GNSSにおける搬送波位相遮断環境における測位精度の向上に関する研究

海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

1755027 張皓琰
指導教員 久保信明教授

目次 〉
CONTENTS

01 研究背景と目的

02 市販受信機の評価実験

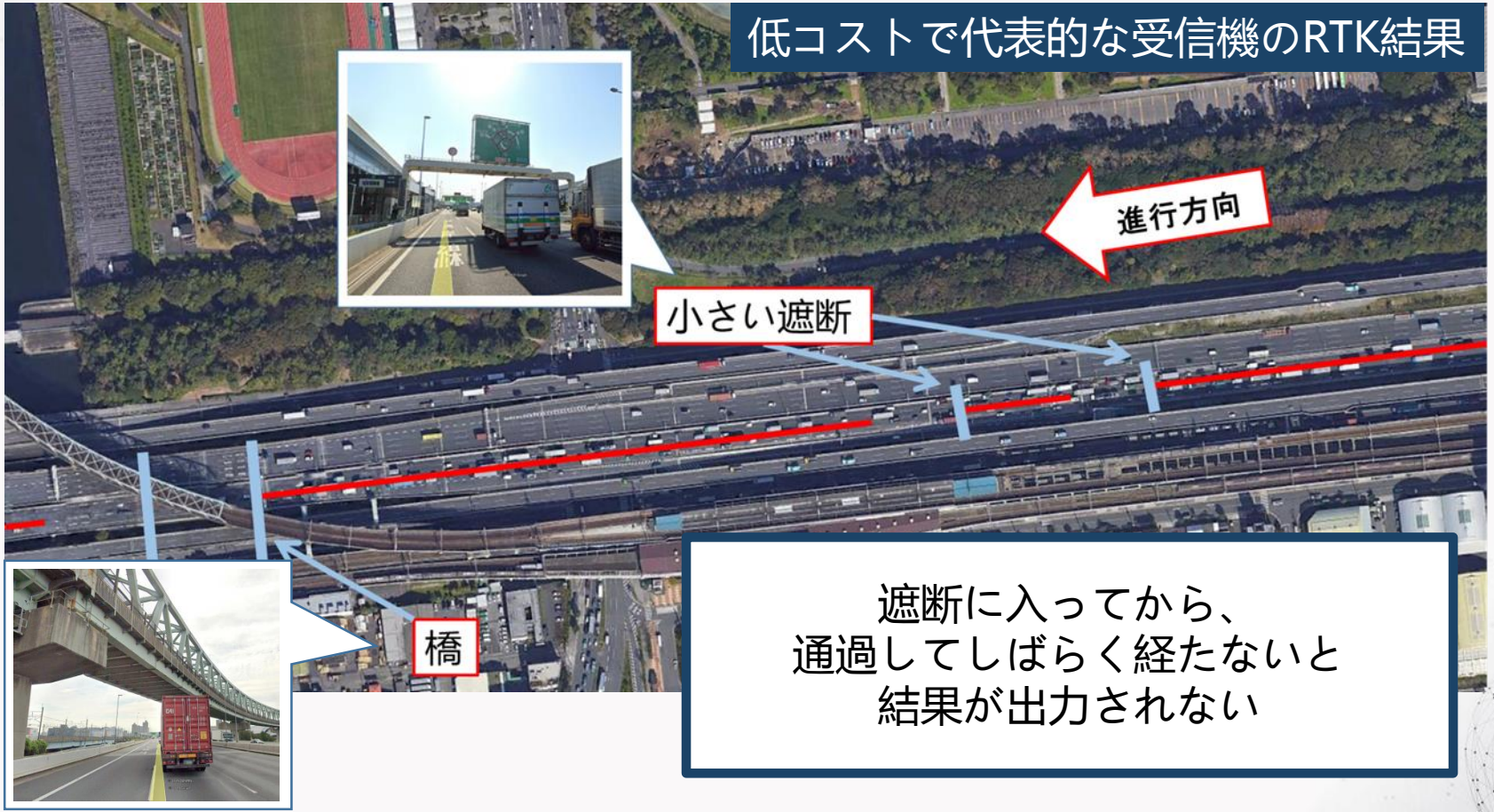
03 改善手法と結果

04 まとめ

01
PART

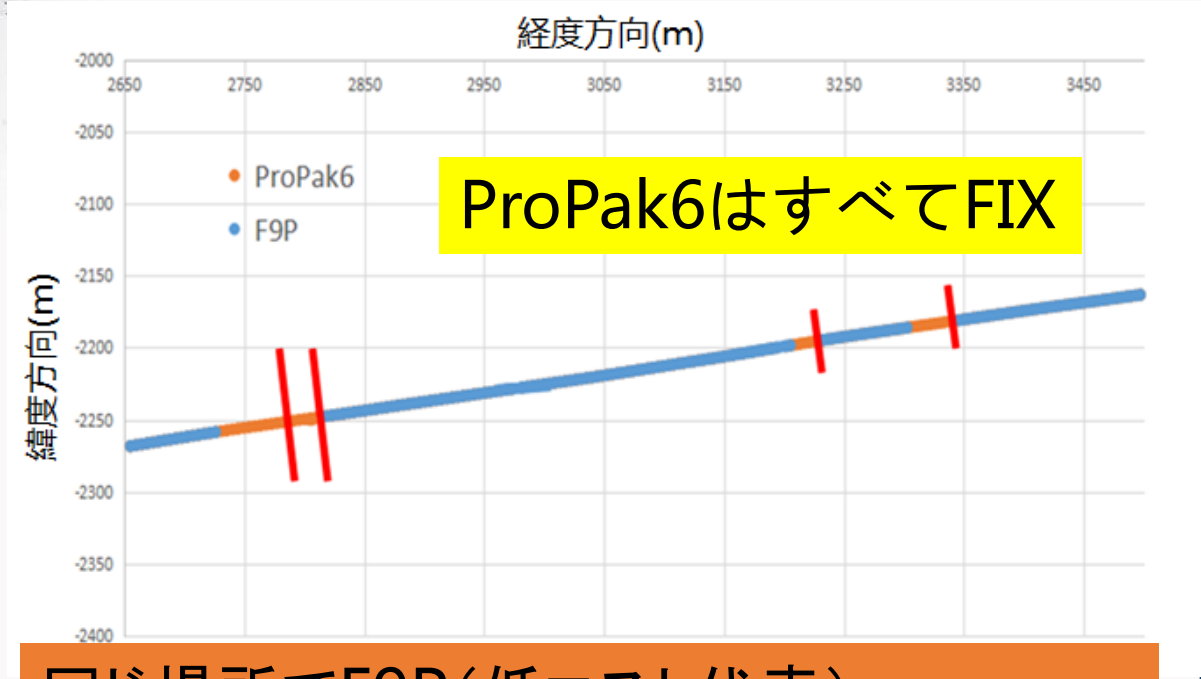
研究背景と目的

研究背景



遮断に入ってから、
通過してしばらく経たないと
結果が出力されない

研究背景



同じ場所でF9P（低コスト代表）
とProPak6（測量級）のRTK結果
→低コストと測量級で若干差がある

ProPak6は
遮断の下を通過しても
結果が連続出力した

こういった現象から、
F9PとProPak6の高架下を
通過後の性能結果を比較し
て差の部分を調査する

研究背景

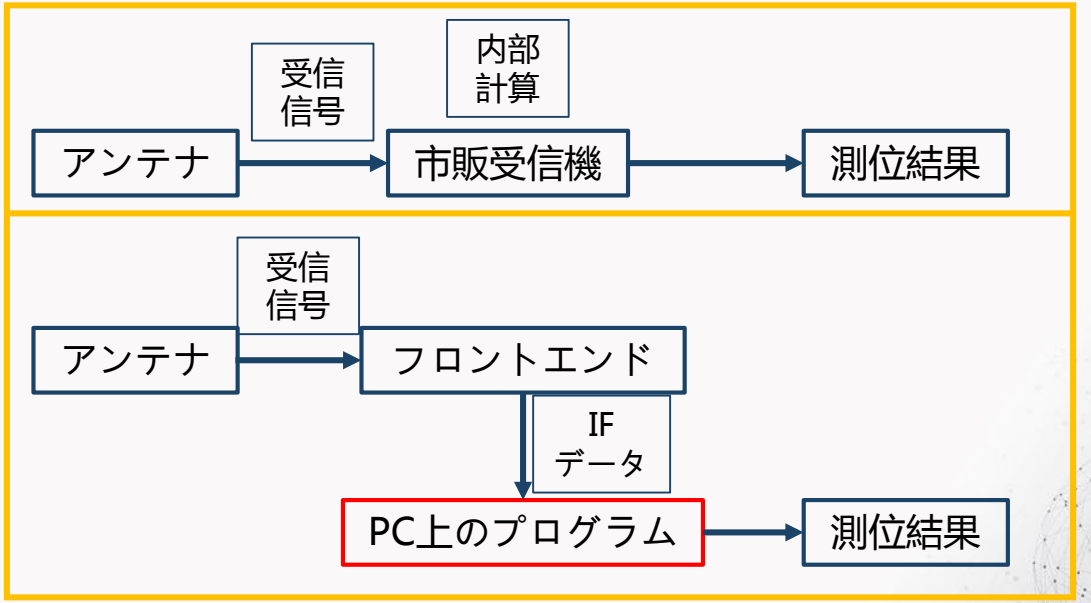
ソフトウェア受信機とはフロントエンドで信号データ（IFデータ）を取得し、以後の処理をPC上で処理する受信機

