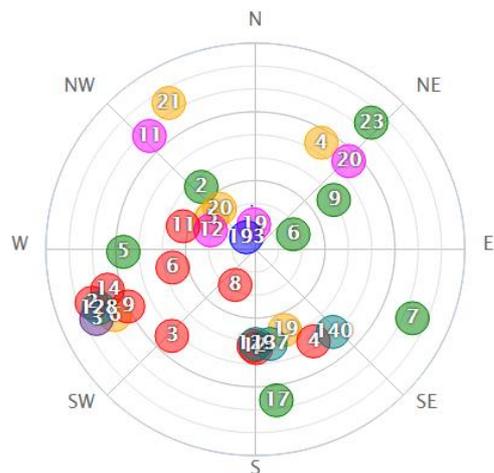


# 低コストGNSS受信機のcm級測位への利活用に関する研究

修士学位論文発表



N=33 ●GPS(7) ●GLO(6) ●GAL(4) ●BDS(10) ●QZS(1) ●IRNS(1) ●SBS(4)



海運ロジスティクス専攻

1755009

高橋 漱



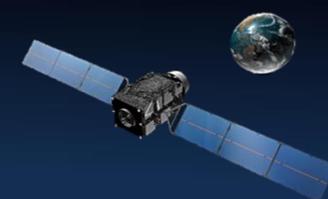
Tokyo University of Marine  
Science and Technology

# 発表内容



- ✓ 研究背景
- ✓ 目的
- ✓ 提案手法
- ✓ 実験結果
- ✓ IoT向けに開発したキットの紹介
- ✓ リアルタイムの実験及び結果
- ✓ まとめ

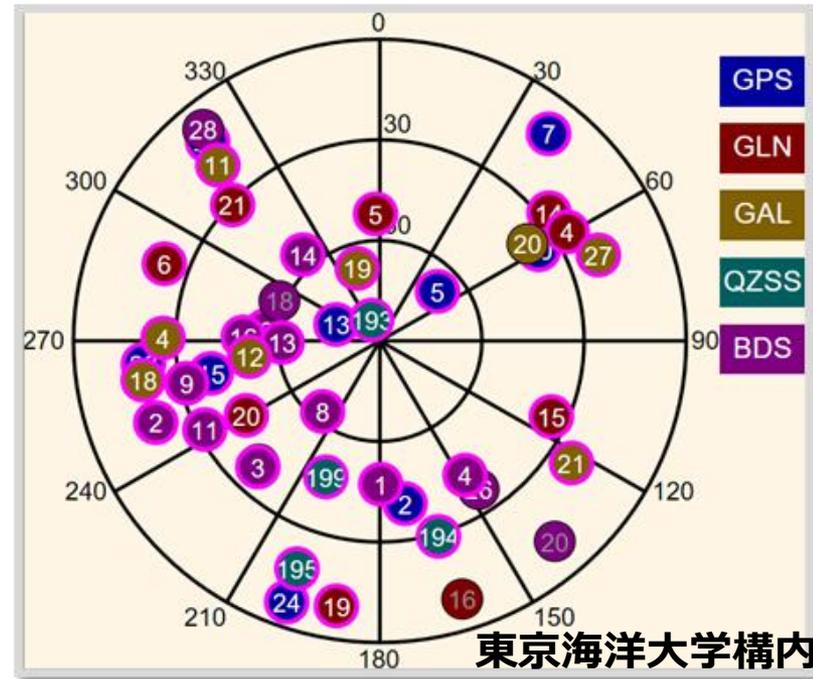
# 研究背景



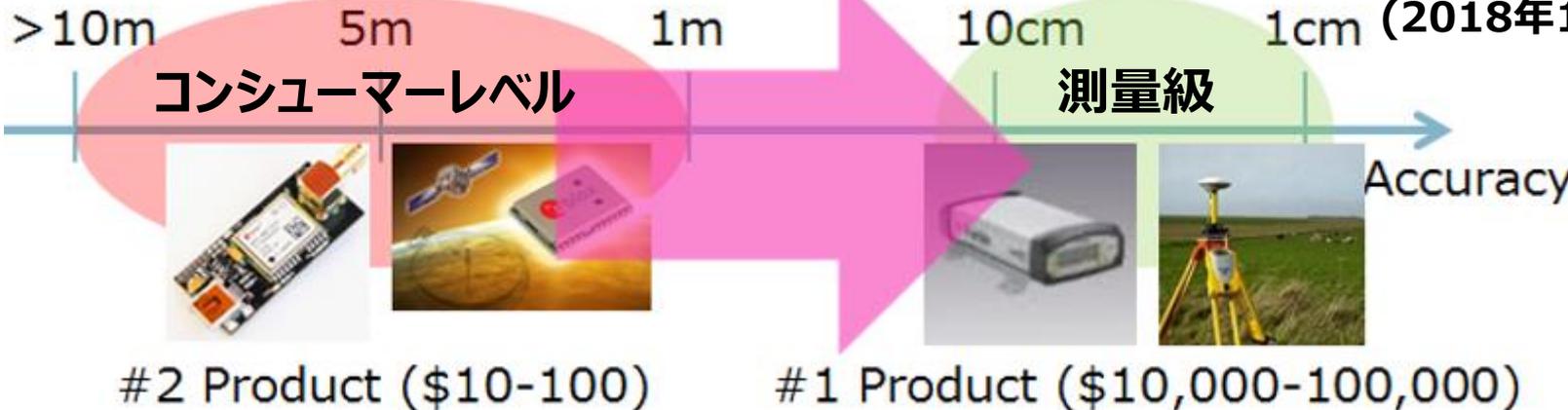
各国の測位衛星の近代化と低コストGNSS受信機の発達により、安価な位置情報システムが今注目されている



さらに、低コストGNSS受信機の性能が測量級GNSS受信機に追いつこうとしている（複数周波数帯に対応した低コストGNSS受信機など）



東京海洋大学構内の第4実験棟屋上 (2018年12月)



# 研究背景



## i-Construction ~建設現場の生産性革命~

国土交通省

- 建設業は社会資本の整備の担い手であると同時に、社会の安全・安心の確保を担う、我が国の国土保全上必要不可欠な「地域の守り手」であることから、**建設業の賃金水準の向上や休日の拡大等の働き方改革**による**生産性向上が必要不可欠**。
- 国土交通省では、平成28年を「**生産性革命元年**」と位置付け、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までの全ての建設生産プロセスでICT等を活用する「**i-Construction**」を推進。
- 本年9月12日に開催された第1回未来投資会議において、建設現場の生産性を、**2025年度までに2割向上**を目指すこととした。

### 測量

3次元測量(UAVを用いた測量マニュアルの導入)



従来測量



UAV(ドローン等)による3次元測量

### 施工

ICT建機による施工(ICT土工用積算基準の導入)



従来施工



ICT建機による施工

### 検査

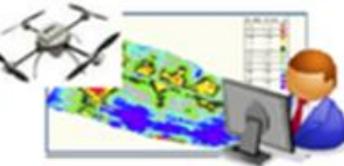
検査日数・書類の削減



人力で200m毎に計測

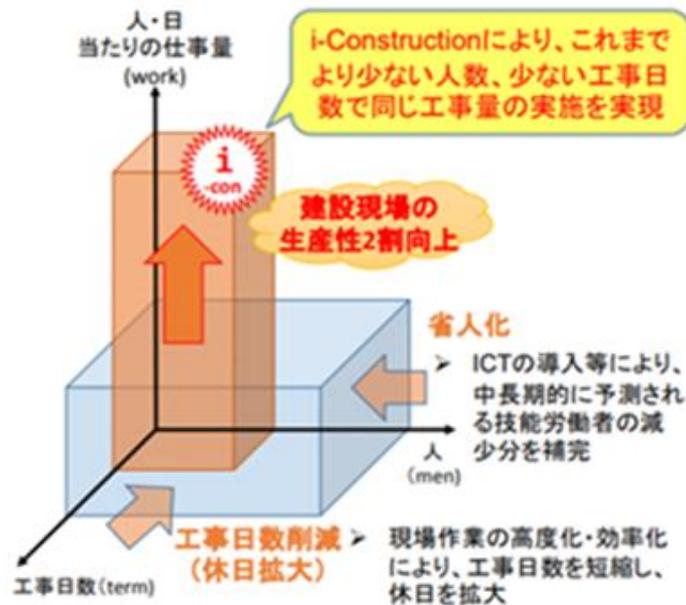


計測結果を書類で確認



3次元データをパソコンで確認

### 【生産性向上イメージ】



# 研究背景



## 情報化施工



平成28年5月  
「i-Constructionの取り組みについて」  
国土交通省 関東地方整備局 資料より

点群データ

1m2に1点以上

<例：道路土工（盛土工）>

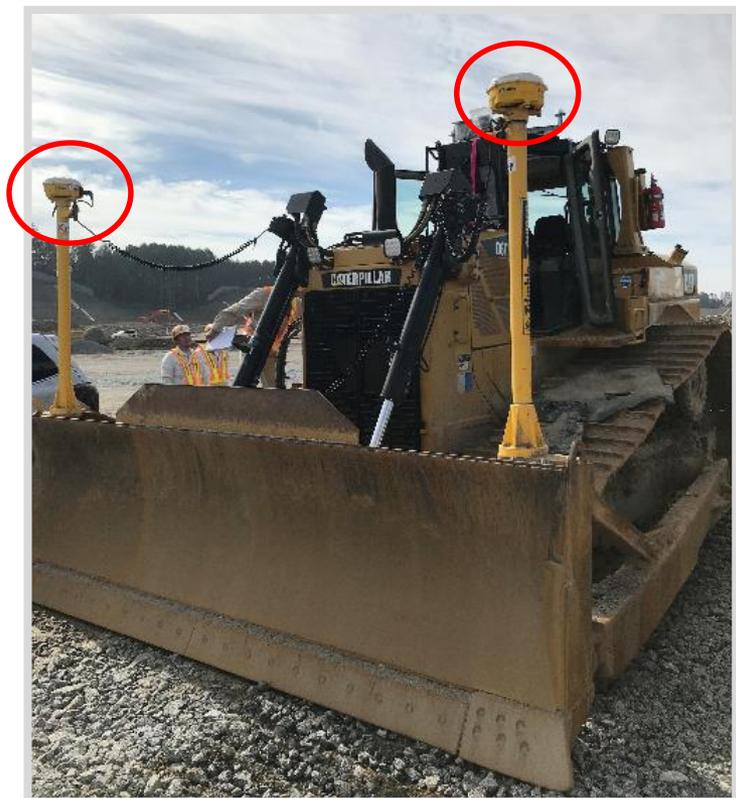
測定基準：測定密度は1点/m<sup>2</sup>以上、評価は平均値と全測点

規格値：設計面との標高較差（設計面との離れ）

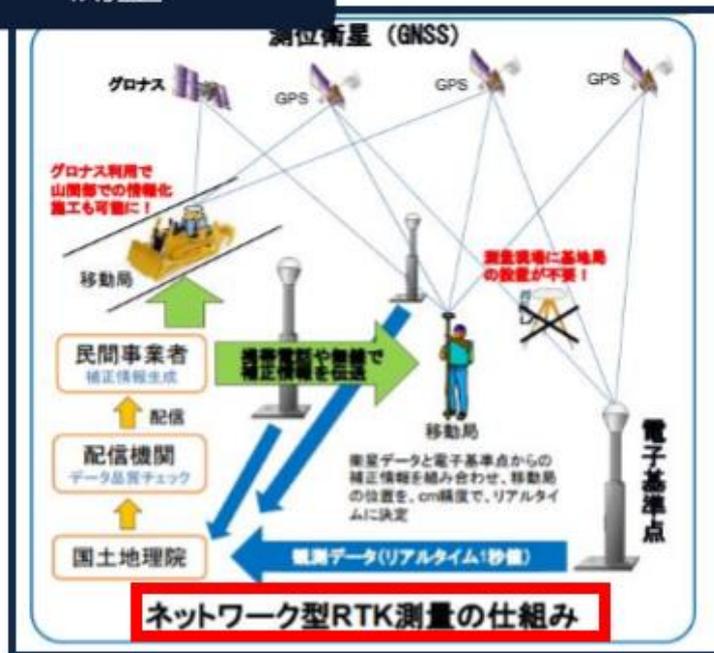
平場 平均値：±5cm 全測点：±15cm

法面 平均値：±8cm 全測点：±19cm

※法面には小段含む

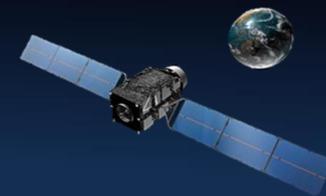


## 測量



平成28年5月  
「ネットワーク型RTK測量について」  
国土地理院 資料より

# 研究背景



高精度測位を利用した情報化施工アプリケーション例



**こういった現場では低コストGNSS受信機が必要！**

出典：(株)コマツ  
総合カタログ

**圃場工事**  
大規模な土地改良や農地整備工事の計画精度を高めるための高精度測位システムです。測量工事、建設工事における高精度の管理および自動化の管理や高精度な土地改良工事の効率化に貢献します。

- 3D-MC GNSS トラッカー 23p
- 3D-MC GNSS トラッカー EXE CAR 14p
- 3D-MC GNSS トラッカー EXE CAR 18p
- 3D-MC GNSS トラッカー EXE CAR 23p

**河川工事**  
河川工事や治水施設建設に活用する高精度測位システムは、河川工事の高精度な測量が可能です。河川工事や治水施設建設に活用する高精度測位システムは、河川工事の高精度な測量が可能です。

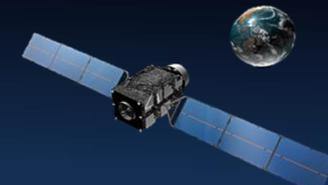
- 3D-MC TR トラッカー 17p
- 3D-MC TR トラッカー 21p
- 3D-MC TR トラッカー 13p
- 3D-MC TR トラッカー 12p
- 3D-MC TR トラッカー 12p

