

令和 4 年度地球観測技術等調査研究委託事業
「新しいフェーズに入った衛星測位技術を加速させる
人材育成/宇宙航空人材育成プログラム」
委託業務成果報告書

令和 5 年 5 月
国立大学法人東京海洋大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京海洋大学が実施した令和4年度「新しいフェーズに入った衛星測位技術を加速させる人材育成/宇宙航空人材育成プログラム」の成果を取りまとめたものです。

目次

1	はじめに	1
1.1	委託業務の目的	1
1.2	業務の方法	1
1.3	当該年度における委託業務の結果概要	2
2	実施内容	4
2.1	参加者の募集	4
2.1.1	募集案内	4
2.1.2	募集案内：ニュースレター	5
2.1.3	説明会の実施	6
2.1.4	応募方法	7
2.1.5	選考	7
2.1.6	事前課題	7
2.1.7	検証	12
2.2	セミナーの実施	12
2.2.1	セミナーの教材、及び時間割	14
2.2.2	機材(アンテナや再放射器)の準備、及びセミナー時のサポート内容	16
2.2.3	セミナー講義内容	18
2.2.3.1	ソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性	18
2.2.3.2	GNSS の基礎 1 測位衛星、座標、時刻と衛星位置ソフトウェア	18
2.2.3.3	GNSS の基礎 2 観測誤差と測位方式等	18
2.2.3.4	フロントエンドの役割と概要 (IF、ビット、サンプリング、IQ 値等)	19
2.2.3.5	教材で利用するソフトウェア GNSS 受信機の紹介 (Github や PC の動作環境)	22
2.2.3.6	GNSS の信号について (衛星からの信号を知る)	23
2.2.3.7	信号の捕捉について (再捕捉の必要性)	24

2.2.3.8	信号の追尾について（DLL、FLL、PLL、信号強度、フィルター設計など）	25
2.2.3.9	航法データのデコードについて	26
2.2.3.10	観測データの生成と測位演算について	27
2.2.3.11	FPGA の活用（HDL の基礎）	28
2.2.3.12	FPGA の活用（Xilinx Vivado 入門）	30
2.2.3.13	FPGA の活用（C/A コードの生成とテストベンチ）	32
2.2.3.14	GNSS シミュレータの役割と概要、電波暗室の概要	34
2.2.3.15	GNSS-SDR の有用性、将来 GNSS そして QZSS の計画と期待	35
2.2.4	参加者に対する習熟度の把握	35
2.2.5	面談の実施	39
2.3	コンテストの紹介	43
2.4	高周波アンテナ測定試験の実習	43
2.4.1	高周波アンテナ測定試験の内容と課題（2022 年 8 月）	45
2.4.2	高周波アンテナ測定試験の内容と課題（2023 年 2 月）	46
2.4.3	高周波アンテナ測定試験の実習後のアンケート結果	48
3	まとめ	48
4	添付資料	49
4.1	学会等発表実績	49

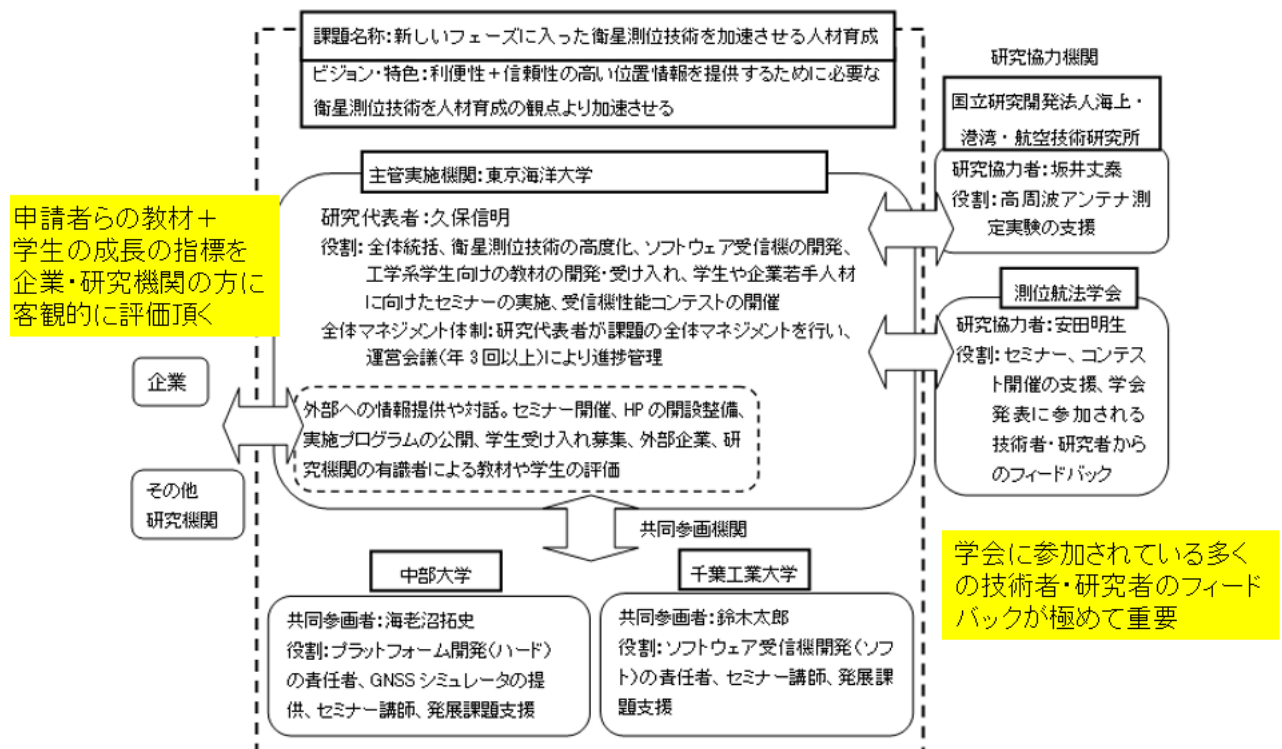
1 はじめに

1.1 委託業務の目的

本業務は、衛星測位用の受信機を自由に改修できるソフトウェアベースの受信機を開発・準備し、それらを教材として採用し、そのソフトウェア受信機の理論だけでなく信号処理や測位演算を同時に学ぶアクティブ・ラーニングによる宇宙航空人材育成を目的とする。

参加学生は、自分の手でソフトウェア受信機を改良しながら「なぜこのような処理なのか」「どうすればもっと性能が向上するのか」といった疑問や課題を自ら発見することで、それと並行して開催されるチュートリアルの中で、衛星測位用の受信機設計や測位と通信の基礎を主体的に学び、さらに、開発したソフトウェア受信機を利用したコンテストを実施することで、関連企業への広報活動を展開し、潜在的な人材の発掘にも努める。

国産の準天頂衛星の競争力を高めるために、実際にユーザーの手元に届く受信機側の開発競争力を国内で促進し、持続的な宇宙航空人材育成サイクルの確立を目指す。図 1.1 に本業務の実施体制を示す。



【図 1.1： 本業務の実施体制】

1.2 業務の方法

令和4年度における実施内容は、以下の通りである。

①参加学生の募集

東京海洋大学が中心となって、本業務に参加する学生として、衛星測位分野に関連する全国の大学・高専から、10名以上の参加者を募集する。衛星測位分野へのキャリアパスを考慮し、基本的に工学系の学部には所属する学生を対象とする。なお、企業の若手研究者も対象とする。応募を検討している学生に

対して、本業務の説明会を開催する。ここでは、教材となるソフトウェア受信機のデモを行い、この技術を習得することで、さらに発展した開発の可能性が広がることを示す。これら作業と以下の実施項目について、3大学の教員だけでなく、東京海洋大学で雇用する研究員や技術補佐員の支援を受けて行う。また、2021年度に開発したフロントエンドの試作機等を用いた検証も合わせて行うこととする。

②セミナーの実施

測位航法学会と連携して、ソフトウェア受信機に関するチュートリアルと利用方法に関するセミナーを3大学の教員が中心となり開催する。参加者の参加しやすい時期を選び、期間は3日間程度とし1年間に2回程度（夏、秋頃）実施する。2021年度に開発した90分・15コマ分の教材のうち、ハンズオン以外で対応できる部分については、事前にオンライン等で実施することを想定している。トータルの参加人数は、上述の通り1回に10名程度とする。事前にデータや教材を準備し、参加学生に配布する。参加学生からのフィードバックをもらうことで、教材の改修を継続する。コロナ禍でハンズオンが不可となった場合、事前に機材やソフトウェアを送付し、教員側で準備したデータで対応する。リアルタイム動作の確認については、アンテナを含めて設置する必要があるため、その方法を伝授し、個別に動作確認ができたかどうか確認する。

本内容について3社以上の衛星測位関連企業・研究機関の方の監修を頂く。参加者に対する習熟度を図るために、セミナーの中で3大学の教員で課題を課し、参加者のレポートを見て判断する。参加者の本プログラムへ参加前と参加後の状態での成長を評価するために、セミナー参加後一定期間経過した後、衛星測位関連企業・研究機関の方と参加者が面談できる場を持ち、参加前と比較してどのように成長したか客観的に評価頂く。また参加者が学生の場合、学生の指導教員より評価頂く。

③コンテストの紹介

セミナーへの参加者に対して、ソフトウェア受信機を利用したコンテストの内容を紹介する。具体的には、担当教員らで準備した様々な電波環境（静止データと移動データ）での元データに対して、参加者が改良したソフトウェア受信機を利用して計算した最終位置結果の精度を競うものである。元データの参加者とのやりとりや通知については、東京海洋大学が中心となって実施する。

④高周波アンテナ測定試験の実習

高周波の試験の仕方を学習するために、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所などが所有する電波暗室を利用した実習を行う。複数の衛星測位用アンテナを準備し、電波暗室でそれらアンテナの利得や偏波特性を計測する方法と結果の見方について学ぶ。1日の実習を1年間に2回程度実施する。参加人数は1回に10名程度とする。参加学生に2021年度に準備した教材を配布する。参加者への通知や教材についての回答は、東京海洋大学が中心となって実施する。

1.3 当該年度における委託業務の結果概要

令和4年度における業務の結果概要は、以下の通りである。

①参加学生の募集

東京海洋大学が中心となって、本業務に参加する学生として、衛星測位分野に関連する全国の大学・高専から、10名以上の参加者を募集した。衛星測位分野へのキャリアパスを考慮し、基本的に工学系の学部・に所属する学生を対象とした。なお、企業の若手研究者も対象とした。応募を検討している学生に対して、本業務の説明会を5月23日に開催した。ここでは、教材となるソフトウェア受信機のデモを行い、この技術を習得することで、さらに発展した開発の可能性が広がることを示した。これら作業と以下の実施項目について、3大学の教員だけでなく、東京海洋大学で雇用する研究員や技術補佐員の支援を受けて行った。また、2021年度に開発したフロントエンドの試作機等を用いた検証も合わせて行った。

②セミナーの実施

測位航法学会と連携して、ソフトウェア受信機に関するチュートリアルと利用方法に関するセミナーを3大学の教員が中心となり開催した。参加者の参加しやすい時期を選び、期間は3日間とし、1年間に2回実施した。2021年度に開発した90分・15コマ分の教材のうち、ハンズオン以外で対応できる部分については、事前にオンラインで実施した。トータルの参加人数は、1回に15名（2回で30名）であった。事前にデータや教材を準備し、参加学生に配布した。参加学生からのフィードバックをもらうことで、教材の改修を継続した。本内容について3社以上の衛星測位関連企業・研究機関の方の監修を頂いた。参加者に対する習熟度を図るために、セミナーの中で3大学の教員で課題を課し、参加者のレポートを見て判断した。参加者の本プログラムへ参加前と参加後の状態での成長を評価するために、参加前の知識やレベルを開催前に教員らで把握し書面に残した。セミナー参加後一定期間経過した後、衛星測位関連企業・研究機関の方と参加者が面談できる場を持ち、参加前と比較してどのように成長したか客観的に評価頂いた。面談を持つ時間を持たない企業の参加者に対しては、自己評価のアンケートを課し、参加前と比較してどのように成長したかを主観的に評価してもらった。また参加者が学生の場合、学生の指導教員より評価頂いた。

③コンテストの紹介

セミナーへの参加者に対して、ソフトウェア受信機を利用したコンテストの内容を紹介した。具体的には、担当教員らで準備した様々な電波環境（静止データと移動データ）での元データに対して、参加者が改良したソフトウェア受信機を利用して計算した最終位置結果の精度を競うものである。元データの参加者とのやりとりや通知については、東京海洋大学が中心となって実施した。

④高周波アンテナ測定試験の実習

高周波の試験の仕方を学習するために、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所などが所有する電波暗室を利用した実習を行った。複数の衛星測位用アンテナを準備し、電波暗室でそれらアンテナの利得や偏波特性を計測する方法と結果の見方について学んだ。1日の実習を1年間に2回実施した。2回とも測定試験実施後、参加者に測定試験に関する理解を問う課題を与え、提出頂いた。参加人数は1回目13名、2回目16名、2回で29名であった。参加学生に2021年度に準備した教材を配布した。参加者への通知や教材についての回答は、東京海洋大学が中心となって実施した。

2 実施内容

2.1 参加者の募集

2.1.1 募集案内

宇宙航空人材育成を目標としたアクティブ・ラーニング型セミナー、及び高周波アンテナ測定試験の実習を年に2回（8月と2月）開催する事とした。参加者の募集は主に本業務専用のホームページ（<https://gnss-learning.org/>）から行った。図 2.1.1a にホームページのメイン画面を示す。



【図 2.1.1a：ホームページのメイン画面】

このホームページは、本業務で実施している内容を公開するために令和3年に立ち上げた。ホームページの作成は、外注先である webcil に依頼した。本業務にアサインされている技術補佐員と外注先の一般社団法人測位航法学会が中心となってホームページの更新をした。ホームページは9つのタブで構成している。表 2.1.1a にホームページの構成表を示す。

【表 2.1.1a：ホームページの構成表】

タブ名	リンク	内容
ホーム	https://gnss-learning.org/	セミナー情報、ホームページの更新情報
プログラム概要	https://gnss-learning.org/program/	本業務の紹介
ブログ	https://gnss-learning.org/blog/	セミナーに関する情報、質問を受付
GNSS ニュース	https://gnss-learning.org/gnssnews/	最新の海外ニュースの紹介
プログラムおよび教材	https://gnss-learning.org/learning/	セミナーで使用する教材の紹介
コンテスト	https://gnss-learning.org/contest/	コンテストの紹介
発展的課題	https://gnss-learning.org/advance/	発展的課題の紹介
発表資料	https://gnss-learning.org/publication/	本業務の参加者が学会等で発表した資料の紹介
リンク	https://gnss-learning.org/link/	本業務に関わるリンク先の紹介

尚、本業務の募集案内は、『ホーム』タブに掲載した。図 2. 1. 1b に 2022 年 4 月 22 日付けに掲載した「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー開催のお知らせを示す。

「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」セミナー開催のお知らせ

「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」セミナーを開催します。ソフトウェアGNSS受信機について学べる実践的な内容のセミナーを開催いたしますので、ぜひご参加いただきますようお願い申し上げます。

◆説明会（終了しました）

（※セミナーに参加ご希望の方は説明会にご参加下さい。やむを得ずご参加できない場合は、[こちらの動画](#)をご覧ください。）

<日時>	2022年5月23日（月）13:30～
<内容>	「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」セミナーについて
<参加方法>	Zoom https://us02web.zoom.us/j/81570923370?pwd=SUZiMGJPCdZSWlpqaDF4MWdicERjUT09 ミーティングID: 815 7092 3370 パスコード: 150010

◆セミナー

（※同じ内容を2回に分けて開催します。[どちらか](#)を選択頂けます）

<第一回>	2022年8月8日（月）～10日（水） 3日間 9:00～17:00
<第二回>	2023年2月8日（水）～10日（金） 3日間 9:00～17:00

第一回、第二回共通事項

<講師>	●東京海洋大学 海事システム工学部門 久保信明 ●中部大学 工学部 宇宙航空理工学科 海老沼 拓史 ●千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター 鈴木太郎
<内容>	「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」について
<会場>	東京海洋大学 越中島キャンパス
<定員>	10名～20名

◆アンテナ測定

（※同じ内容を2回に分けて開催します。[どちらか](#)を選択頂けます）

<第一回>	2022年8月26日（金） 9:00～17:00
<第二回>	2023年2月 7日（火） 9:00～17:00

第一回、第二回共通事項

<講師>	●東京海洋大学 海事システム工学部門 久保信明 ●中部大学 工学部 宇宙航空理工学科 海老沼 拓史 ●千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター 鈴木太郎
<内容>	アンテナ測定
<会場>	電子航法研究所
<定員>	10名～20名

※本セミナーは新型コロナウイルス感染拡大の防止対策指示のもと、細心の注意を払い開催させていただきます。また、新型コロナウイルス感染症の影響で、日程や場所、開催方法等が変更になる場合があります。変更がある場合は、[こちらのホームページ](#)にて、随時お知らせしますので予めご了承下さい。

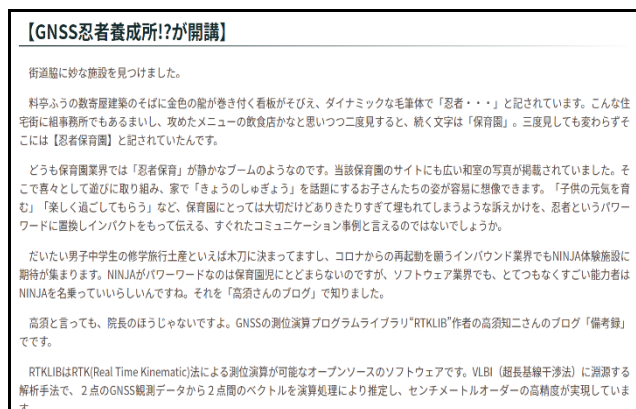
2022.4.22

【図 2. 1. 1b : 2022 年 4 月 22 日「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー開催のお知らせ】

