

東京大学 海洋アライアンス
総合海洋基盤（日本財団）プログラム
「メガ津波から命を守る防災の高度化研究」
報告書

『航空機による巨大津波の広域観測網の構築』

平成31年3月



まえがき

2011年の東北地方太平洋沖地震（マグニチュード 9.0）による巨大津波は、2万人もの死者・行方不明者をもたらした。一方、2004年のインドネシアのスマトラ沖地震（マグニチュード 9.1）では巨大津波がインド洋全域に伝わり、沿岸国全体に23万人以上もの犠牲者を生み出した。巨大津波は一度起きると広い範囲に渡って甚大な被害を及ぼすのが特徴であり、その被害を最小限に抑えることは日本のみならず世界中の沿岸国の共通の課題である。

巨大津波による人的被害を最小限に抑えるには、津波を震源に近い沖合で観測し、津波が沿岸に到達する前にその波高を迅速かつ正確に予測し、的確な警報を出して避難を促す必要がある。我が国では東北地方太平洋沖地震後に、三陸沖の日本海溝周辺や四国沖の南海トラフ周辺に多数の海底水圧計を海底ケーブルでつないだ津波観測網(S-net, DONET)が整備された。しかしながら、津波計の観測網の設置・維持は高額なコストがかかるため、このような津波観測網を全世界的に展開するのは困難である。また、ブイ式海底水圧計を全世界的に展開した沖合の津波観測網(DART)も存在するが、その観測点の数はまだ大きく限られている。次世代の津波予測・警報システムを確立するために、できるだけ低コストで全海洋を効率よく密にカバーできる津波観測網の構築が求められている。

そこで、東京大学海洋アライアンス総合海洋基盤（日本財団）プログラム「メガ津波から命を守る防災の高度化研究」では、既存の津波観測網を補完しつつ、全世界的に多数点展開しうる新たな津波の観測方法として沖合を航行する航空機を津波観測プラットフォームとして利用する方法を提案し、研究・検討をおこなってきた。本報告書では、本プログラムで実施した、航空機に搭載したレーダーによる津波観測の有効性を実証するために行った研究成果を報告する。さらに、航空機を利用した津波観測の社会実装に向けて、その課題を整理するために関係官庁・企業等のステークホルダーを対象に実施したヒアリング調査の結果を報告する。その結果を受けて、航空機による津波観測の実装形態と課題を議論する。さらに、様々な実装形態に対応可能な航空機レーダーの概念設計を説明する。最後にまとめとして政策提言を行う。

目次

1. 現行の津波の予測・警報システム.....	1
1.1. 気象庁の津波予測・警報システム	1
1.2. 国際的な津波予測・警報システム	5
1.3. 現行の津波予測・警報システムの課題	7
2. 航空機を利用した津波観測の提案.....	9
3. 航空機を利用した津波観測の有効性の検証.....	13
3.1. 海面高度観測実験	13
3.2. 単体観測シミュレーション	15
3.3. 複数の航空機観測データに基づく津波の予測	16
3.3.1. 現実の航空機位置データに基づく津波波形インバージョン解析	16
3.3.2. 航空機観測データのデータ同化による津波予測	21
4. 航空機を利用した津波観測の実装に向けたヒアリング調査.....	25
4.1. ヒアリング結果概要	26
4.2. ヒアリング結果のまとめ	30
5. 航空機を利用した津波観測の実装の形態と課題.....	33
5.1. 旅客機に新規に電波高度計を設置するケース	33
5.1.1. 実装の形態	33
5.1.2. 実装上の課題	33
5.2. 旅客機に搭載されている電波高度計を利用するケース	35
5.2.1. 実装の形態	35
5.2.2. 実装上の課題	36
5.3. 無人航空機を活用するケース	38
5.3.1. 実装の形態	38
5.3.2. 実装上の課題	39
6. 航空機搭載レーダーシステムの検討.....	41
6.1. システム設計	41
6.2. システム構成	46
6.3. ハードウェア構成	46
7. 提言 「航空機による巨大津波の広域観測網の構築」	50

1. 現行の津波の予測・警報システム

本章では現在運用されている津波予測・警報システムを説明する。最初に気象庁の津波予測・警報システムについて述べ、東北地方太平洋沖地震における対応、および震災後に整備された観測網について説明する。さらに、国際的に展開されている津波の予測・警報システムと観測網の概要を述べる。最後に現行の津波予測方法の課題を整理する。

1.1 気象庁の津波予測・警報システム

図 1.1 は気象庁の津波予測・警報システムの流れを示している[Tatehata, 1997]。このシステムは、陸上に設置した多数の地震計で構成される地震観測網と津波予報データベースで構成される。津波予報データベースは図 1.2 に示すように、津波を引き起こしうる地震の震源位置やマグニチュードについて約 10 万通りの想定シナリオを考え、各々のシナリオについて事前に津波数値シミュレーションを行い、得られた各地の沿岸最大波高と到達時間を保存したものである。

この気象庁のシステムでは、地震が発生すると、まず初めに地震観測網で得られたリアルタイムの地震波データから地震発生 1~2 分後に震源位置とマグニチュードを推定する(図 1.1 左)。それから津波予報データベース(図 1.2)を検索して、推定した震源位置とマグニチュードに最も近い津波シミュレーションで得られた沿岸最大波高と到達時刻を取り出すことで、地震発生 3 分以内に津波警報の第一報を発表することになっている(図 1.1 左)。

さらに警報第一報発表後も、広帯域地震計から得られる長周期の地震波データを解析してずれ動いた断層の範囲と変位を推定し、地震規模を正確に表現するマグニチュード(モーメントマグニチュード M_w)を計算し、このマグニチュードが第一報の推定値より大きい場合は津波予報データベースから津波予測の再評価を行い、地震発生 10 分~20 分後に津波警報を更新することになっている(図 1.1 右)。

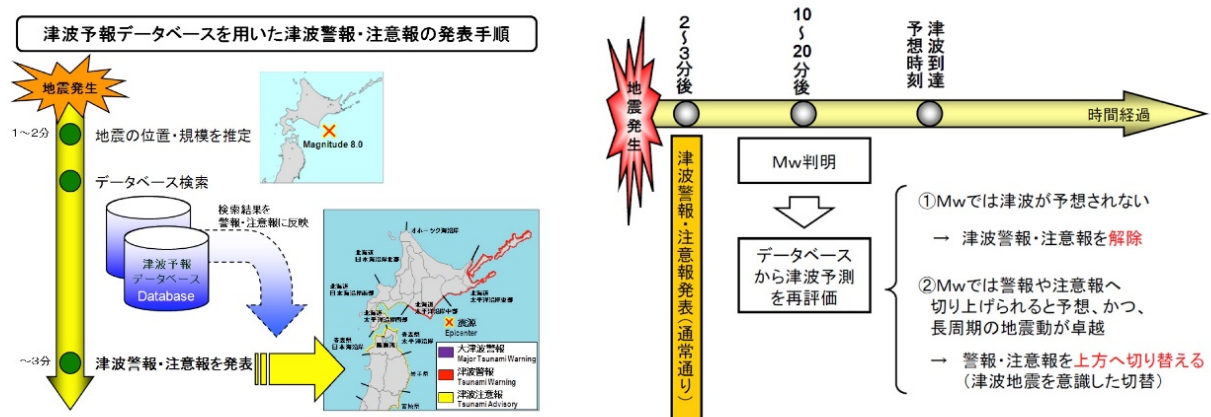


図 1.1 気象庁の津波予測・警報システムの流れ。(左) 地震発生後 3 分以内に津波警報の第一報を発表するまでの手順、(右) 地震発生 10 分~20 分後に津波警報を更新する手順を示す。気象庁 HP(<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/ryoteki.html>)より引用。

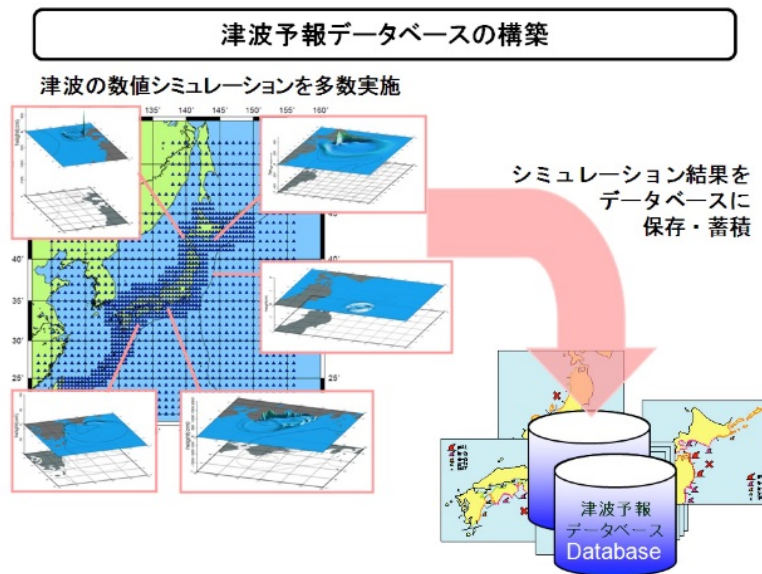


図 1.2 気象庁の津波予測・警報システムで使われる津波予報データベース。日本周辺海域で津波を引き起こす可能性がある地震断層を約 10 万ケース想定し、各ケースに対応した初期海面変位を与え実施した津波数値シミュレーションのデータを格納したもので構成される。気象庁 HP (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/ryoteki.html>)より引用。

・東北地方太平洋沖地震における気象庁の津波予測・警報システムの対応

2011 年の東北地方太平洋沖地震の時も、気象庁の津波予測・警報システムは規定どおり地震発生 3 分後に大津波警報を出した。しかし、このとき発表した津波の予測波高が岩手県 3 m、宮城県 6m、福島県 3m と実際に来襲した津波に比べて著しく過小評価になっており、このことが住民の避難を遅らせた要因の一つとなった[金井・片田, 2012]。この津波の過小評価は、最初の 1~2 分の地震計データから推定した地震マグニチュードが $M=7.9$ と実際の値 $M=9.0$ よりも小さかったためである。これは、一般に $M=8$ を超える巨大地震の場合、長周期の地震波は大きくなるが、通常の地震計(強震計)で捉えられる周期 5 秒程度以下の地震波の大きさはほとんど変わらないため、そこから推定したマグニチュードが頭打ちになるためである[気象庁, 2012]。この欠点を補うため、気象庁の津波・警報予測システムでは長周期の地震波も測定できる広帯域地震計のデータを使って地震発生 10 分~20 分後にマグニチュードを再推定することになっているが(図 1.1 右)、東北地方太平洋沖地震の時は地震波の振幅が大きく広帯域地震計の測定レンジを超えたため正確なマグニチュードが推定できず、津波警報の更新ができなかった[気象庁, 2012]。