→市販受信機では出せないデータをチェックできる

✓ 柔軟性が高い

✓ 信号処理アルゴリズムの開発が可能

✓ 内部の計算が全部見られる



研究の目的

一、低コスト受信機、ソフトウエア受信機と高価な測量受信機の高架下通過後の結果を分析し、搬送波位相、信号強度、追尾状態などを比較して高架下通過時の性能差の有無を調査

二、上記の調査結果より、短時間の高架下で測位精度をキープ（水平10㎝程度）する手法を提案しました

高架下瞬断（数秒）でのターゲットとする精度は水平10cm（RTK/PPPのFIX解を出せない区間をつなぐ）

02
PART

高架した追尾性能の評価実験

評価項目（低コスト代表）

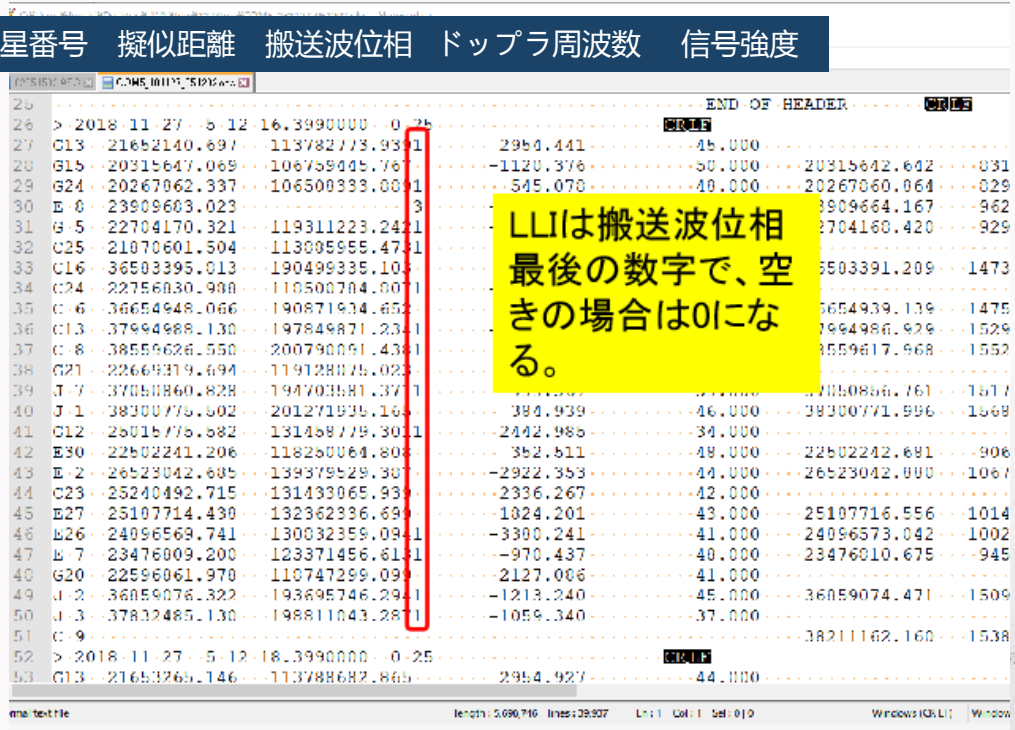
u-blox F9P

2万円ぐらい

RINEXデータの搬送波位相とLLIで測位性能をチェック

LLI（Loss of lock indicator ）について
範囲は0から3である：
- 0:正常の状態または未知
- 1:サイクルスリップの可能性がある
- 2:ハーフサイクルスリップの可能性がある
- 3:問題がありノイズも大きい

衛星番号　擬似距離　搬送波位相　ドップラ周波数　信号強度



LLIは搬送波位相最後の数字で、空きの場合は0になる。

サイクルスリップ：位相の連続性がなくなること
ハーフサイクルスリップ：連続性はあるがRTKができない

評価項目（測量級）

NovAtel ProPak6

100万円以上

RANGEファイル

信号追尾状態

Abbreviated ASCII Example:

```
<RANGE COM1 0 82.0 FINESTEERING 1729 155076.000 02004000 5103 1
46
31 0 24514687.250 0.064 -128825561.494675 0.010 3877.473 45.0 563.310 18109c04
31 0 24514688.765 0.096 -100383546.734328 0.010 3021.415 39.8 558.90 02309c0b
14 0 20345286.178 0.047 -106915249.491005 0.008 90.799 47.6 1028 08109c24
14 0 20345282.367
22 0 20789170.556
22 0 20789164.279
11 0 21977065.699
```

Channel Tracking Example

	N7				N6				N5				N4				N3				N2				N1				N0			
0x	0				8				1				0				9				[illegible]				0				4			
Bit	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Binary	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	Channel Assignment	Lock Flag	Dic[illegible]ering on signal	[illegible]urement	[illegible]mary L1	Reserve	[illegible]al Type					[illegible]ouping	Reserve	[illegible]te System			[illegible]tor Spacing			Code Locked Flag	Parity Flag	Phase Lock Flag		Channel Number				Tracking State			
	Automatic	Lock Out	No Digital Filter	Half Cycle	Primary		L1 C/A					Grouped		GPS			PAC			Locked	Known	Locked		Channel 0				L1 Phase Lock Loop			

位相ロック	搬送波位相の算出
パリティフラグ	ハーフサイクルスリップの可能性
コードロック	擬似距離の測定
ハーフサイクル追加	ハーフサイクルを追加

評価項目（ソフトウエア受信機）

TeleOrbit社GTEC
(フロントエンド)

①**各衛星のPLI（Phase Lock Indicator）**

PLIは信号追尾の良否を判断する指標として一般的に用いられており、0.8以上であることが望ましいとされている。算出式は以下の通りである。

$$PLI = \frac{I_P^2 - Q_P^2}{I_P^2 + Q_P^2}$$

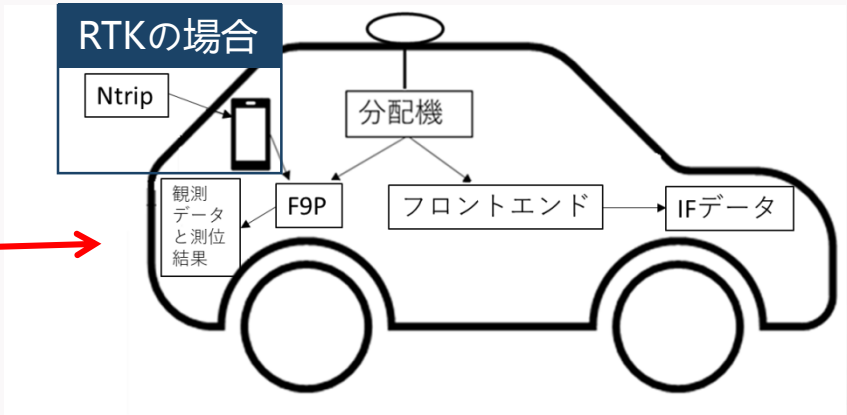
②**航法メッセージ**

上記のI値（各衛星からの航法メッセージ）を正しく復調できているかどうかまでSDRではチェックできる。これが正しく復調できることはRTKにとって重要

実験概要

今回の目的である測位性能チェックはu-blox F9P（低コスト代表）、NovAtel ProPak6（測量級）とフロントエンド（ソフトウエア受信機）を用いて以下の車両実験を行った：