2. 1. 2 募集案内：ニュースレター

ホームページ以外に、科学技術ライターの喜多充成氏に本業務を紹介する一文を依頼し、セミナーの告知をしてもらった。記事は NP0 法人 大学宇宙工学コンソーシアム（UNISEC = University Space Engineering Consortium）のメールマガジン「UNISEC Road-to-SPACE Club」2022 年 6 月号にて配信された。図 2. 1. 2a に記事の一部を示す。また、2022 年 10 月 5 日に発行された測位航法学会ニュースレタ

ーVol.3にも、東京海洋大学の久保信明が本業務、及びセミナーを紹介している記事が掲載された。図2.1.2bに記事の一部を示す。



【図：2.1.2a メールマガジン

【図2.1.2b：測位航法学会ニュースレター

「UNISEC Road -to-SPACE Club」2022 年 6 月号】

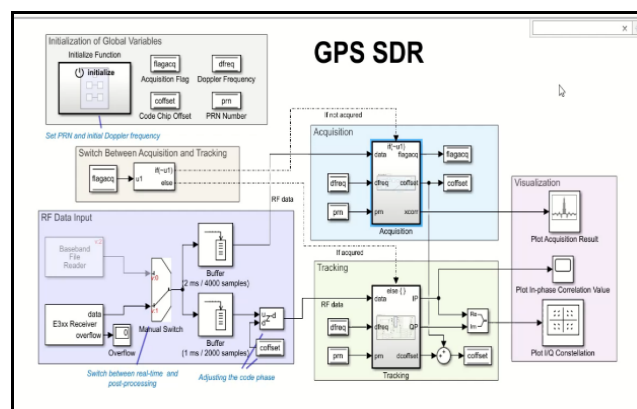
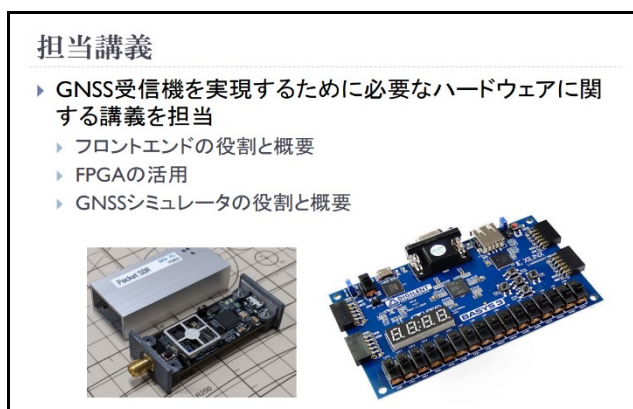
Vol.3】

2.1.3 説明会の実施

2022 年 5 月 23 日に本業務の参加希望者向けに説明会を開催した。コロナの感染状況を考慮し、オンラインで説明会を開催し、合計 50 名が参加した。ここでは、プログラムの概要、及び教材となるソフトウェア受信機のデモを行い、この技術を習得することで、さらに発展した開発の可能性が広がることを示した。表 2.1.3 に説明会のプログラムを示す。また、説明会で使用した資料の一部を図 2.1.3 に示す。尚、この説明会は録画し、当日参加できなかった方も後日視聴できるようにした。

【表 2.1.3：2022 年 5 月 23 日説明会のプログラム】

時間	講師	プログラム内容
13:30	東京海洋大学 久保 信明	プログラム概要の説明
14:00	中部大学 海老沼 拓史	講義概要の説明
14:30	千葉工業大学 鈴木太郎	講義概要の説明
15:00	上記三名	質疑応答



【図 2.1.3：説明会で使用した資料の一部】

2.1.4 応募方法

「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー、及び「高周波アンテナ測定試験の実習」への参加希望者には、ホームページの『ホーム』タブ (<https://gnss-learning.org/>) に掲載した応募フォームから申し込んで貰った。応募フォームには、メールアドレス、氏名、大学名/事業所名、学部/所属部署名、現在の研究内容、セミナーへの参加を希望する理由（400 文字以内）等を記入してもらった。表 2.1.4 に第 1 回目、及び第 2 回目の応募期間を示す。

【表 2.1.4：応募期間】

日付	内容
2022年 5月23日	第1回目「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」、「高周波アンテナ測定試験の実習」の申込開始
2022年 6月28日	第1回目「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」、「高周波アンテナ測定試験の実習」の申込終了
2022年10月 7日	第2回目「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」、「高周波アンテナ測定試験の実習」の申込開始
2022年11月11日	第2回目「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」、「高周波アンテナ測定試験の実習」の申込終了

2.1.5 選考

選考については、『応募フォーム』に入力された情報を基に東京海洋大学の久保、中部大学の海老沼、千葉工業大学の鈴木 の 3 名の教員で行った。

衛星測位分野へのキャリアパスを考慮し、基本的に工学系の学部 に所属する学生を対象とした。また、35 歳以下の企業の若手研究者も対象とした。また『応募フォーム』に入力してもらった『セミナーへの参加を希望する理由（400 文字以内）』を参考にした。表 2.1.5 に選考結果の内訳を示す。

第 1 回目「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー、及び「周波アンテナ測定試験の実習」の選考結果については、2022 年 6 月 25 日付けで一般社団法人測位航法学会からメールで応募者全員に通知した。第 2 回目の選考結果については、2022 年 11 月 11 日付けで一般社団法人測位航法学会からメールで応募者全員に通知した。

【表 2.1.5：選考結果の内訳】

		第 1 回目 「ソフトウェア GNSS 受信機プロ グラム」 セミナー	第 2 回目 「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」 セミナー	第 1 回目 周波アンテナ測定試 験の実習	第 2 回目 周波アンテナ測定試 験の実習
学生	志望者	7 名	5 名	7 名	5 名
	受講者	7 名	5 名	5 名	6 名
社会人	志望者	12 名	12 名	12 名	12 名
	受講者	8 名	10 名	8 名	10 名

2.1.6 事前課題

受講者には、「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー、及び「高周波アンテナ測定試験の実習」を受講する前に 7 つの課題をアサインした。期日はセミナー予定日の約 1 ヶ月前とした。表 2.1.6a に 7 つの事前課題を示す。また、この事前課題は一般社団法人測位航法学会から受講者全員にメールで依頼した。また、再確認の為にホームページの『ホーム』タブに同じ情報を掲載した。

【表 2.1.6a：事前課題】

課題番号	課題
①	第 1～3 回：GNSS の基礎の視聴（所要 3 時間 20 分）
②	Google フォーム：GNSS 基礎テストの受講
③	MATLAB のインストール
④	MATLAB 入門講座講習の受講
⑤	FPGA 開発環境のインストール
⑥	Pocket SDR のインストール
⑦	第 14 回：アンテナ測定についての講義の視聴（所要時間 1 時間 26 分）

課題番号①：第 1～3 回：GNSS の基礎の視聴（所要 3 時間 20 分）

GNSS の基礎を事前に学んでもらう為に、本ホームページの『プログラム及び教材』に掲載されている、オンライン授業の 3 つを、第 1 回目は 7/25（月）10:30～16:00 まで Zoom で講義を行い、第 2 回目は第 1 回目を録画した動画をセミナー前までに視聴してもらった。表 2.1.6b に課題番号①の内訳を示す。

【表 2.1.6b：課題番号①の内訳】

番号	タイトル	講師	資料
1	ソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性	東京海洋大学 久保 信明	Introduction
2	GNSS の基礎 1 測位衛星、座標、時刻と衛星位置	東京海洋大学 久保 信明	GNSS Basic 1
3	GNSS の基礎 2 観測誤差と測位方式等	東京海洋大学 久保 信明	GNSS Basic 2

課題番号②：Google フォーム：GNSS 基礎テストの受講

受講者の GNSS に対する基礎理解度を把握するために 3 大学でテストを考案した。79 問中 70 問以上を合格として、Google フォーム (<https://forms.gle/dBWeiXYnRwJzca7J9>) から受講者全員に受けて貰った。テストは再受講が可能となっており、平均 2 回の受講で全員が合格した。図 2.1.6a に GNSS 基礎テストの一部を示す。

1. 衛星測位の基本：GPS の開発が最初に開始された年代として正しいものを選びなさい
☐ 1950 年代
☐ 1970 年代
☐ 1990 年代
☐ 2010 年代
2. 衛星測位の基本 1：GPS は米国の名称での衛星測位システムです。米国だけでなく他国の衛星測位システムも含めた総称は何ですか？
☐ GNSS
☐ QZSS
☐ GPS
☐ ひまわり
3. 衛星測位の基本 2：日本も衛星測位システムを 2010 年より試験期間も含めて運用しています。現在 4 機体制です。この日本の測位衛星の名称は何ですか？
☐ ひまわり

☐ だいち
☐ みちびき
☐ かけはし
4. 自身の位置や姿勢を知るためのセンサーがあります。加速度や角速度を積分する技術です。これらを総称してなんと呼びますか？
☐ IMU
☐ ジャイロ
☐ INS
☐ 速度センサー

【図 2. 1. 6a : GNSS 基礎テストの一部】

課題番号③ : MATLAB のインストール

アクティブ・ラーニング型セミナーを開催するにあたり、プログラミング、及び数値計算プラットフォームである MATLAB (<http://mathworks.com/>) を事前に受講者が所有する PC にインストールしてもらった。図 2. 1. 6b に MATLAB のインストール方法を示す。