結局このときは、岩手県釜石から 20km 沖合に設置された GPS 波浪計(図 1.3)において、地震発生 25 分後に第一報予測値の倍近い波高 6m 以上の津波が来ていることが確認され(図 1.4) [河合他, 2011]、それを受けて地震発生 28 分後に岩手県 6m、宮城県 10m 以上、福島県 6m、さらに 44 分後に 3 県で 10m 以上と津波警報が切り上げられた[気象庁, 2012]。しかしな

がら、この津波警報を更新した時刻は三陸沿岸に津波が到達する直前であり、住民の避難に十分に生かすことができなかった。

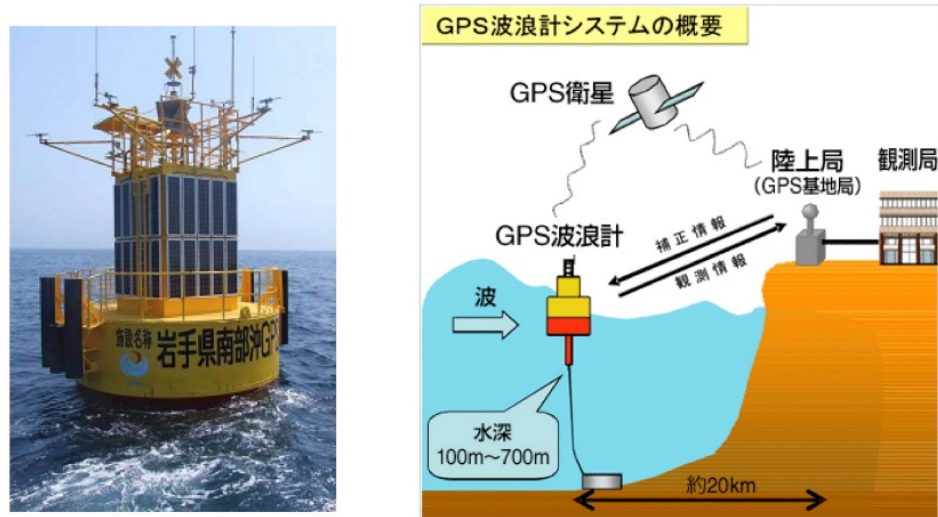


図 1.3 (左) GPS 波浪計、(右) GPS 波浪計システムの概要。国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務局 HP (<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kamaishi/port/bousai/gps/index.html>)より引用。

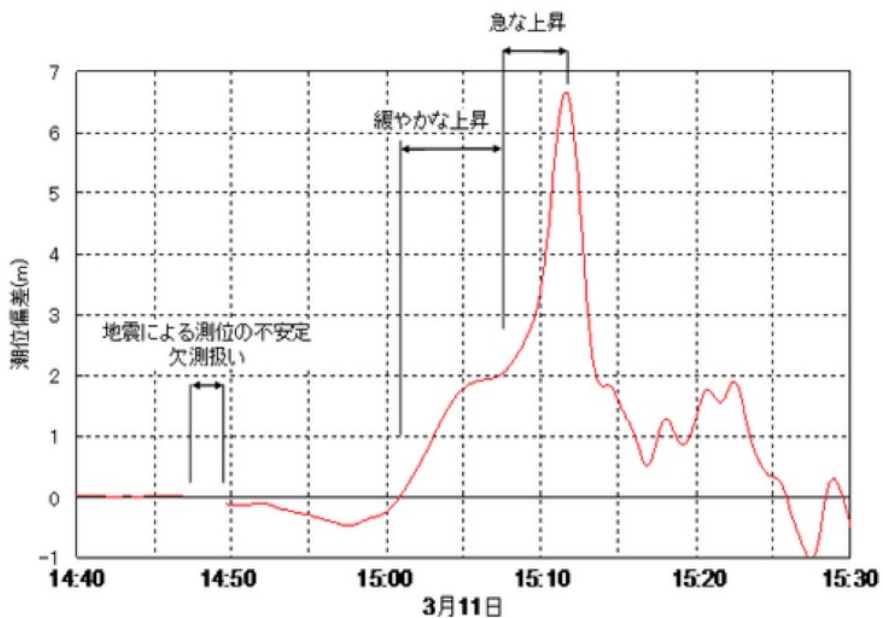


図 1.4 岩手県釜石 20 k m 沖に設置された GPS 波浪計が捉えた東北地方太平洋沖地震による津波。港湾空港技術研究所 HP (<https://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328mlit.html>)より引用。

・東北地方太平洋沖地震後に整備された津波観測網

前節で述べたように東北地方太平洋沖地震で明らかになった津波予測・警報システムの問題点は、地震計データに基づいて予測した津波波高を著しく過小評価したこと、GPS 波浪計データに基づいて予測波高を修正するのに 30 分近くの時間を要したことである。

この問題を受けて震災後に、震源域に近い海域で発生直後の津波を直接捉えるために、日本海溝と南海トラフに沿って大規模な津波観測網が整備された。この観測網は、水圧変化から海面水位を測る津波計と地震計とが一体化した観測装置を光ケーブルで多数個接続したものを海底に張り巡らせ、震源に近い沖合の海面高度のデータをリアルタイムで取得するものである(図 1.5)。日本海溝に沿ったケーブル式津波観測網は 150 点の観測点で構成されており S-net (<http://www.bosai.go.jp/inline/>)と呼ばれ、防災科学技術研究所によって総事業費約 324 億円で整備された。一方、南海トラフの観測網には 49 点の観測点があり DONET (<https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>)と呼ばれ、海洋研究開発機構によって総事業費約 192 億円で整備された。図 1.6 は S-net と DONET さらに以前から運用されていた相模トラフのケーブル式津波観測網の観測点を示している。これらの観測点で取得されたデータは、2016 年 7 月より気象庁の津波予測・警報システムで活用されている。現在さらに高知県沖から日向灘沖にかけての南海トラフにも同様の海底ケーブル式津波観測網(N-net)の整備が計画されている。



図 1.5 ケーブル式海底津波・地震観測網 S-net の概要。防災科学技術研究所 HP (<http://www.seafloor.bosai.go.jp>)より引用。



図 1.6 日本周辺海域のケーブル式海底津波・地震観測網 S-net、DONET、相模湾地震観測施設の観測点の分布。防災科学技術研究所 HP (<http://www.seafloor.bosai.go.jp>) より引用。

1.2 国際的な津波予測・警報システム

巨大津波は国境をまたいで広範囲に被害を及ぼすため、国際的な津波監視体制が確立されている[福長,2009]。1965年のチリ地震を契機に太平洋をカバーする津波監視体制が確立され、2004年のスマトラ沖地震後に全世界に拡大された。図 1.7 は国際的な津波監視体制の組織図である。この中で、太平洋全域の津波監視はハワイにあるアメリカ海洋大気庁(NOAA)の太平洋津波警報センター(PTWC)が中核となって担っている。また、PTWCを補完する地域センターとして北西太平洋津波情報センター(NWPTAC)があり、日本の気象庁がその役割を担い、北西太平洋・東シナ海・南シナ海の沿岸国及び島嶼国の津波監視を行っている。

これらのセンターでは、前節で説明した気象庁の津波予測・警報システムと同様の方法で、全世界の地震計で得られた地震波データから津波波源を推定し、津波数値シミュレーションに基づいて津波の到達時間や波高を予測しその情報を各国に提供している。この津波情報は地震発生から概ね 30 分以内に発表される。

さらに、外洋を伝わる津波を直接観測するために、NOAA によって、図 1.8 に示すような海底津波計に衛星通信用ブイをつないだ DART と呼ばれる津波観測網が開発・運用されている[Benerd and Meinig, 2011]。図 1.9 は DART のステーションの位置を示しており、現在 51 点の観測点がある。気象庁でも同様のブイ式津波計を東北地方太平洋沖地震後に三陸沖に設置している。これら DART で得られる外洋域のリアルタイムの水位データは国際的に共有され、津波警報の確認・修正・解除のために利用されている。特に NOAA では、DART で観測される津波の時系列データを最もよく説明する津波の初期波源をインバージョン解析で推定することによって、地震波データに基づく間接的な方法に比べ信頼性が高く正確な津波予測が行われている[Titov et al., 2003]。

