

# GNSS 反射法を用いた地表面特性推定と信号処理手法の改善

## Improvement of Ground Surface Characteristics Estimation and Signal Processing Methods Using GNSS Reflection Method

北村 章人 , 辻井 利昭

大阪公立大学 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻

Akito Kitamura , Toshiaki Tsujii

Osaka Metropolitan University

**Abstract** With the development of Global Navigation Satellite System (GNSS) technology, a remote sensing technique called GNSS reflectometry has been attracting attention. GNSS signals are attenuated before reaching the ground, and especially reflected signals are very weak, so the signals need to be amplified. Therefore, the effect of amplifying the signal was verified by connecting an amplifier and by changing the incoherent integration time. In addition, by changing quantization bit rate from 2-bit IQ to 4-bit IQ, the quantization error in converting analog signals to digital signals was reduced.

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

全地球測位衛星システム（GNSS：Global Navigation Satellite System）の発展に伴い、GNSS 反射法と呼ばれるリモートセンシング技術が注目されている。GNSS 反射法とは地表面や海面から反射した GNSS 信号電波を計測することによるリモートセンシング手法である。GNSS 衛星をレーダ送信機として利用するため、高い可用性と観測の簡易性といった利点が挙げられる。

GNSS 反射法の研究対象は海上風速、海面高度、積雪量、土壌水分量など多岐に渡る。特に、地表面特性推定は、水文学、気候学、農業などにおいて重要な領域を占めており、本研究では、地表面の水分量によって電力反射率および比誘電率が変化することを利用して、地表面特性推定を行う。直接信号と地表面からの反射信号の信号強度を信号対雑音比（SNR）として測定し、その比から電力反射率および比誘電率を導出する方法を採用した。

GNSS 信号は、右旋円偏波（RHCP: right-handed circularly polarization）で送信され、一度反射すると主に左旋円偏波（LHCP: left-handed circularly polarization）となる。そこで、本研究では直接信号と反射信号を受信するために、右旋円偏波（RHCP）信号と左旋円偏波（LHCP）信号の両方に感度を持つ両円偏波アンテナを使用した。

### 1.2 研究目的

地表面特性推定を行うにあたって、GNSS 衛星は地表面からはるか遠方に位置するため、地表に届くまでに GNSS 信号は減衰されてしまい、特に反射波は直接波と比べて非常に微弱であるという問題点がある。そこで、本研究では両円偏波アンテナを用いて取得した微弱な直接波と反射波に対して 100ms の非コヒーレント積算処理を行うことで信号を増幅させ、その信号強度の比から反射点での電力反射率及び比誘電率を求める手法を採用した[1]。

ただし、ゲインが比較的小さいアンテナを使用する場合は、100ms の非コヒーレント積算処理のみでは十分な信号強度を得られない。そのため、本研究では微弱な反射信号に対してアンプを接続することや非コヒーレント積算時間を 200ms に変更することでゲインの小さなアンテナでも従来手法と同程度またはそれ以上の推定精度を得られるような改良を目指した。さらに、従来は衛星信号を 2bitIQ で処理していたが、アナログ信号をデジタル信号に変換する際の量子化誤差を考慮し、4bitIQ で処理する手法の検討も行う。

### 1.3 論文の構成

本論文は、全 6 章構成である。第 1 章では研究の背景、目的を述べた。第 2 章では研究理論（GNSS 反射法の原理と信号処理手法）について紹介する。第 3 章では 3 つの異なる条件で水面、コンクリート面、裸地を対象に行った GNSS 反射法実験の方法と結果を説明する。第 4 章では信号処理手法の改善を施した上で行った水面実験の結果を示す。第 5 章では実験結果をもとに地表面特性の評価を行い、改善手法の有効性を検証する。第 6 章では研究成果のまとめと今後の課題について述べる。

## 2 GNSS 反射法の原理と信号処理手法について

### 2.1 GNSS 反射法の概要

GNSS 反射法は、地表や海面からの GNSS 反射信号を受信し、反射面の組成に関する情報を得ることに基づいたリモートセンシング手法である。GNSS 反射法はレーダ送信機として GNSS 衛星を用い、受信機は地上や海上および小型航空機や超小型衛星に設置・搭載された GNSS 受信機であるため、バイスタティックレーダとして機能する。また、GNSS 反射法のシステムは、受信機が複数の GNSS 衛星からの信号を同時に受信するマルチスタティックレーダシステムに拡張することができる。

GNSS 反射法は他の既存のリモートセンシングツールと比べて以下のような利点がある。[2]

- ① 高い可用性  
地球近傍において常時どこにおいても、上空に送信機を保有することができ、バイスタティックな観測が可能である。
- ② 観測の簡易化と高い自由度  
ユーザが用意すべき機器は受信機器のみで、従来の観測機器と比較して、簡易化・小型化・省電力化を図ることができる。また、媒介電波の入射角や波長、信号帯域を変えることで異なる観測値を得ることができる。
- ③ 複数送信機によるマルチスタティック観測  
GPS, QZSS, Galileo, GLONASS, BeiDou など、多くの信号源を選択できる。
- ④ 前方散乱の利用  
後方散乱を利用するモノスタティックな観測よりも強い信号強度を稼ぐことができる。

## 2.2 GNSS 反射法ジオメトリ

GNSS 信号には右旋円偏波 RHCP が用いられているが、完全に平滑な表面で反射（鏡面反射）した GNSS 信号は入射角がブリュースター角以内（衛星仰角が（90°－ブリュースター角）以上）で左旋円偏波 LHCP 成分が多くなり、特に入射角が小さい（衛星仰角が大きい）場合、主に LHCP 成分となる．ブリュースター角 $\theta_B$ は、物質の比誘電率 $\epsilon_r$ によって、次式で求まる．

$$\theta_B = \tan^{-1} \sqrt{\eta} \quad (1)$$

$$\eta = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (2)$$

$\eta$ は物質の複素比誘電率、 $\epsilon_r$ は実数部、 $\epsilon_0$ は自由空間の誘電率（8.854×10<sup>-12</sup> F/m）、 $\sigma$ は電気伝導率、 $\omega$ は角周波数（ $2\pi f$ :  $f = 1.575\text{GHz}$ ）であるが、実数部と比べて虚数部が与える影響は小さく、本論では無視する．よって、代表的な物質の比誘電率およびブリュースター角は以下の表 1 ようになる．

GNSS 衛星、地表面、受信機は、図 1 示すようなバイスタティックレーダシステムを構成する．天頂方向 RHCP アンテナで直接信号を、天底方向 LHCP アンテナで反射信号を受信して地表面のリモートセンシングを行う．受信した GNSS 信号の電力を測定することで、地表面の反射率を求めることができる．ここで、天底方向アンテナが受信する全電磁界は、地表から散乱されたさまざまな寄与の合計であり、散乱成分には、コヒーレント成分と非コヒーレント成分の 2 種類がある．地表面が滑らかである（鏡面反射）と考えられる場合、非コヒーレント成分は非常に低い値となり、無視することができ、アンテナが受信する総電力はコヒーレント成分のみで近似することができる．本論では平滑面を仮定し、この近似を利用した．