<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>

下記「推奨 MATLAB 環境」のものをインストールお願いいたします。（学生の方はアカデミック版がありますのでそちらをお勧めいたします）

~~~~~

■ MATLAB R2022a（既に R2022b がリリースされていますが、R2022a をインストールしてください）

- Communications Toolbox : 複数の信号処理ブロックを利用
- DSP System Toolbox : 相関演算に利用
- Simulink Coder : 高速化, リアルタイム動作に利用
- Signal Processing Toolbox : 上記の Toolbox との依存関係
- MATLAB Coder : 上記の Toolbox との依存関係
- Fixed Point Designer : 上記の Toolbox との依存関係

【図 2. 1. 6b : MATLAB インストール方法】

諸事情で PC に MATLAB をインストールできない受講者に関しては、PC の貸出を行った。貸出用の PC に MATLAB をインストールする作業は本業務の補助者としてアサインされている東京海洋大学の研究員が行った。

### 課題番号④ : MATLAB 入門講座講習の受講

MATLAB をインストールした後、受講者には MATLAB の基本操作を習得するために『MATLAB 入門講座』

(<https://matlabacademy.mathworks.com/jp/details/matlab-onramp/gettingstarted>) を受講してもらった。『MATLAB 入門講座』の修了証を必須とした。修了証は、技術補佐員、及び一般社団法人測位航海学会宛にメールで提出してもらった。受講者全員が修了証を提出した。図 2. 1. 6c に『MATLAB 入門講座』の修了証のサンプルを示す。



【図 2. 1. 6c : 『MATLAB 入門講座』の修了証のサンプル】

#### 課題番号⑤ : FPGA 開発環境のインストール

アクティブ・ラーニング型セミナーを開催するにあたり、FPGA 開発環境を事前に受講者が所有する PC にインストールしてもらった。図 2. 1. 6d に FPGA 開発環境のインストール方法を示す。

#### FPGA 開発環境のインストール

セミナーでは、Xilinx 社の FPGA 開発環境である Vivado ML Standard Edition を使用します。  
以下の手順に従い、事前のインストールをお願いします。

対応 OS は、Windows 10 と Linux になります。

ダウンロードとインストールに数時間ほど必要になりますので、時間に余裕をもって作業を行ってください。

#### アカウントの作成

インストーラのダウンロードには、Xilinx のアカウントが必要になります。アカウントをお持ちでない方は、まずは下記リンクからアカウントを作成してください。

<https://japan.xilinx.com/registration/create-account.html>

以下、Windows 版を例に、具体的な手順を説明します。

#### インストーラのダウンロード

下記リンクから、Vivado ML エディション 2022.1 Full Product Installation の「ザイリンクス統合インストーラ 2022.1: Windows 用自己解凍型ウェブインストーラ」をダウンロードします。

<https://japan.xilinx.com/support/download.html>

【図 2. 1. 6d : FPGA 開発環境のインストール方法】

諸事情で PC に FPGA 開発環境をインストールできない受講者に関しては、PC の貸出を行った。貸出用の PC に FPGA 開発環境をインストールする作業は本業務の研究員としてアサインされている東京海洋大学の学生が行った。

## 課題番号⑥：Pocket SDR のインストール

令和 3 年度に開発した GNSS 受信機用多周波フロントエンドである Pocket SDR（図 2.1.6e）をセミナーで使用するにあたり、事前に受講者が所有する PC に Pocket SDR のソフトウェアをインストールしてもらった。図 2.1.6f に Pocket SDR のインストール方法を示す。



【図 2.1.6e：Pocket SDR】

### Pocket SDR のインストール

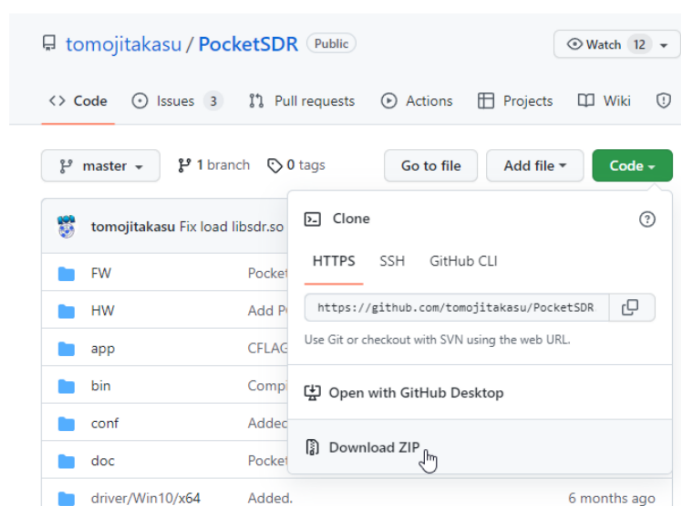
Pocket SDR は、オープンソースの GNSS ソフトウェア受信機です。2 周波対応のフロントエンドデバイスに加えて、受信した GNSS 信号の捕捉や追尾を行うためのソフトウェアが GitHub で公開されています。

<https://github.com/tomojitakasu/PocketSDR>

以下、Windows へのインストールを例に、手順を解説します。

#### Pocket SDR のダウンロード

まず、上記 GitHub のサイトにアクセスし、Code ボタンから Download Zip を選択してください。「PocketSDR-master.zip」というファイルがダウンロードされます。



ダウンロードした zip ファイルを適当なフォルダに展開してください。この際に、フォルダのアドレスに日本語やスペースが含まれないように選んでください。ここでは、例として「D:¥Seminar¥PocketSDR」としています。

【図 2.1.6f：PocketSDR のインストール方法の一部】

課題番号⑦：第14回：アンテナ測定についての講義の視聴（所要時間1時間26分）

アンテナ測定についての基礎を事前に学んでもらう為、第1回目は8月19日16:30～18:00にZoomで講義を行った。また、第2回目は本ホームページの『プログラム及び教材』に掲載されている第1回目を録画したものを視聴してもらった。本ホームページの『プログラム及び教材』に掲載されている、オンライン授業の1つを視聴してもらった。表2.1.6cに課題番号⑦の内訳を示す。

【表2.1.6c：課題番号⑦の内訳】

| 番号 | タイトル                      | 講師        | リンク先                            |
|----|---------------------------|-----------|---------------------------------|
| 14 | GNSS シミュレータの役割と概要、電波暗室の概要 | 海老沼<br>久保 | 14_Simulator<br>14_Gnss_Antenna |

### 2.1.7 検証

令和3年度に開発したフロントエンドの試作機等を用いた検証も合わせて行った。関連する企業のエンジニアに本試作機を展開することで、有用な知見を得ることができた。例として、データを取得する際に、ノートPCのマウスやBluetoothの処理を完全にOFFにすることで、データ漏れを防ぐことができるようになった。実際に取得したデータとそのデータ解析用のプログラムを以下の通りHPに掲載した。<https://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/sdr.html>。また去年度購入したUSRPE310用の取扱い方法について、鈴木先生に作成頂き上記HPにPDFで掲載した。

## 2.2 セミナーの実施

一般社団法人測位航法学会と連携して、東京海洋大学、中部大学、千葉工業大学の3大学の教員が中心となり、宇宙航空人材育成を目標としたアクティブ・ラーニング型セミナーを年に2回、それぞれ3日間の期間で実施した。表2.2aにセミナー開催日を示す。

【表2.2a：セミナー開催日】

| セミナー名                    | 開催日        | 時間          | 開催場所                          |
|--------------------------|------------|-------------|-------------------------------|
| 第1回目「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」 | 2022年8月8日  | 13:00～17:00 | 東京海洋大学越中島キャンパス<br>第4実験棟5階 大教室 |
|                          | 2022年8月9日  | 9:30～17:00  |                               |
|                          | 2022年8月10日 | 9:30～17:00  |                               |
| 第2回目「ソフトウェアGNSS受信機プログラム」 | 2023年2月8日  | 13:00～17:00 | 東京海洋大学越中島会館2階<br>セミナー室3       |
|                          | 2023年2月9日  | 9:30～17:00  |                               |
|                          | 2023年2月10日 | 9:30～17:00  |                               |

開催場所は、東京海洋大学 越中島キャンパス（〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6）で実施した。第1回目はコロナの感染状況を考慮し、最大130名収容できる東京海洋大学 越中島キャンパス第4実験棟5階大教室（図2.2a）で実施した。第2回目は、東京海洋大学 越中島会館2階セミナー室3（図2.2b）で実施した。セミナー期間中は一般社団法人測位航法学会が中心となり会場の準備、受講者の検温、アンケートの配布（第1回目セミナーのみ）、清掃等を実施した。





【図 2. 2a：第 4 実験棟 5 階大教室】



【図 2. 2. b：越中島会館 2 階セミナー室 3】

各セミナーには、選考の結果受講が決まった 15 名（合計 30 名）に参加してもらった。表 2. 2b に第 1 回目セミナー受講者の内訳を示す。表 2. 2c に第 2 回目セミナー受講者の内訳を示す。尚、遠方から参加する学生については旅費を支給した。

【表 2. 2b：第 1 回目「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー受講者の内訳】

| 事業所名／大学名       | 所属部署名／学部又は学科名              |
|----------------|----------------------------|
| 東京海洋大学         | 応用環境システム学                  |
| 千葉大学           | 融合理工学府                     |
| 早稲田大学          | 基幹理工学研究科 機械科学・航空宇宙専攻       |
| 大阪公立大学 ※       | 工学研究科                      |
| 大阪公立大学 ※       | 工学研究科航空宇宙海洋系専攻航空宇宙工学分野     |
| 名城大学 ※         | 理工学研究科メカトロニクス工学専攻          |
| サレジオ工業高等専門学校   | 専攻科                        |
| アルプスアルパイン株式会社  | AD プロジェクト                  |
| ボッシュ株式会社 横浜事務所 | クロスドメインコンピューティングソリューション事業部 |
| 株式会社快適空間 FC    | 技術開発グループ                   |
| 株式会社構造計画研究所    | 通信工学部                      |
| 三菱重工業株式会社      | ICT ソリューション本部              |
| 日本航空電子工業株式会社   | 商品開発センター                   |
| 日立産機システム       | 研究開発本部                     |
| 日立製作所          | 研究開発グループ                   |
| 合計 15 名        | ※旅費支給                      |

【表 2. 2c：第 2 回目「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー受講者の内訳】

| 事業所名／大学名 | 所属部署名／学部又は学科名 |
|----------|---------------|
| 立命館大学 ※  | 理工学部電気電子工学科   |

|                |                             |
|----------------|-----------------------------|
| 立命館大学 ※        | 理工学部電気電子工学科                 |
| 早稲田大学          | 大学院法学研究科                    |
| 東京海洋大学 ※       | 海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻        |
| 東京大学 ※         | 工学系研究科 航空宇宙工学専攻             |
| 清水建設株式会社       | フロンティア開発室 宇宙開発部             |
| 宇宙技術開発株式会社     | 宇宙システム技術部 先端技術開発グループ        |
| JAXA           | 航空技術部門航空安全イノベーションハブ         |
| 沖電気工業株式会社      | イノベーション推進センター センシング技術研究開発部  |
| JAXA           | 第一宇宙技術部門 衛星測位システム技術ユニット     |
| JAXA           | 第一宇宙技術部門 衛星測位システム技術ユニット     |
| 三菱電機 情報技術総合研究所 | スマートセンシング技術部                |
| 三菱電機（株） 鎌倉製作所  | 防衛技術部 技術第六課                 |
| 三菱電機ソフトウェア（株）  | 電子システム事業統括部 鎌倉事業所 第二技術部 第三課 |
| 日本信号株式会社       | 自動運転システム部                   |
| 合計 15 名        |                             |