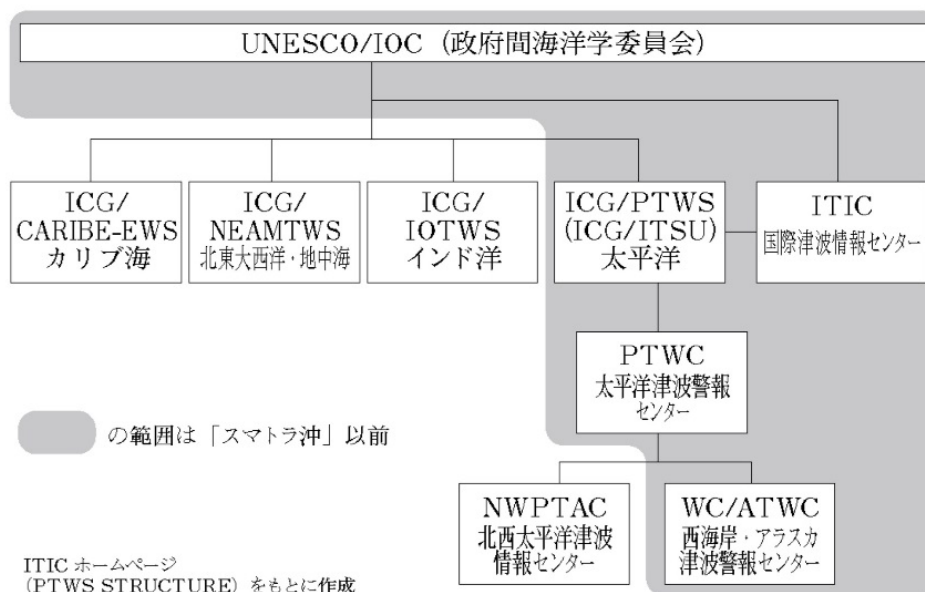


図 1.7 国際的な津波監視体制の組織図。福長(2009)より引用。

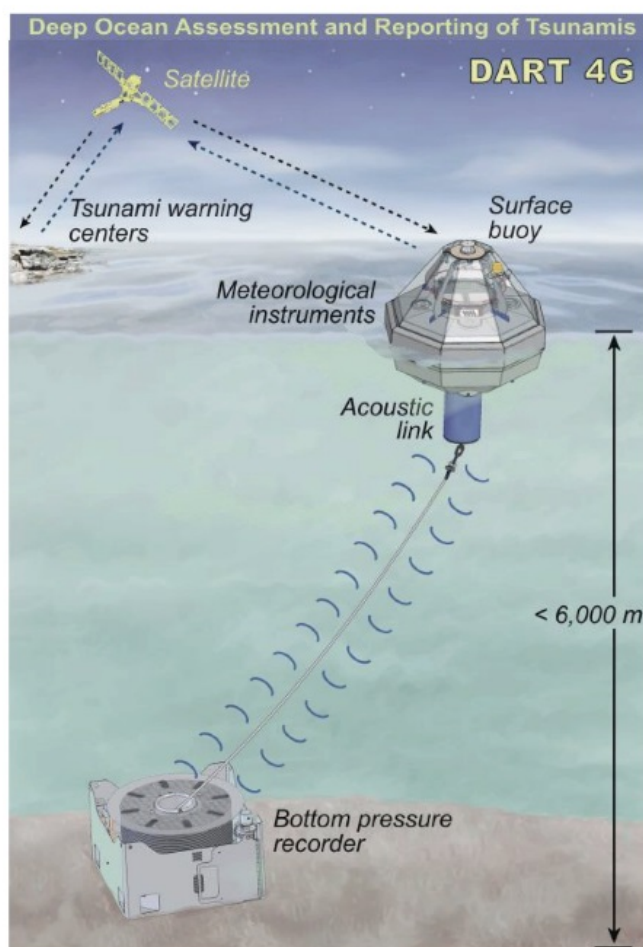


図 1.7 ブイ式海底津波計システム DART の概要。NOAA Center for Tsunami Research HP (<https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>)より引用。

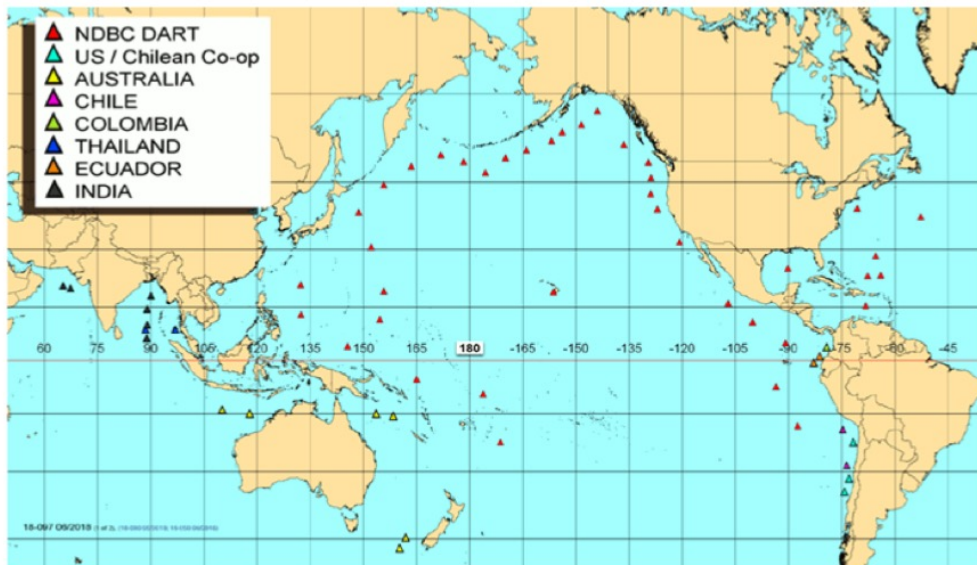


図 1.8 国際的津波観測網であるブイ式海底津波計システム DART の観測点分布。

NOAA Data Buoy Center HP(<https://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>)より引用。

1.3 現行の津波予測・警報システムの課題

上述のように、現行の多くの津波予測システムは地震波データからマグニチュードを推定し、そこから間接的に津波の規模を推定している。この方法は迅速性が大きな利点であるが、断層範囲が広域にわたり地震動が長時間続く巨大地震の場合、津波の規模を過小評価してしまう問題がある。東北地方太平洋沖地震では、このことが避難行動に悪影響を与えた。逆に、横ずれ断層による地震の場合、マグニチュードが大きくても海底隆起を伴わないため、津波予測が過大評価になる。

このことから、震源に近い沖合で津波を直接観測し、この観測に基づいて正確な津波予測を行うことが強く求められている。日本では東日本大震災の経験を踏まえて、三陸沖や四国沖にケーブル式津波計(S-net, DONET)やGPS 波浪計ブイの観測網が整備された。また国際的にはブイ式津波計による津波観測網(DART)も構築されている。しかしながら、このような沖合の津波観測網の設置には多額のインフラ整備費がかかるだけでなく、外洋の過酷な環境下での観測網を維持にも大きな費用がかかるという問題がある。そのため、ケーブル式津波計やGPS ブイを全世界的に展開するのはほぼ不可能であり、日本周辺の全海域をカバーするのさえ現実的に困難である。一方、DART のブイ式津波計の観測点の数もまだ限られており、観測空白域が多く存在する。

以上のことから、発展途上国を含む世界中の沿岸国の津波防災対策に資することができる次世代の津波予測・警報システムを確立するために、できるだけ低コストで全海洋を効率よく密にカバーできる津波観測網をどのように構築するかが大きな課題となっている。

参考文献

Bernard, E.N. and C. Meinig (2011), History and future of deep-ocean tsunami measurement

s, *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, HI, 2011, 1-7, doi:10.23919/OCEANS.2011.6106894.

福長 秀彦 (2009), 津波情報の国際協力~「スマトラ沖」以降の変貌~, *放送研究と調査*, **59**-2, 24-35.

金田 昌信, 片田 敏孝 (2012), 2011年東北地方太平洋沖地震津波襲来時における津波避難意思決定構造の把握, *災害情報*, **10**, 91-102.

河合 弘泰, 佐藤 真, 川口 浩二 (2011), GPS 波浪計で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, **67**, 1291-1295.

気象庁 (2012), 東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善, https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami-kaizen/20tsunami_keihou_kaizen_all.pdf

Tatehata, H. (1997), The new tsunami warning system of the Japan Meteorology Agency, p.175-188, In Hebenstreit, G. (eds) *Perspectives on Tsunami Hazard Reduction. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 9, Springer, Dordrecht.

Titov, V.V., F.I. Gonzalez, E.N. Bernard, M.C. Eble, H.O. Mofjeld, J.C. Newman, and A.J. Venturato (2005), Real-Time Tsunami Forecasting: Challenges and Solutions, *Natural Hazards*, **35**, 35-41.

2. 航空機を利用した津波観測の提案

前節で述べたように、津波の迅速かつ正確な予測の実現に向けて、震源に近い沖合で発生直後の津波を直接捉える観測網の構築が求められている。そこで、東京大学海洋アライアンス総合海洋基盤（日本財団）プログラム「メガ津波から命を守る防災の高度化研究」では、沖合の津波の新たな観測方法として航空機に搭載したレーダーで津波を観測する方法を提案する。

図 2.1 は航空機レーダー観測の原理である。航空機から直下にマイクロ波を発信し海面に反射し戻ってくる時間から航空機と海面までの距離を測定し、同時に高精度 GPS で航空機の絶対高度を計測することにより、両者の差から航空機の直下の海面高度の変化を求める。

この観測原理は人工衛星による海面高度観測の原理と基本的に同じものである。海面高度衛星は、地球全体を網目状に覆う軌道を繰り返し移動しながら、衛星直下の海面高度を誤差数 cm の精度で測定するものである[市川, 2014]。現在、様々な国（アメリカ、EU、中国、インド）の機関によって計 8 台の海面高度衛星が運用されている。図 2.2 は海面高度計衛星によって捉えられた東北地方太平洋沖地震の津波である。太平洋を伝播する津波の上を海面高度計衛星が通過した際に観測された衛星軌道に沿った海面高度の変化と、津波の数値シミュレーションの結果を比較したもので、両者が大概一致していることが確認できる。ただし、海面高度計衛星は同じ点に繰り返し戻ってくる周回間隔が数日～数十日と長く設定されており、本来は黒潮などの海流の流路や中規模渦の挙動、エルニーニョの暖水塊分布など非常にゆっくり変化する現象を観測対象とするものである。そのため、津波のような突発的に発生する時間スケールの短い現象の観測には適していない。図 2.2 の観測事例も外洋を伝わる津波の上を衛星が偶然通過したことで得られたものに過ぎない。それに対して、航空機は人工衛星に比べ非常に高い機動性を持っており、励起源近くの津波をピンポイントに狙って捉えられることが期待できる。

航空機レーダー観測の社会的実装方法の一つとして、民間航空機の活用が考えられる。現在、全ての民間航空機には、離発着時に地表面との距離を測定するために、電波高度計と呼ばれる小型レーダーが装備されている。この電波高度計は衛星海面高計と同じ仕組みのレーダーであり、電波高度計を利用しても海面高度の観測が原理的には可能である。図 2.3 は航行中の民間航空機の分布の一例を示している。現在、全世界には約 2 万 7 千機の民間航空機が存在し、20 年後には約 4 万 6 千台にまで増加すると予測されている[日本航空機開発協会, 2018]。将来これら民間航空機を利用できるようになれば、全海洋を密にカバーする津波観測網が構築できることが期待できる。民間航空機は人口の多い沿岸都市部の沖合を多く航行しており、その点でも有利である。