**トンネル工事**  
トンネル工事や地下工事でも高精度測位システムは、トンネル工事の高精度な測量が可能です。トンネル工事や地下工事でも高精度測位システムは、トンネル工事の高精度な測量が可能です。

- 3D-MC TR トラッカー 13p
- 3D-MC TR トラッカー 12p
- 3D-MC TR トラッカー 12p

出典：(株)トプコン  
土木総合カタログ

# 研究背景



水平方向の  
プロット(軌跡)

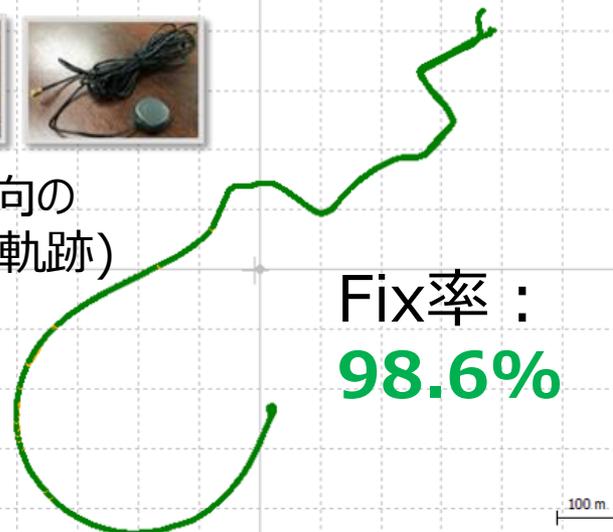


Fix率：  
**100%**

Trimble社 SPS855(多周波測量級)

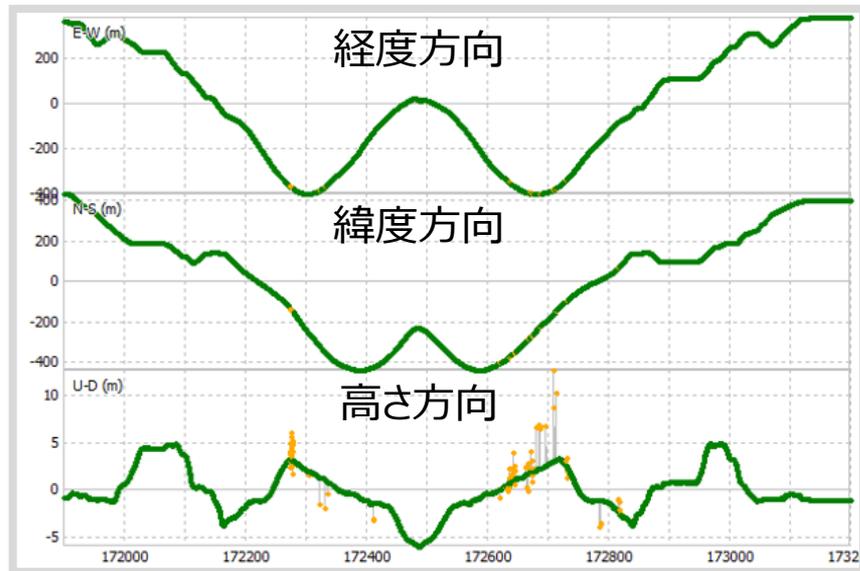
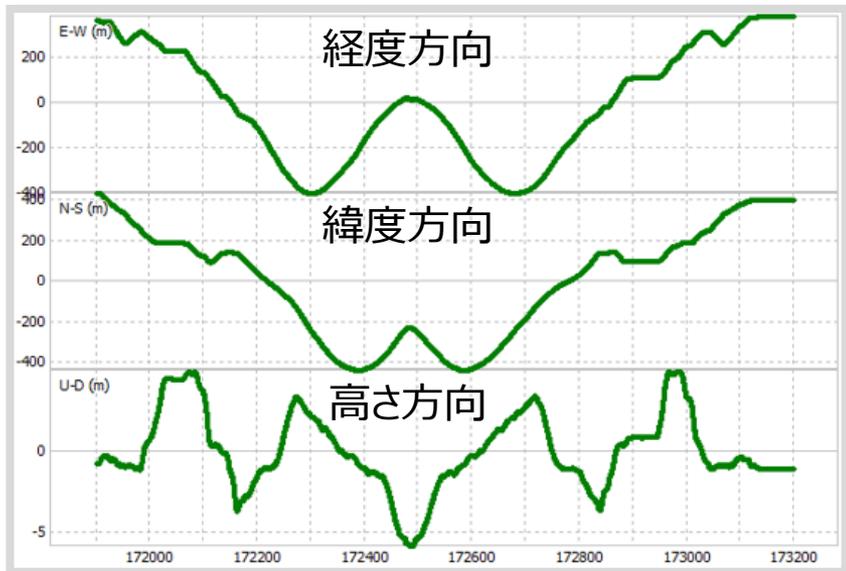


水平方向の  
プロット(軌跡)



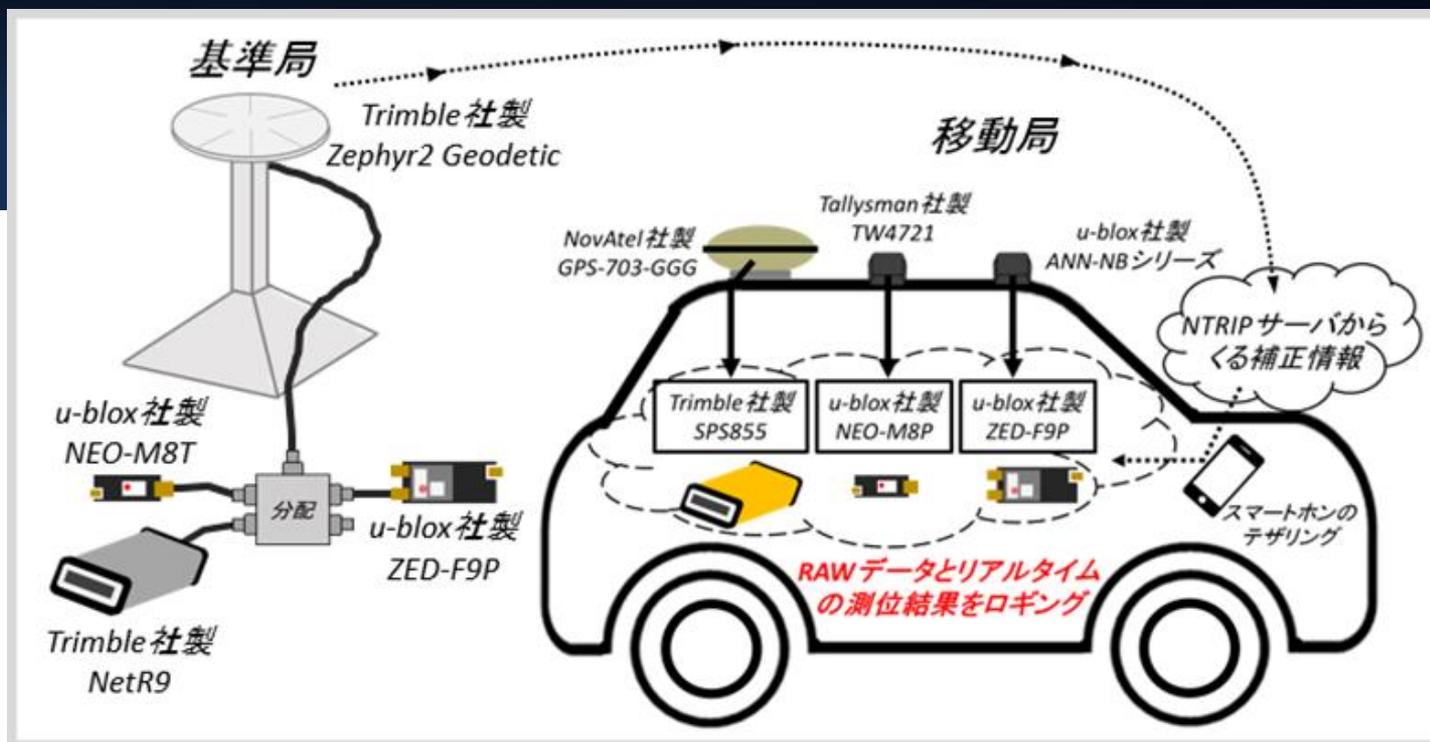
Fix率：  
**98.6%**

u-blox社 NEO-M8P(一周波低コスト)