| ※旅費支給          |                             |

### 2.2.1 セミナーの教材、及び時間割

セミナーでは、令和3年度に開発した90分・15コマ分の教材（図2.2.1a）を使用した。この教材はホームページの『プログラム及び教材』に掲載されており、受講者が事前に観覧できるようにした。

またセミナーの時間割（表2.2.1a）は第1回目、第2回目とも同じものにした。

【表2.2.1a：セミナーの時間割】

|      | 9:30～ | 11:00～ | 昼休み | 13:00～ | 13:30～ | 15:15～ |
|------|-------|--------|-----|--------|--------|--------|
| 1 日目 |       |        |     | 挨拶     | 4      | 5      |
| 2 日目 | 6     | 7      |     |        | 8      | 9      |
| 3 日目 | 10    | 11     |     |        | 12     | 13     |

※数字は教材番号を示す

### 《講 師》

東京海洋大学 海事システム工学部門 久保信明（教材番号：1、2、3、14）

中部大学 工学部 宇宙航空理工学科 海老沼 拓史（教材番号：4、11、12、13、14）

千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター 鈴木太郎（教材番号：5、6、7、8、9、10）

ハンズオン以外で対応できる部分（教材番号：1、2、3、14）については、2.1.6 事前課題に記載した通り、受講者には事前に Zoom 講義を受講、または講義を録画したものを視聴してもらった。

また、教材番号15の講義については、第1回目はアンテナ測定の当日8月26日に対面で行い、第2回目は第1回目の講義と同じ資料をセミナー受講前までに見ていただく事とした。下記表2.2.1bに教材番号15の講義の内容について示す。

【表2.2.1b：教材番号15の講義】

| 番号 | タイトル                             | 講師   | リンク先                                   |
|----|----------------------------------|------|----------------------------------------|
| 15 | GNSS-SDRの有用性、将来GNSSそしてQZSSの計画と期待 | JAXA | 15_GNSSの受信機を学ぶ意義や、将来のGNSS、QZSSの期待_JAXA |

|    |                                           |           |       |                                        |
|----|-------------------------------------------|-----------|-------|----------------------------------------|
| 1  | ソフトウェアGNSS受信機を学ぶ重要性                       | 久保        | オンライン | Introduction                           |
| 2  | GNSSの基礎1 測位衛星、座標、時刻と衛星位置                  | 久保        | オンライン | 02_GNSSBasic1 (1)                      |
| 3  | GNSSの基礎2 観測誤差と測位方式等                       | 久保        | オンライン | 03_GNSSBasic2 (1)                      |
| 4  | フロントエンドの役割と概要 (IF、ビット、サンプリング、IQ値等)        | 海老沼       | 教室    | 04_Frontend                            |
| 5  | 教材で利用するソフトウェアGNSS受信機の紹介 (GithubやPCの動作環境等) | 鈴木        | 教室    | 05_SDR_Setup                           |
| 6  | GNSSの信号について (衛星からの信号を知る)                  | 鈴木        | 教室    | 06_GNSS_Signals+SDR_Overview           |
| 7  | 信号の捕捉について (再捕捉の必要性)                       | 鈴木        | 教室    | 07_Signal_Acquisition                  |
| 8  | 信号の追尾について (DLL、FLL、PLL、信号強度、フィルター設計)      | 鈴木        | 教室    | 08_Signal_Tracking                     |
| 9  | 航法データのデコードについて                            | 鈴木        | 教室    | 09_Navigation_Message                  |
| 10 | 観測データの生成と測位演算について                         | 鈴木        | 教室    | 10_Positioning + SDR_Application       |
| 11 | FPGAの活用 (HDLの基礎)                          | 海老沼       | 教室    | 11_FPGA_Basics1                        |
| 12 | FPGAの活用 (Xilinx Vivado入門)                 | 海老沼       | 教室    | 12_FPGA_Basics2_Vivado_Tutorial        |
| 13 | FPGAの活用 (C/Aコードの生成とテストベンチ)                | 海老沼       | 教室    | 13_FPGA_Basics3                        |
|    |                                           |           |       | 13_FPGA_Basics3_Vivado_Testbench       |
| 14 | GNSSシミュレータの役割と概要、電波暗室の概要                  | 海老沼<br>久保 | オンライン | 14_Simulator                           |
|    |                                           |           |       | 14_Gnss_Antenna                        |
| 15 | GNSS-SDRの有用性、将来GNSSそしてQZSSの計画と期待          | JAXA      | オンライン | 15_GNSSの受信機を学ぶ意義や、将来のGNSS、QZSSの期待_JAXA |

【図 2.2.1a：令和3年度に開発した90分・15コマ分の教材】

尚、本教材、及びセミナーの内容については、衛星測位関連企業・研究機関の方々に監修して頂いた。表 2.2.1c にプログラム及び教材の監修者リスト、評価・面談等の実施者を示した。多くの監修者より、教材及びセミナーの内容について、GNSS 受信機の基礎となる部分が一通り盛り込まれていることを確認頂いた。また、一部の監修者よりマルチ GNSS 化やマルチ周波数化についての要望もあった。この部分は発展的課題として取り組んでおり、2023 年度も継続して取り組む。

【表 2.2.1c：プログラム及び教材の監修者リスト】

| 氏名               | 所属機関            | 支援の概要                                                  |
|------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|
| 荒井 修             | AAI-GNSS 技術士事務所 | 教材・セミナーの内容に関する監修<br>セミナー参加者の評価と面談<br>発展的課題へのアドバイス      |
| Dinesh Manandhar | 東京大学            | 教材・セミナーの内容に関する監修<br>開発したフロントエンドを利用した検証<br>発展的課題へのアドバイス |
| 富永 貴樹            | 古野電気株式会社        | 教材・セミナーの内容に関する監修<br>発展的課題へのアドバイス                       |
| 辻井 利昭            | 大阪公立大学          | 教材・セミナーの内容に関する監修<br>発展的課題へのアドバイス                       |

|       |             |                                                   |
|-------|-------------|---------------------------------------------------|
| 川口 貴正 | 三菱電機株式会社    | 教材・セミナーの内容に関する監修<br>セミナー参加者の評価と面談<br>発展的課題へのアドバイス |
| 古川 玲  | 株式会社構造計画研究所 | セミナー参加者の評価と面談                                     |
| 山田 英樹 | JAXA        | 教材・セミナーの内容に関する監修<br>セミナー参加者の評価と面談                 |
| 岡 龍駿  | 早稲田大学       | セミナー参加者の目線でみたときの評価教材<br>発展的課題への支援                 |
| 川口 秀樹 | 室蘭工業大学      | 発展的課題へのアドバイスと実際の支援                                |
| 松本 洋平 | 東京海洋大学      | 発展的課題へのアドバイスと実際の支援                                |
| 高橋 賢  | 広島市立大学      | 発展的課題へのアドバイスと実際の支援                                |

### 2.2.2 機材(アンテナや再放射器)の準備、及びセミナー時のサポート内容

第1回目及び第2回目セミナー時の屋上のアンテナと再放射キットの写真(図2.2.2a、図2.2.2b、図2.2.2c)を以下に記載した。セミナー自体は教室で実施するため、GNSSの屋外の電波を室内に再放射する形で、受講者はあたかも屋外にいるかのように教室内でGNSSの信号を取得できる。教室内で信号を受信している大元は、屋上のアンテナであるため、この屋上のアンテナの位置が受講者の最後の測位演算の位置結果となる。本セミナーには、東京海洋大学の学生も1名参加したが、その学生とは別にソフトウェアGNSS受信機に精通した大学院生2名を教員3名の補助としてセミナーに参加してもらった。第1回目、第2回目ともに2名の補助がついた。彼らは参加者が講師の講義についていけないときにサポートしてくれた。また、講義以外でのサポートは測位航法学会の方に依頼した。



【図2.2.2a：第1回目セミナー時の屋上アンテナ】





【図 2. 2. 2b : 第 1 回目セミナー時の室内での再放射キット】

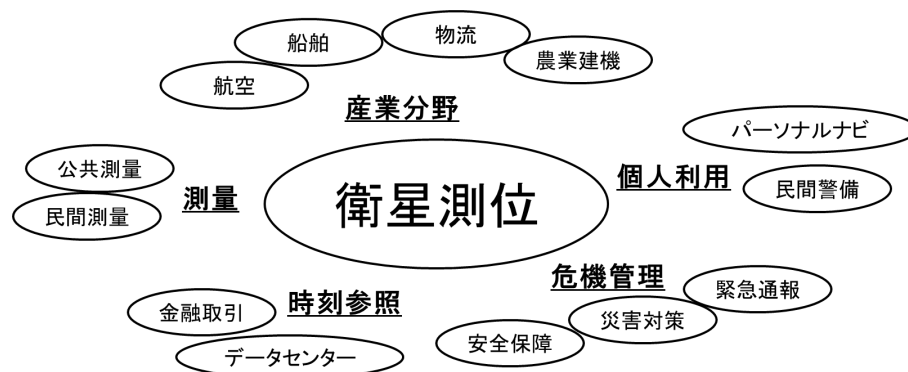


【図 2. 2. 2c : 第 2 回目セミナー時の室内での再放射キット（前の講師の右）】

### 2.2.3 セミナー講義内容

#### 2.2.3.1 ソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性

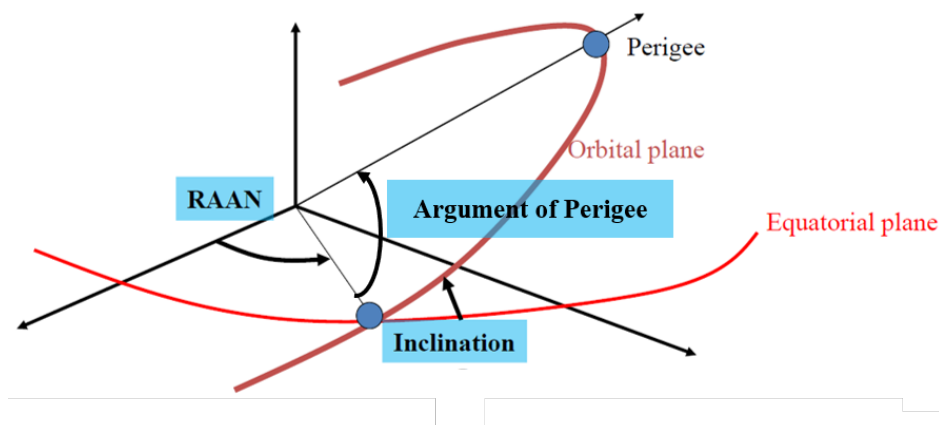
本講義では、この課題でソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性について説明した。以下の図 2.2.3.1 のように衛星測位を取り巻く環境は非常に多岐にわたっており、様々なアプリケーションで利用されている。



【図 2.2.3.1：衛星測位を取り巻く環境】

#### 2.2.3.2 GNSS の基礎 1 測位衛星、座標、時刻と衛星位置ソフトウェア

本講義では、GNSS の基礎の中でも、衛星の役割、位置を決定するための座標系の役割、そして衛星測位の要である正確な時刻の役割と衛星位置を推定する方法について説明した。



【図 2.2.3.2：衛星軌道を決定するもの】

例えば、衛星の位置を決定するための係数としてアルマナックとエフェメリスを紹介した。上図 2.2.3.2 は衛星軌道を決定する 6 つのパラメータ（アルマナックと呼ばれる）のうち、軌道傾斜角、昇交点赤経、近地点離角を示したものの例である。

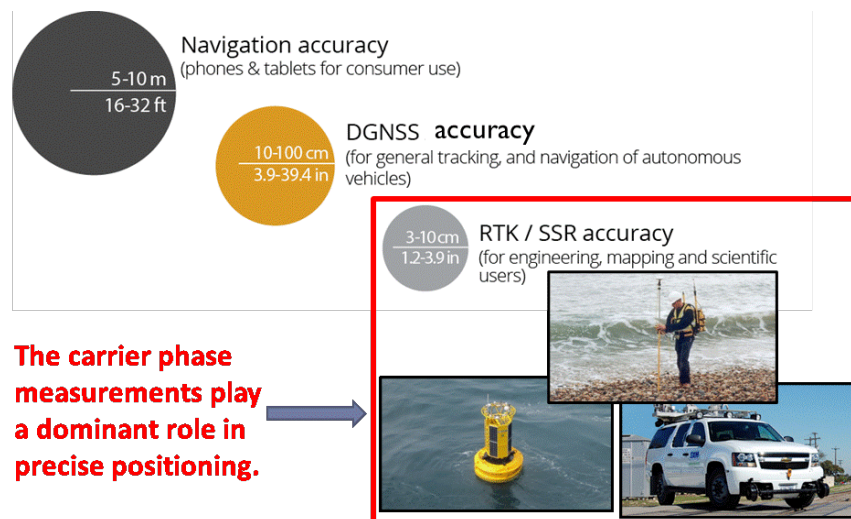
#### 2.2.3.3 GNSS の基礎 2 観測誤差と測位方式等

本講義では、GNSS の基礎の中でも、各種観測値の誤差の要因と各種測位方式について説明した。GNSS で得られる観測値に含まれるいくつかの誤差を知ることは、精度を自身で高める上で重要であり、以下の図 2.2.3.3a のように大きく 6 つに分類して説明した。

| Sources                  | Potential error size                              |
|--------------------------|---------------------------------------------------|
| Satellite clock errors   | Broadcast : ~5 ns (rms)<br>Precise: ~75 ps (rms)  |
| Satellite orbital errors | Broadcast : ~2 m (rms)<br>Precise: ~5 cm (rms)    |
| Ionospheric errors       | 2-10 m (at zenith direction)                      |