さらに、無人航空機の利用も考えられる。無人航空機は UAV(Unmanned Aerial Vehicle)、UAS(Unmanned Aircraft System)、ドローンなどと呼ばれている。近年小型で回転翼ローターを持つドローンの低価格化が進み広く普及しているため、一般的には小型ドローンのイメージが強いが、実際には大きささまざまな形態があり、図 2.4 に示すように、全幅 30m を超えるものから小型のもの、8000m 以上の高高度を飛行するものから 150m 以下の低高度用のものまで用途に応じて様々な機体が存在している[熊田, 2014]。近年、産業・社会分野への応用が急

速に拡大しており、既に多くの自治体では災害・防災情報の収集に無人航空機が活用されている。アメリカ航空宇宙局(NASA)では無人航空機を利用したハリケーン調査も行われている。将来的にはこのような無人航空機を活用して津波監視網へと組み込むことも十分考えられる。

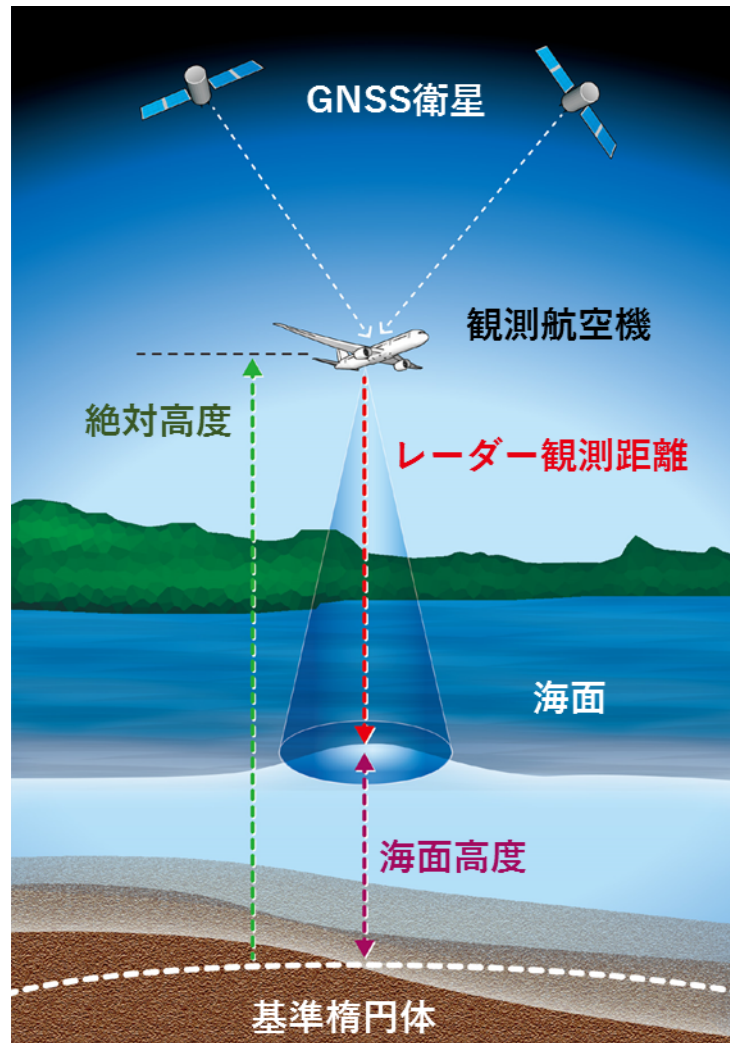


図 2.1 航空機による海面高度測定の概略図。海面高度は GNSS 測量による航空機の絶対高度の計測と航空機搭載電波高度計による海面までの距離測定により導出される。

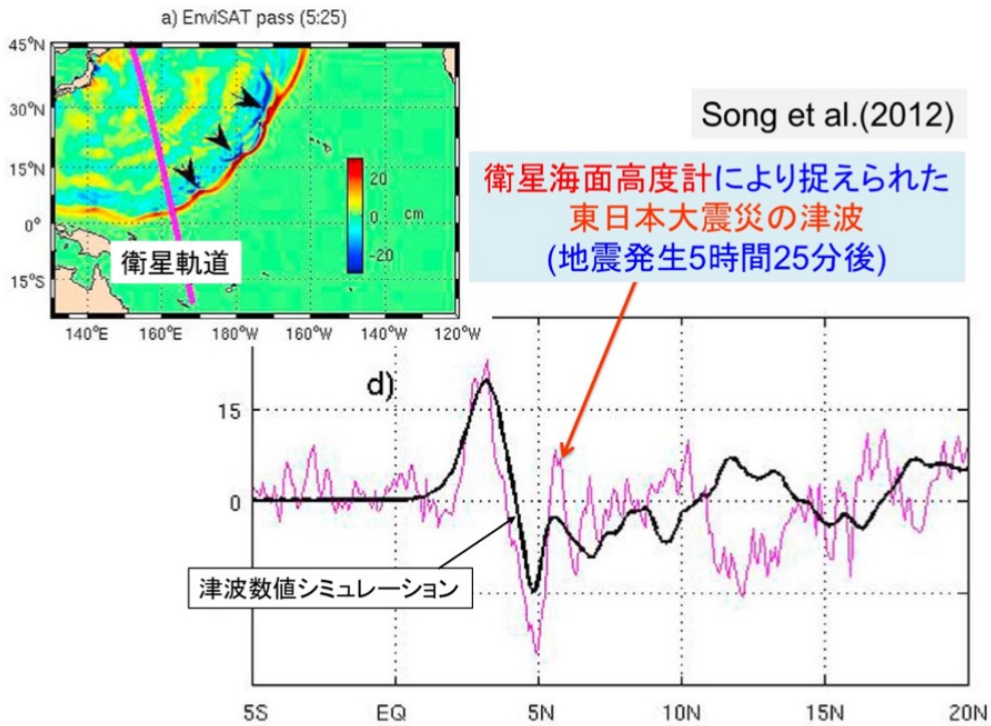


図 2.2 海面高度計衛星 Envisat によって捉えられた東北地方太平洋沖地震の津波。(右上) 衛星軌道(ピンク色実線)と数値シミュレーションで再現した地震発生 5 時間 25 分後の津波の海面高度変化の分布、(左下) 衛星海面高度計観測で得られた軌道に沿う海面高度変化の緯度分布(ピンク色実線)と数値シミュレーションの結果(黒実線)の比較。Song et al.(2015)より引用。



図 2.3 全世界を航行する航空機の分布。flightradar24 HP(<https://www.flightradar24.com>)より引用。



図 2.4 無人航空機の種類。熊田(2016)より引用。

参考文献

- Airbus Defence and Space (2018), Airbus Zephyr Solar High Altitude Pseudo-Satellite flies for longer than any other aircraft during its successful maiden flight, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/08/Airbus-Zephyr-Solar-High-Altitude-Pseudo-Satellite-flies-for-longer-than-any-other-aircraft.html>
- Hall, D.W., C.D. Fortenbach, E.V. Dimiceli, and R.W. Parks (1983), A preliminary study of solar powered aircraft and associated power trans, NASA Contractor Report 3699, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840005126.pdf>
- 市川 香 (2014), 21 世紀初頭の衛星海面高度計, *海の研究*, **23**, 13-27.
- 熊田 貴之 (2016), 空の産業革命-無人航空機(ドローン)時代の幕開け-, *ペトロテック*, **39**, 817-828.
- 日本航空機開発協会 (2018), 民間航空機に関する市場予測 2018-2037, <http://www.jadc.jp/data/forecast/>
- Song, Y.T., I. Fukumori, C.K. Shum, and Y. Yi, (2012), Merging tsunamis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected over the open ocean, *Geophysical Research Letters*, **39**, L05606, doi:10.1029/2011GL050767.

3. 航空機を利用した津波観測の有効性の検証

3.1. 海面高度観測実験

航空機搭載の電波高度計による海面高度計測がどの程度の精度を持つか、津波の検知が実際に可能なかどうかを調べるため、衛星海面高度計 Jason-2、3 との同期観測を行い、海面高度の測定精度の検証を行った [Hirobe et al., 2019]。

図 3.1(a)に観測に用いた航空機を示す。航空機の胴体下部に X バンドの FM-CW (Frequency Modulated Continuous Wave) レーダー AT SAR-X (図 3.1(b)) を取り付け、高度約 8500 m、速度約 100 m/s で飛行しながら直下点観測を行った。

航空機観測は、沖合で巨大津波を検知することを想定し、黒潮流域における約 1m 程度の海面高度変化を捉えるべく、日本の太平洋側の海域を対象として選び、検証のため衛星海面高度計 Jason-2 もしくは Jason-3 の通過と同日同軌道上で 3 回行った (図 3.2)。第 1 回観測は 2016 年の 6 月 29 日に伊勢湾沖 (図 3.2 A-B)、第 2 回と第 3 回の観測は同年 12 月 4 日および 8 日にそれぞれ房総半島沖と紀伊半島沖で行った(図 3.2 C-D 及び E-F)。各径路をそれぞれ数回の往復観測を行った。

図 3.3 の実線と破線は、伊勢湾沖(A-B)で得られた 3 回の航空機レーダー観測の結果から、ジオイドおよび潮汐の補正を行った力学的海面高度を示している。約 6km での移動平均で平滑化を行った。機体の大きな振動に対しても、GNSS 観測およびレーダー観測が精度よく追従されていた。3 回の観測結果はほぼ重なっており、北緯 32.5°から 33.5°の間で黒潮による約 1m 程度の海面高度変化を捉えている。これはポイント付きの線で示した Jason-2 による結果ともよく一致している。なお、北緯 33°付近では雨雲の影響により Jason-2 にデータ欠損区間があるが、同時刻での航空機観測では問題なく計測できた。本経路での観測結果は Jason-2 と比べて平均約 6cm の誤差であった。房総半島沖(C-D)と紀伊半島沖(E-F)の観測においても Jason-3 と比較して 10cm 以下の精度で計測できることが確認できた。この観測結果から、航空機レーダー観測によって、沖合において数 10cm 以上の波高で伝播する巨大津波の検知が十分可能であることが初めて実証された。



