

－ 修士論文－

バイスタティックレーダーに向けた
GPS 反射波を用いた偏波情報計測の実験的評価

EXPERIMENTAL EVALUATIONS OF POLARIMETRY FOR
BISTATIC RADAR
USING GPS REFLECTED SIGNALS

平成 25 年 2 月 6 日

指導教官： 齋藤宏文 教授

東京大学大学院
工学系研究科電気系工学専攻
学籍番号：37116427

江川 光

内容梗概

本研究では、将来の小型衛星によるバイスタティック方式でのリモートセンシングにむけた、偏波情報測定手法の基礎検討を行った。従来のリモートセンシングにおける偏波情報計測の研究は、モノスタティック方式が主流であるため、本研究はバイスタティックレーダーに向けたパイロット実験となる。送信機としてGPS衛星を利用し、植生に覆われた土壌を想定した実験環境を構築して、偏波情報計測の地上実験を行った。植生の高さや受信アンテナの角度を変化させて偏波状態の計測を行い、偏波度や交差偏波比の評価を行った。小型衛星のための測定システムの単純化の検討として、2偏波電力からの偏波度推定に着目し、推定精度の評価を行った。

目 次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本論文の目的と構成	3
第 2 章	偏波情報測定のための基本原理	5
2.1	誘電体表面における電磁波の散乱	5
2.2	電磁波の偏波情報	9
2.3	リモートセンシングにおける偏波度の計測	13
第 3 章	実験機器	16
3.1	多偏波アンテナ	16
3.2	GPS 受信機	17
3.3	校正結果	19
第 4 章	実験環境	21
4.1	GPS 信号	21
4.2	観測対象	21
4.3	測定方法	22
第 5 章	実験結果・考察	26
5.1	偏波度計測結果	26
5.2	交差偏波比計測結果	28
5.3	2 偏波電力からの偏波度推定	32
第 6 章	おわりに	34
6.1	まとめ	34
6.2	今後の発展	34
	謝 辞	36

発 表 文 献	37
参 考 文 献	38

表 目 次

2.1	Summary of soil moisture retrieval, comparing the ground-truth data obtained from different probes and the smigol retrieved values[8]	6
3.1	電波暗室での DoP 測定結果	20

目 次

1.1	地球観測衛星「だいち」	2
1.2	Ground experiment for future mission	3
2.1	入射波と反射波の H,V 偏波軸	7
2.2	HV 軸上の右旋円偏波	8
2.3	V,H,R 各偏波の反射率	9
2.4	Two types of microwaves scattering [6]	10
2.5	偏波状態を表すパラメータ	10
2.6	土壌表面の状態による反射波の違い	13
2.7	Flevoland, The Netherlands. Google Earth image	15
2.8	Comparison of the DoP ML and MoM estimators in dual-pol modes. NASA/JPL AirSAR image of Flevoland, The Netherlands. (a) DoP_{ML} in (HH, HV) mode. (b) DoP_{MoM} in (HH, HV) mode. (c) DoP_{ML} in (VH, VV) mode. (d) DoP_{MoM} in (VH, VV) mode. A sliding window covering $n = 5 \times 5$ pixels is used[18].	15
3.1	アンテナ外観	16
3.2	アンテナ切り替え回路	17
3.3	L-L および L-H のアンテナ利得	18
3.4	GPS signals receiver (EVK-6T, u-blox)	18
3.5	GPS 信号発生器)	19
3.6	GPS 受信器入出力特性)	19
4.1	GPS 衛星軌道の一例	22
4.2	実験環境	23
4.3	人工草 (左) と竹枝 (右)	24
4.4	5 分間での電力変動	25
5.1	鏡面方向反射波の DoP 平均値	26

5.2 DoP の角度特性	27
5.3 DoP と鏡面反射方向との角度差の関係	28
5.4 45 度散乱方向における DoP	29
5.5 各測定点の平均電力	30
5.6 LR 比と仰角の関係	30
5.7 HV 偏波比と仰角の関係	31
5.8 45 度 135 度偏波比と仰角の関係	31
5.9 ストークスパラメータから求めた DoP と DoP 推定値の比較	32
5.10 ストークスパラメータから求めた DoP と DoP 推定値の差の観測対象ごとの 比較	33

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

地球温暖化や森林減少等の地球環境の危機が叫ばれて久しいが、それに伴い地上の広範囲を観測可能な、宇宙機によるリモートセンシングの技術開発の重要性が高まっている。また、災害時における被災地の情報収集など、現場へ足を運ぶことなく広域観測が可能な方法として、宇宙機への期待は大きい。

一方、従来の人工衛星開発においては、数百億円もの莫大な開発費と開発期間の長さによるリスクの大きさや、これに伴う高信頼性の要求が問題となっている。この問題に対し近年、低コスト・短期間で開発可能な小型衛星に注目が集まっており、その技術開発が急速に進められている。低リスクな小型衛星の開発活性化による、宇宙機応用工学や関連科学分野の研究促進が期待される。

マイクロ波を用いたレーダリモートセンシングにおいても、小型衛星の普及を見込んで、複数の衛星コンフィギュレーションによる観測が注目されている。つまり、従来の送受信を一機の衛星が担うモノスタティック方式ではなく、送受信アンテナを別々の衛星に搭載する、バイスタティック・マルチスタティック方式での観測が、新たな選択肢として期待される。

また、同じバイスタティック方式での観測のアイデアとして、GPS(Global Positioning System)に代表されるGNSS(Global Navigation Satellite System)衛星の送信電波の地上反射波から、ターゲットの特徴量を観測しようとするGNSS reflectometryが挙げられる。GPSは本来、地上の受信者位置の特定を主なミッションとしているが、GPSには波長20cm程度のLバンド信号が利用されており、地表の物体に対して感度が良いことなど、地上観測において多くの利点があり、近年リモートセンシングへの応用にむけた研究が進められている。

レーダ観測における偏波情報計測

現在のレーダリモートセンシングにおいては、ターゲットにおける散乱波の偏波情報を十分に活用し、観測対象の特徴量を得ようとするポーラリメトリ観測が主流である[1]。文



図 1.1: 地球観測衛星「だいち」

献 [1] に記載されているような、散乱行列やその共分散行列の固有値解析によるターゲット情報の識別が、地上観測において有用であることが知られている。このポラリメトリックレーダの観測においては、水平・垂直の直交する 2 つの偏波で交互に送信する必要があるため、単偏波の観測と比べて P R F (Pulse Repetition Frequency; パルス繰り返し周波数) が 2 倍になってしまう。これは特に、合成開口レーダ (SAR : Synthetic Aperture Radar) の観測において問題となる。

合成開口レーダとは、概念的には衛星軌道上に仮想的なアンテナをいくつも並べたものであり、軌道を移動中に何回も送受信を行ない、受信した電波をドップラー効果を考慮した上で合成することによって、高い空間分解能を得るものである。一方、衛星の軌道運動を利用するため、衛星が地上の同じ場所を照射するまでに日数がかかるという問題もある。このため、P R F が 2 倍になることにより観測幅が半減してしまうと、さらに時間的な分解能の低下につながってしまう。

この問題に対し、送信偏波を 1 つに限定して P R F の倍増を防ぎつつ、偏波情報の計測を行おうとするコンパクトポラリメトリ方式が注目されている [2]-[4]。コンパクトポラリメトリ方式においては、送信偏波として水平偏波 (H 偏波) 成分と垂直偏波 (V 偏波) 成分を同時に含む、円偏波や 45° 直線偏波などを用い、2 偏波での受信を行う。ここから 2 偏波送信・2 偏波受信で得られる偏波情報を推定することで、衛星リソースの有効利用を目指すものである。

こうした偏波情報計測の研究は、従来モノスタティックレーダを対象としており、日本に

1.2 本論文の目的と構成

においても地球観測衛星 ALOS（Advanced Land Observing Satellite: だいち, 図 1.1）で利用されるなど、積極的な実用化が進められている。一方バースタティックレーダにおける偏波情報計測の研究は、今のところ非常に少ない。しかし、DLR（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: ドイツ航空宇宙センター）により 2010 年に打ち上げられた地球観測衛星 Tandem-X が、同機関の TerraSAR-X と本格的なバースタティック観測を行うなど、近年バースタティック・マルチスタティック方式でのレーダ観測に注目が集まっている。よって、小型衛星によるバースタティック・マルチスタティック観測に向けて、偏波情報計測の手法の検討が必要となるだろう。小型衛星における測定システムの研究では、コンパクトポリメトリのような衛星リソースの有効活用がより重要となる。人工衛星の小型化が求められる以上、そこに搭載される測定システムも可能な限り小型化・単純化されることが望ましい。

1.2 本論文の目的と構成

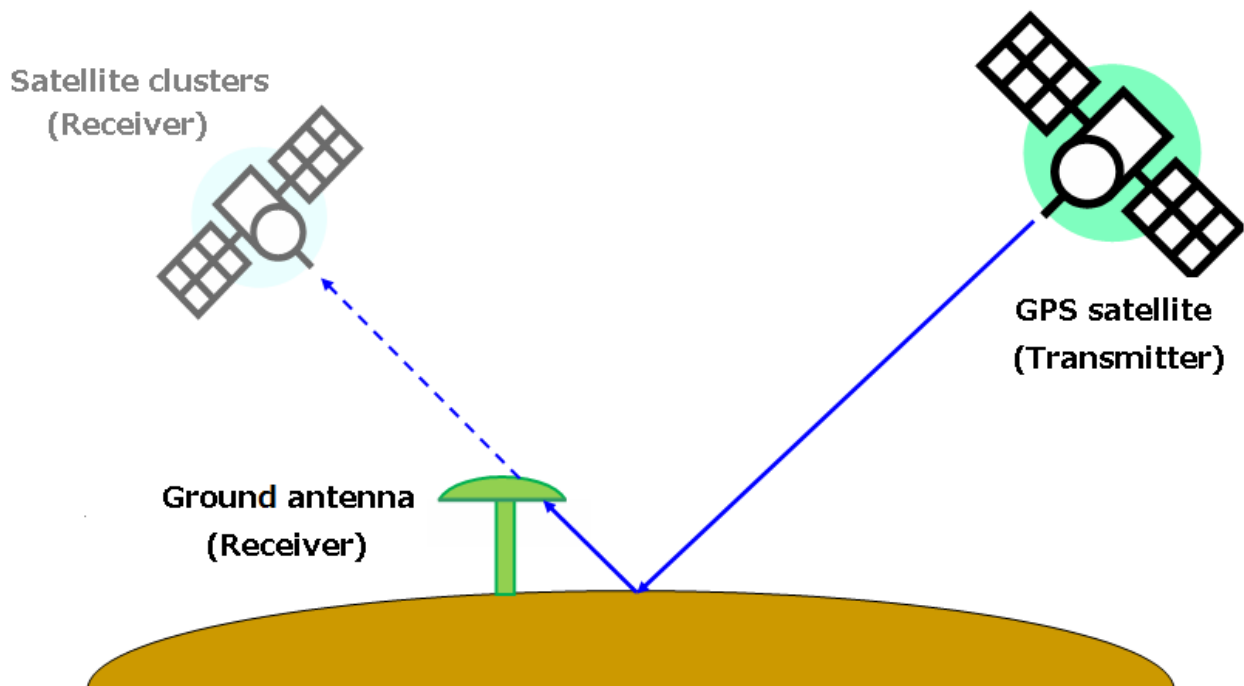


図 1.2: Ground experiment for future mission

本研究では、将来の小型衛星によるバースタティック方式でのレーダーミッションに向けた、偏波測定手法の実験的な評価を行う。送信電波として GPS 信号を利用し、地上に配置したアンテナでその電力測定を行い、将来の宇宙ミッションのための基礎検討を行う (図 1.2)。また偏波状態の指標として、交差偏波比や偏波度 (DoP, Degree of Polarization) に着

目し、測定対象として植生に覆われた土壌を想定する。このための実験環境を構築し、地上実験により偏波情報測定手法の検討・評価を行う。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章で偏波情報測定のための基本原理について述べる。第 3 章では、地上実験に用いた機器の詳細、特性について述べる。続く第 4 章で、実験環境と測定方法について説明する。これらをふまえ、第 5 章で実験結果の説明とその評価を行う。最後に第 6 章で本論文をまとめ、今後の課題を述べる。

第2章 偏波情報測定のための基本原理

地表の測定対象は、そのほとんどが誘電体である。本章では地表の偏波観測に必要となる、誘電体表面における電磁波反射の偏波特性の説明を行う。特に、入射・反射時の軸方向定義は、研究分野や著書によって異なるため、本論文での定義を明らかにしておく。また、電磁波の偏波状態について述べ、リモートセンシングにおける意義を説明する。