また、鏡面反射点とは、入射角と反射角が等しいことを特徴とする反射点である（スネルの法則）．コヒーレント散乱成分は、鏡面反射点周辺の第一フレネルゾーンと呼ばれる狭い領域に集中する．地表面から送信機までの距離が地表面から受信機までの距離よりもはるかに大きい場合、第一フレネルゾーンの半長軸 $a$ と半短軸 $b$ は仰角 $el$ に依存し、受信機の地表面からの高さ $H$ と GPS 信号の波長 $\lambda$ （L1 信号では 19.042cm）によって次のように与えられる[3]．

$$a = \frac{b}{\sin el} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{\frac{\lambda H}{\sin el} + \left(\frac{\lambda}{2 \sin el}\right)^2} \quad (4)$$

表 1 誘電率とブリュースター角[4][5]

物質	比誘電率	電気伝導率[S/m]	ブリュースター角[°]
コンクリート	5.31	0.066	66
水面	80	0.00047	60
乾燥地面	3	0.073-0.27	75-79
湿潤地面	15-30	0.3	84

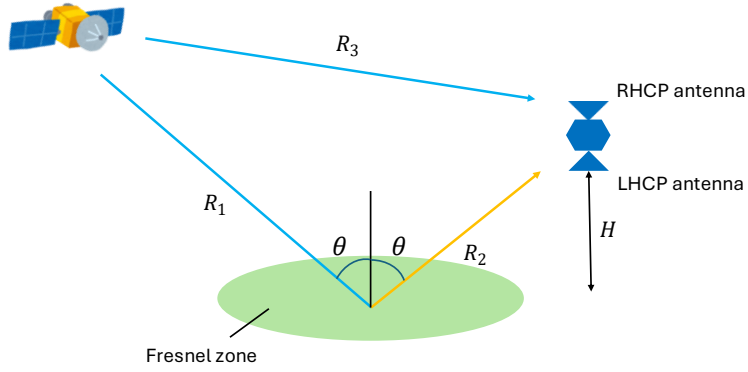


図1 バイスタティックレーダジオメトリ [6]

## 2.3 地表面特性推定のためのバイスタティック方法[6]

平滑面での GNSS バイスタティックレーダ方程式は次のようになる。

$$P_{lr} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 (R_1 + R_2)^2} \Gamma_{lr} \quad (5)$$

添え字 $lr$ は衛星入射信号 (RHCP) が地表で散乱され, LHCP に反転したときの散乱を意味し,  $P_{lr}$ はコヒーレント成分の大きさである.  $P_t$ は送信 RHCP 信号電力,  $G_t$ は送信アンテナ利得,  $G_r$ は受信アンテナ利得,  $\lambda$ は波長である.  $R_1$ は衛星から鏡面点までの距離,  $R_2$ は受信機から鏡面点までの距離,  $\Gamma_{lr}$ は反射面の電力反射率である.

平滑面から粗面への移行が始まると, 反射電力のコヒーレント成分が減少する. したがって, 式(5)の $\Gamma_{lr}$ の項は粗さの増加により平滑面の場合より減少する.

$$\Gamma_{lr} = |R_{lr}(el)|^2 \chi(z) \quad (6)$$

ここで,  $R_{lr}$ はフレネル反射係数,  $el$ は衛星仰角,  $\chi(z)$ は表面高さ $z$ の確率密度関数である.

自然の地表面のほとんどは, ガウス分布でモデル化できる. したがって, 電力反射率は次のように表すことができる.

$$\Gamma_{lr} = |R_{lr}(el)|^2 e^{-h \cos^2(el)} \quad (7)$$

$h$ は粗さパラメータと呼ばれ,

$$h = 4k^2 \sigma^2 \quad (8)$$

ここで  $k$ は波数 ( $2\pi/\lambda$ ),  $\sigma$ は地表面の標準偏差と定義されている. 滑らかな表面 ( $h = 0$ ) の場合, 反射率 $\Gamma_{lr}$ は単純にフレネル反射係数の二乗となる. 本論ではこの仮定を用いる.

また, フレネル反射係数は次のように表される.

$$R_{lr} = \frac{1}{2}(R_{vv} - R_{hh}) \quad (9)$$

ここで,  $R_{vv}$ と  $R_{hh}$ は水平および垂直偏光のフレネル係数であり, 比誘電率 $\epsilon_r$ を用いて,

$$R_{hh}(el) = \frac{\sin(el) - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(el)}}{\sin(el) + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(el)}} \quad (10)$$

$$R_{vv}(el) = \frac{\varepsilon_r \sin(el) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(el)}}{\varepsilon_r \sin(el) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(el)}} \quad (11)$$

と表され、 $\varepsilon_r$ は繰り返し計算を行うことにより求めることができる。

また、反射信号のSNR（信号対雑音比）は次の式で表される。

$$SNR_{reflect} = \frac{P_t G_t}{4\pi(R_1 + R_2)^2} \frac{G_r \lambda^2 G_D}{4\pi P_N} |R_{lr}|^2 \quad (12)$$

ここで、 $P_t$ は送信信号電力、 $G_t$ は送信アンテナ利得、 $G_r$ は受信アンテナ利得、 $G_D$ はGPS信号のC/Aコード逆拡散によるプロセス利得、 $P_N$ はノイズ電力である。

同様に、直接信号のSNRは次の式で表される。

$$SNR_{direct} = \frac{P_t G_t}{4\pi R_3^2} \frac{G_r \lambda^2 G_D}{4\pi P_N} \quad (13)$$

ここで、 $R_3$ は衛星から受信機までの距離である。

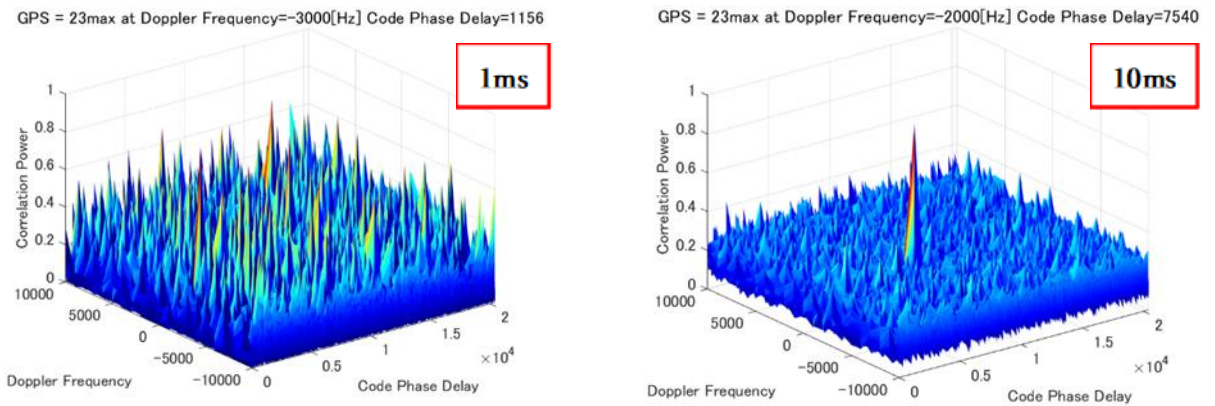
注意しなければならないのは、式(12)と式(13)中の $G_r$ と $P_N$ は等しくないことである。式(12)と式(13)の比を同じパラメータでキャンセルさせ、 $G_r$ と $P_N$ の不確かさを一つの校正パラメータ $C$ にまとめると、次式で表される。

$$\frac{SNR_{reflect}}{SNR_{direct}} = \frac{R_3^2}{(R_1 + R_2)^2} |R_{lr}|^2 \cdot C \approx \Gamma_{lr} \cdot C \quad (14)$$