図 3.1 (a) 観測に用いた航空機、ダイヤモンドエアサービス社所有 King Air 200T
(b)航空機腹部に取り付けた FM-CW レーダー。アルウェットテクノロジー社開発 AT SAR-X を使用。黄色丸で囲んだものがレーダーの送受信アンテナを示す。

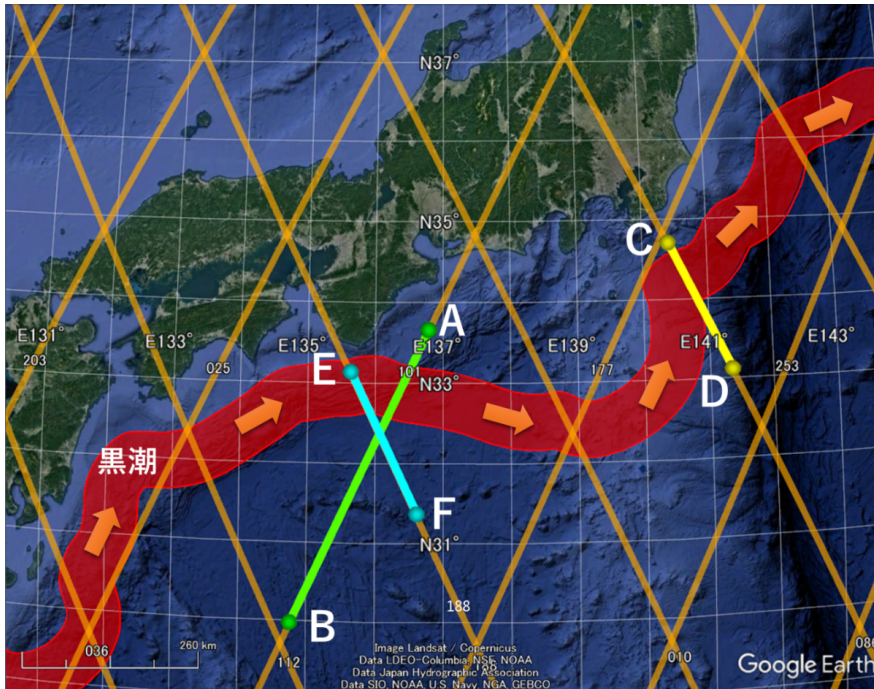


図 3.2 衛星海面高度計 Jason-2 及び Jason-3 の軌道（オレンジ線）と航空機観測経路（緑線 A-B : 2016 年 6 月 29 日、黄線 C-D : 2016 年 12 月 4 日、青線 : 2016 年 12 月 8 日）。太赤線は海上保安庁海洋速報より取得した 2016 年 12 月 2 日の黒潮流路を示す (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp>)。

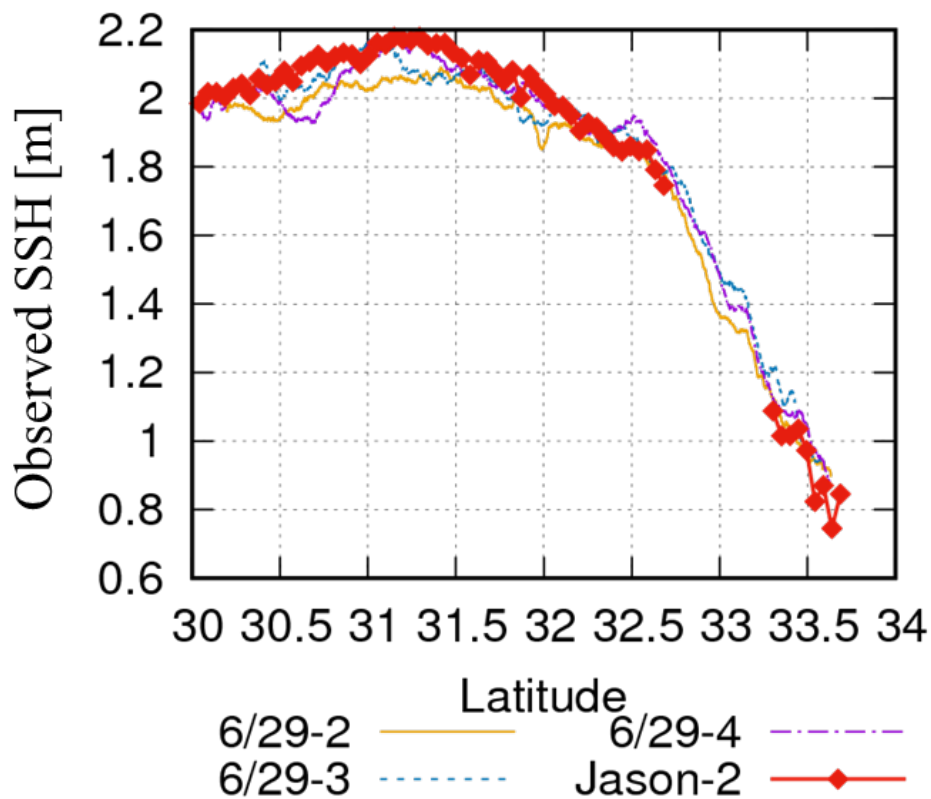


図 3.3 2016 年 6 月 29 日に実施した航空機レーダー海面高度観測の結果。ジオイドと潮位除去後の海面高度を衛星海面高度計 Jason-2 の観測結果（赤線）と比較している。

3.2 単体観測シミュレーション

ここでは実際に1台の航空機レーダー観測により、メガ津波がどのように観測されるかをシミュレーションによって確かめる[Hirobe et al., 2019]。中央防災会議による南海トラフ地震（モーメントマグニチュード 9.1）想定津波初期波源を用い[中央防災会議, 2012]、高精度有限差分津波シミュレーションコードの JAGURS (JAMSTEC parallelized code developed by Geoscience Australia and URS Corporation which used Satake's kernel) [Baba et al., 2015] による計算によって伝播する津波波形を生成した。計算結果による津波発生1分後と5分後の津波波形トップビューを図 3.4 に示す。津波発生直後に広範囲にわたりメガ津波が発生しており、5分後には一部の沿岸地域に津波が到達している様子が伺える。

シミュレーションにより得られた津波による海面高度変化に対し、図 3.4 に示したポイント E からポイント F にかけて航空機海面高度観測を行うことを想定した仮想観測を行った。なお、図 3.4 の区間 E-F は図 3.2 に示した、2016 年 12 月 8 日の航空機観測区間 E-F と同一である。図 3.5 に津波発生0分後、5分後、10分後及び30分後からポイント E より観測を開始して得られる観測海面高度の変化を示す。なお、比較のため津波のない平常時に観測した場合の結果（E-F 航空機観測結果そのもの）を示す。ポイント E は津波波源付近であり、津波発生直後に観測開始したケースでは、開始直後に 2 m 以上の波高変化が 3 分程度で観測される。これは前節で示した航空機海面高度観測の精度 10 cm と比較して十二分に津波検知が可能な値である。このように津波発生直後の波源付近では、単独航空機による数分足らずの観測で巨大津波の検知が可能であるといえる。しかし、沖合における津波波高は時間経過とともにすぐに急速に低減し、津波発生から 5 分後にポイント E からの観測したケースでは高々 1 m 程度の海面高度変化の観測となり、10 分後のケースでは 50 cm 程度の変化の観測となる。さらに 30 分後のケースでは観測精度と同等の変化しか捉えられず、津波の検知は難しくなる。以上のことから、観測ノイズと分離して津波を検知するためには、津波発生後 10 分程度以内に、津波波源付近での航空機観測を行うことが望ましいといえる。

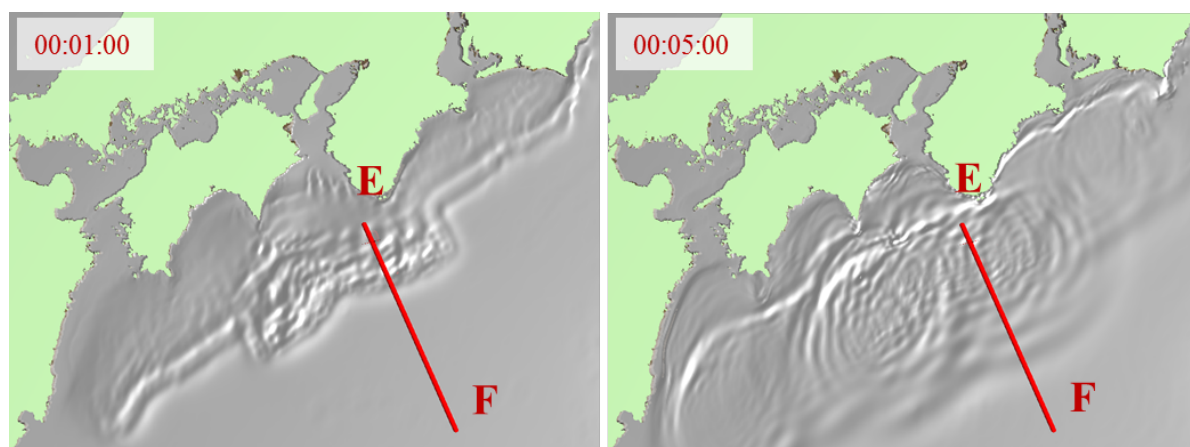


図 3.4 津波数値シミュレーションモデル JAGURS の計算結果による、南海トラフ地震を想定した津波発生 1 分後（左）及び 5 分後（右）の津波波形トップビュー。赤線の区間 E-F は図 3.2 の区間 E-F における 2016 年 12 月 8 日の航空機観測区間と同じ。