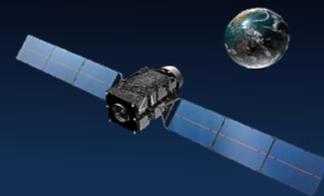


# 研究背景

基準局は第4実験棟  
屋上のものを使用

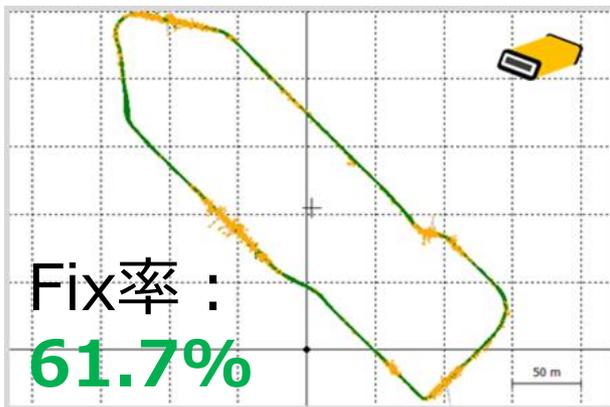


# 研究背景



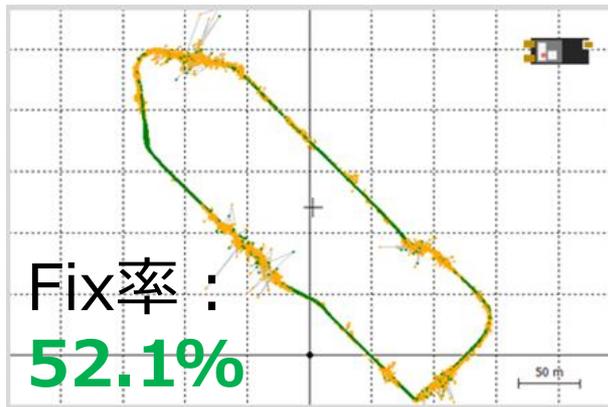
## 多周波対応測量級

後処理解析結果



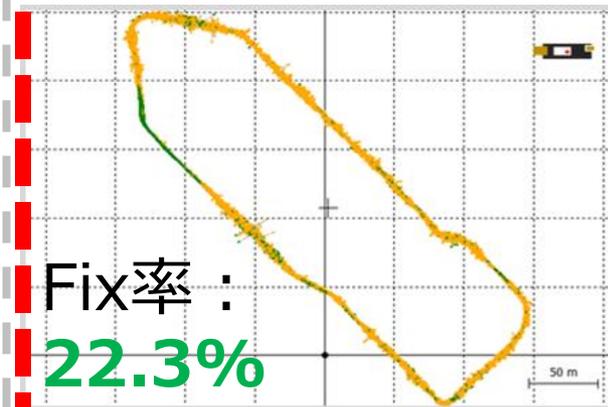
## 多周波対応低コスト

後処理解析結果

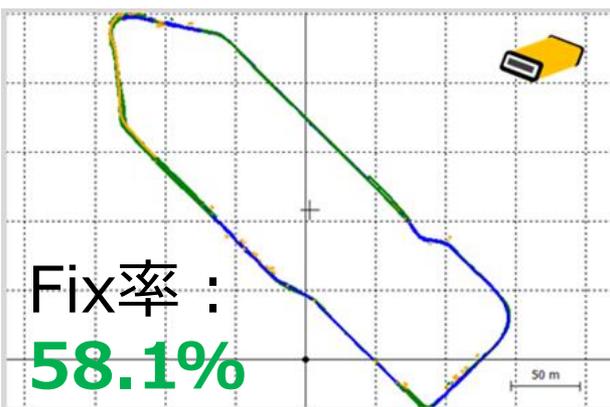


## 一周波対応低コスト

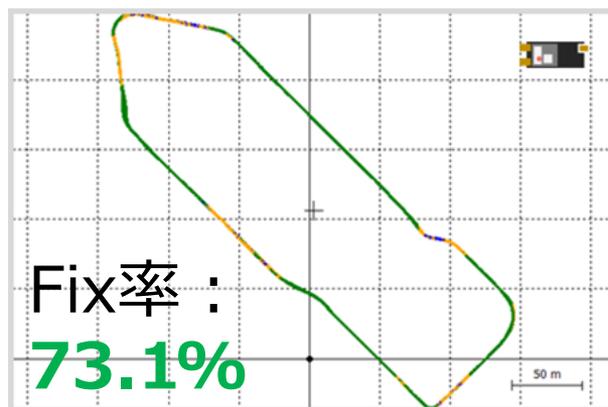
後処理解析結果



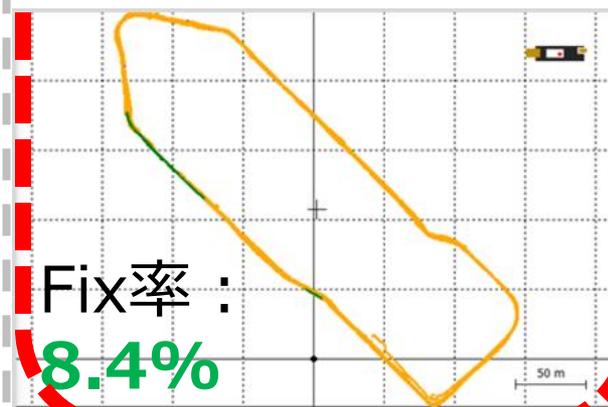
リアルタイム測位結果



リアルタイム測位結果

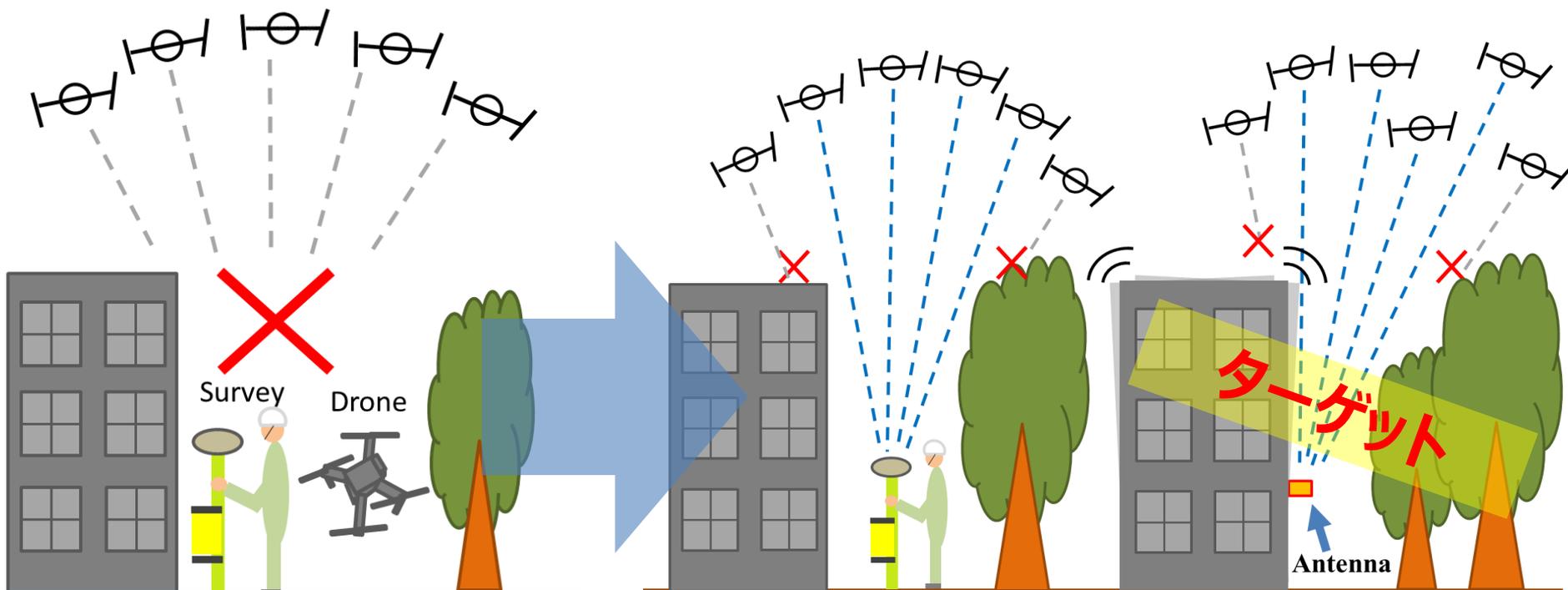
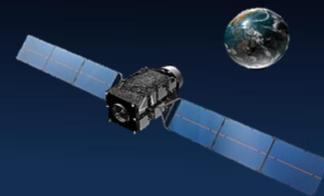


リアルタイム測位結果



性能に関していえば、「多周波測量級」≒「多周波低コスト」>「一周波低コスト」

# 研究背景



通常、上のような悪環境では  
測量等の衛星測位はもちろん  
ドローンの制御なども厳しい

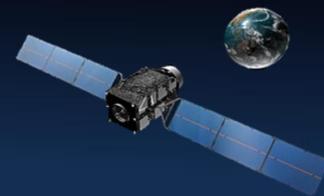


測量級受信機



低コスト受信機

# 研究背景



ダム建設現場

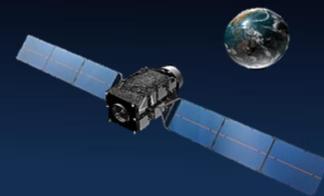


橋梁等



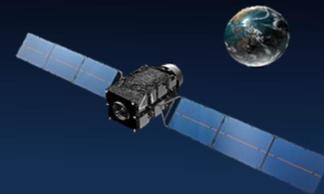
- 地震を含めた災害等の影響評価
- 橋梁等の歪みのモニタリング
- 高層建築のサポート等

# 目的



衛星測位における悪環境下(建物壁面)にて、  
低コストGNSS受信機の利便性を改善させるロ  
バストなRTK手法を用いることにより、リアルタイムかつ精密な位置決定の方法を提案する

# 市販受信機の場合



①

NEO-M8P



ublox



②

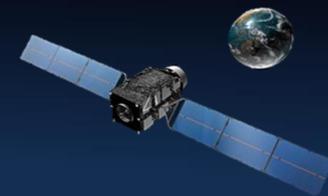
Trimble



SPS855

※どちらの受信機も  
内蔵のRTKエンジン  
が入っている

# u-blox社 NEO-M8P

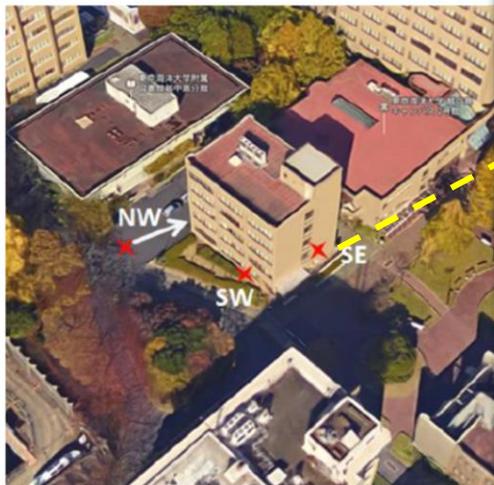


①

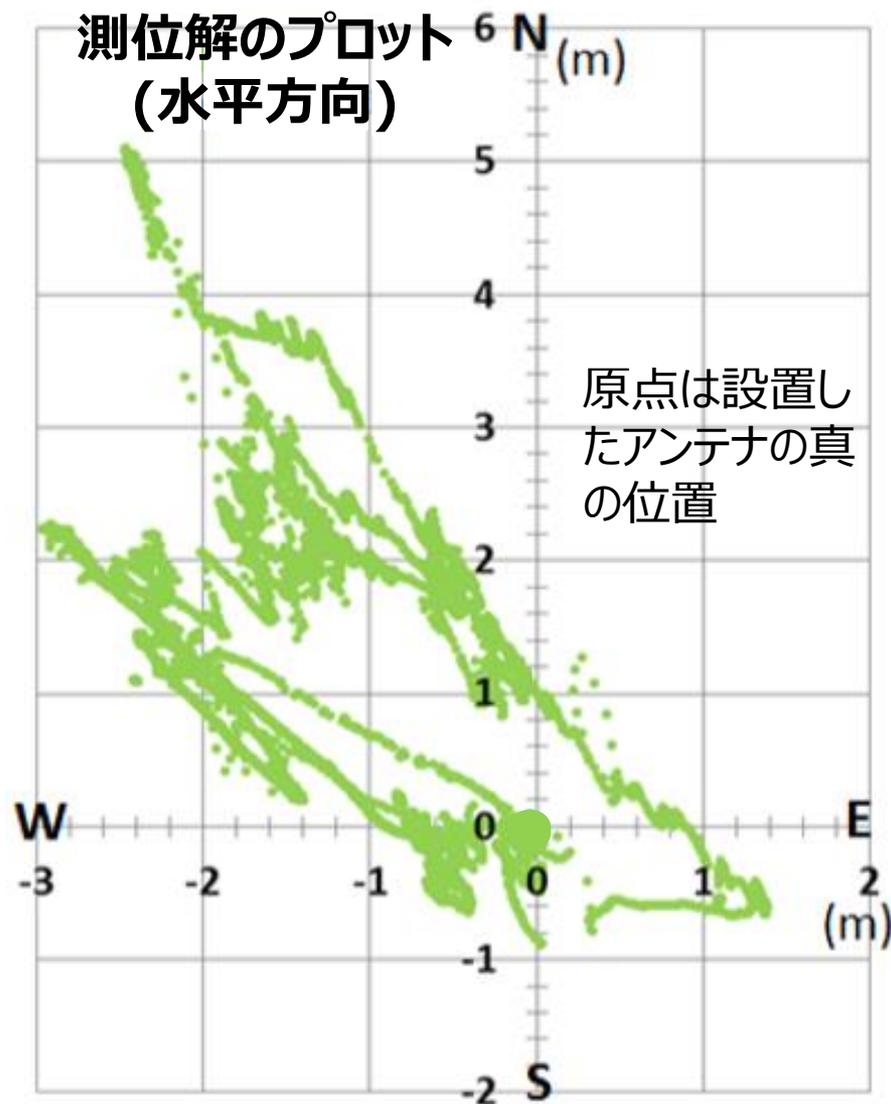
南東壁面2階



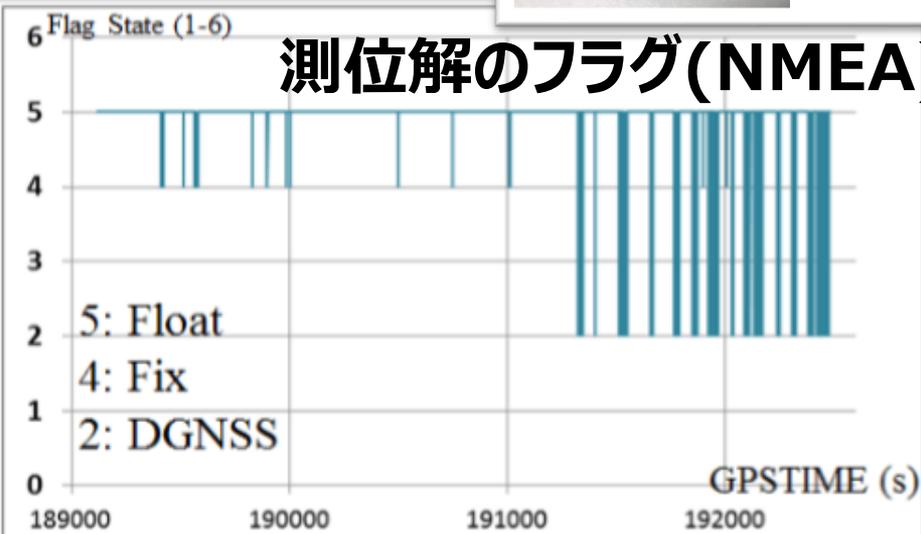
NEO-M8P



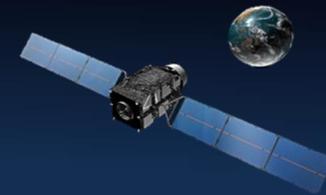
測位解のプロット  
(水平方向)



測位解のフラグ(NMEA)



