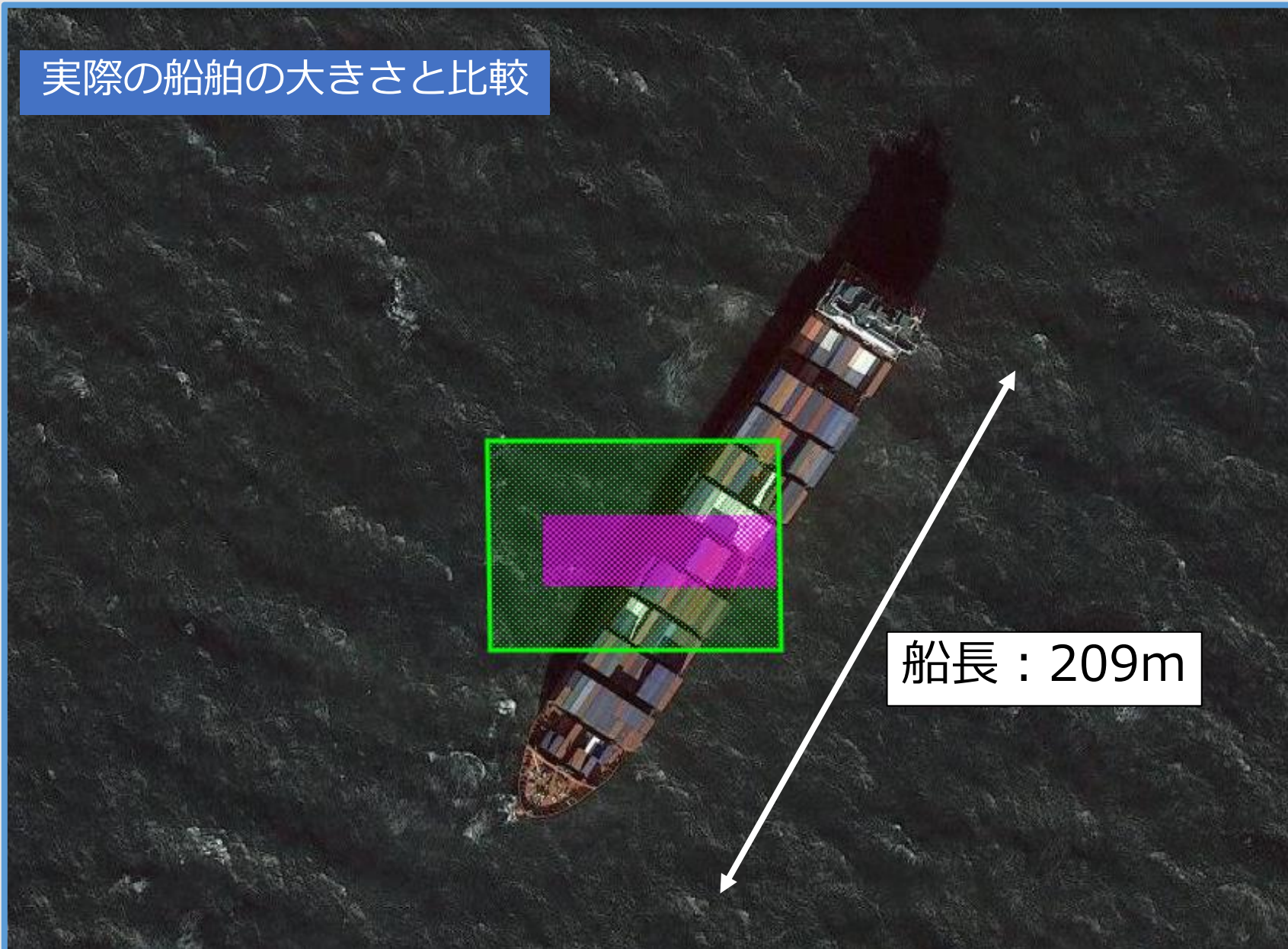


ドップラー周波数が約0.1Hzの精度で取得できるものとするとき、地球上の位置（東京海洋大学第4実験棟）は

**LEO衛星 3機を用いた場合、緯度方向で約28m、経度方向で約67mの精度で求められる。**

# ドップラー周波数による位置推定

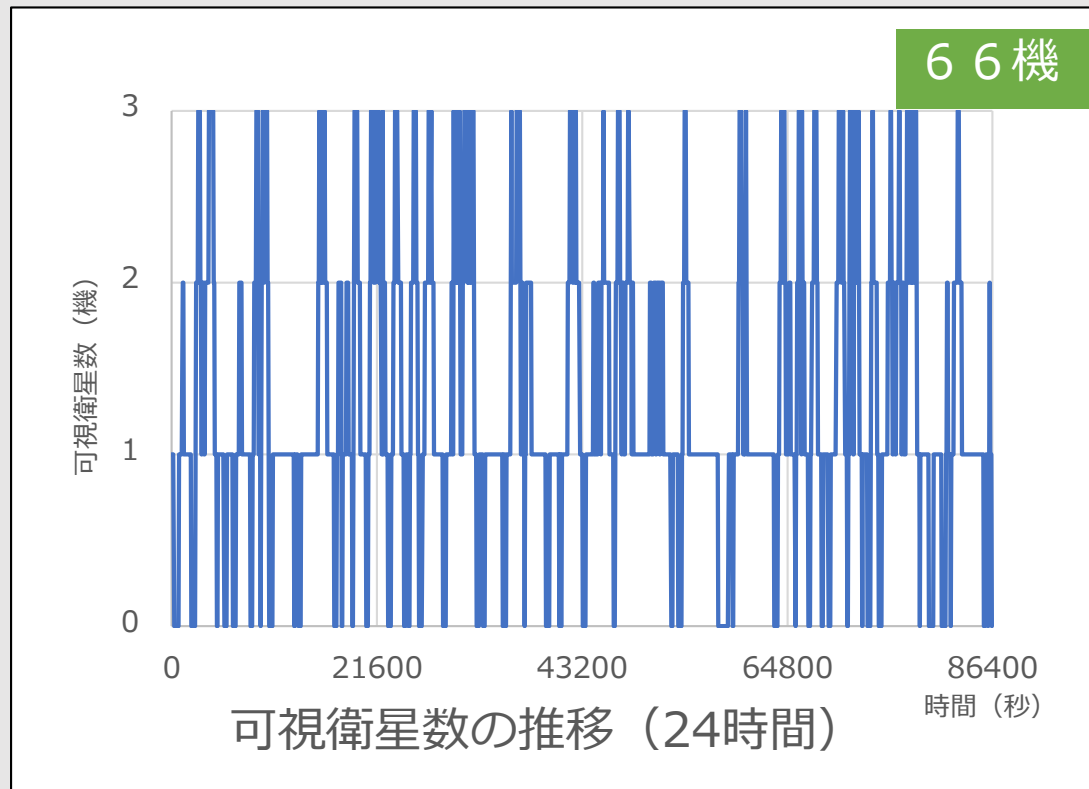
実際の船舶の大きさと比較



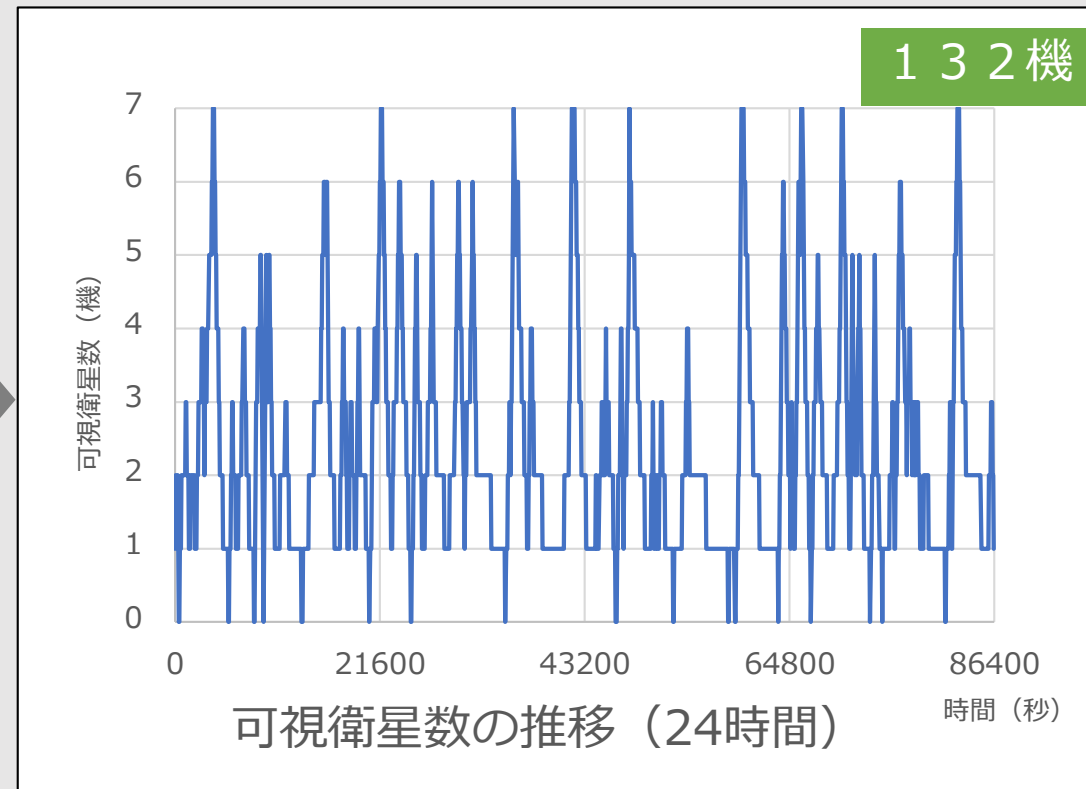
船長：209m

# 衛星数を増加させた場合の変化

6 軌道、6 6 機の衛星を追加した場合の可視衛星数の変化



202 / 1440 (回)



37 / 1440 (回)

可視衛星数が0になる回数  
202回から37回へ減少した

# まとめ及び考察

LEO衛星が少なくとも1機見えれば、100m以内の精度で、さらに複数の衛星が利用できれば数10mの精度で位置を推定することが可能になる



船舶が洋上で静止することができればGNSSにたよらず、大まかな位置を推定できることになる。また、船舶の自立航行への応用などの可能性も秘めていると考える。

## 今後の課題

少しでも速度が出ていた場合、波長が極めて短く推定精度が大幅に落ちることが予想される為、対策を調査する必要がある。

→対策) 精度の高いジャイロなどを利用すれば、速度などから逆算できる(方位などからも)。

---

ご清聴ありがとうございました