以上から、入力パラメータは衛星仰角だけでよくなり、これは直接信号情報から容易に求めることができる。なお、校正パラメータ $C$ は、実験条件を変化させたときに文献値にどれだけ近い値が得られるかを調べるため、本論では1として計算している。受信機から出力したSNRと各パラメータから、地表面特性である電力反射率および比誘電率を、それぞれ式(9)～式(11)及び式(14)から求めることができる。

## 2.4 信号増幅手法

地表に届くまでにGNSS信号は減衰されてしまい、特に反射信号は直接信号と比べて非常に微弱である。本論では、複数エポックの非コヒーレント積算処理によって信号電力の増幅を図っている。非コヒーレント積算処理とは、信号成分の位相を考慮せずに積算していく処理である。以下の図2に、非コヒーレント積算時間の違いによる反射信号捕捉結果の例を示す。なお、用いたデータはオープンスカイで取得したRHCP信号である。



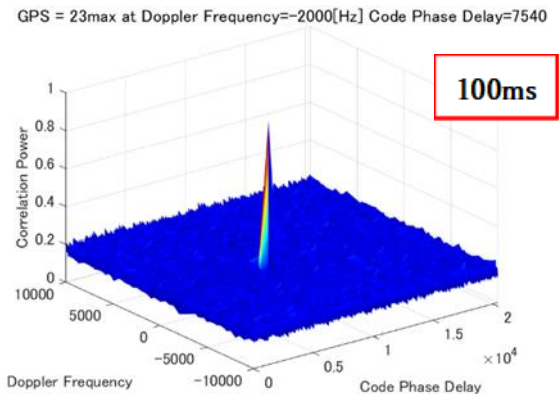


図2 非コヒーレント積算時間の変更による信号補足結果例

## 2.5 信号処理手法

一般的に、GNSS 信号の処理は、アナログ信号からデジタル信号に変換される際に 2bitIQ で処理されることが多い。以下の図 3 に示すように、2bitIQ なら 4 段階、3bitIQ なら 8 段階で変換されるが、そのときに誤差が生じてしまう。これを量子化誤差という。bit 数を大きくすると、その分アナログ信号の解像度が上がり、信号をより正確に記述できるようになる。本研究では、4bitIQ すなわち 16 段階での処理を試みる。

アナログ信号をデジタル信号に変換する際に重要になってくるのが LUT(Look Up Table)と呼ばれる配列である。LUT とは、前もって計算された値のセットを格納した配列であり、デジタル信号に量子化された値を実際の信号レベルに対応する値に変換するために使用される。GNSS 信号処理では、各データの末尾に 1 を追加し、2 の補数の変換を行うことで LUT が決定される。例えば、2bitIQ 処理では、

$$[1 \quad 3 \quad -3 \quad -1]$$

という LUT が用いられている。これを 4bitIQ 用に拡張し、LUT を

$$[1 \ 3 \ 5 \ 7 \ 9 \ 11 \ 13 \ 15 \ -15 \ -13 \ -11 \ -9 \ -7 \ -5 \ -3 \ -1]$$

と定める。

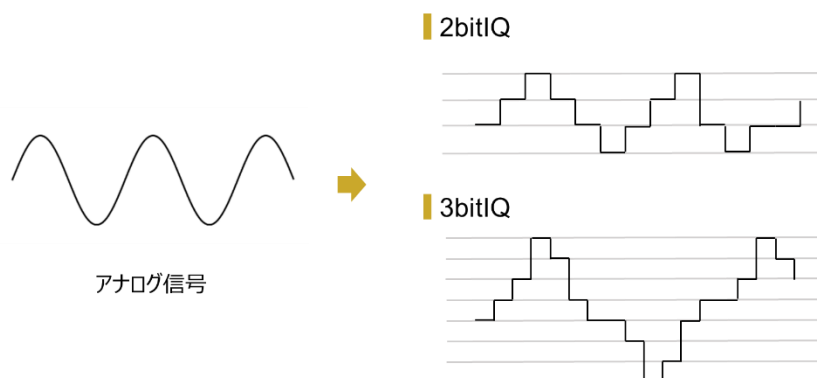


図3 アナログ信号→デジタル信号のイメージ

### 3 GNSS 反射法実験①

#### 3.1 実験手順

本論では、GPS 衛星を対象に、地表面特性の計測手法の有効性を明らかにするため、地表面特性の異なる 3 つの環境において計測実験を行った。以下に、本論で行った GNSS 反射法による地表面特性推定の手順フローチャートを示す。衛星分布については測位解もしくは大阪公立大学近隣の堺電子基準点の情報を国土地理院のデータベースサイトからダウンロードし、使用することができる。

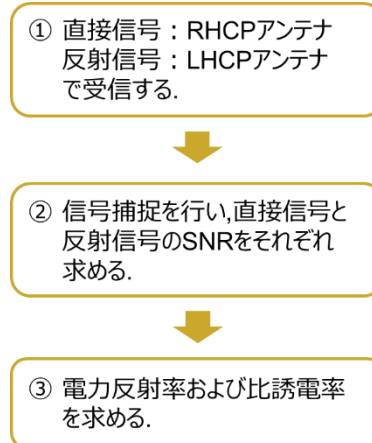


図4 GNSS 反射法による地表面推定の手順フローチャート

#### 3.2 実験機器

図5に例として水面実験での実験セットアップを示す。両円偏波アンテナで（図6）受信した信号をRFフロントエンド（図7）でダウンコンバートし、データ記録用PC（図8）にデジタルデータを保存した。これらの接続関係を簡略化して表したものを図9に示す。また、詳細な機器一覧を表2にまとめた。