(1) 木の下を通過（ u-blox F9P、フロントエンド）
(2) 首都高速（ u-blox F9P、NovAtel ProPak6）
(3) 相生橋を通過（ u-blox F9P、NovAtel ProPak6、フロントエンド）

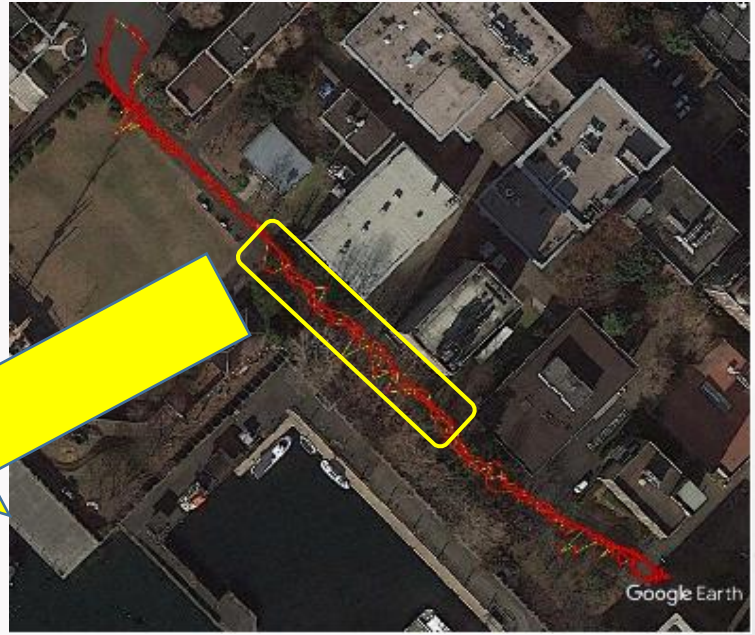


F9Pとフロントエンドを用いた実験する場合

(1)木の下を通過実験

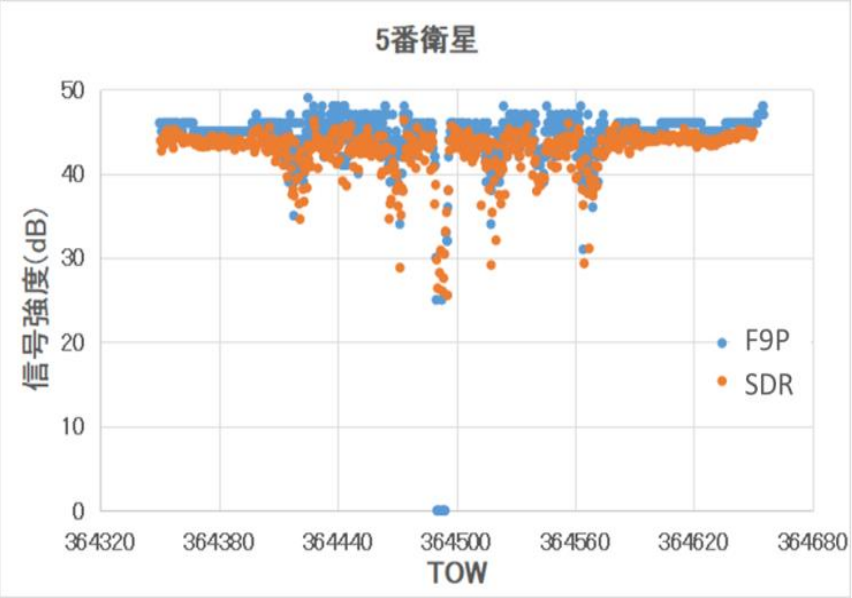
実験時間：2018年11月27日　14:12:30～14:17:30(JST)
実験場所：東京海洋大学校内木の下
受信機： u-blox　F9P、フロントエンド
頻度： 5 Hz
衛星システム：GPSとQZSSのみ

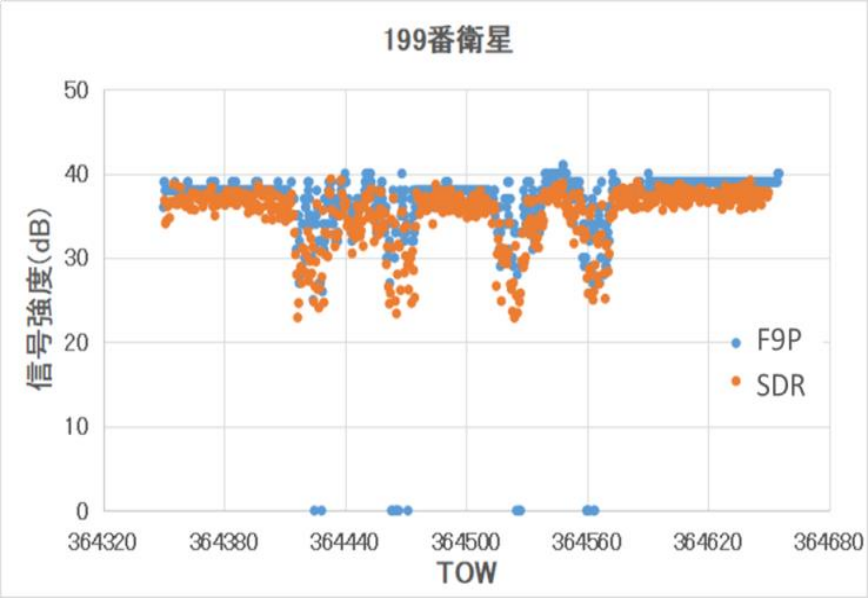
- 研究室のSDR解析ソフトで実験時間を5分に設定
- 右図のルートで木の下を2回往復



木の下2回往復の走行コース
(F9Pの単独測位結果)

