

# ソフトウェアGNSS受信機を利用した 信号追尾に関する研究

---

海運ロジスティクス専攻

1355005 篠原駿吾

# 目次



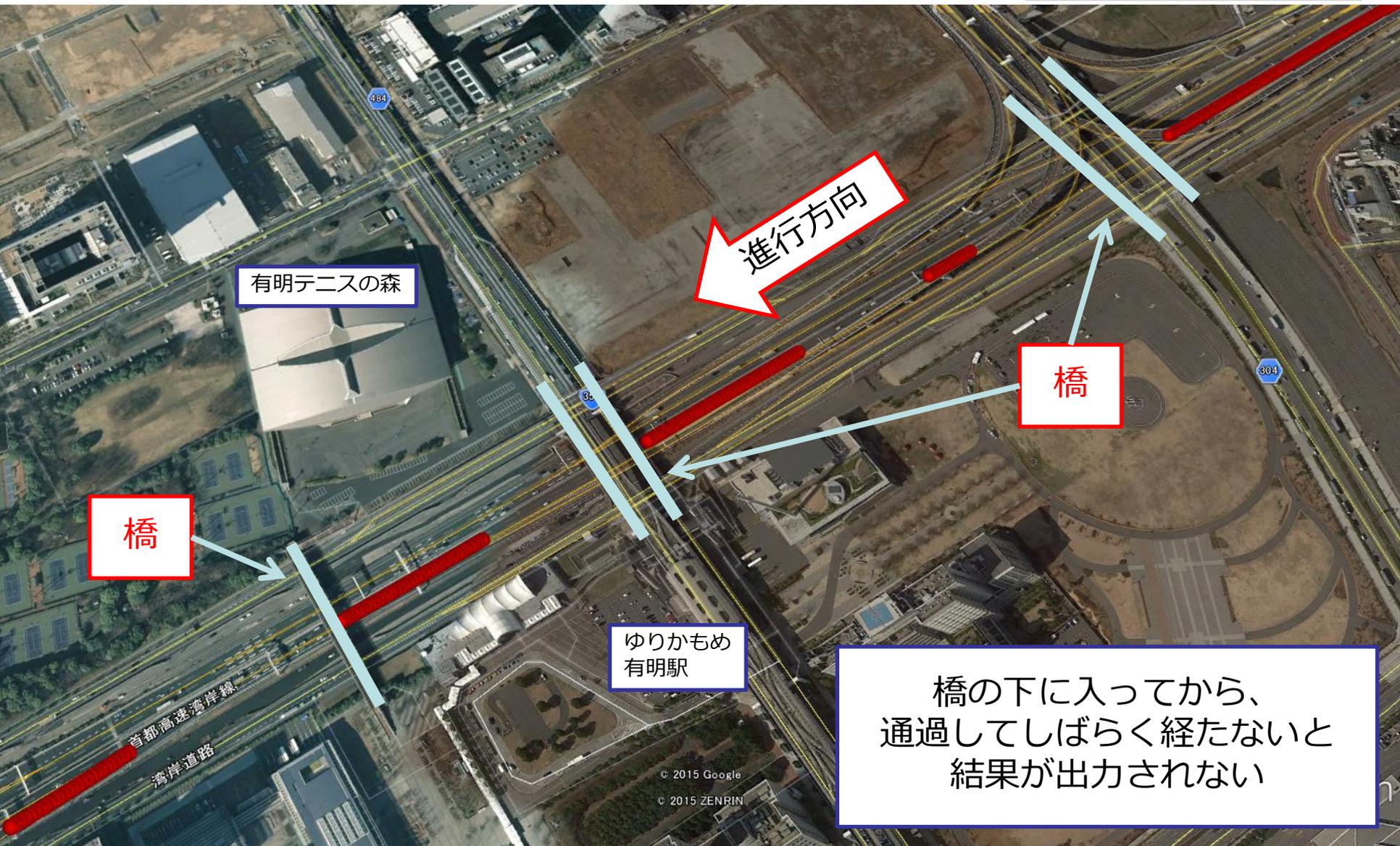
- 研究背景・目的
- 論文内容
- [前半] 観測ドップラと理論ドップラの比較
- [後半] 信号瞬間遮断時の信号追尾性能の改善

# 目次

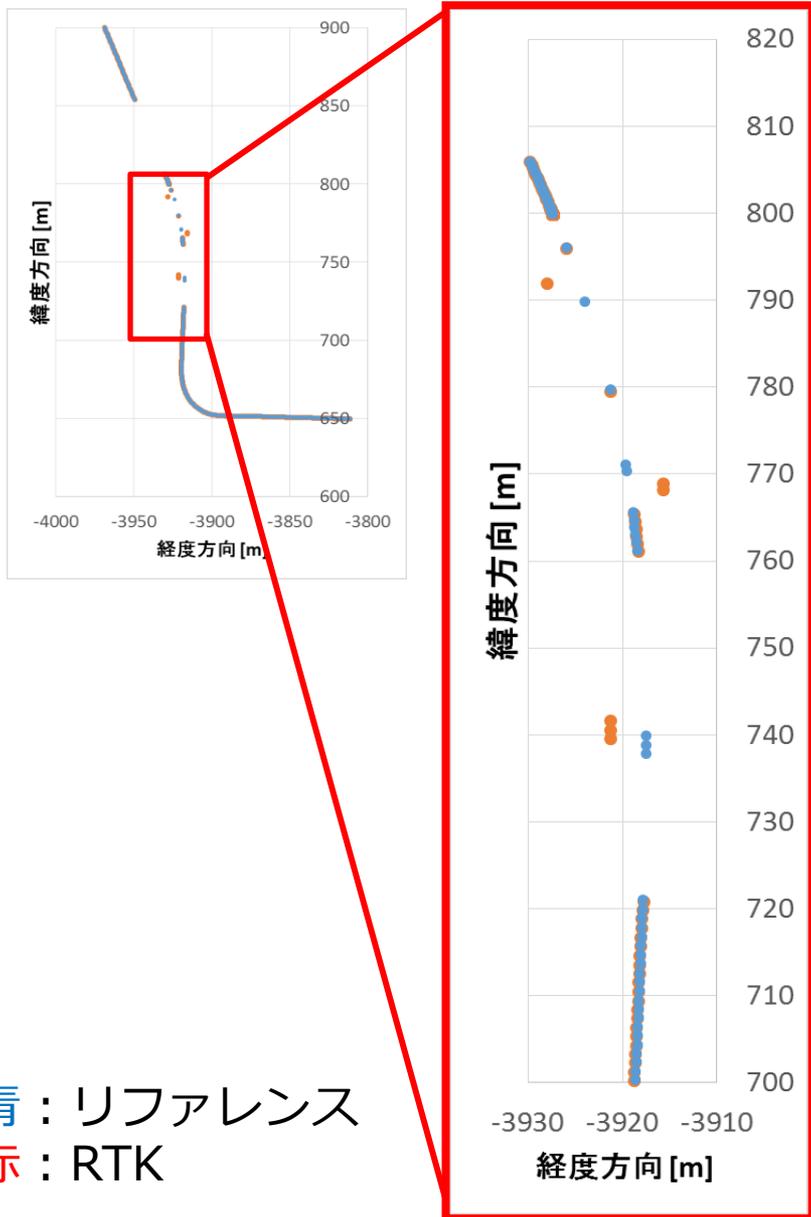


- 研究背景・目的
- 論文内容
- [前半] 観測ドップラと理論ドップラの比較
- [後半] 信号瞬間遮断時の信号追尾性能の改善

# 首都高速湾岸線におけるRTKの結果



# 都市部におけるミスFIX



橋の下を通過し終えても、  
しばらく経たないと結果が出力されない

都市部でミスFIXが散見される



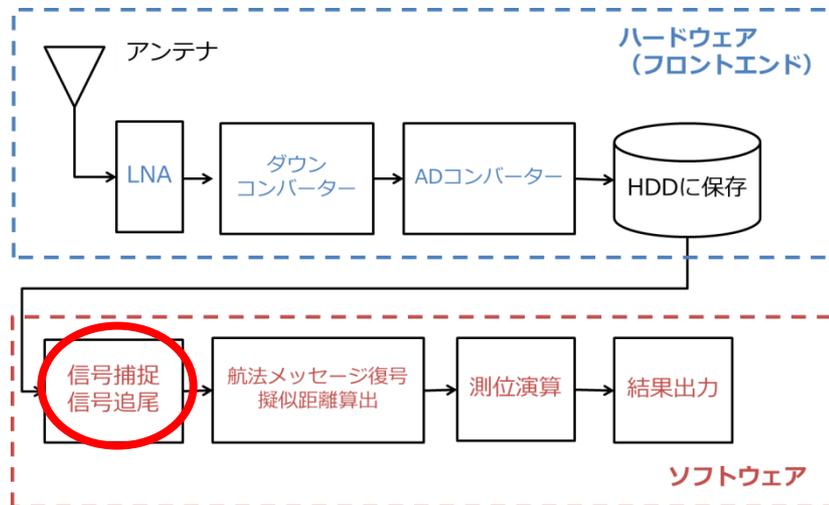
こういった現象の原因の一つとして、  
信号遮断等で追尾ができなくなり、  
**搬送波位相**が出力されていない、  
または正しくないことが挙げられる

# 本研究の目的

ソフトウェア受信機を用いて、信号追尾部に改良を加える等により、  
よりロバストな追尾、  
及び搬送波位相の出力を目指す

## 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、  
以後の処理を汎用のPC上で処理する受信機



ソフトウェアの修正のみで  
信号処理アルゴリズムを変更できる  
→柔軟に新しい信号に対応可能  
→新しい信号処理アルゴリズム  
の開発が可能

## 1. 観測ドップラと理論ドップラの比較

- 平成25年度電子情報通信学会ソサイエティ大会で発表
- 本発表の [前半] の内容 (ソフトウェア受信機は未使用)

## 2. GNSSにおけるドップラ支援追尾

- IS-GNSS 2014 (in Jeju, Korea)で発表
- フロントエンドに原子時計の信号を入力し、内部クロックを安定させた状態でデータを取得。算出した理論ドップラを用いたドップラ支援追尾を試みた。

## 3. 信号瞬間遮断時の信号追尾性能の改善

- 本発表の [後半] の内容

# 目次



- 研究背景・目的
- 論文内容
- [前半] 観測ドップラと理論ドップラの比較
  - 概要
  - 観測ドップラと理論ドップラ
  - 原子時計の効果とドップラ比較
  - 実験と結果
- [後半] 信号瞬間遮断時の信号追尾性能の改善

**観測ドップラ**



受信機から求められる  
ドップラ周波数

**理論ドップラ**



理論的に計算して求める  
ドップラ周波数

この二つのドップラを比較し、  
その結果を衛星排除に用いることにより、  
測位精度向上を図った

# 観測ドップラと理論ドップラ

## 観測ドップラ

$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + D_{off} + noise$$

## 理論ドップラ

$$D_{th} = D_{dynamics} + D_{sv}$$

$D_{dynamics}$  : 移動体によるドップラ [Hz]

$D_{sv}$  : 衛星によるドップラ [Hz]

$D_{off}$  : クロックオフセット [Hz]

$D_{dynamics}$



速度センサ・方位センサ

$D_{sv}$



エフェメリス (計算)