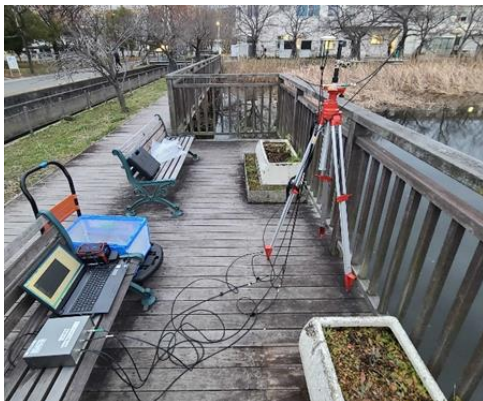


図5 実験セットアップ



図6 両円偏波アンテナ



図7 RF フロントエンド



図8 データ記録用 PC



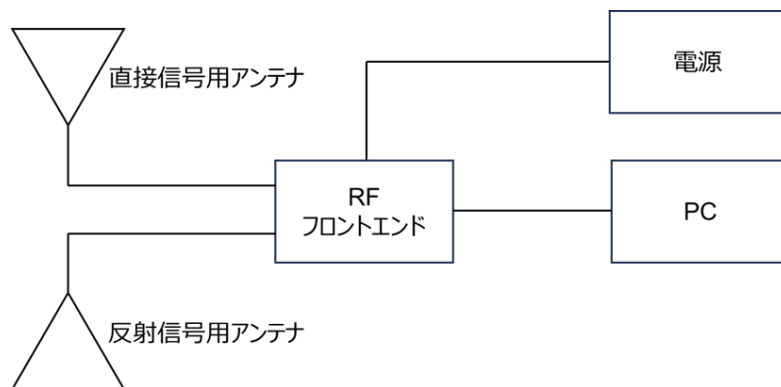


図 9 実験接続図

表 2 実験機器リスト

機器種類	機器名称・型番	製造
直接信号用アンテナ	DUAL POLARIZATION(RHCP/LHCP) ACTIVE L1/L2 GPS ANTENNA 3G1215RL-AA-XS-1 766837	Antcom
反射信号用アンテナ	DUAL POLARIZATION(RHCP/LHCP) ACTIVE L1/L2 GPS ANTENNA 3G1215RL-AA-XS-1 766836	Antcom
RF フロントエンド	多周波 RF データストリーマ COHAC <sup>∞</sup> Chronosphere-DS	Core

### 3.3 実験条件

以下の表 3 に本実験の実験条件を示す。条件 A はアンプによる反射信号増幅なし，非コヒーレント積算時間 100ms，条件 B はアンプによる反射信号増幅，非コヒーレント積算時間 100ms，条件 C はアンプによる反射信号増幅，非コヒーレント積算時間 200ms である。

表 3 実験条件

条件	アンプ	非コヒーレント積算時間
A	なし	100ms
B	あり	100ms
C	あり	200ms

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 水面実験

水面実験の結果を示す。以下の図 10 に観測点(★)を，図 11 に鏡面反射点及び第一フレネルゾーンを，表 4 に信号が水面で反射したと考えられる 2 衛星の衛星配置（仰角，方位角）をまとめた。



図 10 水面実験 観測点

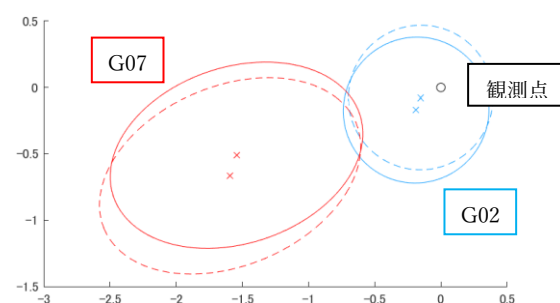


図 11 水面実験 反射点と第一フレネルゾーン



表 4 水面実験 衛星配置

条件	G02		G07	
	EL(deg)	AZ(deg)	EL(deg)	AZ(deg)
A	80.4	227.6	42.6	251.7
B	83.5	243.6	40.9	247.3

\*条件 C は、条件 B のデータの後処理を変更しているため省略.

以下の図 12~14 に、各条件における 100s 間の水面実験での電力反射率及び比誘電率を 5s おきにプロットした図を示す. また、表 5, 6 に結果をまとめた表を示す.

