

平成30年度 卒業論文

安全航行に向けた低軌道衛星(LEO) 利用に関する調査研究

東京海洋大学 海洋工学部

海事システム工学科

学籍番号 1521019

笠井 敬太

指導教員 久保 信明 准教授

目次

- ▶ LEOとは
- ▶ LEOとMEOの比較
- ▶ Almanacデータを用いたシミュレーション
- ▶ LEO運用による海洋安全政策の事例
- ▶ まとめと考察

はじめに

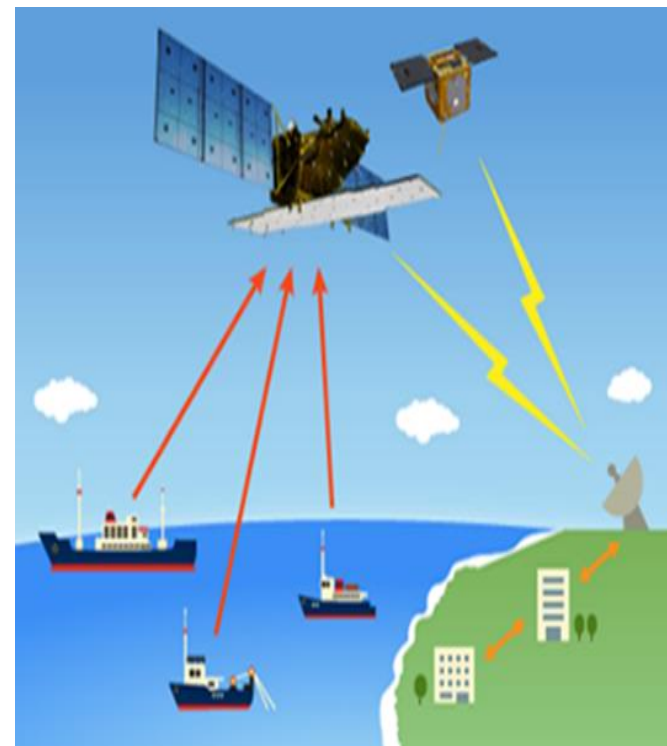
※背景・目的※

- スマートフォンが普及している現在、GNSSを利用するデバイスは40億を超えるといわれている。
- 航海においてもGPSなどの衛星からの情報を使うことが定着してきている。

しかし...

- GPSが使えない状況・環境もある。
- その解決策としてLEOの活躍が見込まれている

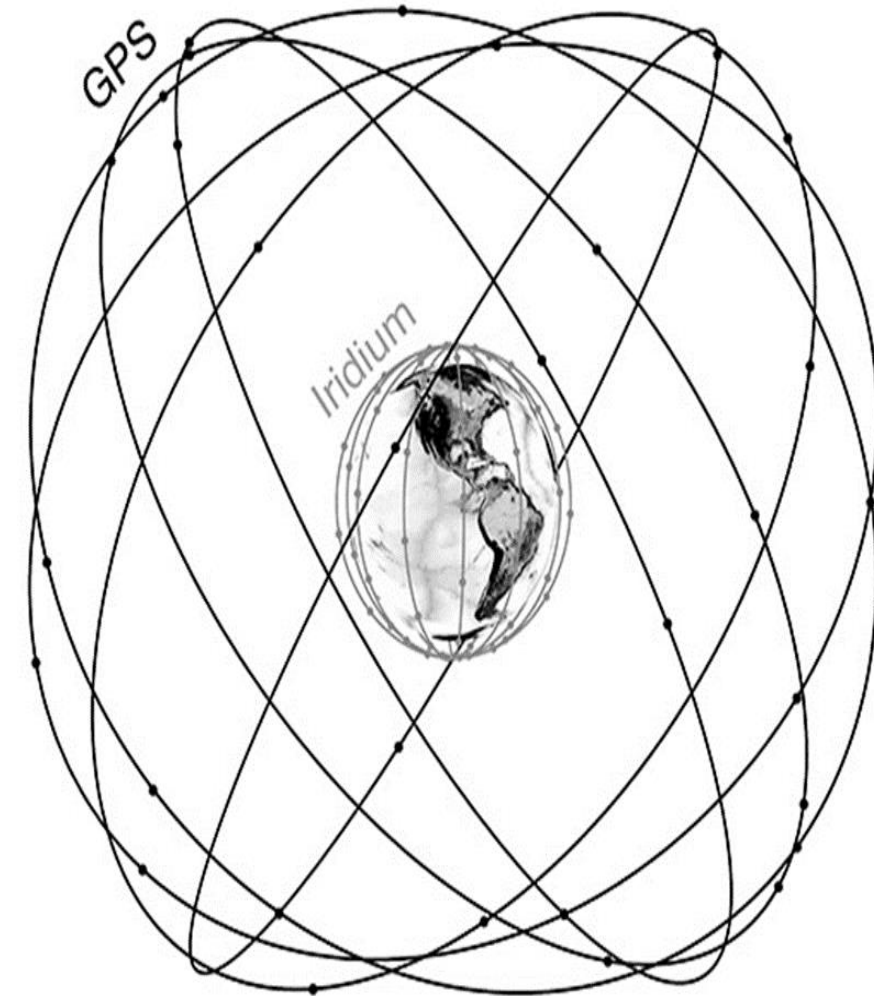
本研究では、LEOを用いることで得られる恩恵に関して調査していく。



LEOとは

※LEOとは※

- 低軌道上に存在する衛星(Low Earth Orbitの略)
特に、高度2,000[km]以下で駆動している衛星を指す。
- GPS高度約20,200[km]で駆動しており、中軌道衛星(MEO)に属する。(2,000 [km]~36,000 [km])
- LEOは地球により近いいため強い信号強度を提供する可能性を秘めている。
- 現在、主に使用されているのはIridium衛星である。