で推定可能

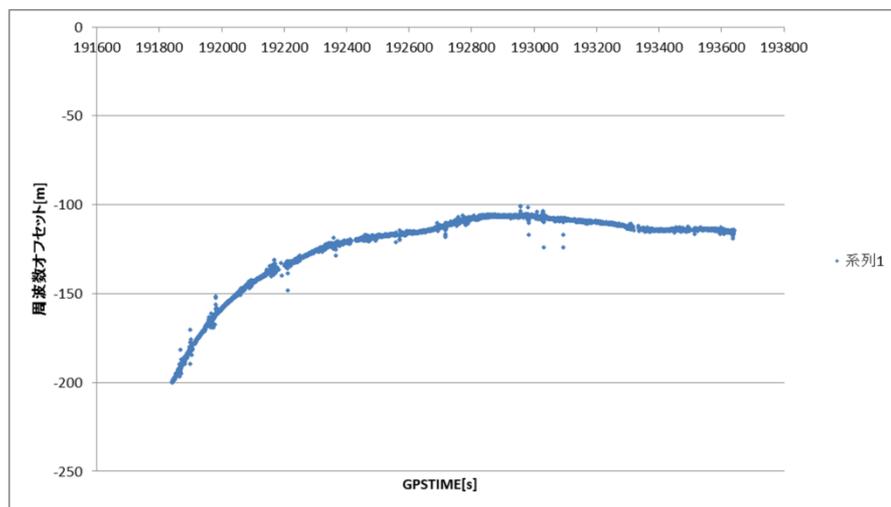
$D_{off}$



推移が非線形で推定は困難

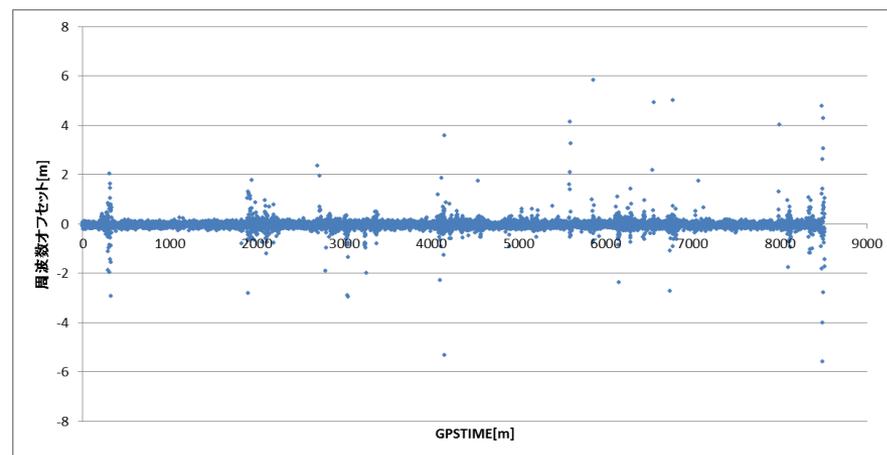
# 原子時計とクロックオフセット

原子時計入力なし



非線形で推定が困難

原子時計入力あり

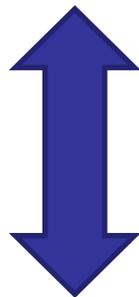


クロックオフセットを  
ほぼ無くすことができる

# 受信機に原子時計を入れると…

観測ドップラ

$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + \cancel{D_{off}} + noise$$



二つのドップラ間で  
比較しやすくなる

理論ドップラ

$$D_{th} = D_{dynamics} + D_{sv}$$

【その他の効果】

- 3衛星測位が可能（時計誤差を解く必要が無いため）
- PLLのロバスト性向上（追尾性能の向上）

# CSAC (chip scale atomic clock)

2004 : 研究者によって開発

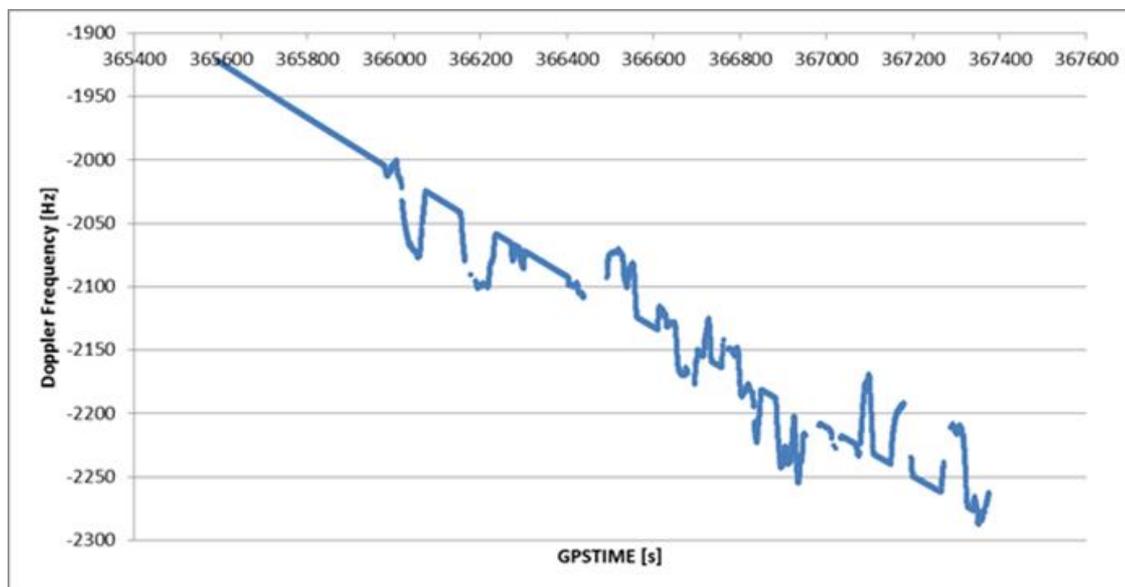
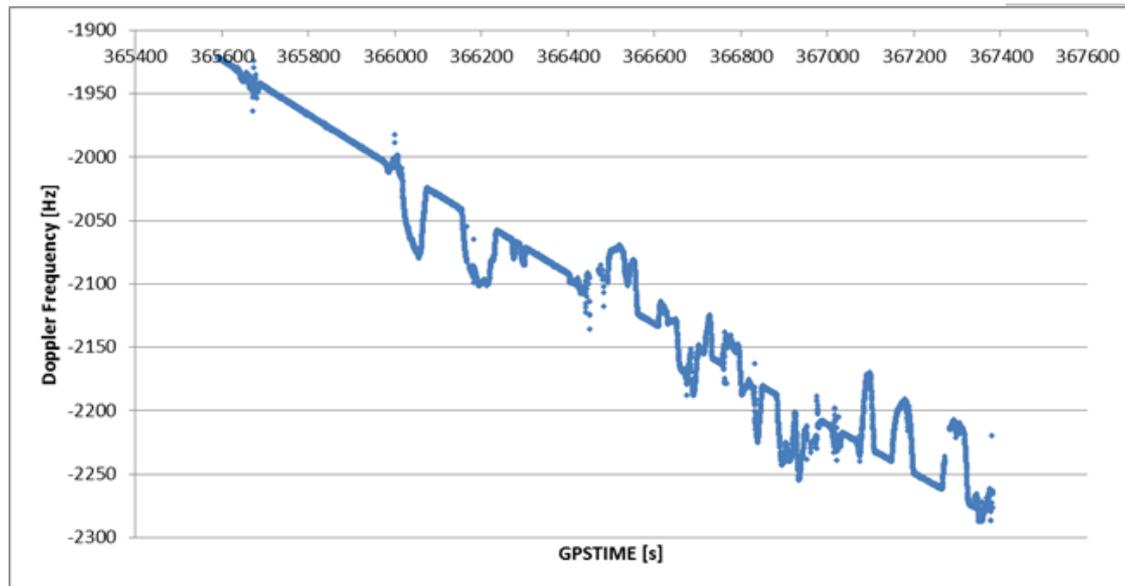
2011 : 商用実用化

- ✓ 低コスト
- ✓ 低消費電力
- ✓ 省スペース、省容積
- ✗ ルビジウム発振器よりは精度が劣る



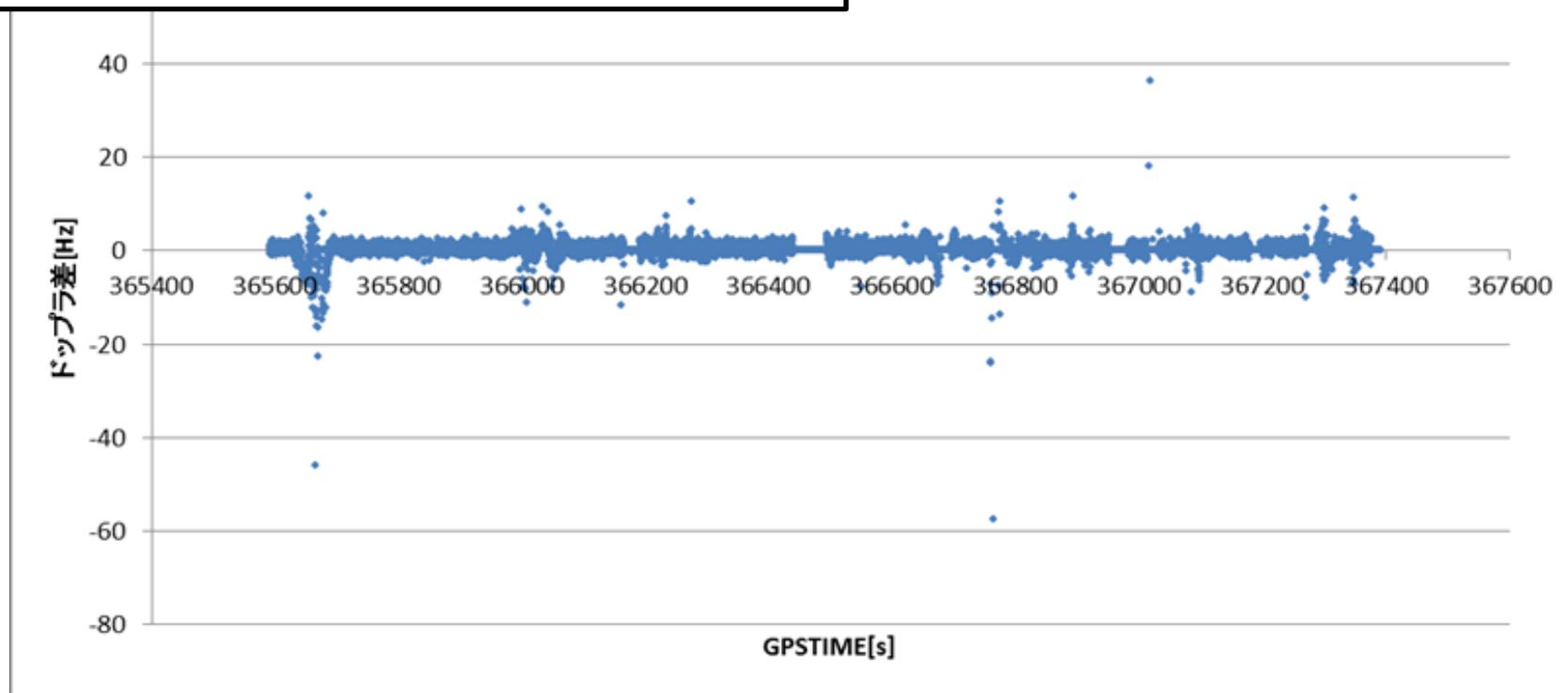
移動体で用いるのに適した原子時計

# 観測ドップラ（上）と理論ドップラ（下）



# 「ドップラ差」

$$\text{ドップラ差} = |D_{obs} - D_{th}|$$



おおよそ数Hz以内に収まっているが、  
所々に飛びがみられる

# 実験機器構成図

月島・勝どき・晴海を自動車で走行  
(主に中高層ビルの谷間を走行)