2.1 誘電体表面における電磁波の散乱

垂直偏波と水平偏波の反射率

電波が異なる屈折率の媒質に入射するとき、吸収された電波の一部は再放射される。レーダ観測ではこの反射された電磁波を観測する。誘電率が異なる物質間の界面での電磁波の振幅反射率は、フレネルの式により垂直 (V) 偏波と水平 (H) 偏波に分けて次のように記述される [7]。

$$r_V = \frac{n_2 \cos \theta_{inc} - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_{inc} + n_1 \cos \theta_t} = \frac{\tan(\theta_{inc} - \theta_t)}{\tan(\theta_{inc} + \theta_t)} \quad (2.1)$$

$$r_H = \frac{n_1 \cos \theta_{inc} - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_{inc} + n_2 \cos \theta_t} = \frac{\sin(\theta_t - \theta_{inc})}{\sin(\theta_{inc} + \theta_t)} \quad (2.2)$$

r_V 、 r_H はそれぞれ垂直偏波と水平偏波の振幅反射率、 n_1 、 n_2 はそれぞれ入射側と透過側の屈折率、 θ_{inc} は入射角、 θ_t は屈折角を表す。ここではスネルの法則

$$n_1 \sin \theta_{inc} = n_2 \sin \theta_t \quad (2.3)$$

を利用している。また、電磁波の屈折率は、比誘電率 ϵ と比透磁率 μ を用いて次のように表される。

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (2.4)$$

垂直偏波の反射率の式 (2.1) において、 $\theta_{inc} + \theta_t = \pi/2$ となるとき、反射率は0となる。この角はブリュースター角とよばれ、その条件は式 (2.1) 及び式 (2.3) から次式で表される。

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.5)$$

	SM=0 %	SM=20 %	SM=40 %
ε_{soil}	$3.25 + j0.10$	$10.43 + j0.97$	$23.67 + j2.50$
θ_B	61.0°	72.8°	78.4°
$90 - \theta_B$	29.0°	17.2°	11.6°

表 2.1: Summary of soil moisture retrieval, comparing the ground-truth data obtained from different probes and the smigol retrieved values[8]

土壌水分による反射率の変化

屈折率 n は式 (2.4) から求まるが、地表観測を行う場合、空気と土壌の境界面を考える必要がある。空気の比誘電率と比透磁率および土壌の比透磁率はほぼ 1 とおけるため、屈折率 n は土壌の誘電率が支配的となる。さらに、乾燥した土の比誘電率はおよそ 3 であり、水の比誘電率は 81 程度であることから、土壌の誘電率は水分により変化する。表 2.1 に土壌水分と誘電率の測定値、ブリュースタ角の計算例を示す。土壌水分の増加によって、土壌の誘電率も増加していることがわかる。また、誘電率の増加は屈折率の増加を意味し、式 (2.5) からブリュースタ角も高くなることがわかる。

右旋円偏波 (RHCP) の反射率

GPS 信号は右旋円偏波であり、反射波の解析には右旋円偏波が入射した場合の、反射率の計算が必要となる。本節では、 r_V 、 r_H を用いた右旋円偏波の反射率の定義を行う。図 2.1 のように入射波、反射波それぞれに垂直偏波と水平偏波の軸をとる。時刻 $t = 0$ において $E_H = 1, E_V = 0$, 角速度 ω で進行方向に対し右周りに回転する右旋円偏波の入射波を考える。図 2.2 に電波の進行方向を紙面に向かって上から下向きとした場合の HV 軸上の右旋円偏波を示す。入射波の E_H, E_V はそれぞれ

$$E_H = \cos\omega t \quad (2.6)$$

$$E_V = \sin\omega t \quad (2.7)$$

となる。また反射波は r_H 、 r_V を用いて

$$E'_H = r_H E_H = r_H \cos\omega t \quad (2.8)$$

$$E'_V = r_V E_V = r_V \sin\omega t \quad (2.9)$$

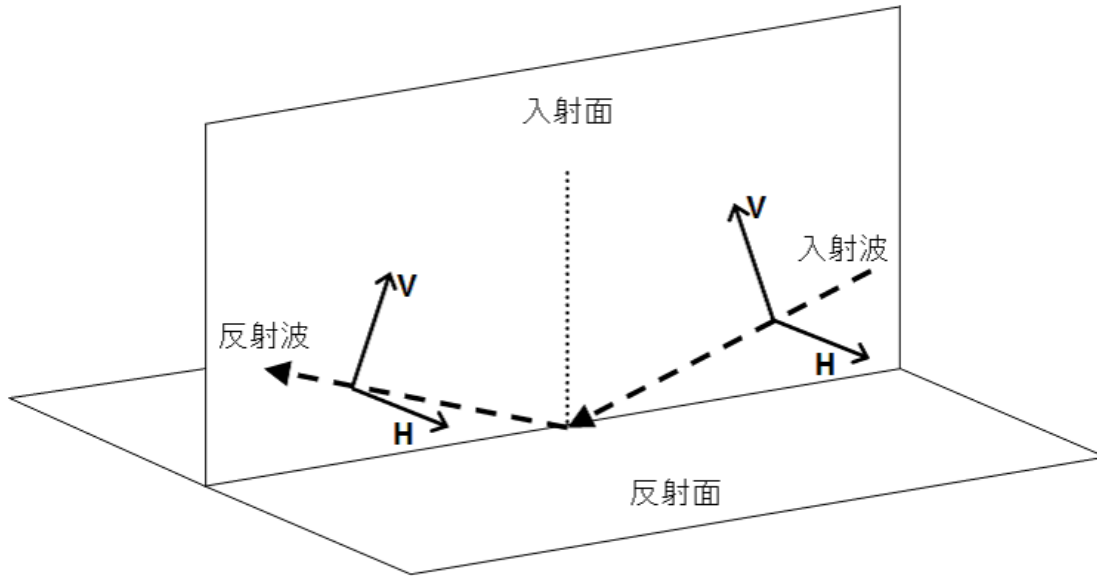


図 2.1: 入射波と反射波の H,V 偏波軸

と表される。よって反射波 E_{ref} は

$$E_{ref} = \begin{pmatrix} E'_H \\ E'_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_H \cos \omega t \\ r_V \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{r_H + r_V}{2} \cos \omega t + \frac{r_H - r_V}{2} \cos \omega t \\ \frac{r_H + r_V}{2} \sin \omega t + \frac{r_H - r_V}{2} (-\sin \omega t) \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

となる。また、図 2.2 における右旋円偏波成分 E_R 、左旋円偏波成分 E_L はそれぞれ

$$E_R = \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$$E_L = \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ -\sin \omega t \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

と表される。式 (2.11) にこの基底変換を行うと

$$E_{ref} = \frac{r_H + r_V}{2} E_R + \frac{r_H - r_V}{2} E_L \quad (2.14)$$

と変換できる。式 (2.14) において E_R 、 E_L の係数が右旋円偏波の反射率、右旋円偏波から左旋円偏波への変換率に相当する。よって右旋円偏波の反射率 r_{RR} と左旋円偏波への変換率 r_{RL} は

$$r_{RR} = \frac{r_H + r_V}{2} \quad (2.15)$$

$$r_{RL} = \frac{r_H - r_V}{2} \quad (2.16)$$

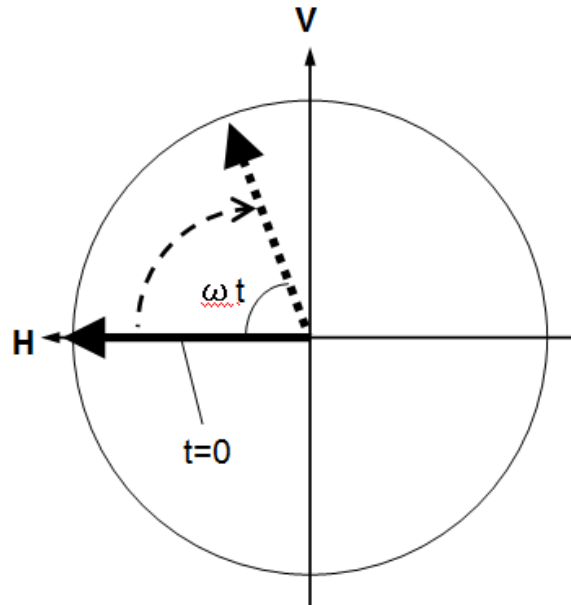


図 2.2: HV 軸上の右旋円偏波

となる。Fig.2.3 に $n_1 = 1$ 、 $n_2 = 4$ としたときの反射率の角度特性を示す。横軸は入射角ではなく入射点の仰角、つまり GPS 衛星の仰角 ($180 - \text{入射角}$) をとる。また、反射率が負になる範囲では反射波の位相が π ずれる。

表面散乱と体積散乱

これまでの反射率は、誘電体表面が滑らかで誘電率が一様である場合の、鏡面方向への反射を扱っている。しかし、地表の観測対象は複雑な形状・特性のため、より複雑な散乱を受ける。この散乱現象はその発生プロセスの違いから、表面散乱と体積散乱に大別される。

表面散乱は、異なる誘電率をもつ媒質の境界面で起こる現象である (図 2.4(a))。一方体積散乱は、媒質内部の誘電率の部分的違いが原因となって起こる散乱である (図 2.4(b))。入射するマイクロ波が媒質の内部深くに侵入するほど、体積散乱の寄与は増加する。具体的には、

- 入射波の波長が長い
- 媒質の表面がなめらか (ラフネスが小さい)
- 媒質の導電率が小さい

これら 3 つの要因が強いほど、表面散乱に対する体積散乱の寄与が大きくなる。1 つの境界面のみを考慮すればよい表面散乱に比べ、体積散乱は複数の境界面における散乱をすべて考慮しなければならない。そのため、体積散乱の特性を正確に記述することは、表面散乱

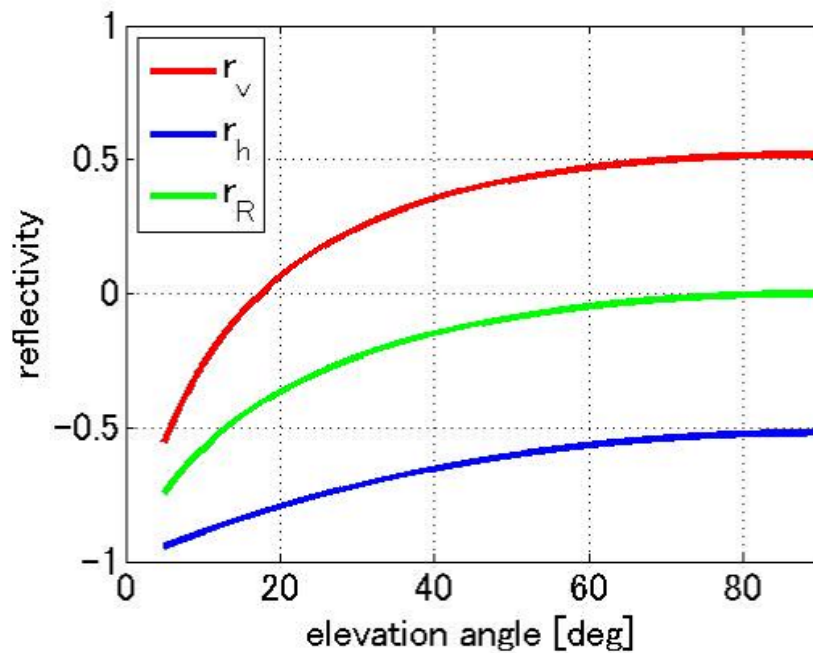


図 2.3: V,H,R 各偏波の反射率

に比べると困難である。実際に、表面散乱のモデルは数多く存在するが、体積散乱を記述したモデルは少ない。

2.2 電磁波の偏波情報

本研究では、植生に覆われた地表を観測対象とするが、この地面からの反射波は、草と土壌からなる数多くの散乱点からの反射波の合計となる。このような電磁波から観測対象の特性を知るためには、その偏波状態を知る必要がある。

ストークスパラメータ

代表的な偏波状態の指標として、ストークスパラメータが挙げられる。ストークスパラメータの利点はすべての要素が実数であり、電力測定によって決定できることである。ストークスパラメータは g_0 、 g_1 、 g_2 、 g_3 の4つからなり、ストークスベクトル g は

$$g = \begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |E_H|^2 + |E_V|^2 \\ |E_H|^2 - |E_V|^2 \\ |E_{45}|^2 - |E_{135}|^2 \\ |E_L|^2 - |E_R|^2 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

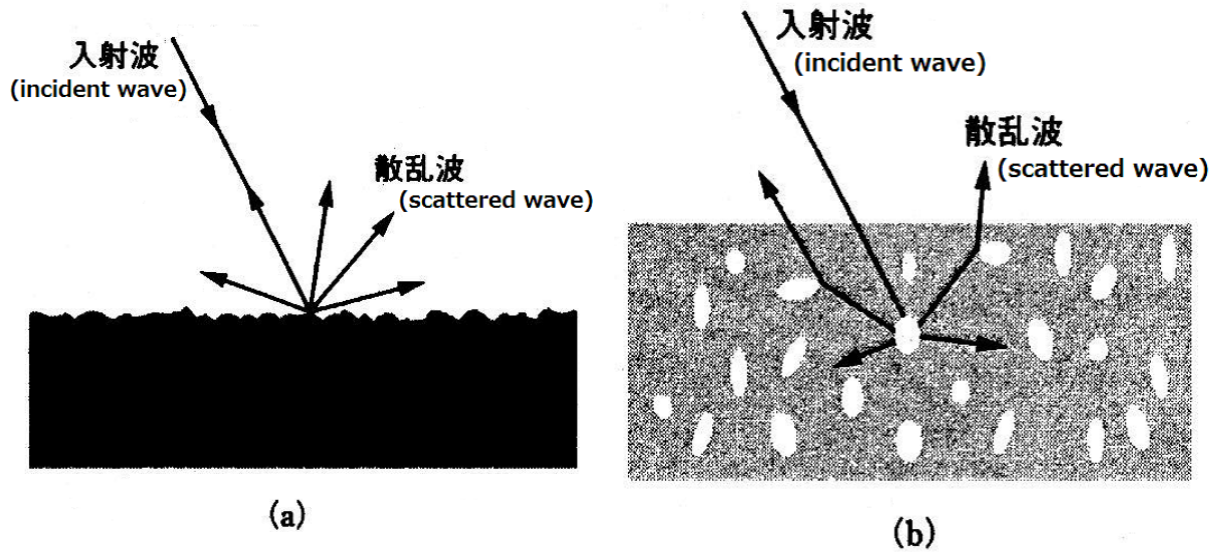


図 2.4: Two types of microwaves scattering [6]

