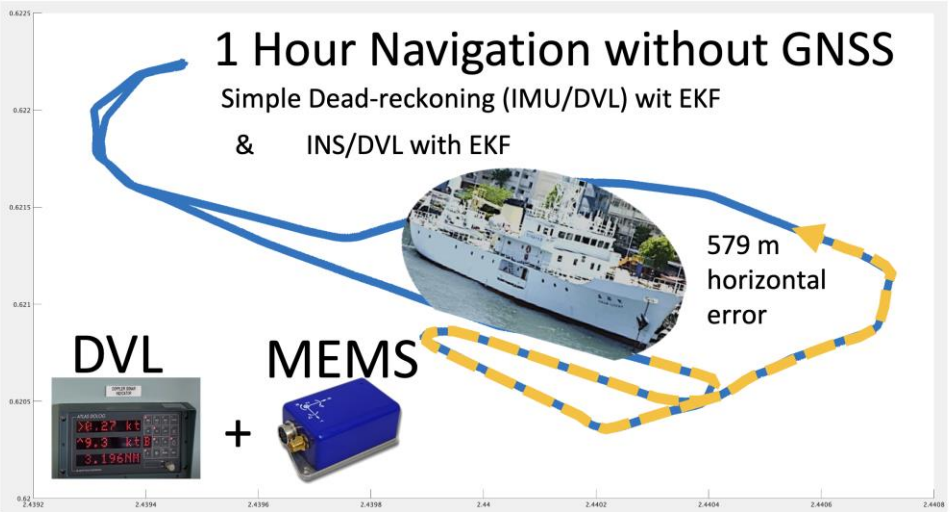
講演:6月3日14:00～15:00
久保信明（東京海洋大学教授）
GPSによる測位と30年後の測位は？



現在の航海にGNSSが利用されていることから、GNSSの簡単な歴史と概要・原理を紹介します。干渉や欺瞞信号にGNSSの信号が非常に弱いことから万が一GNSSが利用できないとき従来の航海計器が大事である点、またGPSに変わる測位（小型の低軌道衛星やINS）がでてくるかについて話します。

概要

- GNSS概要
- 干渉や欺瞞信号に弱い
- スマホでcm級測位
- 様々な位置アプリケーション
- 20－30年後の測位

GNSS概要

位置と通信の重要性

- マクスウェルが電磁波を予言（1864）
- ヘルツが送受信に成功（1888）
- マルコーニが無線通信（大西洋横断）に成功（1901）
- タイタニック遭難事故（1912）

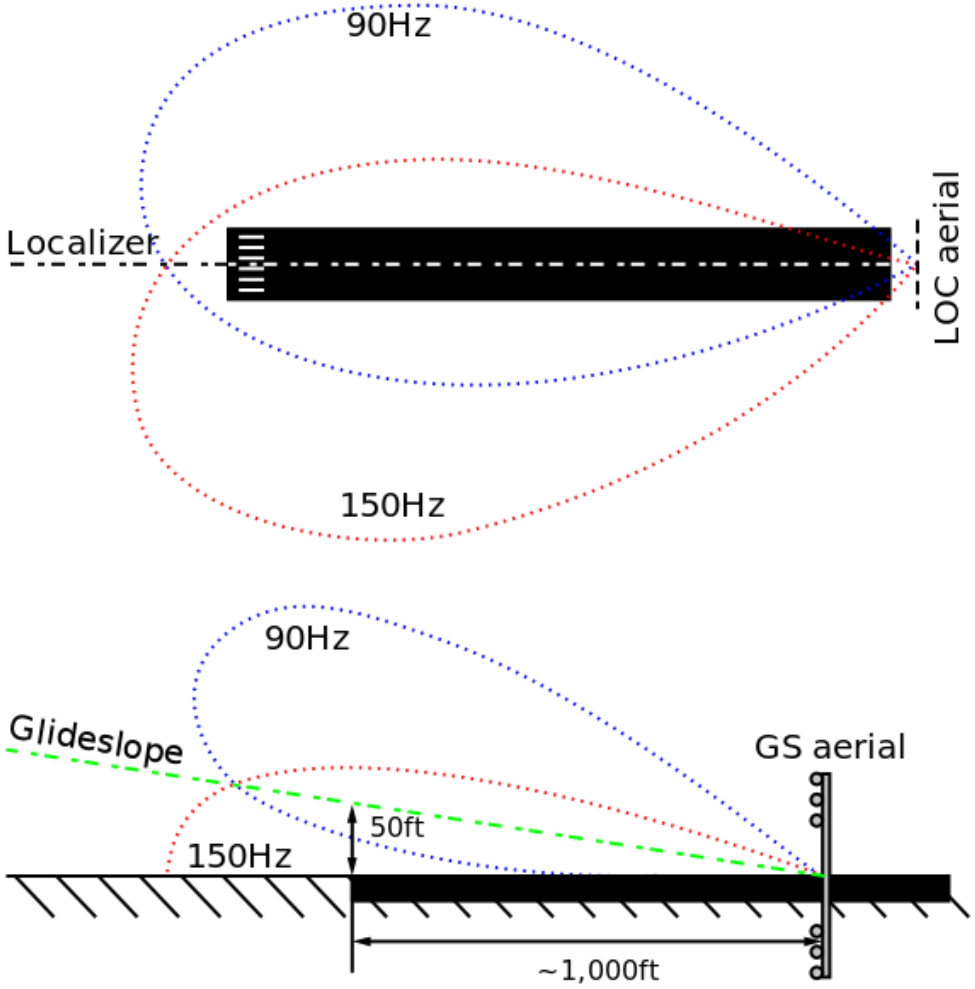
（このときの位置特定手法は?　送信機は火花放電式、受信機はコヒーラ検波器）

氷山の位置の把握
→正確な地図

・
・
・

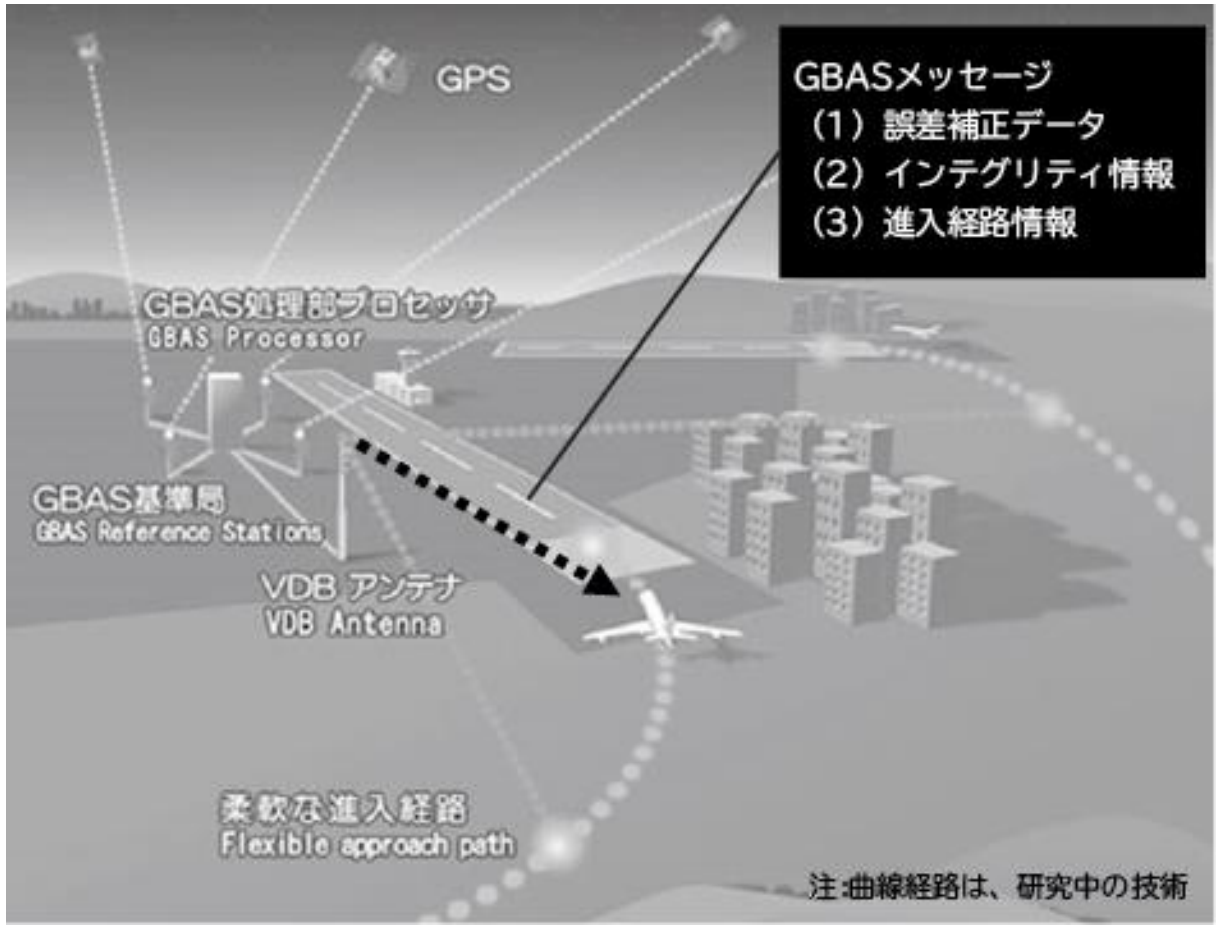
- 米国がGPSの初号機を打ち上げ（1978）
- GPSの正式運用開始（1995）
- 衛星を利用した遭難救援システム：GMDSS（1999）

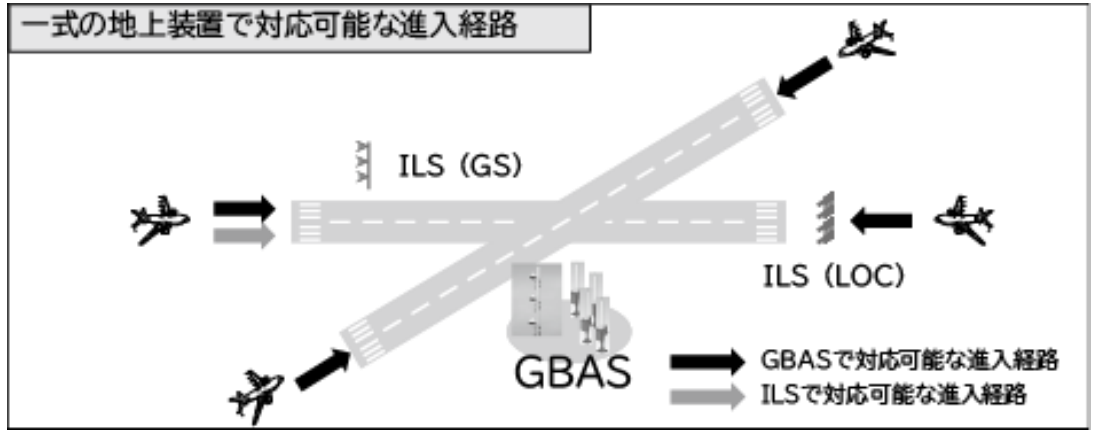
無線による航法



計器着陸装置（ILS : Instrument Landing System）

GPSを利用した航空機進入着陸システム（GBAS）の開発



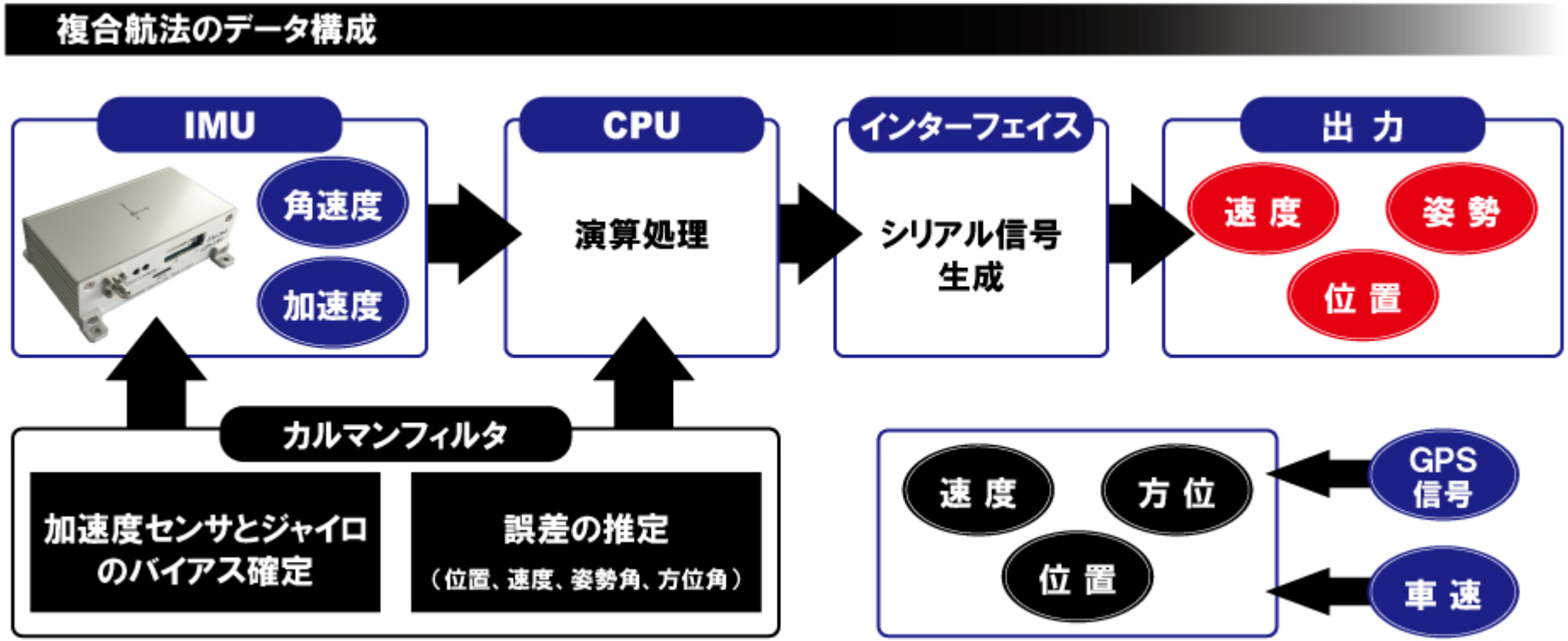


（a）GBAS基準局

（b）VDBアンテナ

https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n01/210110.html

INS（慣性航法）とGNSS



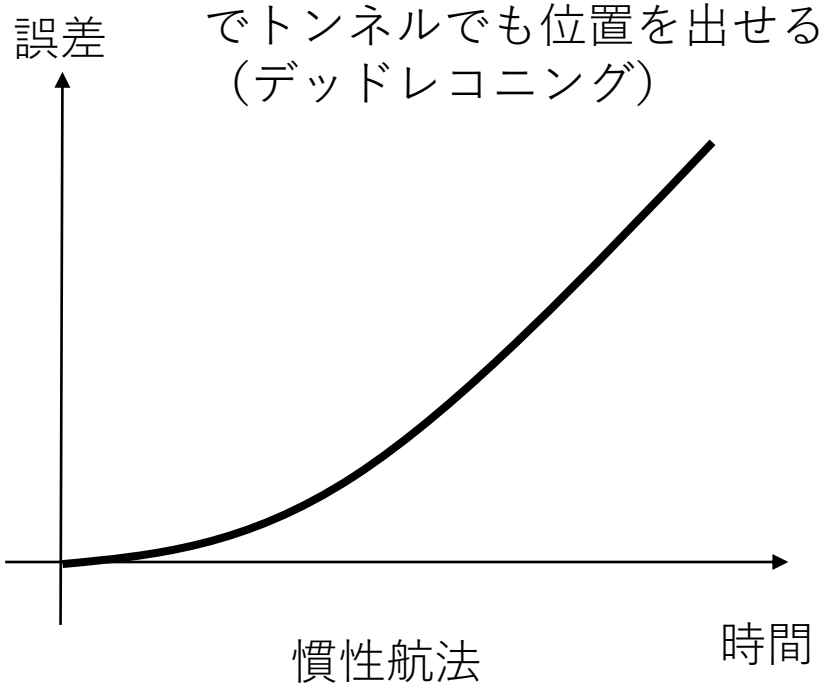
GPSおよび車速データを加えて、演算アルゴリズム（カルマンフィルタ）により慣性データなどの誤差を推定します。