アンテナ

Trimble NetR9  
(CSAC)



CSAC

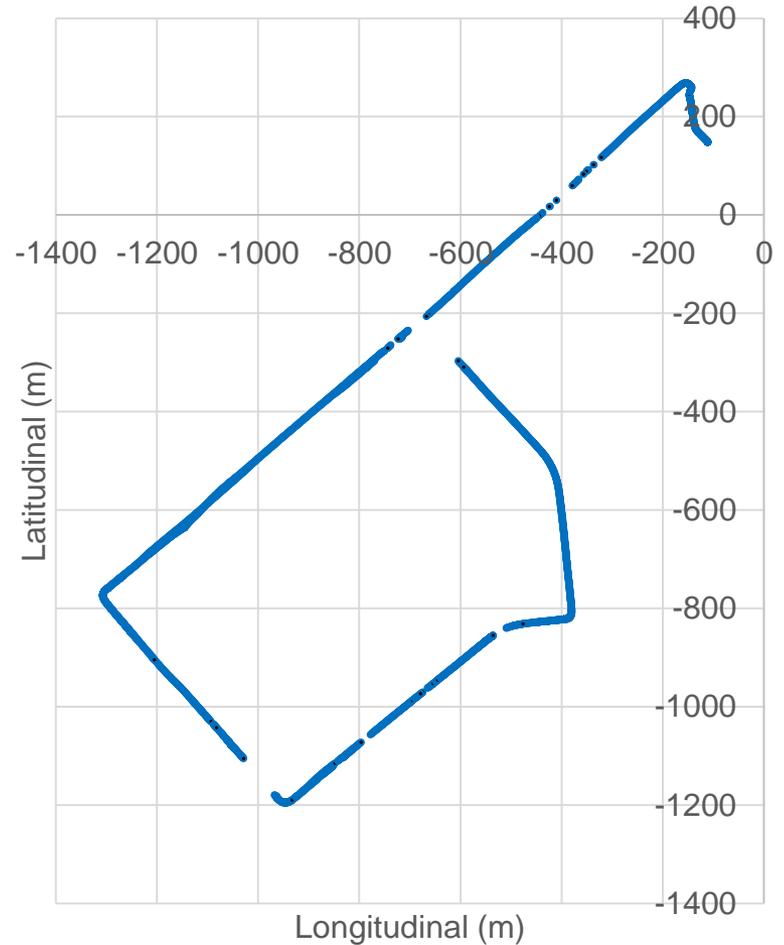
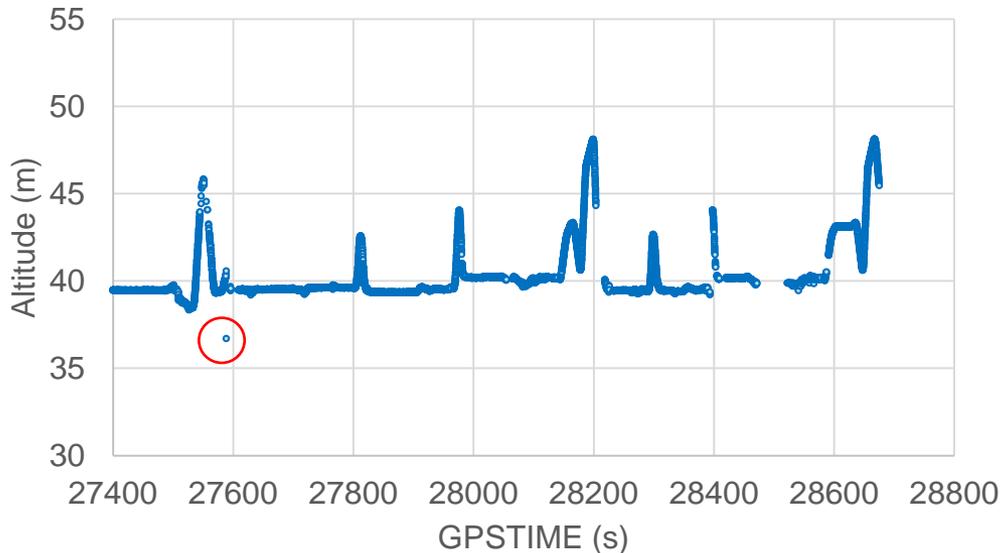
Trimble SPS855  
(内部時計)

分波器

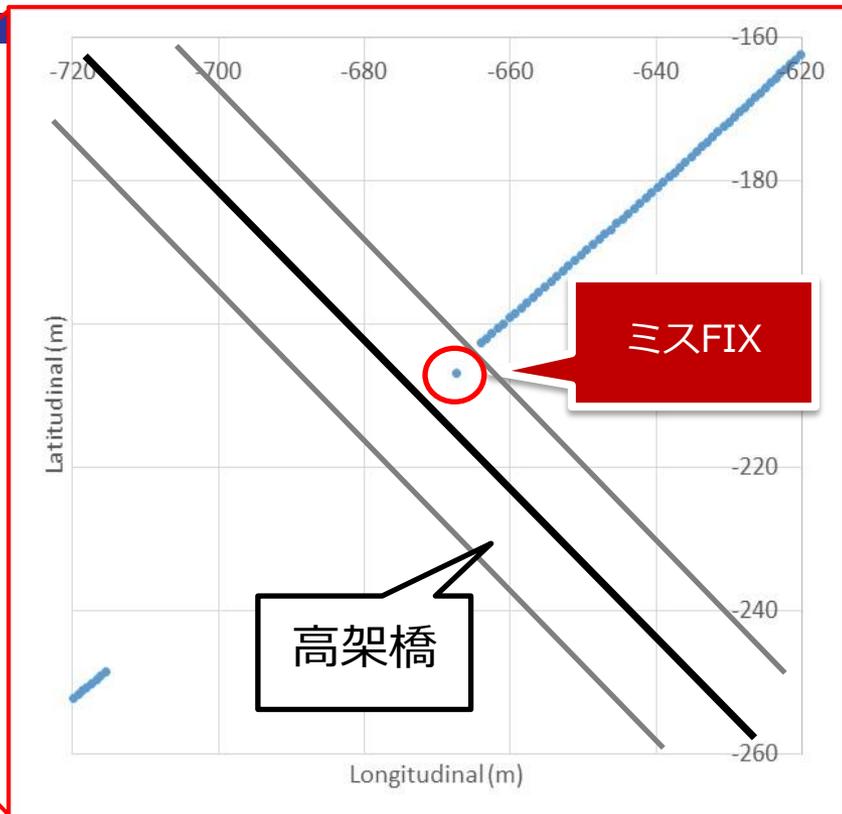
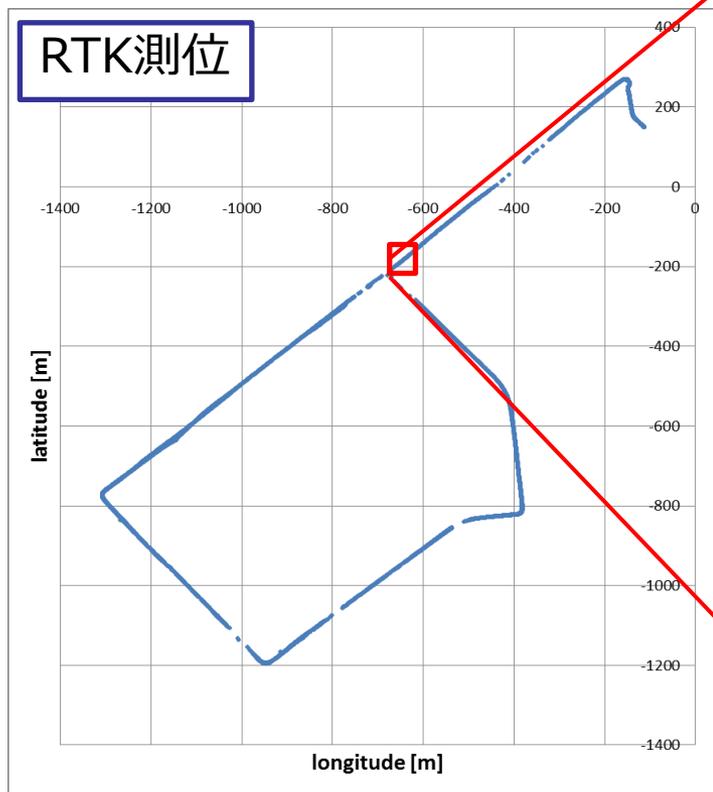
【注】  
本実験の速度・方位情報は  
RTKの結果から取得

# RTK測位結果

Date : Oct. 5, 2014  
About 23 min. (10 Hz)  
LAMBDA + ratio test > 3  
Fix Rate : 84.8%  
Multi-GNSS : GPS/QZS/GLO/BEI



# 拡大

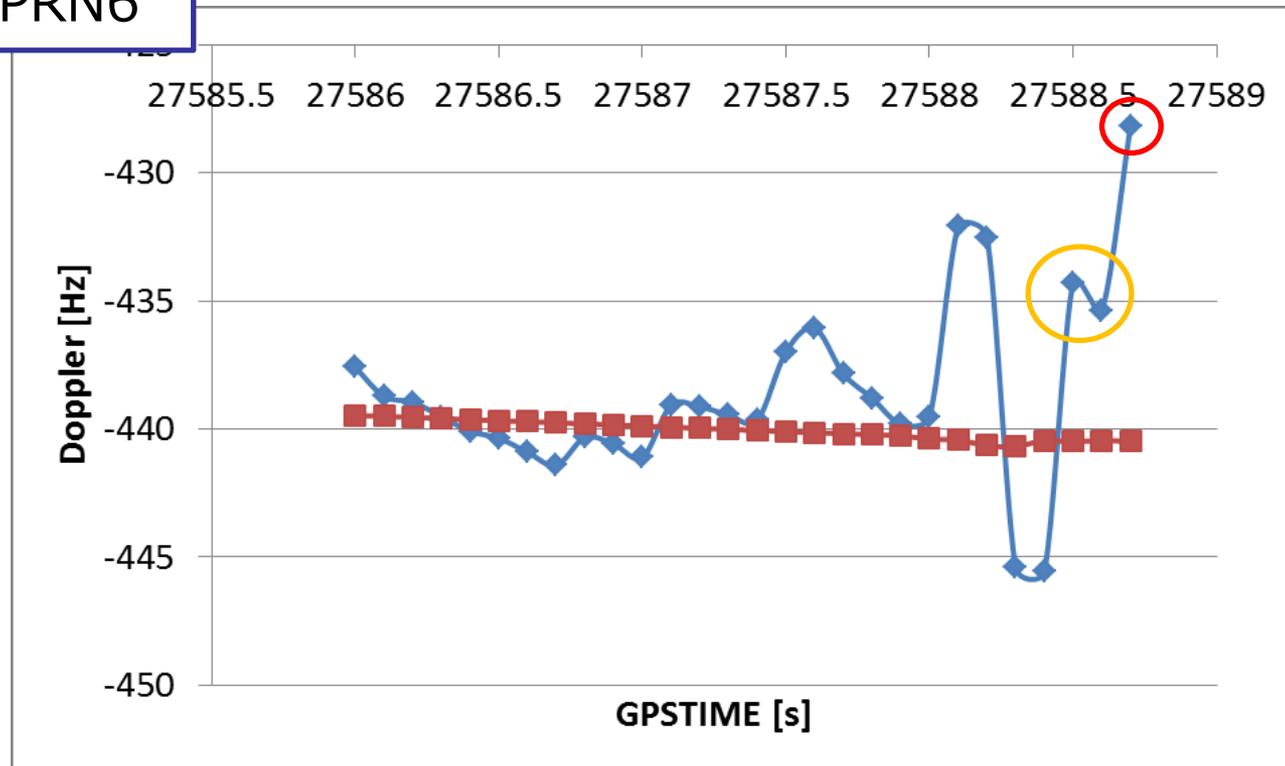


本実験では、大きなミスFIXはこの一箇所だけであった



# ドップラ比較

PRN6



青 : 観測ドップラ  
赤 : 理論ドップラ

○ : ミスFIX  
○ : Ratio値3未満

ミスFIX発生時、  
ドップラ差は10Hz以上を示している

$$|D_{obs} - D_{th}| > threshold$$



測位演算において  
使用可能衛星から除外

- 別の実験で効果を確認済み  
(単独測位。但し効果自体はわずかなもの)
- 上記提案手法で良い測位結果まで  
排除しないかどうかの確認が必要

# [前半] まとめ

- 小型原子時計を利用すると、  
クロックオフセットをほぼ無くすることができる  
これにより理論ドップラを推定し、  
観測ドップラと比較しやすくなる等の効果がある
- 実際に観測ドップラと理論ドップラとの差を比較したところ、  
二つのドップラはほぼ一致する。しかし飛びもある結果であった
- 実験において、ミスFIXが発生している箇所において  
「ドップラ差」が大きいことが分かった
- 「ドップラ差」を用いた衛星選択を行うことにより、  
測位結果向上に繋がる可能性がある