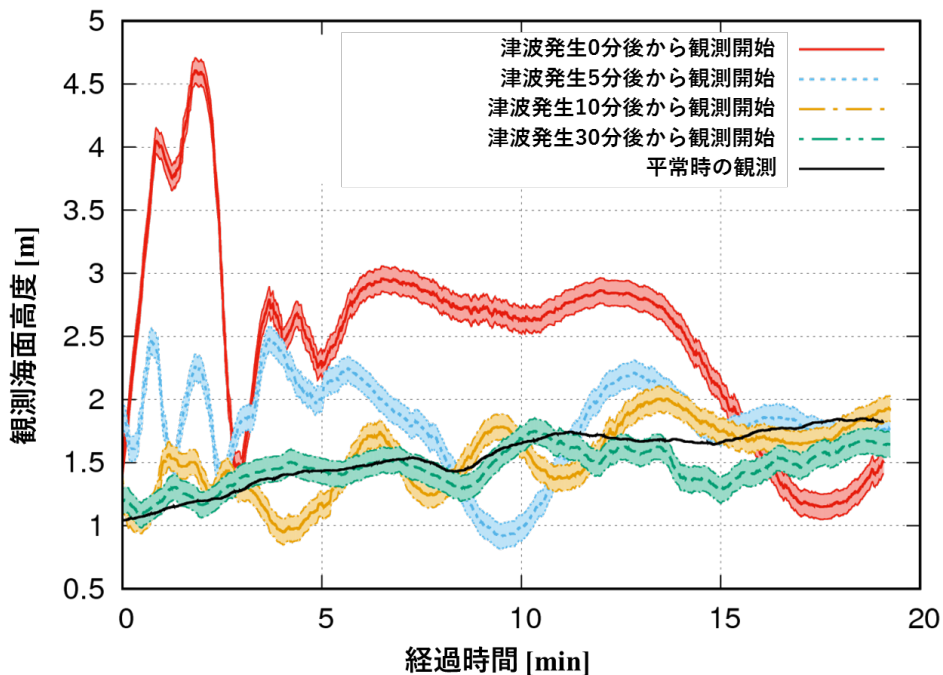


図 3.5 航空機による仮想津波の観測結果。南海トラフの津波シミュレーション（図 3-4）に対し、図 3.4 のポイント E から F にかけて仮想的な航空機観測を行った結果を示している。ポイント E から津波発生 0 分後、5 分後、10 分後及び 30 分後に観測を開始したケースに合わせ、津波のない平常時の観測結果を比較した。津波時の観測結果には 10 cm の観測誤差の幅を含めて表示している。

3.3 複数の航空機観測データに基づく津波の予測

3.3.1 現実の航空機位置データに基づく津波波形インバージョン解析

前節で述べた航空機レーダー観測の結果から、航空機によって約 10cm の精度で海面高度が測定でき巨大津波を捉えるには十分な精度を持つことが実証された。そこで、本節では沖合を航行する多数の航空機で津波を観測した場合、津波予測にどの程度の効果があるかを検証した。

精度のよい津波予測を行うには、津波の初期水位分布すなわち津波波源をできるだけ正確に推定する必要がある。観測データから津波波源を求めるには、インバージョン解析（逆解析）が行われる。インバージョン解析とは、津波の波源領域を細分化したブロックに分割し、各ブロックに単位水位変化を与えたときの観測点での水位変化（応答関数）を数値シミュレーションで求め、実際に観測点で得られる観測データを各ブロックの応答関数の重みつき線形重ね合わせで最も良く表現するように、各ブロックの重み＝水位変化の大きさを最小二乗法で求めるものである（詳細は Satake[1987]を参照）。このインバージョン解析による津波予測は、アメリカ海洋大気庁(NOAA)のブイ式津波計(DART)の観測データに基づくものが運用されている。また、気象庁でもケーブル式津波計(S-net, DONET)や GPS 波浪ブイの観測データのインバージョン解析に基づく正確かつ信頼度の高い津波予測・警報システムが近い将来の運用に向けて研究・開発が進められている。

ここには航空機観測で得られた現実の津波データが存在しないため、南海トラフの巨大津波の数値シミュレーションを行い、その中で複数の航空機を移動させることで仮想的な観測データを取得した。そして、この仮想観測データに対してインバージョン解析を行い、どの程度正確に津波波源が推定できるかを調べた。

・数値実験及びインバージョン解析

本実験では、図 3.6 に示す中央防災会議が設定した南海トラフ津波の初期波源を設定して実験を行った。一方、日本周辺の航空機の位置データは Flightradar24 (<https://www.flightradar24.com>) が提供する 2018 年 7 月 29 日の 1 日間のデータを使用した。図 3.7 は航空機位置データの一例で、日本時間 12 時～12 時 15 分の 1 分ごとの航空機の位置を示している。

図 3.6 の津波波源を数値モデルに与えて数値シミュレーションを行い、その中で現実の航空機位置データに基づいて観測点を移動させることで、各航空機で得られる津波発生後の一定期間の水位変動データを求めた。そして、このデータをインバージョン解析することによって、津波波源を推定した。ここで、インバージョン解析には図 3.6 の赤線枠内に存在する航空機のデータを使用した。また、前節の航空機レーダー観測の結果に基づいて、仮想観測データに誤差として 10cm のランダムノイズを加えインバージョン解析を行った。さらに、比較のために DONET の海底津波計と GPS 波浪ブイで構成される既存の津波観測点(全 71 点、位置は図 3.2)で得られる仮想観測データを使って同様にインバージョン解析を行った。なお、既存の津波観測は航空機レーダー観測に比べ測定精度が高いため、誤差のランダムノイズを加えずインバージョン解析を行った。

・インバージョン解析結果

図 3.8(左)は航行する航空機の数最も多かった 12 時 00 分から 15 分間の全 81 点の航空機の仮想観測データのインバージョン解析から推定した津波波源を示している。一方、図 3.8 (右) は既存の津波観測点(全 71 点)の同じく 15 分間データから推定した津波波源である。両者とも図 3.1 の正解となる元の津波波源の空間パターン、特に東経 133.5°～134.5°の南海トラフの軸に沿う水位ピークを推定できていることが確認できる。推定した津波波源の空間分布と正解の元の津波波源の相関係数は、航空機観測が 0.89 と既存観測が 0.63 となり、航空機観測の方が精度よく推定ができている。これは航空機の位置が比較的一様に分散して津波波源のピークの近傍を通過するのに対して、DONET の観測点は紀伊半島沖から四国東部沖に偏っており、また航空機に比べ相対的に沿岸近くに位置するため、津波の到達に時間がかかるためである。

さらに、図 3.9 (左) は 12 時 00 分からさらに短い 5 分間の航空機の仮想観測データから推定した津波波源であるが、この場合でも、航空機観測から推定した津波波源 (図 3.9(左)) は水位ピークの位置がうまく推定されている。空間分布の相関係数も 0.81 と高い値を示している。それに対して、既存の観測点の推定結果 (図 3.9(右)) では初期波源のピークが空間的に広く分散してしまっている。

この様に航行する航空機の台数が多い日中では、航空機観測によって既存の観測点に比べ

短時間で高い精度の津波予測ができることが明らかになった。ただし、航空機の台数が少なく深夜帯では津波波源の推定精度が大きく低下する。図 3.10 は夜間の時刻 1 時から 15 分間の航空機仮想観測データから推定した津波波源であるが、深夜は航空機の数が極端に減少(計 2 台) するため、初期波源の水位ピークの高さが過小評価され、相関係数も 0.53 に減少する。

そこで、時間帯による津波の予測精度の変化を見るために、図 3.11 (左) は 0 時~24 時までの各時刻の 15 分間の航空機データに基づきインバージョン解析により推定した津波波源の相関係数の変化を示す。一方、図 3.11 (右) はインバージョン解析に使用した航空機の機数と相関係数の関係である。これらを見ると 6 時~22 時の時間帯には相関係数が 0.7 を超え、既存の観測点の推定結果(図 3.3 右、相関係数 0.63) よりも高い精度で津波予測ができていることが分かる。これは航空機の機数が 20 機よりも多くなる時間帯に対応している。一方、航空機が 20 機以下になる深夜から早朝の時間帯では相関係数が全体的に低下するとともに、航空機の配置に依存して相関係数が大きく変化している。図 3.12 は各時刻から 5 分間の航空機データから推定した津波波源の相関係数であるが、航空機が 60 機以上ある 11 時~17 時の時間帯では相関係数が 0.7 を超え高い精度で津波予測ができている。

・まとめ

航空機レーダー観測による津波予測の可能性を検証するために、南海トラフ津波を対象にして現実の航空機位置データに基づく津波波形インバージョンを行った。その結果、津波と同程度の速度で移動する航空機の観測データを利用して津波波形インバージョンが十分に可能なことを確認できた。20 機以上の航空機が存在する 6 時~22 時の時間帯では既存の津波観測(ケーブル式海底津波計と GPS 波浪ブイ)より高精度な津波予測ができることが示された。特に、11 時~17 時では 60 機以上の航空機が存在し、既存の津波観測ではできない 5 分間の観測データでも高精度な津波予測ができることが明らかになった。