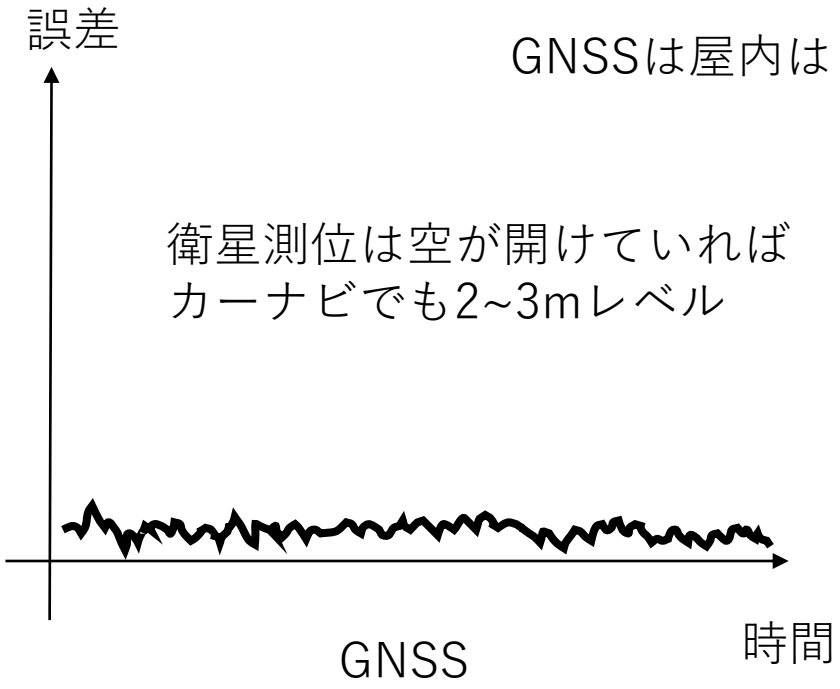
INSは初期値（位置と姿勢）を与えると、あとは角速度と加速度を積分することで継続して位置、姿勢が推定される

それぞれの特徴

GNSSは屋内は×

車の場合、IMUの方位と速度パルス
でトンネルでも位置を出せる
（デッドレコニング）





衛星測位は空が開けていれば
カーナビでも2~3mレベル

お互い補完しあえる

GPS開発者（米国）の当時の考察

- 受動体システムにすることにより、無制限の多くのユーザにサービス
- 衛星から時刻同期された信号を送信。測位手段として三辺測量を選択
- スペクトル拡散技術を利用。1つの無線周波数で信号の同時送信を可能とした。CDMA（Code Division Multiple Access）と呼ばれる符号化概念の最初の普及例
- 電離層による屈折を抑えることと、空間伝搬損失や大気中の減衰との兼ね合いから、Lバンド（約0.5～1.5GHz）を選択
- 各ユーザはその位置を求めるために衛星4機以上を視野に入れる必要があるまた、覆域を世界中（ミサイル）に経済的に提供する必要性
- 運用は現在も国防省で軍用を念頭においている。すべての戦闘機、戦艦、戦車、SoldierにGPS受信機の存在がある

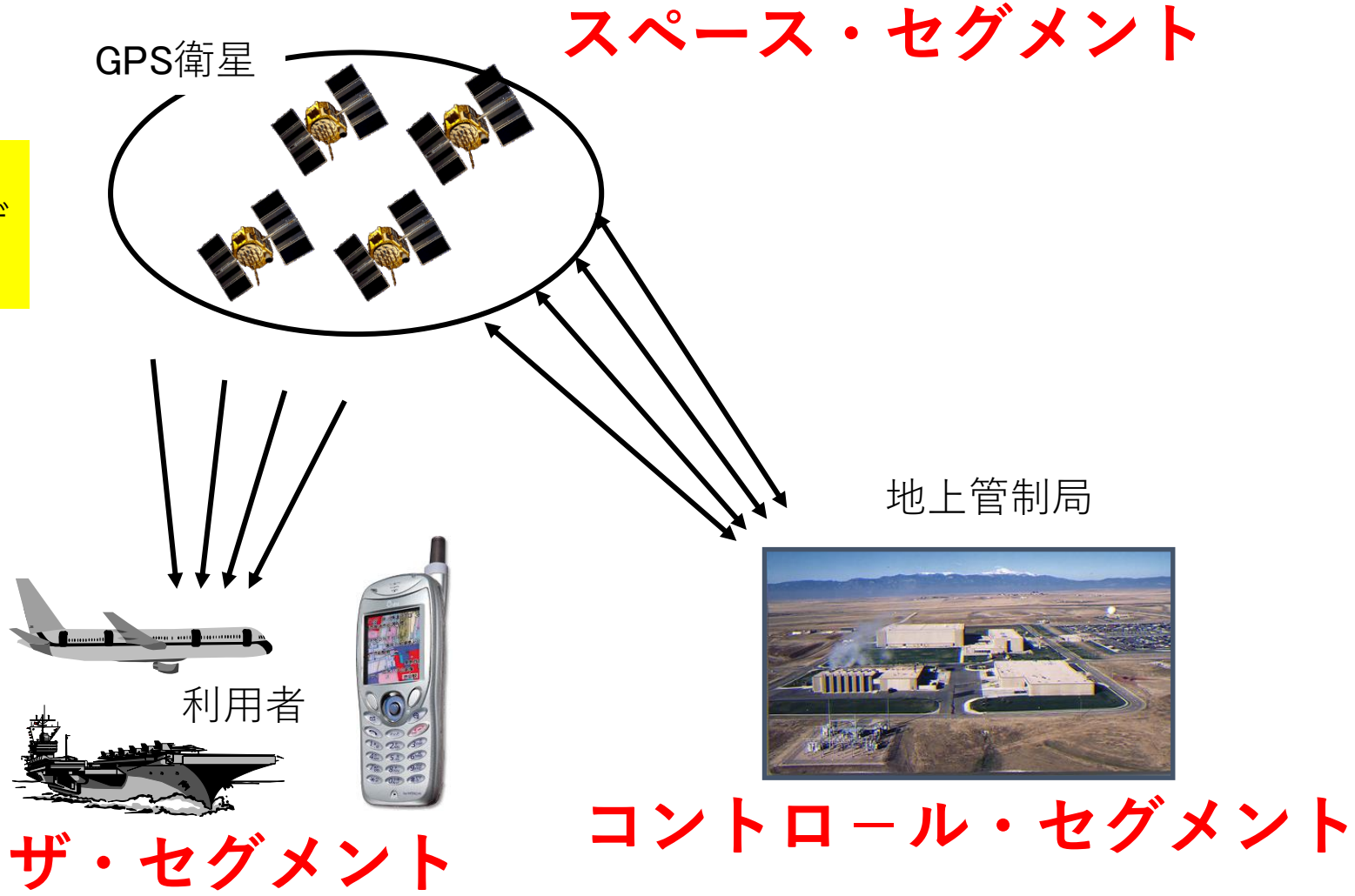
開発年表

- GPS衛星は、1978年にナブスター1が打ち上げられてから、はや40年が経とうとしています。以下の表に世代ごとのGPS衛星をまとめました。現在、31機のGPS衛星が軌道上で運用状態にあり、3世代分のGPS衛星が混在していることがわかります。ブロック2R-Mでは、民生用にL2C帯信号（現在24機で利用可能）が送信されるようになり、ブロック2Fでは、さらにL5帯（現在17機で利用可能）の民生用信号が送信されるようになりました。なお、ブロック2Aは現在は存在しません。現在ブロック3と呼ばれる新しい世代の衛星が打ち上げられています

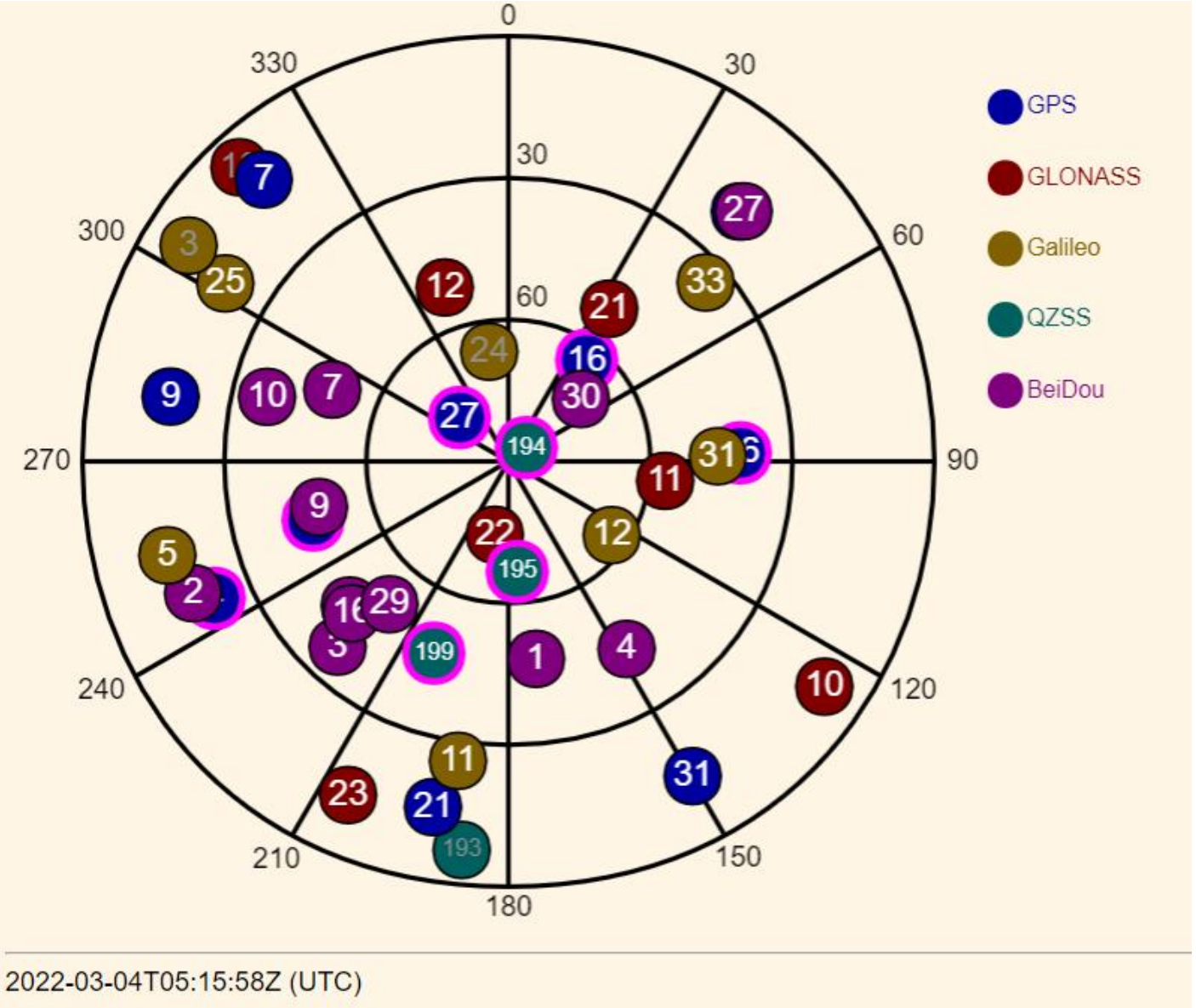
世代	打ち上げ年	総数	設計寿命	現在の運用数
ナブスター1	1978～1985	11機（1機失敗）	5年	0機
ナブスター2	1989～1990	9機	7.5年	0機
ブロック2A	1990～1997	19機	7.5年	0機
ブロック2R	1997～2004	13機（1機失敗）	10年	6機
ブロック2R-M	2005～2009	8機	10年	7機
ブロック2F	2010～2016	12機	15年	12機
ブロック3	2018～	6機	?	6機

衛星測位のシステム

衛星から電波を出している時点で
システムとしての仕事は○。ユーザから衛星への通信はない



GPS→GNSS（Global Navigation Satellite System）



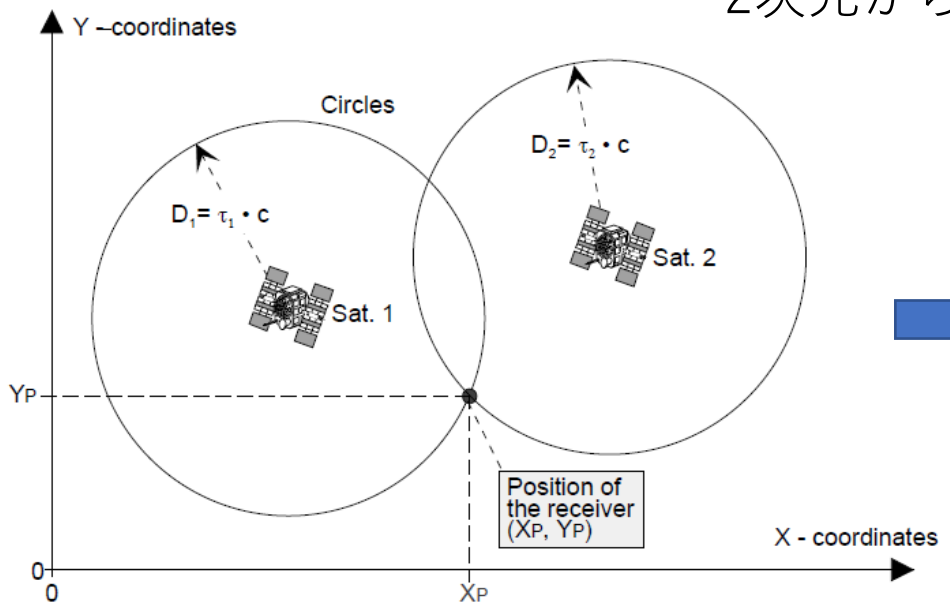
現在はGNSSと呼ばれる。衛星測位は米国だけでなく以下の国々が運用中

運用国	名称	現在の数
米国	GPS	31
ロシア	GLONASS	22
欧州	GALILEO	21
中国	BDS	44
日本	QZSS	4
インド	NAVIC	7