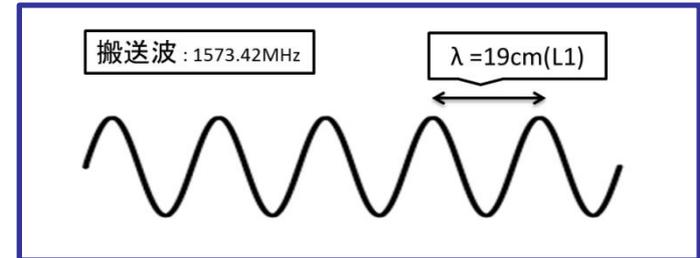
# 目次

- 研究背景・目的
- 論文内容
- [前半] 観測ドップラと理論ドップラの比較
- [後半] 信号瞬間遮断時の信号追尾性能の改善
  - 概要
  - 搬送波位相と信号遮断発生時の振る舞い
  - ターゲットとする信号遮断
  - ドップラ周波数推定について
  - 実験と結果（静止データと移動体データ）

- 今回はRTKを始めとする高精度測位に欠かすことのできない搬送波位相に着目、搬送波位相のロバストな追尾に関して検討、実験を行った。
- 具体的には信号遮断時にドップラ周波数を推定し、その値を元に搬送波位相を推定することにより、市販受信機よりも早く、かつ正確な搬送波位相を出力、高精度測位で活用できるようにする

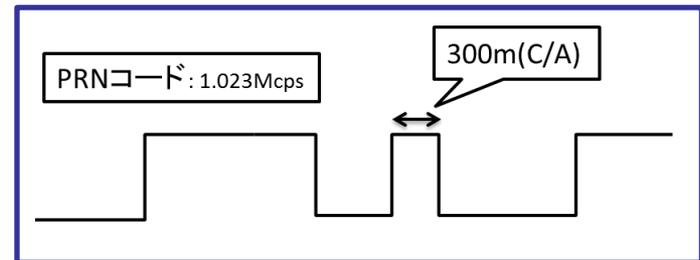
# 搬送波位相とは(vs 擬似距離)

- **ドップラ周波数の積算値**
- 「目盛」が細かい (約19cm)
- 測位するためには  
整数値アンビギュイティ  
を解く必要がある
- 測位精度は最高で数mm程度