| Tropospheric delay       | 2.3-2.5m (at zenith direction)                    |
| Multipath (open sky)     | Code : 0.5-1 m<br>Carrier : ~5 cm                 |
| Receiver Noise           | Code : 0.25-0.5 m (rms)<br>Carrier : 1-2 mm (rms) |

【図 2. 2. 3. 3a : 観測値に含まれる誤差】

測位方式についても同様に、以下の図 2. 2. 3. 3b のように大きく 3 つに分類して説明した。それぞれ、単独測位、DGNSS、RTK である。

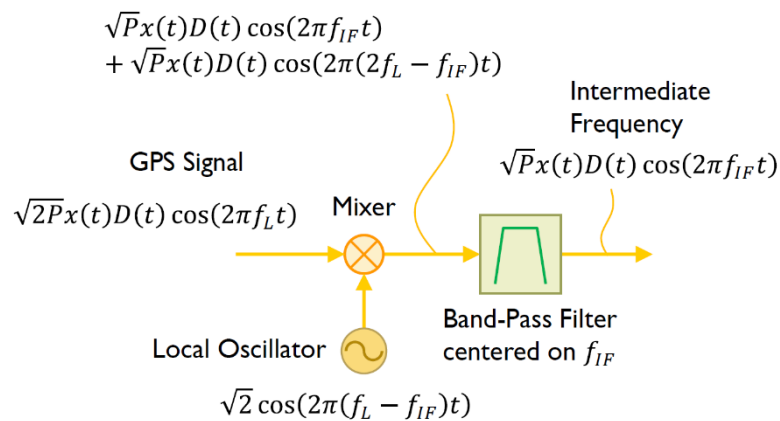


【図 2. 2. 3. 3b : 測位方式】

#### 2. 2. 3. 4 フロントエンドの役割と概要（IF、ビット、サンプリング、IQ 値等）

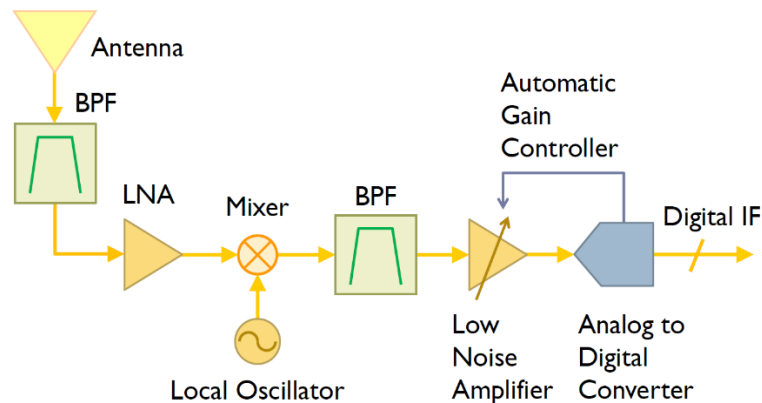
本講義では、高周波の無線信号をソフトウェア無線機や FPGA で処理できるデジタル信号に変換する回路であるフロントエンドの仕組みについて解説した。

アンテナに受信された高周波の GNSS 信号は、まずはダウンコンバータによって、ソフトウェア無線機や FPGA で処理可能な中間周波数（IF: Intermediate Frequency）信号と呼ばれる低周波のアナログ信号に変換される。無線信号は、搬送波と呼ばれる正弦波からなるため、これらの処理はすべて三角関数の公式を使って表すことができる。その仕組みを図 2. 2. 3. 4a に示す。



【図 2. 2. 3. 4a : ダウンコンバータの仕組み】

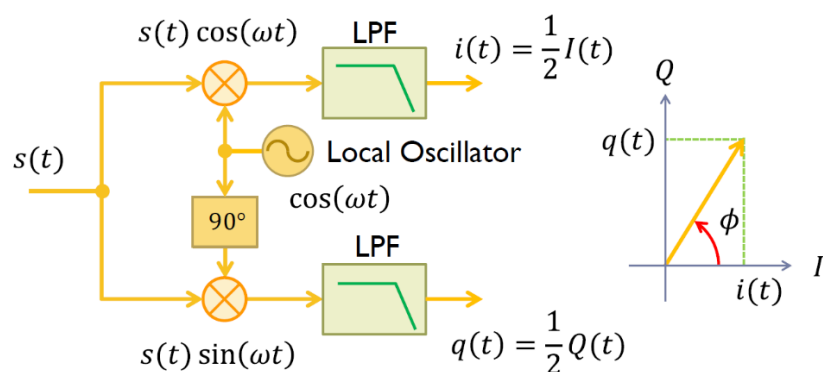
続いて、IF 信号は、アナログーデジタル変換器（ADC：Analog to Digital Converter）によって、デジタル信号に変換される。GNSS 信号は、拡散符号の位相情報によって測距を行うため、信号の振幅には情報が含まれない。そのため、GNSS 信号のフロントエンドには、一般的に 2 ビットの ADC が用いられる。この ADC によって、IF 信号が（-3, -1, +1, +3）の離散値にデジタル化される。さらに、ADC に入力される IF 信号の振幅が、この離散値に収まるよう、AGC（Automatic Gain Controller）によって、入力振幅が自動制御されている。これらフロントエンドの構成をまとめたブロック図を図 2. 2. 3. 4b に示す。



【図 2. 2. 3. 4b : フロントエンドの構成】

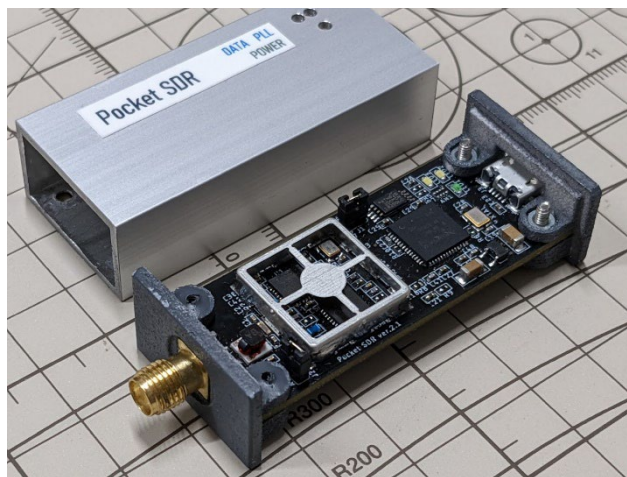
近年では、様々な GNSS 信号に対応できるよう、より汎用的なフロントエンドとして、中間周波数を 0Hz とする直交復調器が広く用いられている。基本的な構造は、IF 信号のフロントエンドと同様であるが、その出力として I/Q 信号と呼ばれる直交した成分をもつ 2 つのデジタル信号が得られる。その仕組みを図 2. 2. 3. 4c に示す。





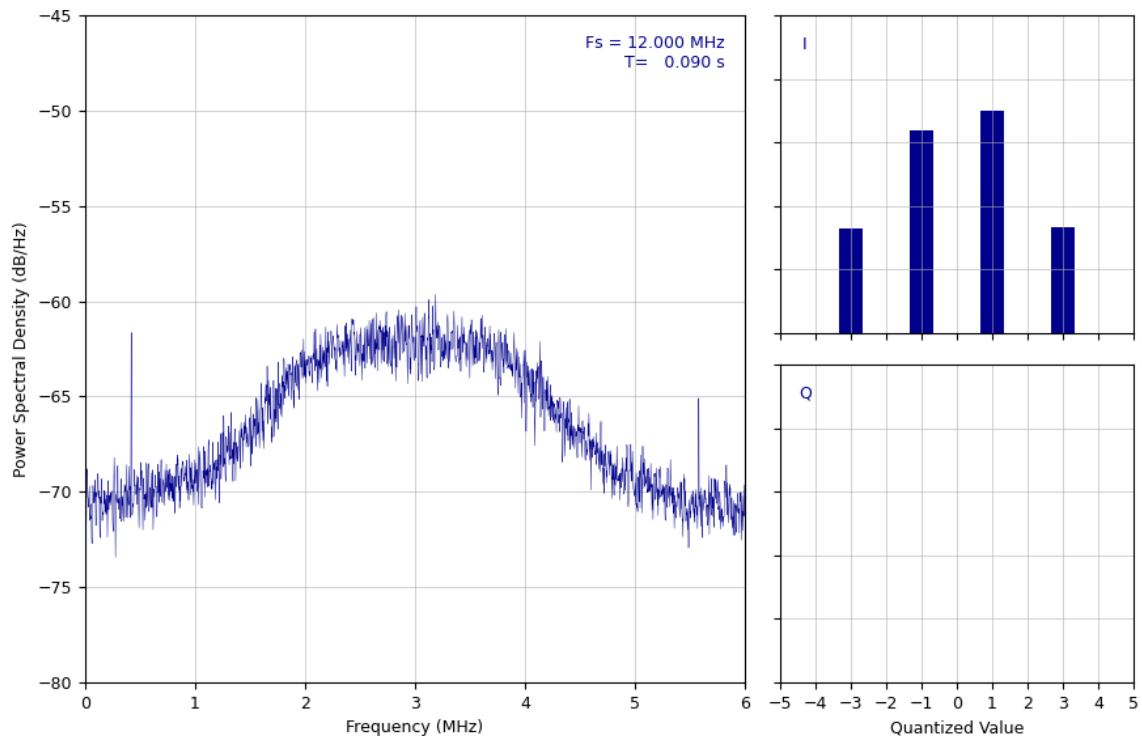
【図 2. 2. 3. 4c : 直交復調器の仕組み】

本講義では、これらフロントエンドの動作を実際に確認してもらうために、GNSS 信号の受信とデジタル化された信号の可視化の実習を行った。この実習では、令和 3 年度に試作した 2 周波対応フロントエンド基板を改良した PocketSDR を用いた。試作基板では、フロントエンドの MAX2771 と、デジタル信号を PC に転送するための EZ-USB FX2LP の回路基板を分けていた。その改良版である PocketSDR は、これらを一体化することで、よりコンパクトで扱いやすい教育ツールとなっている。図 2. 2. 3. 4e に PocketSDR の外観を示す。



【図 2. 2. 3. 4e : PocketSDR の外観】

本講義で取得した IF 信号の例を図 2. 2. 3. 4f に示す。左図は IF 信号の電力スペクトル密度を示している。これは図 2. 2. 3. 4a に示すダウンコンバータのバンドパスフィルタの特性を表している。右図はデジタル化された IF 信号の頻度分布である。GNSS 信号は非常に微弱であるため、観測される IF 信号はほぼ熱雑音に埋もれている。そのため、デジタル化された IF 信号の各離散値の頻度は、正規分布に従うことになる。つまり、フロントエンドが正常に動作していれば、正規分布の  $1\sigma$  に相当する (-1, +1) の頻度が、全体の 68% を占めることになる。図 2. 2. 3. 4f の頻度分布では、わずかに DC バイアスによる分布の非対称性が現れているものの、AGC の機能により信号が飽和するようなことはなく、正常にサンプリングされていることが確認できる。



【図 2. 2. 3. 4f : IF 信号の観測例】

#### 2. 2. 3. 5 教材で利用するソフトウェア GNSS 受信機の紹介 (Github や PC の動作環境)

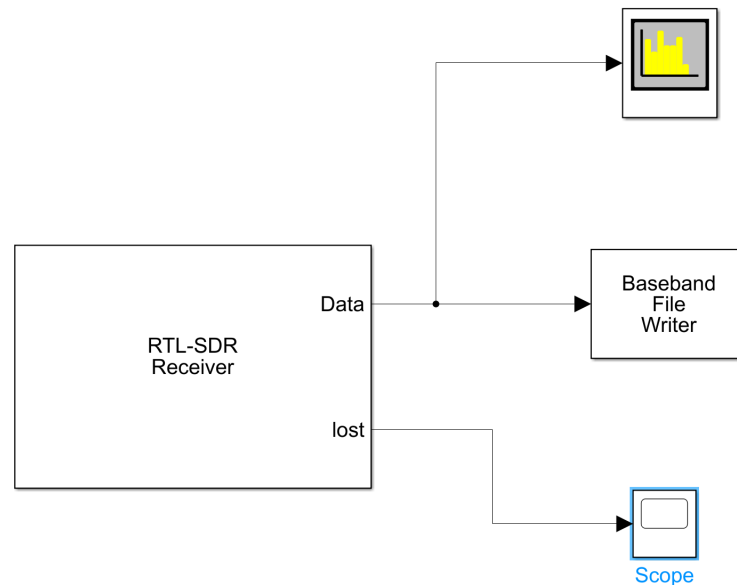
本講義では、ソフトウェア GNSS 受信機を用いたプログラミングによる GNSS 信号処理の学習の事前準備として、フロントエンドのドライバーのインストール、実行環境である MATLAB/Simulink の環境設定を行った。図 2. 2. 3. 5a に、本セミナーで使用する GNSS フロントエンドの外観を示す。RTL-SDR と呼ばれるフロントエンドと GNSS アンテナを参加者全員に配布し、ドライバーのインストール、アンテナバイアススティの有効化、データの取得方法などの説明を行い、各自の PC において RTL-SDR の動作確認を行った。



【図 2. 2. 3. 5a : フロントエンド (RTL-SDR) の外観】

図 2. 2. 3. 5b に、本講義で構築した、MATLAB/Simulink のモデルを示す。PC に接続した RTL-SDR からデジタル化した RF 信号を PC に取り込み、スペクトラムを表示するプログラムをモデルベース開発により

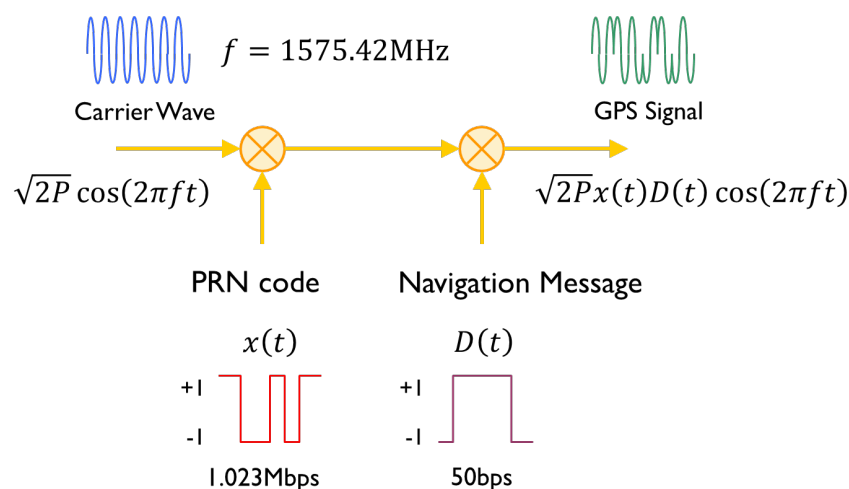
作成した。これにより、フロントエンドである RTL-SDR の基本的な使い方と、MATLAB/Simulink でのプログラム方法を学び、ソフトウェア GNSS 受信機の構築に必要な、RF 信号を PC に取り込む部分を構築した。



【図 2. 2. 3. 5b : MATLAB/Simulink での RTL-SDR からのデジタル信号の受信】

#### 2. 2. 3. 6 GNSS の信号について（衛星からの信号を知る）

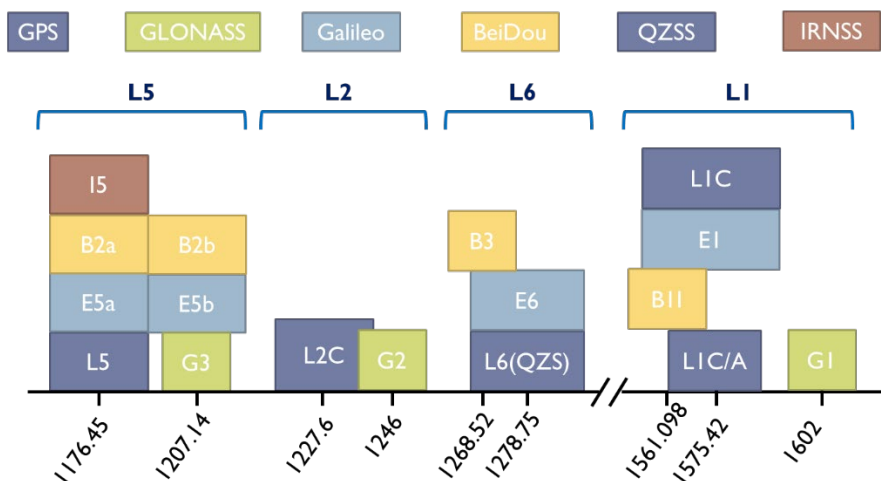
本講義では、ソフトウェア GNSS 受信機を構築するのに必要な知識である GNSS 信号の詳細について学習した。図 2. 2. 3. 6a に GNSS 信号の構造について示す。GNSS 信号は 1575. 42MHz の搬送波に、PRN コード、ナビゲーションメッセージが BPSK 変調により重畳されて送信される。この PRN コードの詳細と、PRN コードの生成方法について学習し、さらに GNSS によって異なる周波数、異なる構造の信号が送信されていることを学習した。



【図 2. 2. 3. 6a : GPS の L1C/A 信号の構造】

図 2. 2. 3. 6b に様々な GNSS からの信号の種類と送信されている周波数を示す。GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou、QZSS、IRNSS がそれぞれどの周波数においてどのような信号を送信しているのかを学習した。

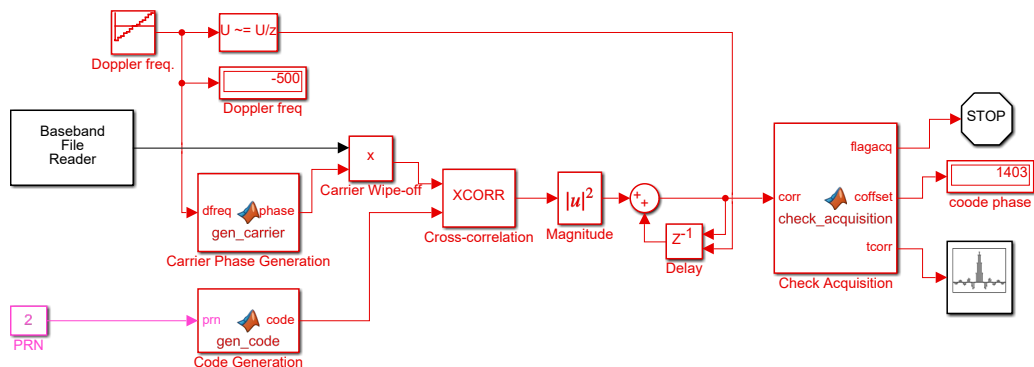
さらに本講義では、GNSS 信号処理をソフトウェアで実施するソフトウェア GNSS 受信機のメリット、デメリットについて紹介した。また、現在オープンソースで利用可能な GNSS ソフトウェア受信機のプロジェクトをいくつか紹介し、本セミナーで実施するモデルベースで開発するソフトウェア GNSS 受信機の特徴について説明した。



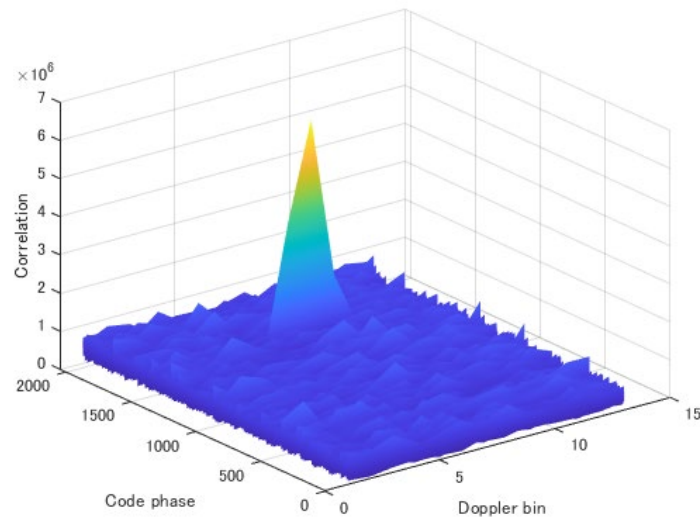
【図 2. 2. 3. 6b : GNSS 信号の周波数と信号の種類】

#### 2. 2. 3. 7 信号の捕捉について（再捕捉の必要性）

本講義では、GNSS 信号の捕捉方法について学習した。GNSS 信号処理の最初の段階では、アンテナで受信可能な信号の大まかなドップラーシフト周波数と、コード位相を推定する必要がある。これを信号処理でどのように実現すればよいかを学習した。図 2. 2. 3. 7a に MATLAB/Simulink で作成した、GNSS 信号の捕捉のモデルを示す。フロントエンドから受信したデジタル信号から、ドップラー周波数に基づく搬送波位相の位相情報をキャンセルし、ベースバンド信号を取り出す。図 2. 2. 3. 7b に実際に RTL-SDR を用いて取得した RF データから、作成した信号捕捉モデルである衛星のドップラー周波数とコード位相を推定した例を示す。参加者のそれぞれの PC 上で、このモデルを動かして GNSS 信号の捕捉を試してみることで、GNSS 信号捕捉について学習した。



【図 2. 2. 3. 7a : MATLAB/Simulink での GNSS 信号の捕捉モデル】

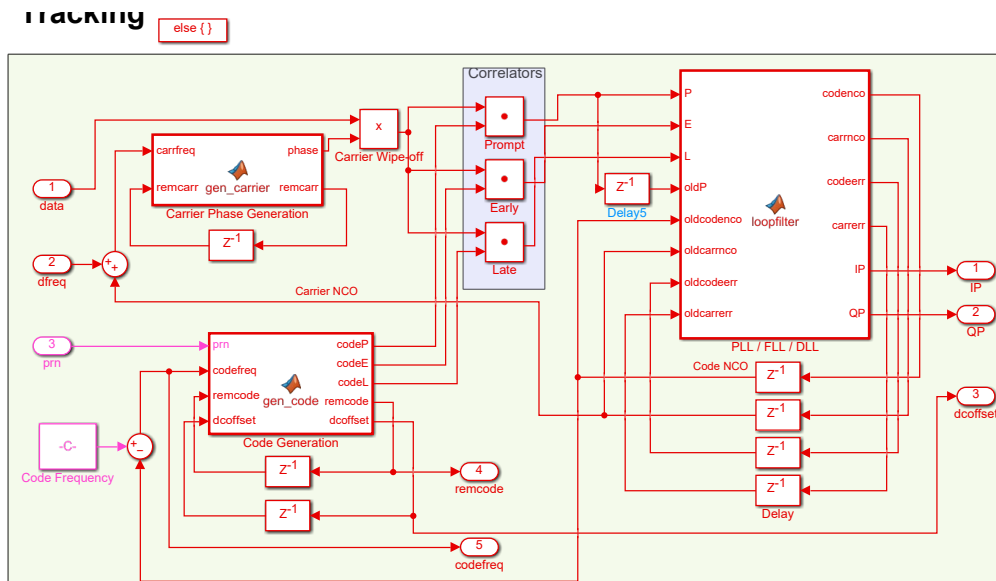


【図 2. 2. 3. 7b : MATLAB/Simulink での GNSS 信号の捕捉結果】

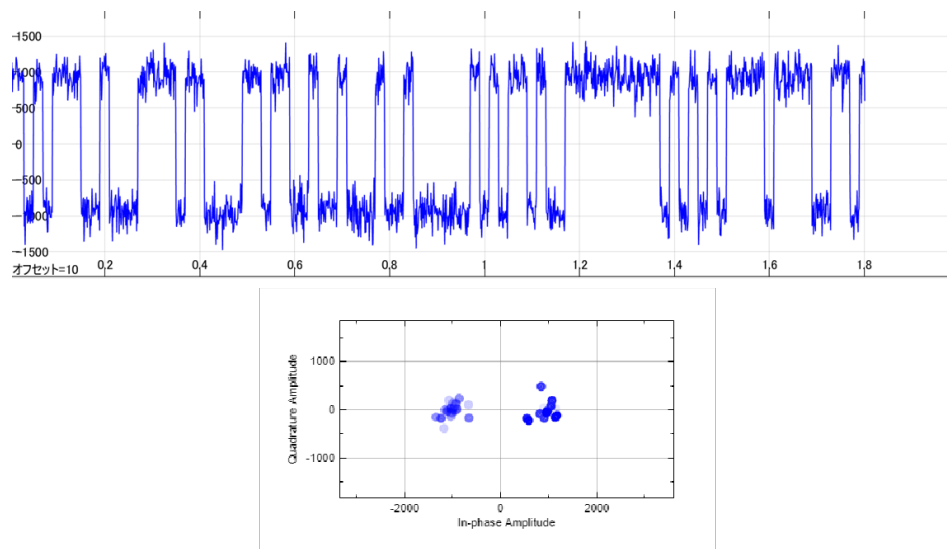
#### 2. 2. 3. 8 信号の追尾について (DLL、FLL、PLL、信号強度、フィルター設計など)

本講義では、GNSS 信号の捕捉後に、アンテナと GNSS 衛星の相対速度の変化から発生するドップラー周波数の変化を追尾し、ナビゲーションメッセージを復号し測距するために必要な、GNSS 信号の追尾方法について学習した。本講義で作成した MATLAB/Simulink による GNSS 信号の追尾のモデルを図 2. 2. 3. 8a に示す。GNSS の信号追尾では、Early-Prompt-Late の 3 つの相関器を利用する。3 つの相関器の出力から、Delay Lock Loop、Phase Lock Loop、Frequency Lock Loop の 3 つを利用することで、周波数とコード位相をフィードバック制御により調整する。これにより、ベースバンド信号を復号することが可能となり、また周波数と位相変化から、GNSS による距離変化を算出することが可能となる。

作成した MATLAB/Simulink のモデルにより、参加者自身の PC において GNSS 信号追尾のハンズオンを実施した。図 2. 2. 3. 8b に GNSS 信号の追尾中の相関器出力を示す。In-Phase の相関値の出力から、ベースバンド信号が復号されていることが確認できる。



【図 2.2.3.8a : MATLAB/Simulink での GNSS 信号の捕捉モデル】



【図 2.2.3.8b : MATLAB/Simulink での GNSS 信号の捕捉結果】

### 2.2.3.9 航法データのデコードについて

本講義では、GNSS 信号の追尾によって復号したベースバンド信号から、ナビゲーションメッセージをデコードする方法について学習した。まず、GNSS のナビゲーションメッセージの種類と、その構造について学んだ。GNSS のナビゲーションメッセージは GNSS 信号ごとに異なるメッセージ構造が利用されており、ナビゲーションメッセージのデコードに必要な処理方法を学習した。ナビゲーションメッセージのビット同期方法、ナビゲーションメッセージのビット決定方法、エラー検出と訂正方法について紹介し、実際にそれらをどのように実装するのかを説明した。図 2.2.3.9 に MATLAB/Simulink で作成したナビゲーションメッセージのデコードモデルを示す。フロントエンドで取得した RF データから、前述した信号捕



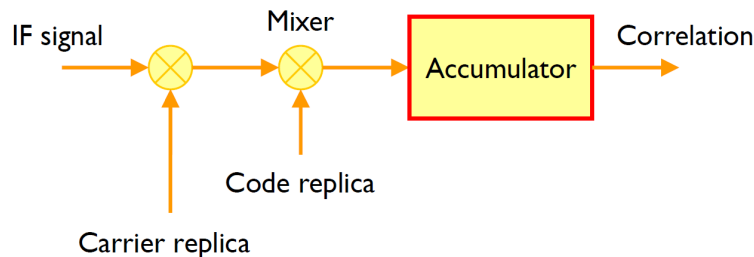


### 2.2.3.11 FPGA の活用 (HDL の基礎)

本講義では、ソフトウェア無線を用いて学んだ GNSS 信号処理のリアルタイム化に向けて、デジタル信号処理をハードウェアで実現する FPGA の基礎について解説した。

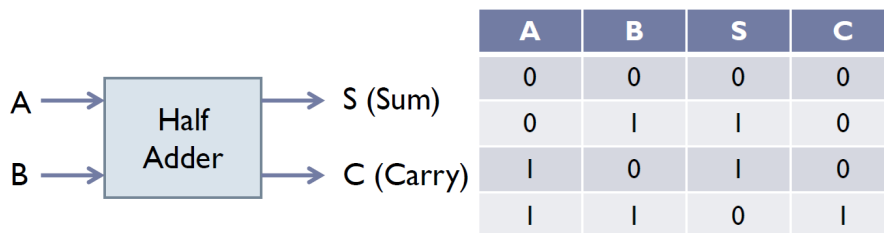
FPGA はプログラマブルな論理回路であり、その開発には HDL (Hardware Description Language) を用いる。イメージとしては、ソフトウェア開発に用いる C 言語や Python などのプログラミング言語に似ている。しかし、これらプログラミング言語がアルゴリズムとしての処理手順を記述するのに対して、HDL は論理回路の回路図を記述するための言語という大きな違いがある。まずは、この違いを体感してもらうために、GNSS 信号処理の基本的な回路となる相関処理を例に、HDL の記述方法を解説した。代表的な HDL として、Verilog と VHDL という言語が挙げられる。本講義では、Verilog を採用している。

図 2.2.3.11a に相関処理の概要を示す。デジタル化された IF 信号に、搬送波および拡散コードのレプリカ信号を掛け合わせ、それを Accumulator によって 1 コード長分加算することで、相関値が得られる。Accumulator による加算は、デジタル化された 2 進数の足し算回路である。そこで、HDL の基礎として、2 進数の足し算回路の記述を取り上げた。



【図 2.2.3.11a : IF 信号の相関処理】

足し算回路のように、入力に対して出力が一意に決まる論理回路を、組み合わせ回路と呼ぶ。組み合わせ回路の入出力の関係は、真理値表そのものであり、その関係を AND や OR などの論理演算子を用いて記述することになる。2 進数の足し算の最小回路は、Half Adder と呼ばれる 1 ビットの足し算回路である。図 2.2.3.11b に Half Adder の入出関係と、その真理値表を示す。1 ビットの信号 A と B を足し合わせた結果が S となる。S が 2 よりも大きな場合は桁上がりとなり、C が 1 となる。



【図 2.2.3.11b : Half Adder の入出力関係と真理値表】

図 2.2.3.11c に、Half Adder を Verilog で記述した例を示す。HDL で記述されたひとまとまりの回路は、モジュールと呼ばれる。