※GPS衛星とイリジウムの概略図※

LEOとMEOの比較

- LEOとMEOの違い

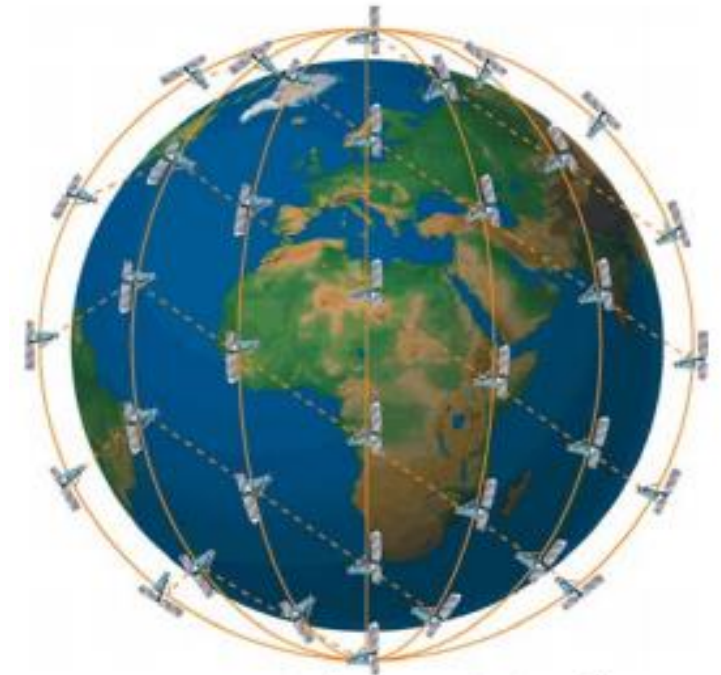
- ① 軌道高度
- ② 照射範囲と信号強度
- ③ 周回速度と衛星数

特性	MEO	LEO	MEO:LEO
システム	GPS	Iridium	
高度	約 20,200[km]	約 780[km]	25:1
天頂における信号の損失	約 -97[dB]	約 -69[dB]	約 28[dB]
衛星が通信可能な地上の範囲	約 1.73×10^8 [km ²]	約 1.93×10^7 [km ²]	9:1
衛星が通信可能な地上の範囲の半径	約 7,900[km]	約 2,500[km]	3:1
平均運動	約 0.0008[deg/sec]	約 0.06[deg/sec]	1:7
軌道周期	約 12[hours]	約 100[minutes]	7:1
衛星数	31機	66機	1:2

※表:LEOシステムとMEOシステムの比較※

LEOとMEOの比較

- GPSは1点に対し1度に10機の衛星を見ることができる。
しかし、Iridium衛星はGPSの2倍もの衛星を持っているが、
基本的には、1度に1つの衛星しか見ることができない。
- また、カバレッジについてもGPSの方が顕著に良い。
- 結論: GPSが使える環境では、GPSを使って測位するが良い。



※Iridium衛星とは？※

6軌道、66機の衛星からなる低軌道コンステレーション。

衛星間通信が可能であり、一つの衛星から見渡せる地域が狭くなるため、多数の衛星を連携させ、全地球をカバー。

Iridium	GPS	Iridium	GPS
66[機]	31[機]	約100[機]	10[機]未満

※衛星数※

※coverage※

GPSが抱える問題点

※信号強度※

• 原因①: 軌道

地球からの距離が大きいため、エネルギーが地球への通過中に大きく広がってしまう。

• 原因②: 設計

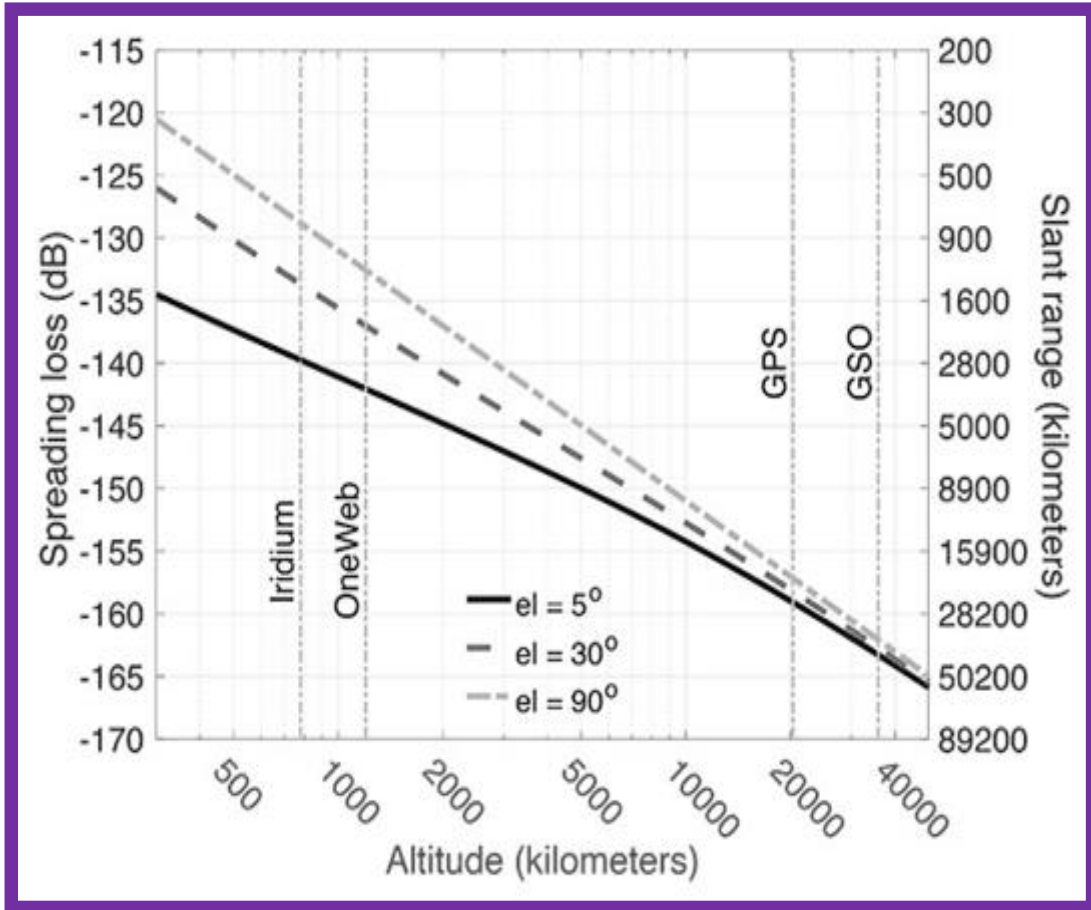
オープンスカイ環境で動作するように設計されているため、密集した都市や屋内でのサービスが厳しく制限されてしまう。

解決策

- ✓ LEOは地上のGPS信号よりも300~2,400倍強力。GPS信号が遮られている位置、航行、タイミング(PNT)アプリケーションに適している

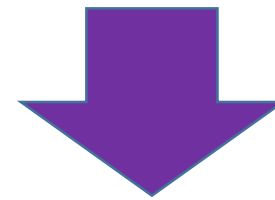
GPSの補完・バックアップとして...

信号強度と照射範囲



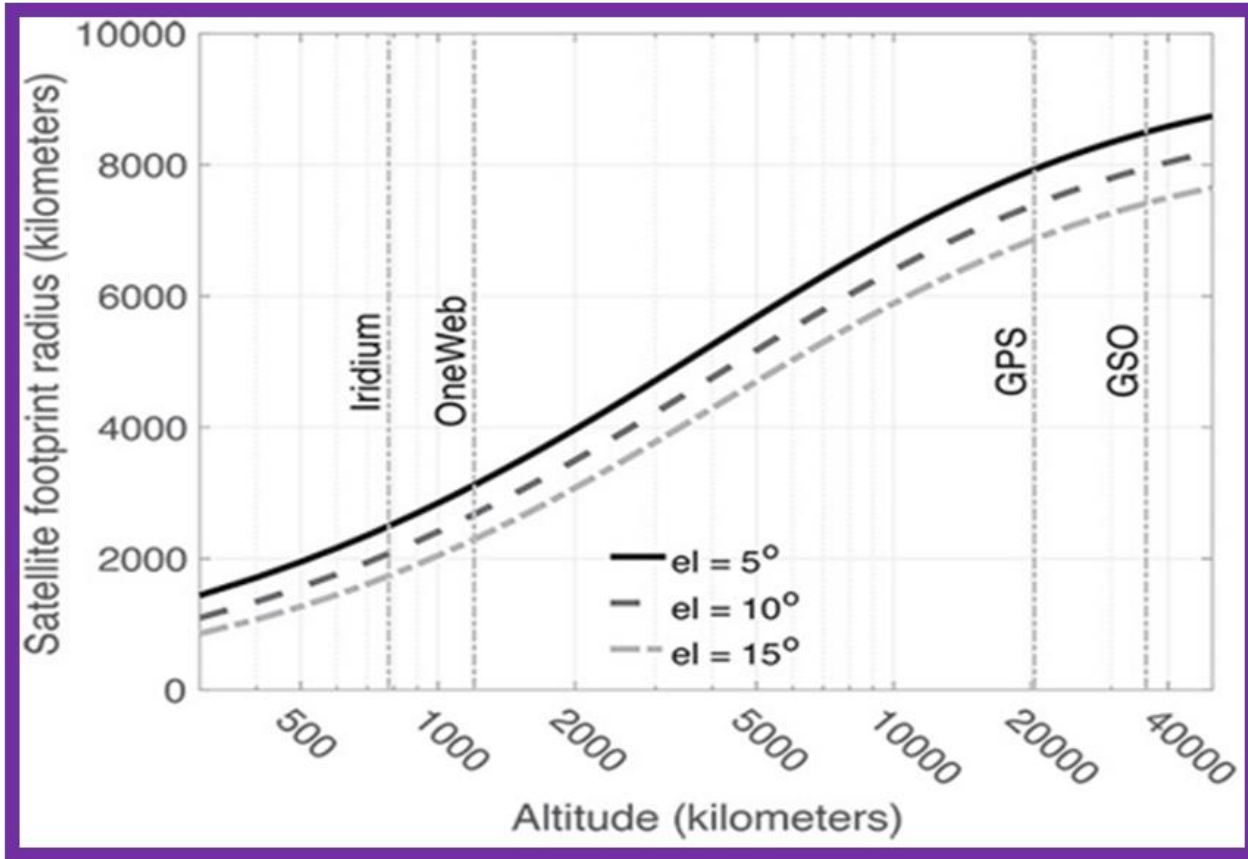
※信号強度※

- Iridium、Oneweb等のLEOは、傾斜範囲は小さく、信号強度が強い
- GPS、GSO等は傾斜範囲は大きいですが、信号強度はLEOに比べると弱い

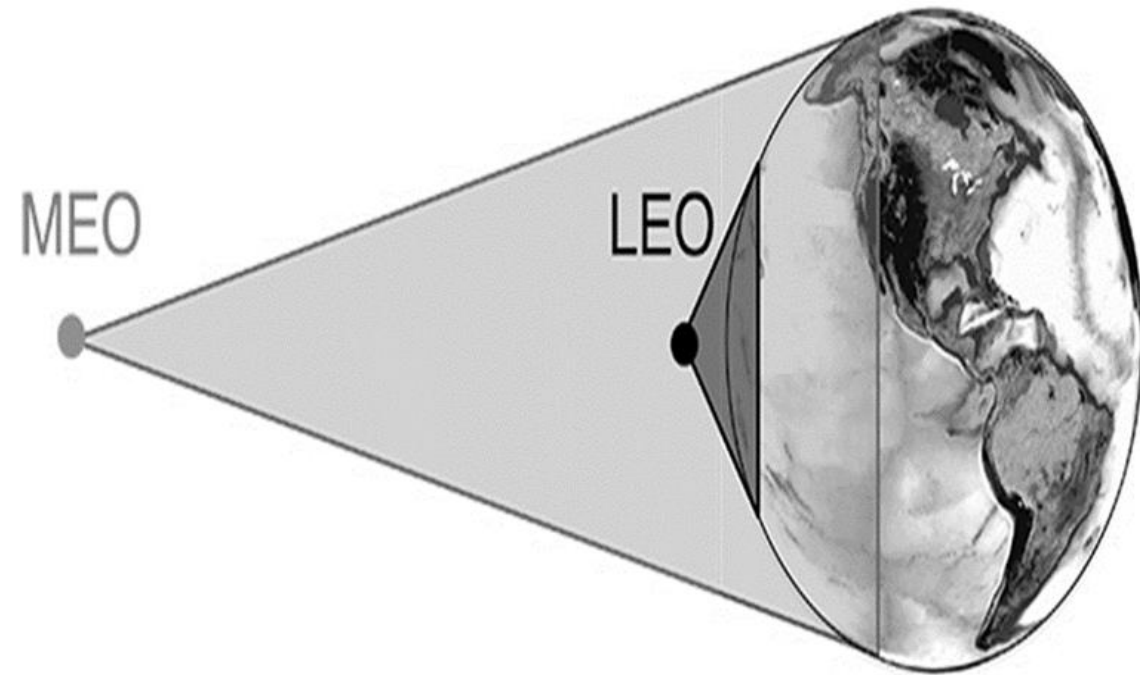


LEOはGPSなどのMEOに比べて、地表でもその信号のエネルギーの損失が少ない！

信号強度と照射範囲②



※照射範囲※



※図: 低軌道衛星の距離と通信可能な地上の範囲の比較(縮尺)※

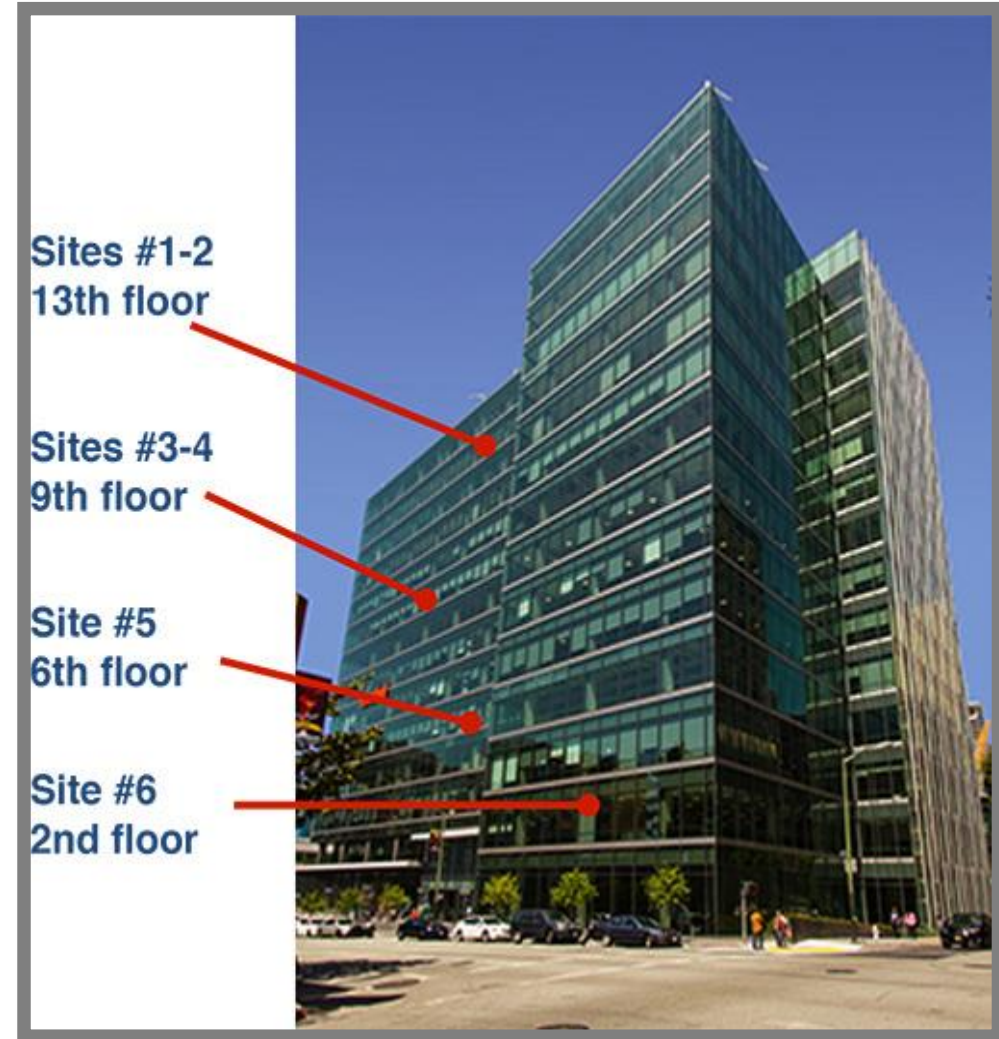
- Iridium、Oneweb等のLEOは高度が低く、照射の範囲が小さい
- GPS、GSOは高度が高く、照射範囲が大きい