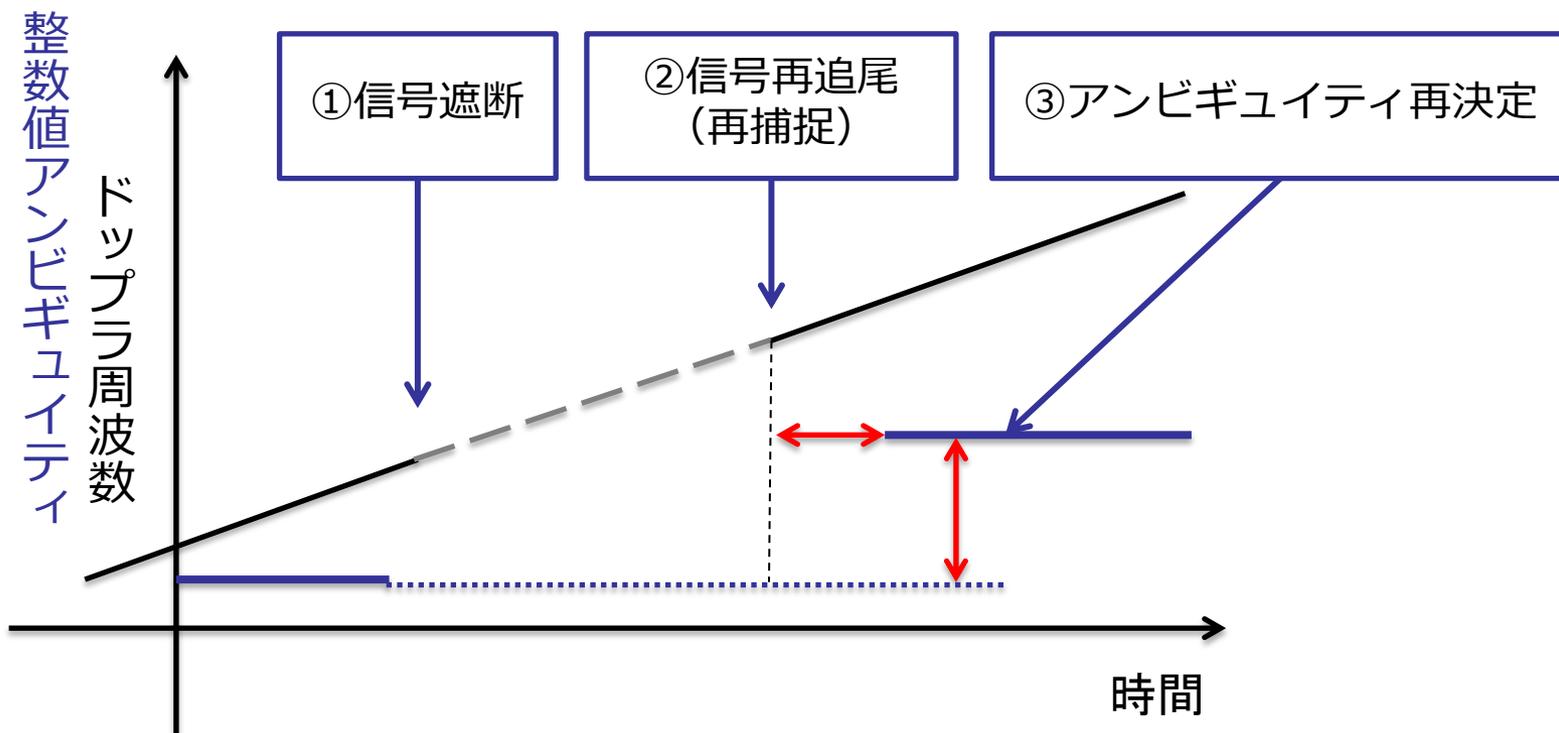


## 【参考】 擬似距離 (コード測距)

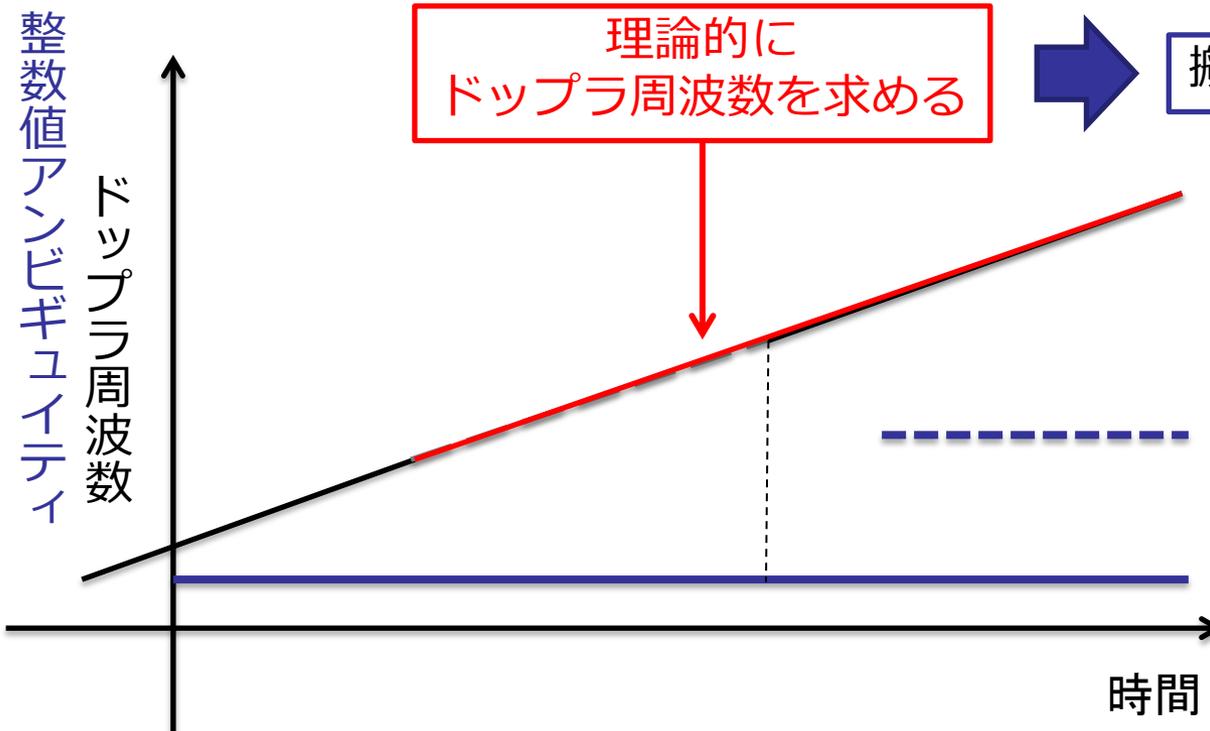
- 「目盛」が荒い (約300m)
- 測位精度は最高で数十cm程度



# 信号遮断が発生すると



改めて時間を掛けて  
アンビギュイティを解く必要がある



理論的に  
ドップラ周波数を求める

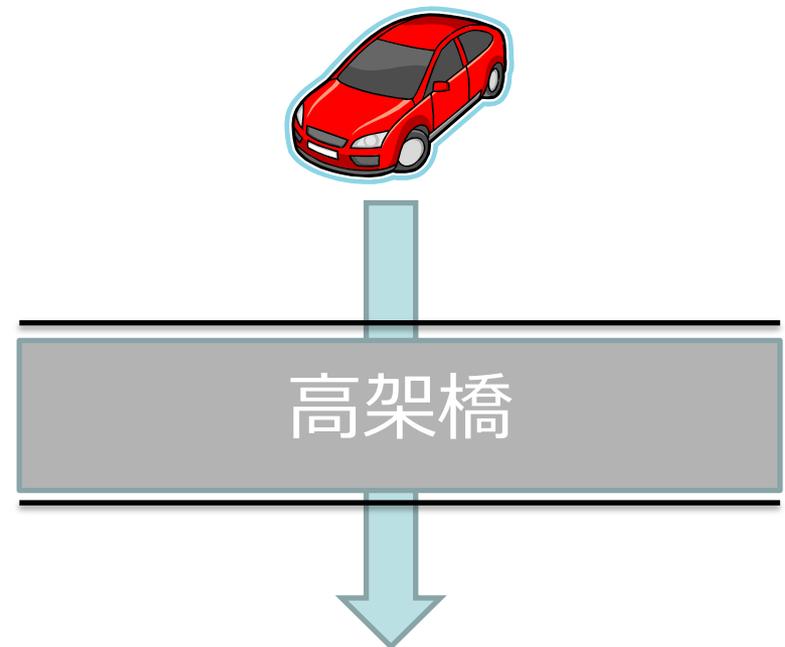
搬送波位相も推定可能

上手くドップラ周波数を推定すれば、  
改めてアンビギュイティを解かずに  
そのまま継続して使えるかもしれない

市販受信機よりも早く  
搬送波位相が出力できる可能性

# ターゲットとする信号遮断

- 高架下の横断によって生じる、わずかな時間のもの
- 距離で数十m, 時間で一瞬～数秒
- 自動車走行時、特に高速道路での走行を想定



# イメージ



高速道路だけでなく、  
運河に掛かる橋の下を  
船舶が通過する際にも  
応用できる可能性も



# 搬送波位相推定における問題は二つ

- **ドップラ周波数の推定**

- 搬送波位相はドップラ周波数の積算値なので、ドップラ周波数が推定できれば、搬送波位相も推定できる

- **ハーフサイクルアンビギュイティ**

- GPS信号がBPSK変調であることで起きる現象
- 対策を施さないと搬送波位相の結果が半波長ずれ、高精度測位が困難になる

# ドップラ周波数の推定

観測されるドップラ周波数

$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + D_{off} + noise$$

エフェメリスで  
推定可能

正確に推定するには…

速度センサ  
方位センサ

と

原子時計等の  
高精度な時計

が必要

本発表前半部で示したとおり、  
機材を揃えれば正確なドップラ周波数を推定は可能  
だが、実用的にはコスト面等で難が生じる。

観測されるドップラ

$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + D_{off} + noise$$

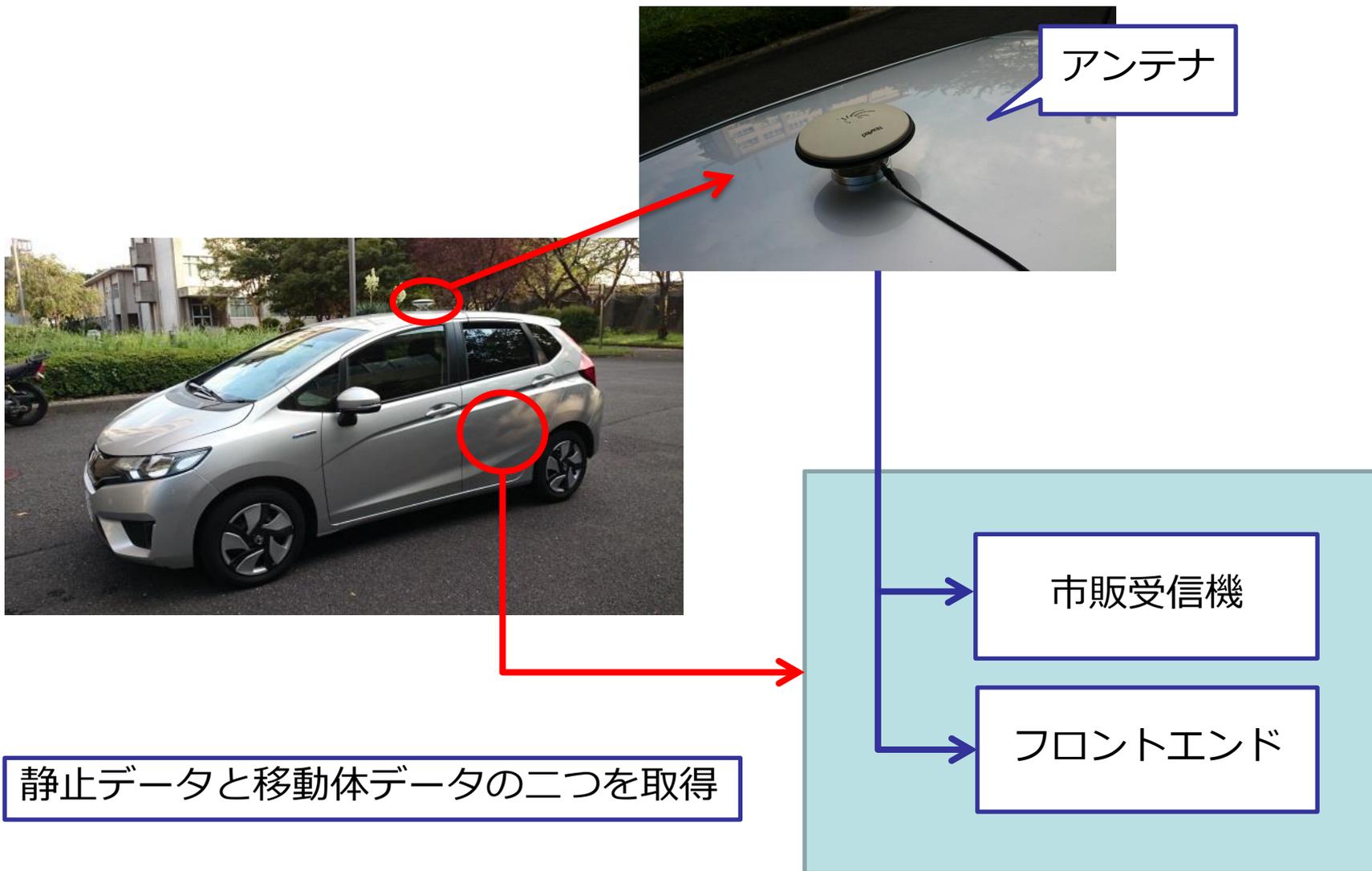
今回ターゲットと  
している信号遮断は  
非常に短時間のもの



- ・ 移動体の運動はほぼ等速  
( $\rightarrow$ 移動体によるドップラは変化しない)
- ・  $D_{sv}$ ,  $D_{off}$  は本来は非線形だが、  
線形に推移するとみなす

信号遮断直前のドップラ周波数を用いて  
まとめて**線形近似**してしまう

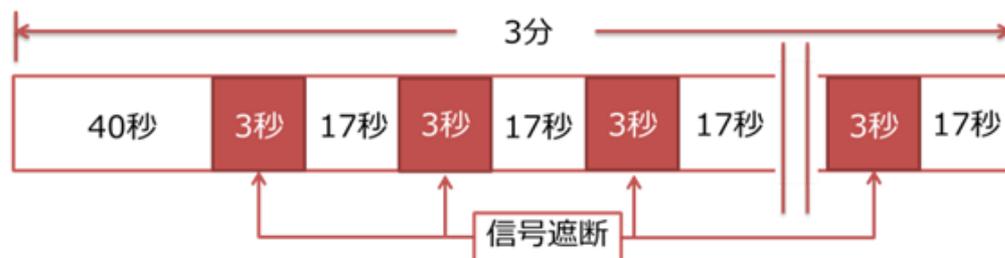
# 実験機器構成図



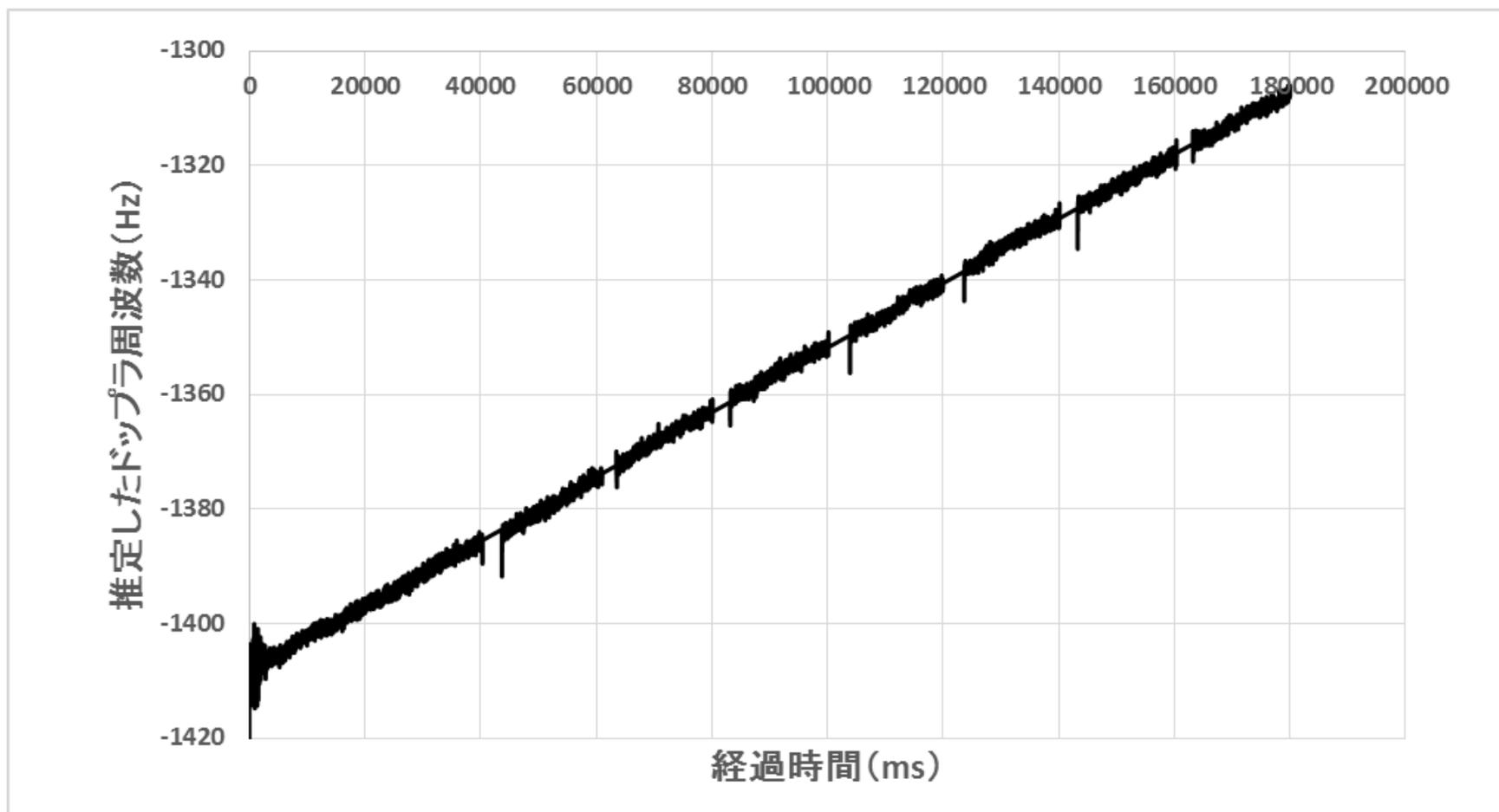
# データ取得（静止）

- 場所：明治丸前
- 取得年月日：2014/12/11
- データ取得時間：3分

金属板をアンテナ上に被せる方法で  
約3秒間の信号遮断を  
計7回実施

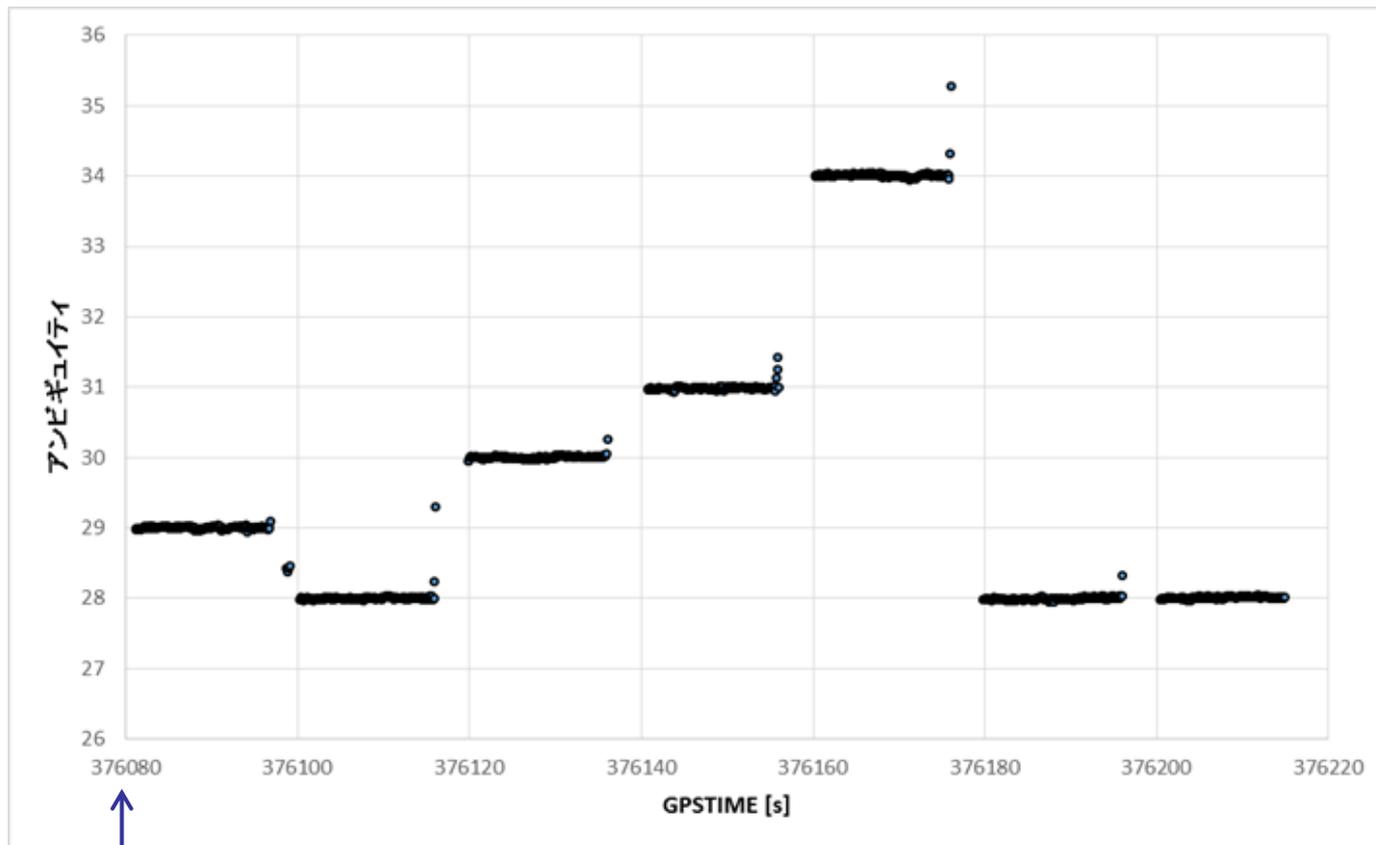


# ドップラ周波数の推定



※全時間のデータを元に線形近似した

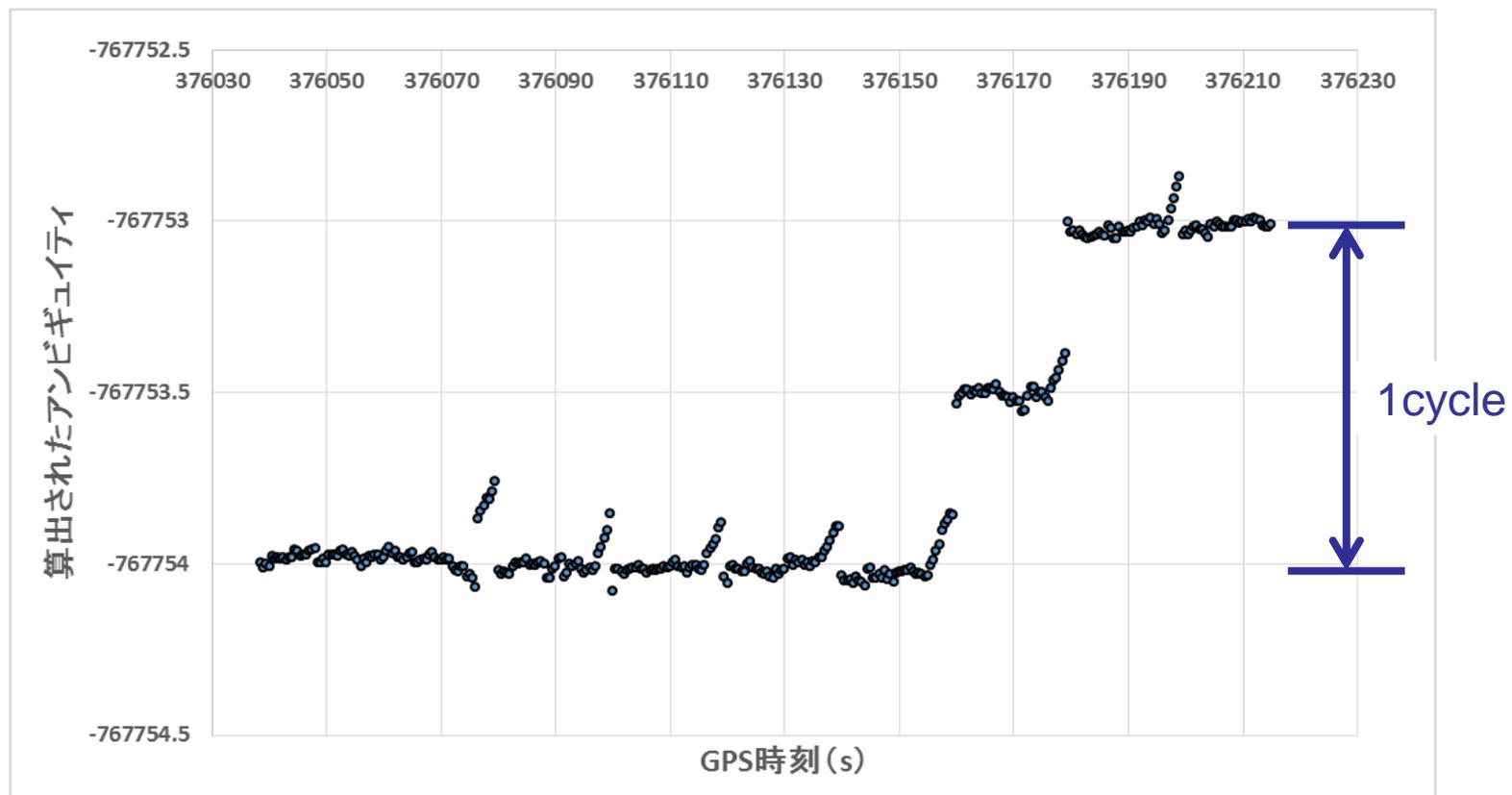
# 市販受信機によるアンビギュイティ



この時刻で  
1回目の遮断が発生

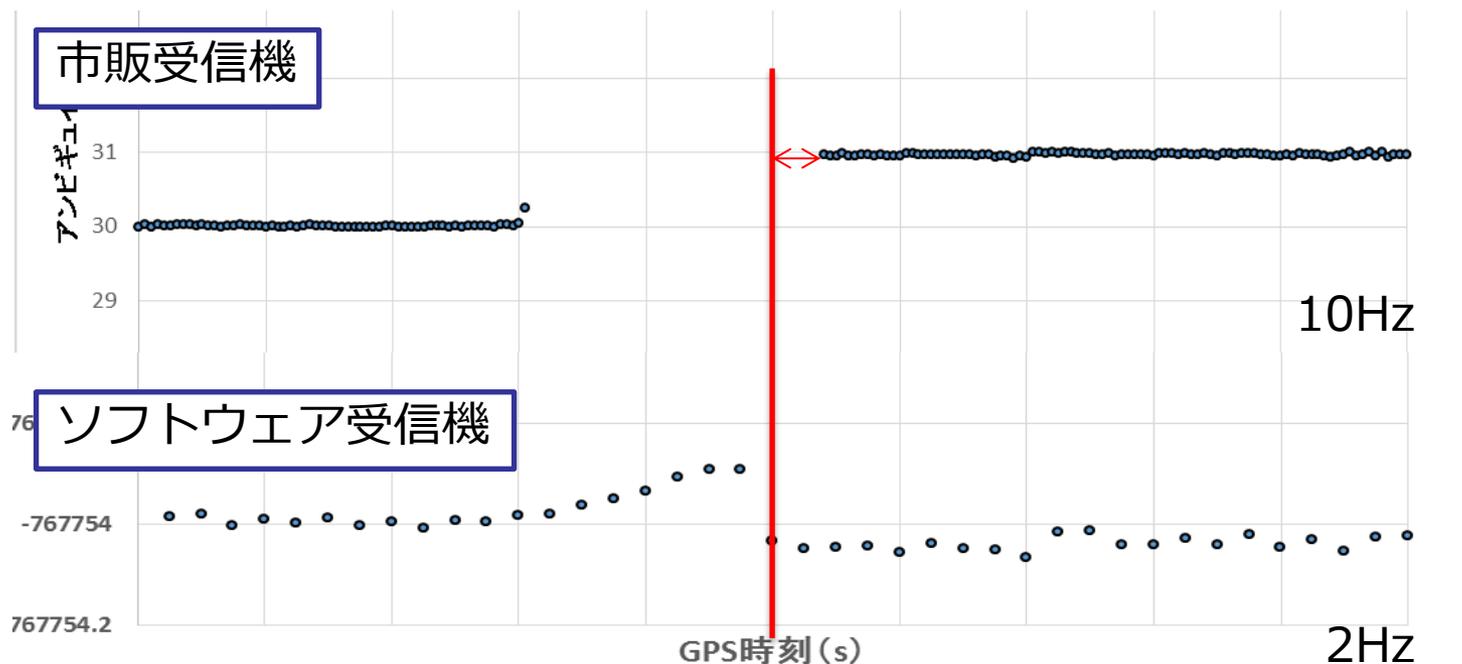
信号が遮断されるとアンビギュイティが途切れる  
(途切れる回数が遮断回数と一致)

# ソフトウェア受信機によるアンビギュイティ



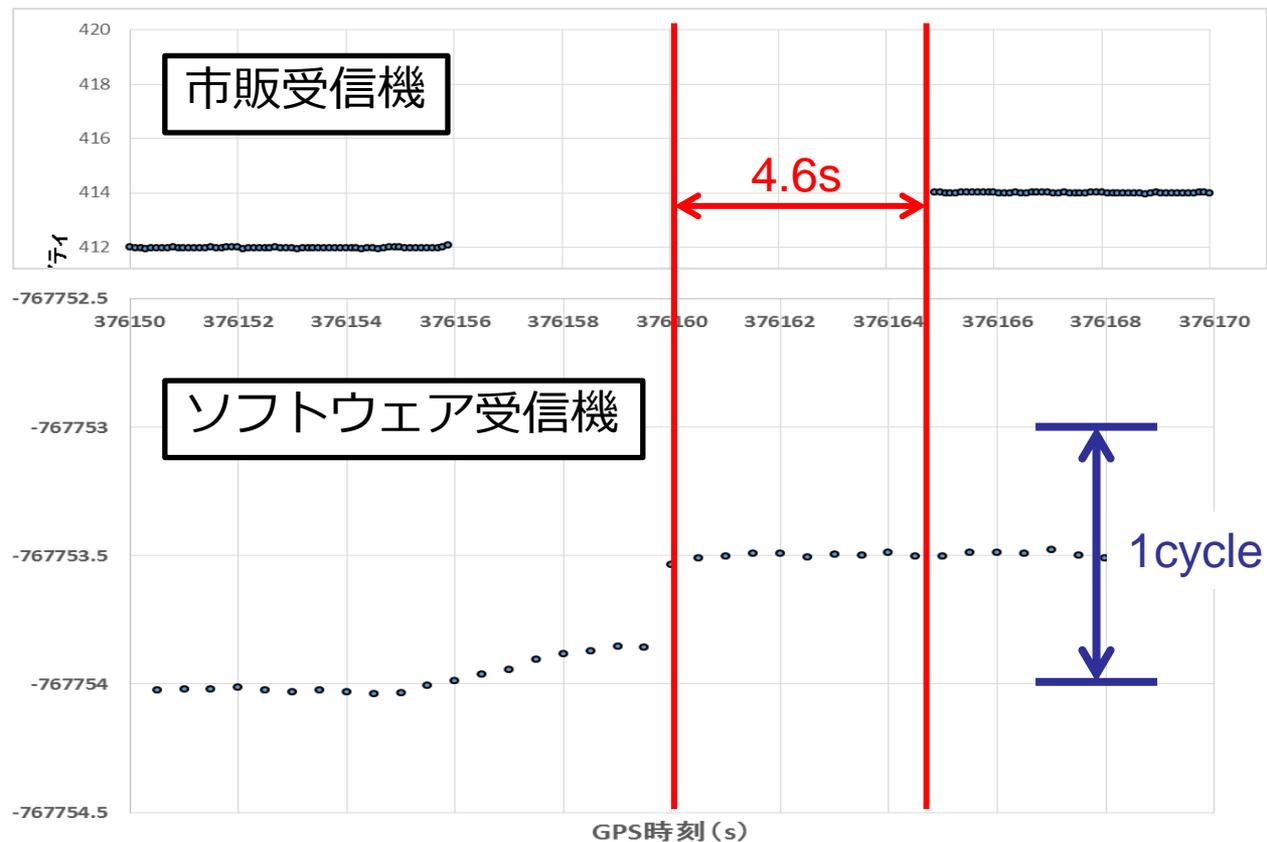
信号遮断が発生しても、ドップラを推定しているため  
アンビギュイティを出力続けている

# 比較 (1)



ソフトウェア受信機は、市販受信機と比べて…  
→およそ1秒早くアンビギュイティが求められている  
→信号遮断中もアンビギュイティを求め続けている  
(1サイクル以内に収まっている)

# 比較 (2)



ソフトウェア受信機の方は  
ハーフサイクルアンビギュイティが解けていないが、  
市販受信機よりも4.6秒早く求められている。

# データ取得（移動体）

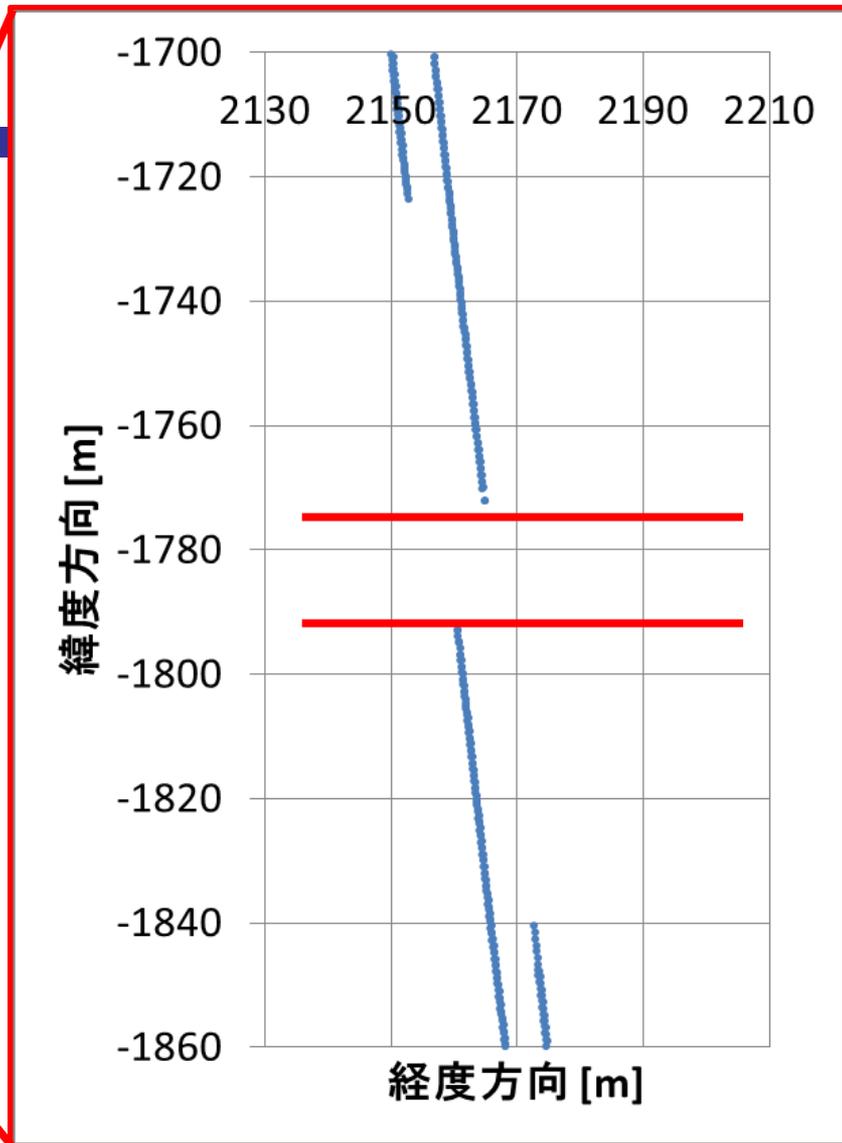
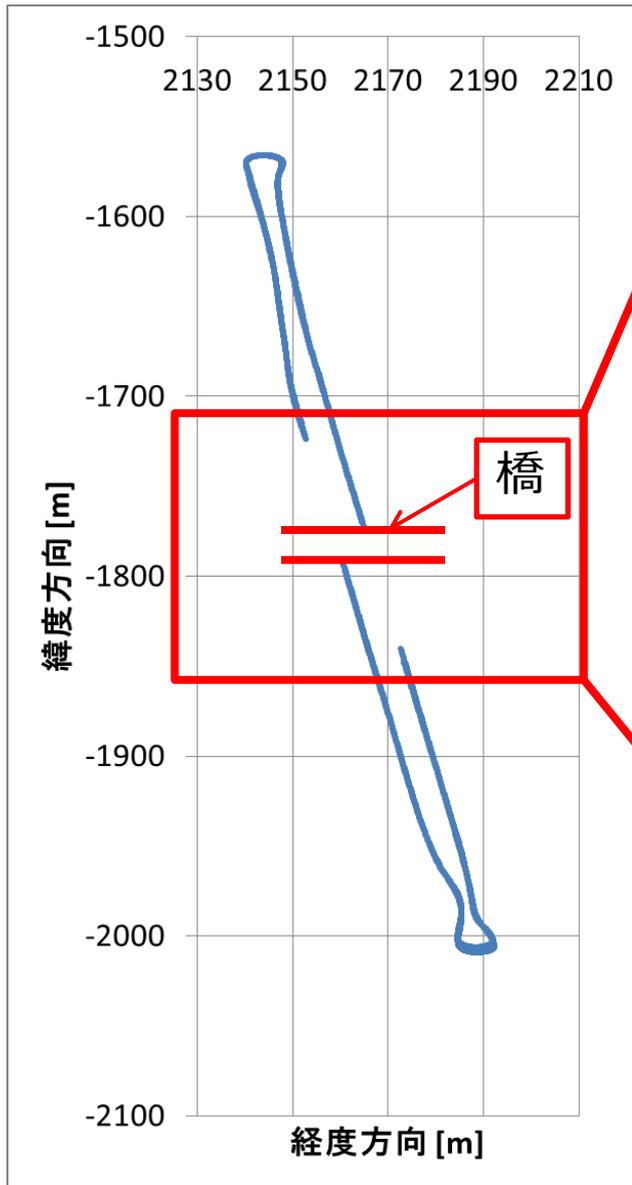
- 場所：辰巳の森海浜公園内
- 取得年月日：2015/01/09
- データ取得時間：3分