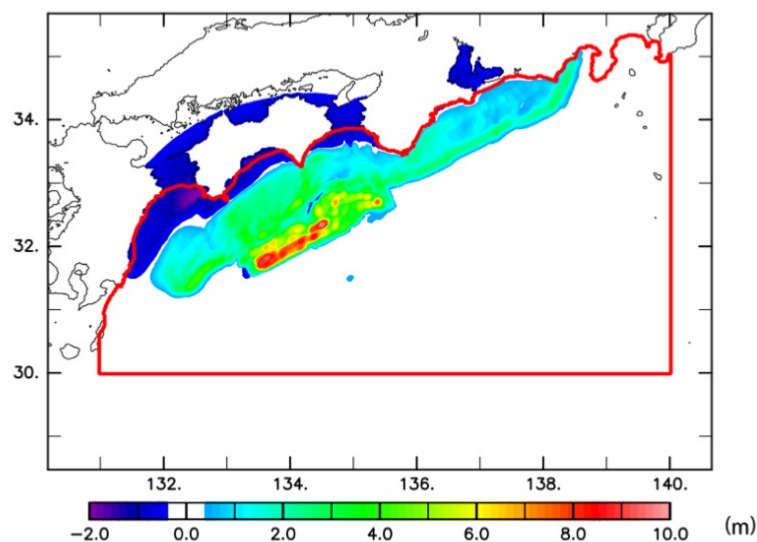


図 3.6 数値実験で仮定した南海トラフ津波の初期波源の海面水位分布。赤実線はインバージョン解析に利用した航空機データの位置の範囲を表す。

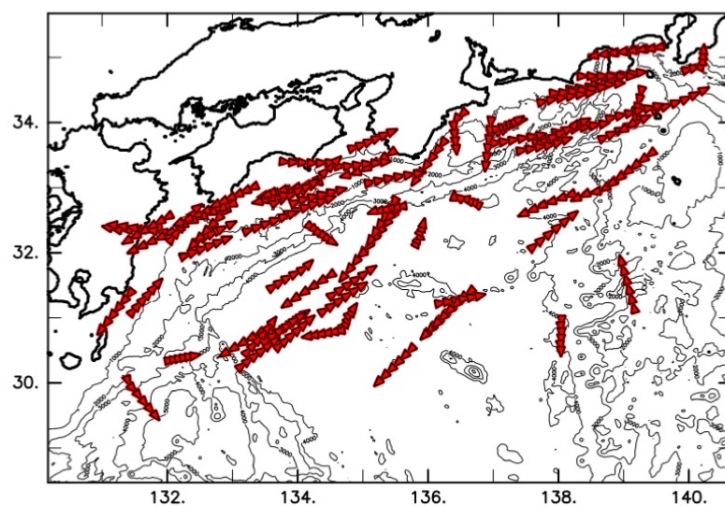


図 3.7 2018 年 7 月 29 日の 12 時～12 時 5 分(日本時間)の 1 分毎の航空機の位置の分布。
背景のコンターは 1000m 毎の水深の等値線を表す。

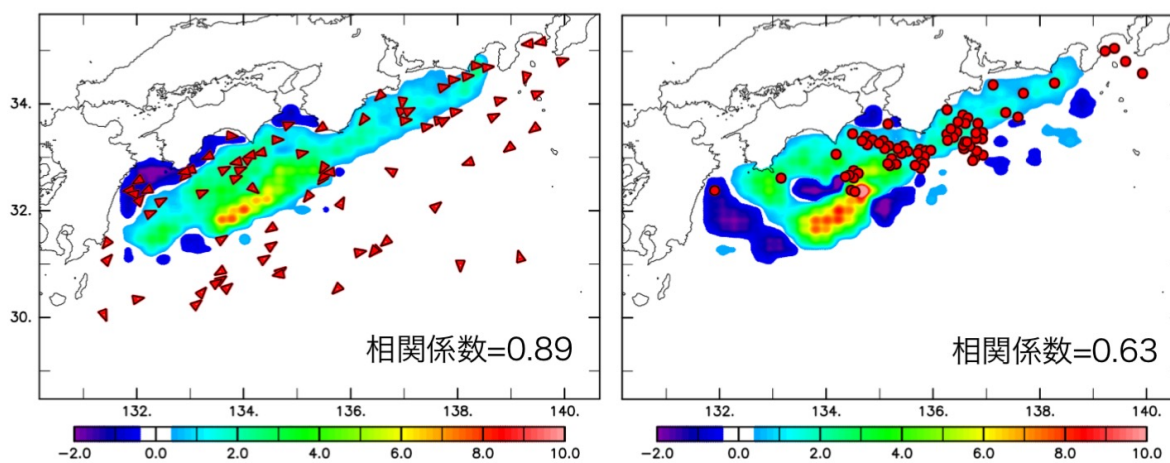


図 3.8 (左) 日本時間 12 時から 15 分間の航空機仮想観測データをインバージョン解析して求められた津波の初期波源の水位分布。赤三角点は航空機の位置を表す。(右) 既存の観測点(DONET と GPS 波浪計)の 15 分間の仮想観測データのインバージョン解析から求められた津波の初期波源の水位分布。赤丸は既存の観測点の位置を表す。

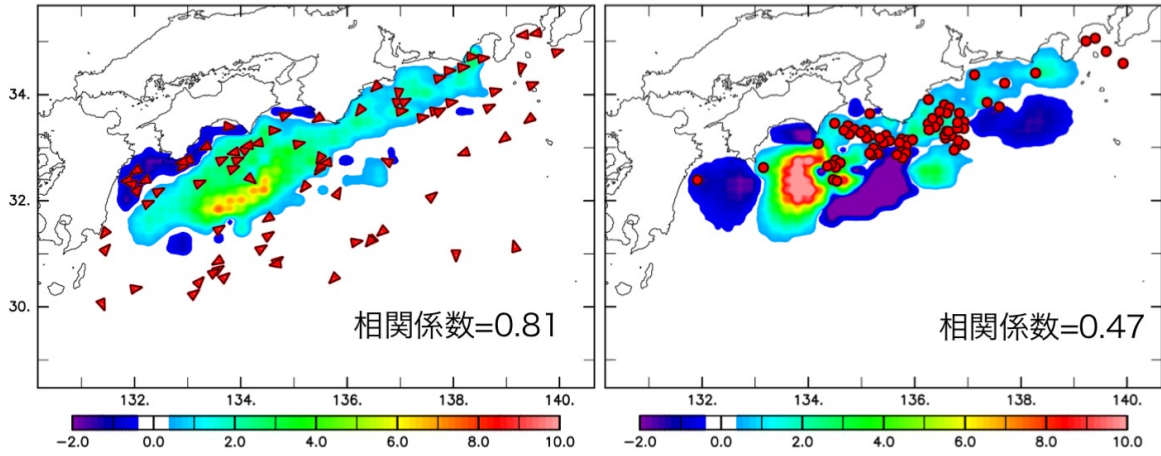


図 3.9 (左) 日本時間 12 時から 5 分間の航空機仮想観測データと(右) 5 分間の既存観測点の仮想観測データから推定した津波波源の水位分布。

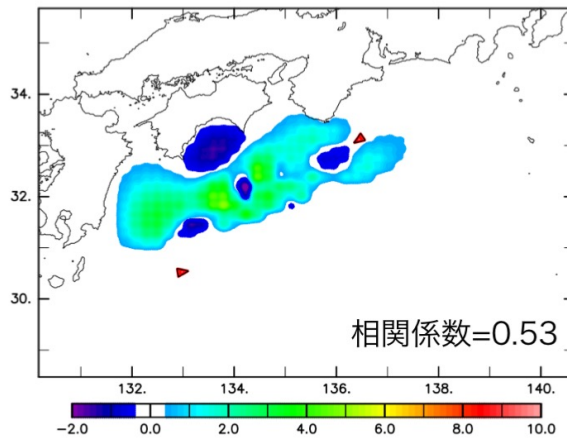


図 3.10 日本時間午前 1 時から 15 分間の航空機仮想観測データのインバージョン解析から推定した津波の初期波源の水位分布。

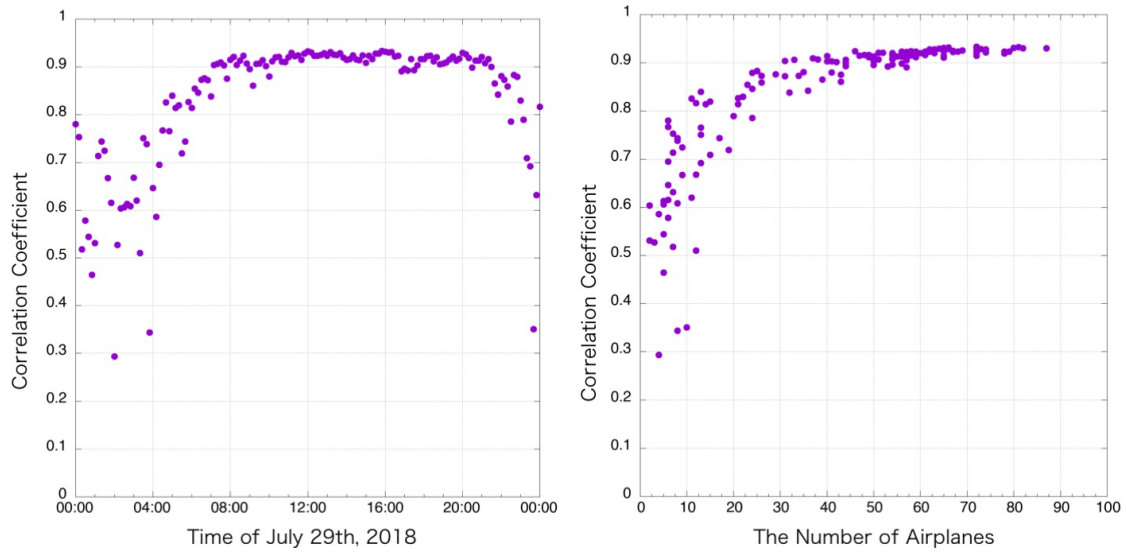


図 3.11 (左) 2018 年 7 月 29 日の日本時間 0 時から 24 時までの 10 分毎の各時刻から 15 分間の航空機仮想観測データのインバージョン解析から求めた津波初期波源の空間分布と元の初期波源の空間分布との相関係数の時間変化。(右) インバージョン解析に使用した航空機データの数と相関係数の関係。