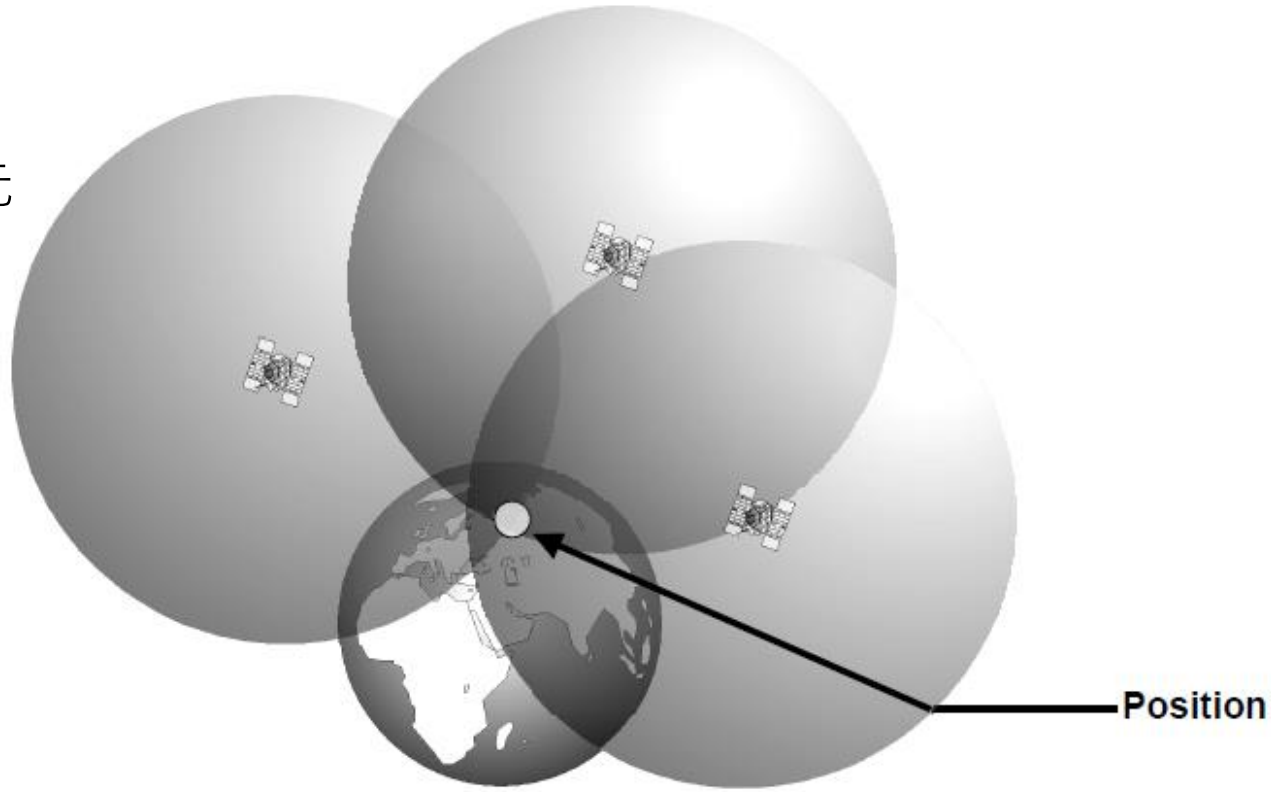
2022年2月

位置を決める原理

- 三辺測量

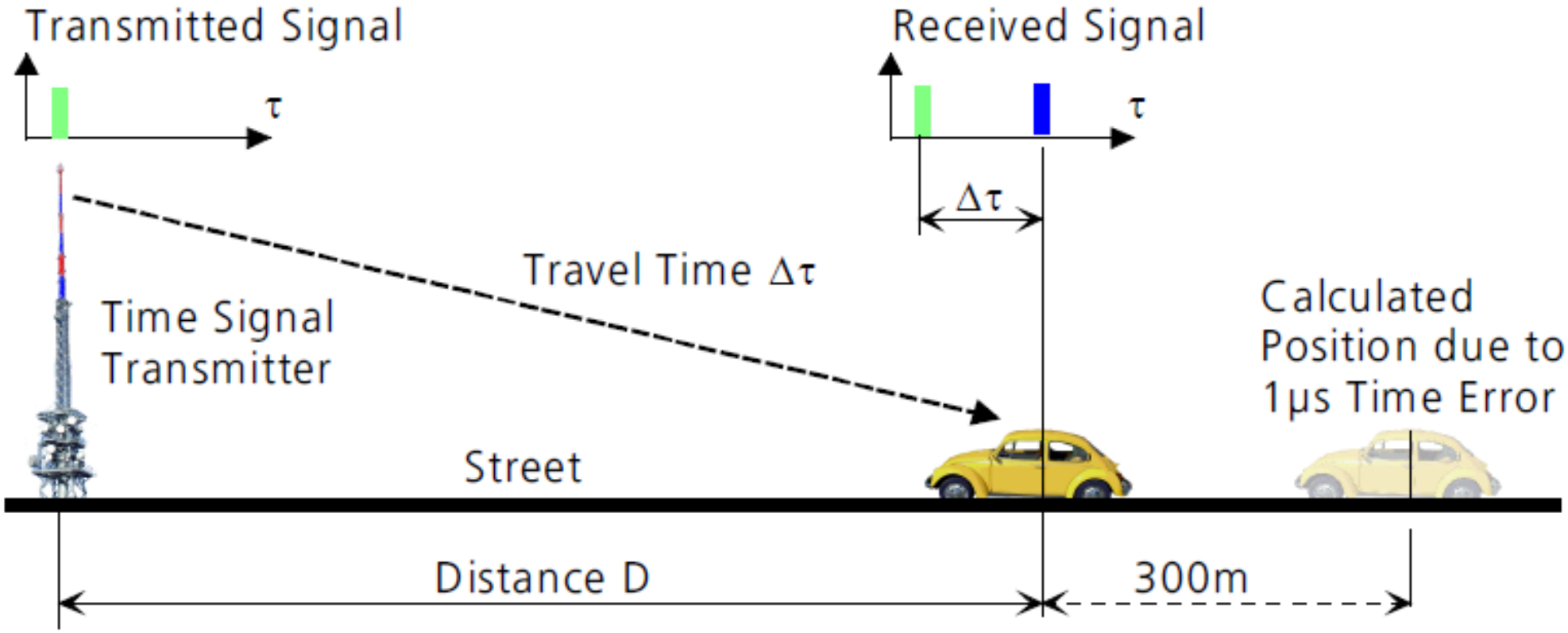


2次元から3次元



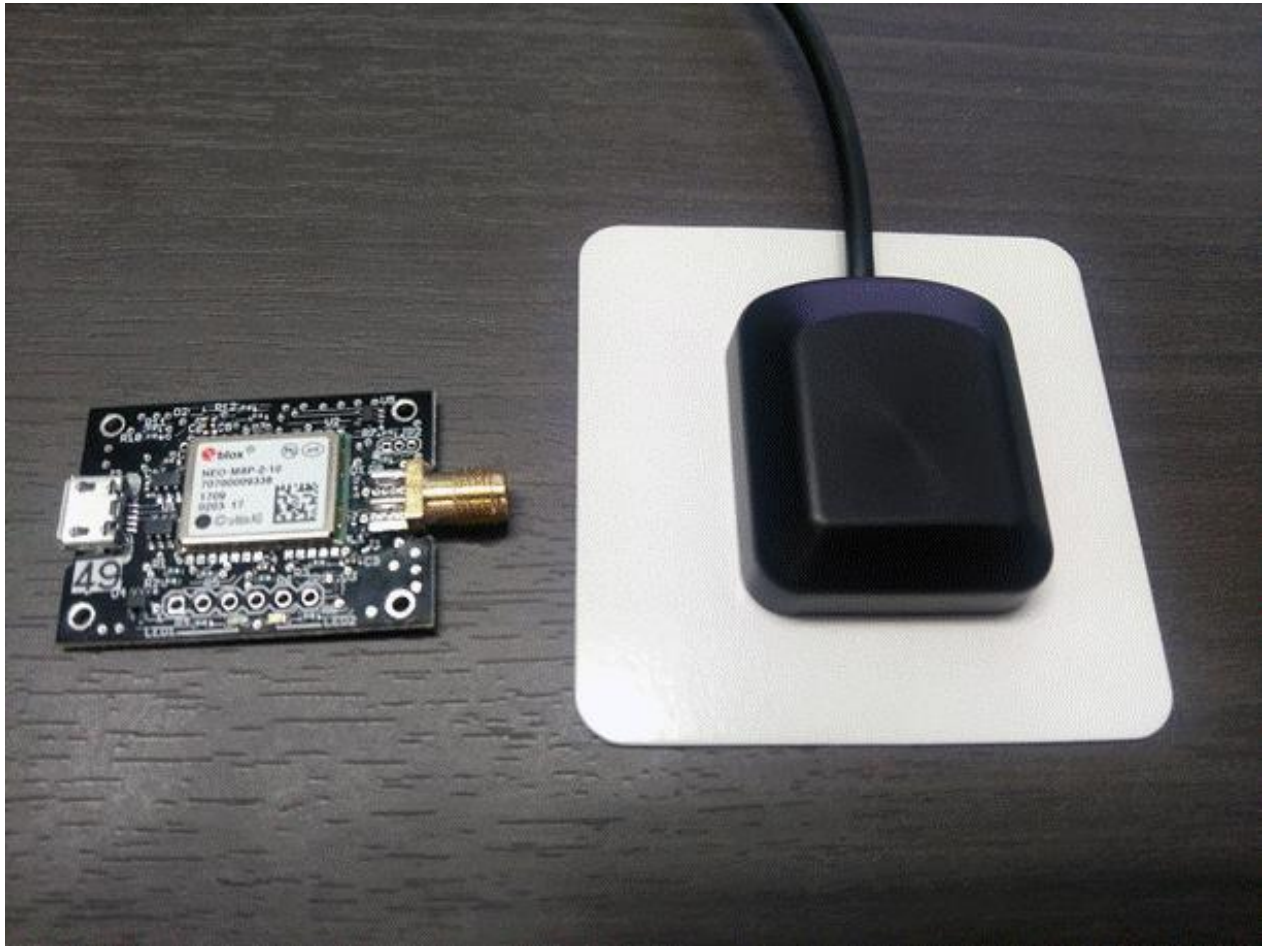
衛星測位の場合、距離は光速×伝搬時間で計算
光速はとても速い。衛星位置は衛星自身が放送

光速×伝搬時間＝距離



光速は1μ秒で約300m進む。24時間365日、1μ秒で同期できる時計はあるか？

衛星測位ユーザに必要なもの



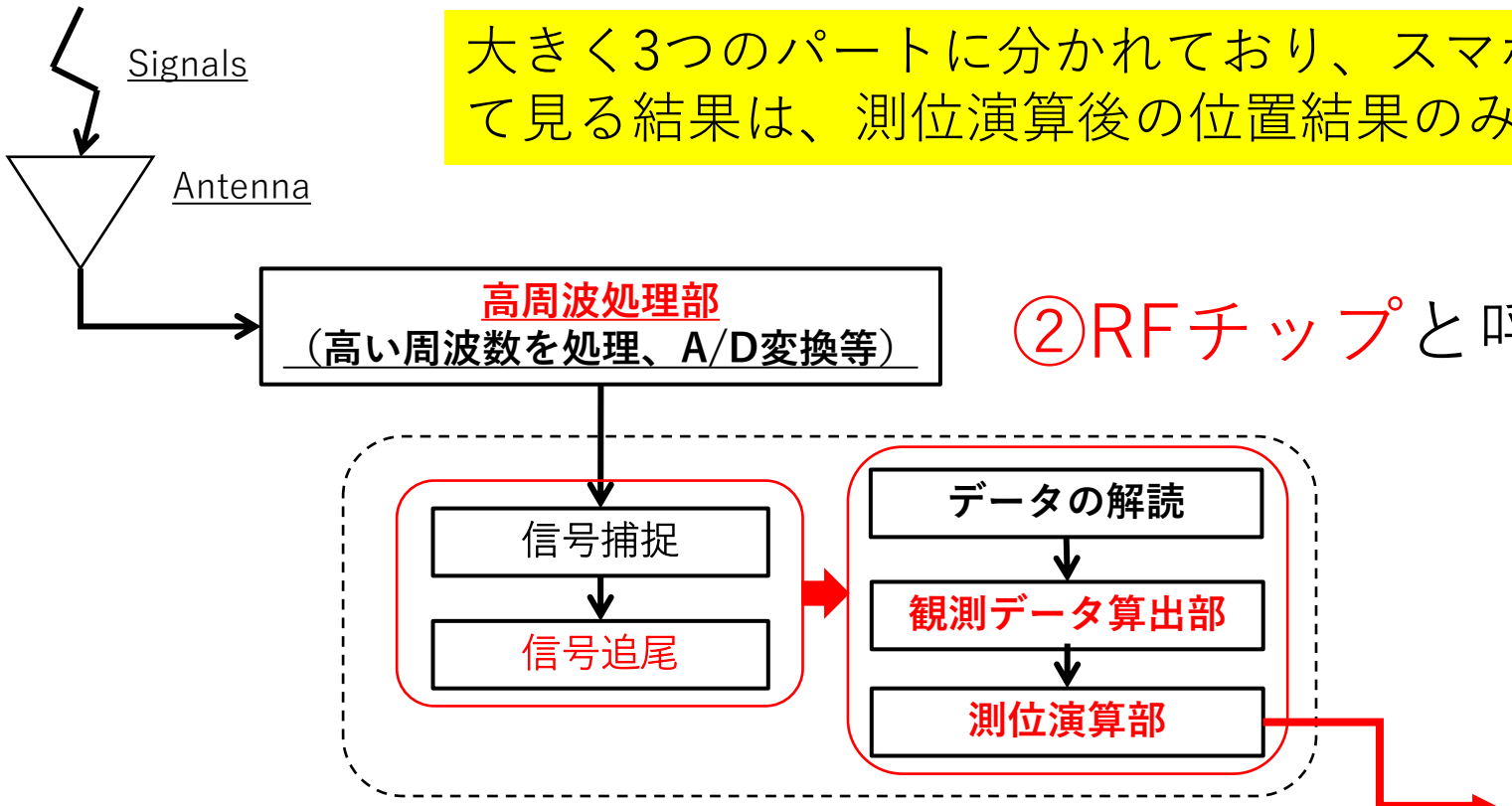
アンテナと受信機（チップ）、電源が必要。もし緯度、経度情報を利用したい場合は、取り出す機器（PC等）。スマホに全部含まれている

左の写真の受信機（チップ）は評価キットと呼ばれるもので、USBでデータを取得できる。研究開発用で使われる（1つで2～3万）。

受信機の中の機能分け

①アンテナ部

大きく3つのパートに分かれており、スマホを利用して見る結果は、測位演算後の位置結果のみです

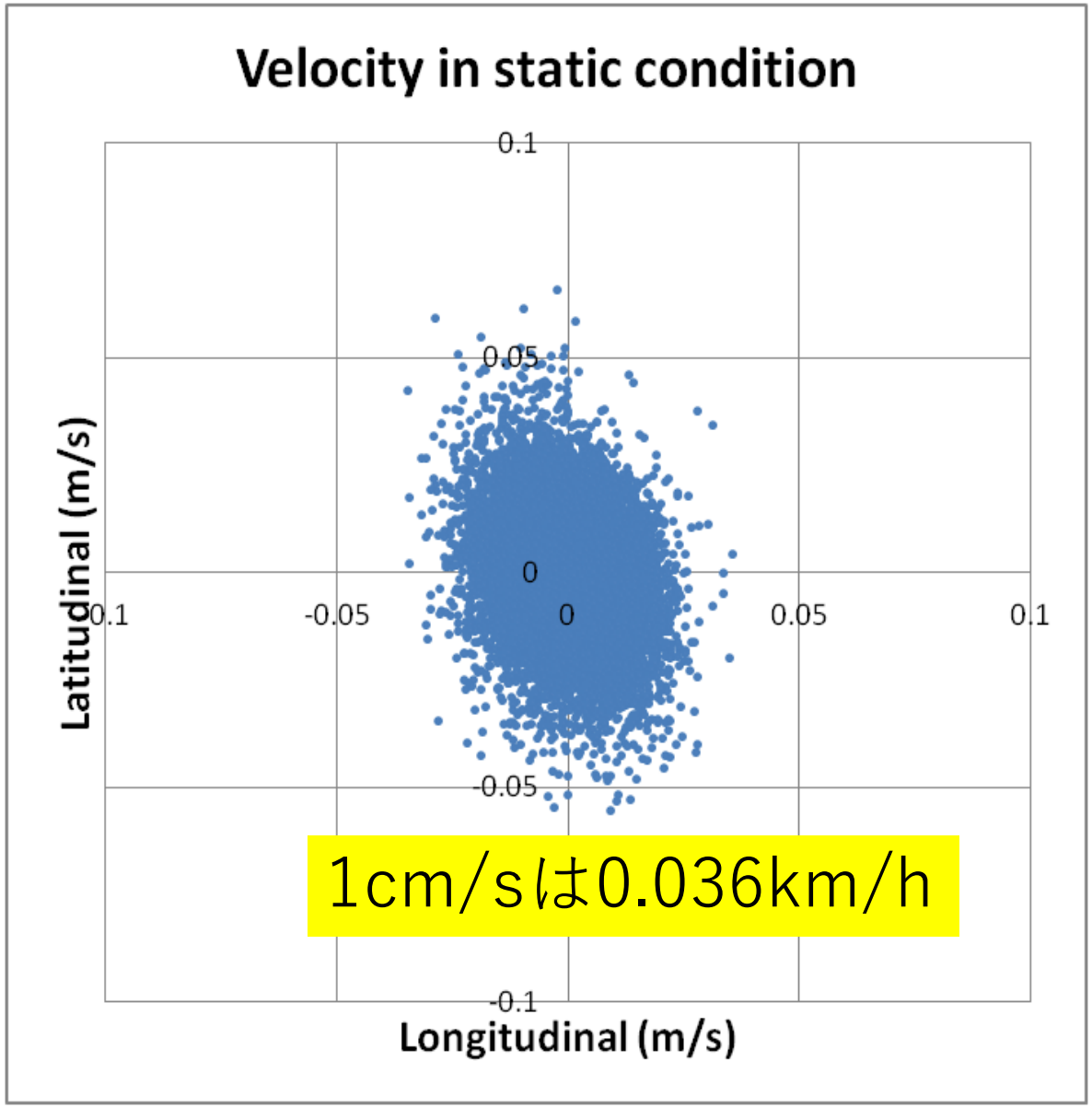


②RFチップと呼ばれる

緯度、経度の位置情報

③ベースバンドと呼ばれる

GNSSによる速度情報（とても正確）



- 左は$100くらいのGNSS受信機による速度結果
- 水平方向の標準偏差は1-2cm/s
- 静止実験なので、真値は0cm/s
- 開けた屋外であればこの精度がどんな速度でも3次元で出せる
- 例えば速度成分だけ積分しても10分程度で2-3mしかずれない
- 2cmのアンテナと1cmのチップでこの精度がでるセンサーはない

車のスピードメータとGNSSのスピードはどちらが正しい?

237km/h

【シビック TYPE R】CIVIC TYPE R Limited Edition　鈴鹿アタック　Vol.1
走行テスト　車載動画

干渉や欺瞞信号に弱い

GNSS信号のポイントと課題

信号が微弱

- 2万km彼方に100Wの電球があるのと同じレベル。
- 同じ周波数で強力な電波があったらとても受信できない。

信号の形式・内容が公知

- 技術力さえあれば、誰でもGNSS受信機をつくれる。
- 技術力さえあれば、誰でもGNSS信号をつくれる。

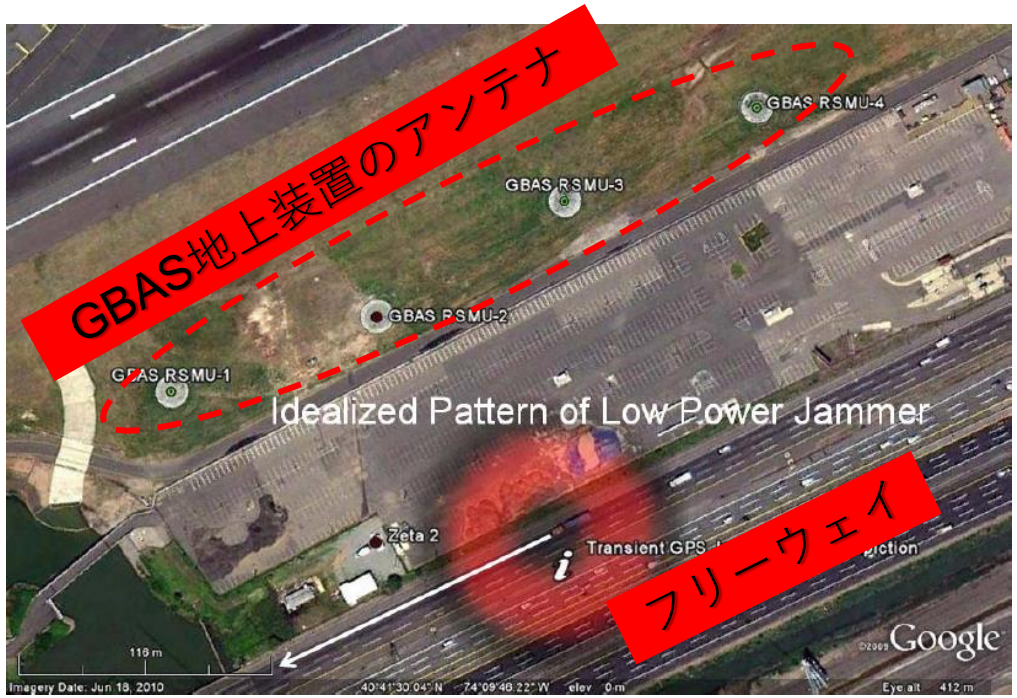
正当な信号か検証する仕組みがない

- GNSS信号は、暗号化はされておらず、認証情報もない。
- 第三者が生成した信号を、正当な信号と区別できない。

ジャミングの例

- **GNSSを妨害するのは難しくない**
  - ➢米国ではPDD（Personal Privacy Device）と称して販売されていた（当時は合法）
    - ◆トラック運転手等が運行実績を会社に知られないため
  - ➢GBAS（GPSによる航空機着陸誘導システム）地上装置の誤動作の原因と判明
  - ➢現在は規制対象。しかし、容易に妨害できる状況には変わりない

市販PDDの例



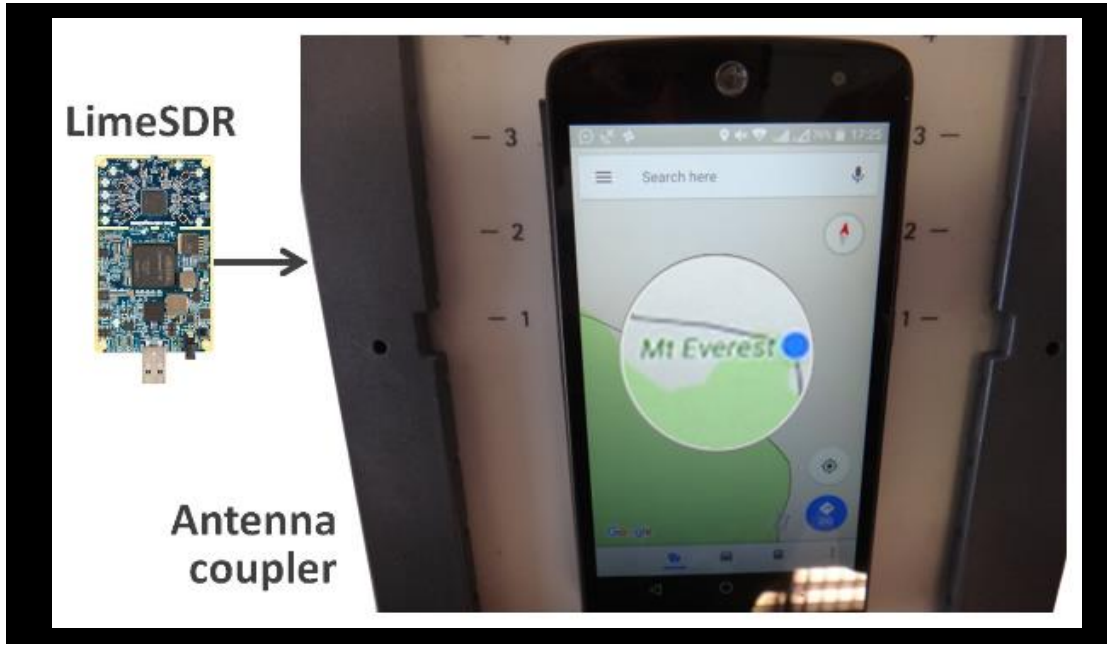
ニューアーク空港（ニュージャージー州）の状況

問題点

- 電波干渉やジャミングを検知しても、発信源を特定するのが困難。
- 自動車のように移動する場合はさらに難しい。

GPSのセキュリティ：意図的な場合

- **意図的なもの：スプーフィング（なりすまし）**
  - GPS信号を独自に生成して送信するもの。
    - *微弱な電波でもGPSを妨害できる。本物のGPS信号と区別できない。*
    - *最近は、ソフトウェア無線技術の進展により安価に実行できるようになってきた。*
  - 症状：GPSにより測定される位置が大きくずれる。
    - *攻撃者の意図する位置を算出させることが可能。*



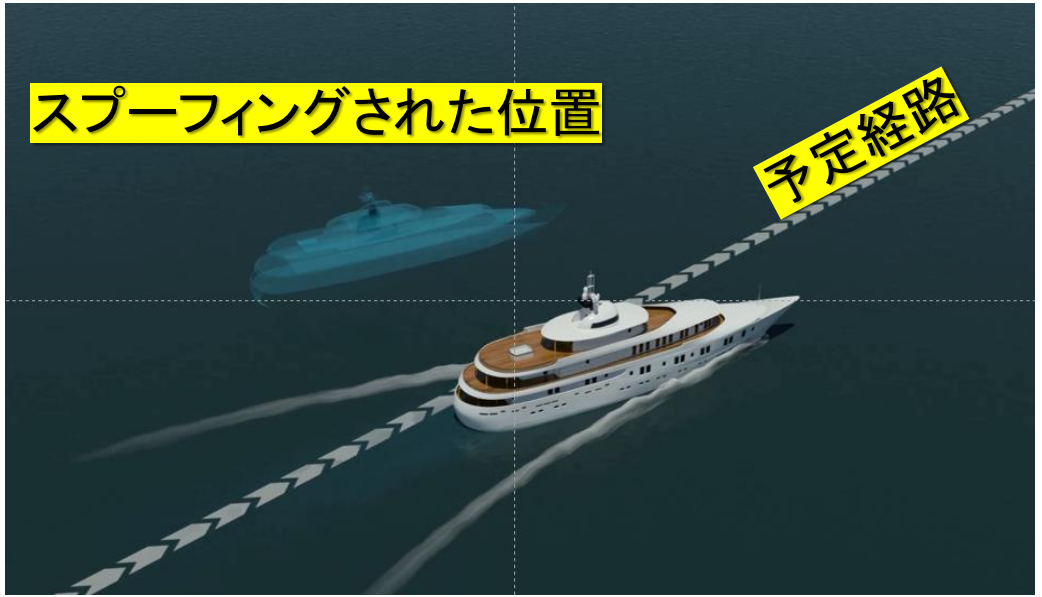
エベレスト？

（Septentrio社HP）

船舶を乗っ取った実験例

（Todd Humphreys, Secure PNT for Autonomous Systems, Stanford PNT Challenges and Opportunities Symposium, Nov. 2013）

スプーフィング
送信機



邪魔をする方法とその対策

邪魔をする方法

- ジャミング（干渉妨害）
- ミーコニング（GPS信号はそのままで多少加工）
- スプーフィング（なりすまし）
- 位置情報の偽装

対策方法

- GNSS信号の暗号化（ミーコニングに対して困難）
- 指向性アンテナの利用
- センサフュージョン（ハイブリッド航法）
- GNSS以外のバックアップを確保
- 受信機ネットワーク