```

module half_adder(A, B, S, C);

    input A, B;
    output S, C;

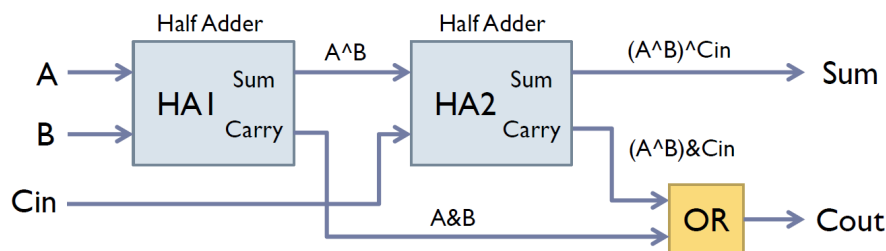
    assign S = A ^ B;
    assign C = A & B;

endmodule

```

【図 2.2.3.11c : Verilog による Half Adder の記述例】

Half Adder では、下の桁からの桁上りを入力として考慮していない。この桁上りも加えた足し算を行う回路を Full Adder と呼ぶ。つまり、Full Adder は、Half Adder の入力に下の桁からの桁上りが加わった 3 入力の回路となる。Full Adder も組み合わせ回路であるため、その真理値表を HDL で記述することが可能であるが、図 2.2.3.11d のように Half Adder を 2 つ組み合わせることで実現することもできる。図 2.2.3.11d において、Cin が下の桁からの桁上りを示す新しい入力である。



【図 2.2.3.11d : Full Adder の構成】

このように、HDL では、すでに準備されているモジュールを上位のモジュールに組み込むことができる。このような方法を階層構造設計と呼ぶ。この階層構造設計は、HDL のリソースを活用するための非常に重要な考え方である。そこで、本講義では、図 2.2.3.11c で設計した Half Adder のモジュールを用いて、Full Adder を階層構造で実現する手法についても解説した。図 2.2.3.11e に階層構造で記述した Full Adder の例を示す。

```

module full_adder(A, B, Cin, Sum, Cout);

    input A, B, Cin;
    output Sum, Cout;
    wire S1, C1, C2;

    half_adder HA1(A, B, S1, C1);
    half_adder HA2(S1, Cin, Sum, C2);

    assign Cout = C1 | C2;

endmodule

```

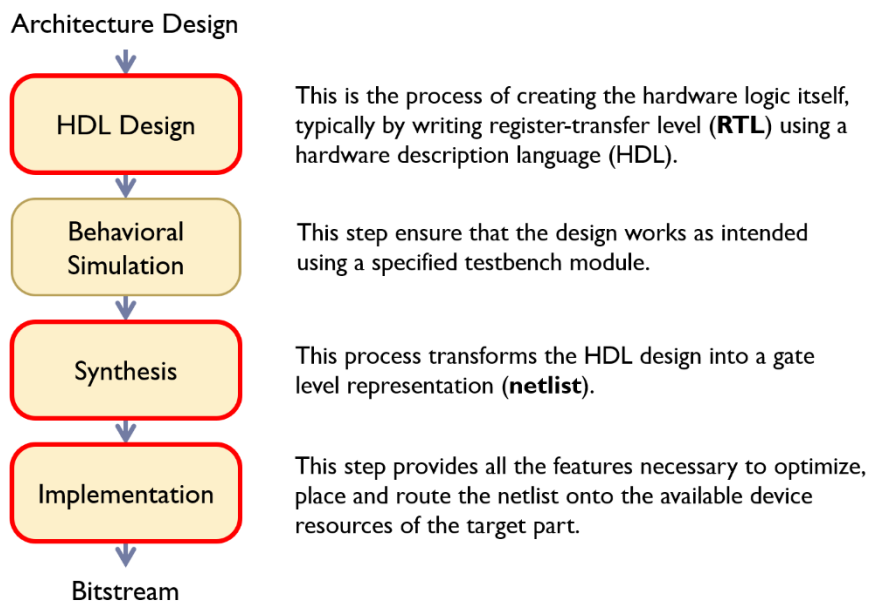
【図 2.2.3.11e : 階層構造で記述した Full Adder の例】

本講義における演習課題として、Full Adder をさらに階層構造にすることで、3 ビットの足し算回路を記述してもらった。

#### 2.2.3.12 FPGA の活用 (Xilinx Vivado 入門)

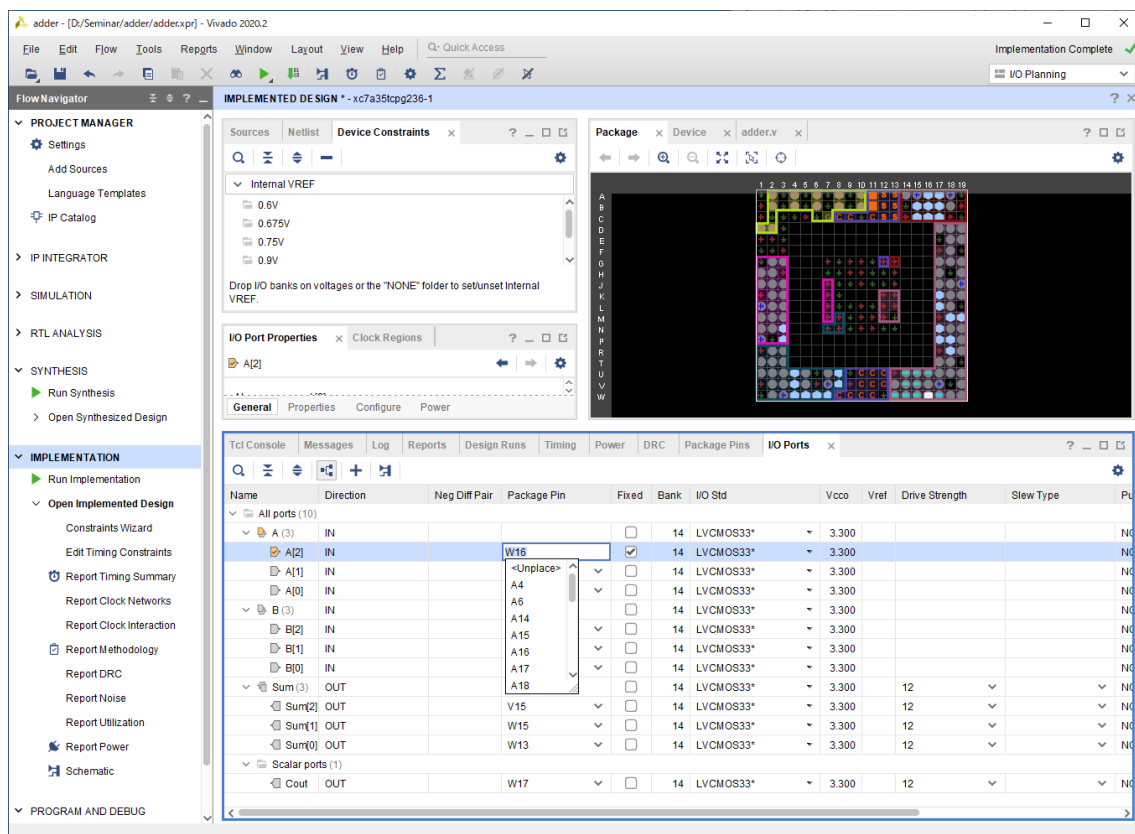
HDL の基礎で解説した Verilog は、汎用的な論理回路の記述言語である。しかし、これを特定の FPGA に書き込めるようにするためには、特別なツールが必要となる。本講義では、FPGA として代表的な Xilinx 社の製品を選択し、そのためのツールとして Xilinx 社が提供する開発環境である Vivado の使い方を解説した。

図 2.2.3.12a に、基本的な FPGA の開発フローを示す。HDL で記述された論理回路は、必要に応じて、回路シミュレータによって、論理回路のロジックレベルでの動作確認を行う。HDL で記述された回路を、実際の FPGA に組み込み可能な回路図（ネットリスト）に変換する処理を合成（Synthesis）と呼ぶ。さらに、合成されたネットリストに対して、特定の FPGA の構造やピン配置に合わせて回路の配置やルーティングの最適化を行う。この処理を Implementation と呼ぶ。このような処理で生成された FPGA に書き込み可能なバイナリデータを、ビットストリームと呼ぶ。



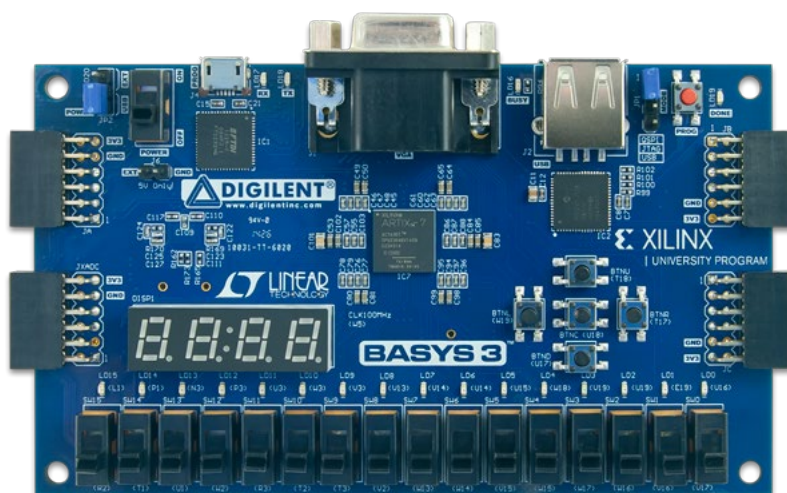
【図 2.2.3.12a : FPGA の設計フロー】

本講義では、HDL の基礎における演習課題で作成した 3 ビットの足し算回路の HDL から、図 2.2.3.12a の手順に従って Vivado を操作することでビットストリームを生成し、Xilinx 社の FPGA 評価基板である BASYS 3 に書き込み、動作確認を行った。図 2.2.3.12b に、Vivado における Implementation の手順で、3 ビット足し算回路の入出力を FPGA の特定のピンに配置している様子を示す。



【図 2. 2. 3. 12b : Vivado によるピン配置の指定】

図 2. 2. 3. 12c に BASYS 3 の外観を示す。3 ビットの入力である A と B をスライドスイッチに、足し算の結果を LED に表示するように図 2. 2. 3. 12b のピン配置を指定している。生成したビットストリームを BASYS 3 に書き込み、スライドスイッチを操作することで、実際のハードウェアでの 3 ビット足し算機の動作を確認してもらった。

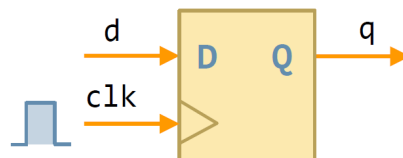


【図 2. 2. 3. 12c : BASYS 3 FPGA 評価基板の外観】

### 2.2.3.13 FPGA の活用 (C/A コードの生成とテストベンチ)

HDL の基礎で作成した足し算回路は、入力に対して一意に出力が決まる組み合わせ回路であった。もうひとつの代表的な論理回路として、外部からの入力だけではなく、記憶されている回路の内部状態によって出力が決まる順序回路が挙げられる。本講義では、この順序回路の例として、図 2.2.3.11a に示す関連処理におけるコードレプリカの生成を取り上げた。

コードレプリカには、LFSR (Linear Feedback Shift Register) と呼ばれるシフトレジスタ回路で生成される疑似雑音信号が用いられている。シフトレジスタの各ビットは、D フリップフロップと呼ばれる記憶素子で構成されている。図 2.2.3.13a に D フリップフロップの構成図を示す。D フリップフロップは、D と CLK の 2 入力と Q の 1 出力を備えている。D に記憶させたい真理値を入力した状態で、CLK が立ち上がる (low から high に遷移する) と、D の真理値を D フリップフロップが記憶し、それを Q に出力する。Q の出力は、次に CLK が立ち上がり、記憶内容が更新されるまで変化しない。このような D フリップフロップを Verilog で記述した例を図 2.2.3.13b に示す。組み合わせ回路と異なり、CLK の立ち上がりによって励起される処理を記述するための always 文が使われている。



【図 2.2.3.13a : D フリップフロップ】

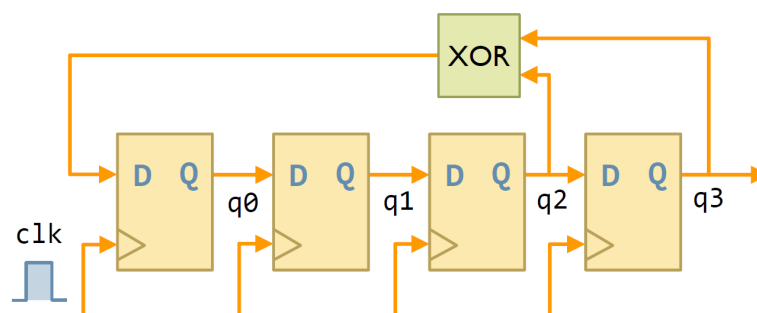
```
module flop(input clk,
            input d,
            output reg q);