# Trimble社 SPS855

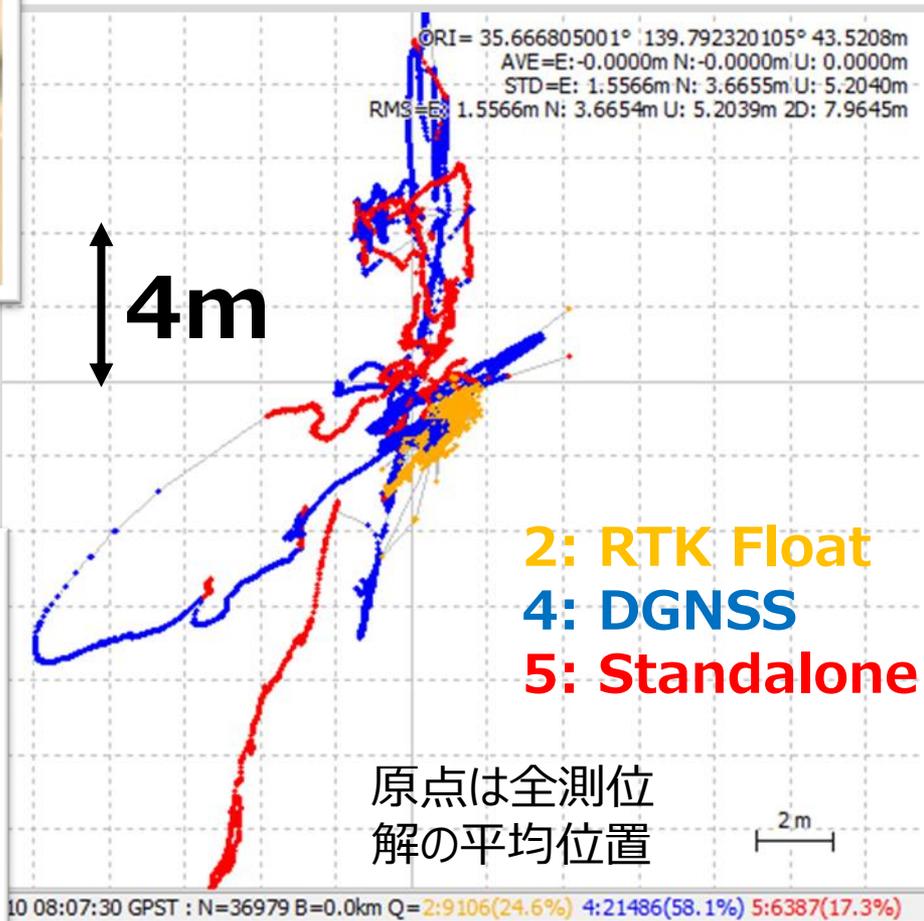


②

南西壁面1階

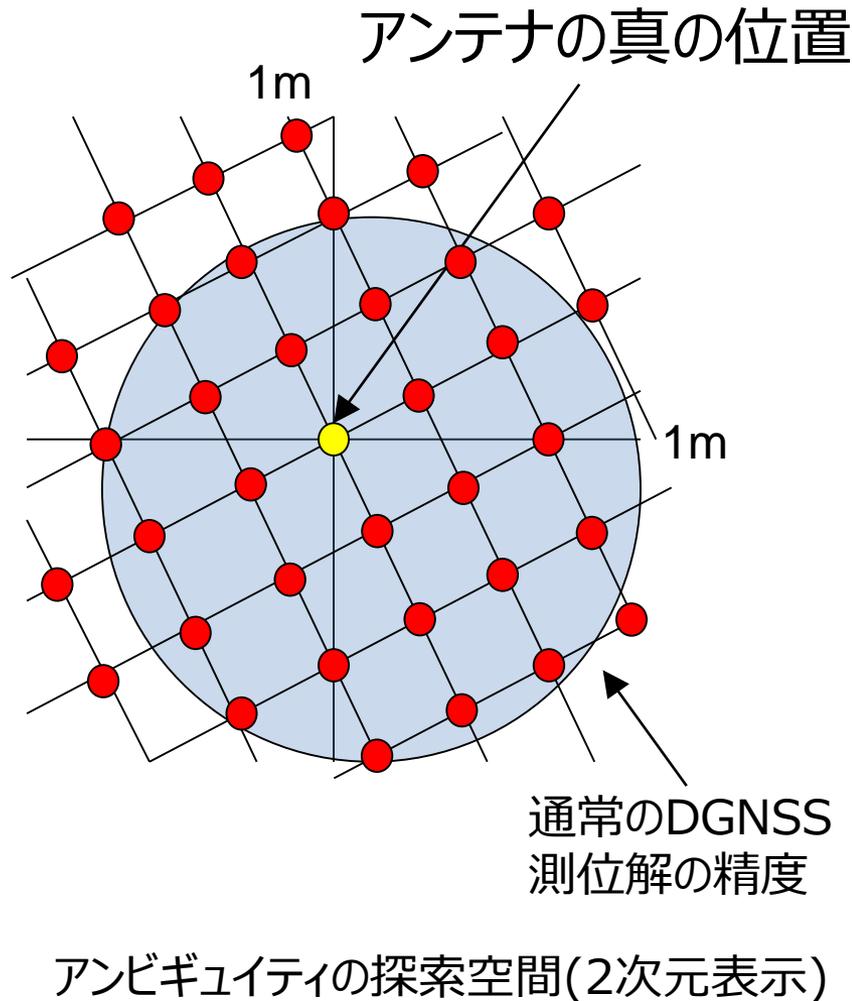
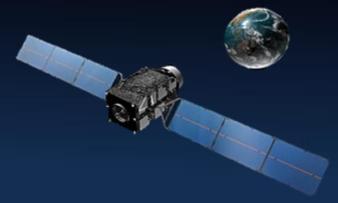


水平方向プロット



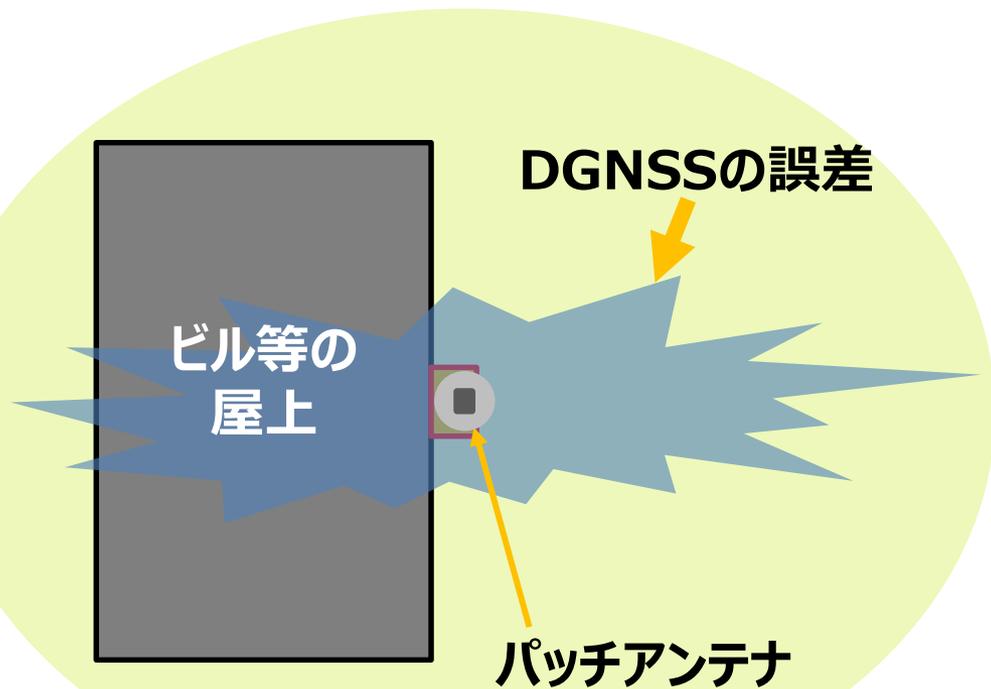
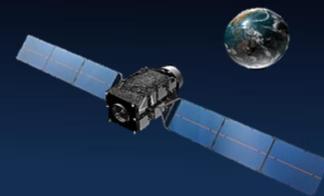
RTK解なし

# 提案手法であるアンビギュイティ決定



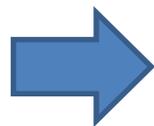
- アンビギュイティ決定(AR)の性能は、Float解の精度に強く依存する
- Float解の精度が悪ければ、正しいアンビギュイティを決定することは不可能である
- ほぼ静止点ともいえる建造物の動揺監視というアプリケーションの場合、Float解によって作り出される探索空間の範囲を大きく狭めることが可能である
- 本アルゴリズムでは、時々刻々得られるリアルなDGNSSの結果を利用せず、真のアンテナ位置に極めて近い位置を常に入力しておくことで探索空間の範囲を狭めている

# 提案手法であるアンビギュイティ決定

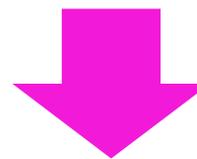


\* こういった環境では、DGNSSの測位精度は一般に数十メートルに達する

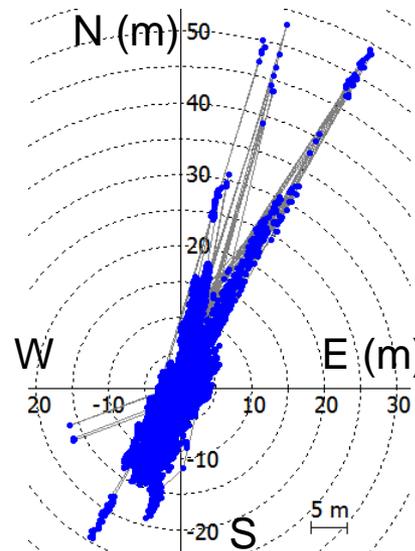
南西壁面にアンテナを設置し、DGNSS測位を行った時の一例 (水平方向のプロット)



擬似距離による  
大きな位置誤差

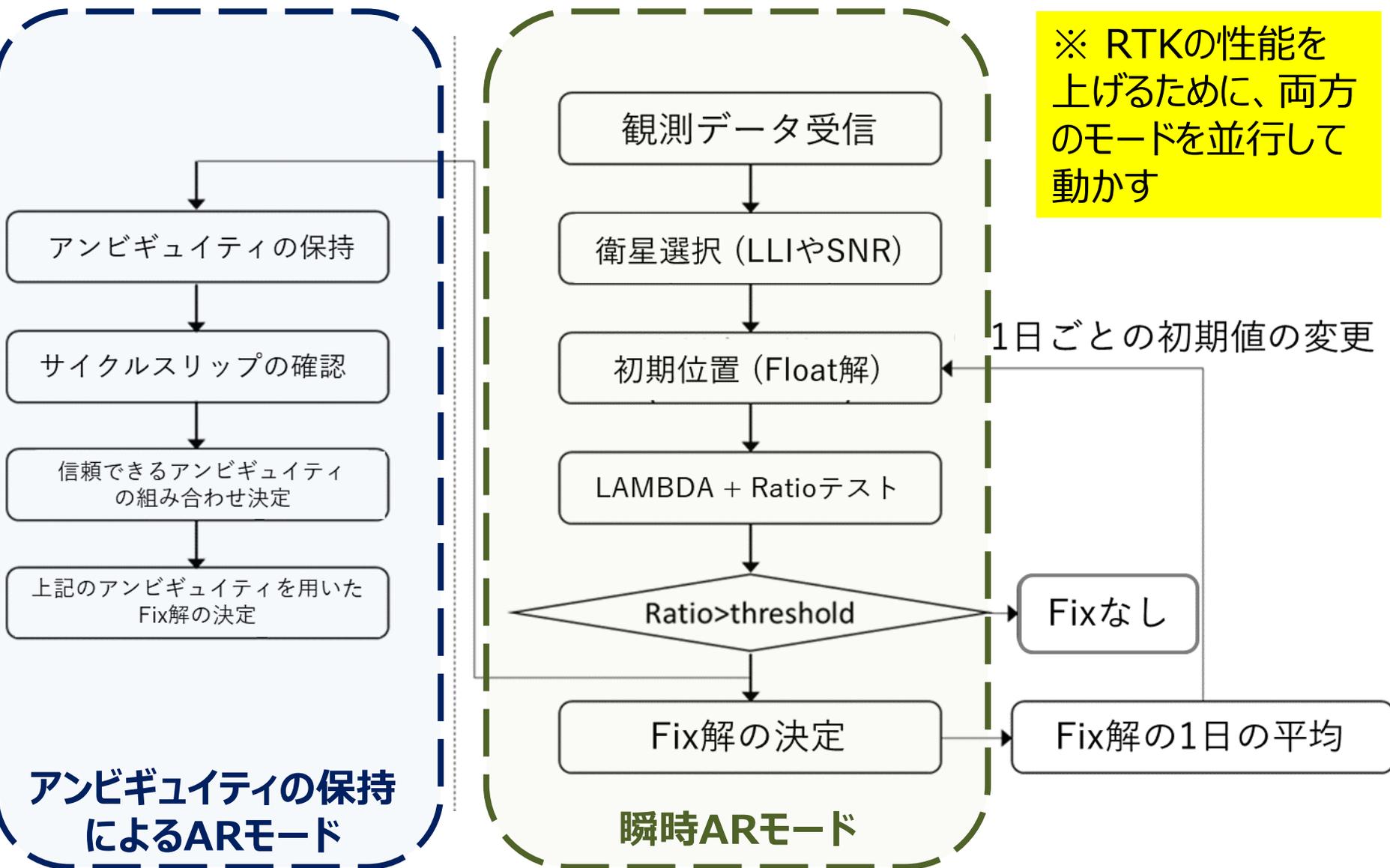
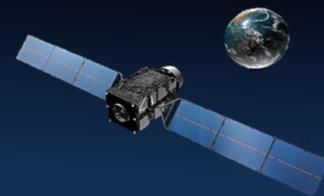


搬送波位相を追尾していても、擬似距離の測位による位置の誤差が大きいと、正しいアンビギュイティを決定することは不可能



原点はアンテナの  
真の位置

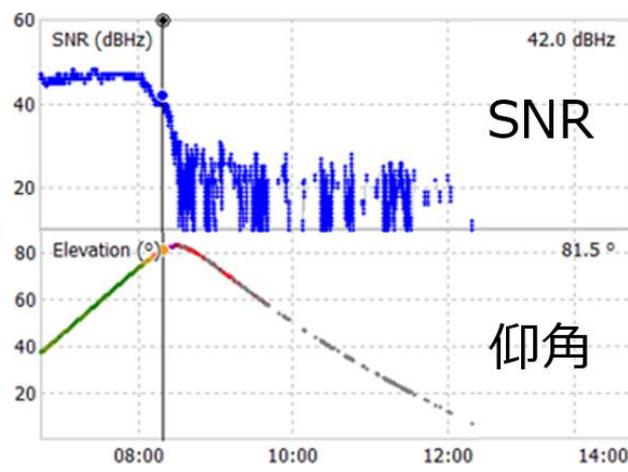
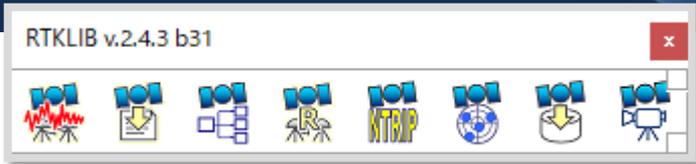
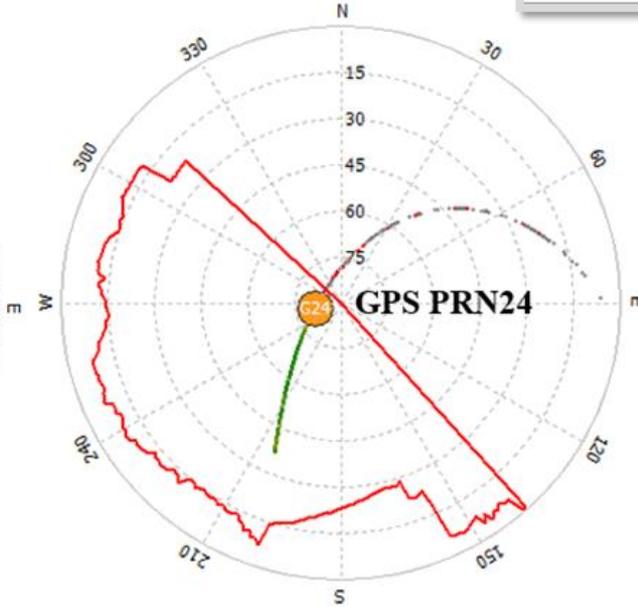
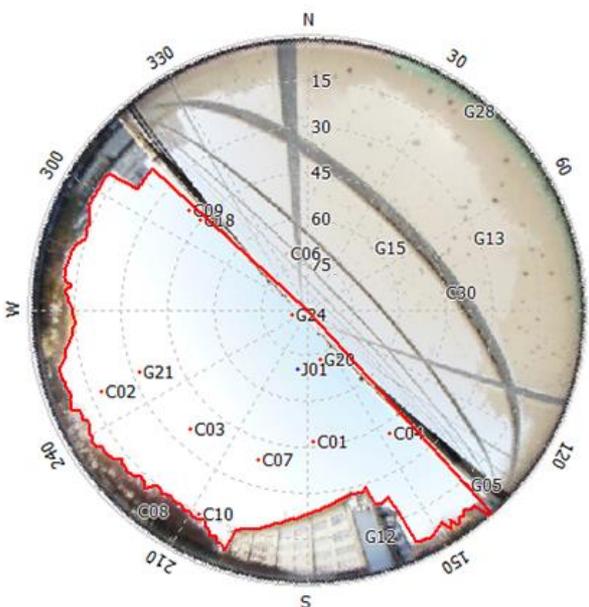
# 提案手法のフローチャート