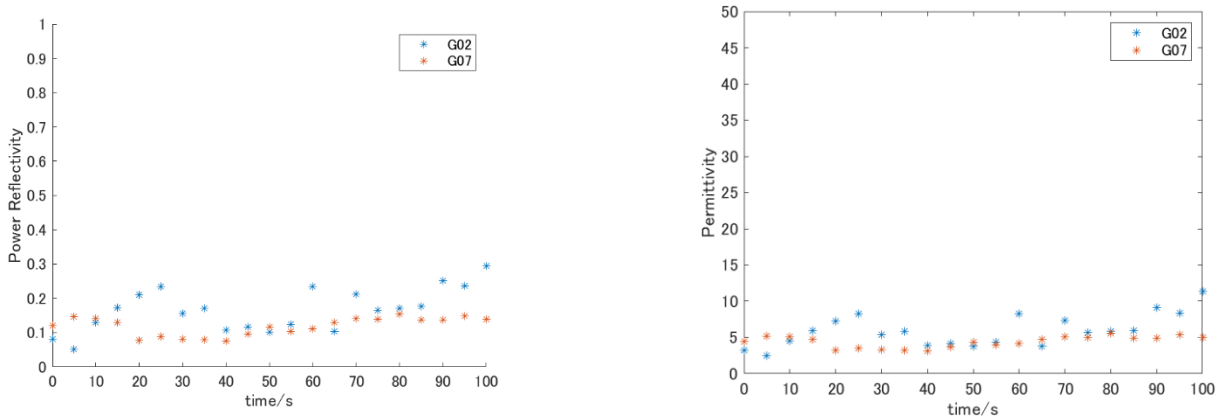


図 12 水面実験(A) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

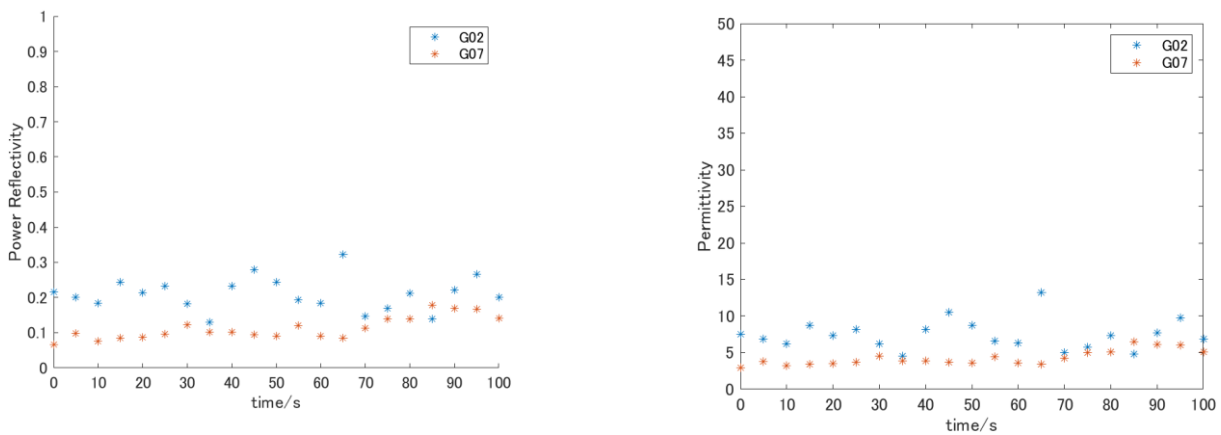


図 13 水面実験(B) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

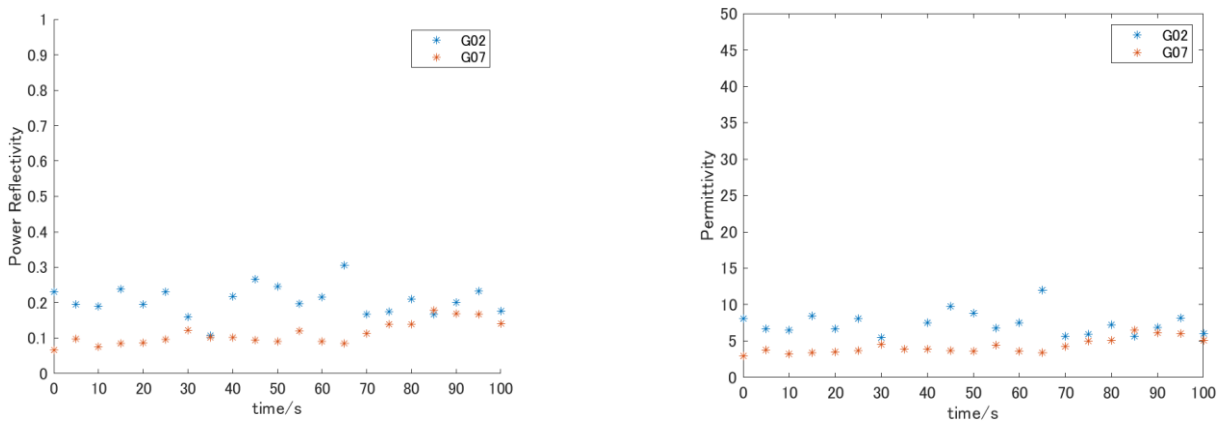


図 14 水面実験(C) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

表 5 水面実験 平均電力反射率

条件	G02	G07	Average
A	0.17	0.15	0.16
B	0.21	0.11	0.16
C	0.21	0.11	0.16

表 6 水面実験 平均比誘電率と文献値[7]

条件	G02	G07	Average
A	5.94	5.57	5.76(80)
B	7.45	4.27	5.86(80)
C	7.24	4.27	5.76(80)

### 3.4.2 コンクリート面実験

コンクリート面実験の結果を示す。以下の図 15 に観測点(★)を、図 16 に鏡面反射点及び第一フレネルゾーンを、表 7 に信号がコンクリート面で反射したと考えられる 2 衛星の衛星配置（仰角，方位角）をまとめた。



図 15 コンクリート面実験 観測点

図 15 コンクリート面実験 観測点

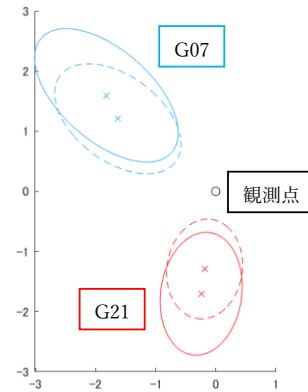


図 16 コンクリート面実験 反射点と第一フレネルゾーン

表 7 コンクリート面実験 衛星配置

条件	G07		G21	
	EL(deg)	AZ(deg)	EL(deg)	AZ(deg)
A	31.7	311.3	41.0	188.1
B	36.4	306.6	48.9	188.2

以下の図 17~19 に、各条件における 100s 間のコンクリート面実験での電力反射率及び比誘電率を 5s おきにプロットした図を示す。また、表 8,9 に結果をまとめた表を示す。

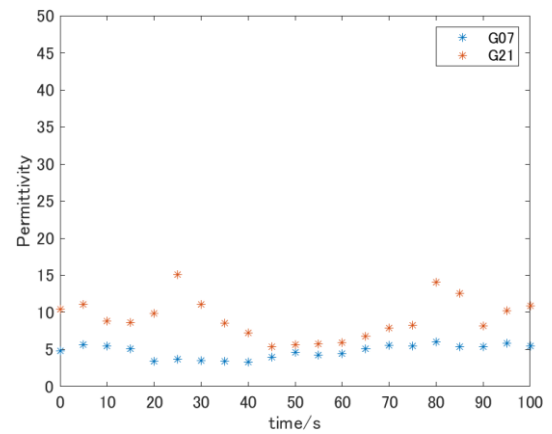
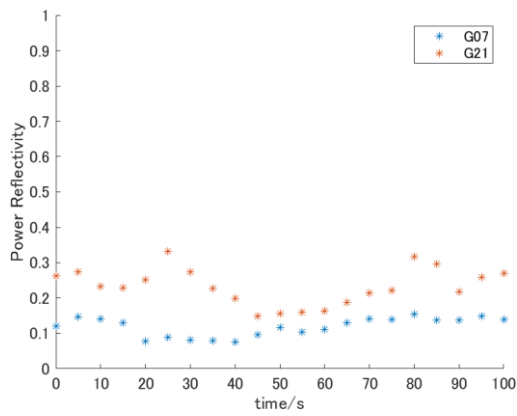


図 17 コンクリート面実験(A) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

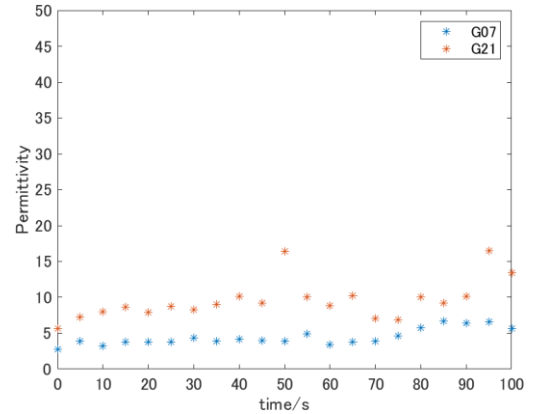
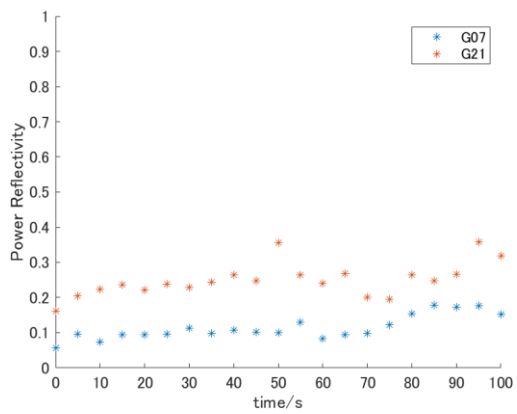


図 18 コンクリート面実験(B) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

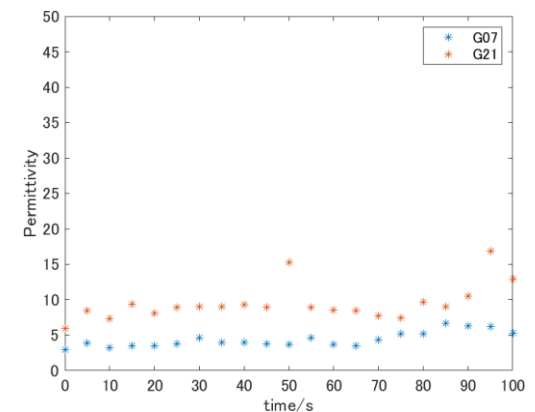
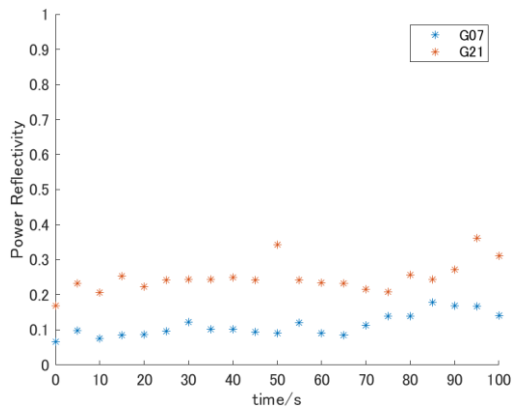


図 19 コンクリート面実験(C) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

表 8 コンクリート面実験 平均電力反射率

条件	G07	G21	Average
A	0.12	0.23	0.18
B	0.11	0.25	0.18
C	0.13	0.25	0.19

表 9 コンクリート面実験 平均比誘電率と文献値[4]

条件	G07	G21	Average
A	4.75	9.16	6.96(5.31)
B	4.44	9.61	7.03(5.31)
C	4.38	9.51	6.95(5.31)

### 3.4.3 土壌面（裸地）実験

土壌面（裸地）実験の結果を示す．以下の図 20 に観測点(★)を，図 21 に鏡面反射点及び第一フレネルゾーンを，表 10 に信号が裸地で反射したと考えられる 2 衛星の衛星配置（仰角，方位角）をまとめた．



図 20 裸地実験 観測点

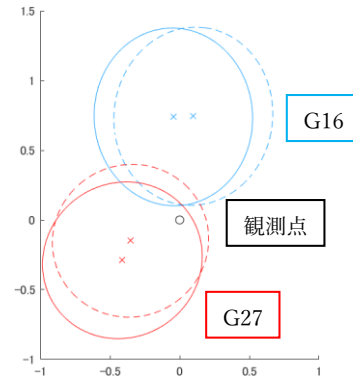


図 21 裸地実験 反射点と第一フレネルゾーン

表 10 裸地実験 衛星配置

条件	G16		G27	
	EL(deg)	AZ(deg)	EL(deg)	AZ(deg)
A	63.1	356.5	71.0	234.9
B	62.8	7.5	75.3	247.1

以下の図 22~24 に，各条件における 100s 間の裸地実験での電力反射率及び比誘電率を 5s おきにプロットした図を示す．また，表 11, 12 に結果をまとめた表を示す．なお，平均を計算する際に，外れ値（比誘電率が 50 を超えるデータ）を除外している．

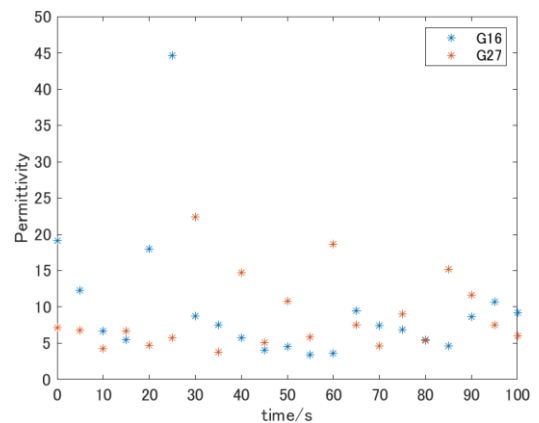
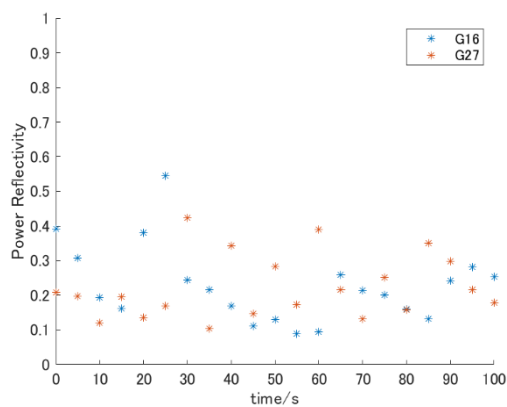


図 22 裸地実験(A) 平均電力反射率（左）平均比誘電率（右）

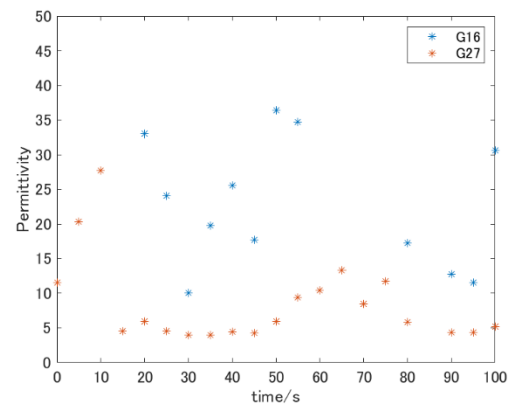
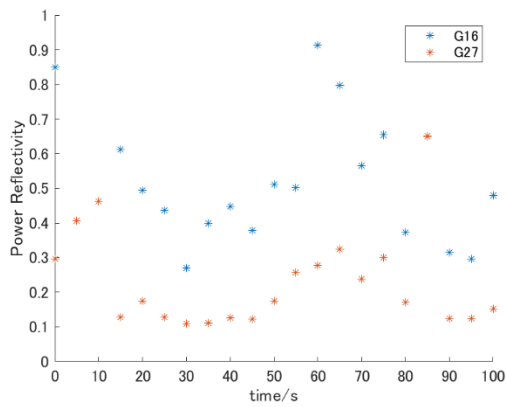


図 23 裸地実験(B) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

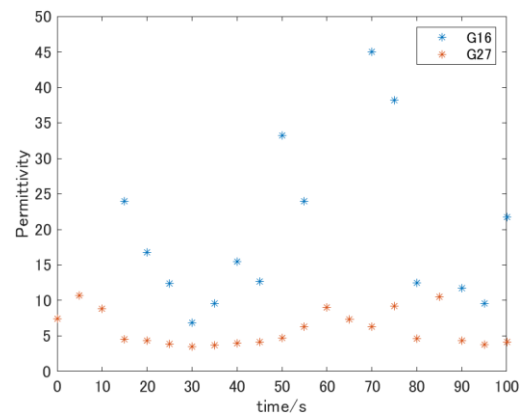
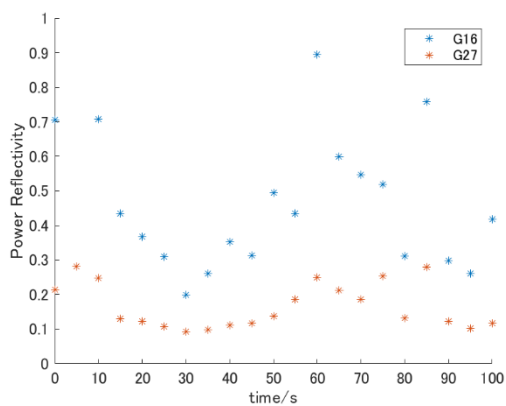


図 24 裸地実験(C) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

表 11 裸地実験 平均電力反射率

条件	G16	G27	Average
A	0.23	0.22	0.23
B	0.41	0.23	0.32
C	0.37	0.17	0.27

表 12 裸地実験 平均比誘電率と文献値[4]

条件	G16	G27	Average
A	9.82	8.74	9.28(15)
B	22.8	12.3	17.6(15)
C	19.6	5.97	12.8(15)

## 4 GNSS 反射法実験②

### 4.1 実験条件

2.5 章で述べたように、一般的に GNSS 信号は 2bitIQ で処理されるが、アナログ信号をデジタル信号へ変換する際のビットエラーを低減し、計測精度を向上させるべく、4bitIQ での処理を試みた。水面実験において、2bitIQ で処理した場合（条件  $\alpha$ ）と 4bitIQ で処理した場合（条件  $\beta$ ）の結果を比較する。また、データ取得衛星として QZSS を追加し、3 衛星からのデータを平均化する。

## 4.2 実験結果

以下の図 25 に観測点(★)を, 図 26 に鏡面反射点及び第一フレネルゾーンを, 表 13 に信号が水面で反射したと考えられる 3 衛星の衛星配置 (仰角, 方位角) をまとめた.

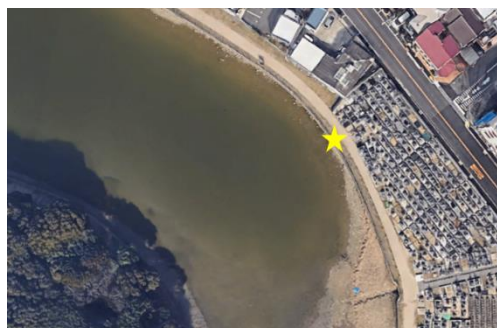


図 25 水面実験 観測点

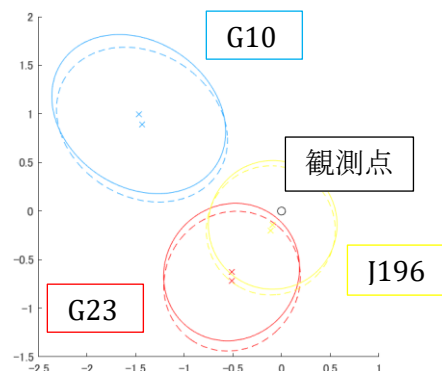


図 26 水面実験 反射点と第一フレネルゾーン

表 13 水面実験 衛星配置

条件	G10		G23		J196	
	EL(deg)	AZ(deg)	EL(deg)	AZ(deg)	EL(deg)	AZ(deg)
$\alpha$	51.6	304.2	70.1	219.3	85.7	212.5
$\beta$	53.0	301.8	68.5	215.2	84.2	209.0

以下の図 27, 28 に, 各条件における 100s 間の水面実験での電力反射率及び比誘電率を 5s おきにプロットした図を示す. また, 表 14, 15 に結果をまとめた表を示す.

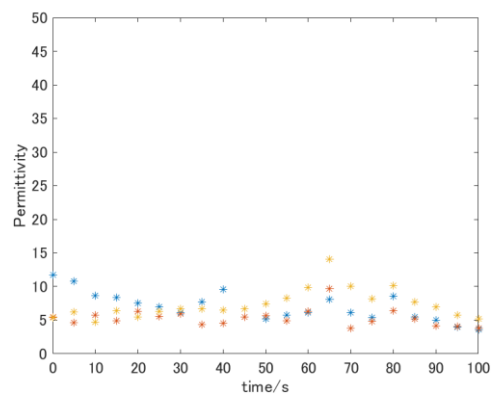
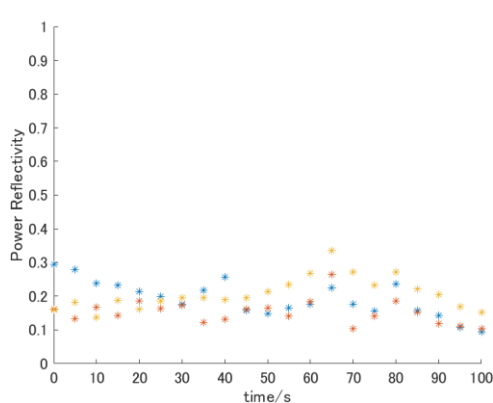


図 27 水面実験( $\alpha$ ) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

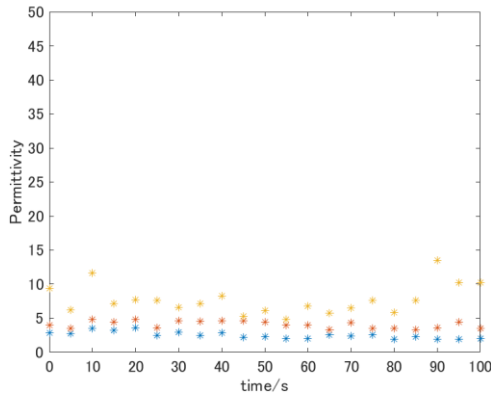
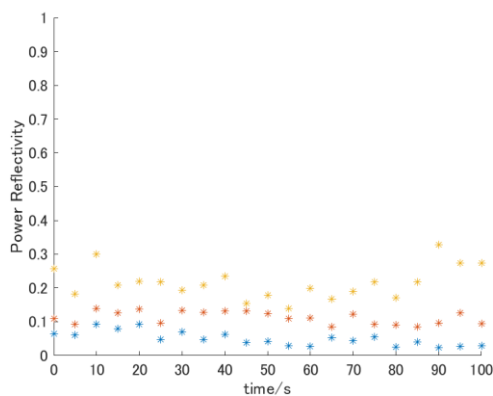


図 28 水面実験( $\beta$ ) 平均電力反射率 (左) 平均比誘電率 (右)

表 11 水面実験 平均電力反射率

条件	G10	G23	J196	Average
$\alpha$	0.19	0.25	0.21	0.18
$\beta$	0.050	0.11	0.22	0.13

表 12 水面実験 平均比誘電率と文献値[7]

条件	G10	G23	J196	Average
$\alpha$	6.96	5.32	7.37	6.55(80)
$\beta$	2.51	4.07	7.71	4.76(80)

## 5 考察

以下の表 13 に水面，コンクリート面，土壌面（裸地）の 3 地点での GNSS 反射法実験①の結果をまとめた．赤字の箇所はそれぞれ最も文献値[4][7]に近い比誘電率が得られた条件である．まず，これらの結果について考察を行う．

まず水面について，文献値と大きく異なる結果が得られた．原因として，実験機器に異常があったこと，実験場所周辺の電波環境が悪かったこと，風などによる水面の揺らぎによって反射信号が乱反射したこと，などが考えられる．

次にコンクリート面について，文献値に近い結果が得られた．環境はオープンスカイで周囲に大きな遮蔽物はなく，表面も水面と違い揺らぐことがないので安定した信号捕捉が行えたと考えられる．

次に土壌面（裸地）について，これもコンクリート面と同様に文献値に近い値が得られたが，実験結果に外れ値（比誘電率が 50 以上となる値）が複数含まれていた．原因として，実験場所である白鷺公園グラウンドは表面に若干の凹凸があり，水面と同様反射信号が乱反射し，上手く信号を捕捉できない時間帯があったことが挙げられる．

また，アンプと非コヒーレント積算時間変更による信号増幅効果について，表 13 の赤字部分から分かるように，コンクリート面と裸地では条件 C すなわちアンプあり，非コヒーレント積算時間 200ms のときに文献値に最も近い値が得られた．そのため，本論の信号強度を高める提案手法の有効性をある程度確認できたといえる．一方で，水面では有用な結果を得ることができなかったため，さらなる手法の改善が必要であると考えられる．

表 13 実験①の結果と文献値[4][7]（()内）の比較

		水面	コンクリート面	裸地
電力反射率	A	0.16	0.18	0.23
	B	0.16	0.18	0.32
	C	0.16	0.18	0.27
比誘電率	A	5.76(80)	6.96(5.31)	9.28(15)
	B	5.86(80)	7.03(5.31)	17.6(15)
	C	5.76(80)	6.95(5.31)	12.8(15)

次に，以下の表 14 に水面における GNSS 反射法実験②の結果をまとめた．これらの結果について考察を行う．

本実験は，2bitIQ による処理と 4bitIQ による処理を比較し，計測精度が改善されるかを調べる実験であったが，文献値[7]から分かるように，信号処理手法を改善しても文献値に近づく結果は得られなかった．これは，受信機である RF フロントエンドの AGC(Automatic Gain Control)機能に問題があったと考えられる．以下の図 29 に条件  $\beta$  での実験における IQ データを出力した結果を示す．図 29 か



ら分かるように、4bitIQ 処理を行ったとき、適切にゲインが調整されず、ガウス分布に従っていないことが分かる。また、2bitIQ 処理の場合も表 13 に示した水面の文献値とかけ離れてしまっていることから、受信機の AGC 機能以外に、GNSS 信号電波の受信環境にも問題があったと考えられ、改善が必要である。

表 14 実験②の結果と文献値[7](0内)の比較

		水面
電力反射率	$\alpha$ (2bit)	0.18
	$\beta$ (4bit)	0.13
比誘電率	$\alpha$ (2bit)	6.55(80)
	$\beta$ (4bit)	4.76(80)

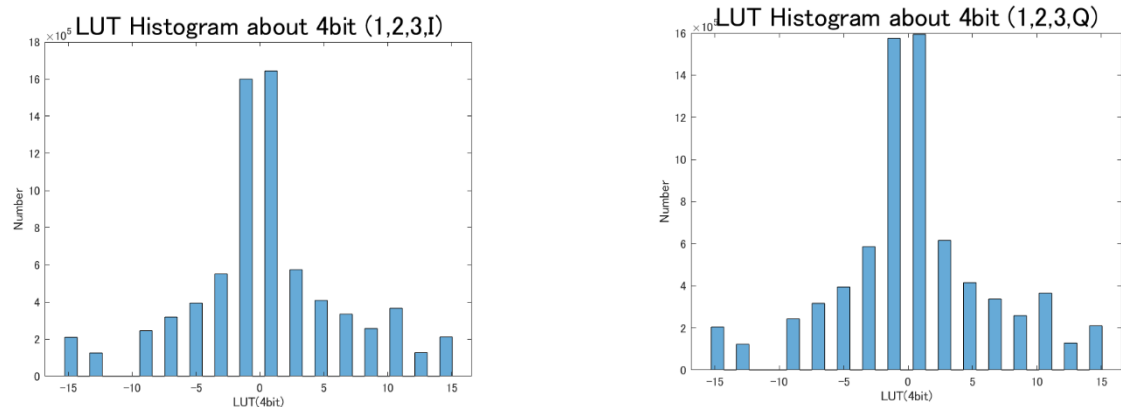


図 29 条件  $\beta$  (4bit)におけるゲイン分布 (左 : I データ 右 : Q データ)

## 6 まとめと今後の課題

本論では、GNSS 反射法を用いた地表面特性推定において、微弱な環境下の環境下でも安定した信号捕捉を行う手法としてアンプや非コヒーレント積算時間の変更による信号増幅を提案した。手法の有効性を検証するため、水面、コンクリート面、土壌面（裸地）の 3 地点で実験を行い、算出される電力反射率及び比誘電率を文献値と比較した。コンクリート面、裸地では提案手法の有効性を確認することができたが、水面では実験環境（表面での乱反射や電波環境）が原因で安定した信号捕捉を行うことはできなかった。そのため、実験環境の整備と、表面の凹凸など自然環境特有の不確かさにも対応できるモデルの開発が今後の課題として挙げられる。

また、アナログ信号をデジタル信号へ変換する際の量子化誤差を低減し、計測精度を向上させることを目的に、信号処理を 4bitIQ で行うことを試みた。2bitIQ 処理時の LUT を拡張し、4bitIQ 処理に適した LUT を提案した。構築したモデルを用いて比較実験を行ったが、結果の改善には至らなかった。信号受信環境の改善及び受信機の AGC 機能の修正が必要である。

今後、以上に挙げた課題の解決に取り組み、正確な地表面特性手法の確立を目指していく。

## 7 参考文献

- [1] 坂倉央子, “両円偏波アンテナを用いた GNSS 反射法による地表面特性推定” 大阪府立大学大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 修士論文, 2021.
- [2] 三川祥典, “合成開口レーダ手法を GPS 測位信号の地表散乱波へ適用した画像化アルゴリズムに関する研究” 東京大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 博士論文, 2012.
- [3] F. Zimmermann, B. Schmitz, L. Klingbeil and H. Kuhlmann, “GPS Multipath Analysis Using Fresnel Zones,”

sensors, 2018.

- [4] "ITU-R: Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz, Recommendation ITU-R P.2040-2," 2021.
- [5] "ITU-R Electrical characteristics of the surface of the Earth, Recommendation ITU-R P.527-6," 2021.
- [6] Trabajo Fin de Grado, "GNSS-R systems for soil parameters determination," 2018.
- [7] S. J. Katzberg, O. Torres, M. S. Grant, D. Masters, "Utilizing Calibrated GPS Reflected Signals to Estimate Soil Reflectivity and Dielectric Constant: Results from SMEX02," NASA Technical Reports Server, 2006.