    always @ (posedge clk)
        q <= d;

endmodule
```

【図 2.2.3.13b : always 文を用いた D フリップフロップの記述】

本講義では、演習課題として、この D フリップフロップを用いて、図 2.2.3.13c に示す 4 ビットの LFSR を記述してもらった。この回路は、15 ビット周期の疑似雑音信号が生成することができる。その動作を、図 2.2.3.13d に示す。シフトレジスタの内部状態として、1 から 15 の値が、ランダムに生成されていることが確認できる。

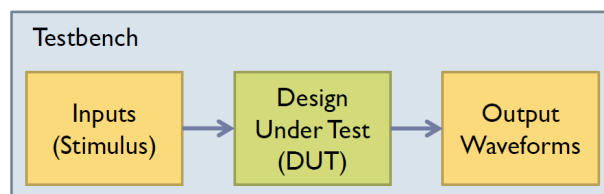


【図 2.2.3.13c : LFSR による疑似雑音信号の生成】

| q3 | q2 | q1 | q0 | Decimal | Hex |
|----|----|----|----|---------|-----|
| 0  | 0  | 0  | 1  | 1       | 1   |
| 0  | 0  | 1  | 0  | 2       | 2   |
| 0  | 1  | 0  | 0  | 4       | 4   |
| 1  | 0  | 0  | 1  | 9       | 9   |
| 0  | 0  | 1  | 1  | 3       | 3   |
| 0  | 1  | 1  | 0  | 6       | 6   |
| 1  | 1  | 0  | 1  | 13      | d   |
| 1  | 0  | 1  | 0  | 10      | a   |
| 0  | 1  | 0  | 1  | 5       | 5   |
| 1  | 0  | 1  | 1  | 11      | b   |
| 0  | 1  | 1  | 1  | 7       | 7   |
| 1  | 1  | 1  | 1  | 15      | f   |
| 1  | 1  | 1  | 0  | 14      | e   |
| 1  | 1  | 0  | 0  | 12      | c   |
| 1  | 0  | 0  | 0  | 8       | 8   |
| 0  | 0  | 0  | 1  | 1       | 1   |

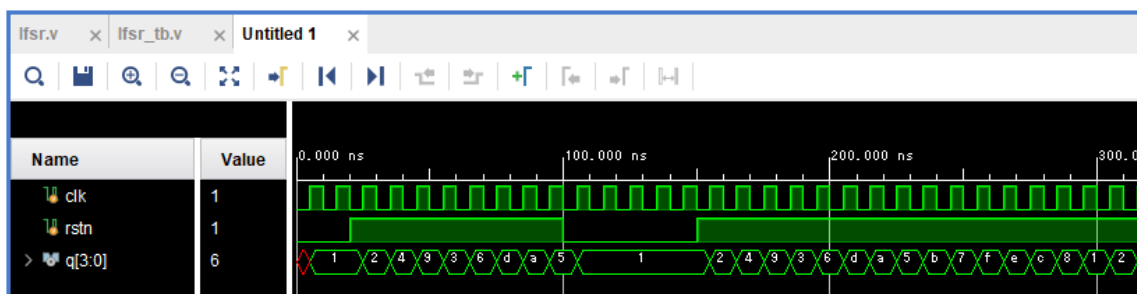
【図 2. 2. 3. 13d : 4 ビット LFSR の動作】

演習課題として記述した 4 ビットの LFSR の動作は、図 2. 2. 3. 12a の Behavioral Simulation として、回路シミュレータを用いてロジックレベルで確認を行った。回路シミュレーションのための HDL のコードを、テストベンチと呼ぶ。このテストベンチは、図 2. 2. 3. 13e に示すように、テストしたい HDL である DUT に対して、入力信号のパターンを疑似的に与え、その出力結果を波形としてグラフィカルに表示することができる。



【図 2. 2. 3. 13e : テストベンチの構成】

テストベンチによる回路シミュレーションの結果を図 2. 2. 3. 13f に示す。4 ビットの LFSR の内部状態である q[3:0] が、図 2. 2. 3. 13d の動作と一致していることが確認できる。



【図 2. 2. 3. 13f : テストベンチによる 4 ビット LFSR の回路シミュレーション】



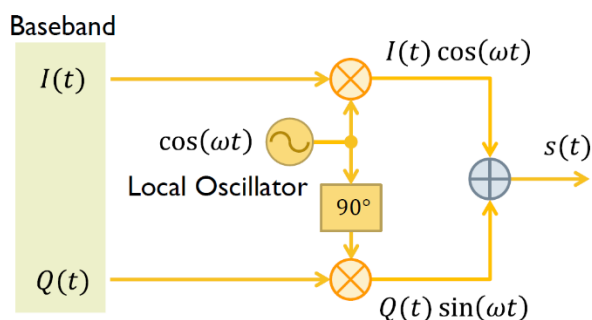
このように、3 コマに渡る FPGA の活用の講義では、図 2. 2. 3. 12a に示す FPGA の開発フローのすべてを、GNSS 信号の相関処理を例に解説した。さらに、Xilinx 社の開発ツールである Vivado と FPGA 評価基板である BASYS 3 を使い、実際に動作させるハンズオンの実習を行った。

#### 2. 2. 3. 14 GNSS シミュレータの役割と概要、電波暗室の概要

本講義では、GNSS 受信機やアンテナをテストするために必要となる GNSS 信号シミュレータと電波暗室の概要について解説した。なお、本講義はハンズオンによる実習がないため、オンラインで実施している。

GNSS 信号シミュレータは、GNSS 受信機のアンテナで受信される無線信号を模擬する信号発生器である。実際の GNSS 信号を用いて受信機をテストしようとする、アンテナを設置する場所や、GNSS 衛星の配置により、テスト毎に条件が変化してしまう問題がある。GNSS 信号シミュレータを用いることで、場所や時間に制限されず、常に同じ条件のテストを実施することが可能となる。

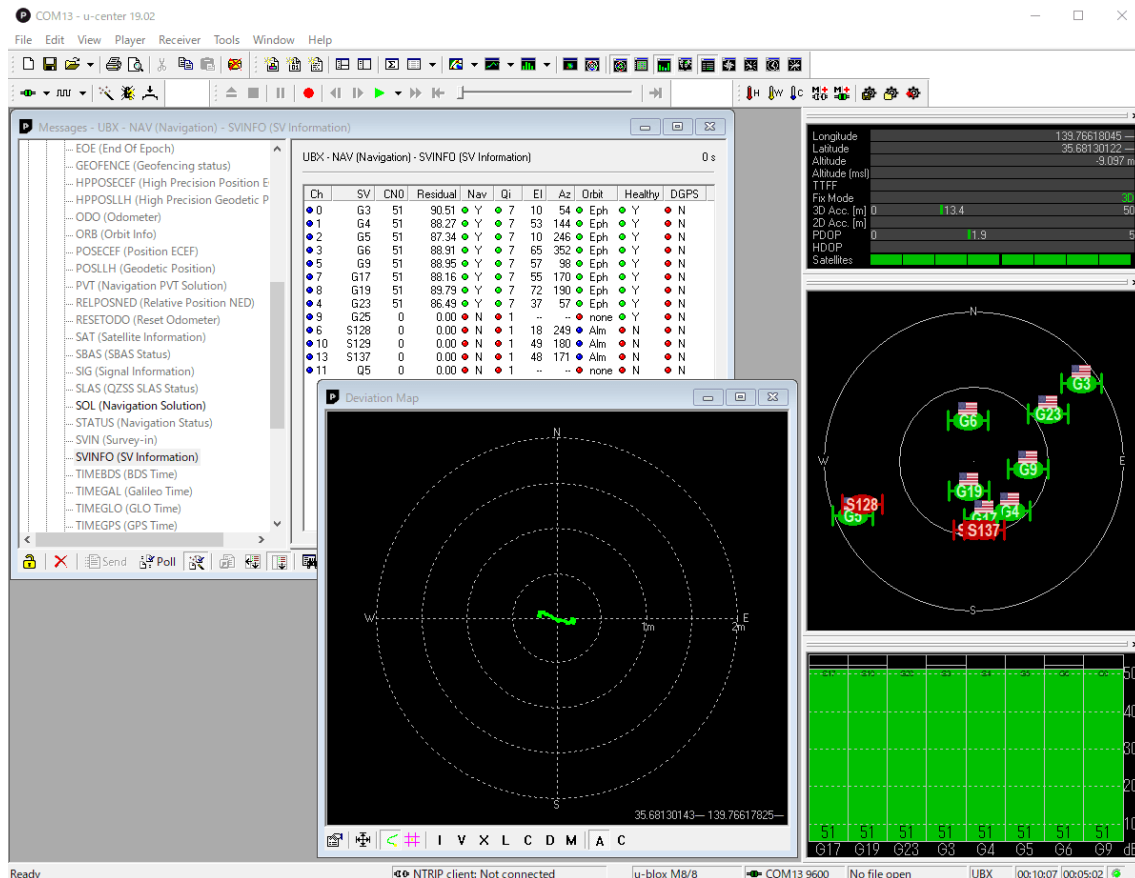
GNSS 受信機で受信された信号は、図 2. 2. 3. 4c に示す受信機の直交変調器の出力として、I/Q 信号として記録することができる。この信号を逆に図 2. 2. 3. 14a に示す直交復調器を用いて高周波信号にアップコンバートすれば、もとの受信信号が復元できることになる。



【図 2. 2. 3. 14a : 直交復調器による I/Q 信号のアップコンバート】

さらに、GNSS 受信機と GNSS 衛星の位置関係から、この I/Q 信号を数値的に生成することも可能である。このような I/Q 信号を生成するためのソフトウェアとして、オープンソースの gps-sdr-sim (<https://github.com/osqzss/gps-sdr-sim>) が挙げられる。

I/Q 信号を無線信号にアップコンバートするための装置として、送信機能を持った SDR デバイスを用いることができる。本講義では、このような SDR デバイスとして、Analog Devices 社が教育向けに販売している ADALM-PLUTO を採用し、デモンストレーションを行った。デモンストレーションにおける GNSS 受信機の出力結果を図 2. 2. 3. 14b に示す。実際の GNSS 衛星からの信号を受信するのと同じように、測位信号を捕捉、追尾し、測位結果を出力している。



【図 2. 2. 3. 14b : GNSS 信号シミュレータによるデモンストレーション】

### 2. 2. 3. 15 GNSS-SDR の有用性、将来 GNSS そして QZSS の計画と期待

本講義では、ソフトウェア GNSS 受信機がどのような分野での利用が期待されているか、すでに利用されているかを JAXA の担当者より説明頂いた。また国産の測位衛星である準天頂衛星への期待を合わせて説明頂いた。準天頂衛星より放送される L6 帯の補正信号を利用することで cm 級の測位が可能である。この L6 帯の補正信号を本課題であるソフトウェア GNSS 受信機や対応したフロントエンドを利用することで、デコードすることができ、さらには市販受信機の観測データとあわせて cm 級の測位が可能となる。もし FPGA の基盤等で実現できれば、通常の GNSS 受信機として利用することも可能である。特に、衛星搭載用の GNSS 受信機では、リコンフィギャラブルな受信機が求められており、ソフトウェア GNSS 受信機が期待されている。

### 2. 2. 4 参加者に対する習熟度の把握

参加者に対する習熟度を図るために、セミナーの中で 3 大学の教員で課題を課し、参加者のレポート及び PC 上での動作状況を見て判断した。2 回のセミナー開催中において、できるかぎり現場で質疑に対応できるよう配慮した。具体的には、教員 3 名だけでなく、すでにソフトウェア GNSS 受信機を研究開発で利用している博士課程及び修士課程の学生に同席してもらった。講師が前で動作させていることと同じことができない参加者もこういったセミナーではおられるため、即座に対応できるようにした。2 回の

アンテナ測定試験に際しては、教員 3 名だけでなく電子航法研究所の 2 名の専門の方がおられたため、質疑があった場合、その場で対応することができた。

さらに参加者の本プログラムへ参加前と参加後の状態での習熟度及び成長を評価するために、参加前の参加者の状況を開催前に教員らで把握し書面に残した。具体的には参加申し込み時に、大学及び企業等で実施している研究及び業務内容の記載と、なぜ本ソフトウェア GNSS 受信機のセミナーへの参加を希望するのかの理由の記載をして頂いた。以下に理由の箇所の学生 1 名と企業の方 1 名の例を示した。全参加者にこのような理由を記載頂いたことで、参加前における参加者のソフトウェア GNSS 受信機に関する予備知識について把握することができた。全体的に、実際に受信機を開発した経験のある方は少ないこともわかった。

#### セミナーへ参加希望する理由（学生の例）

「私は、ドローンを用いて地熱発電所の 3 次元地図を生成するシステムの開発をしている。ドローンには、6 つの GNSS アンテナが搭載されており、GNSS-IMU 複合により機体の位置・姿勢を高精度に求めることができる。しかしドローンでは高高度からの観測となるため、地面に近い部分はデータが取れないという問題があった。そこで、昨年度より、GNSS 受信機、IMU、LiDAR を搭載したハンディ型マッピング装置を開発している。ハンディ型装置で課題となったのが、遮蔽物等により RTK 測位における FIX 解が得られないというものであった。また、ドローンと比べて姿勢のブレが大きいのも明らかになった。そこで現在開発を検討しているのが、GNSS と SLAM の複合である。本セミナーを受けて GNSS 理解を深め、ハンディ型装置の位置・姿勢推定精度を向上させ、高精度にセンシングできるシステムを開発していきたいと考えている。」

#### セミナーへ参加希望する理由（企業の方の例）

「弊社では車載環境での GNSS 測位精度を向上させる手法の開発に取り組んでいます。RTKLIB の動作を調査したことで測位演算部の理解は進みましたが、GNSS 測位全体の仕組みを把握するためには、測位演算部だけでなく GNSS 受信機内部の動作を理解することが必要になると感じています。また、業務にて GNSS 測位精度向上のために誤差発生要因特定に取り組んでおり、受信機で観測した生データや測位演算部の動作を用いて評価していますが、それだけでは誤差発生要因を完全には特定できていません。GNSS 受信機内部の動作を把握することにより誤差発生要因を理解し、要因の特定・対策を講じることにもつながるとも考えています。今回の「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナーは GNSS 受信機内部の動作への理解を深められる貴重な機会と考えておりますので、受講を希望します。」

さらに習熟度を測る方法として、2.1.6 事前課題、課題番号②：Google フォーム：GNSS 基礎テストや、アンテナ測定試験後のレポート課題、セミナー終了後のアンケートを実施した。参加申し込み時の参加者の状況報告と比較して、参加後のアンケートの内容より、以下の事がわかった。

#### セミナー終了後のアンケート結果

セミナー終了後、受講者全員にアンケートに答えてもらった。第 1 回目のセミナーでは、アンケート用紙を 2022 年 8 月 8 日、及び 10 日に全員に配布し、その場でアンケート用紙に記入してもらった。第 2 回

目のセミナーでは、2023 年 2 月 11 日に一般社団法人測位航法学会からメールで Google フォーム上のアンケートに答えるよう依頼した。以下にアンケート結果をまとめた。5 番、6 番で記載した通り、ソフトウェア GNSS 受信機を利用して研究開発を進める参加者が何名かおられることがわかった。

### 1. GNSS に関わった経験年数

第 1 回目セミナーの受講者、及び第 2 回目セミナーの受講者の半数以上が GNSS に関わった経験年数が「1 年未満」であった。表 2. 2. 4a に内訳を示す。

【表 2. 2. 4a: GNSS に関わった経験年数】

|      | 1 年未満 | 1～3 年 | 3 年以上 | 計  |
|------|-------|-------|-------|----|
| 1 回目 | 11    | 2     | 2     | 15 |
| 2 回目 | 9     | 2     | 4     | 15 |
| 計    | 20    | 4     | 6     | 30 |

### 2. GNSS 受信機の信号処理部に携わった経験年数

第 1 回目セミナーの受講者、及び第 2 回目セミナーの受講者の大多数が、GNSS 受信機の信号処理部に携わった経験年数は「1 年未満」だった。表 2. 2. 4b に内訳を示す。

【表 2. 2. 4b: GNSS 受信機の信号処理部に携わった経験年数】

|      | 1 年未満 | 1～3 年 | 3 年以上 | 計  |
|------|-------|-------|-------|----|
| 1 回目 | 15    | 0     | 0     | 15 |
| 2 回目 | 14    | 1     | 0     | 15 |
| 計    | 29    | 1     | 0     | 30 |

### 3. GNSS-SDR の教科書等での学習の有無

第 1 回目セミナーの受講者、及び第 2 回目セミナーの受講者の半数以上が GNSS 受信機の信号処理部に携わった経験年数は「無」だった。表 2. 2. 4c に内訳を示す。

【表 2. 2. 4c: GNSS-SDR の教科書等での学習の有無】

|      | 無  | 有 | 計  |
|------|----|---|----|
| 1 回目 | 11 | 4 | 15 |
| 2 回目 | 12 | 3 | 15 |
| 計    | 23 | 7 | 30 |

### 4. GNSS-SDR プログラムの動作実績の有無

第 1 回目セミナーの受講者及び第 2 回目セミナーの受講者の半数以上が GNSS-SDR プログラムの動作実績は「無」だった。表 2. 2. 4d に内訳を示す。

【表 2. 2. 4d: GNSS-SDR の教科書等での学習の有無】

|      | 無  | 有  | 計  |
|------|----|----|----|
| 1 回目 | 9  | 6  | 15 |
| 2 回目 | 11 | 4  | 15 |
| 計    | 20 | 10 | 30 |

## 5. 今回のセミナーへ参加してみての感想

第 1 回目、及び第 2 回目の受講者からは、肯定的なコメントを多く頂いた。全てを掲載することはできないがその一部を表 2. 2. 4e に示す。

【表 2. 2. 4e: 今回のセミナーへ参加してみての感想】

| 参加者からのコメント（一部）                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GNSS 測位の原理から、受信機の仕組みまで細かく学べて、非常に充実した内容でした                                                                                                                                 |
| Simulink や Matlab を用いたハンズオン形式がとても分かりやすかった                                                                                                                                 |
| 教科書等では学べない、ソフトウェア受信機をどう実装すれば良いのかや、信号が実際にどう処理されるのかを、Matlab を用いて実装しながら、途中の信号の様子を見て処理を学ぶ事ができたのはとても分かりやすかった                                                                   |
| 実際自分の手で生の衛星のデータを扱う体験もでき、常にワクワクしながら講義を受ける事ができた                                                                                                                             |
| GNSS に関しては初心者でどこから手を付けたら良いか迷っていたが、このセミナーを受講して概略的な理解を深められ、かつ今度の学習のきっかけを掴めた                                                                                                 |
| 受信機信号処理を詳細に理解する、その前段階としてコンパクトかつ網羅的に学ぶことが可能な大変有意義な機会と感じました。個人的には Simulink を用いた講義が非常に分かり易いと感じました。GNSS 研究のトップランナーの御三方の生の講義ということもあり、活字には現れてこない考え方等の部分も一部伺えたように感じており大変満足しております |

## 6. 今後、このような場面で GNSS-SDR を利用してみたい等の希望や、既にある課題などありましたら、ご自由にお書きください。

すべてを掲載することはできないが、以下に記載頂いた内容の一部を表 2. 2. 4f に示す。

【表 2. 2. 4f: 今回のセミナーへ参加してみての感想】

| 参加者からの想定課題（一部）                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 防衛分野における GNSS/INS 複合航法の利用                                                                                                                                                            |
| 現在、私はスプーフィングについての研究を行っています。スプーフィングを再現する過程で、入手済みの擬似距離データに変更を加えることでスプーフィングを行っています。GNSS-SDR はシミュレータとしても利用できる、とのことですので、後処理的にスプーフィングを行うのでは無く GNSS-SDR を利用して、スプーフィングを再現できるようになればいいなと考えています |

マルチパス環境下での信号追尾の強化にあたって、INS による信号追尾の強化を検証するために GNSS-SDR を利用したい

近年 BOC 信号が増えてきているため、もし次回のセミナーがありましたら BOC 信号の捕捉・追尾についても講義内容に含めていただければ幸いです

### 2.2.5 面談の実施

参加者の本プログラムへ参加前と参加後の状態での成長を評価するために、セミナー参加後一定期間経過した後、衛星測位関連企業・研究機関の方と参加者が面談できる場を持ち、参加前と比較してどのように成長したか客観的に評価頂いた。面談を持つ時間を持たない企業の参加者に対しては、自己評価のアンケートを課し、参加前と比較してどのように成長したかを主観的に評価してもらった。また参加者が学生の場合、学生の指導教員より評価頂いた。今回、セミナーへ参加した 30 名全ての方の評価を実施することができた。面談を実施する中で、本課題で購入した機材や、もともと担当の教員 3 名で所持していた機材についての貸し出し等を実施した。特にソフトウェア GNSS 受信機用のデータを取得するフロントエンドについては、やや特殊な機材であることから、多くの参加者に貸出を行い、可能な範囲で技術的なアドバイスをを行った。

以下に学生の評価結果を示した。学生の面談の評価は各大学研究室の指導教員の先生に 3 月に依頼した。5 段階で 5 が大変良い、4 が良好、3 が標準的に達成、2 がやや不十分、1 が不十分とした。(表 2.2.5a) 評価点にあわせて、現在の状況を記載した。いずれの学生も 3 以上が達成できており、今後の進展(学会発表までもっていきける)が期待できる学生も少なからずおられる状況であった。

【表 2.2.5a：学生の面談評価結果】

| 事業所名／大学名     | 大学生 | 面談評価 | 参加者の状況                                                      |
|--------------|-----|------|-------------------------------------------------------------|
| 早稲田大学        | 修士  | 4    | 修士課程での研究が GNSS のマルチパス低減のため、SDR セミナーでの知見を生かせそうである            |
| 東京海洋大学       | 博士  | 5    | アンテナ測定結果でのヘリカルアンテナに関する発表と論文執筆。現在は、ポケット SDR で MADOCA-PPP の実装 |
| 大阪公立大学       | 修士  | 4    | SDR セミナーでの知見を活かして研究に取り組んでいる                                 |
| 名城大学大学院      | 修士  | 4    | 直接 SDR を研究に利用できていないが、測位演算部の改良に知見が役立っている                     |
| サレジオ工業高等専門学校 | 学部生 | 4    | 2023 年 4 月より、海洋大の研究室で GNSS の研究を開始する。SDR セミナーに関して率直な意見を頂いている |
| 千葉大学         | 修士  | 3    | 4 月より GNSS 関連の企業へ就職するため受講した。現時点での進捗はまだない模様                  |
| 大阪公立大学       | 修士  | 5    | アンテナアレイ技術を用いた耐スプーフィング技術に関する学会発表を行った(飛行機シンポジウム)              |
| 早稲田大学        | 修士  | 4    | SDR を利用した種々の案を提示頂いている。海洋大で博士課程に入る予定                         |

|        |     |   |                                                              |
|--------|-----|---|--------------------------------------------------------------|
| 東京海洋大学 | 修士  | 5 | 現在海技大学校にて、SDR を利用した Spoofer の構築を実施。GNSS-SDR の授業等での利用も検討。資料あり |
| 立命館大学  | 学部生 | 4 | SDR セミナーでの知見を活かして研究に取り組んでいる。来年からは大阪公立大の辻井先生のもとで研究を開始         |
| 東京大学   | 修士  | 5 | 博士課程はオーストラリアの大学へ進学するが、今回のアンテナ測定の知見が生かせそうである                  |
| 立命館大学  | 学部生 | 3 | まだ発表はないが、SDR セミナーでの知見を活かして研究に取り組んでいる                         |

以下に企業及び研究機関より参加頂いた方との Zoom 及びメールでの面談結果を示した。教員ら 3 名と有識者 8 名（表 2.2.5b に記載）を加えて評価を行った。面談まで実施できなかった方については、自己評価のアンケートを提出頂くことで評価を行った。評価結果を上記の学生と同様に以下の表に示した。評価点は 5 段階としており、評価点についてはすべて有識者による評価とした。面談だけでなく、実施前及び実施後のアンケート結果を見て頂くことで、実際に成長したかどうかという観点で見て頂いた。企業及び研究機関の方々も全員何等かの目的意識を持って本セミナーに参加されており、全員 3 点以上の評価となった。GNSS の研究開発において、測位演算で終わる方と、もう一歩受信機の信号処理まで必要な方がおられることがよくわかる結果であった。特にジャミング・スプーフィング関連や、市販受信機では対応できない SDR を利用した受信機開発など、大きなテーマを持っておられる方も少なからずおられた。発展的課題への期待を述べられている方もおり、この面談で終わることなく、2023 年度も引き続き本セミナーの参加者との対話を継続する。



【表 2. 2. 5b : 企業及び研究機関より参加頂いた方の面談評価結果】

| 事業所名／大学名           | 面談評価 | 参加者の状況                                                   |
|--------------------|------|----------------------------------------------------------|
| 日立製作所              | 3    | PPP や CLAS の利用を検討。SDR の利用まではまだいたっていない                    |
| 三菱重工業株式会社          | 4    | ジャミングやスプーフィングに対して、今後 GNSS 受信機の中身の知見をどのように生かしていけるか検討されている |
| 日立産機システム           | 4    | 今年度の SDR だけでなく 2023 年度のシミュレータの開発にも興味を持たれており非常に前向きである     |