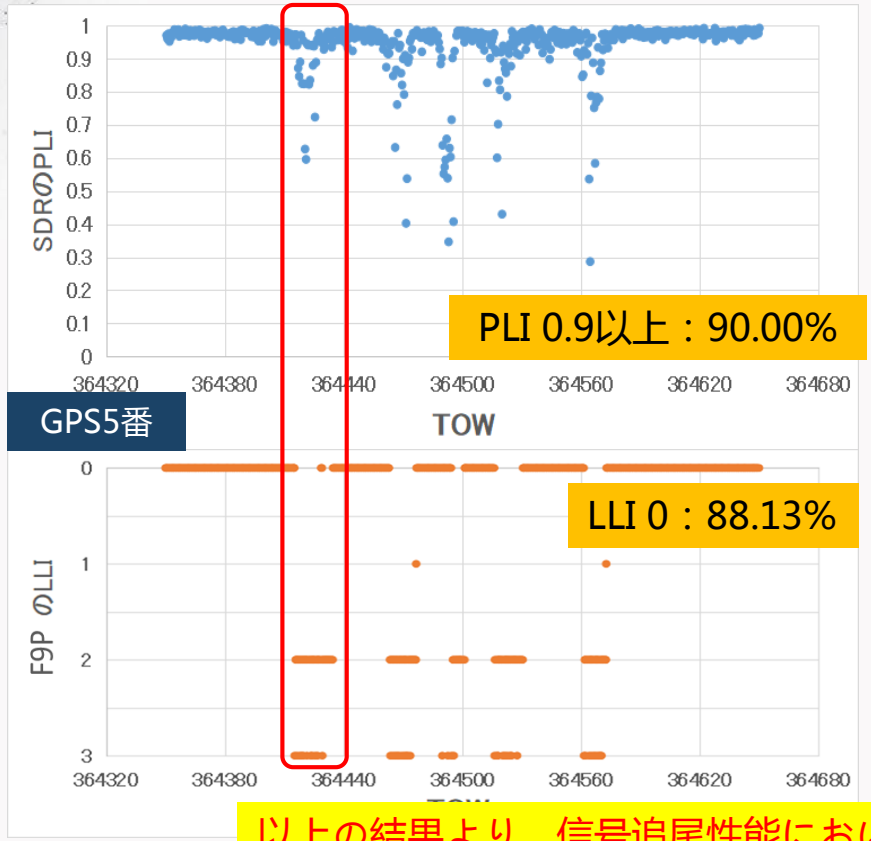
(1)実験結果（信号強度の比較）

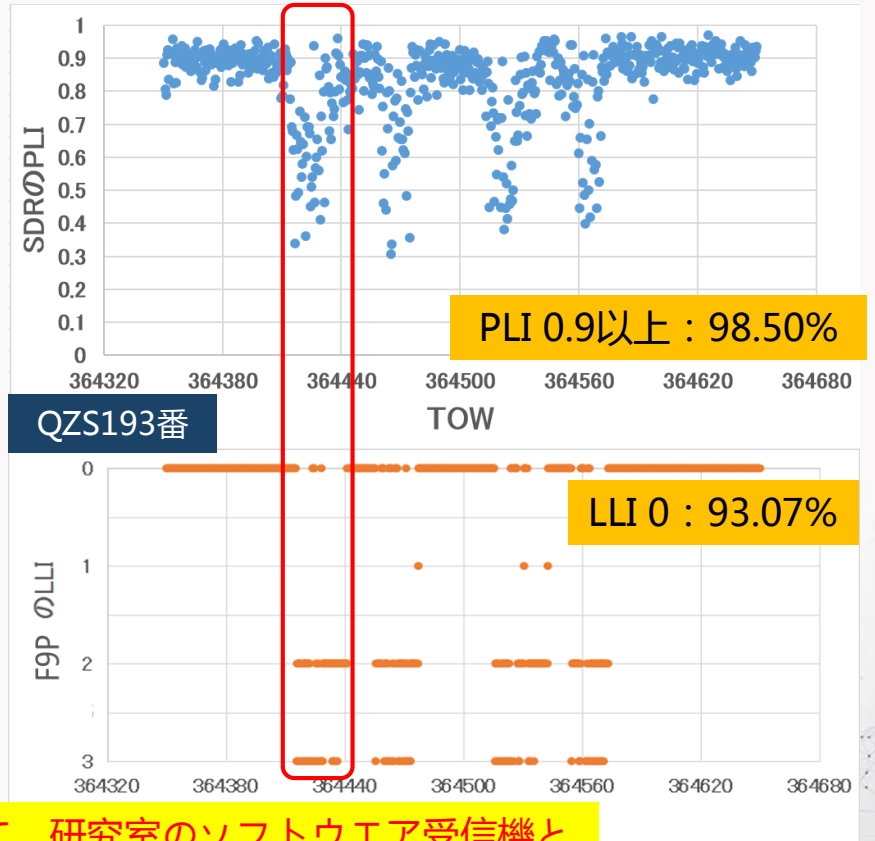




信号強度の比較をとることで、若干SDR側が低く出るものの、変動は概ね同様の結果

(1)実験結果（PLIとLLIの比較）



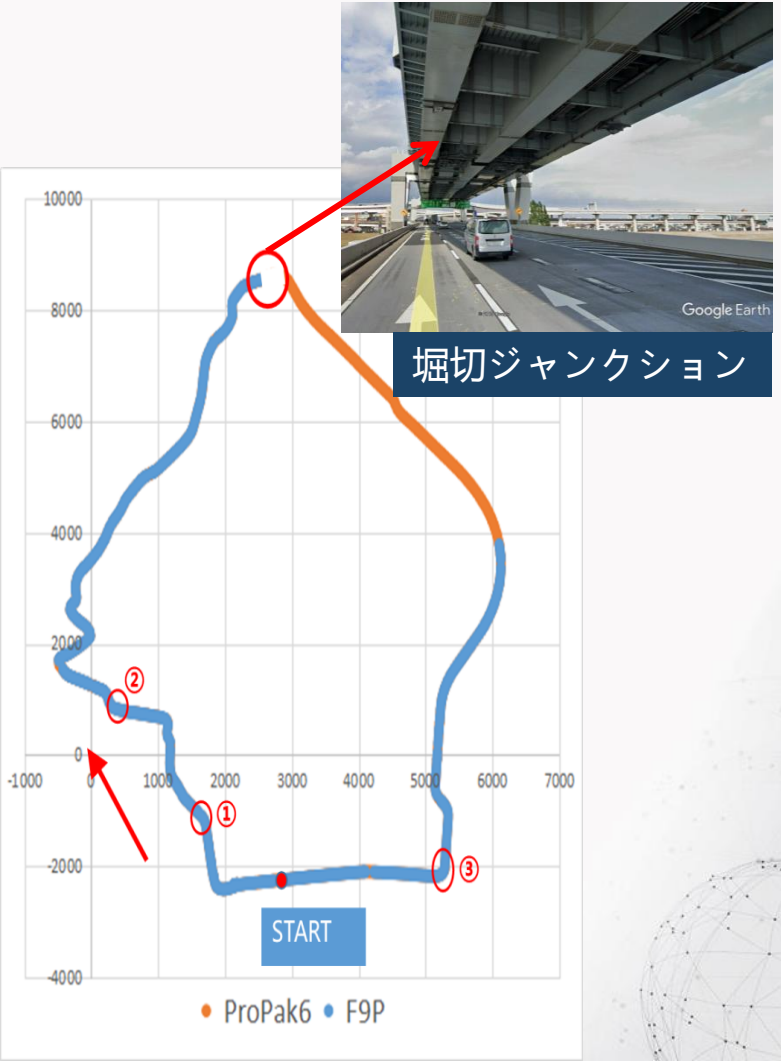


以上の結果より、信号追尾性能において、研究室のソフトウエア受信機とu-blox社のF9Pで、木の下の環境で大きな差はみられなかった

(2)首都高速

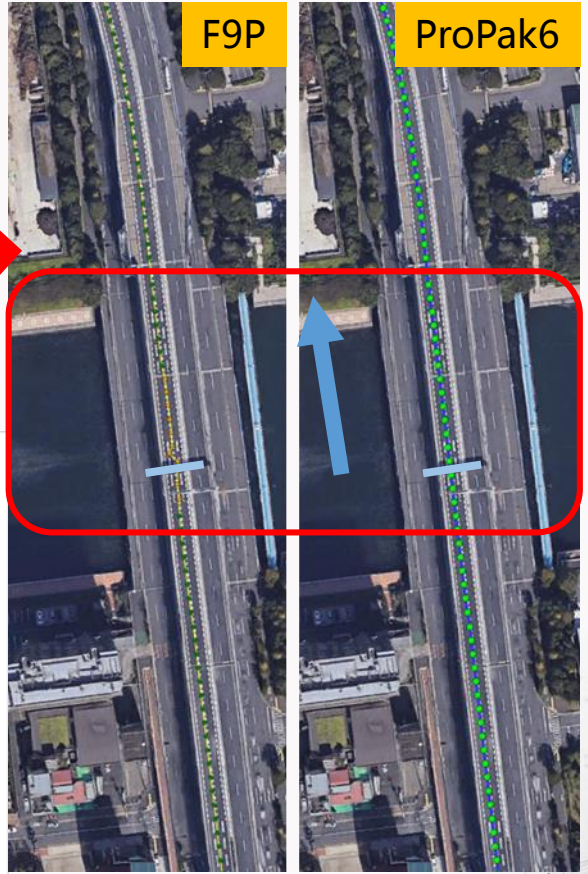
実験時間：2019年2月5日　15:04:10～15:28:23
実験場所：首都高速道路
受信機：u-bolx F9P、Novatel ProPak6
頻度：F9P-5Hz、ProPak6-10Hz
衛星システム：GBQRE

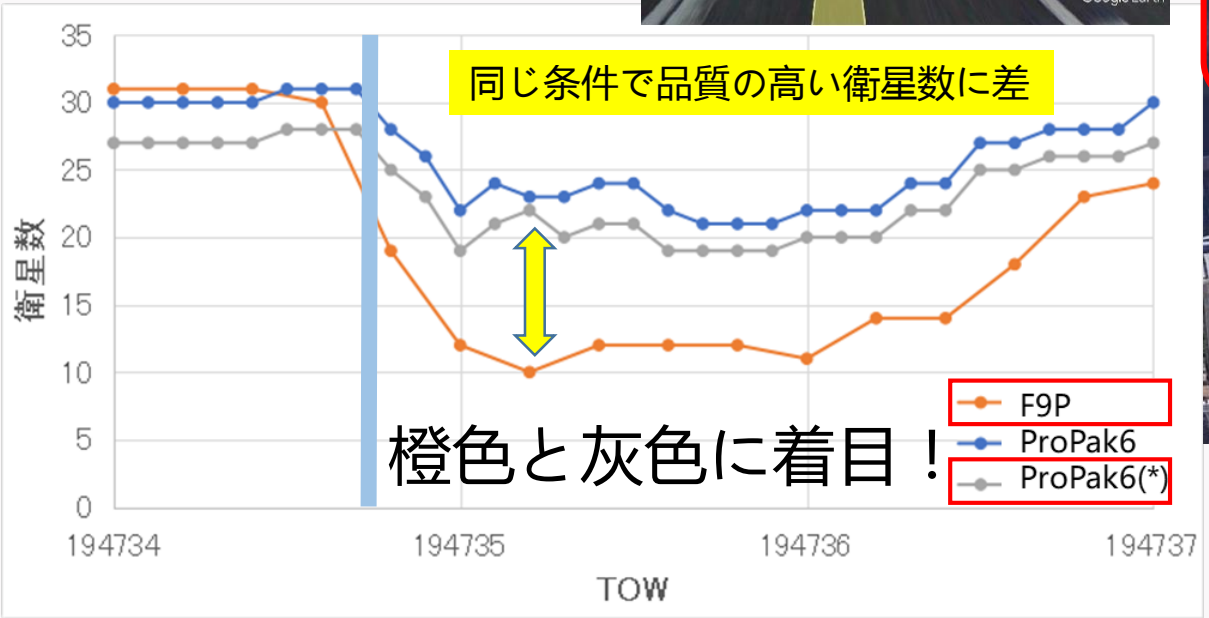
- 首都高速1週
- 堀切ジャンクションでF9Pが
長い時間RTKに復帰しなかった
- 本研究の対象となる事例（数秒の瞬断）は
F9PのRTKができなかった箇所で25地点
- 右に三つ通過例を挙げた（次スライド）