GPS信号が受信できない環境での実験

屋内測位パフォーマンス

※概要※

- 左図のような屋内において信号強度を調べる実験が行われた。
- Site1-6の場所に受信機を設置。
- 各ポイントでのGPS、Iridiumからの信号強度を調べる。



GPS信号が受信できない環境での実験②

※結果※

- 屋内測位における各信号の結果。

	Sites1-2(13階)	Sites3-4(9階)	Site5(6階)	Site6(2階)
GPS	△	×	×	×
Iridium	◎	◎	◎	◎

- GPS信号は上層部の窓際の一部でしか正確な位置は測位できなかった。
- 一方、アンテナと空の間に多くの鋼鉄とコンクリートの層がある最下階でも、Iridiumの[C/N0]は35～55[dB-Hz]を示した。

(GPSがオープンスカイ環境で得られる信号の強さ)

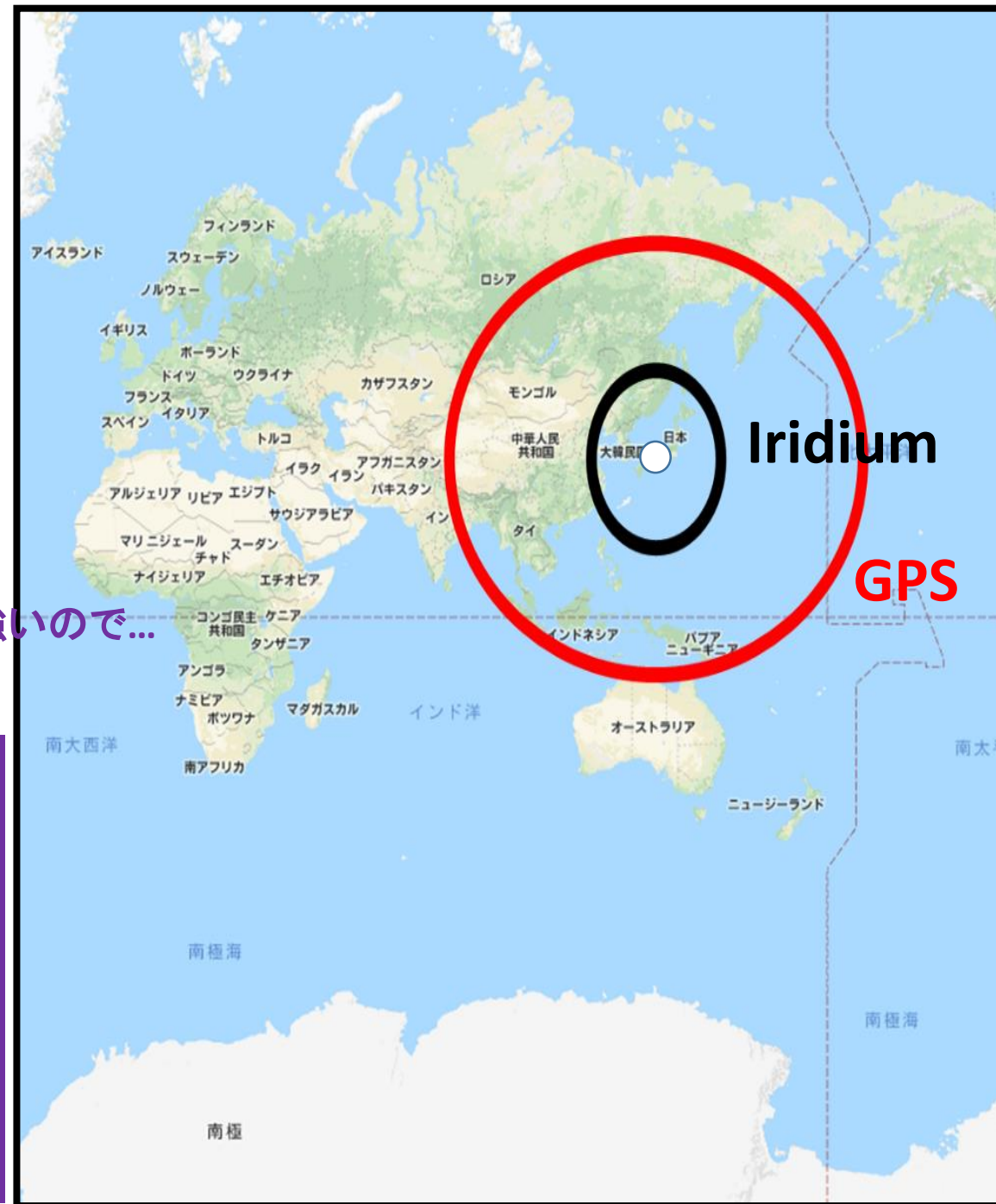
信号強度と照射範囲③

- ある時刻におけるGPSとIridium衛星の照射範囲をシミュレート。
- 赤枠がGPS衛星、黒枠がIridium衛星。
- GPS衛星はIridium衛星の3倍の半径で、9倍の照射範囲を持つ。



範囲が狭く、信号強度が強いので...

- 認証のレベルがかなり高いことにより、GPSに対する攻撃や、スプーフィング(なりすまし)に強い。
- 結果:地上の都市部にままならず、海洋安全に防衛上大きく前進!