オープンスカイ環境だが、  
途中高架橋による  
信号遮断がある

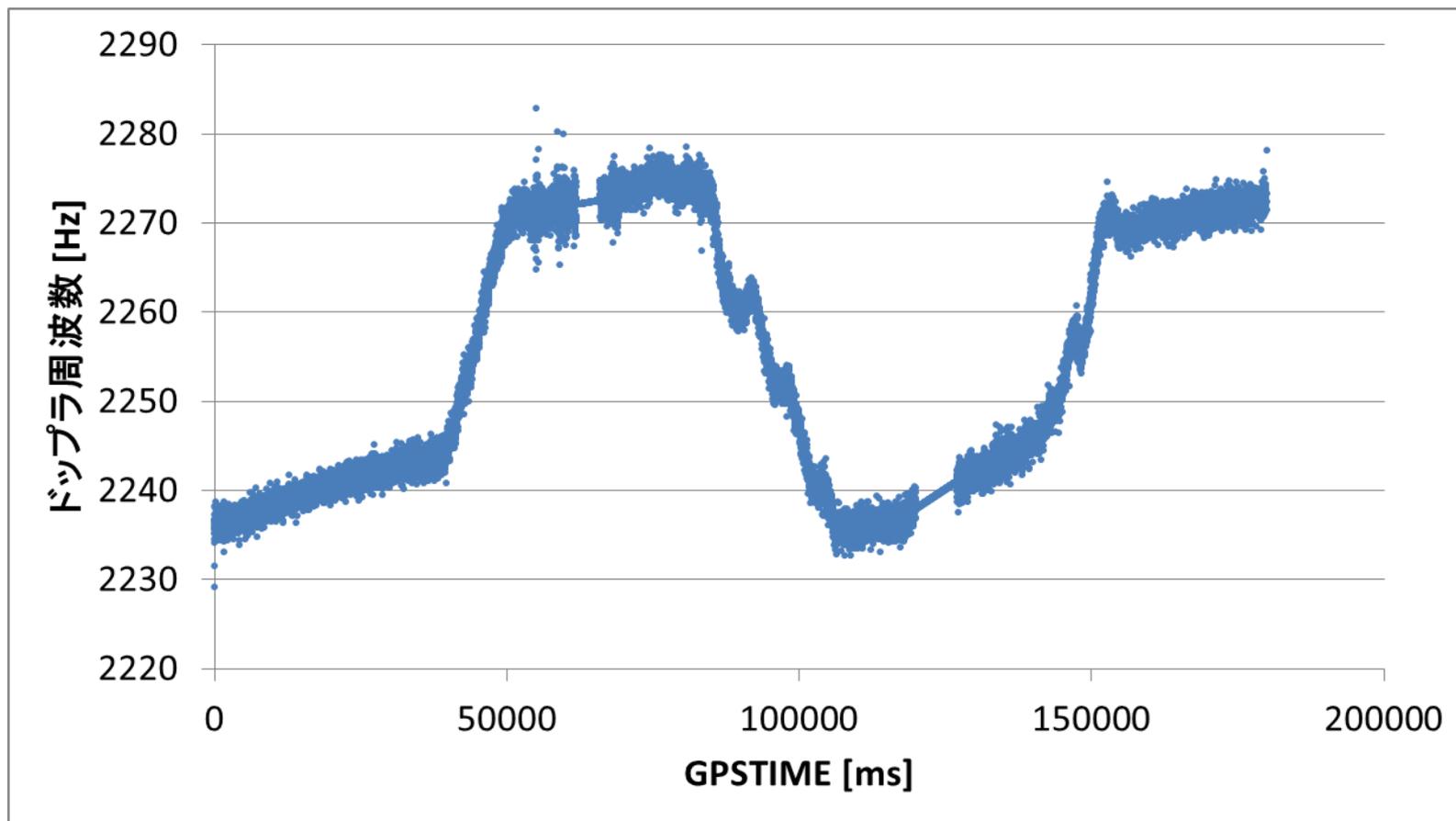


# RTK測位結果



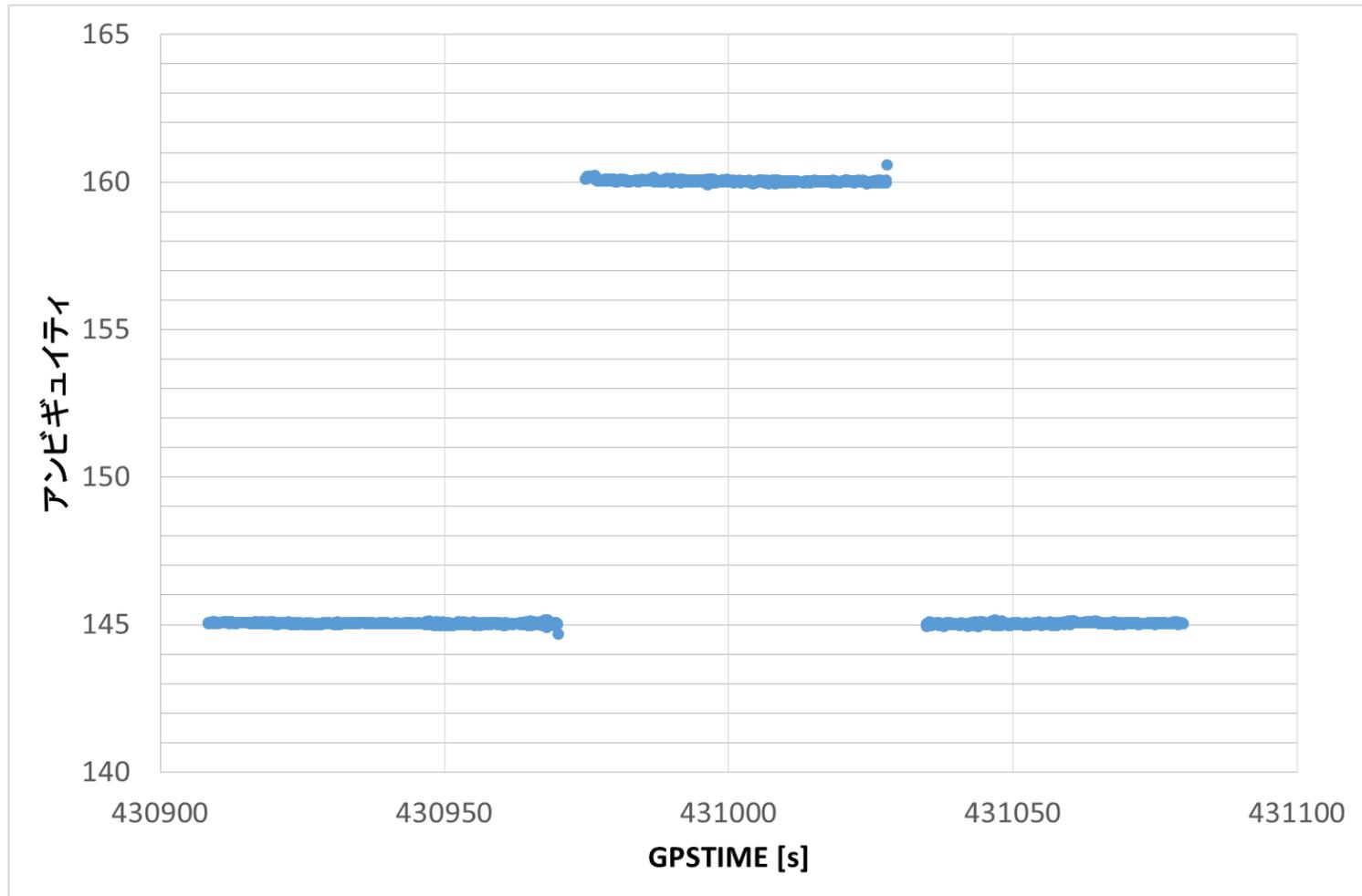
橋の下を通過後しばらく時間が経たないと  
RTKの結果が出力されない

# ドップラ周波数の推定

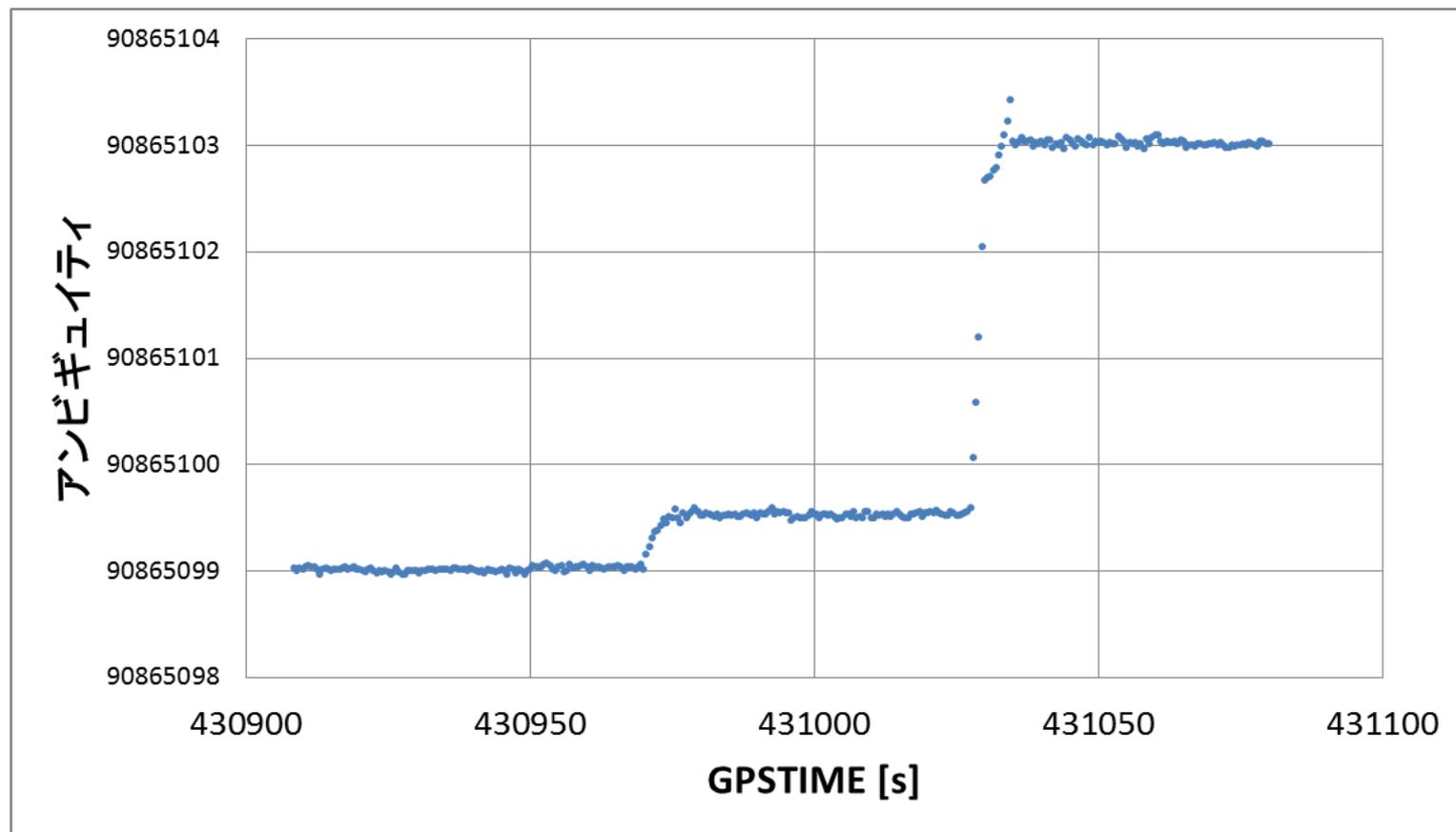


※遮断前およそ10秒間のデータを利用して線形補間を行った

# 市販受信機によるアンビギュイティ



# ソフトウェア受信機によるアンビギュイティ



# 比較 (1)

PRN20(遮断1回目)

アンビギュイティ

市販受信機

93

92

約 2 秒

1 cycle

ソフトウェア受信機

90865100

90865099

90865098

1 cycle

430950

430960

430970

430980

430990

431000

GPSTIME [s]

# 比較 (2)

PRN10(遮断 2 回目)

アンビギュ  
スコ

255

市販受信機

5.2秒

1cycle

90865104

ソフトウェア受信機

90865

90865102

1cycle

90865101

90865100

90865099

90865098

431020

431030

431040

431050

GPSTIME [s]

アンビギュイティが安定したのは市販受信機が出力を開始した時刻と同じだが、信号遮断時もアンビギュイティを出力し続けることにより、それに近い値が、5.2秒前に求まっている。

# 本実験のポイント

- 正確なアンビギュイティを出すことも重要だが、信号遮断発生時からアンビギュイティを求め続けているという点も重要  
(ずれても1サイクル以内)
- そもそもこの実験で行っていることがVector Tracking Loopと呼ばれる手法の一部
- 今回は線形近似による補完だったが、もしセンサ等を用いて正確なダイナミクスを求めることができれば、更に正確なドップラ周波数推定ができ、つまり、更に正確な搬送波位相の出力ができる

# [後半] まとめ

- 高架下横断等の短時間の信号遮断時において、線形近似を用いてドップラ周波数を推定することにより、ソフトウェア受信機を用いて信号復帰後素早く搬送波位相を出す試みを行った
- 結果、市販受信機よりも早くアンビギュイティを出力でき、静止データにおいては最大4.6秒早く求めることができた。
- ハーフサイクルアンビギュイティの問題が解決でき、かつ、正確なダイナミクスを求めることができれば、更に正確な搬送波位相を出力できる

ご清聴ありがとうございました

---