# RTKLIBを使った後処理解析の設定



南西壁面地点での上空視野



RTKPOST ver.2.4.3 b29

Options

Setting1 Setting2 Output Statistics Positions Files Misc

Positioning Mode: Kinematic

Frequencies / Filter Type: Forward

Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz): 20

Rec Dynamics / Earth Tides Correction: OFF

Ionosphere Correction: Broadcast

Troposphere Correction: Broadcast

Satellite Ephemeris/Clock: Broadcast

Excluded Satellites (+PRN: Included):

GPS  GLO  Galileo  QZSS  SBAS  BeiDou  IRNSS

Load... Save... OK Cancel

SNR Mask

Rover  Base Station

	<5	15	25	35	45	55	65	75	>85
L1	35	35	35	35	35	35	35	35	35
L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

OK Cancel

Options

Setting1 Setting2 Output Statistics Positions Files Misc

Integer Ambiguity Res (GPS/GLO/BDS): Fix and ON ON

Min Ratio to Fix Ambiguity: 3

Min Confidence / Max FCB to Fix Amb: 0.9999 0.25

Min Lock / Elevation (°) to Fix Amb: 0 0

Min Fix / Elevation (°) to Hold Amb: 10 0

Outage to Reset Ambiguity (min): 0.050

Max Age of Diff (s) / Sync Solution: 30.0 ON

Reject Threshold of GDOP/Innov (m): 30.0 30.0

Max # of AR Iter/# of Filter Iter: 1 1

Baseline Length Constraint (m): 0.000 0.000

Load... Save... OK Cancel

Options

Setting1 Setting2 Output Statistics Positions Files Misc

Measurement Errors (1-sigma)

Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2	500.0	100.0
Carrier-Phase Error a+b/sinE (m)	0.003	0.003
Carrier-Phase Error/Baseline (m/10km)	0.000	0.000
Doppler Frequency (Hz)	10.000	10.000

Process Noises (1-sigma/sqrt(s))

Receiver Accel Horiz/Vert (m/s <sup>2</sup> )	1.00E+01	1.00E+01
Carrier-Phase Bias (cycle)	1.00E-04	1.00E-04
Vertical Ionospheric Delay (m/10km)	1.00E-03	1.00E-03
Zenith Tropospheric Delay (m)	1.00E-04	1.00E-04
Satellite Clock Stability (s/s)	5.00E-12	5.00E-12

Load... Save... OK Cancel

仰角マスク: 20°

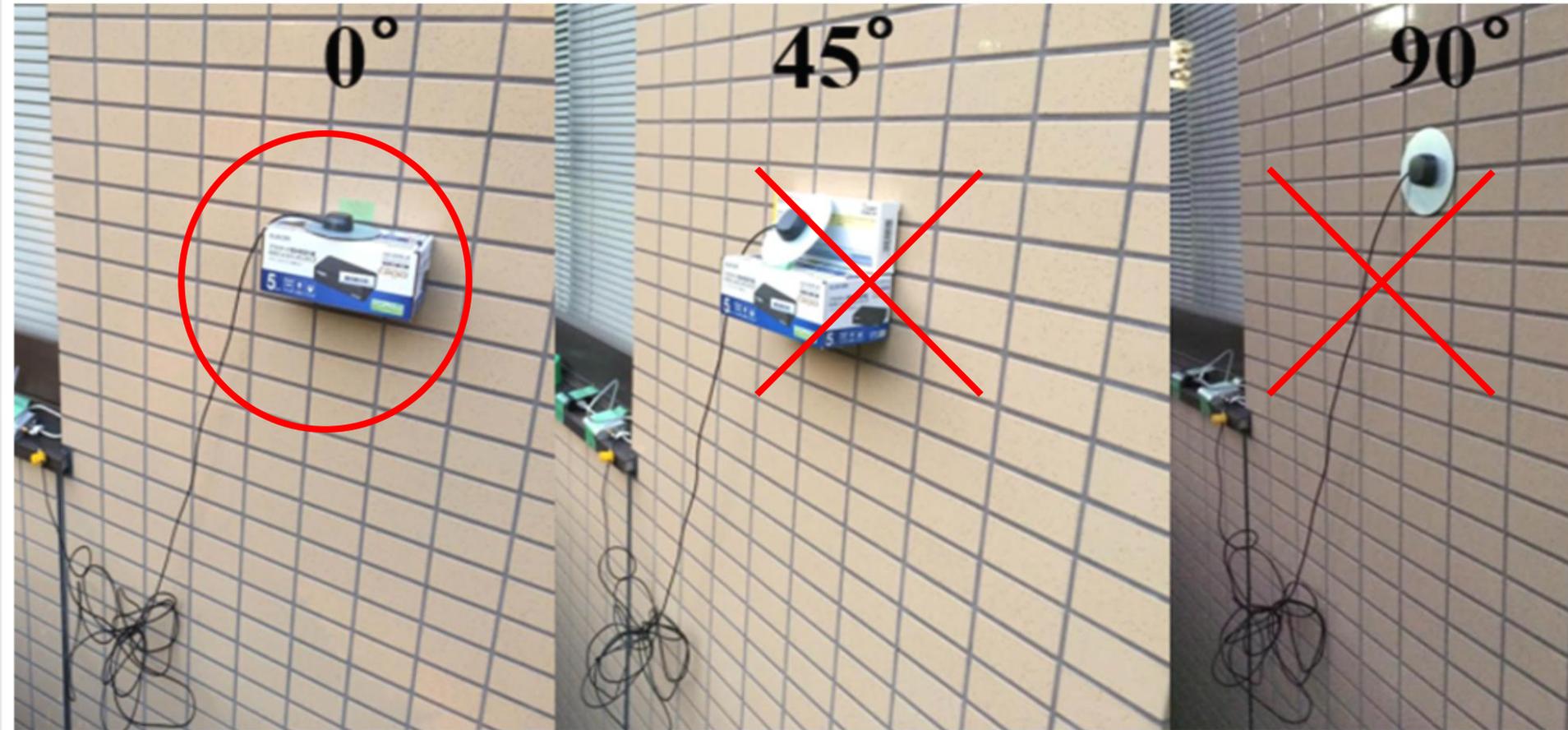
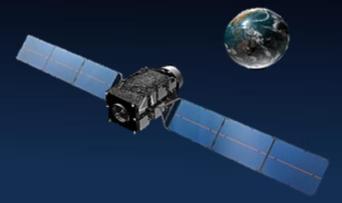
SNRマスク: 35dBHz

Fix and Hold

500対1

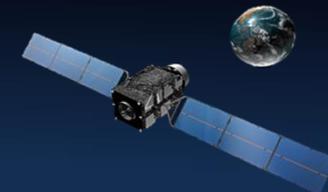
RTKPOSTのオプション (南西の場合)

# 事前実験 - 0°、45°、90°



※ 事前に、地面に対して0°、45°、90°を向くアンテナ設置方法で試験し、測位結果を見る限りでは、0°が一番良い設置方法であると判断したため、本研究の実験ではすべて0°を採用している

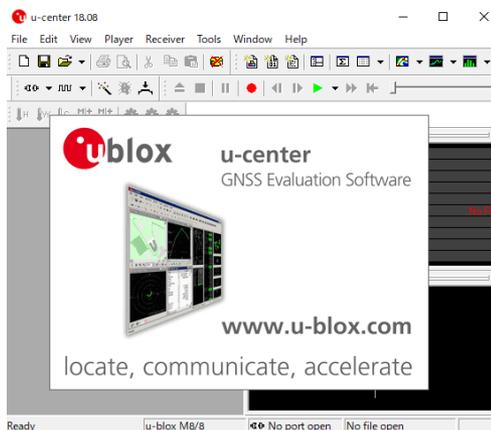
# 実験概要



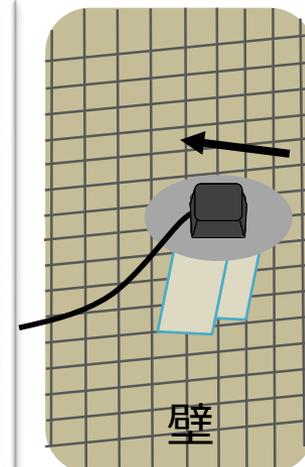
- 設置場所:  
3号館の南西、南東、北西、北東壁面
- 測位時間:  
24時間 (南西)、23時間 (南東、北西及び北東)、1[Hz]  
※ 2017年11月中
- 使用衛星システム:  
GPS  + QZSS  + Galileo  + BeiDou 
- 受信機のセッティング:  
u-centerによるデフォルトのセッティング



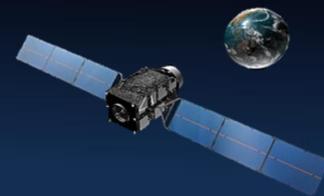
u-blox NEO-M8Tロガー  
(移動局と基準局ともに)



Tallysman TW4721



# RTKの測位結果の評価指標



$$\text{RTKの信頼性 [\%]} = \frac{\text{信頼できる解の個数}}{\text{Fix解の個数}}$$

※ 本研究では、信頼性の指標として、水平方向で真の位置から±10cm以内、高さ方向で±20cm以内の解が信頼できる解とした

$$\text{RTKのFix率 [\%]} = \frac{\text{Fix解の個数}}{\text{測位時間帯の総エポック数}}$$

# 実験環境



設置場所 (海洋大構内)



南西壁面

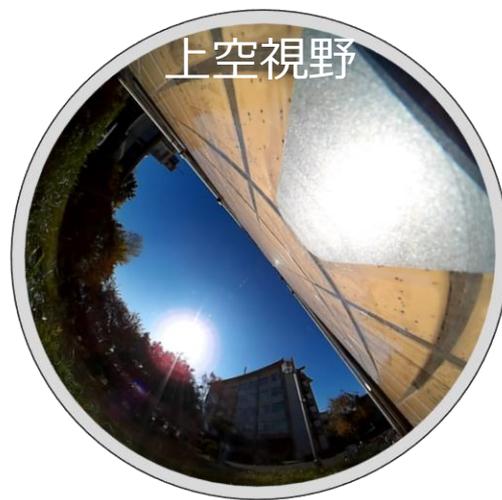
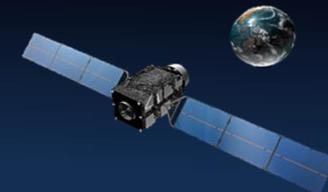
南東壁面



北西壁面

北東壁面

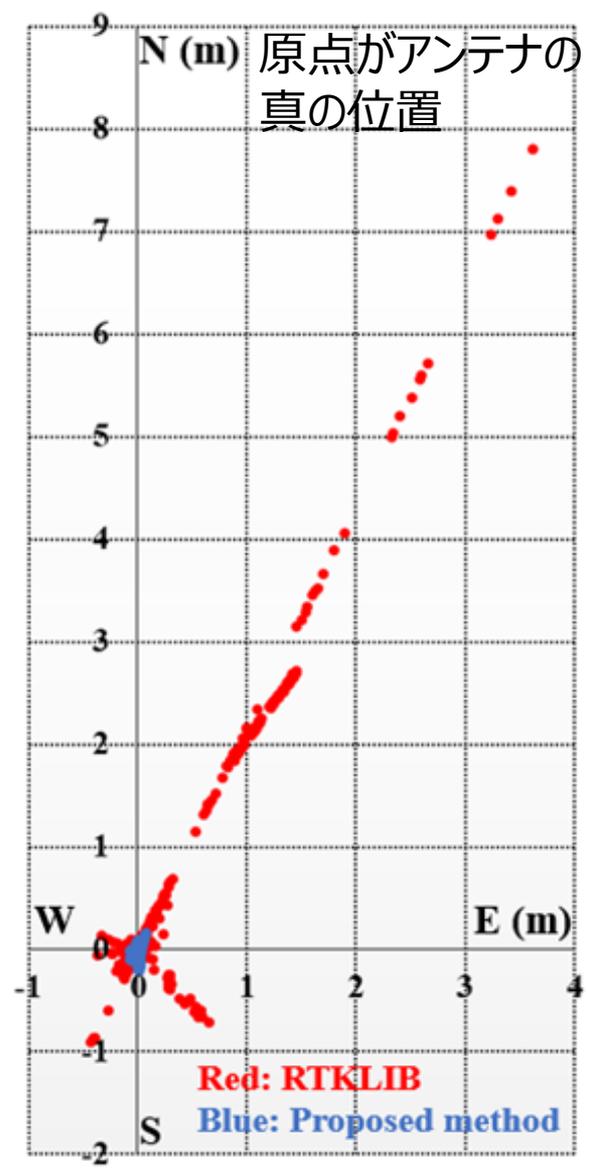
# 南西壁面の結果



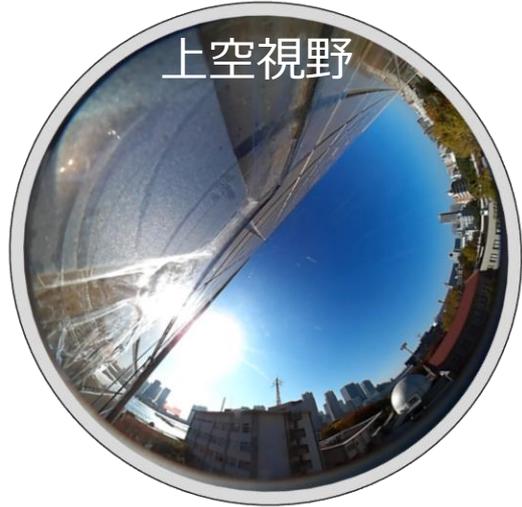
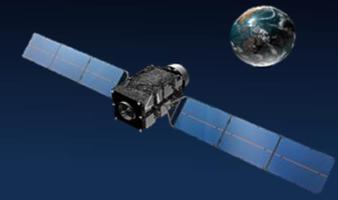
総工ポック数: 86400