通過点①
(小さい高架)

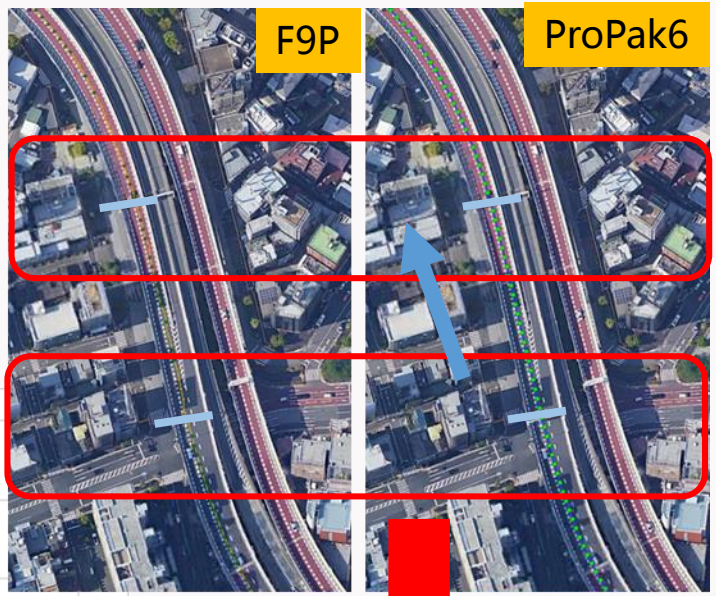
GBQRE
衛星数をチェック



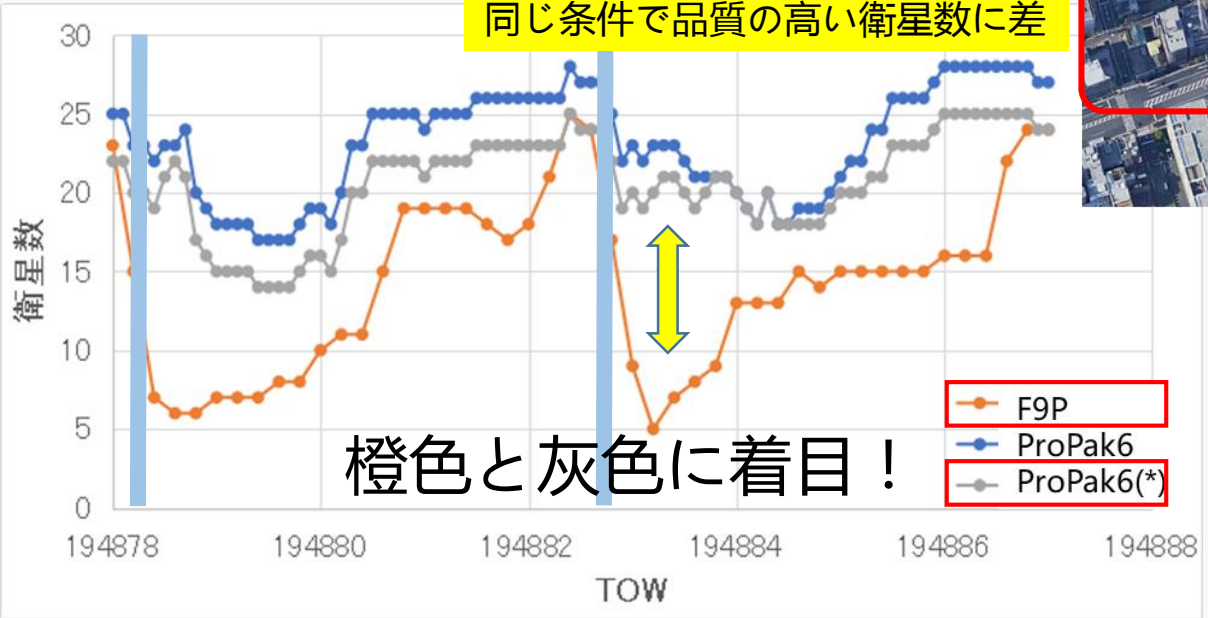


通過点②
(連続高架)

GBQRE
衛星数をチェック



同じ条件で品質の高い衛星数に差

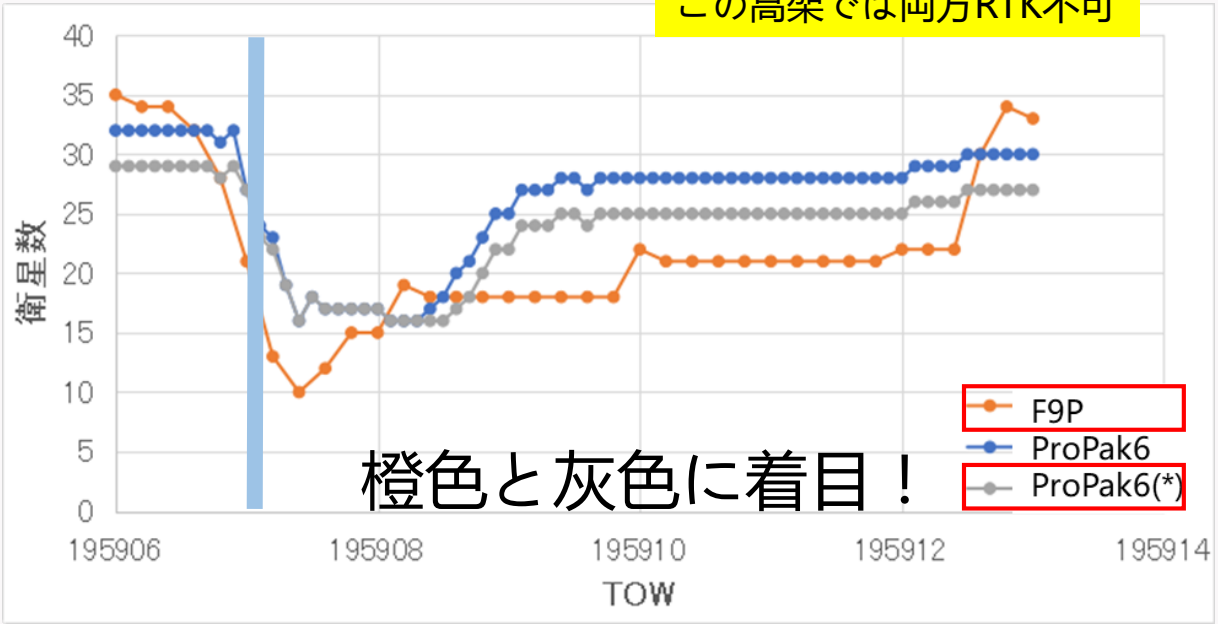


橙色と灰色に着目！

通過点③
(小さい高架)

GBQRE
衛星数をチェック

この高架では両方RTK不可



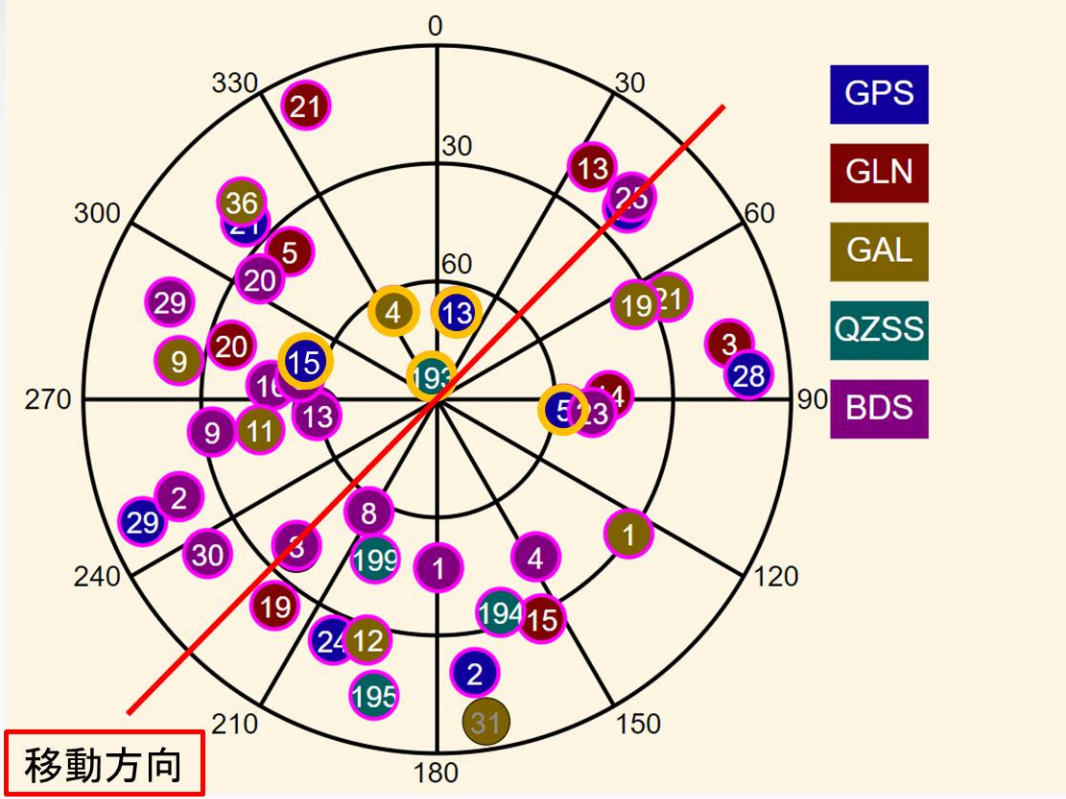
(3)相生橋を通過実験

通過時の信号遮断状況

u-blox F9P、フロントエンドとNovAtel受信機(ProPak6)を車に載せて以下のコースで2回往復して、橋の下を4回通過した

(3)衛星配置

2019年9月14日8時50分(UTC)



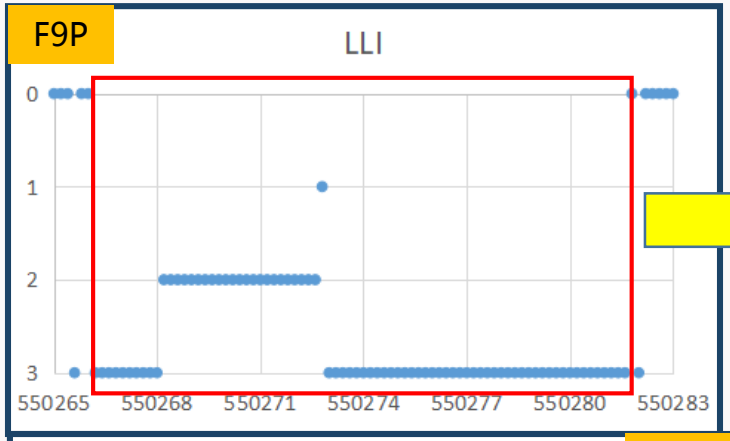
SDRで追尾性能を確認するため
仰角高いGPS5番、13番、15番
GAL4番とQZSS193番を選択した

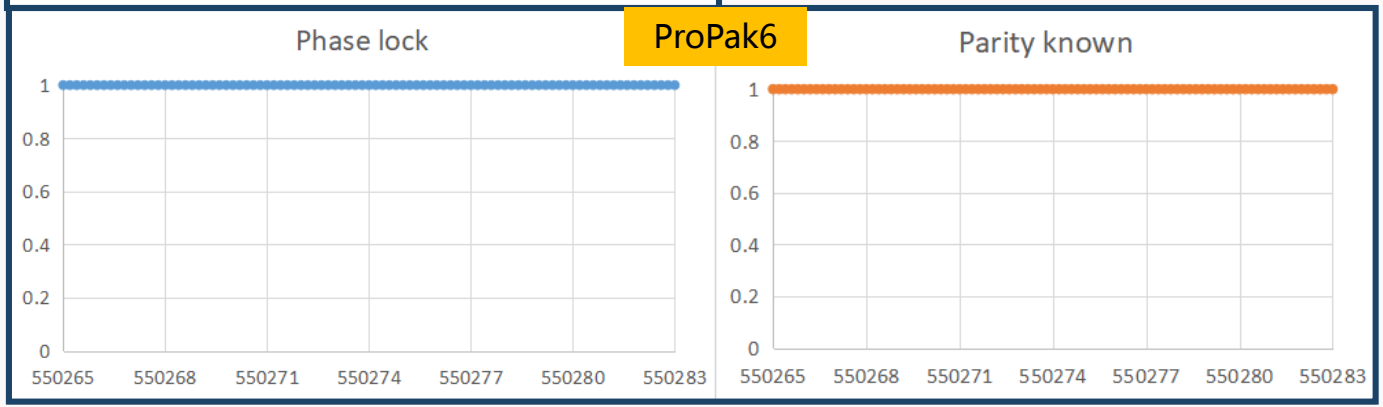
通過時間帯：
①550265～550282(17秒)
②550427～550438(11秒)
③550487～550498(9秒)
④550611～550623(11秒)

(3)F9PとProPak6の比較結果

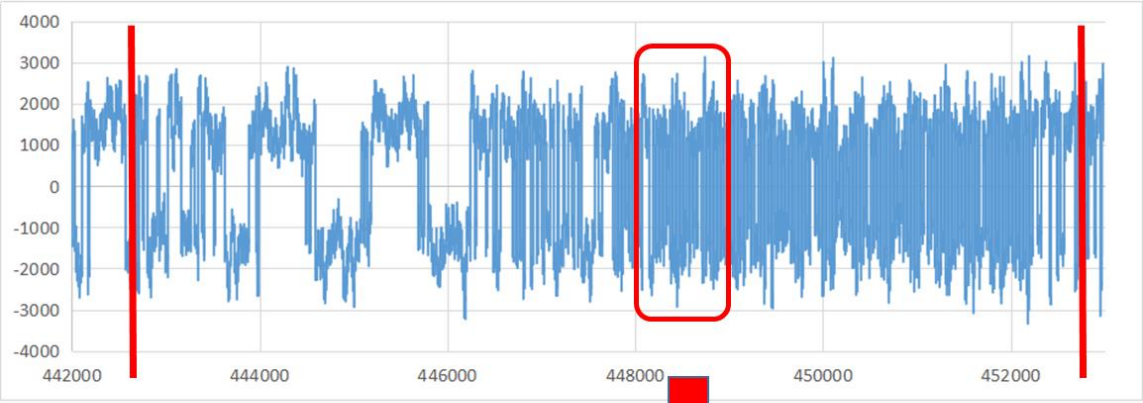
(一回通過の時間帯)

193番

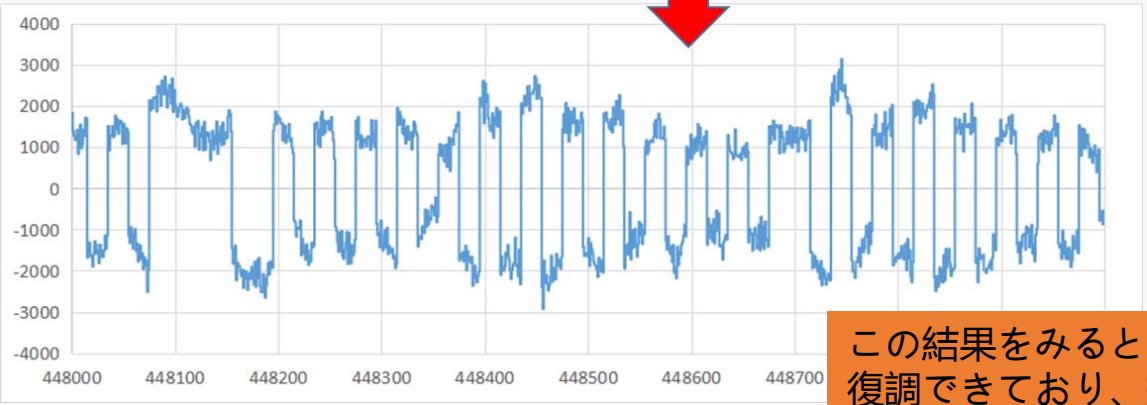




(3)SDRの追尾結果(QZS193番)



上記と同じ通過時の
追尾結果



1秒に拡大して、50bpsで送信され
1周期20msの航法メッセージ
データが見える

(横軸:SDR時刻[ms]　縦軸:同位相)

この結果をみると193番衛星は航法メッセージも
復調できており、搬送波位相追尾の問題はなかった。
→F9Pがやはり何か不調だった

3種類の高架実験よりわかったこと

低コストと測量級受信機及びソフトウエア受信機を用いて、3種類の高架下で搬送波位相追尾性能の実験を実施した

①木の下の実験→低コスト受信機とソフトウエア受信機の出力にほぼ差がないことがわかった
②首都高速の実験→測量級受信機のほうが、追尾できる搬送波位相の数が多く、瞬断ではRTKが継続するケースが多かった（低コストでも継続できるとき有）
③相生橋の実験→橋の下でもFIXすることがあり、精度も問題ないことがわかった。測量級受信機のほうがロバストであり、ソフトウエア受信機でも確認できた

3つの実験を通して

- 柱の大きさがそれほど大きくない高架下において、低コスト代表及び測量級受信機において、搬送波位相の追尾自体（RTKは無視）は可能であることがわかった
- 特に、測位演算に必要な5-6機以上は常にあった
- また、ソフトウエア受信機での評価においても、例えば柱の連続する相生橋の下において、航法メッセージまで復調できていることがわかった。これは搬送波位相の品質が高いことを意味している
- 以上より、**本実験であげたような高架の環境では、RTKはできないとしても、搬送波位相は利用できることがわかった**

03
PART

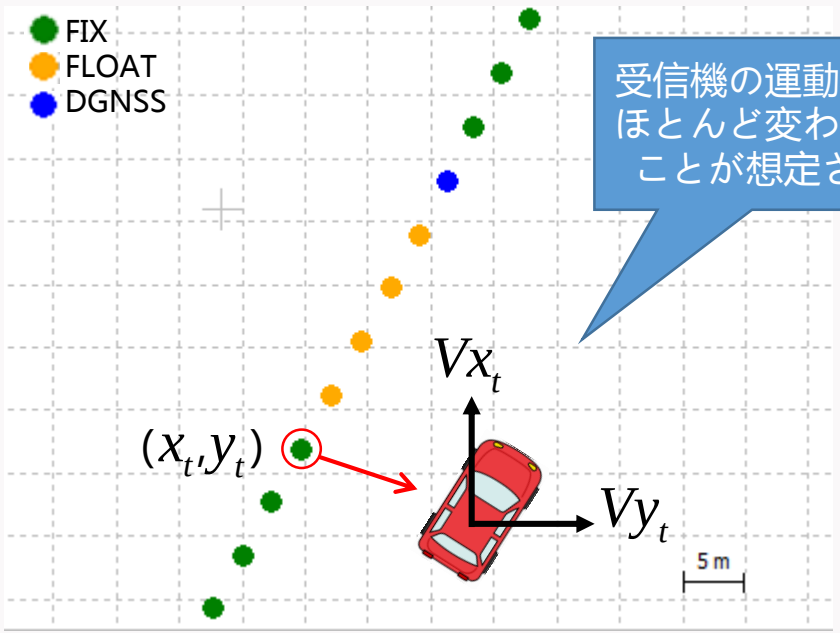
改善手法と結果

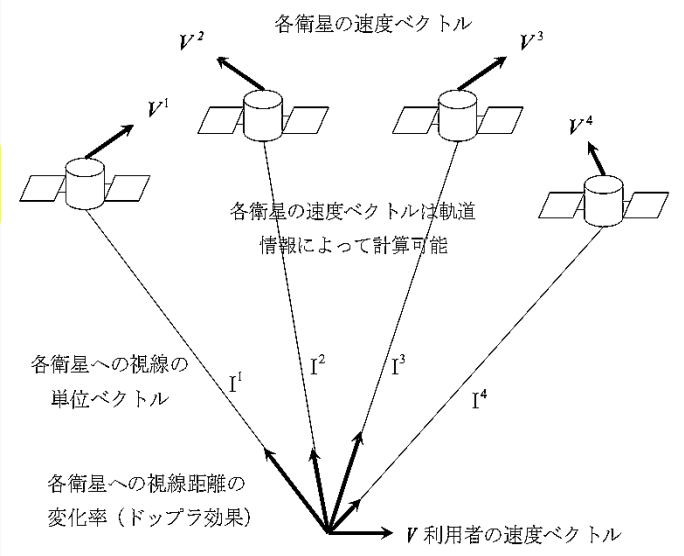
首都高速等の数秒間以内の瞬断に対して、RTK/PPPができないときに
10cm以内の精度で位置を継続させる

改善手法

ドップラ周波数からの速度を利用して位置精度を改善

RTKの場合、搬送波位相のサイクルを求める必要があるが
ドップラ周波数はサイクルまで求めず位相情報のみ利用





「GNSS衛星の速度」と「衛星と自車との間の相対速度」により自車の3次元速度ベクトルが得られる
それぞれの速度成分を積算することで位置を推定

$$x_{t+1} = x_t + Vx_t \times \Delta t$$
$$y_{t+1} = y_t + Vy_t \times \Delta t$$

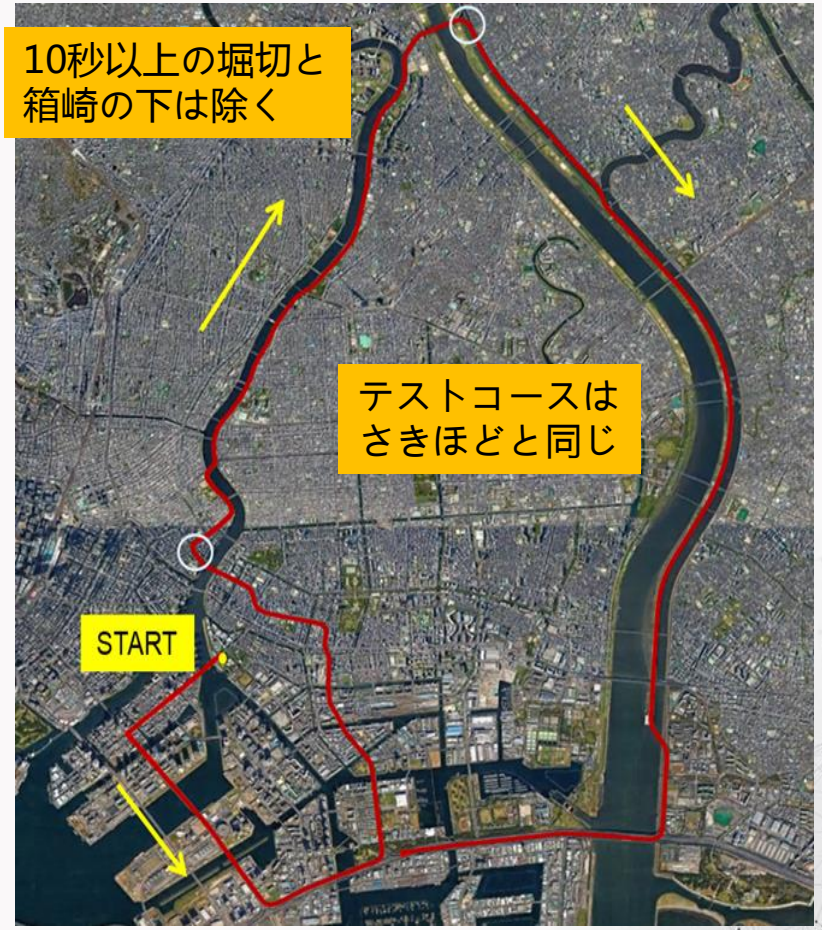
利用データ：①位置情報、②ドップラ速度

改善手法を確認する実験

- 海洋大の屋上のF9P（低コスト代表） 受信機に対して、車にも載せて首都高速でRTK実験を行った（2019年12月）

- 右側の周回部分の高速を2周した。1周で高架は63個存在（Googleより）。2周走行中に45回、RTKができない時間帯があった。それ以外はFIX（数cm）していた。

- ドップラ周波数（F9P出力）から速度推定に関する衛星選択は→搬送波位相がある、30dBHz以上　仰角15度

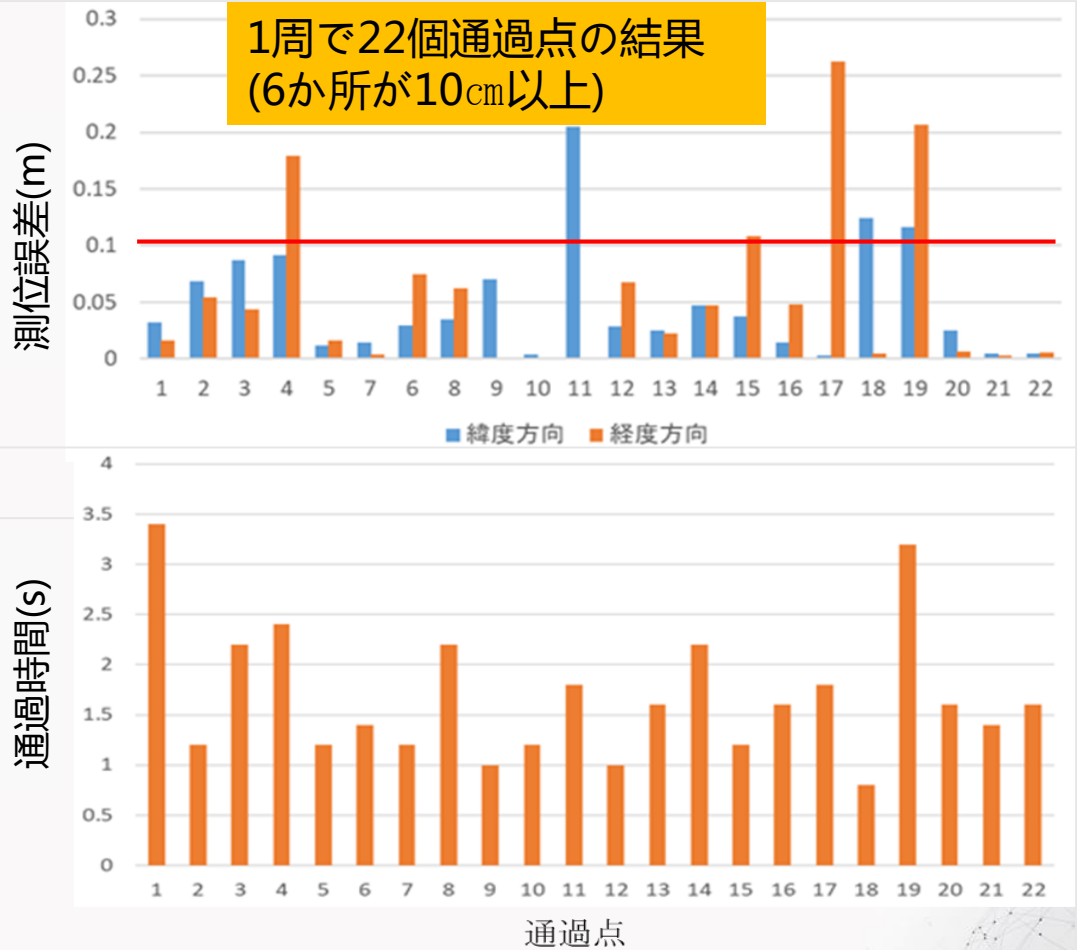


RTKとの比較結果

全通過点の比較結果：

評価項目	比較結果(m)		
	緯度方向	経度方向	水平方向
平均値	0.06	0.07	0.08
標準偏差	0.06	0.08	0.07

- 結果より、45の通過点のうち、32の測位誤差は10cm以下になった
- 通過時間は全部4s以内



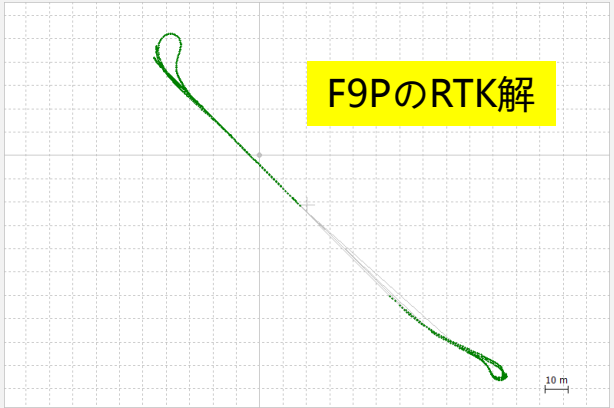
ドップラ速度支援方法では、短時間（数秒以内）の信号遮断に対して、ほとんどの精度で10cm程度の測位結果が得られた

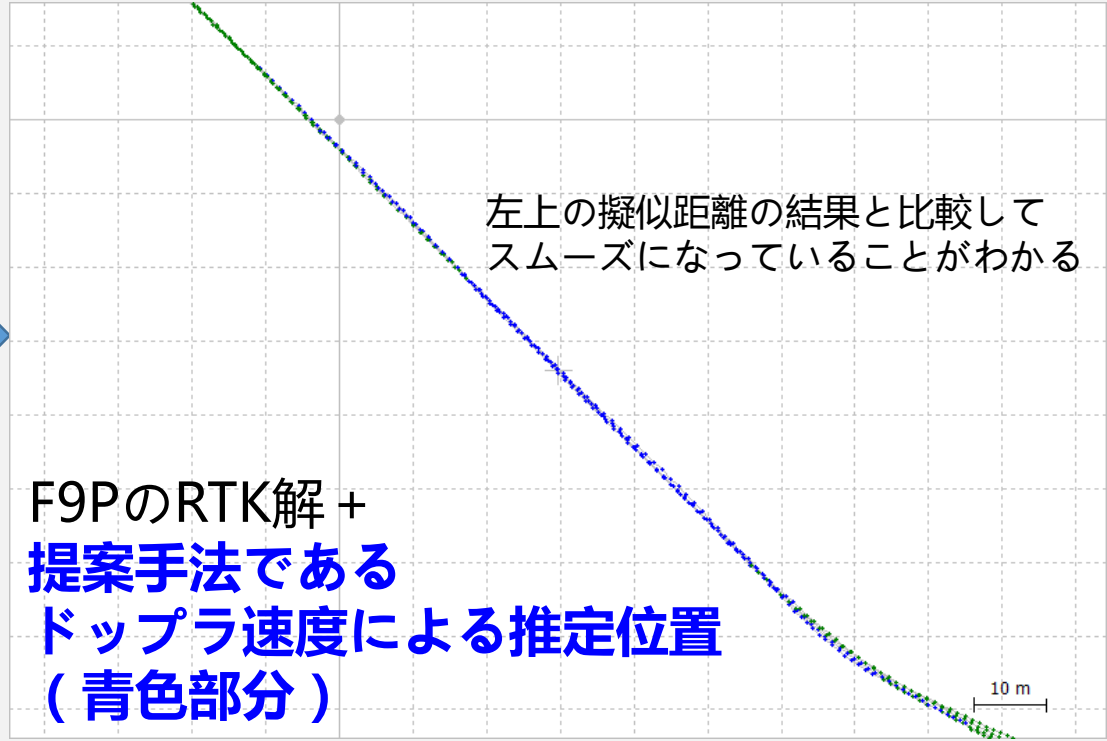
10cm未満に改善できなかった箇所

周囲の遮蔽物によるマルチパスは、信号遮断の発生前の測位精度とドップラ速度精度の低下をもたらす可能性がある

連続的な高架通過したから、搬送波位相の復調状態より測位精度とドップラ速度精度が下がる可能性がある

木の下でのドップラ速度推定による位置





04
PART

結論

結論

- 高速高架等の短時間の電波遮断において、低コスト受信機は信号追尾できず、数秒間やや不安定な測位結果を出すケースが多かった。測量級受信機ではそのようなケースが低減されていた。

- 研究室のソフトウエア受信機を利用することで、実際に道路の橋梁下でも安定して搬送波位相が追尾できるケースがあることを確認でき、搬送波位相そのものは位置推定に利用できそうであると予測しました。

- 実際に、搬送波位相の元の値であるドップラ周波数を利用し、短時間（数秒以内）の信号遮断に対して、精度の高い連続的な軌跡が得られることがわかった。水平方向の精度はほぼ10cm程度未満であり、10㎝を超える部分は今後の課題である。

ご清聴いただき
ありがとうございました