と表される。ここで、 E_H 、 E_V 、 E_{45} 、 E_{135} 、 E_L 、 E_R はそれぞれ水平偏波、垂直偏波、45 度、135 度の直線偏波、左旋、右旋円偏波の強度を表す。特に g_0 は全電力を表し、

$$g_0 = |E_H|^2 + |E_V|^2 = |E_{45}|^2 + |E_{135}|^2 = |E_L|^2 + |E_R|^2 \quad (2.18)$$

を満たす。これらをもとに次のように偏波状態が決定できる (図 2.5)。

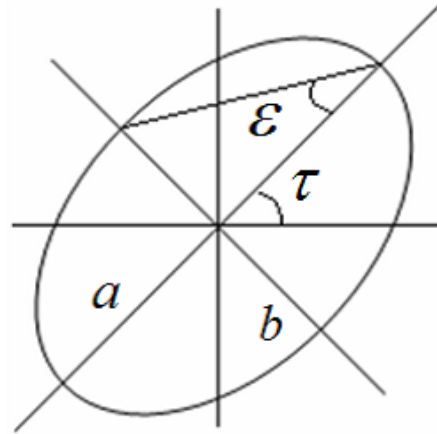


図 2.5: 偏波状態を表すパラメータ

$$\text{傾き角 } \tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{g_2}{g_1} \quad (2.19)$$

$$\text{膨らみ角 } \epsilon = \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{g_3}{g_0} \quad (2.20)$$

$$\text{軸比 } \frac{a}{b} = \frac{1}{\tan \epsilon} \quad (2.21)$$

偏波度

計測時間中に風で草が揺れるなどした場合には、反射波の合計位相はランダムに変動することになる。また、電磁波の送信アンテナが航空機や宇宙機に搭載されるリモートセンシングの場合、その移動に伴って電磁波の反射スポットや光路差も時々刻々と変動する。これにより位相や干渉の度合いも変化するため、偏波のそろい具合も変動する。その指標として偏波度 (DoP, Degree of Polarization) を考える。以下、DoP の計算方法についての説明を行う。

z 方向に伝搬する電磁波は、直交する 2 つの基底 X, Y を用いて式 (2.22) のように表される。

$$\mathbf{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_X(z, t)e^{j(\omega t - \nu z)} \\ E_Y(z, t)e^{j(\omega t - \nu z)} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

ここで、 t は時刻、 ω は角周波数、 ν は波数を表す。ここから偏波状態を表すジョーンズベクトルは

$$\mathbf{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_X(z, t) \\ E_Y(z, t) \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

と表され、その要素は複素数となる。ジョーンズベクトルから共分散行列が次のように計算される [13]。

$$\mathbf{\Gamma} = E[\mathbf{E}\mathbf{E}^\dagger] = \begin{pmatrix} E[E_X E_X^*] & E[E_X E_Y^*] \\ E[E_Y E_X^*] & E[E_Y E_Y^*] \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} a_1 & a_3 + ja_4 \\ a_3 - ja_4 & a_2 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は期待値、 † はエルミート共役、 * は複素共役操作を表す。この共分散行列から DoP は以下のように定義される [13]。

$$DoP = \left(1 - \frac{4|\mathbf{\Gamma}|}{(\text{tr}\mathbf{\Gamma})^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{4[a_1 a_2 - (a_3^2 + a_4^2)]}{(a_1 + a_2)^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

より実用的には平均電力測定から求まるストークスベクトルから、DoP を求めることができる。つまり、式 (2.17) を変形し

$$g = \begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle |E_H|^2 + |E_V|^2 \rangle \\ \langle |E_H|^2 - |E_V|^2 \rangle \\ 2\text{Re}E_H E_V^* \\ 2\text{Im}E_H E_V^* \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

と置き、式 (2.27) の X, Y を H, V に置き換えるとすれば、式 (2.27) は

$$\mathbf{\Gamma} = \langle \mathbf{E}\mathbf{E}^\dagger \rangle = \begin{pmatrix} \langle |E_H|^2 \rangle & \langle E_H E_V^* \rangle \\ \langle E_V E_H^* \rangle & \langle |E_V|^2 \rangle \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} g_0 + g_1 & g_2 + jg_3 \\ g_2 - ja_3 & g_0 - g_1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

となる。ただし、 $\langle \rangle$ は平均操作を表す。ここから DoP はストークスパラメータを用いて

$$DoP = \frac{\sqrt{\langle g_1 \rangle^2 + \langle g_2 \rangle^2 + \langle g_3 \rangle^2}}{\langle g_0 \rangle} \quad (2.28)$$

となる。

DoP は偏波のそろい具合を表し、DoP=1 のときは完全偏波、DoP=0 のときは完全無偏波、両者の混ざり合う DoP \in [0,1[では部分偏波を表す。

偏波度の推定

ストークスパラメータから偏波度を求めるには 6 種の偏波で測定する必要がある。しかし、より少ない偏波数の電力測定からでも偏波度を推定することはできる。4 種から 2 種の偏波からの DoP の最尤推定やモーメント法による推定が考案されている [14][15]。

ここでは、最も効率の良い推定法と期待される、2 種の直交する偏波電力を用いた最尤推定について説明する。推定のための前提条件として、式 (2.23) のジョーンズベクトルの分布が正規分布に従うと想定する。

$$p(\mathbf{E}) = \frac{1}{\pi^2 |\mathbf{\Gamma}|} \exp(-\mathbf{E}^\dagger \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{E}) \quad (2.29)$$

ここから直交する 2 種偏波での電力測定値 $\mathbf{I} = (I_1 I_2)^T$ の確率密度分布は 2 変量ガンマ分布であることが導かれる [16]。

$$p(\mathbf{I}) = \frac{1}{2k} \exp\left(-\frac{a_2 I_1 + a_1 I_2}{2k}\right) f_1(c I_1 I_2) \mathbf{1}_{R_+^2}(\mathbf{I}) \quad (2.30)$$

ここで、 $k = \frac{1}{2}(a_1 a_2 - a_3^2 - a_4^2)$ 、 $c = \frac{1}{4}(a_1 a_2 - 2k)k^{-2}$ 、 f は

$$f_q(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{z^m}{\Gamma(m+q)m!}, q > 0 \quad (2.31)$$

の超幾何関数を表す。さらに、 $\hat{a}_1 = E[I_1]$ 、 $\hat{a}_2 = E[I_2]$ をそれぞれの推定値としたうえで、式 2.25 における $a_3^2 + a_4^2 = r$ とおき、未知数 r の最尤推定を行う。 r の推定値は $\partial p(\mathbf{I})/\partial r = 0$ を満たし、その条件は

$$\hat{a}_1 \hat{a}_2 - r - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_1^j I_2^j \frac{f_2[r I_1^j I_2^j / (\hat{a}_1 \hat{a}_2 - r)^2]}{f_1[r I_1^j I_2^j / (\hat{a}_1 \hat{a}_2 - r)^2]} = 0 \quad (2.32)$$

となる。この非線形方程式をニュートンラプソン法を用いて解くことで、 r の推定値 \underline{r} が得られ、DoP の推定値を計算できる。

$$DoP_{MLE} = \left(1 - \frac{4[\hat{a}_1 \hat{a}_2 - (\underline{r})]}{(\hat{a}_1 + \hat{a}_2)^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

2.3 リモートセンシングにおける偏波度の計測

前節で述べたように、DoP は偏波のそろい具合を表す。ここから、地上のリモートセンシングにおいては、電磁波が散乱される観測対象の特徴量となりうる指標として注目されている。式 (2.28) から、DoP は 6 種の偏波における電力の時間的もしくは空間的平均をとることで求まる。つまり、この平均操作を行う区間内での偏波のばらつき具合が DoP を決定する。送信電波の偏波状態が一定であると仮定すると、反射波の偏波状態のばらつきは電磁波が散乱される対象の空間的・時間的変化に依存する。例えば、表面が非常になめらかで誘電率も一様な土壌を想定すると、反射波は土壌表面における鏡面反射成分のみとなり、空間的にその反射位置を多少変化させても同様の鏡面反射波が得られると考えられ、偏波のばらつきは非常に小さくなる (図 2.6 左)。つまり、反射波の偏波度は非常に高くなるだろう。一方、土壌の表面が植生で覆われているとすると、反射波は土壌表面の鏡面反射波のほかに、葉や茎などの多数の散乱点における反射、およびそれらの間の複数回散乱波を合計した干渉波となるだろう (図 2.6 右)。この場合、空間的に反射位置を変化させると、植生の雑多性から偏波状態も大きく変化し、平均区間内でのばらつきが大きくなると思われる。よって、反射波の偏波度は前者に比べ低くなるだろう。

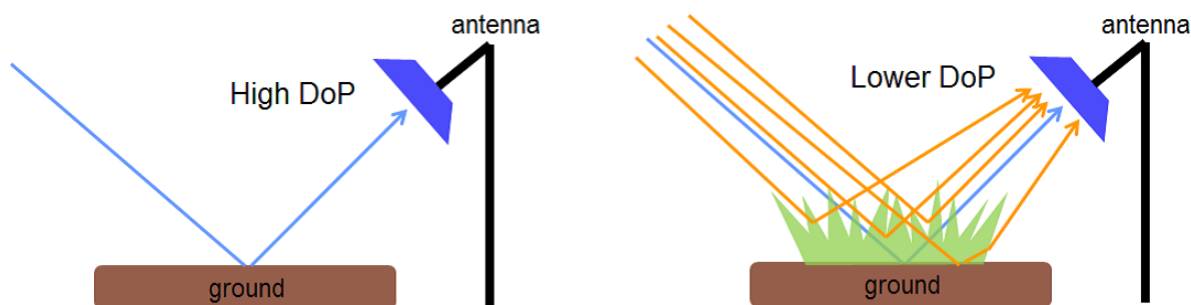


図 2.6: 土壌表面の状態による反射波の違い

このように偏波度は地表の状態の特徴量となりうる。DoP を利用して農場における植物の成長のモニタリング [17] や、植物と人工物の識別 [18]、海洋での船とオイル流出の検知 [19]、月表面のクレーター観測 [20] など、様々な研究が進められている。ここではオランダのフレヴォランド州における DoP の計測結果を研究例として取り上げる [18]。図 2.7 に測定値における google earth の航空写真を示す。また、図 2.8 に (HH, HV) 偏波と (VH, VV) 偏波それぞれにおける計測結果を用いた、最尤推定法とモーメント法による DoP 計算結果を示す。これらの結果は NASA/JPL のリモートセンシング航空機 AirSAR により計測されたものである。

図 2.7 からわかるように、農業地域での観測が行われている。それぞれの農地区画で作物の状態が異なるため、色の違いが見て取れる。この区画ごとの違いが図 2.8 の DoP マップにおいても観測されている。ここから、DoP が地表の植生に対する良い特徴量であること

がわかる。

しかし、計測に用いる偏波や DoP の計算（推定）手法によって、図 2.8 の 4 枚の画像は異なる特徴を持つことがわかる。例えば、左右の画像の比較は (HH, HV) 偏波と (VH, VV) 偏波の比較となっているが、(VH, VV) 偏波の画像の方が DoP の強弱がはっきり表れていることがわかる。また、上下の画像の比較は最尤推定法とモーメント法の比較であるが、画像下部を横に走る並木道の DoP が、上 2 枚では低 DoP であるのに対し下 2 枚では高 DoP と、明らかに異なっている。このように、DoP の計測・推定は選択する偏波や計算手法への依存も大きいため、観測対象にあわせた検討が必要となる。この研究はモノスタティックレーダにおける計測結果を用いているが、バイスタティックレーダを考える際も同じことが言えるだろう。



図 2.7: Flevoland, The Netherlands. Google Earth image

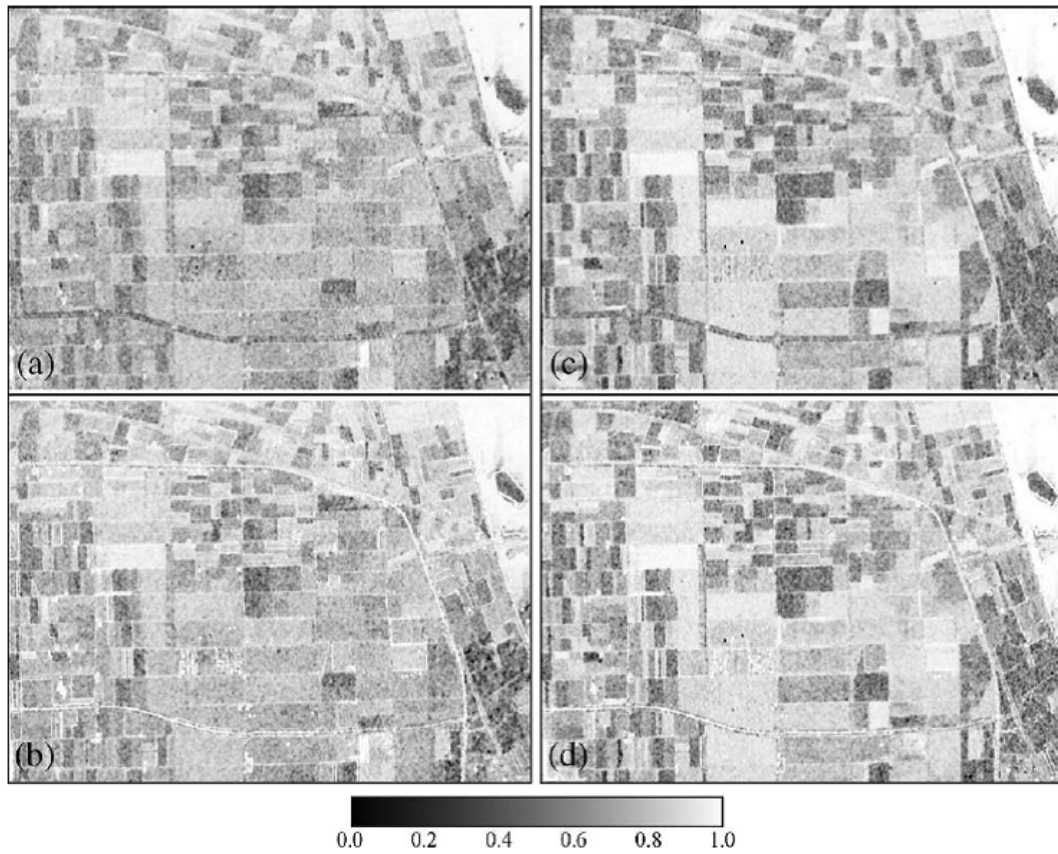


図 2.8: Comparison of the DoP ML and MoM estimators in dual-pol modes. NASA/JPL AirSAR image of Flevoland, The Netherlands. (a) DoP_{ML} in (HH, HV) mode. (b) DoP_{MoM} in (HH, HV) mode. (c) DoP_{ML} in (VH, VV) mode. (d) DoP_{MoM} in (VH, VV) mode. A sliding window covering $n = 5 \times 5$ pixels is used[18].

第3章 実験機器

本章では、地上測定に用いたアンテナやGPS受信機の仕組み・特性について説明する。また、ストークスパラメータ測定のための校正結果についてまとめる。

3.1 多偏波アンテナ

前章で述べたように、ストークスパラメータの測定には水平、垂直、45度、135度の直線偏波と、左旋、右旋円偏波の6通りの偏波での電力測定が必要となる。本研究では、アンテナの回転とスイッチ切り替えによりこれら6種の偏波測定が可能なアンテナを用いた(図3.1)。



図 3.1: アンテナ外観

このアンテナはGPS信号に合わせた1575MHz帯(波長約20cm)のショートバックファイアアンテナである。直線偏波計測時には、中心部の直線アンテナを水平、垂直、45度、135度の任意の角度に回転させて使用する。円偏波計測時には、直交する2つの直線アンテナ出力の90度位相ハイブリッドにより、右旋、左旋円偏波出力を得る。図3.2にアンテナの円偏波切り替え回路を示す。

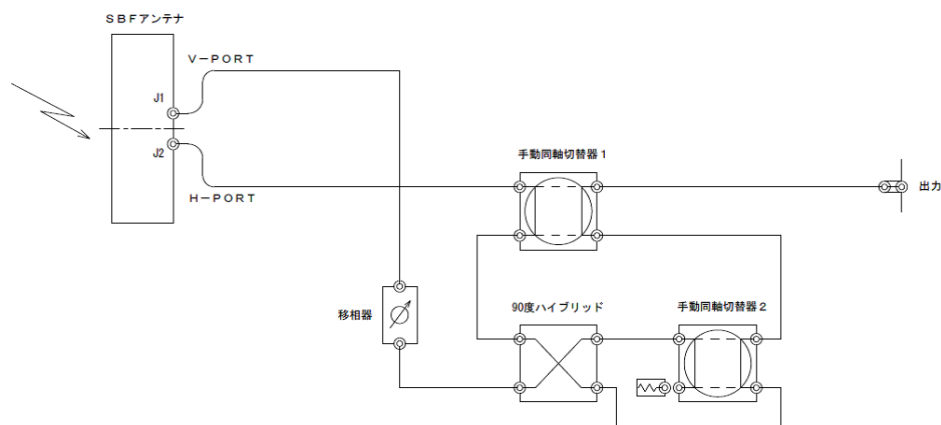


図 3.2: アンテナ切り替え回路

図 3.2 からわかるように、円偏波計測時には直線偏波計測時に比べ切り替えスイッチやハイブリッド器により損失が大きくなる。このため円偏波測定には+0.56dB の校正を行っている。

アンテナゲイン

反射波の地上測定の際には、アンテナは指向性を持つ必要がある。なぜなら GPS 衛星からの直接波と地上反射波を同時に受けてしまうと、その干渉波の電力を測定してしまうためである。この干渉波からも観測対象の特徴量を推定することはできるが、本研究では将来の宇宙ミッションにおけるバイスタティックレーダ観測の基礎実験として、対象からの反射波のみに着目する。

ショートバックファイアアンテナは、図 3.1 にあるように直径が 2 波長分（約 40 cm）の反射円板と半波長（約 10 cm）の円板の間に半波長ダイポールアンテナを配置してある。これにより一種の共振器を構成し、アンテナの指向性を得る。本アンテナは、正面利得約 15dBi、半値電力ビーム幅約 34 度の指向性を持つ。また直線偏波の交差偏波識別度は約 30dB、円偏波（LR）の交差偏波識別度は約 20dB である。図 3.3 に送信側左旋円（L）偏波、受信側 L および H 偏波でのゲイン測定結果を示す。このゲイン測定はテレコムエンジニアリングセンター松戸試験所の電波暗室で行った。

3.2 GPS 受信機

GPS 受信機として u-blox 社の EVK-6T(図 3.4) を用いた。また GPS 評価ソフトウェアも同社の u-center を利用した。このソフト電力評価は CNR(Carrier Noise Ratio) であるが、

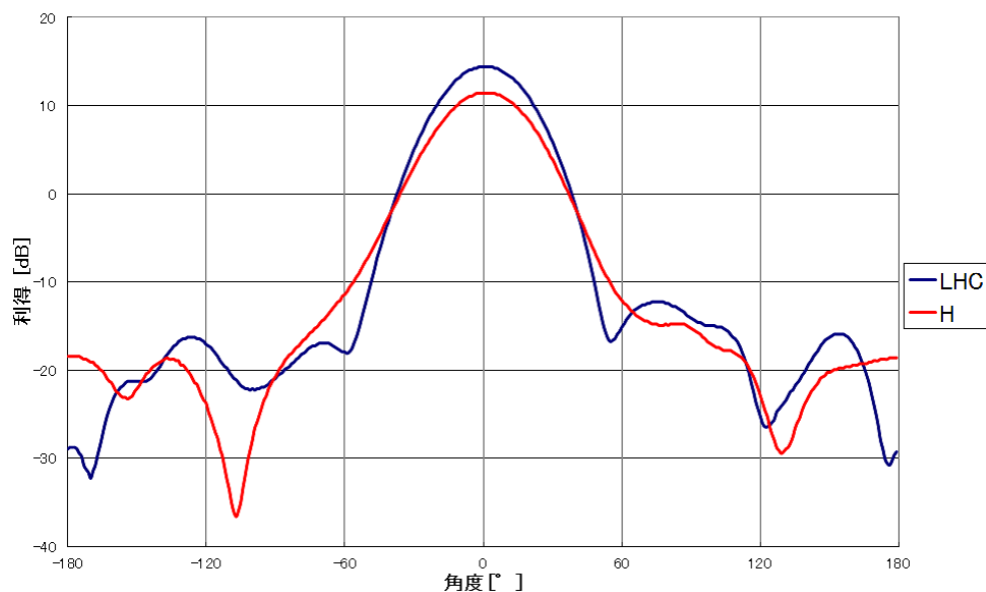


図 3.3: L-L および L-H のアンテナ利得



図 3.4: GPS signals receiver (EVK-6T, u-blox)

以降本論文では単に電力と表記する。

この受信機の電力表示は1dB単位であるが、測定の精度をあげるためアンテナ受信機間に0.1dB刻みのステップアッテネータを介すことにより、0.1dB精度での電力測定を行った。

また、この受信機の入出力特性は必ずしも線形ではないため、GPS信号発生器(MEGURO, MSG-2041 図 3.5)を用いてその校正を行った。

GPS信号発生器と受信機をアンテナを介さず直接接続し、受信機の特性を得た。結果を図 3.6 に示す。計測結果から最小二乗法により二次近似曲線を計算し補正に用いた。図 3.6 で出力を横軸、入力を縦軸としているのは、この近似関数を実際の計測結果にかけ合わせることにため、受信機表示値としての横軸、真値としての縦軸と対応をとるためである。受信機最大定格の60dB近づくとつれ、低めの値を返しやすいことがわかる。

3.3 校正結果



図 3.5: GPS 信号発生器)

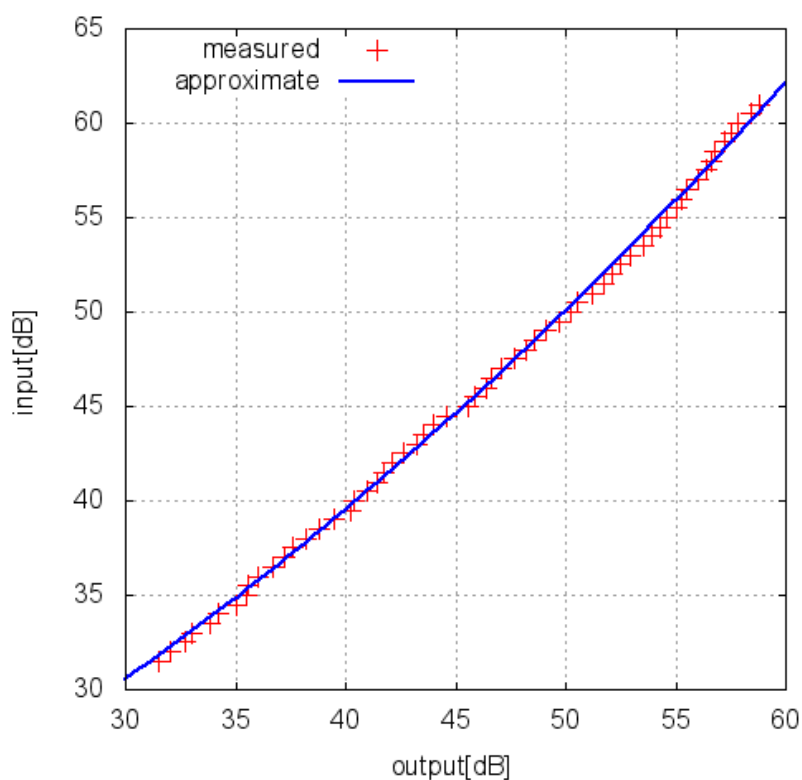


図 3.6: GPS 受信器入出力特性)

3.3 校正結果

前節までの構成に基づき、電波暗室で GPS 信号を用いたストークスパラメータおよび DoP の測定を行い、そのアンテナ・受信機の精度を評価した。アンテナは信号の入射線方向に向い合わせ測定を行った。信号強度は屋外での受信強度範囲に合わせ約 5dB おきに 5

通りの強度で行った。また、送信アンテナには実際の GPS 衛星と同様右旋円 (R) 偏波アンテナを用いた。

表 3.1 に測定結果を示す。

R 偏波強度 [dB]	55.6	51.0	46.5	42.0	37.2
DoP	0.997	1.000	0.987	0.987	0.997

表 3.1: 電波暗室での DoP 測定結果

電波暗室においては、マルチパスによる干渉等の影響は非常に小さく、時間的に変動する散乱対象もないため、偏波度はほぼ 1 に近いと考えられる。表 3.1 からわかるように、DoP は誤差 0.01 程度で測定できていると思われる。

第4章 実験環境

4.1 GPS 信号

地上実験に利用する観測電波として、GPS 信号を利用した。GPS は本来受信者の位置情報を特定するためのシステムであるが、GPS に代表される人工衛星による位置測位システムは、すでに地球上全面で 24 時間計測可能な衛星コンステレーションが完成されていることを利用し、リモートセンシングへと応用する研究が進められている。このリモートセンシング手法は GNSS-R(Global Navigation Satellite System - Reflectometry/Reflected) と呼ばれ、その観測対象は土壌水分 [10]、植生 [8][9]、海面 [11]、積雪 [12] など多岐にわたる。また、既存の衛星を信号送信機として利用するため、地上実験による測定手法の評価においても非常に有用である。

測定に利用する GPS 電波は R 偏波であり、この信号は L バンド信号 (1575.42MHz 帯) で波長が約 20cm と地上の植生等の観測対象にマッチする。この帯域が雲や大気による減衰をあまり受けないことも重要である。さらに R 円偏波であることから、GPS 信号での実験は第 1 章でのべたコンパクトポリリメトリ観測のための事前実験にもなりうる。円偏波の送信を直交する直線偏波で受信することには、双方のダイナミックレンジがそろいやすいなどの利点もあり、衛星の小型化のためのパイロット実験としても有用と考えられる。

また、GPS 衛星は高度約 20200km の準同期軌道上にある。つまりおよそ 12 時間で地球を一周するため、信号の入射角は 1 時間で最大 30° ほど変化する。図 4.1 に GPS 衛星の軌道の一例を示す。図中の線上の数字は時刻を表す。こうした軌道予測には Trimble 社の planning ソフトを使用した。GPS 衛星の位置情報は常に信号に乘せられているため、この角度情報を容易に利用できる。この衛星の仰角変化を利用して反射波の角度特性を評価した。

4.2 観測対象

観測対象として植生に覆われた土壌を想定し、研究棟の屋上に 2m 四方の木枠で囲まれた土台を用意した (図 4.2)。この土壌は平らにならしてある。

また植生の模擬として、高さ 7~15cm 程度の人工草と高さ 20cm~50cm 程度の竹枝 (図

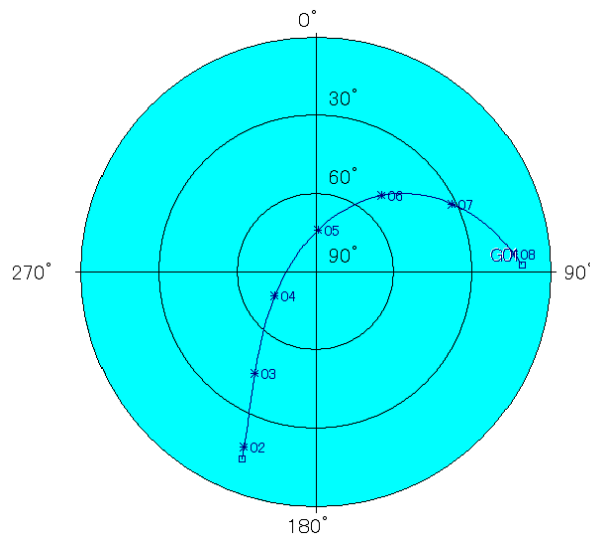


図 4.1: GPS 衛星軌道の一例

4.3) を利用した。植生なしの土壌、土壌と人工草、土壌と竹枝の 3 種の観測対象で比較を行った。また竹枝は乾ききっていたため、水で湿らせてから利用した。

4.3 測定方法

図 4.2 のようにアンテナを土台にむけて、そこからの散乱波の測定を行った。前章で述べたように、0.1dB 刻みのステップアッテネータを介してアンテナと受信機を接続し、水平偏波、垂直偏波、45 度、135 度の直線偏波、左旋、右旋円偏波の各電力強度の測定を行った。ここから式 (2.17) に基づきストークスパラメータを計算した。これを GPS 衛星の仰角変化に合わせて 5 回程（仰角変化にして 5 ～ 7 度）繰り返し 1 グループとする。このグループ内でストークスパラメータの平均値を計算し、式 (2.28) からこのグループにおける DoP の計算を行った。

アンテナ角度

バイスタティックレーダーの利点として、送信機の位置に対して受信機の位置が必ずしも固定されないことが挙げられる。第 2 章で述べたように、電磁波の反射強度は角度依存性が強いのである。特に土壌表面での鏡面反射と、土壌のラフネスや体積散乱・植生による散乱等多方向への散乱では、偏波状態が大きく異なると期待される。そこで、鏡面反射方向と鏡面反射成分以外の散乱成分の比較を行う。鏡面方向の前方散乱成分を測る場合には、土台が水平だと仮定し、アンテナの向きを GPS 信号の入射線と水平面に対象となる方向に向けて測定を行った。この角度からアンテナの向きをずらすことで、鏡面反射成分以



図 4.2: 実験環境

外の散乱成分を計測できる。本研究では、アンテナ向きの方位角のみをずらして散乱成分の測定を行った。方位角の角度差は22.5度、34度、45度の3通りで、鏡面方向と合わせて計4通りの角度で測定を行った。アンテナの仰角については、測定するGPS衛星の仰角に合わせて鏡面对象となるよう下向きに傾けたまま固定する。今回、水平方向のみに角度変化をつけたのは、測定環境上の制約による。つまり、アンテナ仰角を水平に近づけすぎてしまうと、土壌表面の受信面も広くなり土台の幅を超えてしまうこと、垂直に近づけすぎてしまうとアンテナが入射波自体を遮ってしまうことによる。また、方位角の角度差についても、180度ずらした後方散乱成分までを比較することが望ましかったが、アンテナを後ろ向きにずらしすぎると信号電力が著しく低くなり、GPS衛星のPRN識別に支障があるため、最大で45度の角度変化とした。

計測時間中の電力変動

式(2.17)によるストークスパラメータの計算は、同じ空間的・時間的区間内での平均電力の測定を仮定している。しかし、今回の測定法では、アンテナの計測偏波を切り替えながらL・R・V・H・45度・135度の順で測定を行っており、その間にGPS衛星も移動していくため、厳密には同じ空間・時間での測定ではない。これは誤差の原因になると考えられる。1つのストークスペクトルを得るのに必要な時間は、アンテナの偏波切り替えや0.1dBステップアッテネータの切り替えなどで2・3分かかる。この間のGPS衛星の運動は、角度



図 4.3: 人工草（左）と竹枝（右）

変化にして 1-2 度である。一方、時間的な電力の変化は測定条件によって異なる。図 4.4 に 5 分間単一偏波でアンテナ向きを固定した時の電力変動の計測結果を示す。

図 4.4 の横軸は 5 分間の平均電力を、縦軸はその間の電力変動の標準偏差を表す。この電力測定は約 20 秒おきに行った。また直接波は GPS 衛星の方向にアンテナを直接向けた場合、反射波はアンテナを鏡面反射方向に向け土壌からの反射波を測定したことを表す。図 4.4 から直接波よりも反射波の方が変動が大きいことがわかる。これは、反射波の場合には、計測時間中の衛星の移動による、空間的な散乱点の変化の影響を受けやすいためと思われる。さらに、測定電力が低いほど電力変動が大きいことがわかる。これは、電力に対し一定の割合で変動が乗るだけではなく、一定電力の変動成分が観測されていることを表す。こうした変動の要因としては、大気の状態変化による減衰量の変化や、測定環境周辺のマルチパスの変化等が考えられる。一方、同様の電力変動測定を、GPS 受信機と GPS 信号発生器を直に接続して行う場合は、変動はほとんどなく、まれに 0.1dB の変動がみられるのみであったので、GPS 受信機は変動の要因ではないことがわかった。また、電力変動は同程度の平均電力でもばらつくことがわかる。本研究では 40-45dB での計測が多いが、その電力変動は 0.5dB 前後であることがわかる。式 (2.28) から、DoP の計算は電力/電力の次元で行われており、DoP の誤差も 0.5dB 程になる恐れがある。実際には 5 点程度のストークスベクトルの平均をとっているため、変動誤差の平滑化も期待されるが、この誤差の軽減は今後の課題である。

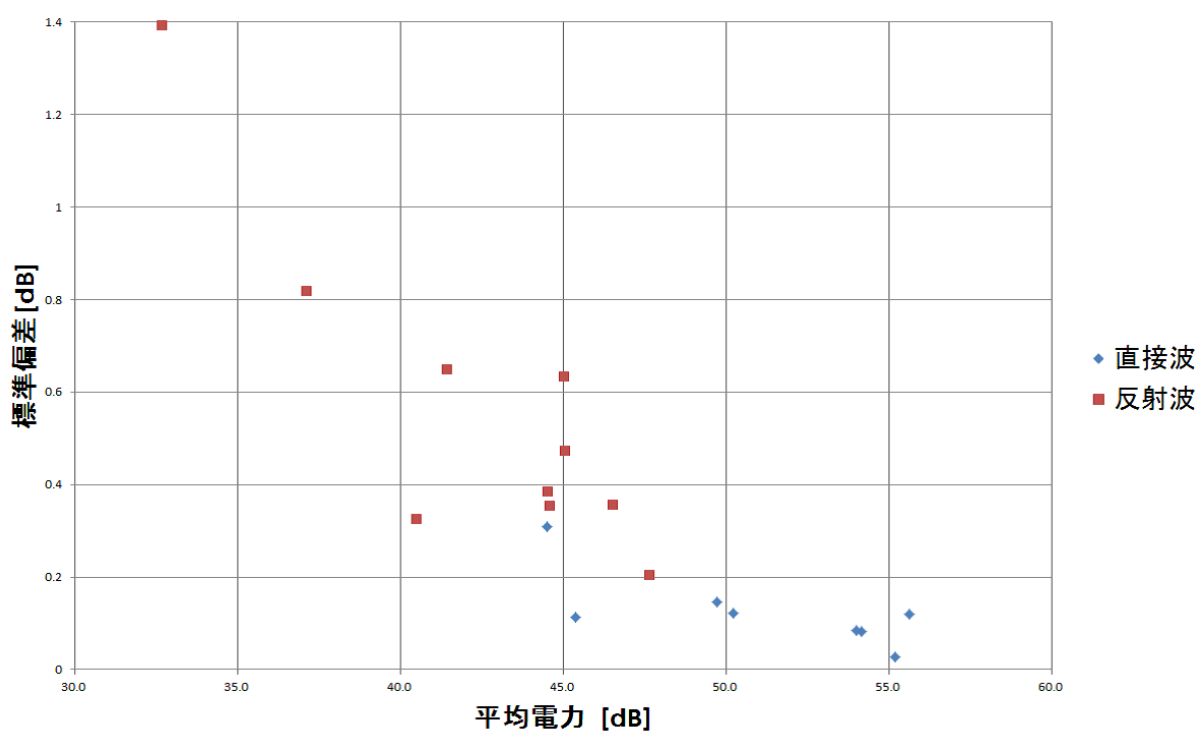


図 4.4: 5 分間での電力変動

第5章 実験結果・考察

5.1 偏波度計測結果

図 5.1 に鏡面方向成分の測定における各測定対象の偏波度の平均値を示す。

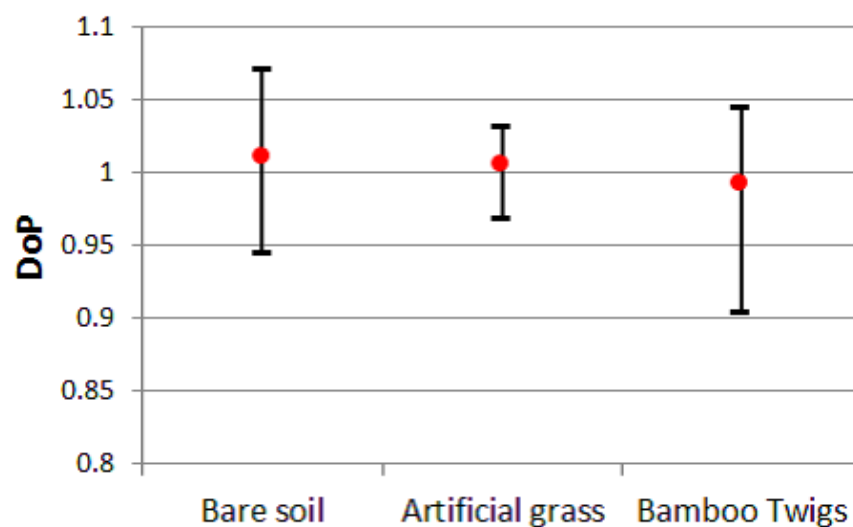


図 5.1: 鏡面方向反射波の DoP 平均値

図 5.1 のエラーバーは測定値の最大・最小を表す。DoP の平均値は植生の有無にかかわらずほとんど変わらず、1 を中心にばらついている。植生が多いと平均値がわずかに低いようにも見えるが、誤差の範囲内である。つまり今回のような観測対象では、鏡面方向においては土壌からの鏡面反射成分が圧倒的に強く、植生等による前方以外への散乱、多重散乱による影響がほとんど見られていないと考えられる。このため植生等による影響を鏡面反射方向の DoP で評価することは難しいといえる。

また、本来 1 が最大値であるはずの DoP が 1 より大きい値を示す場合がある。これは誤差によるものと考えられる。前章で述べたように、計測時間内に GPS 信号の反射波全電力が大きく変化する場合に誤差も大きくなりやすい。

次に、アンテナ方位角をずらした散乱成分での DoP 計測を含めた結果を GPS 衛星仰角を横軸にとり図 5.2 に示す。

鏡面方向との角度差が大きくなるほど、DoP が低くなる傾向が見られる。22.5 度の水平角度差方向では、DoP は鏡面方向と同じく 1 に近い値となったが、34 度、45 の散乱方向で

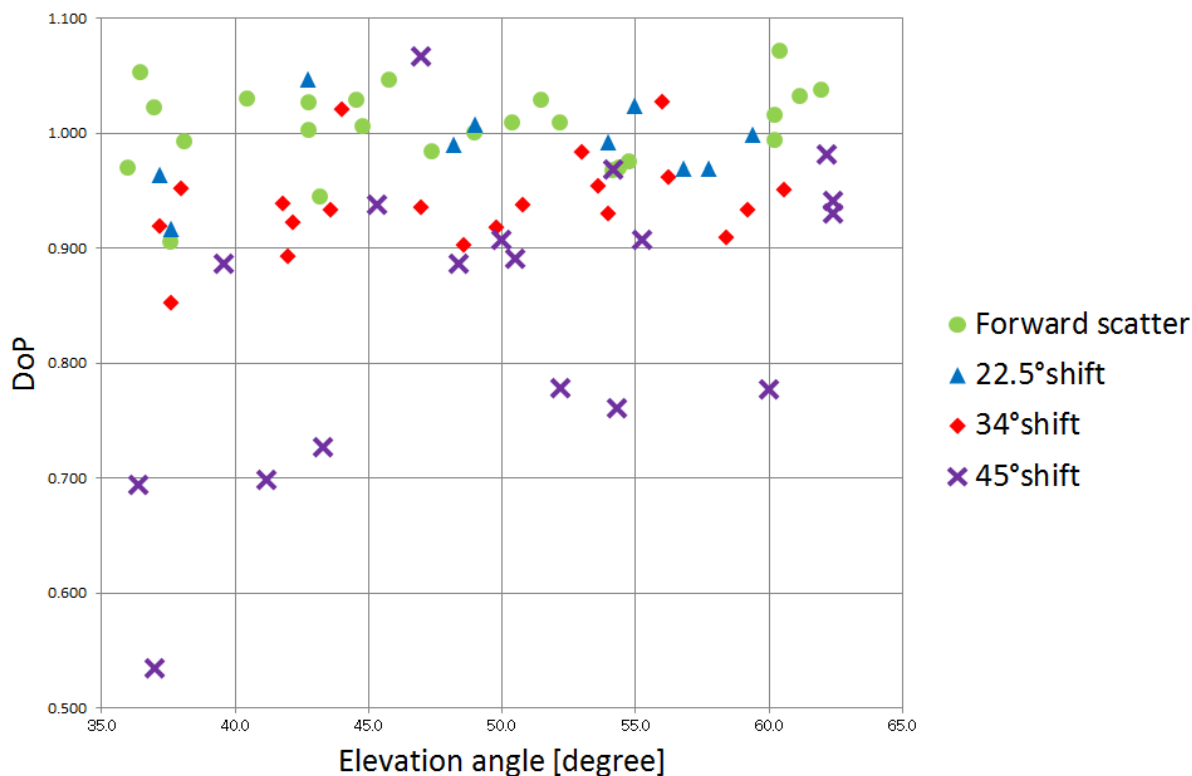


図 5.2: DoP の角度特性

は角度差に応じて DoP が低くなる。これは 22.5 度程度の角度差では鏡面反射成分が大きく、DoP も高い値となるが、角度差が大きくなるにつれ鏡面反射成分が受からなくなってゆき、DoP の低い散乱成分を多く受けるようになるためだと考えられる。角度差をつけた散乱成分は、仰角が高くなるほど DoP も高くなる傾向にあるが、これも同様の理由による。つまり仰角が高くなると、同じ方位角度差でも鏡面反射方向との角度差は小さくなる。鏡面反射方向との角度差 α は幾何学的に求まり、仰角が ϕ で等しく方位角に θ の差をつけたとすると、

$$\alpha = 2\sin^{-1} \left(\frac{\cos\phi\sqrt{1-\cos\theta}}{\sqrt{2}} \right) \quad (5.1)$$

となる。図 5.3 に、鏡面反射方向との角度差 α と DoP の関係を示す。

鏡面反射方向との角度差を大きくすると DoP が低くなる傾向がみられる。およそ 25 度以上の角度差において DoP が大きく下がり始める。アンテナの 25 度方向の利得は正面に対し約-6dB であるので、鏡面方向の反射波電力と他の方向への散乱電力の差は 6dB 以上であると推測される。

図 5.4 に最も DoP の変化が大きかった 45 度散乱方向での、観測対象による DoP の違いを示す。観測対象による差異としては、鏡面方向からの角度差を大きくとった際の竹枝での DoP が他の点より若干低くなったが、土壌のみと人工草での違いはほとんど見られなかった。これは、人工草の丈が最大でも 15cm と波長 20cm に対して短く、誘電率 2.5 程度のプ

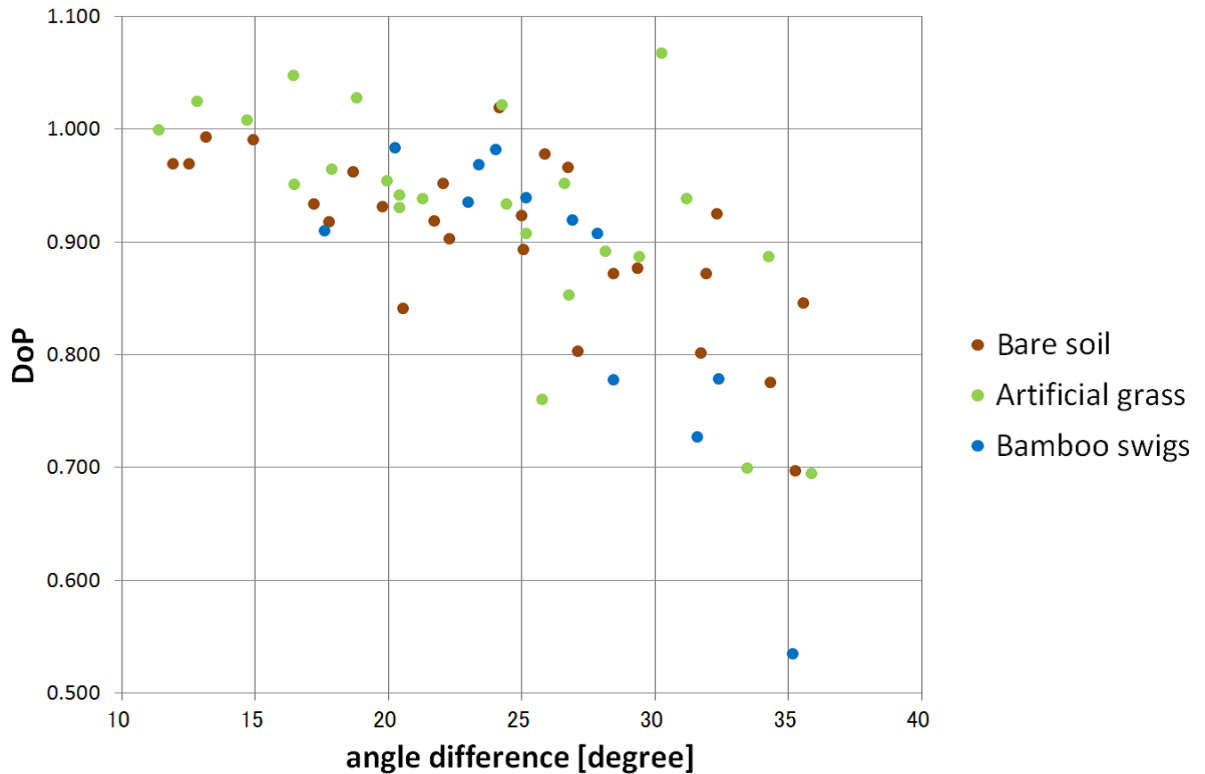


図 5.3: DoP と鏡面反射方向との角度差の関係

ラスチックでできているため、GPS 電波はほとんど散乱されなかったためだと考えられる。逆に 20cm 以上の大きさで十分な誘電率を持つ植生ならば、GPS 電波による DoP 測定が植生量推定の指標になる可能性があることが分かった。

また、前章で述べたように電力と誤差には相関が考えられるため、各 DoP 計算グループにおける平均電力を図 5.5 に示す。この平均電力はすべての偏波の平均電力である。DoP の結果と同様、角度差を大きくとった低仰角での測定で、電力が低くなっている。角度差が大きくなるにつれ鏡面反射成分が受からなくなってゆき、弱い散乱成分を受けているためだと考えられる。また、鏡面反射方向での平均電力は、土壌のみと人工草での違いはほとんど見られないが、竹枝での計測結果は他の 2 つより若干低い傾向にある。ここでも、竹枝の散乱効果が確認できる。

5.2 交差偏波比計測結果

図 5.6 に LR 偏波比の計測結果と仰角の関係を示す。

式 (2.15)、式 (2.16)、および図 2.3 からわかるように、R 偏波の GPS 信号は仰角が高いほど L 偏波での反射成分が強くなる。図 5.6 の鏡面反射方向では、土壌と人工草での計測時は LR 比には特徴的な違いはないが、竹枝の低仰角の計測結果においては他の 2 種より LR

5.2 交差偏波比計測結果

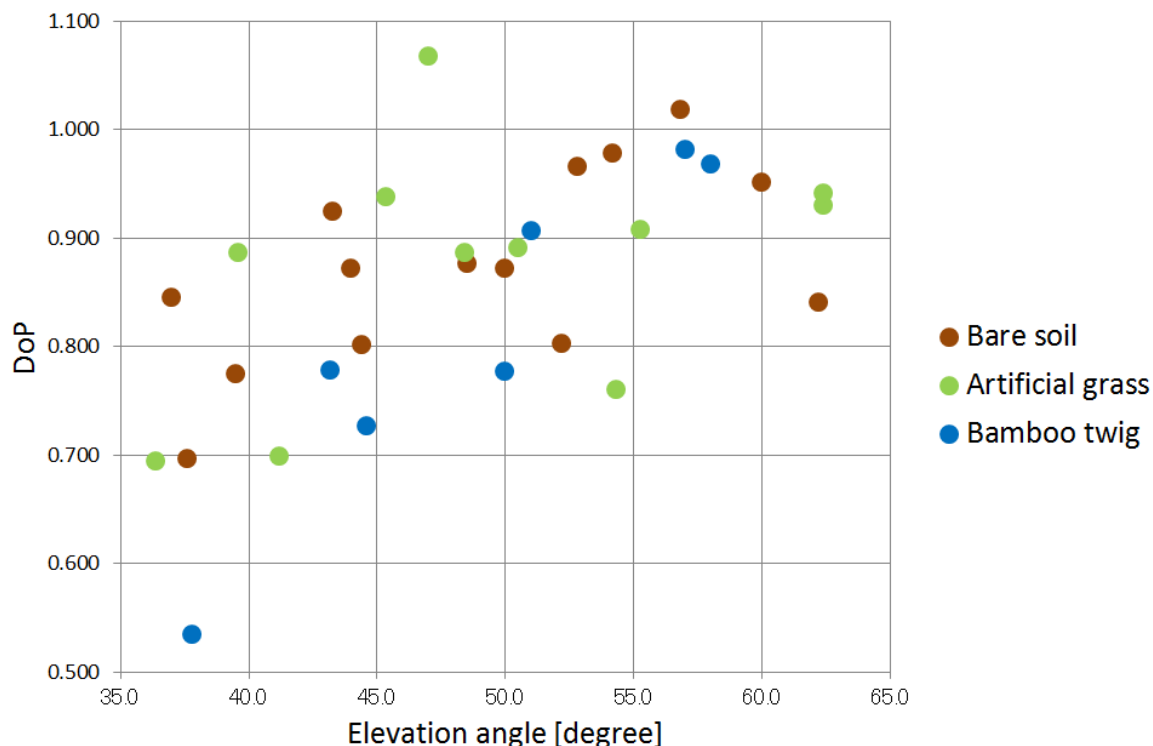


図 5.4: 45 度散乱方向における DoP

比が低くなっている。これは、前節で述べたように竹枝では散乱の影響が比較的強く観測でき、1 回反射ならば L 偏波になるはずの反射波が、多重反射により R 偏波成分を増したためであると考えられる。低仰角でこの影響が見られるのは、低仰角では GPS 信号の植生層を通過する経路が長くなることや、竹枝の多くは地面から鉛直に植えられているため高仰角になると影響を受けにくくなるなどの理由が考えられる。DoP の鏡面反射方向での測定では、これら観測対象による違いはみられなかったため、鏡面反射方向の測定では DoP より偏波比に焦点を充てるべきかもしれないが、第 2 章で述べたように交差偏波比の電波の入射角や誘電率への依存性を考慮する必要がある。また鏡面方向から方位角度差をつけてゆくと鏡面反射成分が減り、他の散乱成分が増すため LR 比も下がった。

図 5.7、図 5.8 に HV 偏波比・45 度 135 度偏波比の計測結果と仰角の関係をそれぞれ示す。

式 (2.1)、式 (2.2)、および図 2.3 からわかるように、HV 比は仰角が低いほど大きくなり、ブリースタ角で最大値をとる。図 5.7 の鏡面反射方向では、測定時の土壤水分が 6 % 程度であり、ブリースタ角が 35 度以下（約 20 度）のため、仰角に対し減少傾向にある。植生（高）の低仰角において HV 比が大きい点があるが、これは竹枝が鉛直に植えられているためではないかと思われる。図 5.8 の鏡面反射方向では、おおむね 0dB 付近にばらついており、鏡面反射成分では 45 度と 135 度は対称であるという理論的理解と一致する。その他に観測対象による特性の大きな違いはなく、送信偏波が R の際にはやはり LR 比を考慮することが、有用であろうと思われる。図 5.7、図 5.8 の方位角度差をつけた場合の偏波

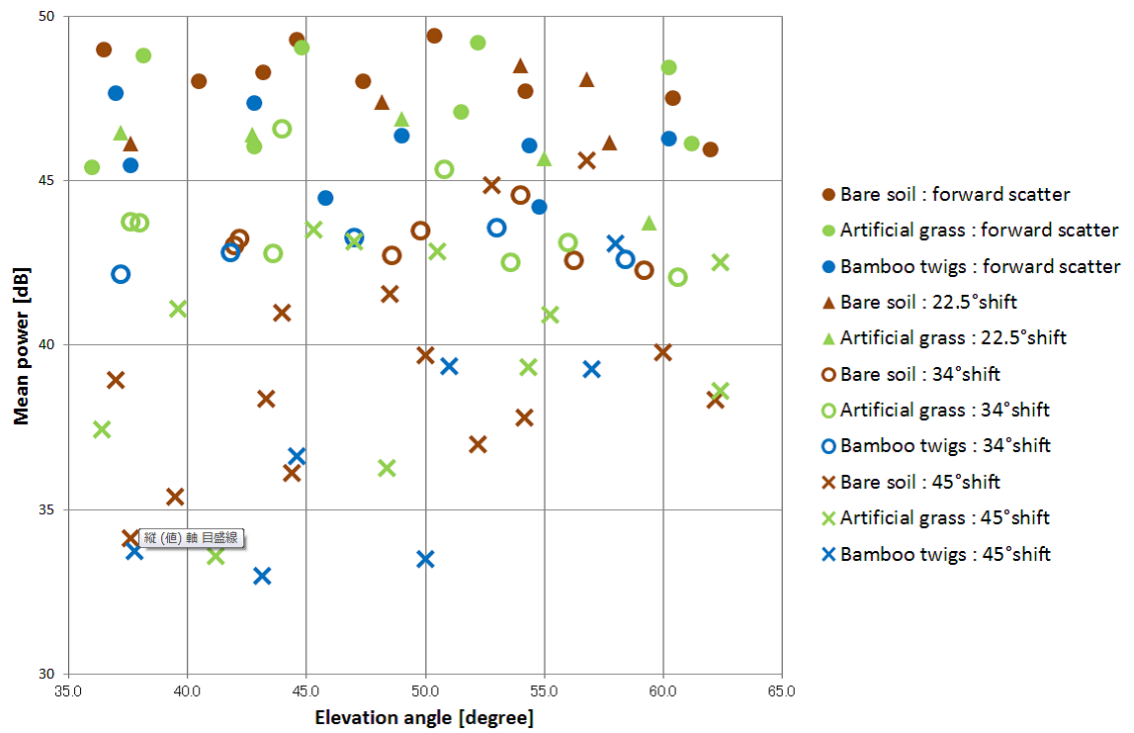


図 5.5: 各測定点の平均電力

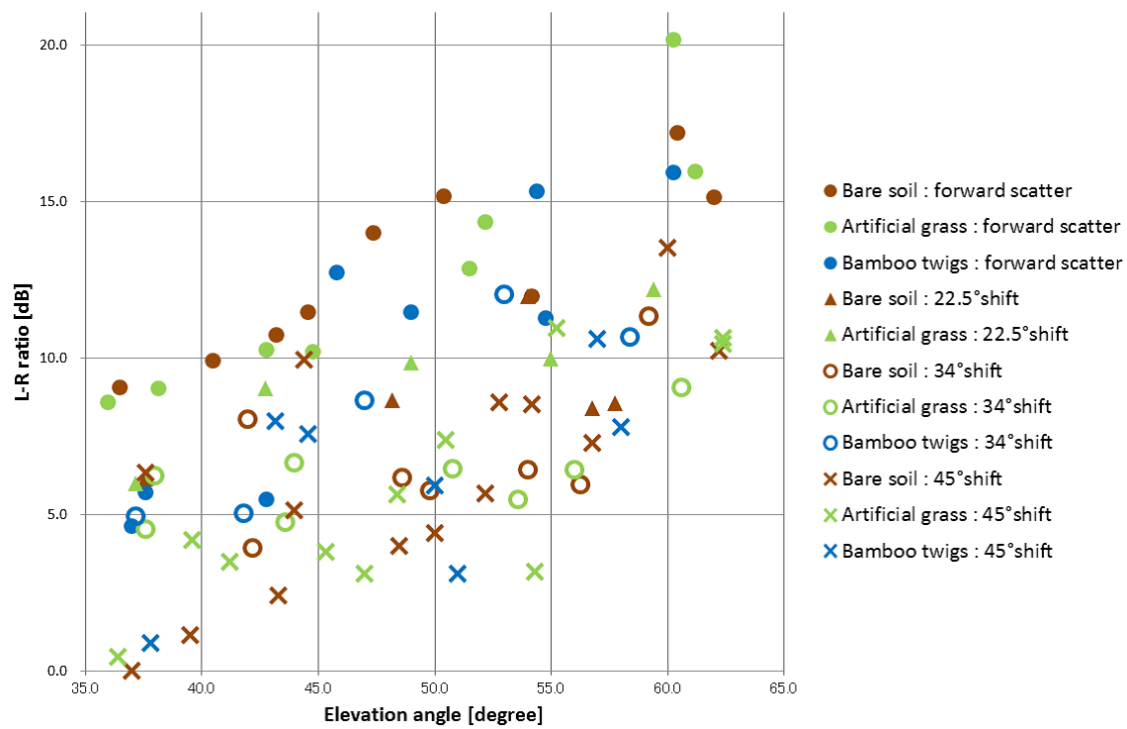


図 5.6: LR 比と仰角の関係

5.2 交差偏波比計測結果

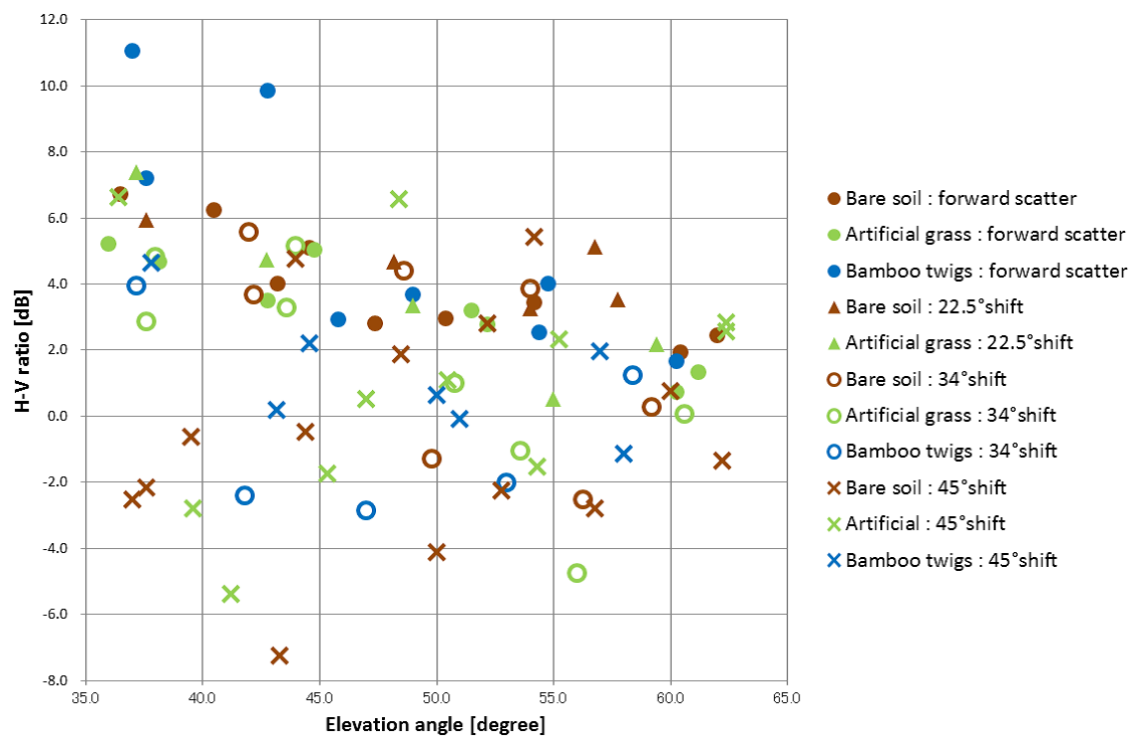


図 5.7: HV 偏波比と仰角の関係

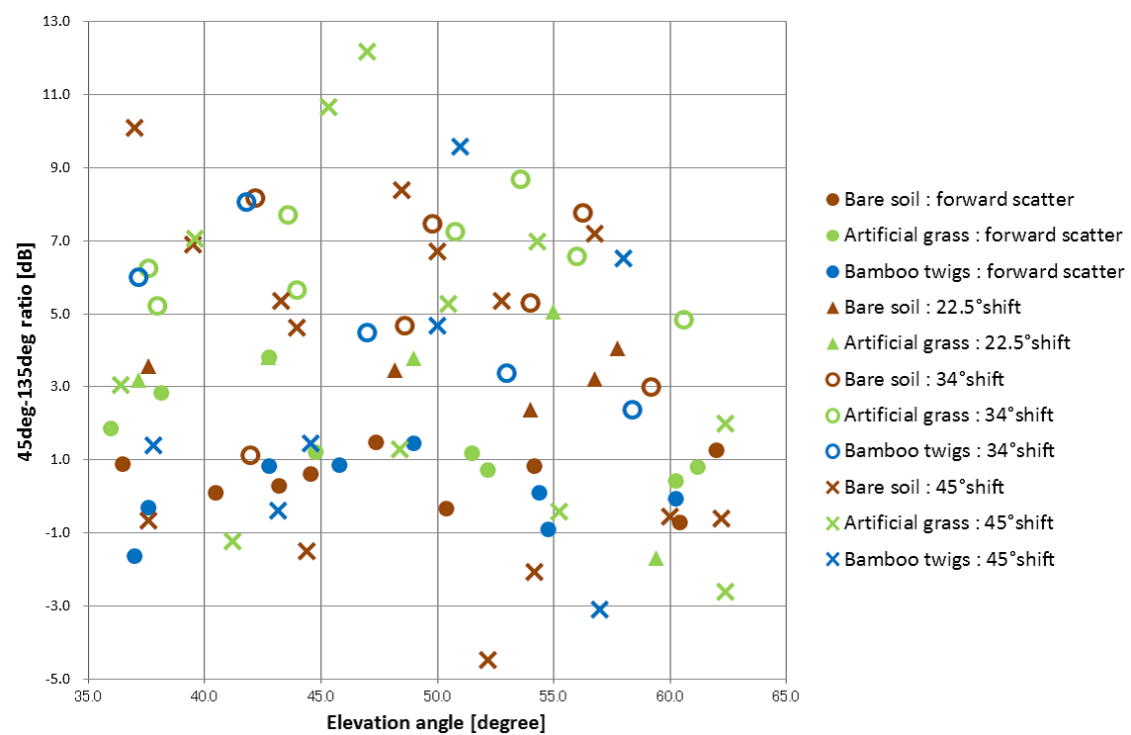


図 5.8: 45 度 135 度偏波比と仰角の関係

比が大きくばらつくのは、両者の特性が入れ替わりつつあるためであり、軸の定義の問題である。。

5.3 2 偏波電力からの偏波度推定

将来の小型衛星によるレーダミッションにおいて DoP 測定を行おうとする場合、多数の偏波アンテナを小型衛星に搭載すると、低コストという利点が損なわれる可能性がある。小型衛星に搭載されるシステムは可能な限り小型化、単純化されることが望ましい。そのための基礎検討として、2 種の偏波電力から DoP の推定を行い、ストークスパラメータから求めた DoP との比較、評価を行った。

図に L・R 偏波、H・V 偏波、45 度・135 度偏波それぞれによる DoP の推定値と、ストークスパラメータから求めた DoP との比較を示す。

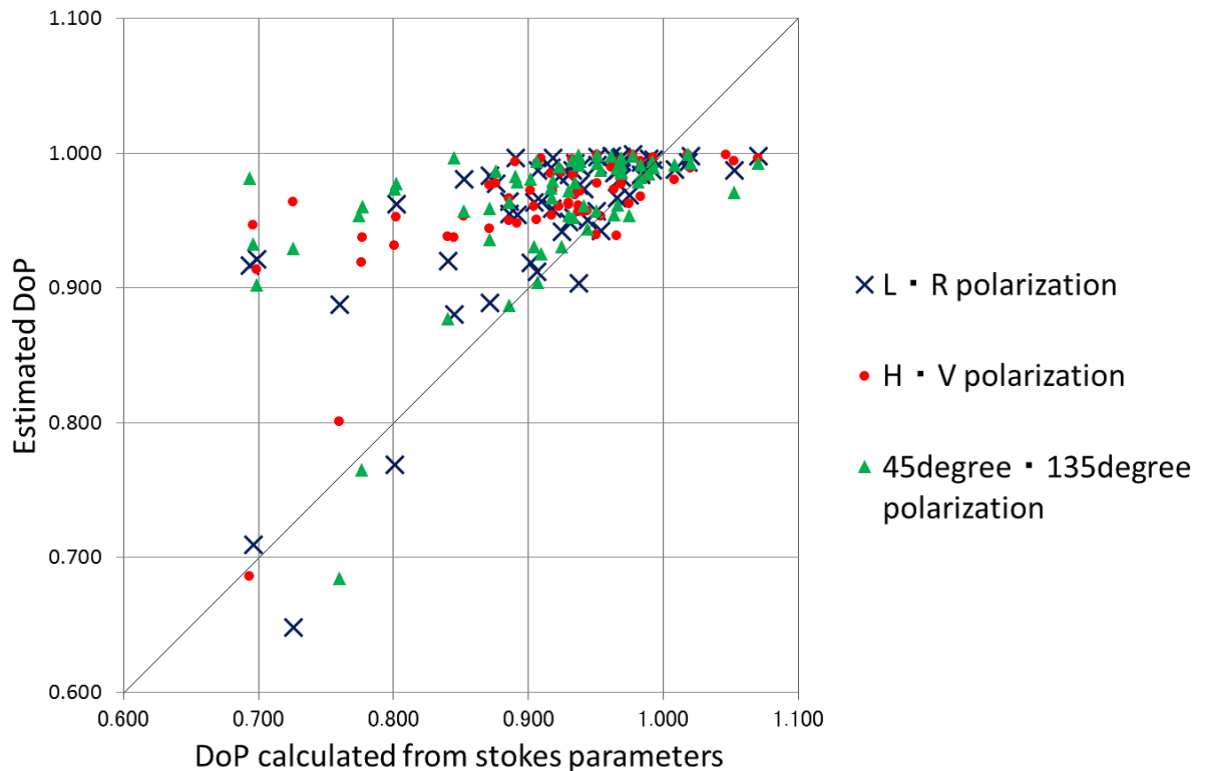


図 5.9: ストークスパラメータから求めた DoP と DoP 推定値の比較

DoP の推定値はどの偏波基底においても共通の傾向がみられる。DoP の推定値は測定値に近い値となる場合と、実測値から大きく外れ 1 に近い値になる傾向がある。ストークスパラメータから求まる DoP によらず、この傾向はみられる。この原因は検討中であるが、その理由としては想定しているジョーンズベクトルの分布が実測値と異なることや、今回の測定数自体が少なく十分な精度が得られにくいことなどが考えられる。また、ストーク

5.3 2 偏波電力からの偏波度推定

スパラメータから求まる DoP 自体の精度も問題となるだろう。また、観測対象による推定の精度にも違いはみられなかった。図 5.10 に DoP 測定値と推定値の差の観測対象ごとの平均値を示す。どのターゲットでも誤差を平均すると 0.058 程度であり、同じような誤差のばらつきになった。よって、この推定手法の評価のためには、現在のストークスパラメータ測定方法の改善と、より多くの点での測定、その統計的評価が必要となる。

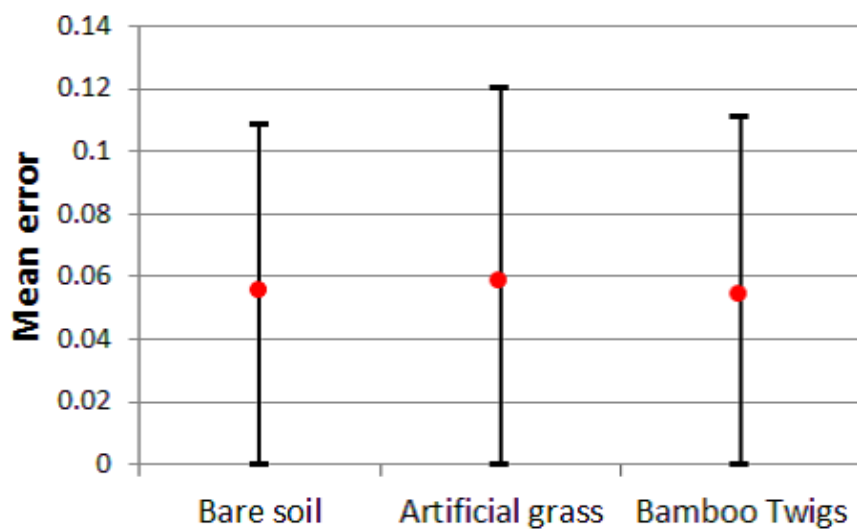


図 5.10: ストークスパラメータから求めた DoP と DoP 推定値の差の観測対象ごとの比較

第6章 おわりに

6.1 まとめ

本研究では、将来の小型衛星によるバイスタティック方式でのリモートセンシングにむけた、偏波情報測定手法の基礎検討を行った。従来のリモートセンシングにおける偏波情報計測の研究が、モノスタティック方式を主流としていることから、バイスタティックレーダーに向けたパイロット実験となることを説明した。偏波情報計測のための基本原理の説明を行い、特に偏波度に着目し地表観測における偏波計測が有用であることを示した。地上実験においては、リモートセンシングへの応用が注目される GPS 衛星を送信機として利用し、植生に覆われた土壌を想定した実験環境を構築した。植生の高さや受信アンテナの角度を変化させて偏波状態の計測を行い、偏波度や交差偏波比の評価を行った。小型衛星のための測定システムの単純化の検討として、2 偏波電力からの偏波度推定に着目し、推定制度の評価を行った。

DoP の測定では、鏡面反射方向での測定が植生の有無にかかわらず土壌表面での反射の影響を強く受けてしまうため、鏡面反射方向での DoP 測定により植生の特徴量推定が困難であると分かった。DoP は鏡面反射の影響の少ない角度で行うべきであり、アンテナの利得にも依存するが、本実験では 4 5 度の方位角度差が必要となった。また、鏡面反射方向においても植生の影響を受けないわけではなく、LR 比等の交差偏波比にはその影響が多少見られたが、送信電波の入射角や受信アンテナの向きへの依存が強いと考えられる。また、DoP の少数偏波による推定手法に着目し、その実証を試みたが、結果として推定値の明らかな偏りがみられるため、精度向上のため測定数を増やした上での検討が必要であることがわかった。

6.2 今後の発展

今後の課題として、まずストークスパラメータ測定手法の改善が挙げられる。特に、誤差が計測時間中の電力変動に起因する可能性が高いことから、計測時間の短縮を検討したい。あるいはその誤差を補正するための、電力変動測定用のサブシステムの構築も有用であろう。

さらに、今回変化させた観測条件のさらなる拡張が挙げられる。観測対象として、より DoP 変化に寄与すると思われる植物もしくはそれに準ずる対象を用いて偏波計測を行うことで、DoP 測定の数・幅が増し、DoP 推定手法評価の精度向上への寄与も期待できる。また受信アンテナの方向も、今回は仰角を変化させず、方位角を限定的に変化させるのみであったが、これらを大きく変化させることで鏡面方向から離れた評価が行えるだろう。これには広範囲での測定を行わなければならず、観測場所の選定が課題となる。

また、GPS 信号を用いたリモートセンシングで有効な観測量と考えられている土壌水分についても、偏波情報計測による推定が期待できるため、土壌水分を変化させた環境での測定が考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御協力を頂いた皆様に対し、この場を借りて感謝の言葉を申し上げます。

宇宙航空研究開発機構 齋藤宏文教授、福田盛介准教授には、研究に対する取り組み姿勢、屋外実験の実施方法、発表論文を執筆する上でのアドバイスなど、厳しくも温かいさまざまなご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

またハイム・テクノロジー 石丸元様には、アンテナの製作・修理にご尽力いただき、感謝申し上げます。

さらに齋藤宏文研究室の皆様には、研究を進める上で多くの助けを頂きました。以上の方々を始め、本論文の執筆に際してご支援を頂いたすべての方々に、深く感謝いたします。

発 表 文 献

- (1) 加藤竜太, 江川光, 齋藤宏文, 福田盛介: 「GPS 地表反射波を用いたリモートセンシングにおける偏波情報を考慮した実験的評価」, 電子情報通信学会 vol. 112, no. 41, SANE2012-16, pp. 31-36, 2012 年 5 月.
- (2) 江川光, 齋藤宏文, 福田盛介: 「バイスタティックレーダーに向けた GPS 反射波を用いた偏波情報計測の実験的評価」, 電子情報通信学会 総合大会, 2013 年 3 月発表予定.
- (3) H.Egawa,H.Saito and S.Fukuda : "Experimental evaluations of polarimetry for bistatic radar using GPS reflected signals", Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, September 2013 発表予定

参 考 文 献

- [1] 山口芳雄、「レーダポラリメトリの基礎と応用－偏波を用いたレーダリモートセンシング－」、電子情報通信学会、2007年
- [2] J.-C. Souyris and S. Mingot, “Polarimetry based on one transmitting and two receiving polarizations: The $\pi/4$ mode,” in Proc. IGARSS, Toronto, ON, Canada, 2002, pp. 629-631.
- [3] R. Keith Raney, “Hybrid-Polarity SAR Architecture”, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 45, NO. 11, NOVEMBER 2007
- [4] My-Linh Truong-Loi, P. Dubois-Fernandez, A. Freeman, E Pottier, “The conformity coefficient or how to explore the scattering behaviour from compact polarimetry mode” Radar Conference, 4-8 May 2009 IEEE
- [5] K.M.Larson, E.E.Small, E.D.Gutmann, A.L.Bilich, J.J.Braun, and V.U.Zavorotny, “Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies”, *Geophysical Research Letters*, vol.35, pp.L24405, 2008.
- [6] 大内和夫, “リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 (第2版)”, 東京電機大学出版局, 2009.
- [7] 藤原邦男, 山口重雄, “光学・電子光学”, 朝倉書店
- [8] Nereida Rodriguez-Alvarez, Adriano Camps, Merce Vall-llossera, Member, Xavier Bosch-Lluis, Alessandra Monerris, Isaac Ramos-Perez, Enric Valencia, Juan Fernando Marchan-Hernandez, Jose Martinez-Fernandez, Guido Baroncini-Turricchia, Carlos Perez-Gutierrez, Nilda Sanchez, “Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.49, NO.1, 2011
- [9] N. Rodriguez-Alvarez, X. Bosch-Lluis, R. Acevo, A. Aguasca, A. Camps, M. Vall-llossera, I. Ramos-Perez, E. Valencia, “Study of maize plants effects in the retrieval

- of soil moisture using the interference pattern GNSS-R technique” Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2010, pp. 3813-3816, July 25- 30, Honolulu, Hawaii, USA.
- [10] K.M.Larson, J.J.Braun, E.E.Small, V.U.Zavototny, E.D.Gutmann, and A.L.bilich, “GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol.3, pp.91-99, March, 2010.
 - [11] M.Martin-Neira, M.Caparrini, J.Font-Rossello, S.Lannelongue, and C.S.Vallmitjana, “The PARIS Concept: An Experimental Demonstration of Sea Surface Altimetry Using GPS Reflected Signals”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.39, pp.142-150, 2001.
 - [12] N. Rodriguez-Alvarez, A. Aguasca, E. Valencia, X. Bosch-Lluis, I. Ramos-Perez, H. Park, A. Camps, M. Vall-llossera, “SNOW MONITORING USING GNSS-R TECHNIQUES” Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, On page(s): 4375 - 4378
 - [13] E.Wolf, “Coherence properties of partially polarized electromagnetic radiation” *Nuovo Cim*, vol. 13, no.6, pp1165-1181, Sep. 1959.
 - [14] M.Roche, J.Fade,and P.Réfrégier, “Parametric estimation of the square degree of polarization from two intensity degraded by fully developed speckle noise” *J.Opt.Soc.Amer.A*, vol. 24, no. 9, pp. 2719-2727, 2007.
 - [15] F. Chatelain, J.-Y. Tourneret, M. Roche, and M. Alouini, “ Estimating the polarization degree of polarimetric images in coherent illumination using maximum likelihood methods, ” *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 26, no. 6, pp. 1348-1359, 2009.
 - [16] F. Chatelain, J.-Y. Tourneret, A. Ferrari, and J. Inglada, “ Bivariate gamma distributions for image registration and change detection, ” *IEEE Trans. Image Process.* 16, 1796-1806 (2007).
 - [17] J. David Ballester-Berman and Juan M. Lopez-Sanchez, “ANALYSIS ON THE POTENTIAL OF L-BAND POLSAR DATA FOR CROP MONITORING”, POLinSAR 2011 ESA-ESRIN, Frascati, 27 January 2011
 - [18] Reza Shirvany, Marie Chabert, Member, Jean-Yves Tourneret, “Estimation of the Degree of Polarization for Hybrid/Compact and Linear Dual-Pol SAR Intensity Images:

Principles and Applications” IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 51, NO. 1, JANUARY 2013

- [19] R. Shirvany, M. Chabert, and J.-Y. Tournet, “Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR,” ” *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. (JSTARS)*, pp. 1-8, 2012, DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2182760.
- [20] R. Keith Raney, Joshua T.S. Cahill, G. Wesley Patterson, and D. Benjamin J. Bussey, “The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data with application to lunar craters” *J. Geophys. Res.*, 117, E00H21, doi:10.1029/2011JE003986.