提案手法はRTKLIBよりも良い結果を示した

南西方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	91.8[%]	98.2[%]
Fix 解の数	79314(GBQE)	84822(GBQE)
信頼性	99.15[%]	99.77[%]
信頼できる解の数	78638	84622
ずれの平均	0.021 [m]	0.012 [m]
ずれの標準偏差	0.173 [m]	0.012 [m]



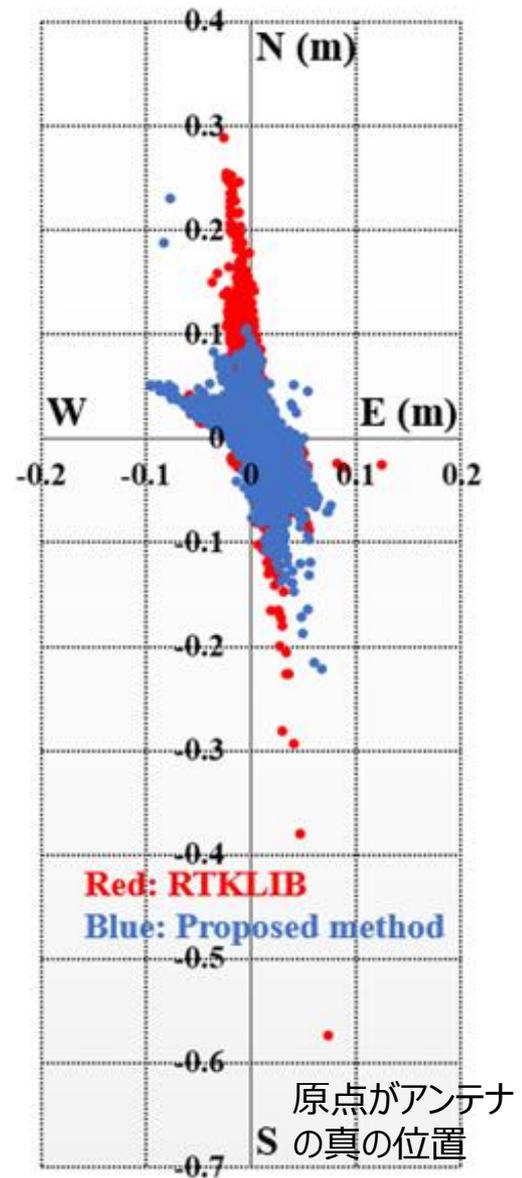
# 南東壁面の結果



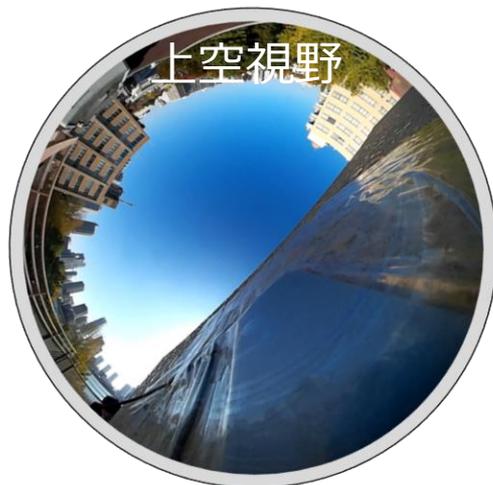
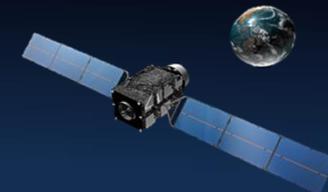
総エポック数: 82800

提案手法はRTKLIBのベストセッティングとほぼ同等であった

南東方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	97.5[%]	96.4[%]
Fix 解の数	80697(GBQE)	79805(GBQE)
信頼性	99.66[%]	99.85[%]
信頼できる解の数	80426	79682
ずれの平均	0.012 [m]	0.008 [m]
ずれの標準偏差	0.013 [m]	0.022 [m]



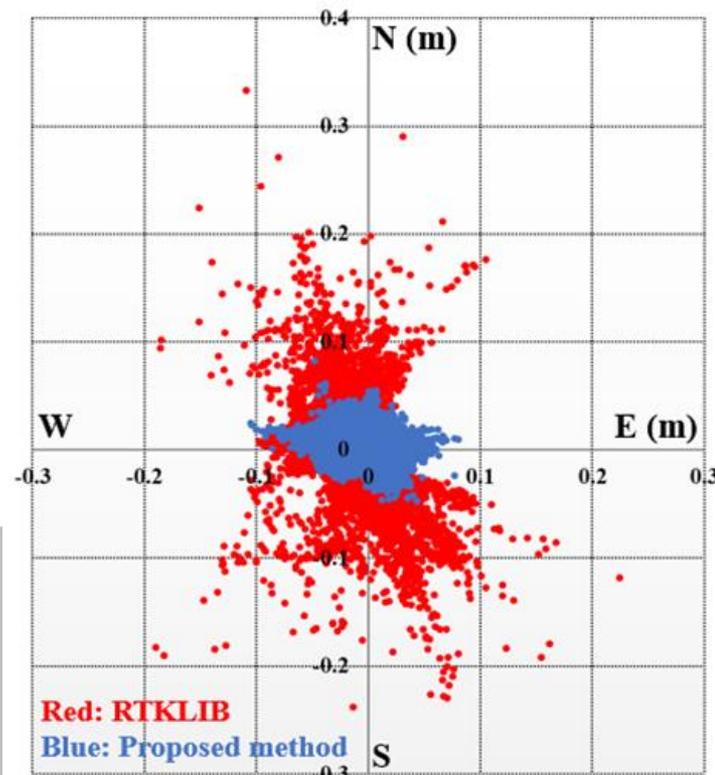
# 北西壁面の結果



総工ポック数: 82800

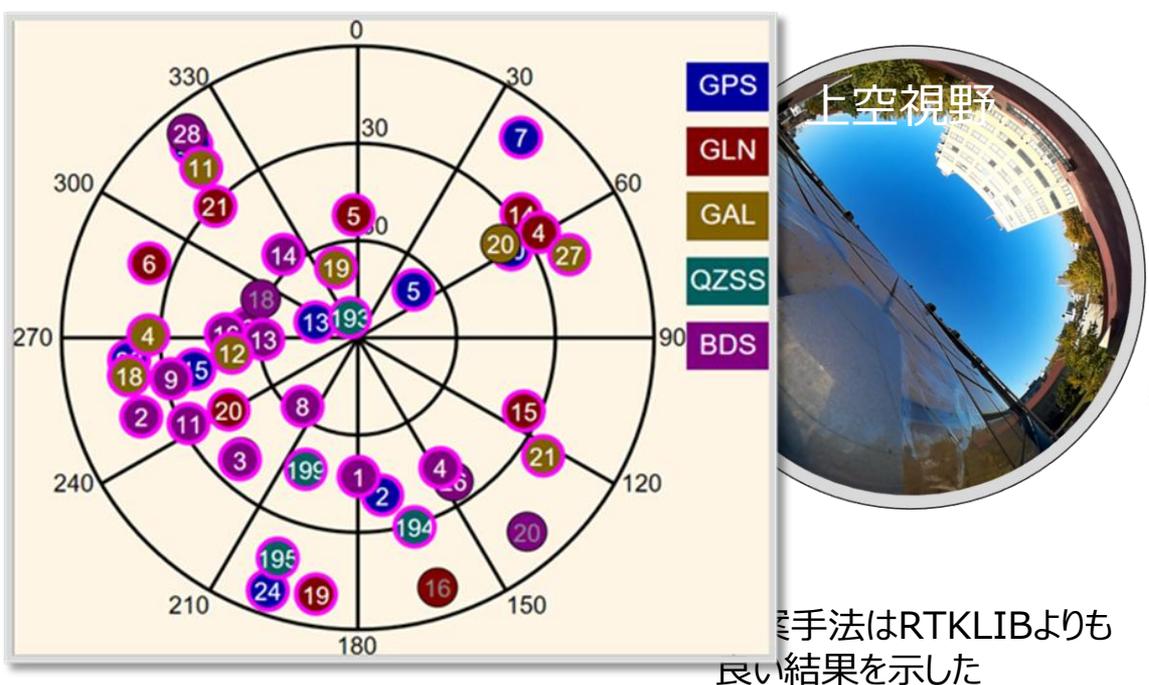
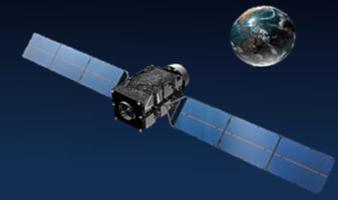
提案手法はRTKLIBよりも良い結果を示した

北西方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	93.9[%]	97.4[%]
Fix 解の数	77739(GBQE)	80681(GBQE)
信頼性	99.06[%]	99.99[%]
信頼できる解の数	77006	80679
ずれの平均	0.017[m]	0.012[m]
ずれの標準偏差	0.019[m]	0.009[m]

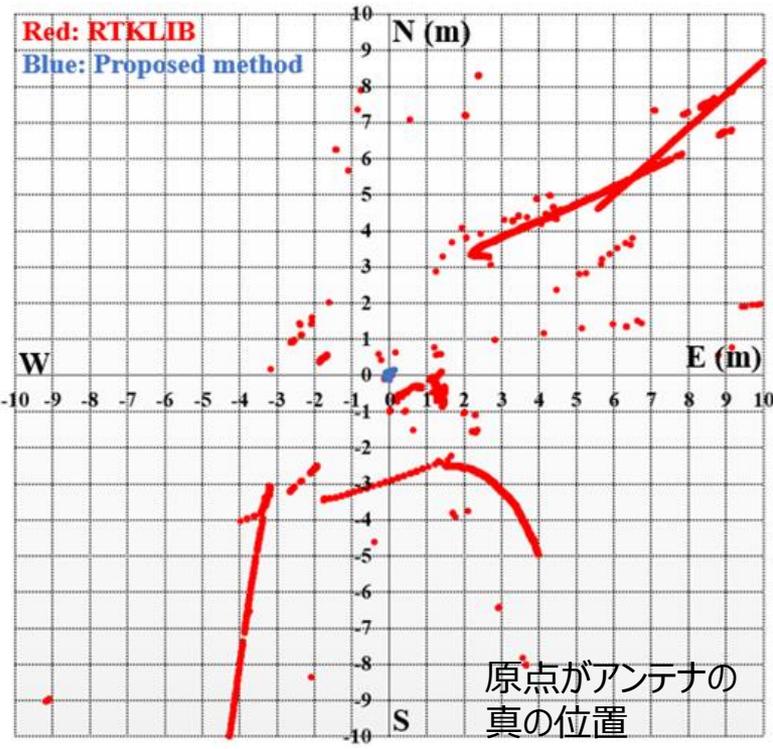


原点がアンテナの真の位置

# 北東壁面の結果



提案手法はRTKLIBよりも良い結果を示した

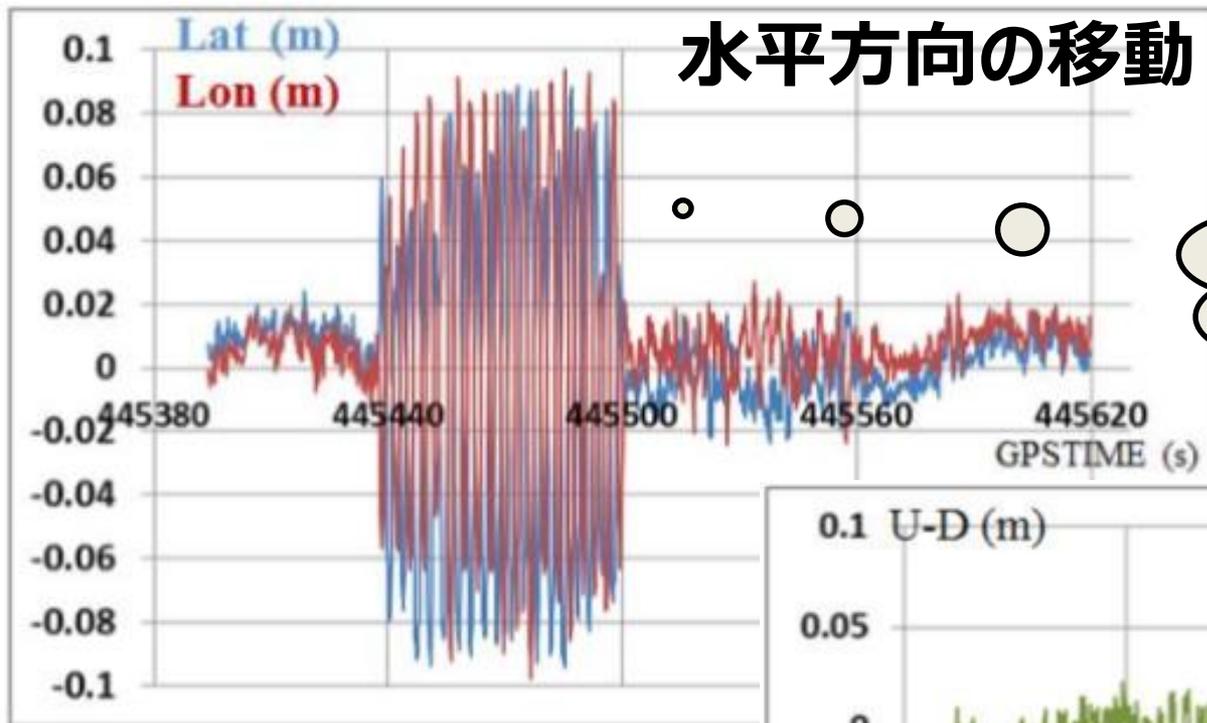


北東方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	29.1[%]	12.5[%]
Fix 解の数	24133(GBQE)	10331(GBQE)
信頼性	35.92[%]	99.40[%]
信頼できる解の数	8669	10269
ずれの平均	20.2	0.046
ずれの標準偏差	254	0.017

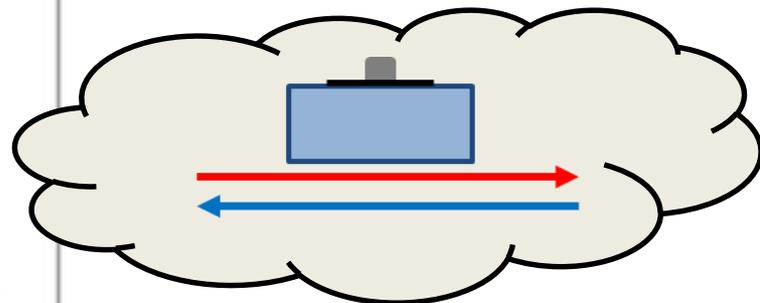
※ マルチGNSSを用いても、2017年秋時点ではRTKに必要な衛星数を確保できる時間帯が短かった

→ 今後の更なる各国測位衛星の近代化や、低コスト多周波対応GNSS受信機(u-blox社のZED-F9Pなど)を利用することで、方向に関係なく提案手法の測位ができるようになると思われる

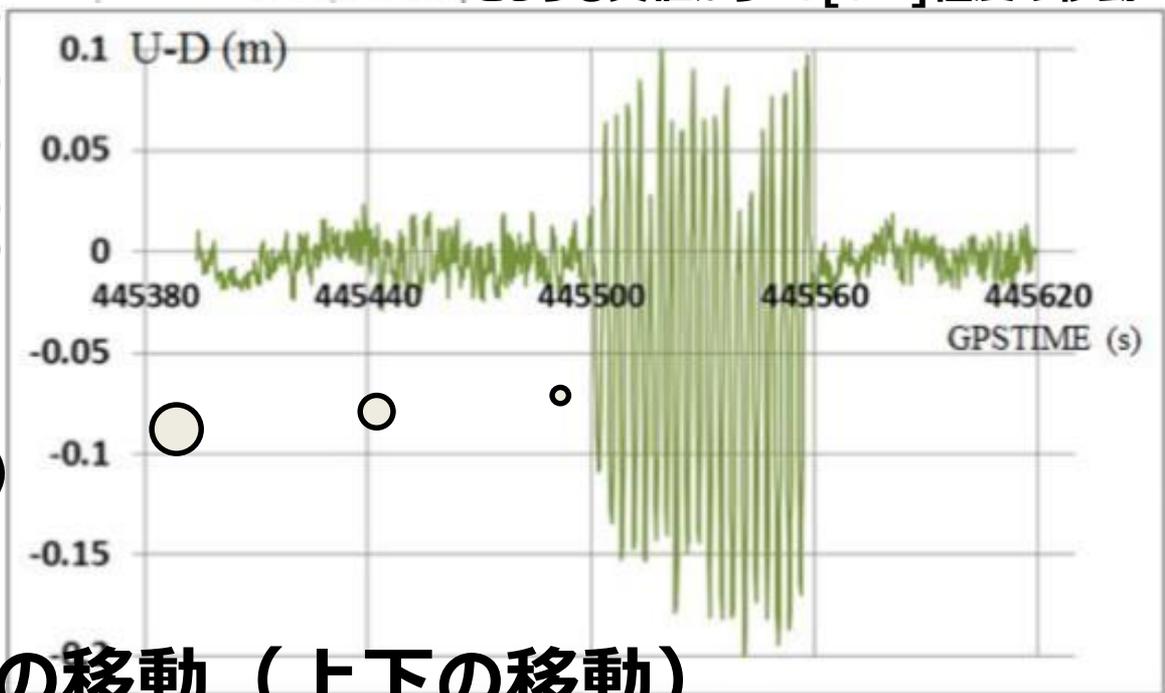
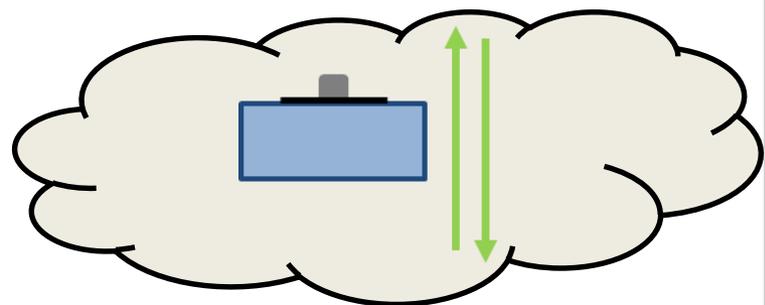
# 本手法のロバストといえる部分



## 水平方向の移動 (左右の移動)

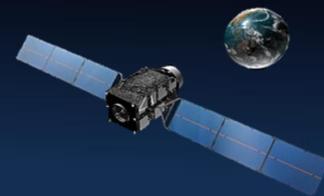


どちらも真値から10[cm]程度の移動



## 垂直方向の移動 (上下の移動)

# 本手法のロバストといえる部分

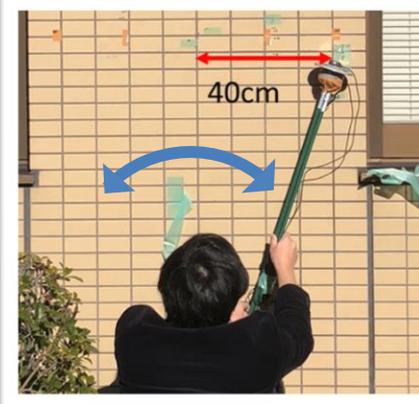


フローチャートで示したアンビギュイティを保持するARモードに関しては、

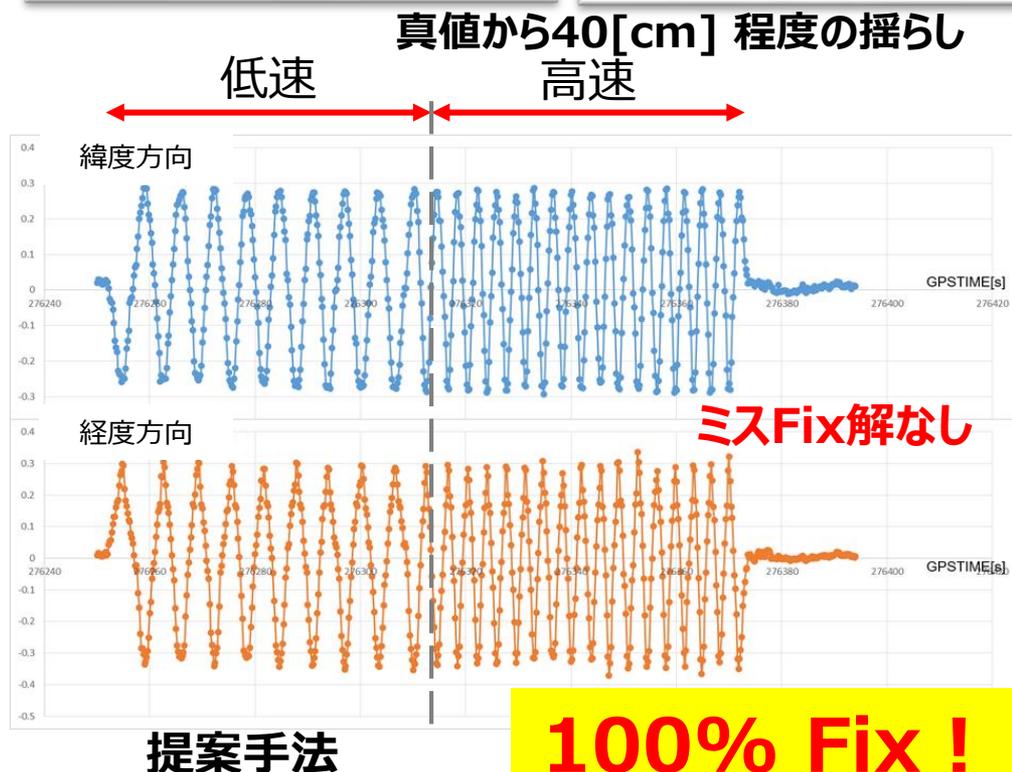
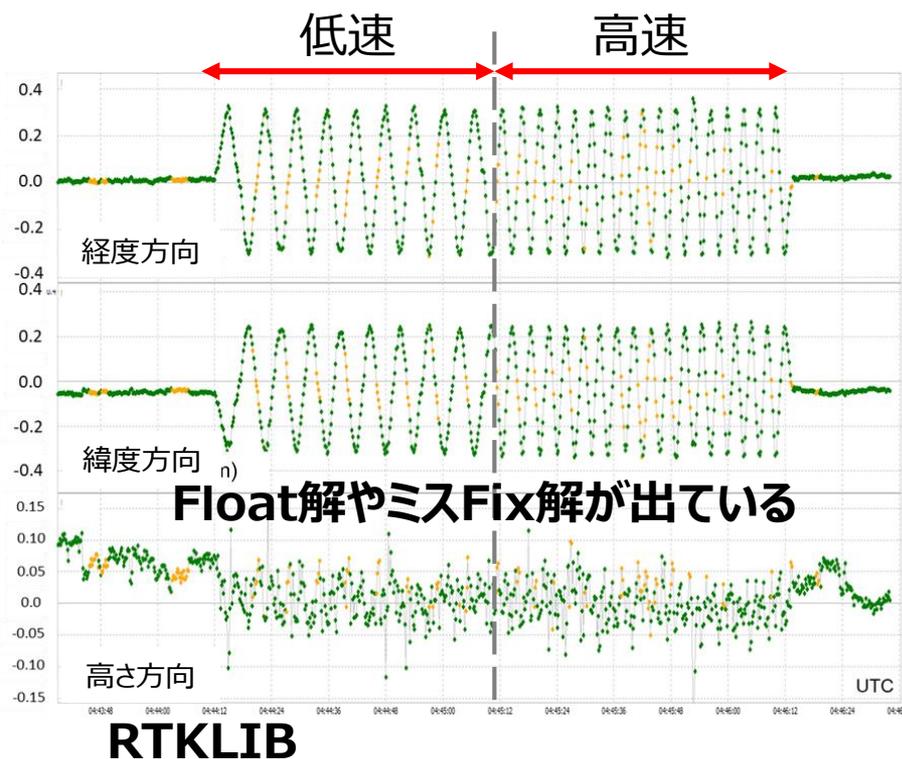
低速の揺らし: 1分  
高速の揺らし: 1分



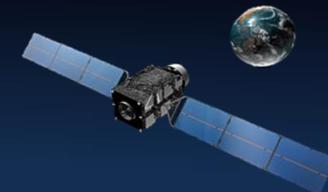
南西1階壁面



40cm

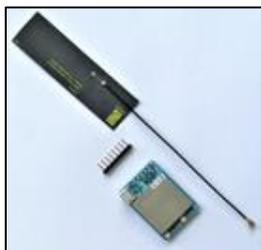


# IoT向けキットの開発

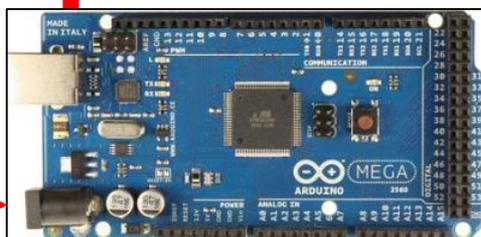


## 移動局側

IIJ mioの  
SIMカード  
と  
3GIM V2.2



Arduino MEGA



電源(バッテリー)



Tallysman社  
TW4721



u-blox社  
NEO-M8P

Ntripサーバー

## 基準局側

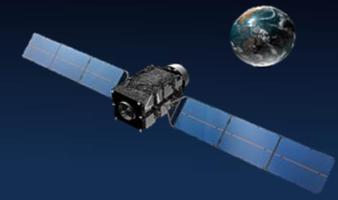
提案手法が  
組み込まれて  
いるPC等

## 観測局側

遠隔でモニタリング



# IoT向けキットの開発



## リアルタイム測位



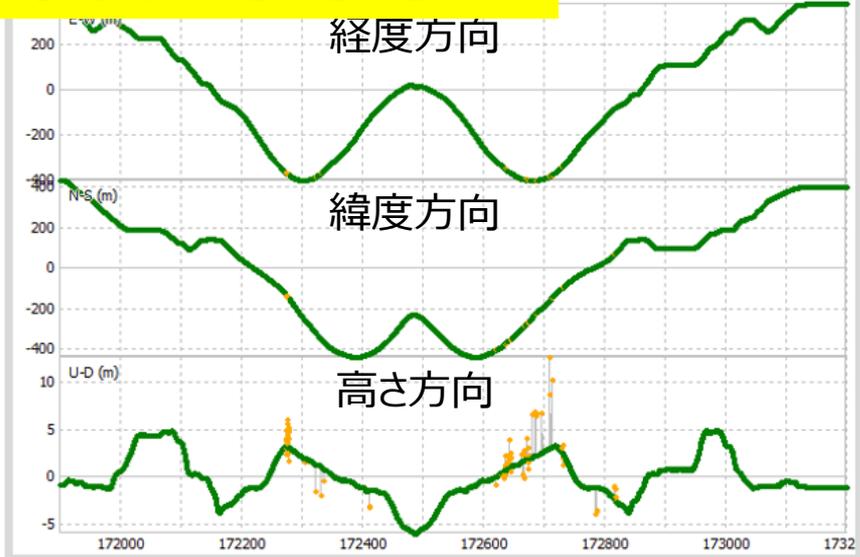
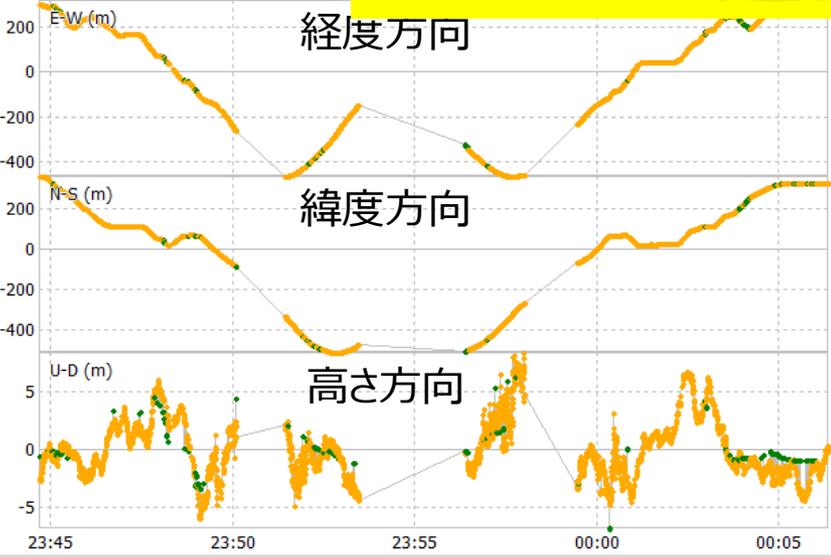
Fix率：  
**5.4%**

## 後処理解析



Fix率：  
**98.6%**

**現場での通信環境によるもの**



# 追加実験 – リアルタイムでのモニタリング



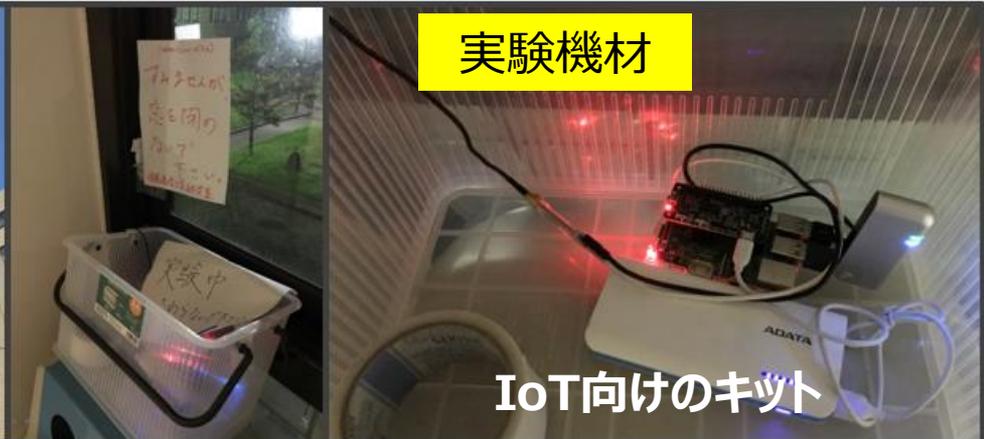
2018年の8月にリアルタイムのモニタリング試験を実施  
10時間分(2Hz)

南東壁面

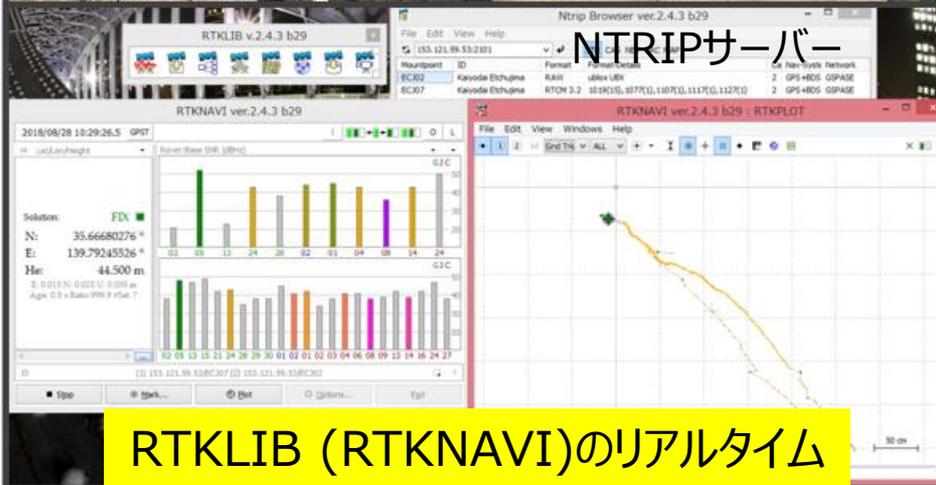


2階

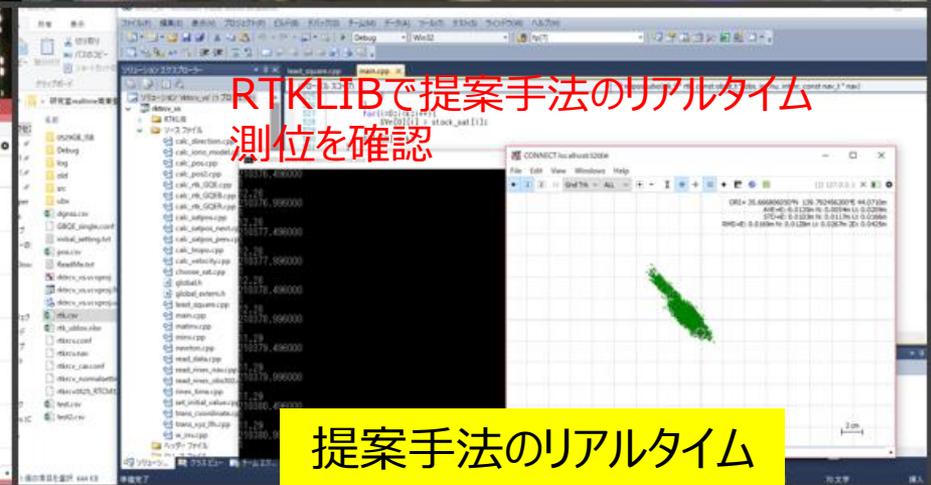
実験機材



IoT向けのキット

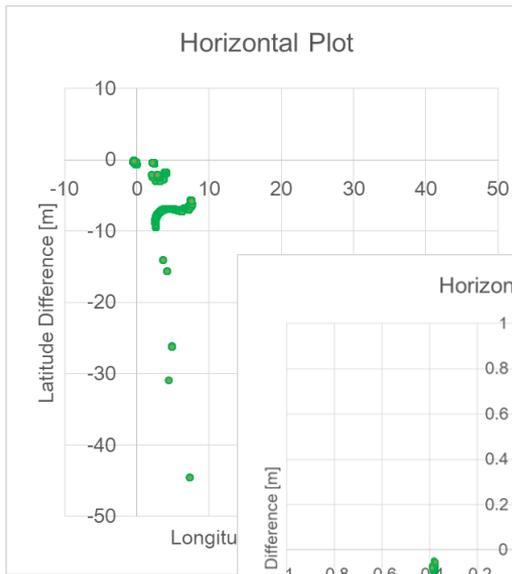
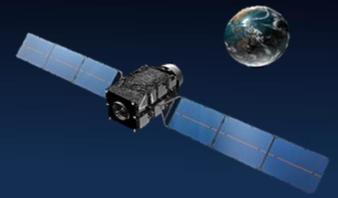


NTRIPサーバー



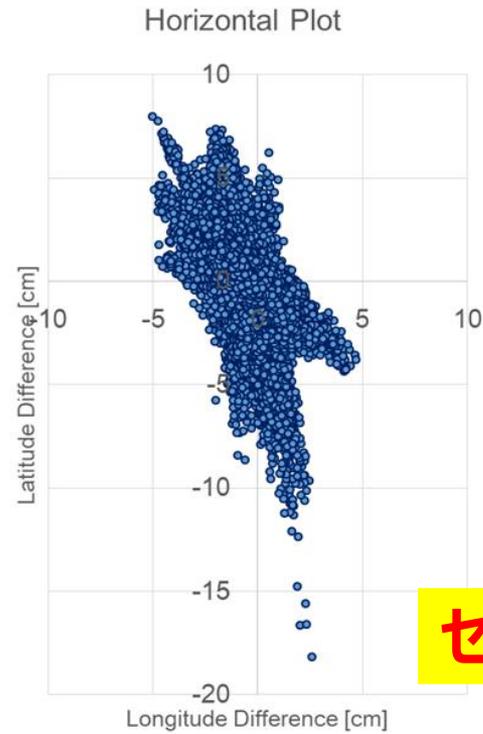
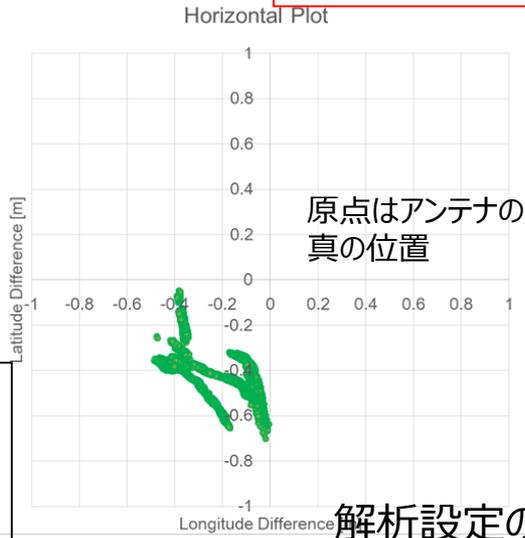
RTKLIBで提案手法のリアルタイム測位を確認

# 追加実験 – リアルタイムでのモニタリング



Fix率 : 50.2%  
 信頼性 : 0%  
 Avg. : 2.19 [m]  
 Std. : 3.14 [m]  
 Max : 45.1 [m]

RTKLIBの  
リアルタイム  
測位結果

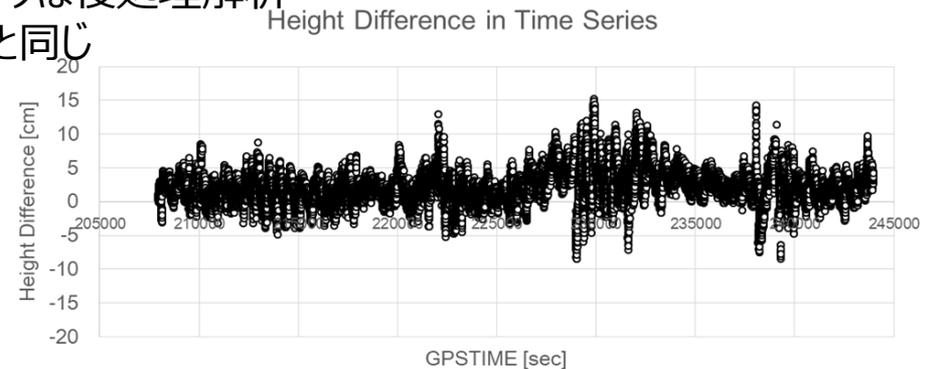
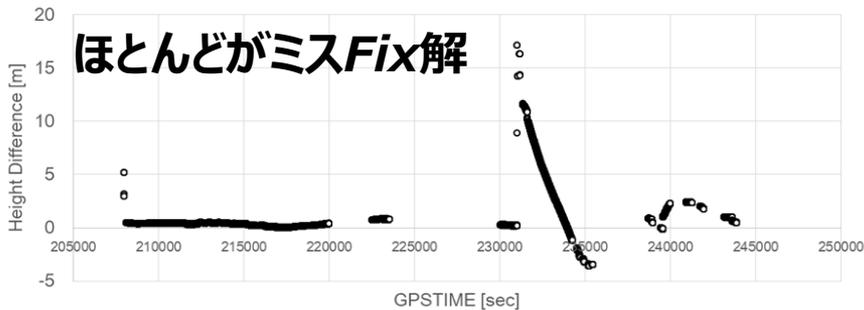


Fix率 : **97.9%**  
 信頼性 : **99.96%**  
 Avg. : 0.0164 [m]  
 Std. : 0.0118 [m]  
 Max : 0.184 [m]

提案手法の  
リアルタイム  
測位結果

センチメートル級

解析設定のパラメータは後処理解析  
で採用していたものと同じ



# まとめ



- 低コストGNSS受信機の利便性向上という観点から、ロバストなRTKの提案手法を用いることにより、細かな構造物の動揺等をリアルタイムでモニタリングできることが確認でき、Fix率や信頼性等が通常のRTKよりも改善されていることが確認できた
- 本研究で示した手法は、類似の環境下で、同様の目的を持つ研究へ応用することが可能であると思われる
- 北東方向の実験結果は実用レベルには至らなかったが、今後進んでくる各国測位衛星の近代化や多周波対応(L1帯とL2帯)の低コストGNSS受信機の利用により、利便性の問題は解決可能である
- IoTを志向したRTKの実用化という面では、通信環境がボトルネックであることが分かった



国立大学法人

東京海洋大学

Tokyo University of Marine Science and Technology

ご清聴いただき  
ありがとうございました