周回速度と衛星数①

(I)スピード。

GPS衛星は12時間ごとに1回の測位を完了するが、イリジウムはわずか100分で完了することが可能。LEOの角速度はGPS衛星の約7倍。

(II)衛星数

LEOはGPSよりも多くの数の衛星が上がっているため、測位の補強やアプリケーション開発拡大に期待されている。

システム	軌道領域	衛星数	高度[km]
GPS	MEO	31	20,200
GLONASS	MEO	24	19,100
Galileo	MEO	24	23,200
BeiDou	MEO	35	21,500
Iridium	LEO	66	780
Iridium NEXT	LEO	66	780
OneWeb	LEO	648	1200
SpaceX	LEO	4025	1100

周回速度と衛星数②

	Iridium NEXT	QZSS
開発・打ち上げ費用[1機]	約50億円	約2,000億円
重量	680[kg]	4,100[Kg]
設計寿命	15年間	10年間

- LEOは中・高軌道衛星に比べてコストパフォーマンスが非常に優れている。



複数同時打ち上げ、多数の開発が容易に。

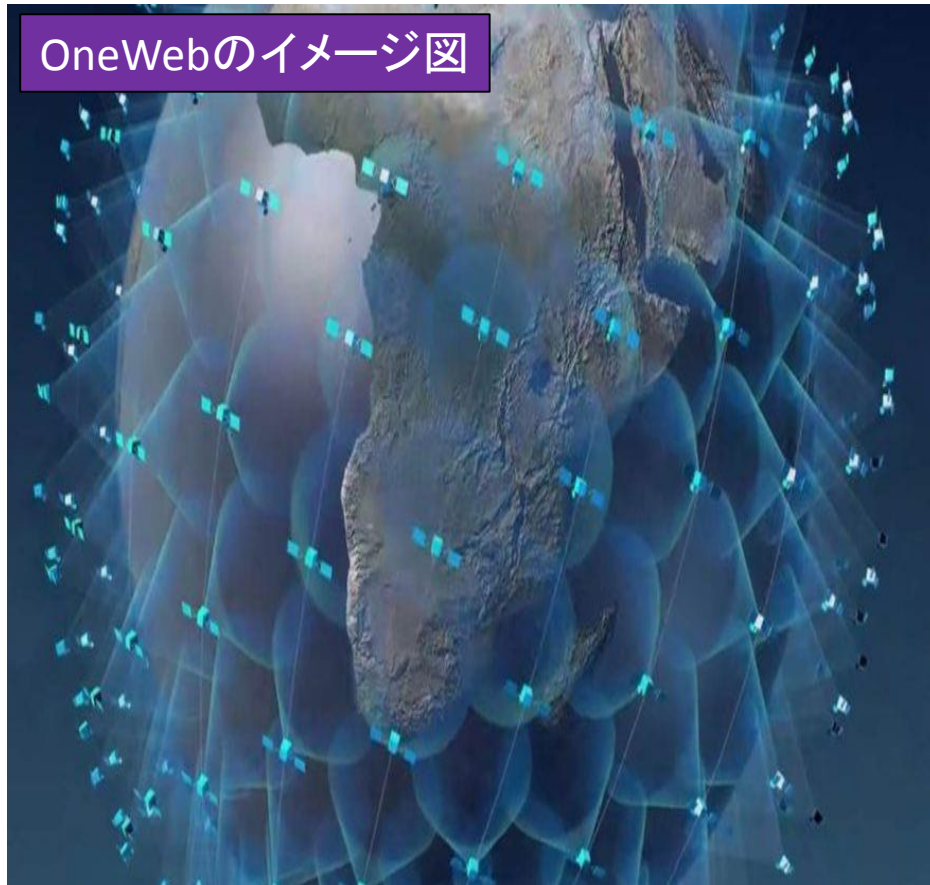
周回速度と衛星数③

※多数打上げによる利点※

- OneWeb→648[機]
- SpaceX→4,025[機]
のLEOを新たに導入することを発表した。



- 世界人口の54%にInternetアクセスを可能に
 - カバレッジをあげることを可能にする。
- 通信インフラが整備されていない山間部や海洋での高速通信が実現することが可能になる。



※画像: SpaceNEWS.com※

Almanacデータを用いたシミュレーション

※目的※

- ①日本において、LEOがどのような動きをし、可視できるかを検証するため
- ②GPSとの差異を見出すため

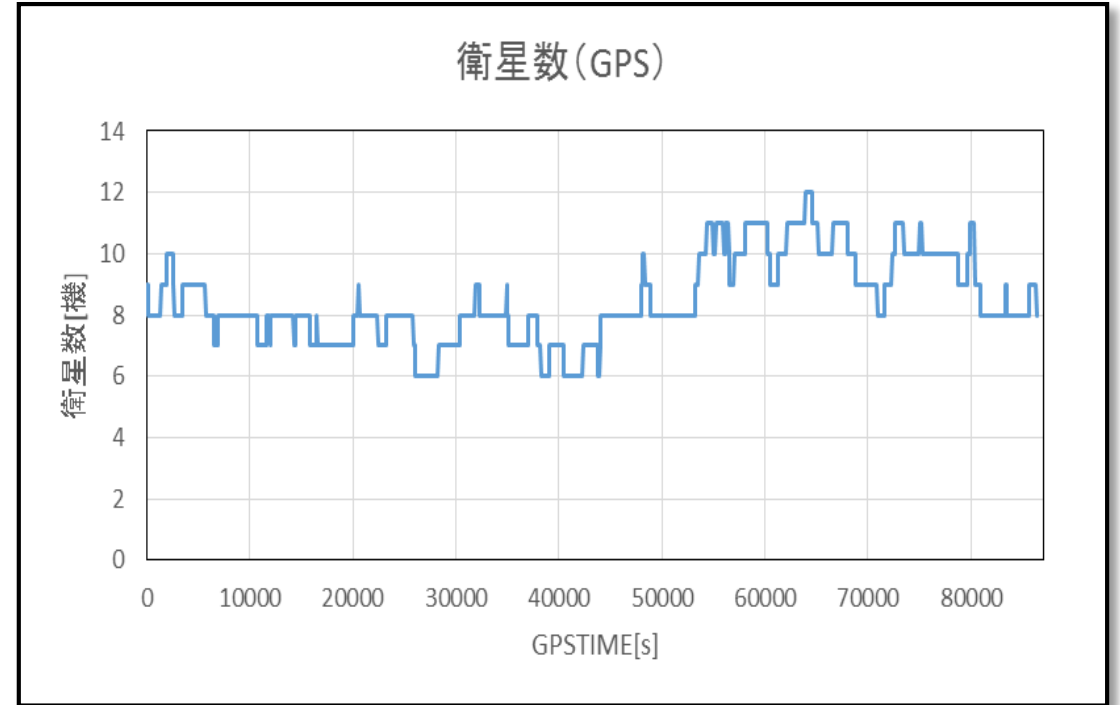
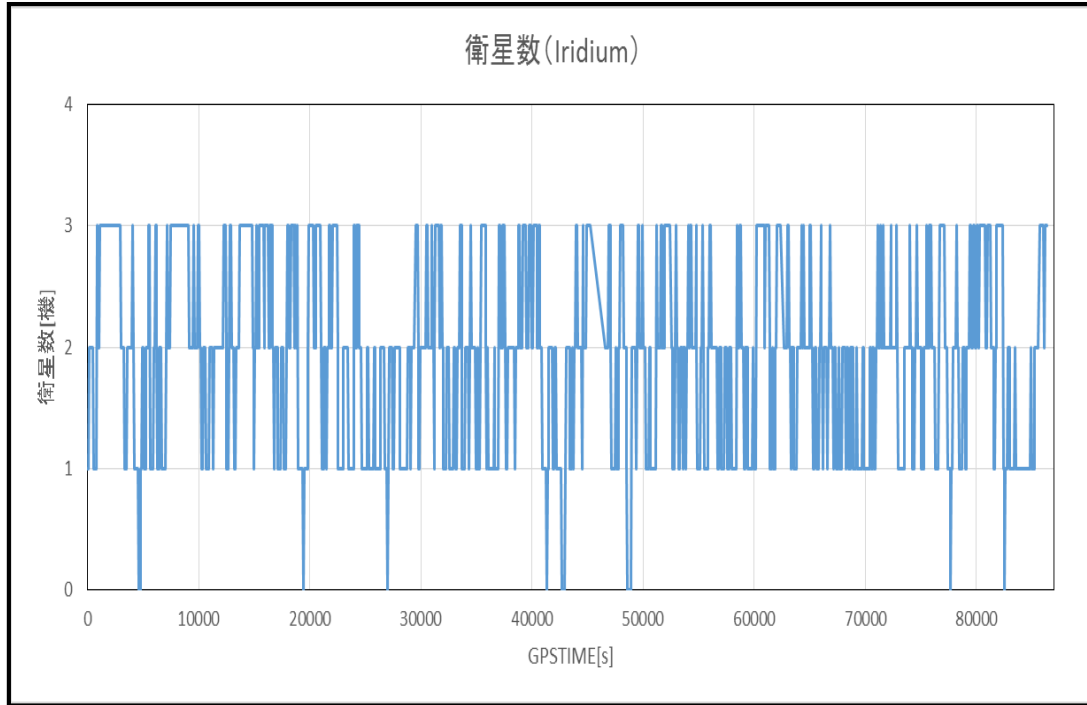
※実験方法※

- Almanacと呼ばれる衛星情報を用いて衛星の位置を計算。
- 本来ない低軌道衛星のAlmanacデータを作成し、シミュレートを行う。

```
***** Week 65 almanac for PRN-01 *****
ID:          01
Health:      000
Eccentricity: 0.4962921143E-002
Time of Applicability(s): 503808.0000
Orbital Inclination(rad): 0.9623416489
Rate of Right Ascen(r/s): -0.7897471819E-008
SQRT(A) (m 1/2): 5153.587891
Right Ascen at Week(rad): 0.8094426381E+000
Argument of Perigee(rad): -1.746035655
Mean Anom(rad): -0.1816641466E+001
Af0(s):      0.1535415649E-003
Af1(s/s):    0.0000000000E+000
week:        65
```

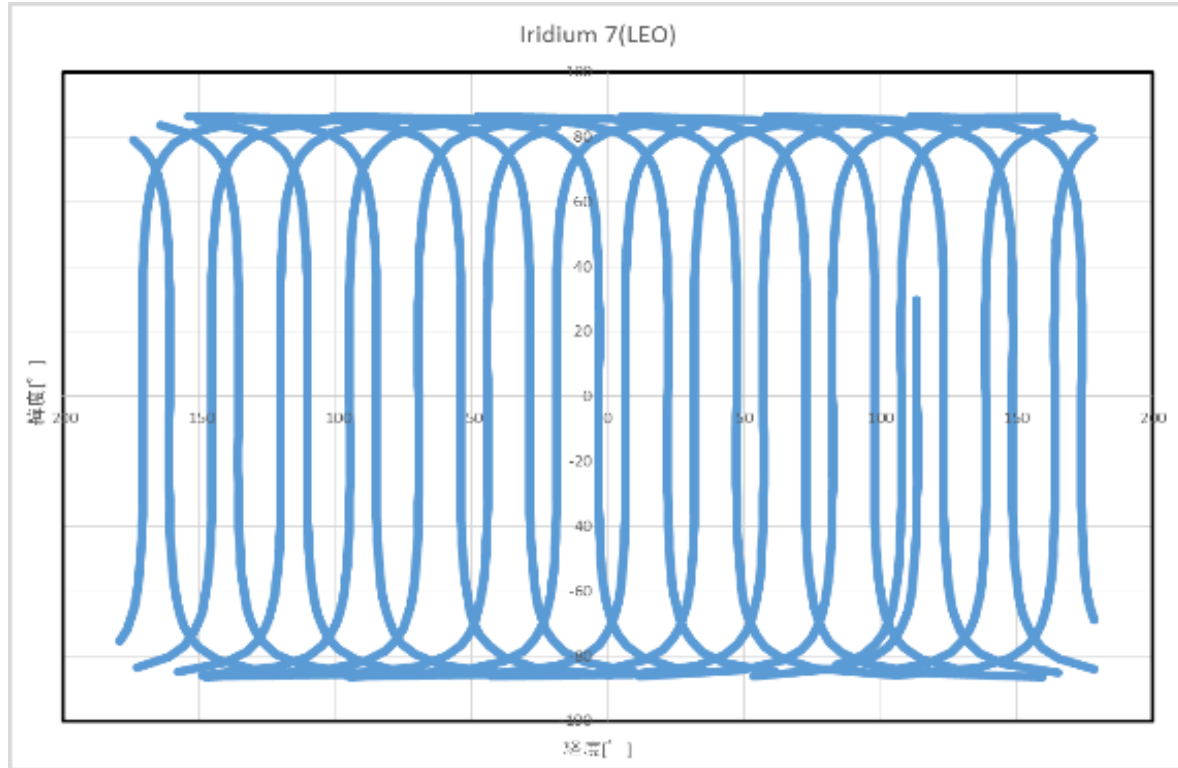
※Almanacデータ※

シミュレーション結果(衛星数)

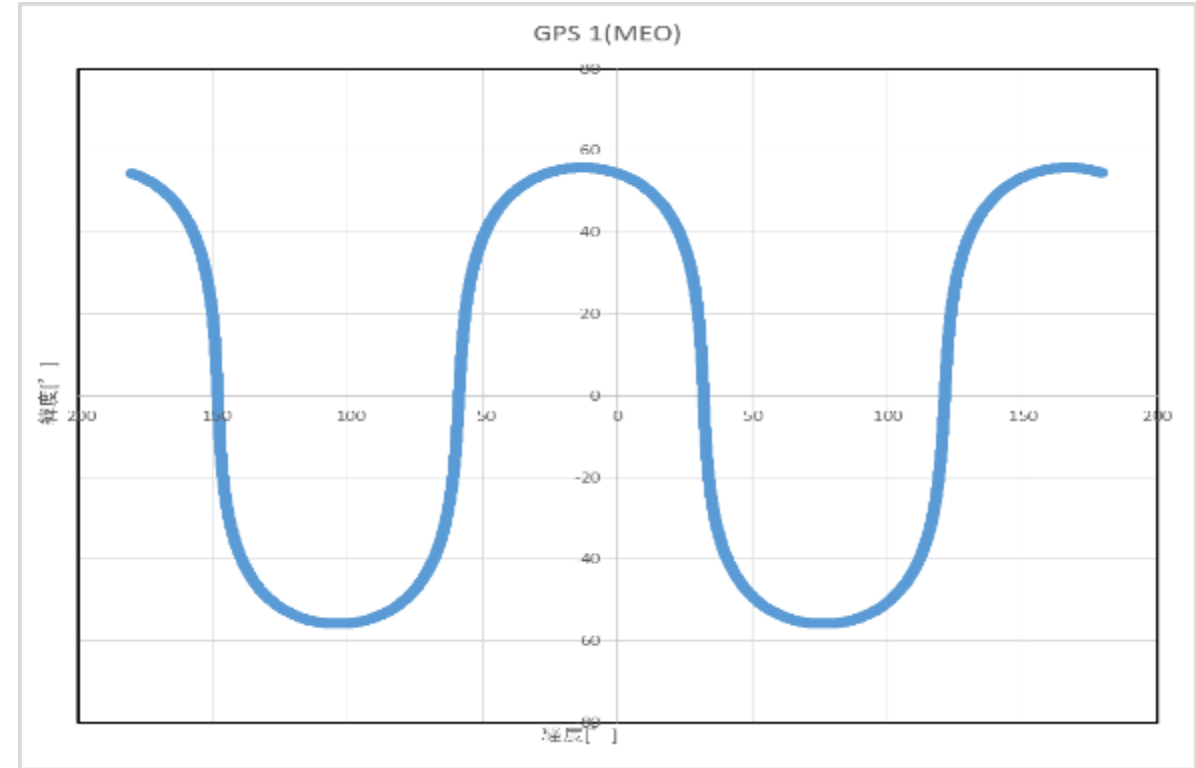


- 東京海洋大学第4実験棟からの可視衛星数の比較。
- 時間は24時間(1日)分。プロットは1分刻み。
- 左図がLEO66機(IridiumNEXT衛星66機)、右図がGPS衛星31機分のデータ。

シミュレーション結果(衛星軌道)

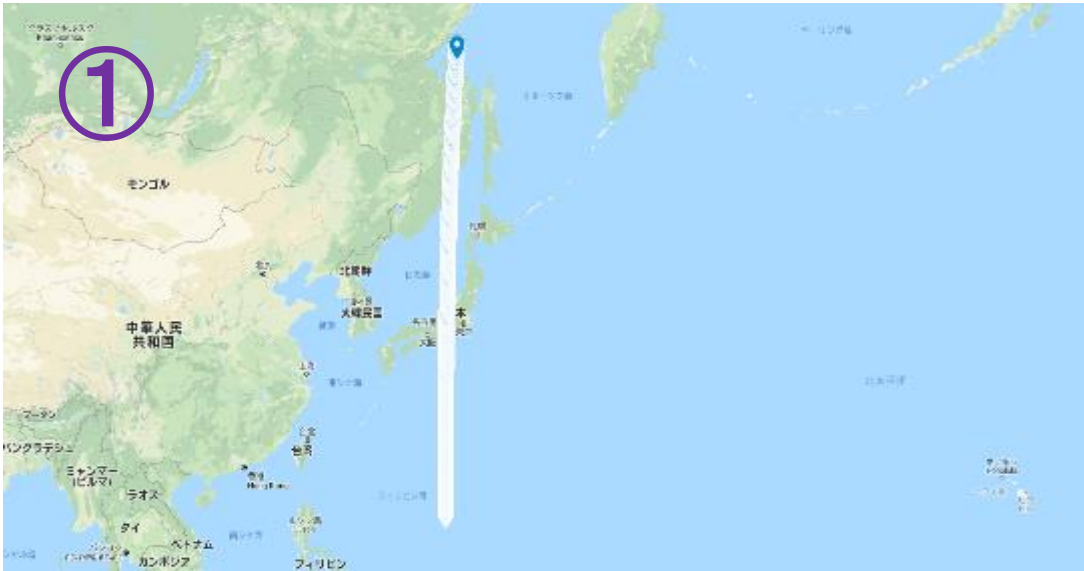


- Iridiumの7番衛星の24時間分の位置を示したグラフ。
一日の内で地球を14.5周していることが見られる。

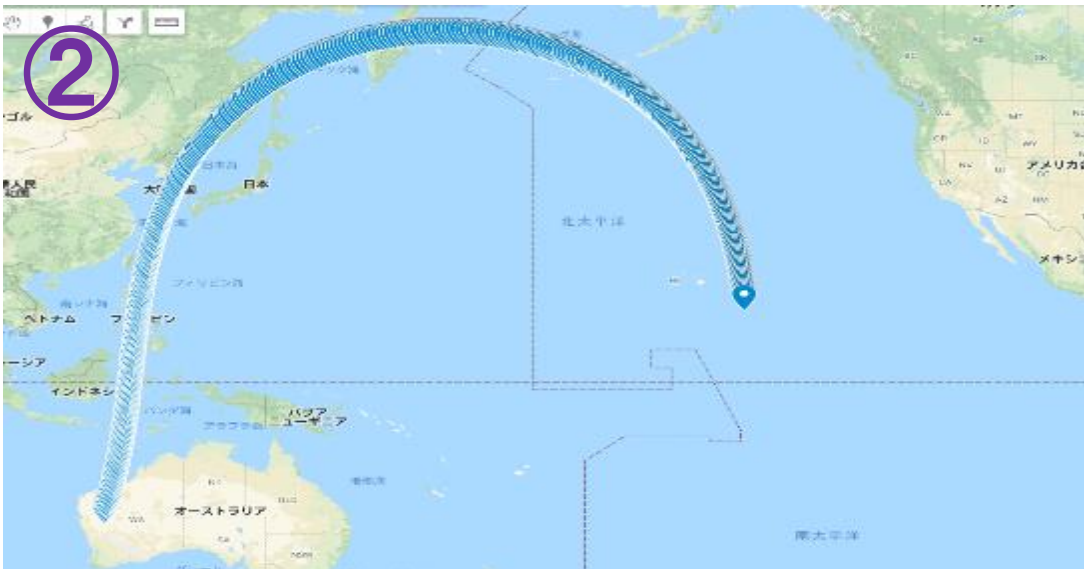


- GPSの1番衛星の24時間分の位置を示したグラフ。
一日のうちで地球を2周していることが見られる。

シミュレーション結果(衛星の速度)



- 左図は研究室(東京海洋大学4号実験棟)からマスク角 10° としたときに可視できる場合のプロット図である。



- ①はIridium衛星のプロット図で、研究室から可視できる時間は約11分間程。
- ②はGPS衛星のプロット図で、研究室から可視できる時間は約6時間40分程。
- 比較をするに、Iridiumは照射範囲が狭く、速く過ぎ去ってしまい、GPSは照射範囲が広く、長く可視できることがわかるシミュレート結果となった。

※使った衛星: Iridium158※

シミュレーション結果(衛星の速度②)

※沖縄一稚内間でどのように見れるのか?※

- 日本を縦断し、使用ができる可視衛星のうち、1つの衛星が稚内から沖縄までどのように移動するかをシミュレート。
- 進行方向は矢印の向き。
- 各ポイントは衛星の座標を示しており、間隔は1分刻み。
- 直線距離にして2,471[km]をわずか14分間で移動する。
- 右表は、衛星の各ポイントに対して各地点で衛星利用の可否をまとめたもの。



	稚内	東京	那覇
●	○	×	×
●	○	○	×
●	○	○	○
●	×	○	○
●	×	×	○

シミュレーション結果(まとめ)

- ①LEOはGPSに比べて約7倍の速度で地球を周回している
- ②低軌道で巡回しているため、1点に対する照射範囲及び照射時間は小さいものとなる
- ③利用可能時間(24時間):98.7%、最長連続利用可能時間:約8時間1分
- ④利用不可能時間(24時間):1.3%、最長連続利用不可能時間:約3分
- ⑤LEOは移動速度が早いため、定点に対して常に同じ衛星を使うことができないという欠点が見受けられた。

- 通信・測位の補強という面では十分な結果。
また、LEOの利用はIridium衛星だけでなくMEOに比べ他多数の衛星があるため、更なる補強利用の可能性がある。

LEO運用による海洋安全政策の事例①

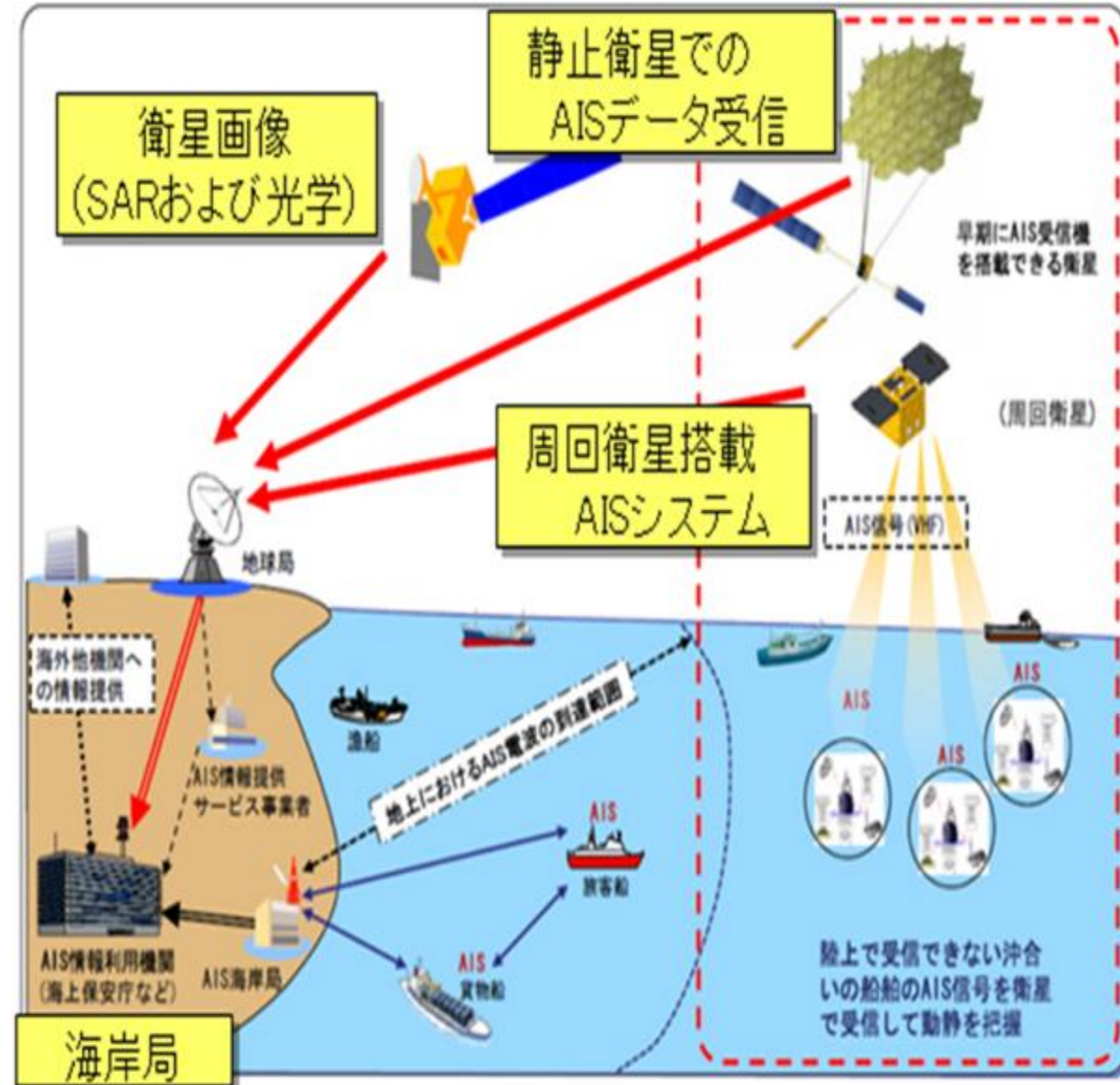
小型衛星実証実験 (SDS-4)

※概要※

- 衛星搭載船舶自動識別システム実験: SSpace based AIS Experimentの略
- 小型実証衛星4型(SDS-4)とは、第一期水循環変動観測衛星「しずく」の相乗り小型副衛星である。

※目的※

- 宇宙での信号受信実験を行い、宇宙から船舶の動きを観測。衛星にAIS受信機を搭載することで、沿岸に設置された陸上局では収集ができなかった外洋海域等のAIS情報を観測することができ、低軌道衛星ならではの活躍が期待されている。



LEO運用による海洋安全政策の事例②

海洋地球研究船「みらい」

北極航海中では、高緯度であるため既存の通信衛星サービスの利用が難しい。

...しかし、Iridium衛星を用いることで、

(i) 全球での船舶トラッキング

(ii) 海洋環境保全

(ii) 海上安全

の情報が手に入り、より安全な航海が可能になると見込まれている。



※写真:JAMSTEC※

LEOで既存の衛星を補強することにより、様々な状況下での通信・測位が可能に。



LEOは、海洋安全達成に必要なアプリケーション開発拡大の将来性があると世界中でも注目されてきている。

まとめと考察

※まとめと考察※

- LEOは、軌道高度・衛星数の多さ・信号強度の強さの3点から、GPS衛星の通信・測位を補強することが可能。
→都市部や屋内・海洋にまで新たなアプリケーション開発の発展へと繋がると考えられる。
- LEOは測位性能・ブロードバンド環境が上昇。
→自立航行分野での活躍が見込まれる。

※今後は…※

- 他の低軌道衛星のシミュレートや極地などの既存の静止衛星では測位・通信が難しい地域におけるシミュレートを行う。
- 自律航行など、LEO利用によって、安全航行へ活躍が見込まれる分野の継続して調査。

参考文献

- 「Innovation: Navigation from LEO」

<https://www.gpsworld.com/innovation-navigation-from-leo/>

- 「衛星搭載船舶自動識別システム(AIS)実験「SPAISE」」

<http://www.satnavi.jaxa.jp/experiment/spaise/>

- NORAD Two-Line Element Sets Current Data

<https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>



ご清聴ありがとうございました。