| 株式会社構造計画研究所        | 5    | 実際に仕事で SDR に取り組まれている様子で、セミナー受講は大いに役立っている                 |
| 日本航空電子工業株式会社       | 4    | GNSS/IMU の統合測位を担当されており、今回の信号処理部での改良アプローチが役にたっている         |
| アルプスアルパイン株式会社      | 5    | ドップラ周波数や擬似距離の精度検証で、受信機内部の信号処理の知見が必要であり、役に立っている           |
| ボッシュ株式会社           | 4    | 受講内容が直接業務に関連。種々の問題意識もお持ちである                              |
| 株式会社快適空間 FC        | 4    | 主に GNSS の RTK に関する業務をされており、SDR の知見が今後役に立ちそうである           |
| 三菱電機<br>ソフトウェア (株) | 4    | FPGA に関連する知識の取得をする機会がなかったので、その点は役に立ちそうである                |
| 日本信号株式会社           | 3    | 自身の業務が GNSS 関連であるが、SDR との接点を見つけることは難しい印象である              |
| 宇宙技術開発株式会社         | 4    | GNSS の信号処理部を一通りマスターできた。今後準天頂衛星の新しい信号を解析する方向とのこと          |
| 沖電気工業株式会社          | 4    | 自動車メーカーへ転職される予定で、GNSS の業務に携わることから今回の SDR の知見が生きそうである     |
| 三菱電機 (株)<br>鎌倉製作所  | 5    | 今回の SDR は自身の知識を再確認する適切な場所となった。またテキストになり講義内容も役にたった        |
| 三菱電機<br>情報技術総合研究所  | 5    | GNSS のマルチパス誤差低減技術を研究されており、受信機の信号処理部分でまだ改良の余地がないか検討されている。 |
| JAXA               | 5    | FPGA を利用して GNSS 受信機を開発する工程を試したい。                         |
| JAXA               | 4    | 準天頂衛星の L6 信号を利用した PPP の小型受信機を開発をすすめていく。このセミナーの内容が役に立つはず  |
| JAXA               | 5    | スプーフィングの研究開発をしており、その基礎を学ぶ上で役にたった。今後の発展的課題への教員からの支援を期待    |
| 清水建設株式会社           | 5    | 現場で RTK を利用したモニタリングを担当されており、搬送波位相そのものの生成を SDR でやってみる予定   |

自己評価アンケートの質問内容と実際に回答頂いた企業の方の例の1つを記載した。この方はすでに予備知識をお持ちの方で、積極的にソフトウェア GNSS 受信機を利用していきたい方であった。そのためには、ソフトウェア GNSS 受信機の性能を向上させることが重要で、まさに教員側の課題であり、さらには 2023 年度の発展的課題の対象である。説明会でも事前に話したが、世の中にある優れた市販 GNSS 受信機と同じレベルのものをすぐに開発することが難しく、本課題では、取り組むきっかけとなるような工夫をしている。以下に挙げられているような課題はまさに重要で、すぐに対応できるものと時間をかけるものとで分けて、教員側で対応している。

【表 2. 2. 5c : 自己評価アンケートの質問内容と実際に回答頂いた企業の方の例】

| 質問                                                                                                                                       | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 本セミナーを受講したことで、GNSS に関して自身の知見が広がった点がありますか？                                                                                                | ①これまで信号処理の原理を”とりあえず”で頭に詰め込んでいたが、MATLAB 版 SDR のおかげで一連の処理をイメージでき視覚的に理解しやすい。その点、知見が広がったと言える。<br>②アンテナ測定とその評価方法はそれまでよく理解していなかったため知見が広がった。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 本セミナーを受講したことで、現在の仕事で役に立っている点（または今後役に立ちそうな点）はありますか？                                                                                       | 現状、GNSS 関連の業務があまり出来ておらず来年度こそは進めていきたいが、ENRI さんで 10 万円で測定出来ることを上長に話したところ耳寄りな情報だったようでぜひ JAXA 所有アレーアンテナを測定したいという話になりました。<br>測定データの評価方法も学べたので今後に生かせそうです。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 現在、GNSS に関連して具体的に取り組んでいる課題で困っている点があれば、どのような内容でもけっこうですので遠慮なく記載してください。<br>ソフトウェア GNSS 受信機をこういう風にアップデートしてください等でもかまいません。教員側で対応できることは対応いたします。 | ①もし MATLAB 版 SDR の多周波対応をしていただけると非常に有難いです。また、1 衛星信号を Acquisition した後、その信号を基準に他信号の Acq を早めるアシスト機能の実装もされれば比較したり試してみたいです。<br>②GNSS シミュレータでスプーフィング実験を行った際、実信号との同期精度が悪いのか、装置の放射までの経路による遅れが原因なのか中々騙せないことがあります。騙せても後処理すると乗っ取ったタイミングがグラフにすると顕著なので、いつ乗っ取ったか分からないくらい綺麗にスプーフィングさせたいところです。（現在は大阪公立大辻井先生に貸出中でしばらく確認できません）<br>③各メーカーのノウハウによるもので当たり前かもしれませんが、市販受信機は安価なものでも FE+SDR と比べれば高性能で、いくら SDR をこちらでカスタマイズしても市販受信機の感度やマルチパス対策と比較にならない。今後、SDR をより市販受信機のパフォーマンスに近づけられれば有難いです。<br>③課題という訳ではないですが、MATLAB 版 SDR のリアルタイム処理が未だうまくいかずセミナー時は個体の問題かな？とも思っていました。Amazon で RTL-SDR 別個体買って試してもダメでした。一度は成功させたいと思い色々見なおしているところです。 |

## 2.3 コンテストの紹介

本セミナーで学んだことを実践する場として、コンテストを2023年度に実施する予定である。目的は、本セミナーで学んだことが実践力として身につけているか確認することと、ソフトウェア GNSS 受信機を利用した開発に適しているテーマに取り組むことである。幅広く人材を発掘するために、本セミナーの参加者以外の方の参加も可能とする。セミナーで利用した教材やデータはすでに公開済みであり、ソフトウェア GNSS 受信機もセミナー参加者以外の希望者には配布している。

コンテストの内容について教員で3回打ち合わせをし、千葉工業大学鈴木先生を中心に内容をおおよそ決定し、その内容を第1回・第2回セミナー参加者へメールとホームページ上 (<https://gnss-learning.org/contest/>) で告知した。コンテスト用のデータ公開は2023年度の6月頃までに行う予定であり、測位航法学会等を通じて、幅広い参加者を募る予定である。

ソフトウェア GNSS 受信機を利用したコンテストの現時点での内容を以下に示す。

1. 静止体の GPS だけでないマルチ GNSS またはマルチ周波数の IF データを公開し、信号追尾までできたかを競うもの
  2. 静止体及び移動体の IF データを公開し、測位精度を競うもの
  3. ジャミング・スプーフィングに関する課題を競うもの
- 上記3つの課題から少なくとも1つを選択し取り組む。

## 2.4 高周波アンテナ測定試験の実習

GNSS 受信機を含め、無線機のアンテナは電波の入口となる重要なデバイスである。特に近年では、多システム・多周波数対応の安価な GNSS 受信機が販売されるようになり、そのための低価格帯のアンテナも同じように多周波数対応となってきた。

このような GNSS アンテナのゲインパターンには、同時に複数の GNSS 衛星からの信号を受信するために天頂方向にブロードである一方、地平線に付近ではマルチパスを抑制するために急激にアンテナゲインを下げるなど、特殊な要求がある。また、GNSS 信号は右旋円偏波で送信されているため、アンテナ側も右旋円偏波であることが求められる。このような円偏波の特性を表すパラメータとして、軸比が用いられている。

しかし、これら低価格帯 GNSS アンテナのカatalogなどでは、対応する信号の周波数帯が表示されていることはあっても、これらゲインパターンの詳細や軸比が示されていることは稀である。

そこで、本実習では、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所（〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7丁目42番23号）の電波無響室において、多周波数対応となった低価格帯 GNSS アンテナのゲインパターンと軸比の計測試験を実施した。この実習により、高周波アンテナの測定試験方法を学ぶと共に、低価格帯 GNSS アンテナの性能評価を行った。本実習は、2022年8月と2023年2月に2回開催している。

また、表 2.4a に高周波アンテナ測定試験の実習の開催日を示す。

【表 2. 4a: 高周波アンテナ測定試験の実習の開催日】

| 日付           | 内容                   | 開催場所            |
|--------------|----------------------|-----------------|
| 2022年 8月 26日 | 第1回目「高周波アンテナ測定試験の実習」 | 電子航法研究所<br>電波暗室 |
| 2023年 2月 7日  | 第2回目「高周波アンテナ測定試験の実習」 | 電子航法研究所<br>電波暗室 |

各実習には、選考の結果受講が決まった合計 29 名に参加してもらった。表 2. 4b に第 1 回目「高周波アンテナ測定試験の実習」受講者の内訳を示す。表 2. 4c に第 2 回目「高周波アンテナ測定試験の実習」受講者の内訳を示す。尚、遠方から参加する学生に関しては旅費を支給した。また、参加者への通知や教材についての回答は、一般社団法人測位航法学会が中心となって実施した。

【表 2. 4b: 第 1 回目「高周波アンテナ測定試験の実習」受講者の内訳】

| 事業所名／大学名       | 所属部署名／学部又は学科名              |
|----------------|----------------------------|
| 早稲田大学          | 基幹理工学研究科 機械科学・航空宇宙専攻       |
| 東京海洋大学         | 応用環境システム学                  |
| 名城大学大学院 ※      | 理工学研究科メカトロニクス工学専攻          |
| サレジオ工業高等専門学校   | 専攻科                        |
| 千葉大学           | 融合理工学府                     |
| アルプスアルパイン株式会社  | AD プロジェクト                  |
| ボッシュ株式会社 横浜事務所 | クロスドメインコンピューティングソリューション事業部 |
| 株式会社快適空間 FC    | 技術開発グループ                   |
| 株式会社構造計画研究所    | 通信工学部                      |
| 三菱重工業株式会社      | ICT ソリューション本部              |
| 日本航空電子工業株式会社   | 商品開発センター                   |
| 日立産機システム       | 研究開発本部                     |
| 日立製作所          | 研究開発グループ                   |

【表 2. 4c: 第 2 回目「高周波アンテナ測定試験の実習」受講者の内訳】

| 事業所名／大学名 | 所属部署名／学部又は学科名          |
|----------|------------------------|
| 立命館大学 ※  | 理工学部電気電子工学科            |
| 立命館大学 ※  | 理工学部電気電子工学科            |
| 東京海洋大学 ※ | 海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻   |
| 早稲田大学    | 大学院法学研究科               |
| 大阪公立大学 ※ | 工学研究科                  |
| 大阪公立大学 ※ | 工学研究科航空宇宙海洋系専攻航空宇宙工学分野 |

|                |                            |
|----------------|----------------------------|
| 清水建設株式会社       | フロンティア開発室 宇宙開発部            |
| 宇宙技術開発株式会社     | 宇宙システム技術部 先端技術開発グループ       |
| JAXA           | 航空技術部門航空安全イノベーションハブ        |
| 沖電気工業株式会社      | イノベーション推進センター センシング技術研究開発部 |
| JAXA           | 第一宇宙技術部門 衛星測位システム技術ユニット    |
| JAXA           | 第一宇宙技術部門 衛星測位システム技術ユニット    |
| 三菱電機 情報技術総合研究所 | スマートセンシング技術部               |
| 三菱電機 (株) 鎌倉製作所 | 防衛技術部 技術第六課                |
| 三菱電機ソフトウェア (株) | 電子システム事業統括部 鎌倉事業所 第二技術部第三課 |
| 日本信号株式会社       | 自動運転システム部                  |

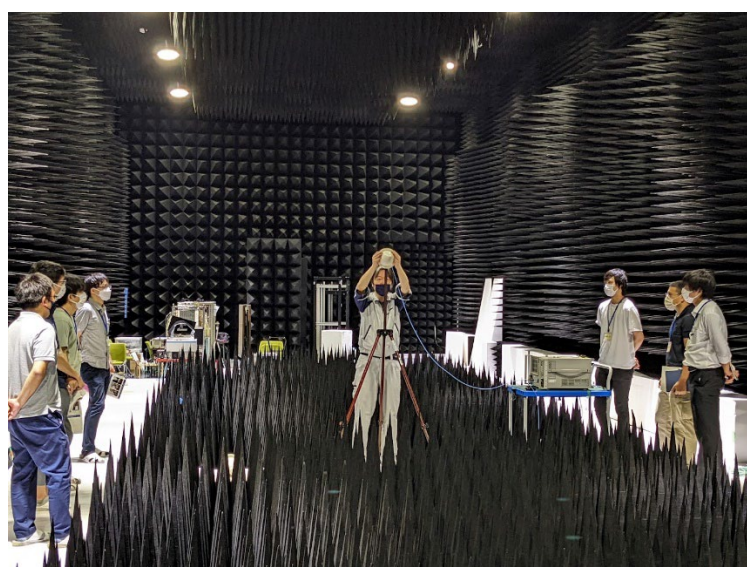
#### 2.4.1 高周波アンテナ測定試験の内容と課題 (2022 年 8 月)

第 1 回目の GNSS アンテナ測定試験には、2022 年 8 月のセミナーに参加したメンバーを中心に、13 名の参加があった。このメンバーを 2 つのチームに分け、それぞれ異なる GNSS アンテナのゲインパターンと軸比の計測を実施した。ここで計測を行った GNSS アンテナの概要を表 2.4.1a にまとめる。第 1 回目の測定対象として、多くの GNSS 衛星から放送されている L1 帯と L5 帯に対応した GNSS アンテナを選定している。

【表 2.4.1a : GNSS アンテナの概要】

| 番号 | メーカー    | 型番          | サイズ                                     |
|----|---------|-------------|-----------------------------------------|
| 1  | TOPGNSS | TOP508      | $\phi 27.5\text{mm} \times 58\text{mm}$ |
| 2  | NovAtel | GPS-703-GGG | $\phi 185\text{mm} \times 69\text{mm}$  |

図 2.4.1a に計測用の送信アンテナを設置している様子を示す。



【図 2.4.1a : 計測用送信アンテナの設置作業】

計測対象のアンテナをターンテーブルに設置すると、アンテナの仰角や方位角に応じた受信電力の計測が自動的に行われ、エクセルファイルの表として出力される。測定中の様子を図 2. 4. 1b に示す。



【図 2. 4. 1b : GNSS アンテナ測定実験】

参加メンバーには、本実習の課題として、この計測結果からアンテナのゲインパターンの描画と軸比の計算を行ってもらった。

#### 2. 4. 2 高周波アンテナ測定試験の内容と課題（2023 年 2 月）

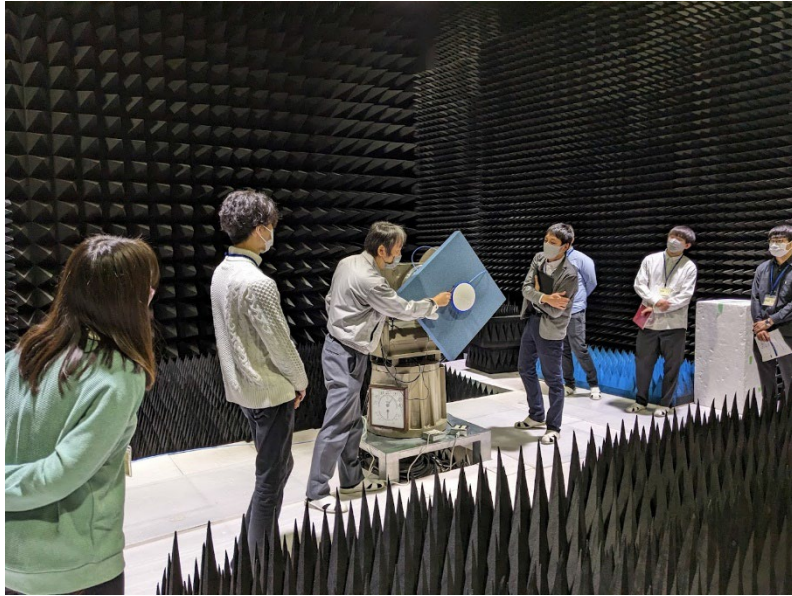
第 2 回目の GNSS アンテナ測定試験には、2023 年 2 月のセミナーに参加したメンバーを中心に、16 名の参加があった。このメンバーを 2 つのチームに分け、第 1 回目と同様に、2 種類の GNSS アンテナのゲインパターンと軸比の計測を実施した。ここで計測を行った GNSS アンテナの概要を表 2. 4. 2 にまとめる。第 2 回目の測定対象として、準天頂衛星から PPP 測位のための補正データを放送している L6 帯に対応した GNSS アンテナを選定している。

【表 2. 4. 2 : GNSS アンテナの概要】

| 番号 | メーカー    | 型番     | サイズ                                                  |
|----|---------|--------|------------------------------------------------------|
| 3  | Beitian | BT-200 | $\phi 200\text{mm} \times 68\text{mm}$               |
| 4  | Beitian | BT-345 | $100\text{mm} \times 68\text{mm} \times 24\text{mm}$ |

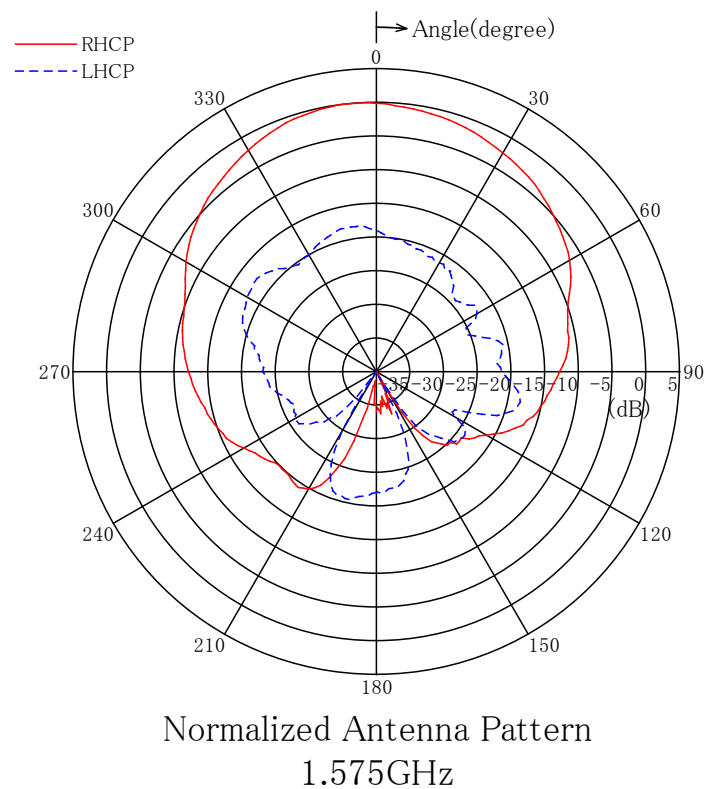
図 2. 4. 2a に計測対象の GNSS アンテナをターンテーブルに設置している様子を示す。





【図 2. 4. 2a : 計測対象 GNSS アンテナの設置作業】

第 1 回目と同様に、参加メンバーには、本実習の課題として、この計測結果からアンテナのゲインパターンの描画と軸比の計算を行ってもらった。アンテナ番号 3 番のゲインパターンの描画例を図 2. 4. 2b に示す。この GNSS アンテナは、精密測位向けのアンテナであり、天頂方向にはブロード、水平線近辺では低い典型的なゲインパターンを示している。



【図 2. 4. 2b : アンテナゲインパターンの実測例】



### 2.4.3 高周波アンテナ測定試験の実習後のアンケート結果

高周波アンテナ測定試験の実習終了後、受講者全員にアンケートに答えてもらった。第1回目の実習では、アンケート用紙を2022年8月26日に全員に配布し、その場でアンケート用紙に記入してもらった。第2回目のセミナーでは、2023年2月7日に一般社団法人測位航法学会からメールでGoogle Form上のアンケートに答えるよう依頼した。以下アンケート結果をまとめた。

【表 2.4.3：高周波アンテナ測定試験の実習後のアンケート結果】

| 質問                               | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実際に参加してみ<br>ての全体的な感想             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貴重な機会をいただきありがとうございました。実際の測定に立ち会ったことがなかったため、軸比の測定方法など大変勉強になりました。また、アンテナの底面方向から入射に対する利得が思ったよりも高く見えたため、今後実験データ処理を行う際には考慮の必要があるかもしれない、という気づきもありました。</li> <li>・ アンテナの利得等の性能試験の仕組みは、通常のGNSSの学びでは触れることの少ない部分だと思います。そういった部分を実際の測位を通して学べたことが非常に有意義でした。</li> <li>・ アンテナ特性の評価が、いかに大事かや、実際に自分の目で結果を見ると、衛星測位を行うに辺り注意点などが見えてきた。また、コンシューマ向けのアンテナを使用することも増えてきたため、実際に自身で試験などを行いたいと考えた。</li> </ul> |
| 今回のアンテナ測定及び説明で分かりにくかった点や質問したい点など | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軸比、利得の測定例における計算方法（dbを真値に変換する）</li> <li>・ 円偏波の回転方向について</li> <li>・ 受講生にアンテナ特性の大切さを伝えるため、アンテナパターンが測位性能にどのように影響するのか、もう少し説明があった方が良かったと感じました。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                               |
| 現時点でGNSS-SDRの利用で困った点など           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現在INSとの相互補完に向けて準備を進めているところです</li> <li>・ まずRTL-SDRを使って色々チャレンジしてみたい</li> <li>・ GNSS-SDRの利用方法がネットで体系的にまとまったものはありますか？</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                     |

## 3 まとめ

2022年度は、本課題の根幹であるGNSS-SDRのセミナーを2回対面で実施し、アンテナ測定も2回対面で予定通り実施することができた。参加者のうち大部分の方々は、確かな目的意識をもって受講されている方であった。アンケートや面談の結果、受信機の内部処理に初心者の方が半分以上であったが、各自の研究や仕事に生かせる内容であることがわかった。実際に、発展的課題へつながる参加者が少なからず存在し、すでに3名の学生は2022年度に学会発表を行った。2023年度に向けて、さらに発展的課題への取り組みと学会発表できる参加者を継続して支援していく予定である。

## 4 添付資料

### 4.1 学会等発表実績

#### 学会等発表実績

委託業務題目「新しいフェーズに入った衛星測位技術を加速させる人材育成/宇宙航空人材育成プログラム」

機関名 国立大学法人東京海洋大学

#### 1. 学会等における口頭・ポスター発表

| 発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）                       | 発表者氏名                 | 発表した場所（学会等名）    | 発表した時期           | 国内・外の別 |
|------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|--------|
| MATLAB/Simulink による教育用ソフトウェア GNSS 受信機のモデルベース開発 | 鈴木太郎                  | 測位航法学会総合大会      | 2021 年 6 月 25 日  | 国内     |
| 新しいフェーズに入った衛星測位技術を加速させる人材育成                    | 久保信明                  | 測位航法学会シンポジウム    | 2021 年 10 月 29 日 | 国内     |
| GNSS アレーアンテナを用いた不要波の方向推定及び抑制に関する研究             | 米山まうむ<br>(大阪公立大学大学) 他 | 第 60 回飛行機シンポジウム | 2022 年 10 月 12 日 | 国内     |
| 再放射キットを Spoofer と想定した場合の検知方法について               | 長岡賢吾<br>(東京海洋大学)      | 測位航法学会シンポジウム    | 2022 年 10 月 21 日 | 国内     |
| ヘリカルアンテナのアンテナパターンと性能評価                         | 尾関友啓(東京海洋大学)          | 測位航法学会シンポジウム    | 2022 年 10 月 21 日 | 国内     |

#### 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし