

# 「GNSS反射信号を用いた全地球常時観測が拓く新しい宇宙海洋科学」の成果について

研究開発体制  
 主管研究機関  
 研究代表者名  
 共同研究機関

九州大学  
 准教授 市川 香  
 和歌山大学、(株)IHI、名古屋大学

研究開発期間

平成26年度～  
 平成28年度  
 (3年間)

研究開発規模

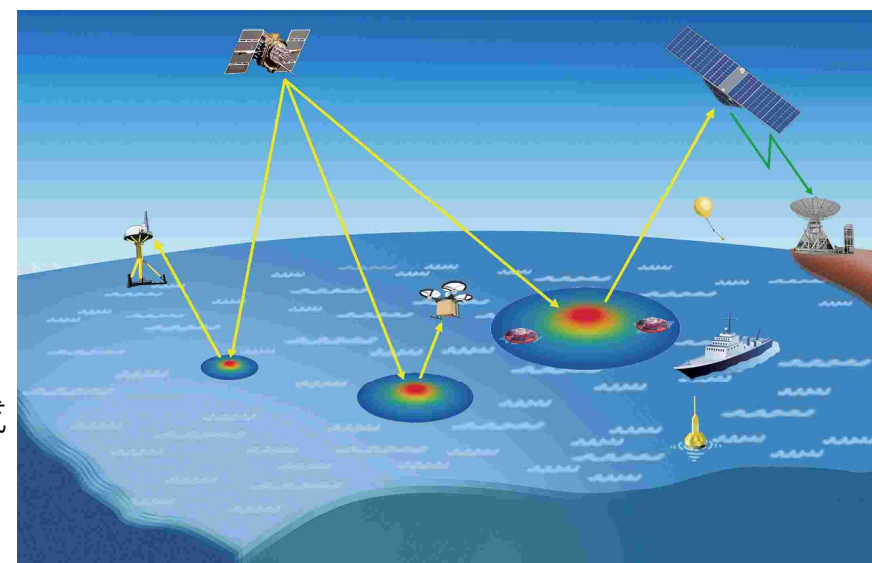
予算総額 (契約額) 100百万円		
1年目	2年目	3年目
34.3百万円	34.4百万円	31.5百万円

## 研究開発の背景・全体目標

- 人工衛星による海上気象・海象観測は、船舶・浮体による理解を劇的に改善してきた
  - ✓ しかし、高額な費用のために衛星個数に限界
  - ✓ 短時間で変化する現象の観測的理解が欠落
- 小型衛星群に搭載可能なGNSS-R手法で、「全地球常時観測」という視点の獲得を目指す

## 研究開発の全体概要と期待される効果

- ①宇宙航空工学と海洋科学との分野融合機会の創出とコミュニティの育成  
 共同観測・シンポジウム開催
- ②GNSS-R解析手法および有効な気象・海象データ抽出法の開発  
 観測塔やマルチコプターの現場観測より、体系的な知見
- ③GNSS-Rデータ利用環境の整備とデータベースの構築  
 NASAのCYGNSS衛星地上受信局，検証用観測機器開発



GNSS反射波観測のイメージ

今後は、CYGNSS衛星による全地球常時観測データの実利用検証と、新規のセンサーや観測システムの開発へ

## 「国民との科学・技術対話」の推進に関する取組について

- 一般向け サマーセミナー「海と宙の間から ～小型無人飛翔体で海を観・診・視る～」の開催 (福岡, 平成27年9月)
- 一般向け 福岡工業大学先端計測技術センター講演会で講演「海面高度計の resolution と coverage」 (福岡, 平成28年3月)
- 一般向け 九州大学(総合理工学研究院)公開講座で講演「宙から見る海洋 ―リモートセンシングによる海洋観測―」 (春日, 平成28年8月)
- 高校生向け 平成28年度長崎県サイエンスキャンプにて講演「海はどのように流れるか」 (長崎, 平成28年12月)
- 「小型飛翔体による海洋観測」に向けた公開フライトトレーニング講習会 (東京, 福岡, 柏, 名古屋) の開催
- GROWTH Projectホームページ(<http://gnss-r.official.jp/>)開設による情報発信とデータベース公開

# ① 「宇宙航空工学と海洋科学との分野融合機会の創出とコミュニティの育成」

## 実施内容及び主な研究開発成果

### ➤ シンポジウム等の主催

- サマーセミナー「海と宙の間から ～小型無人飛翔体で海を観・診・視る～」の開催（福岡, 平成27年9月）  
主催) 九州大学応用力学研究所  
共催) 九州工業大学超小型衛星試験センター  
後援) 内閣府宇宙戦略室・経済産業省九州経済産業局・日本海洋学会・日本航空宇宙学会・日本航空宇宙工業会, 日本リモートセンシング学会
- 日本海洋学会ナイトセッション「海洋学は小型衛星をどう使う？」（松山, 平成27年9月）
- 名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用研究集会「小型飛翔体による海洋観測 ―データの即時性はどこまで保証できるか―」（名古屋, 平成28年8月）  
✓ 「小型飛翔体による海象観測(その2)」を平成29年7月に開催予定

### ◆ のべ200名を超える全国規模のコミュニティへ

### ➤ フライトトレーニング講習会の実施

- 全国で4回開催（東京・福岡・柏・名古屋）  
■ 大学・国公立研究機関・民間コンサルタントなどから参加

### ◆ 小型飛翔体による海洋観測の実装化に向けて進展



サマーセミナーのパネル会議風景



フライトトレーニング講習会

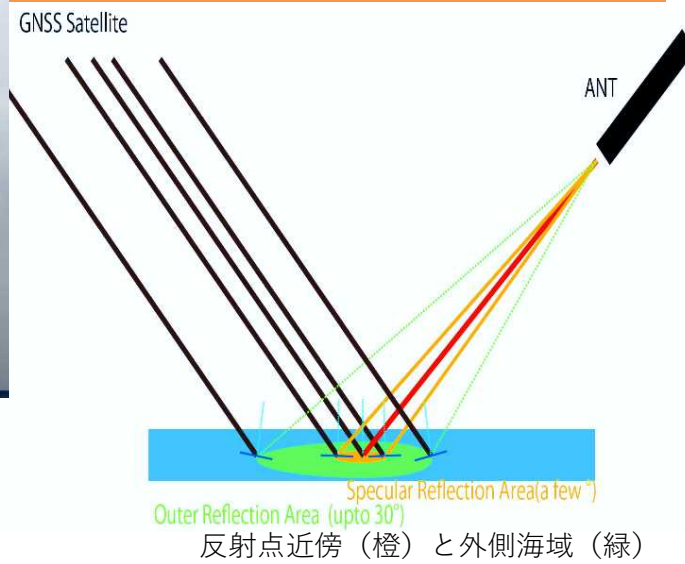
# ② 「GNSS-R解析手法および有効な気象・海象データの抽出法の開発」：海上風速

## 実施内容及び主な研究開発成果

- GNSS-R現場観測
  - ◆ GNSS-R長期時系列観測
    - 20m観測塔（平塚，白浜）
    - 7m大型浮体（琵琶湖）
  - ◆ マルチコプターによる観測
    - 150m高度まで



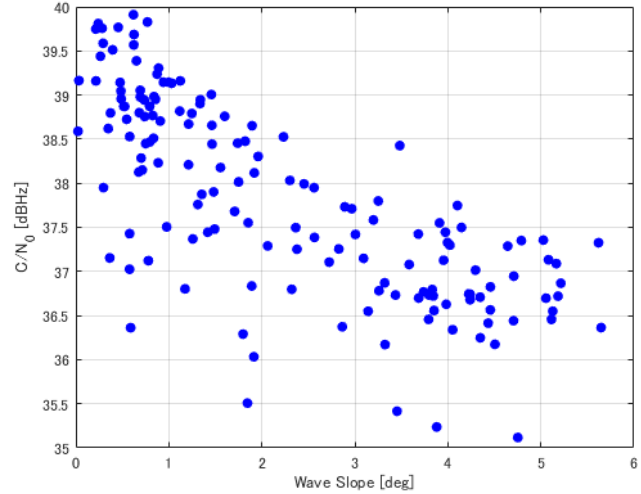
観測風景



- 風が強くて波浪が成長すると，ある瞬間の海面勾配が大きくなる確率が増加し，相対的に平坦になる確率は減る
- 反射点の周辺では，勾配が小さいほど反射波がアンテナに到達できる

- ◆ 波形勾配とGNSS反射強度は，反比例関係にある
  - 「周辺」とは，風が弱くても常に存在する0(1)m以下の波浪スケール
  - または，その波浪の波形勾配に対応したアンテナ視野角（数°）

- 反射点から離れた海域では，勾配が大きくなると反射波がアンテナに到達できない
  - ◆ このため，波形勾配が大きい方が反射強度が増加する
    - 海況に応じて，視野角30°程度まで広がる



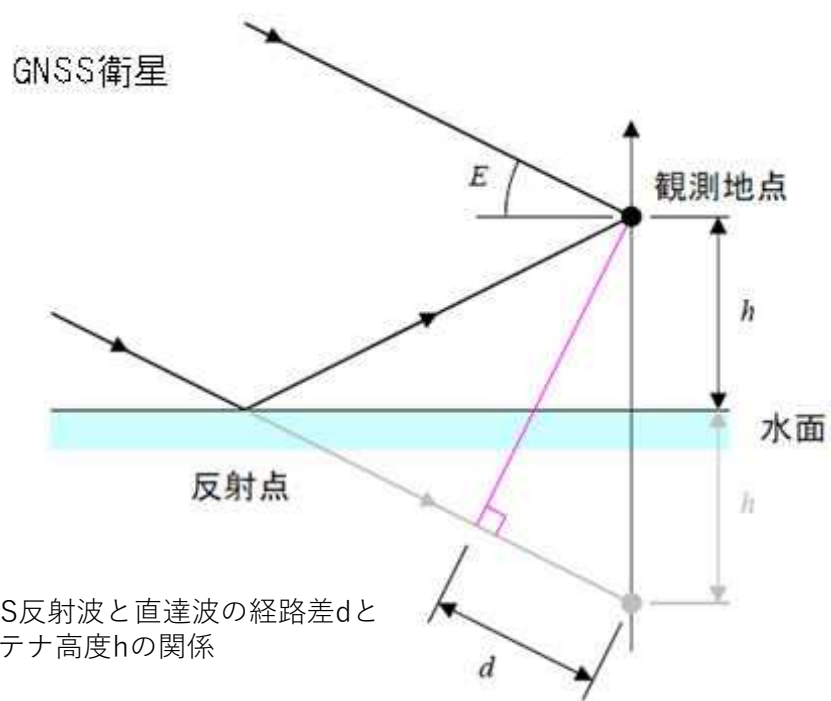
琵琶湖でのGNSS反射波強度(縦軸)と波形勾配(横軸)

- 風速と反射強度との対応関係を知るには，反射点周辺海域と外側海域との分離をするのが大切
  - アンテナの高度を低くする
  - 大きなアンテナを用いて分解能を高くする
  - 移動体に取り付けて合成開口アンテナとする

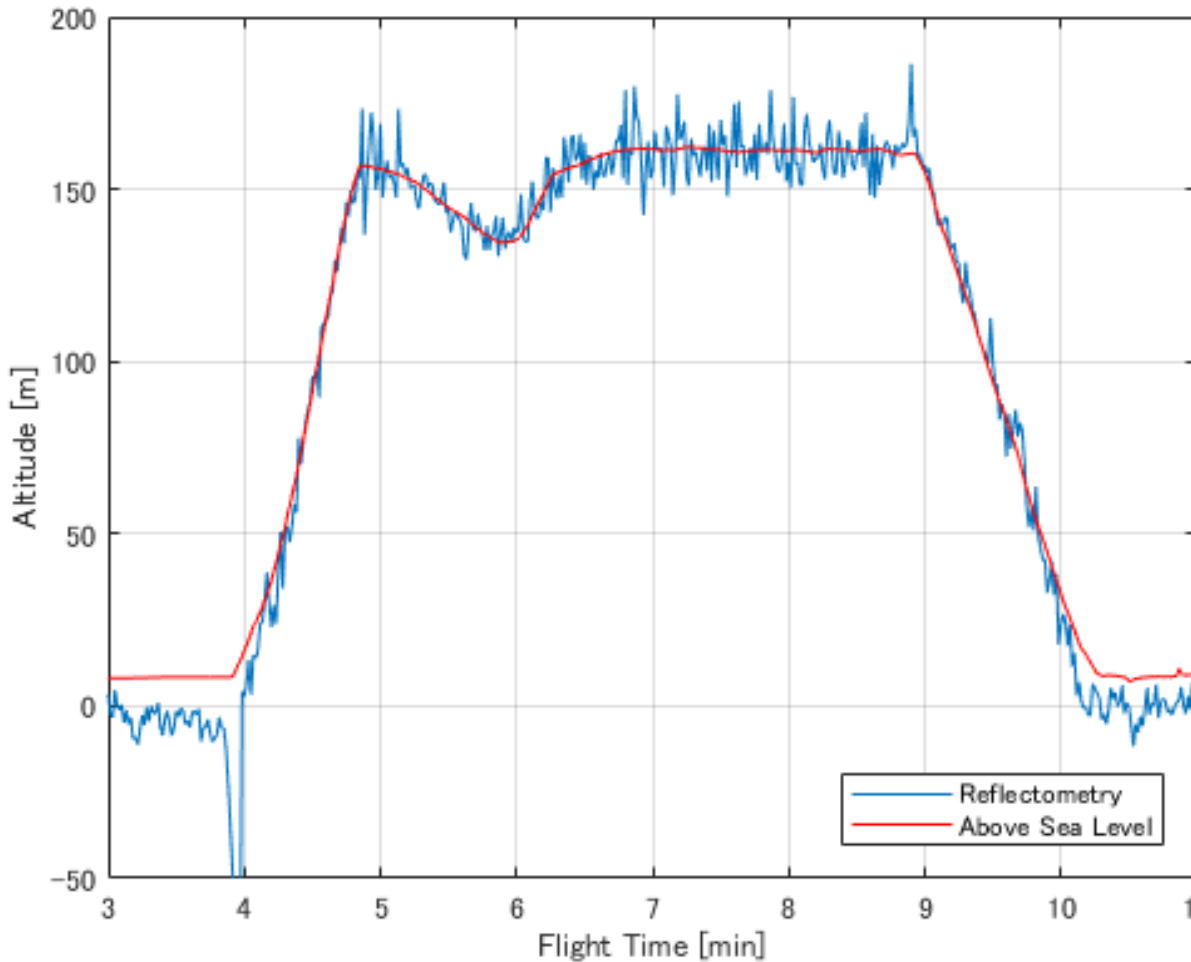
# ② 「GNSS-R解析手法および有効な気象・海象データの抽出法の開発」：海面高度

## 実施内容及び主な研究開発成果

- GNSS信号の反射波と直達波と経路差 $d$ から高度 $h$ を計測
  - ◆ マルチコプター高度なら，通常測位と同程度の精度で実現可能
- 短周期のO(10)mの高度変動
  - ◆ 反射点が波面勾配によって移動するため
    - 逆に，波浪周期が取得できる可能性あり



GNSS反射波と直達波の経路差 $d$ とアンテナ高度 $h$ の関係



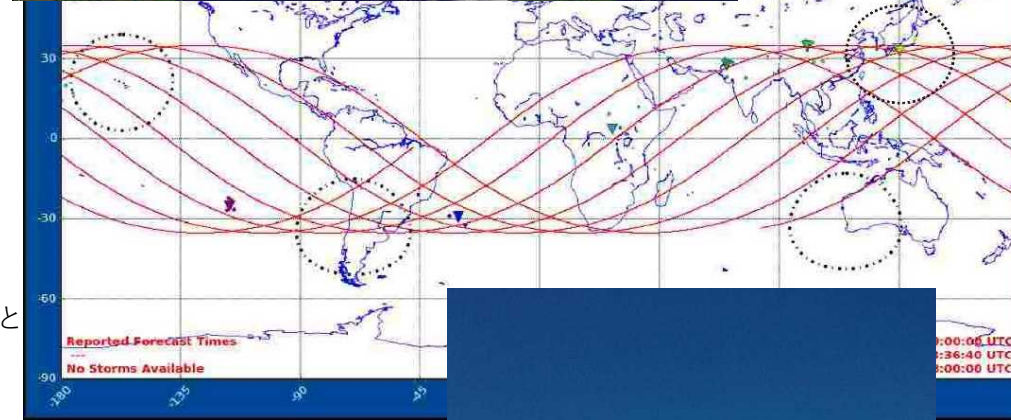
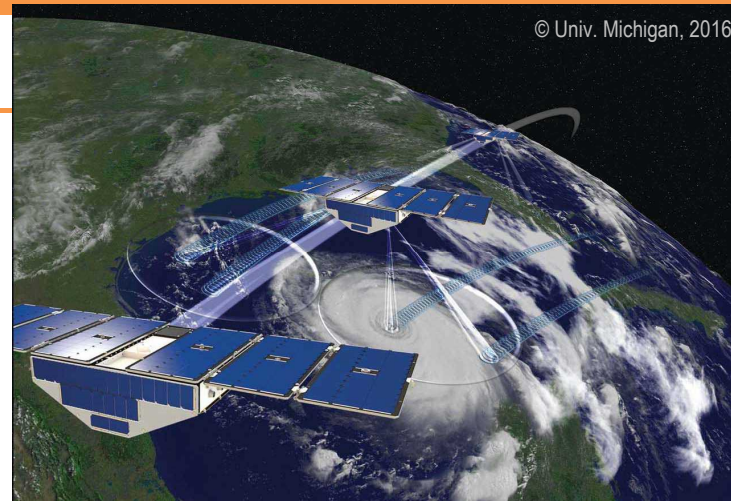
銀河丸から離発着させたマルチコプターの高度変化  
GNSS-R (青) と通常測位 (赤)

### ③ 「GNSS-Rデータ利用環境の整備とデータベースの構築」

#### 実施内容及び主な研究開発成果

#### ➤ CYGNSS受信局整備

- ◆ NASAのCYGNSSサイエンスチームに参加
- ◆ 和歌山大の12mアンテナを増設改修
- ◆ CYGNSSの生データの受信が可能に



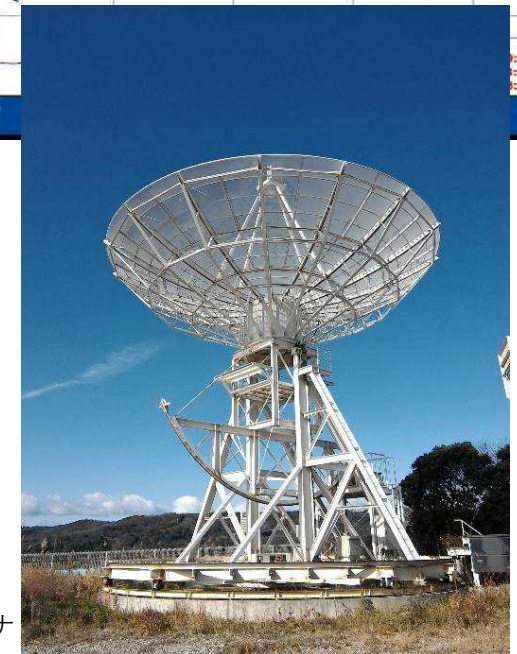
CYGNSS小型衛星群のイメージと軌道パターン

#### ➤ ホームページ・データサーバの作成

- ◆ <http://gnss-r.official.jp/>
  - GNSS-R時系列データと検証用データ
  - マルチコプターのGNSS-R観測

5

和歌山大の12mアンテナ



# その他の研究開発成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会出展
	国内：0 国際：0	国内：2 国際：1	国内：15 国際：10	国内：0 国際：0	国内：2 国際：0	国内：0 国際：0
受賞・表彰リスト						

## 成果展開の状況について

- GNSS-Rを用いた新しい宇宙海洋科学の普及
  - ◆ シンポジウムなどを通じた異分野交流コミュニティの育成
  - ◆ ホームページ開設とデータベース公開
  - ◆ CYGNSSミッションのNHKスペシャル（平成29年9月）での紹介予定など  
プレス報道
- 民間企業での実利用化・産業化
  - 新規センサー開発や海象システムの民間事業化など

## 今後の研究開発計画

- 最低2年間は運用されるCYGNSSの全地球常時観測データの解析
  - ◆ 気象庁や大学などとの共同研究を準備中
    - 台風や爆弾低気圧の予報へのインパクト評価
    - 有義波高の観測と波浪予報向上へのインパクト
    - 大気海洋相互作用による日内風速変動の観測
    - 津波や潮汐などの深海波の位相伝搬観測
    - 雷放電と台風の関連性観測
- 分野融合コミュニティの育成・維持
  - 共同利用研究集会の毎年開催



わかやま新報2017年5月12日付掲載

# 事後評価票

平成29年3月末現在

1. 課題名 GNSS 反射信号を用いた全地球常時観測が拓く新しい宇宙海洋科学
2. 主管実施機関・研究代表者 九州大学・市川 香
3. 再委託機関 和歌山大学、(株)IHI、名古屋大学
4. 事業期間 平成26年度～平成28年度
5. 総事業費 100百万円
6. 課題の実施結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 本課題では、①「宇宙航空工学と海洋科学との分野融合機会の創出とコミュニティの育成」、②「GNSS 反射信号 (GNSS-R) 解析手法および有効な気象・海象データの抽出技術の開発」、③「GNSS-R データ利用環境の整備およびデータベースの構築」の3項目の実施目標を掲げていた。 ①は、一般向けのサマーセミナーと学会のナイトセッションを開催することで分野融合機会を創出した。さらに、「小型飛翔体による海洋観測」として、名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同利用研究集会が毎年シリーズ化され、のべ220名程度が参加する全国規模のコミュニティが形成されつつある。また、海洋関係者へのマルチコプターのフライトトレーニングも全国4カ所（東京・福岡・柏・名古屋）で実施し、大学、コンサルタント会社、現業官庁、国公立研究機関などからの参加者があった。 ②は、GNSS-R 手法による海上風・波浪・海面高度の観測特性（精度や受信高度依存性など）を把握して、観測塔・航空機から衛星まで多様な観測プラットフォームによる GNSS-R の気象・海象観測手法を確立させることを目指した。観測塔での長期時系列観測とマルチコプター観測、さらに小型衛星 TDS-1 データの解析により、反射点近傍の信号を抽出すると精度の良い観測が可能なが確認された。さらに、低高度の受信信号には波浪の影響が強く含まれることや、アンテナの分解能が低く反射点近傍が抽出できないと精度が低下することも確認され、多様なプラットフォームで GNSS-R 観測・データ処理を行うための体系的な指針を形成することができた。 ③は、超小型衛星群による世界初の GNSS-R 観測である NASA の CYGNSS の生データを含む多様な観測プラットフォームにおける GNSS-R 観測と検証用データベースを作成し、GNSS-R 利用環境を整備することを目指した。CYGNSS 衛星群については、小型衛星からの直接データ受信環境の整備は完了したものの、NASA の衛星打上げが遅延したため、年度内にデータベースを構築するには至らなかった。観測塔やマル

チコプターのデータは、予定通り公開した。

#### 「必要性」

これまでの GNSS-R 手法は、宇宙航空工学分野の研究として計画的な計測実験により、気象海象現象との経験則がまとめられてきた。しかし、対象変量以外の物理量変化を抑制する「工学的な実験」で求められた経験式は汎用性が乏しく、異なる条件下での挙動への応用展開が不明であった。本課題では、広いレンジで多種の変量に変化する様子を記録して各種変量の変動特性を捉えようとする「理学的な観測」としてアプローチすることで、海面の波形勾配を軸とした体系だった解釈を行うことができた。例えば観測塔のような固定アンテナから GNSS-R で風速を計測する場合、反射点近傍の信号のみを抽出するためにアンテナ設置高度を低くするかアンテナの開口長を大きくするのが適切であること、成長初期の風波に特徴的な数 m の波長や 1-2 度の波形勾配に合致するようなアンテナ高度・視野角を目安とすること、波浪の影響を強く受けるので波浪周期以上の時間平均が必要なこと、などの体系的な指針が立てられる。この知見は、新規の観測システム開発や産業展開において、受信機的设计やアンテナの配置の指標作成として特に有用である。

海洋科学の研究者が、宇宙航空工学的な「小型飛翔体」を意識した異分野連携のコミュニティ作りに取り込むことで、新しい融合領域の開発に取り組んだ。業務期間中に急遽行われた無人航空機への航空法の改正に伴い、航空を専門としない海洋研究者にとって小型飛翔体の利用を躊躇する傾向があったが、正しい手続き方法や操縦方法を学ぶ機会を創出することで、分野間融合の機会を確保することができた。新規性の強い技能講習という側面があることから、特に若手の研究者・業務担当者の参加が多く、将来的な発展が期待できる。

#### 「有効性」

比較的安価で軽量かつ省電力な GNSS 受信機のみで構成できる GNSS-R 観測は、観測の実施者やプラットフォームに対する制約が少なく、様々な場面で様々な事業者によって気象・海象の観測が可能である。適切に処理すれば精度の良い観測が可能であることが確認できたので、今後は民間事業を含む多くの観測展開が望めるだろう。ただし、GNSS-R の観測特性を理解せずにデータ取得・処理すると有意なデータが得られないことも判明したので、本課題で得られた知見を活用することは特に有用である。

超小型衛星群による全地球常時観測が世界で初めて実現された NASA の CYGNSS データの利用環境を整備したことは、今後の社会的実装への波及効果が大きい。例えば、台風や“爆弾低気圧”の予報精度の向上などに活用できると期待できる。特に、NASA の CYGNSS サイエンスチームに加入していることで詳細観測の要求をしたり、観測からデータ受信までの時間遅れを軽減したりすることが可能となっている。

予算的な制約が少ないプラットフォームである小型飛翔体の活用は、計画から実現まで長期間を要する宇宙機関による大型衛星の打ち上げと異なり、大学や企業の予算規模で独自性のある海洋観測システムの実装が可能となる。宇宙航空工学分野にとっても、新たなニーズを認識することで、社会実装に有効なプラットフォーム開発に向けた取り組みが可能である。実際、シンポジウム等の開催によって創出された日本全国に広がるコミュニティを通して、大学間や民間企業との新たな観測計画や産業化が直接的・間接的に生まれはじめている。



## 「効率性」

微弱な超小型 CYGNSS 衛星の信号を地上局で受信するためには大型のアンテナが必要となるが、和歌山大が所有している既存の 12m アンテナを X バンドと S バンド共用に改修することで CYGNSS のデータ受信に利用可能とした。既存設備を活用するこの計画は、製作コスト・製作期間の両面ともに効率性を高めた。

GNSS 信号の受信機や検証用の海面高度計測浮体は、基本的に市販品を利用して九州大学応用力学研究所の技術室で治具を自作しながら開発することで、開発費用を大幅に抑えた。また、当初は業者に委託していた大型マルチコプターのメンテナンスも、九州大学の技術職員が業者研修を受けたことで自己管理が可能となり、長期的な運用費用を軽減化した。さらに、センサー自身の小型軽量化を図り、比較的安価な小型～中型のマルチコプターで実施できるようにしたことで経費が軽減された。

## (2) 成果

### 「アウトプット」

観測塔での GNSS-R と気象海象の時系列データベース、およびマルチコプターによる GNSS-R 観測のデータベースを得た。これらはホームページにて一般に公開されており、所期の目標通りである。和歌山大学で受信した CYGNSS 衛星からの生データも得られたが、これは NASA 側の要請があって CYGNSS のサイエンスチーム向けに限定して公開した。所期目標としては CYGNSS 衛星のデータも一般向けのデータとして公開する予定であったが、CYGNSS 衛星の打ち上げが 2 ヶ月以上遅延したために、業務実施期間内には一般向けに公開できるデータが CYGNSS 衛星で観測されなかった。

外部向けの発表は、論文発表 3 編、学会等での発表が 25 件であった。これらの数は多くはないが、観測用機器の開発から始めたので、限られた業務期間を考えれば目標を下回るものではない。

### 「アウトカム」 (平成 29 年 6 月末時点)

CYGNSS ミッションによる全地球常時観測は、新規性が高く社会的なインパクトも大きいため、一般向けのプレス報道が続いている。和歌山大学での CYGNSS 衛星の受信に関する新聞報道 (平成 29 年 5 月) のほか、9 月に放映予定のメガクライシスに関する特別番組 (NHK スペシャル) で CYGNSS ミッションを紹介するために NHK からの取材 (平成 29 年 6 月) が行われている。

また、琵琶湖の波浪場に関する問い合わせとデータ提供依頼を滋賀県の公共機関から受けた (平成 28 年 12 月)。波浪は非常に身近な現象でありながら、詳細な現場観測例は多くなく、波浪場の定量的な評価が行える場所や期間は実は限定されている。この例のように波浪情報は船舶運航などには不可欠な情報であり、時期や場所に依らずに波浪情報を提供することへの社会的要請が高いことを裏付けている。

## (3) 今後の展望

NASA の CYGNSS ミッションは、少なくともあと 2 年間は運用される予定なので、CYGNSS 衛星による全地球常時観測を利用した研究を今後本格的に展開することが可能である。CYGNSS 衛星による高頻度集中観測を用いた台風や爆弾低気圧の予報精度へのインパクト評価や、波浪場の予測や観測などに関する気

象庁との共同研究を予定している。また、本課題で整備した和歌山大の受信局を利用した西部太平洋熱帯域における取得データの即時受信など、現業利用に対する有用性の評価なども行う予定である。その他、雷雲と台風の関係性、大気海洋相互作用における日内変動の評価、津波などの浅海波の位相伝搬の観測、土壌水分や海水分布の観測など、海洋科学に限定せず地球物理学の他分野との共同研究（北海道大学、名古屋大学、東京大学、中部大学など）も予定されている。また、複数の民間企業も CYGNSS 衛星データの活用には興味を示しており、将来的な展望が望める。

本課題によって得られた GNSS-R 観測・解析法に関する体系的な知見は、受信機を搭載するプラットフォームに依らず有効なものであるため、固定観測点、無人航空機、旅客機、ゾンデ、超小型衛星などへの展開拡張が可能である。例えば民間企業 A 社では、機器開発を専門とする民間企業 B 社やリモートセンシングデータ解析を専門とする C 社への委託業務などを既に開始し、超小型衛星に搭載可能な受信機センサーの開発や、海象観測システムの民間事業化などを検討している。

さらに、宇宙航空工学分野と海洋科学の分野融合コミュニティの継続的な維持発展のために、名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用研究集会「小型飛翔体による海洋観測」シンポジウムを今後も継続的に毎年開催していく予定である。

#### 評価点

B

評価を以下の5段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

#### 評価理由

所期に計画した業務は一定の成果を挙げ、特に CYGNSS 衛星を用いる全地球常時観測を用いた観測に関しては、複数の機関にまたがる共同研究への発展や、将来の民間企業での実利用化・産業化に向けた展望をみせている。また、「小型飛翔体による海洋観測」として創出された異分野融合コミュニティは、本課題実施機関の枠を大幅に超えて日本全国に広がりつつある。さらに、ホームページの開設と取得したデータベースの一般公開も行っており、成果の社会展開にも尽力している。

以上より、本課題は相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献している。

一方で、今般の研究成果・技術開発と、GNSS-R の利用による全地球常時観測への展開とのつながりが見えず、設備の購入に多くの費用が割かれており、成果に対する費用対効果が明確でない。GNSS-R 手法の利点を活かし、今後の更なる発展を期待する。