スマホでcm級測位ができる時代

スマホでcm級測位ができるのか？

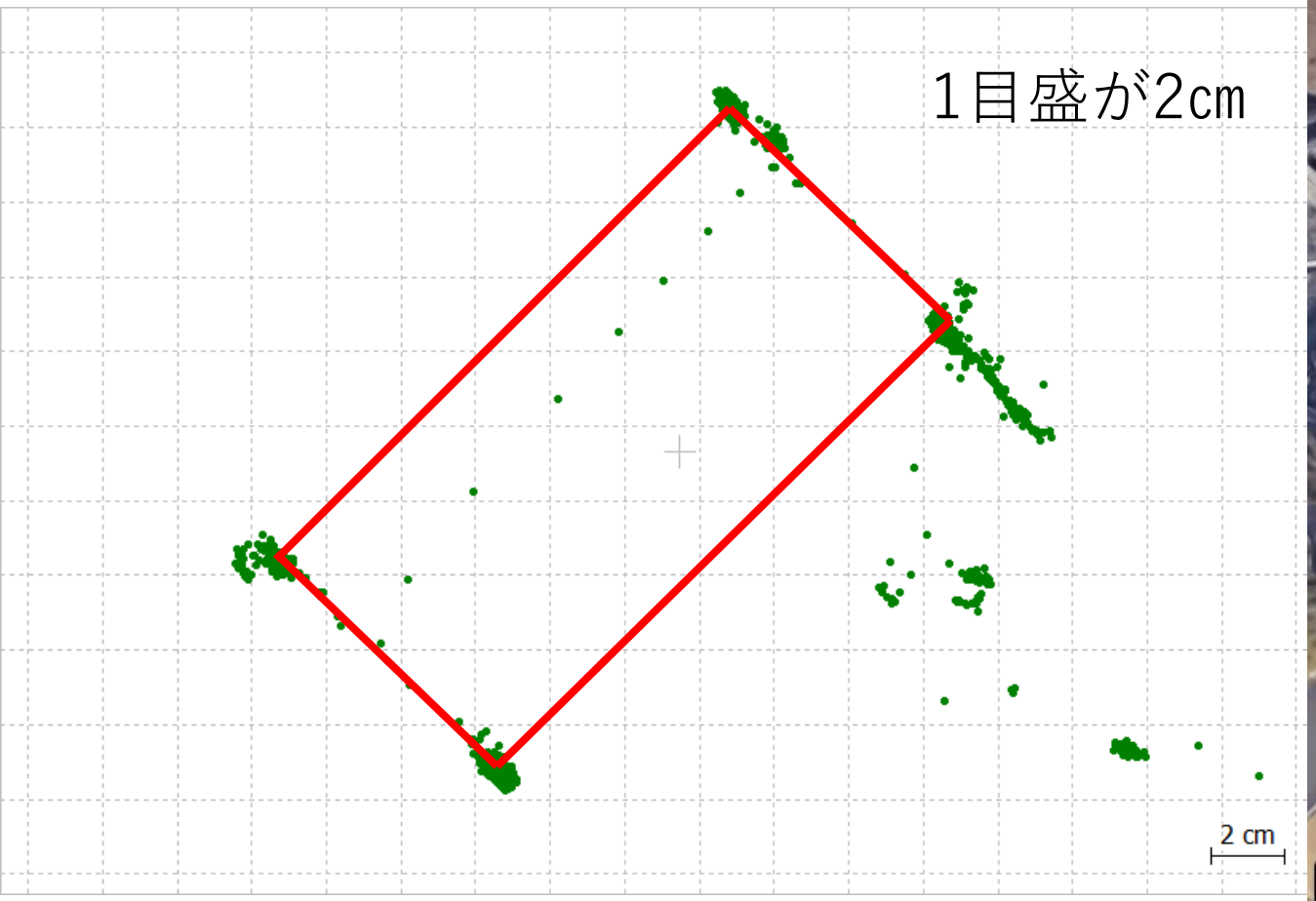
スマホの形をマジックでうつす

RTKのできる受信機で4隅を測量

スマホを設置し、データを収集

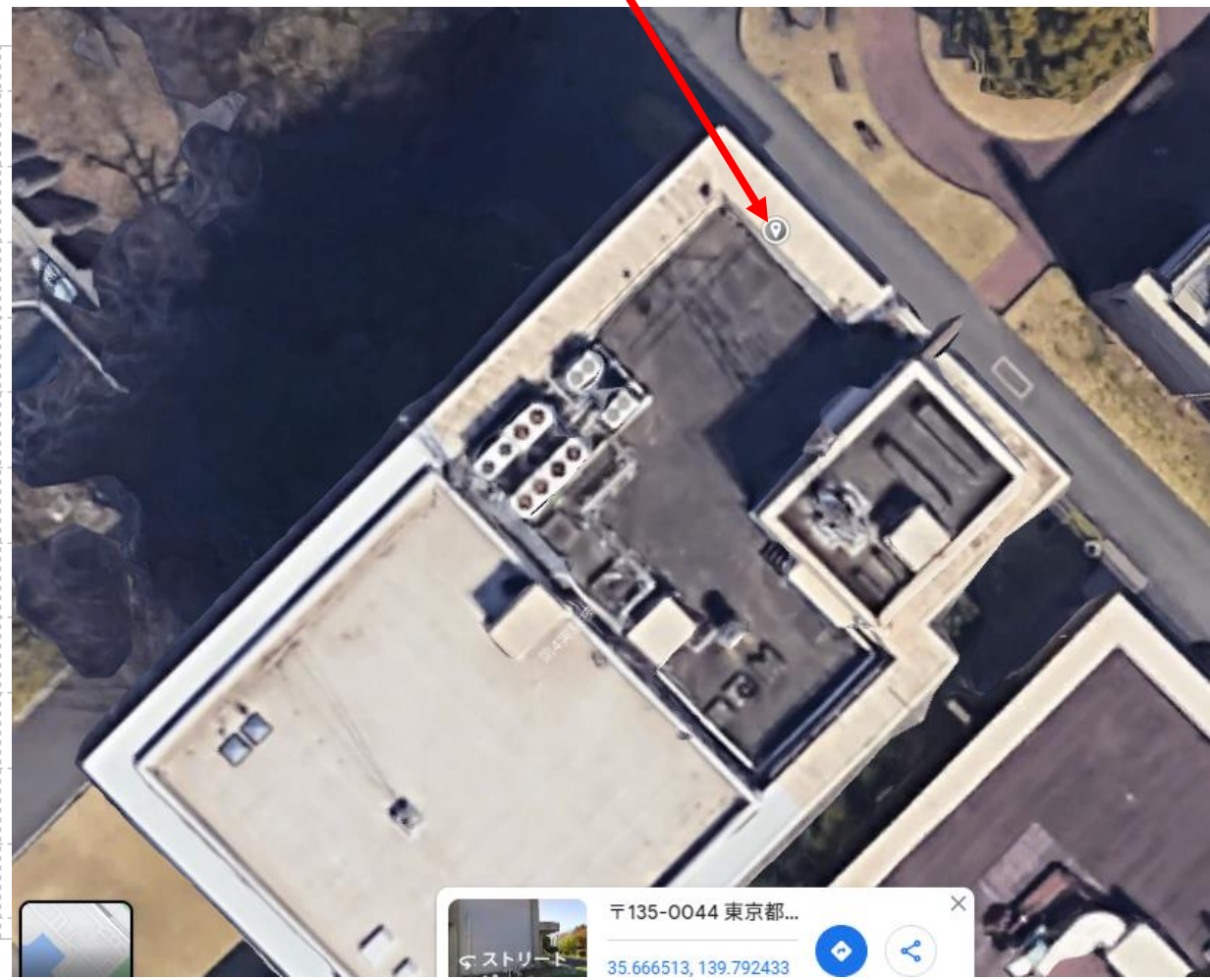
立てた状態でどうなるか

4隅の測量結果

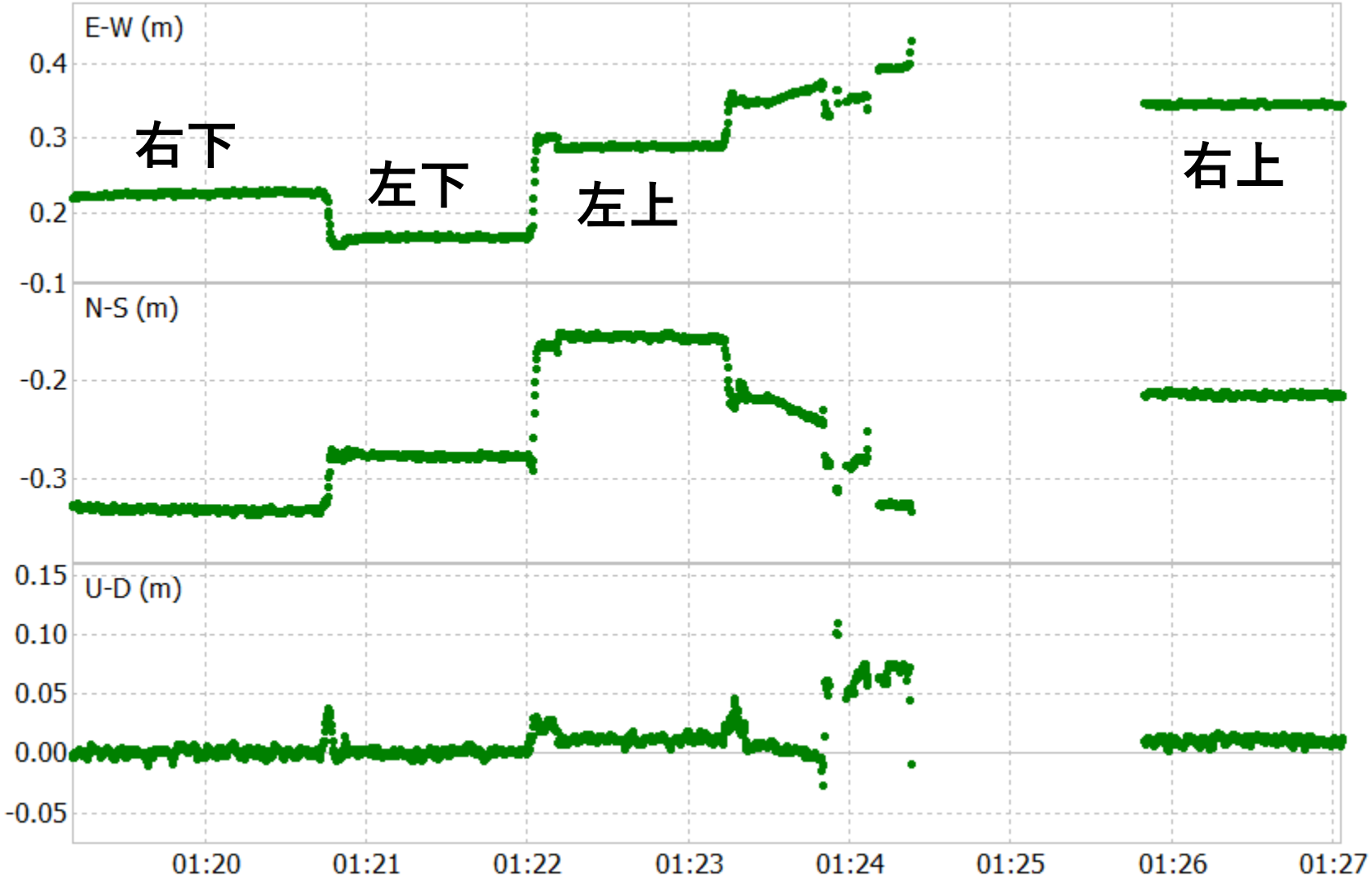


これがスマホの形

このあたりに設置



時系列でみるとこのような感じ

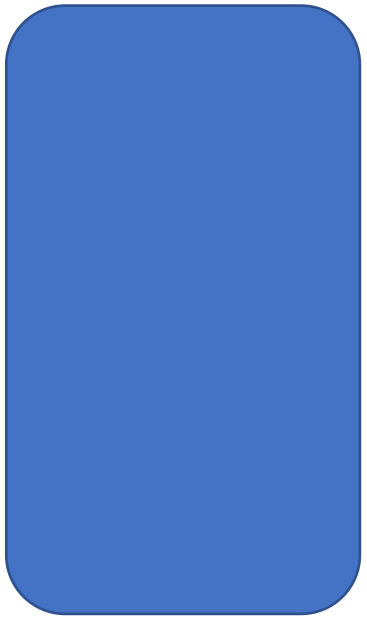


四隅での平均値
をとります
（各1分程度です）

4隅のポイントと高さ

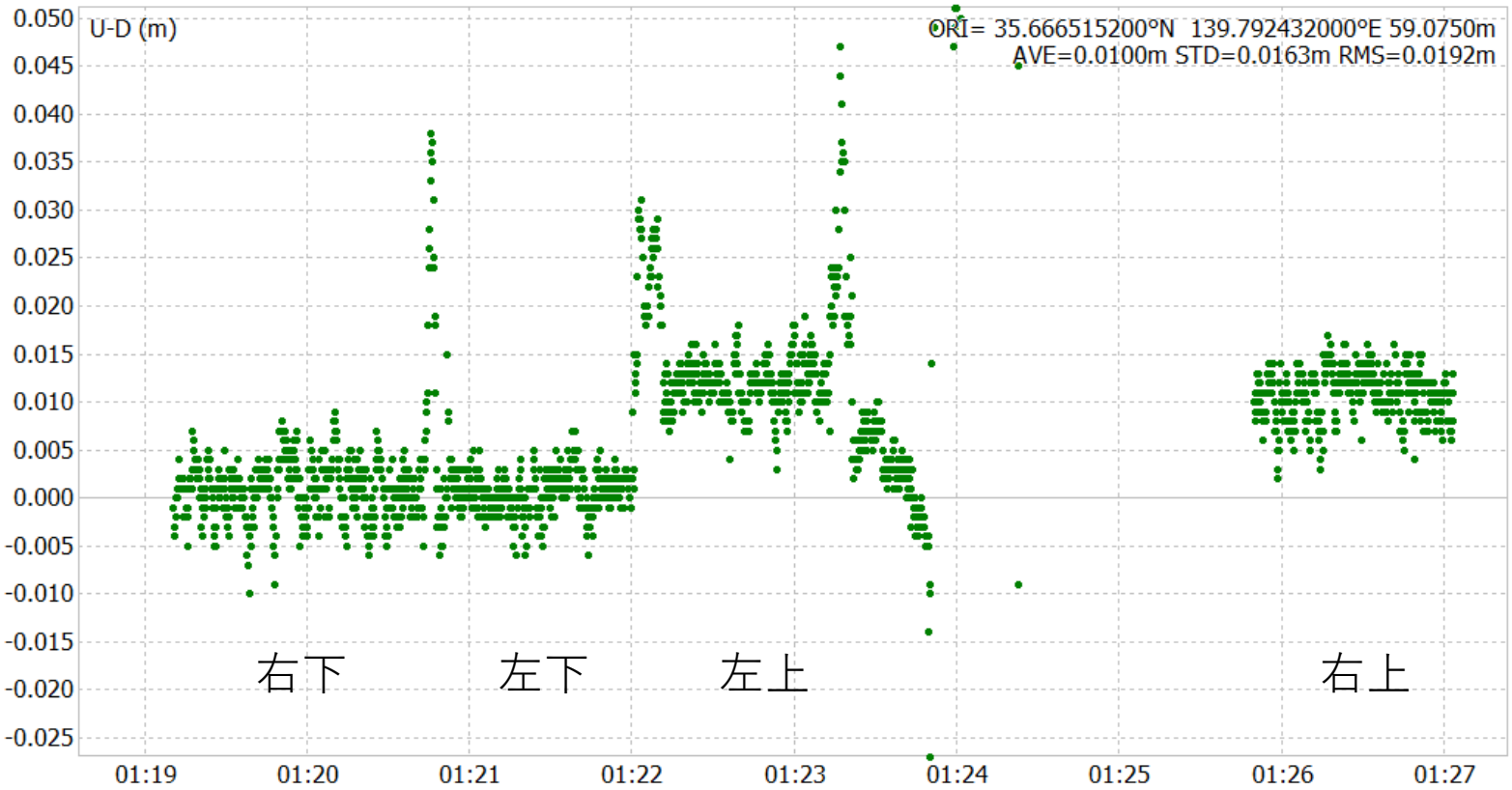
35.6665138
139.7924352

35.6665133
139.7924385



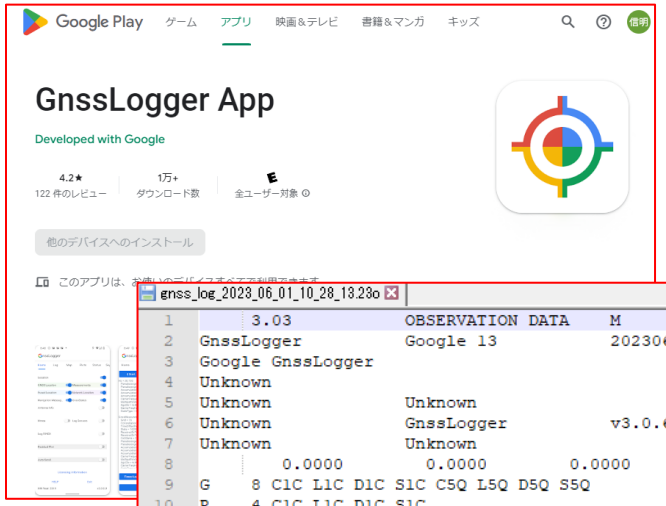
35.6665127
139.7924339

35.6665152
139.7924345



こちらが時系列の高さ。右上の59.075mを基準
右下→左下→左上→右上の順番なので、上のほうが
1cm程度ですが高いことがわかります。たしかに
設置した場所は少し傾いていました

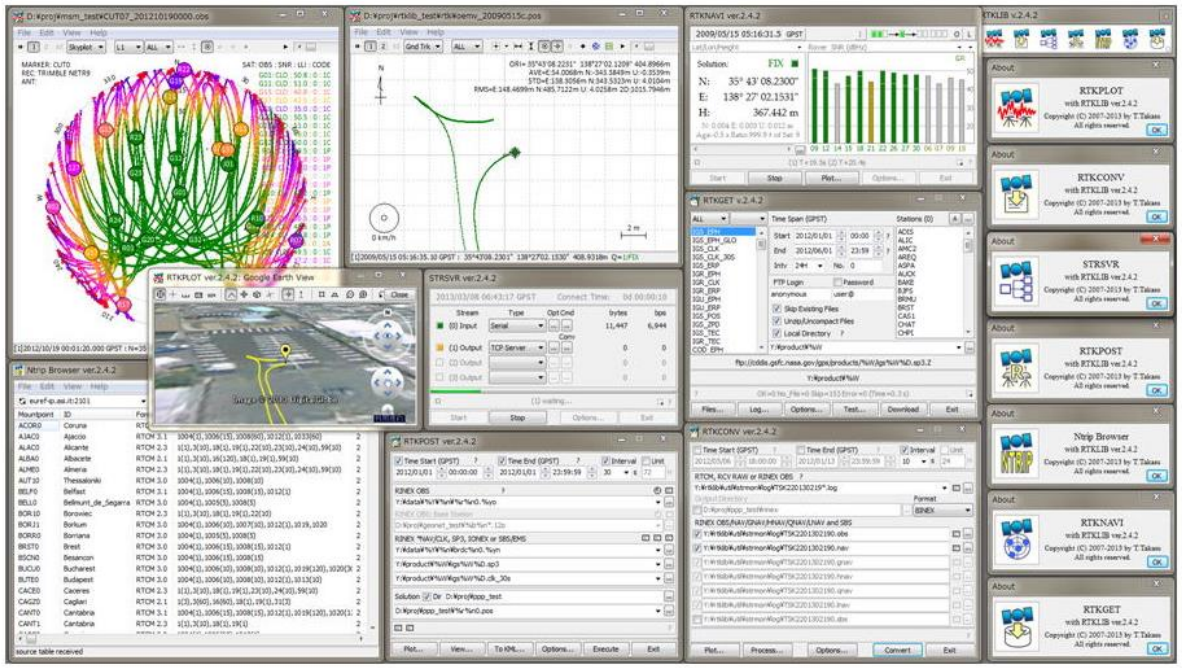
スマホのデータでcm級測位はできるか？



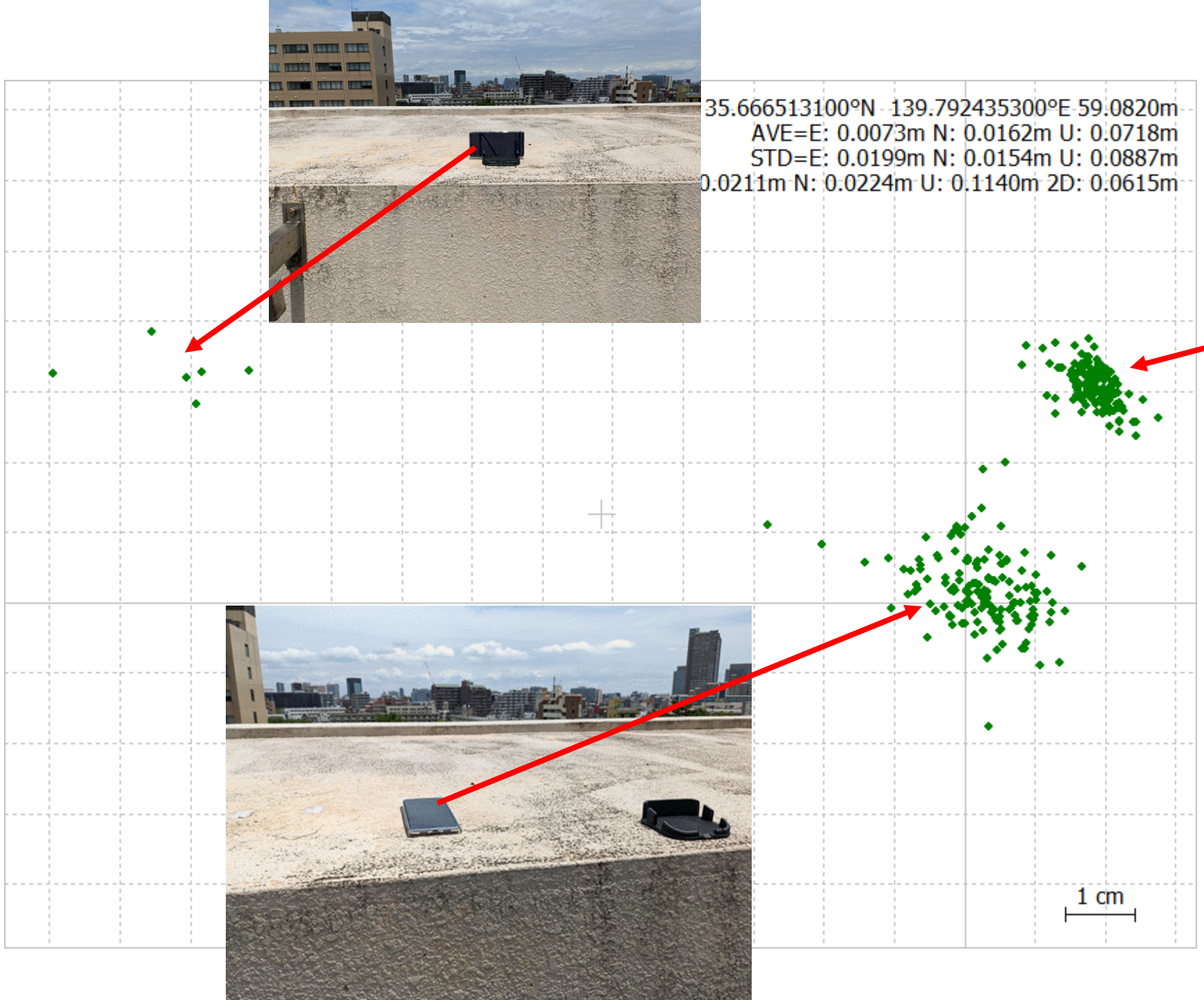
gnss_log_2023_06_01_10_28_13.23o

```
     3.03           OBSERVATION DATA    M                   RINEX VERSION / TYPE
GnssLogger          Google 13           20230601 012837 UTC PGM / RUN BY / DATE
Google GnssLogger                                           MARKER NAME
Unknown                                                     MARKER NUMBER
Unknown             Unknown                                 OBSERVER / AGENCY
Unknown             GnssLogger          v3.0.6.2            REC # / TYPE / VERS
Unknown             Unknown                                 ANT # / TYPE
        0.0000        0.0000        0.0000                  ANTENNA: DELTA H/E/N
G    8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q                      SYS / # / OBS TYPES
R    4 C1C L1C D1C S1C                                      SYS / # / OBS TYPES
J    8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q                      SYS / # / OBS TYPES
C    8 C2I L2I D2I S2I C7Q L7Q D7Q S7Q                      SYS / # / OBS TYPES
E    8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q                      SYS / # / OBS TYPES
  2023     06     01     01     28    37.0000000     GPS    TIME OF FIRST OBS
 5 R11   0 R12 -1 R13 -2 R22 -3 R23   3                     GLONASS SLOT / FRQ #
G L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
G L5Q   0.00000                                             SYS / PHASE SHIFT
R L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
J L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
J L5Q   0.00000                                             SYS / PHASE SHIFT
C L2I                                                       SYS / PHASE SHIFT
C L7Q   0.00000                                             SYS / PHASE SHIFT
E L1C   0.00000                                             SYS / PHASE SHIFT
E L5Q   0.00000                                             SYS / PHASE SHIFT
 C1C     0.000 C1P     0.000 C2C     0.000 C2P     0.000    GLONASS COD/PHS/BIS
                                                            END OF HEADER
> 2023 06 01 01 28 37.4075406  0 9
G01  19967059.39206      -583.07806       116.23906        36.07706
G02  21560215.27405     12457.99405     -2572.75605        34.31705
G07  22599664.67806     13565.13106     -2804.50806        35.68606
G08  21627926.69805     10743.71305     -2217.24505        32.75205
G14  22681596.75706    -10987.23306      2368.45206        37.49506
G21  20638312.09405     10714.77205     -2276.38305        32.64505
G30  22909752.00906      6944.83406     -1424.41306        39.10206
J02  37622419.74105      -126.49005        25.69805        30.23205
J03  38336170.42105      6198.99205     -1280.82605        32.71405
```

これが収集したデータです

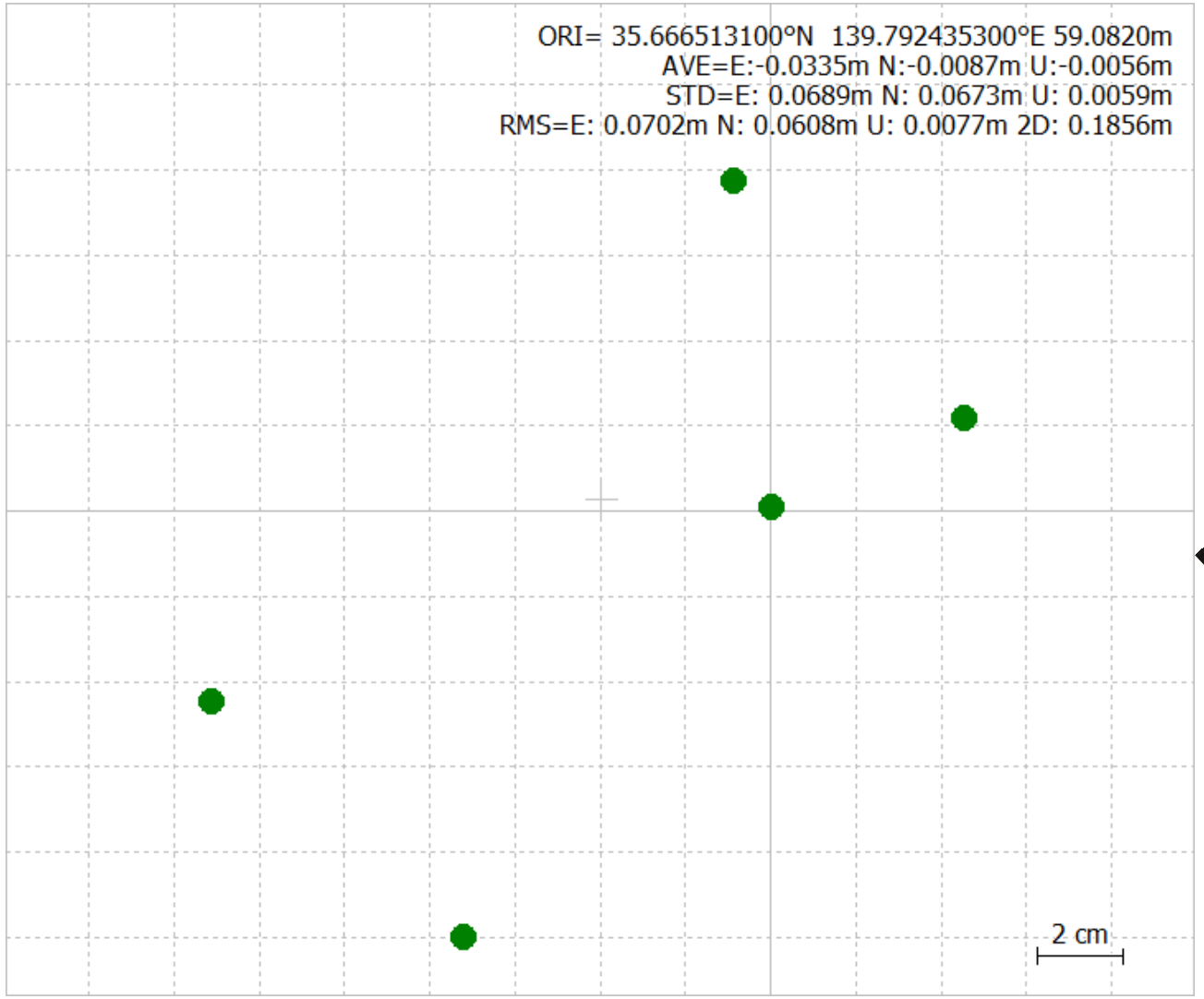


RTKLIBと呼ばれるとてもよくできた
フリーソフトでみなさんもcm級測位を試せます
（正確には左のデータと基準局での同様のデータが
必要です。基準局データはこちらの研究室でも
公開しています）

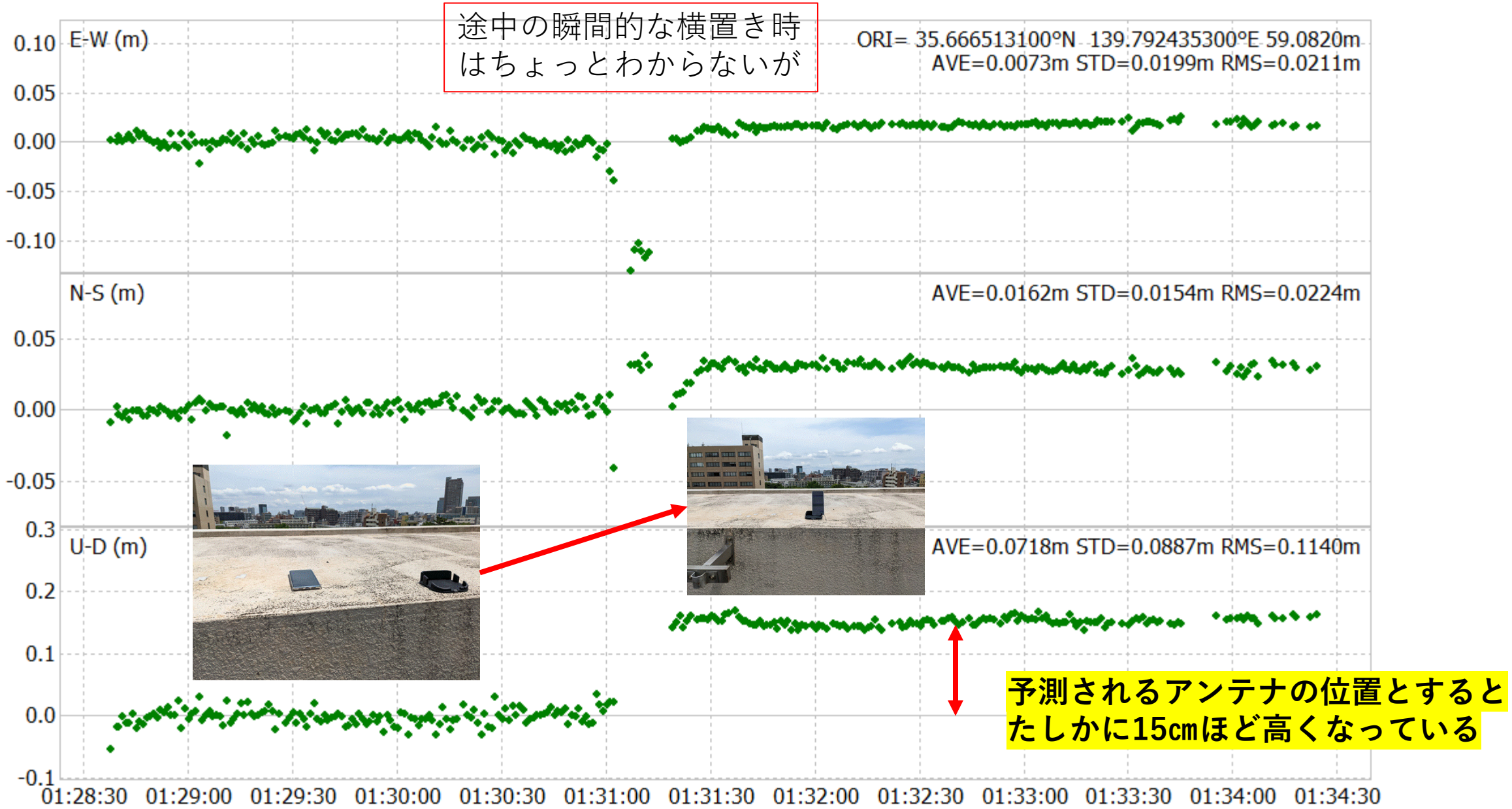


立てたほうがやや
ノイズが小さい

予想されるこのスマホのGNSS用アンテナ位置



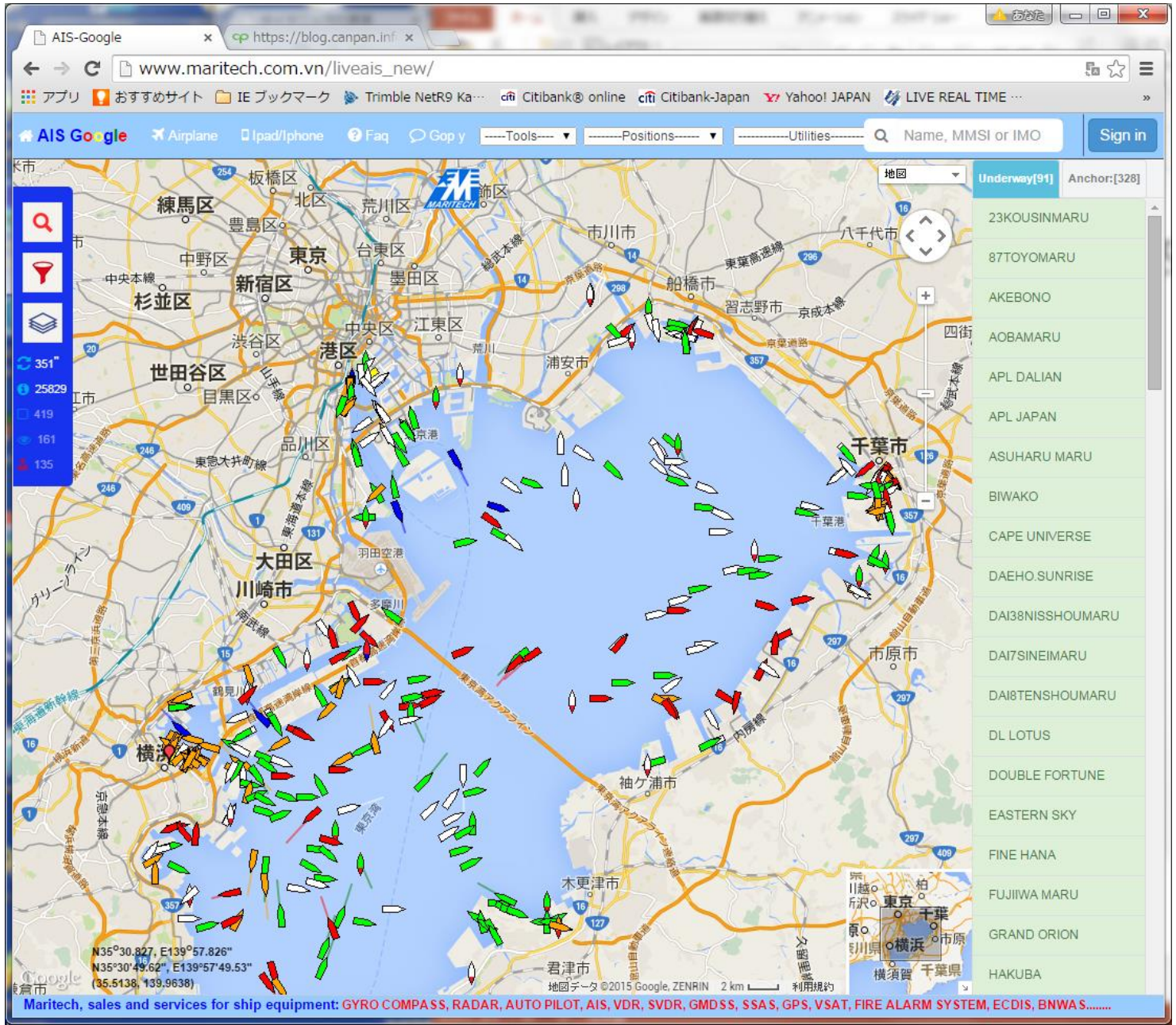
時系列の結果



予測されるアンテナの位置とすると
たしかに15cmほど高くなっている

様々な位置アプリケーション

AIS（船舶自動識別装置）

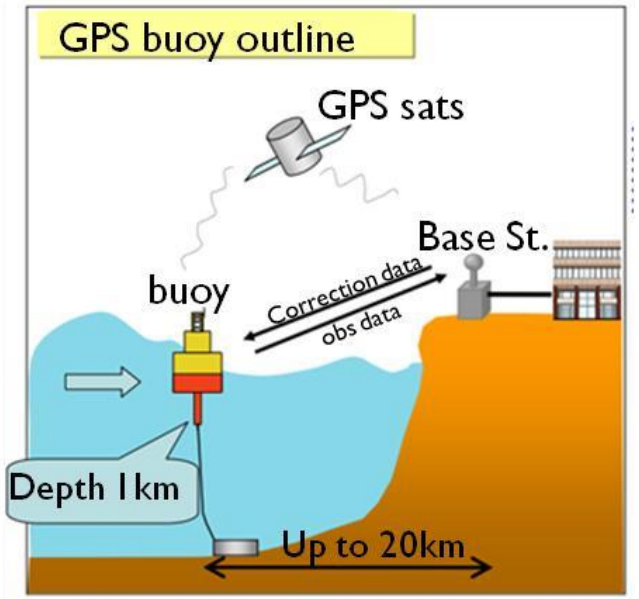


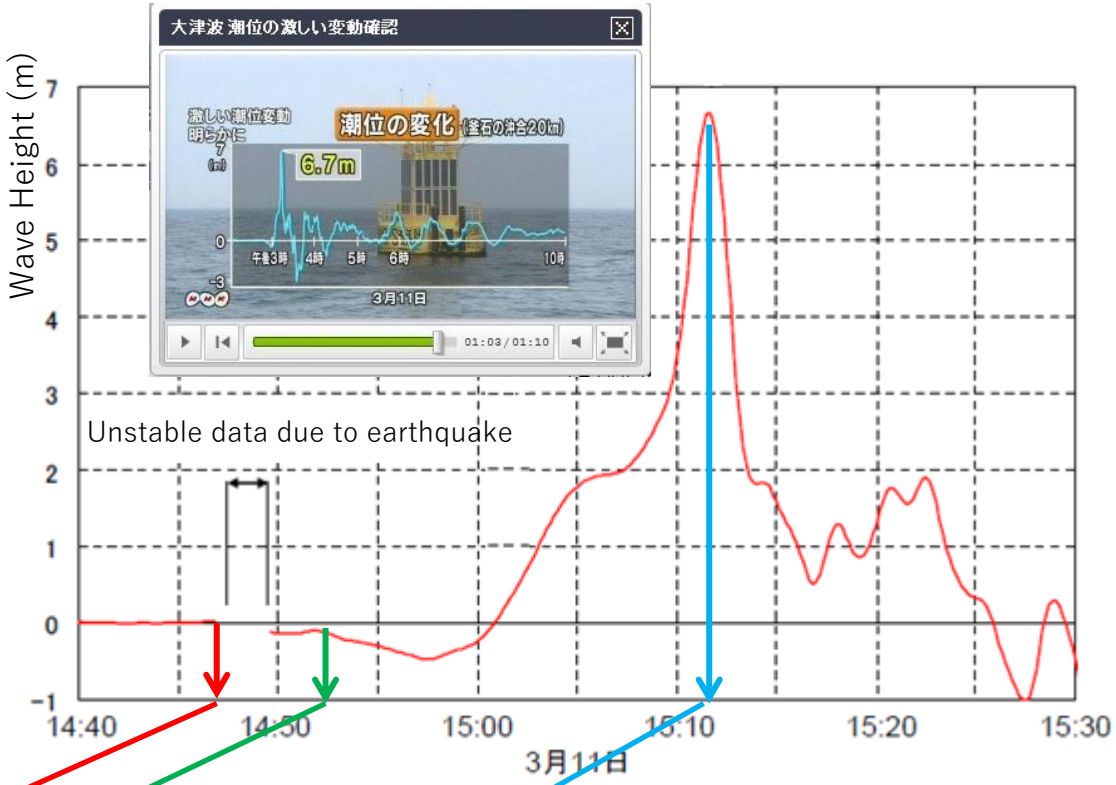
位置と通信を利用

ビックデータとしての可能性
世界中の船舶動向把握
船舶の安全向上
船舶のセキュリティ向上
（海賊対策?）

最近は飛行機のデータもある

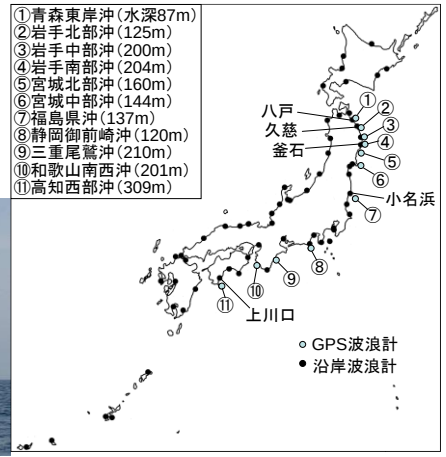
GNSS津波探知





- South *Iwate* buoy
  - 10km offshore
  - Depth 200m

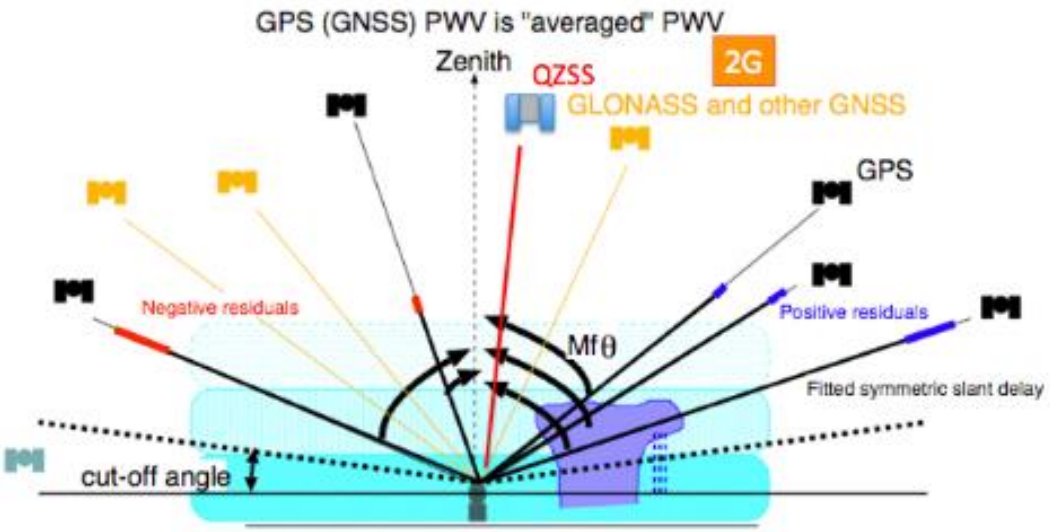
- 14：46　Earthquake
- 14：53　First detected Tsunami motion
- 15：12　Tip of Tsunami wave



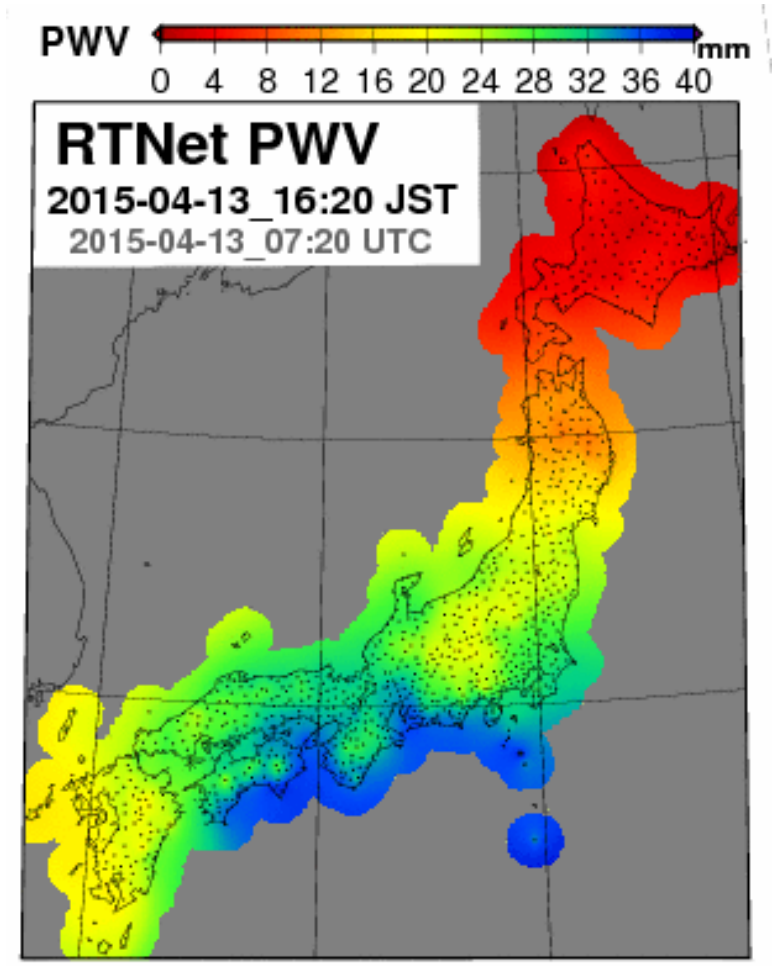
by Port and Airport Research Institute

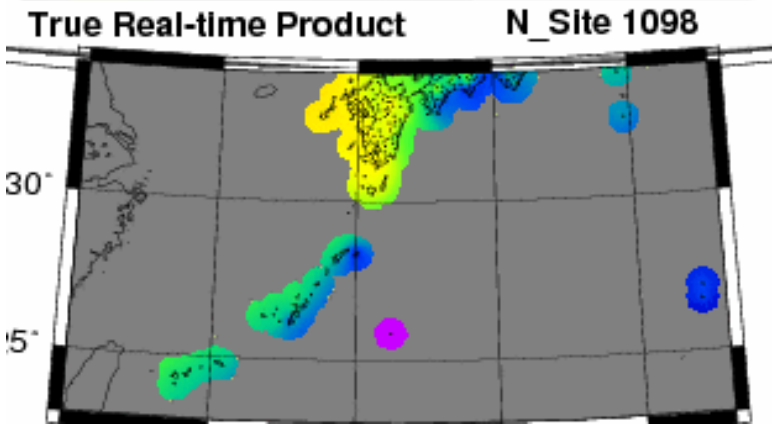
GNSS気象学（水蒸気量の推定）

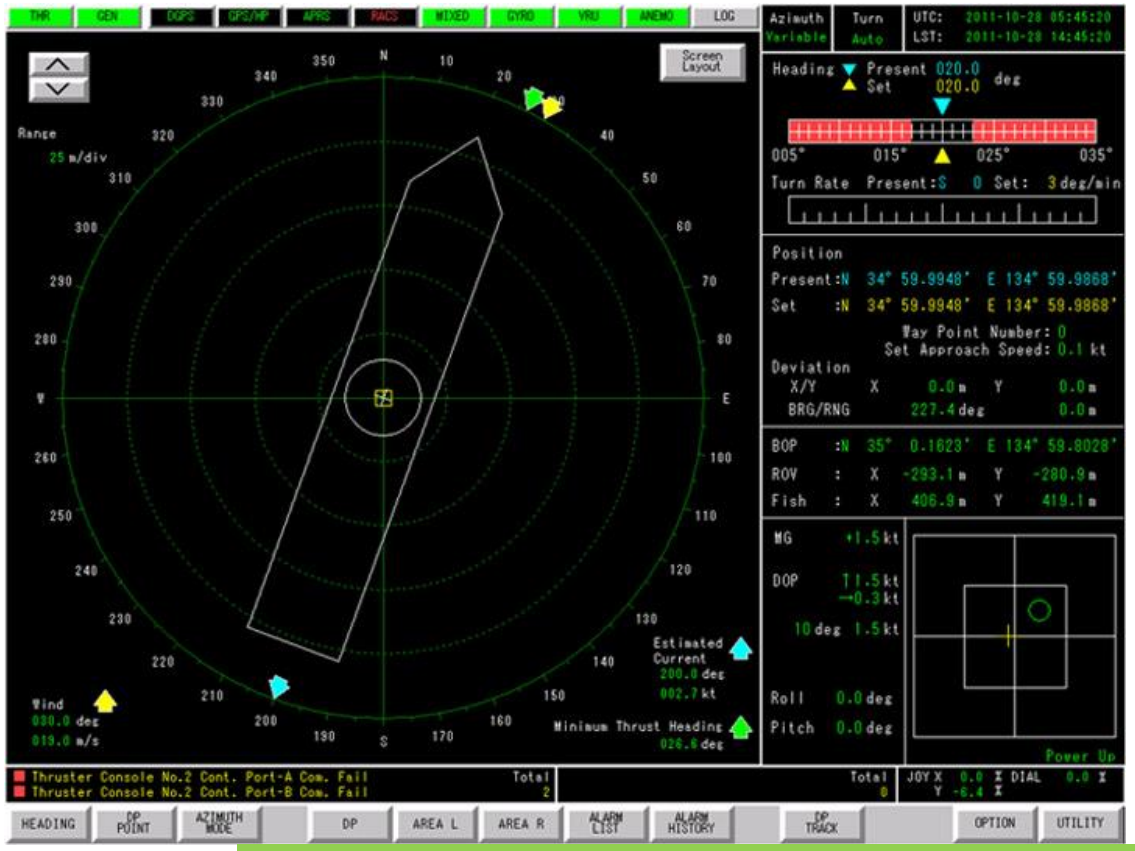
- GNSS測量において，大気遅延を精度良く推定できれば，その情報を気象学に利用できる．現在，GNSS解析で推定される大気遅延は，その気圧に依存する成分を取り除き水蒸気に起因する遅延量に変換された後「可降水量」に変換され，日本をはじめ，世界の主要な気象研究機関で，数値予報の初期場の作成に利用され，降水の予報精度向上に寄与している

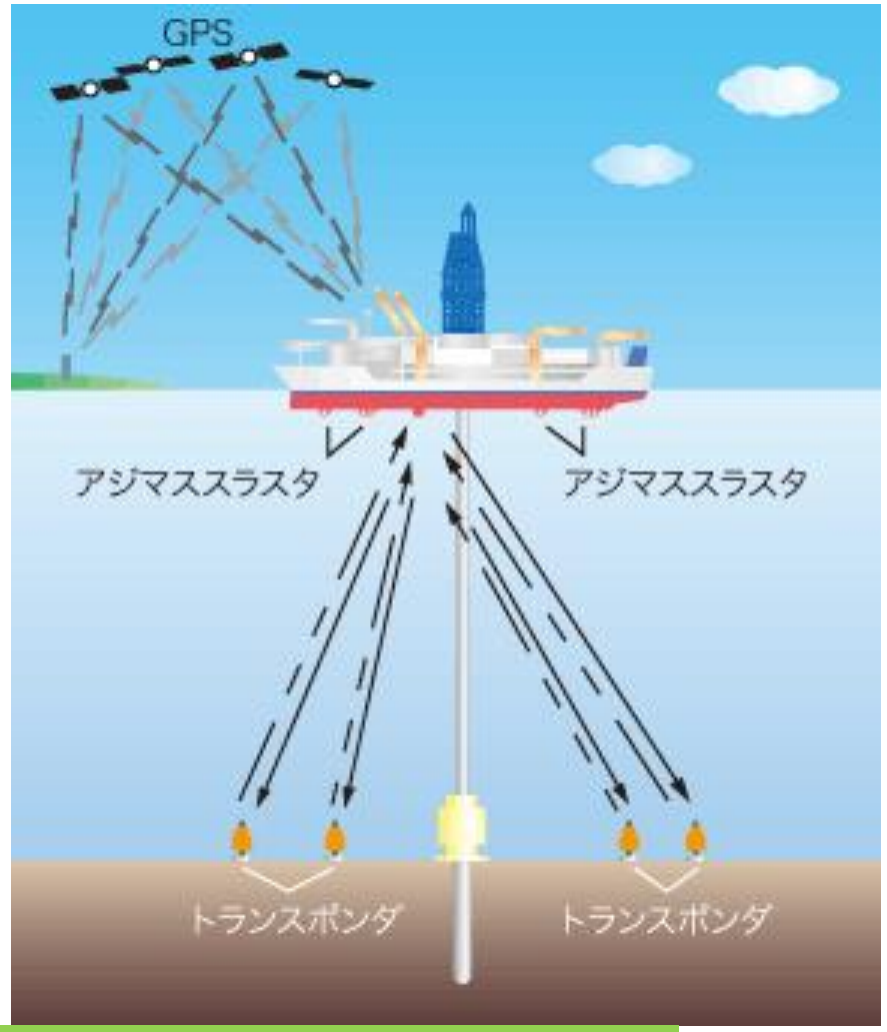


海洋で測定できると、さらに精度が向上する





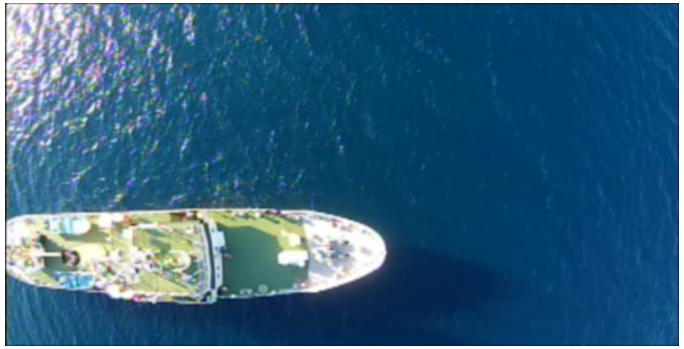




常にGPSにより船の位置を確認し、常時7基（6基のアジマススラスタと1基のトンネルスラスタ）のスラスタの推進方向を360度変え、風や潮流等に流されることなく、船体の位置を一定に保持します

入出港離着桟支援

ドローンで上空45mから



ドローンで上空100mから

全世界対応型ＤＧＰＳ入出港離着桟支援システム

全世界対応型DGPS入出港離着桟支援システムは、GPS（全世界的測位システム：Global Positioning System）を用いて、LNG船やタンカー等危険物運搬船及び各種船舶の入出港及び離着桟時の船体運動をリアルタイムにモニタリングする事によって、入出港離着桟時の操船を支援するとともに船舶の運航管理を目指したシステムです。

測位精度向上のためにGPS補正情報として、全世界の海域で取得可能なグローバルDGPS（Differential GPS）としてStarFire™システムを用いています。

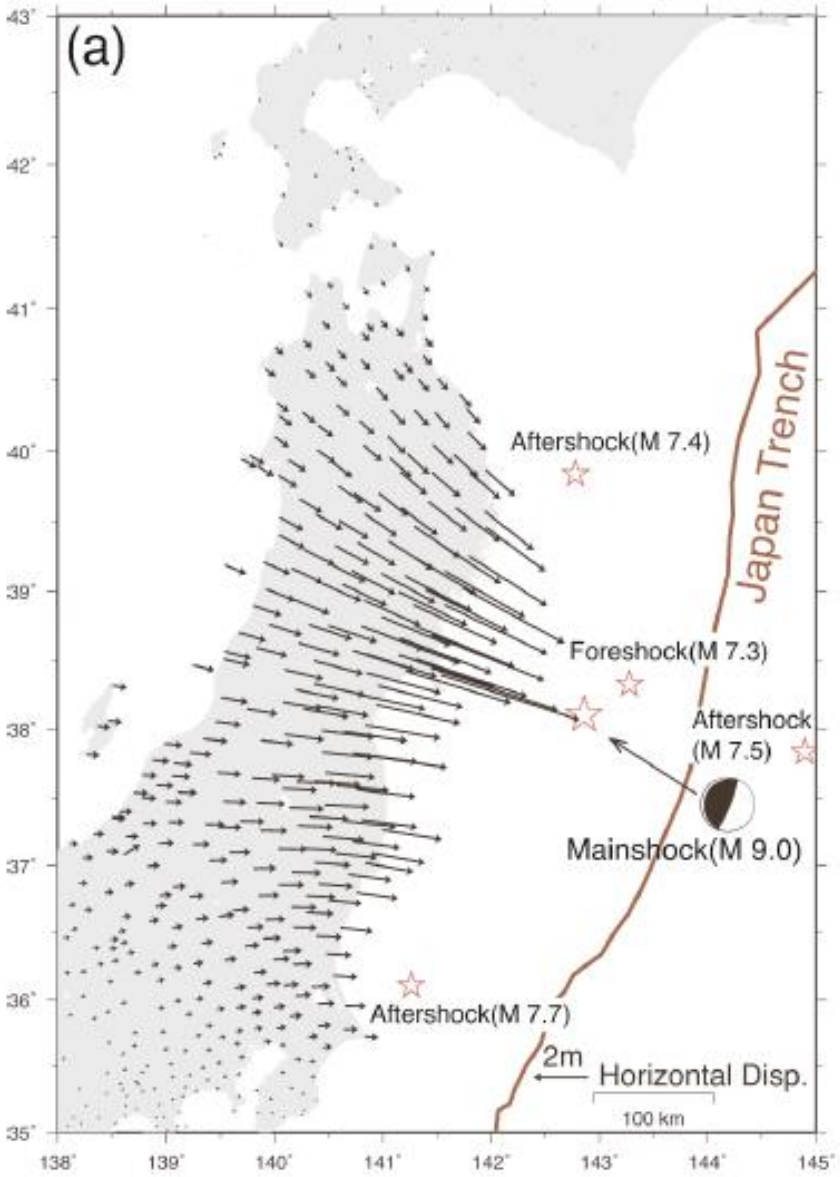
背景

国土交通省を中核として、船舶の知能化や陸上支援体制の高度化及び情報ネットワーク整備を実現するため、海のITS（Intelligent Transport System：高度情報通信技術を活用した海上交通のインテリジェント化）に関する技術開発が推進され、その中でも離着桟支援システムの必要性が提唱されています。

特徴

- GPSとインマルサット衛星の受信可能海域で10センチメートルオーダーの高精度測位ができます。
- 画面には鳥瞰図による自船位置だけでなく、推奨航路、避険線及び船体停止目標を表示します。
- 入出港離着桟時の船位をリアルタイムに監視する事によって、操船支援情報を提供します。
- 離着桟時の接岸速度や係船時の船体運動をリアルタイムに監視することができます。
- 基地との通信によって、船上と陸上で同じ情報を監視及び管理するこができます。
- 船載型及び小型軽量可搬型による対象船への持ち込みが可能です。

地殻変動モニタリング



After the main shock of the March 2011 Tohoku Earthquqke, GSI tried to get initial results of ground surface movements detected by GEONET, which consists of 1,240 GNSS-based control stations and the central analysis unit. After a week, it revealed that Oshika station, close to the epicenter of the main shock, moved 5.3 m eastward and subsided 1.2 m, the largest movement ever observed by GEONET.

by Coordinates and EPS Letter

スマート建機（土木建設分野）

土木建設従事者の減少に対応

UAVが積極的に利用されており、精密位置推定はGNSSに依存

精密農業

* Agricultural management
* Low cost receiver
* Amateur can control
* Improvement of harvest
* Improvement of quality
* Autonomous helicopter

農家人口の減少に対応

GNSSに変わる将来の測位システム

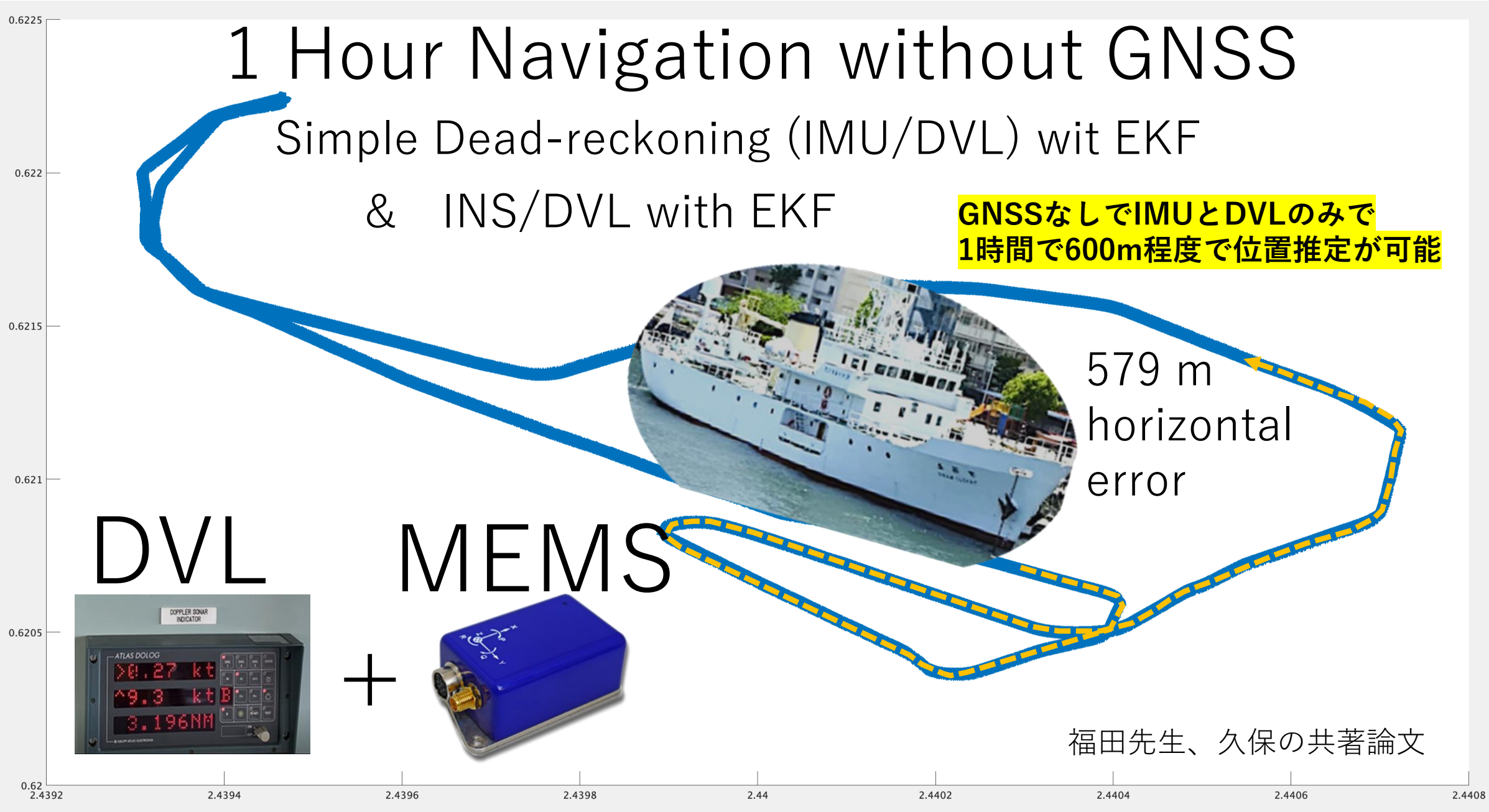
慣性センサーとLEO（低軌道衛星）

1 Hour Navigation without GNSS

Simple Dead-reckoning (IMU/DVL) wit EKF

& INS/DVL with EKF

GNSSなしでIMUとDVLのみで
1時間で600m程度で位置推定が可能



579 m
horizontal
error

DVL

＋

MEMS

福田先生、久保の共著論文

Parkinson博士の講演概要（2023/4）

A former US Secretary of Defense predicted in 2015 that by 2035, GNSS would be replaced by atomic clocks, gyroscopes and inertial technologies: "Twenty years from now everything you have that is manufactured for you, including your phone, will have on the chip a clock, a gyro and an accelerometer. It'll be set the moment it's manufactured and henceforth it will forever know what time it is, where it is, what its spatial orientation is. And it will never need a satellite."

While inertial systems can offer powerful synergies, long-term, pure inertial-system error growth cannot be contained without periodic external references. This talk will discuss those well-known synergies, but also explain why the statement by the secretary is wrong for fundamental reasons that are not overcome with perfect accelerometers and gyroscopes. The speaker, who has been working with inertial systems for 64 years, is a strong supporter of inertial systems, but also believes the PNT community should understand the full story.

米国や日本でも慣性センサーの技術革新により、慣性センサ（量子）のみでGNSSのような位置特定が可能になるという期待があるが、今後10年~20年をみても現実的ではない。

Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Todd E. Humphreys ; Peter A. Iannucci ; Zacharias M. Komodromos ; Andrew M. Graff **All Authors**

16
Full
Text Views

スターリンク衛星をGPSにイーロン・マスク協力拒否も独自研究で実現

Abstract
Authors
Keywords
Metrics

Abstract:
We develop a technique for blind signal identification of the Starlink downlink signal in the 10.7 to 12.7 GHz band and present a detailed picture of the signal's structure. Importantly, the signal characterization offered herein includes the exact values of synchronization sequences embedded in the signal that can be exploited to produce pseudorange measurements. Such an understanding of the signal is essential to emerging efforts that seek to dual-purpose Starlink signals for positioning, navigation, and timing, despite their being designed solely for broadband Internet provision.

LEO衛星による測位の発表がここ数年国際学会で増加

→この論文は既存のStarlink衛星で容易にGPSのような利用ができるのではないかという提案

Published in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Early Access)

Page(s): 1 - 16

DOI: 10.1109/TAES.2023.3268610

Date of Publication: 24 April 2023

Publisher: IEEE

ありがとうございました。

nkubo@kaiyodai.ac.jp