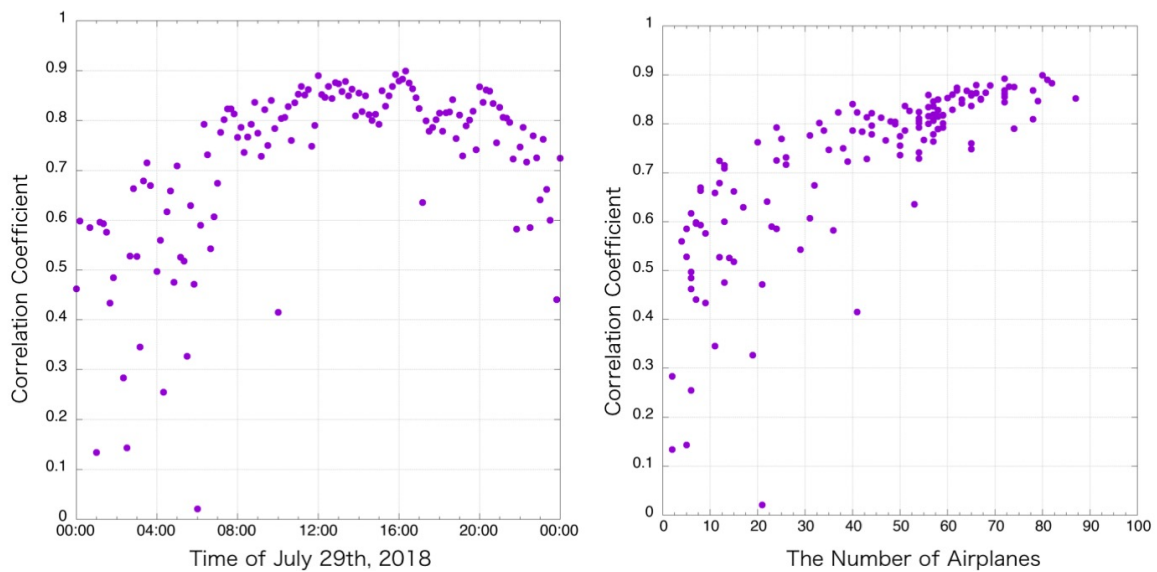


図 3.12 5 分間の航空機仮想観測データのインバージョン解析から求めた津波初期波源の相関係数の時間変化(左)と航空機データ数との関係(右)。

3.3.2 航空機観測データのデータ同化による津波予測

航空機観測データによって津波の予測精度がどの程度向上するか調べるために、データ同化の手法による数値実験も行った[Mulia et al., 2019]。データ同化とは、数値シミュレーションの予測値を時々刻々得られる観測データの情報を使って逐次修正することによって、その予測精度を向上させる方法である。

ここでは前節と同じく、中央防災会議が設定した南海トラフの津波の初期波源を用いて数

値シミュレーションを行い、その中で複数の航空機（計 65 機）を移動させ仮想観測データを取得した。また、ベースとなる第一予測値として、既存の観測点(DONET と GPS 波浪ブイ)の 10 分間の仮想観測データのインバージョン解析から推定した初期波源を使って実施した数値シミュレーションの結果を用いた。この第一予測値の数値シミュレーション計算に航空機の仮想観測データを 10 分間同化させることによって、予測精度がどの程度向上するかを調べた。

図 3.13 はデータ同化シミュレーションで得られた津波の時間発展を示している。第一予測値の初期波源（図 3.13 左上）には存在しない足摺岬沖の正の水位偏差（P1 地点）（図 3.13 左下）が徐々に成長してくるが、これはその上を通過する航空機の観測データの同化によって現れたものである。

図 3.14 は航空機観測データを同化しなかった場合（上）と同化させた場合（右）の沿岸最大波高の分布を示している。航空機観測データを同化しなかった場合すなわち既存の観測点のデータのみから予測した場合は東経 133 度～134 度の四国西部沿岸の津波波高が大きく過小評価される。これは DONET の観測点が四国東部沖に偏っているためである。それに対して、航空機は比較的一様に分布するために、航空機データを同化させることによって四国西部沿岸の過小評価が解消されていることが確認できる。予測値と真値の平均比率で定義される予測精度(Accuracy)も航空機データの同化を行うことによって、66.8%から 86.7%へと大きく向上することが示された。

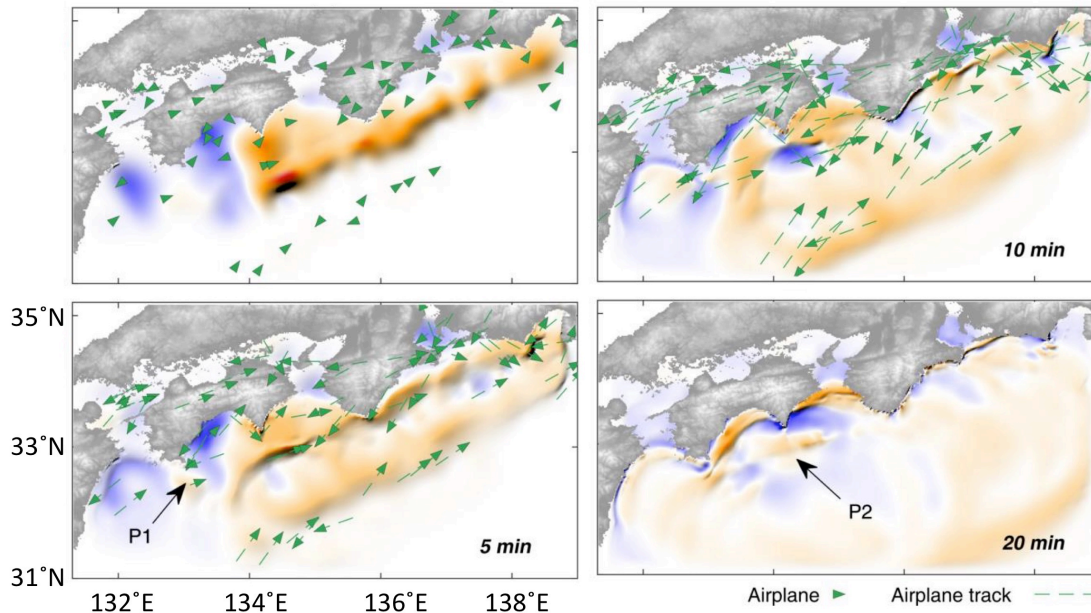


図 3.13 (左上) 既存観測点(DONET, GPS 波浪計)での 10 分間の観測データのインバージョン解析により推定した津波の初期波源分布。(左下) 65 機の航空機観測データをデータ同化することによって得られた 5 分後の津波分布。緑矢印と破線は航空機的位置と 5 分間の航跡を表す。(右上), (右下) それぞれ 10 分後、20 分後の津波分布。

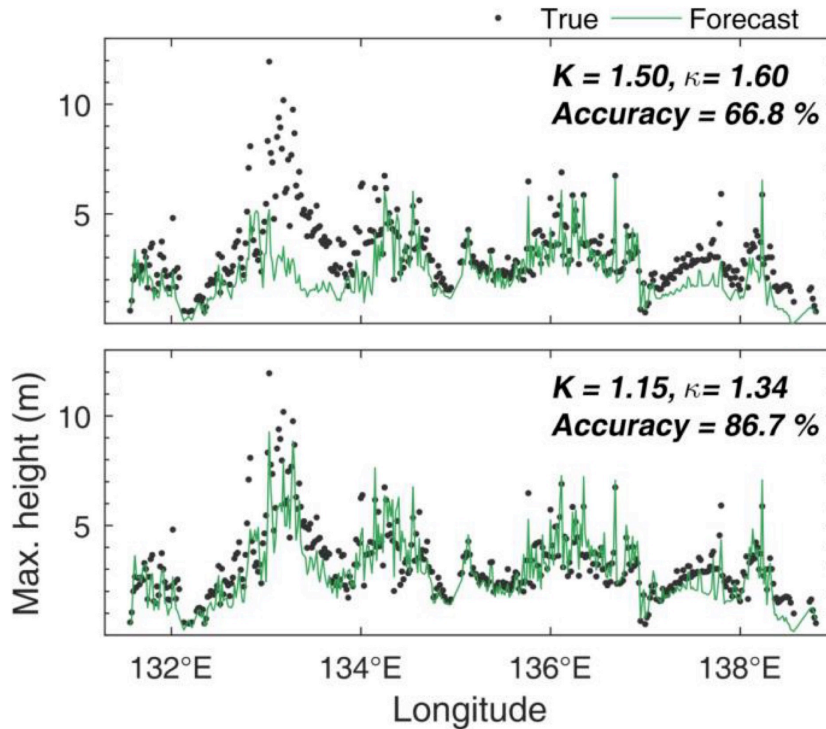


図3.14 (上) 航空機データを同化しなかった場合の沿岸での最大津波波高の経度分布。黒点が予測値、緑線が予測値を表す。(下) 航空機データを同化した場合の最大波高分布。

参考文献

- Baba, T, N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka and T. Kato (2015), Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, **172**, 3455-3472.
- 中央防災会議 (2012), 南海トラフの巨大地震モデル検討会, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report01.pdf
- Gower, J. (2007), The 26 December 2004 tsunami measured by satellite altimetry, *International Journal of Remote Sensing*, **28**, 2897-2913.
- Hirobe, T., Y. Niwa, T. Endoh, I.E. Mulia, D. Inazu, T. Yoshida, H. Tatehata, A. Nadai, T. Waseda, T. Hibiya (2019), Observation of sea surface height using airborne radar altimetry, *submitted to Journal of Oceanography*.
- A new approach for large offshore tsunami detection
- Mulia, I.E., T. Hirobe, D. Inazu, T. Endoh, Y. Niwa, A.R. Gusman, H. Tatehata, T. Waseda, and T. Hibiya (2019), A new concept of tsunami forecasting by monitoring with commercial airplanes (準備中)
- Okal, E.A. (1999) Tsunami detection by satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research*, **104**,599-615.
- Satake, K. (1987) Inversion of tsunami waveform for the estimation of a fault heterogeneity:

- method and numerical experiments, *Journal of Physics of the Earth*, **35**, 241-254.
- Song, Y.T., I. Fukumori, C.K. Shum, Y. Yi (2012), Merging tunamis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected over the open ocean, *Geophysical Research Letters*, **39**, L05606, doi:10.1029/2011GL050767.
- Tsushima, H. and Y. Ohta (2014), Review on near-field tsunami forecasting from offshore tsunami data and onshore GNSS data for tsunami early warning, *Journal of Disaster Research*, **9**, 339-357.

4. 航空機を利用した津波観測の実装に向けたヒアリング調査

航空機搭載レーダーによる津波監視システムの社会実装を実現する上で、どのような実装形態が可能でどのような課題があるかを洗い出すために、ステークホルダーとなる産学官民の機関へヒアリング調査を実施した。主に法的側面や国としてのニーズ、実装までの戦略等の相談として省庁関係各所に、実際の旅客機に搭載するにあたってのコストや技術的側面について、民間航空機会社や航空機機器メーカーにヒアリングを行った。またヒアリングの過程で無人航空機利用の可能性についても明らかとなってきたため、各種研究機関や民間会社への調査を行った。調査対象とした各種機関と目的を図4.1と表4.1に記す。

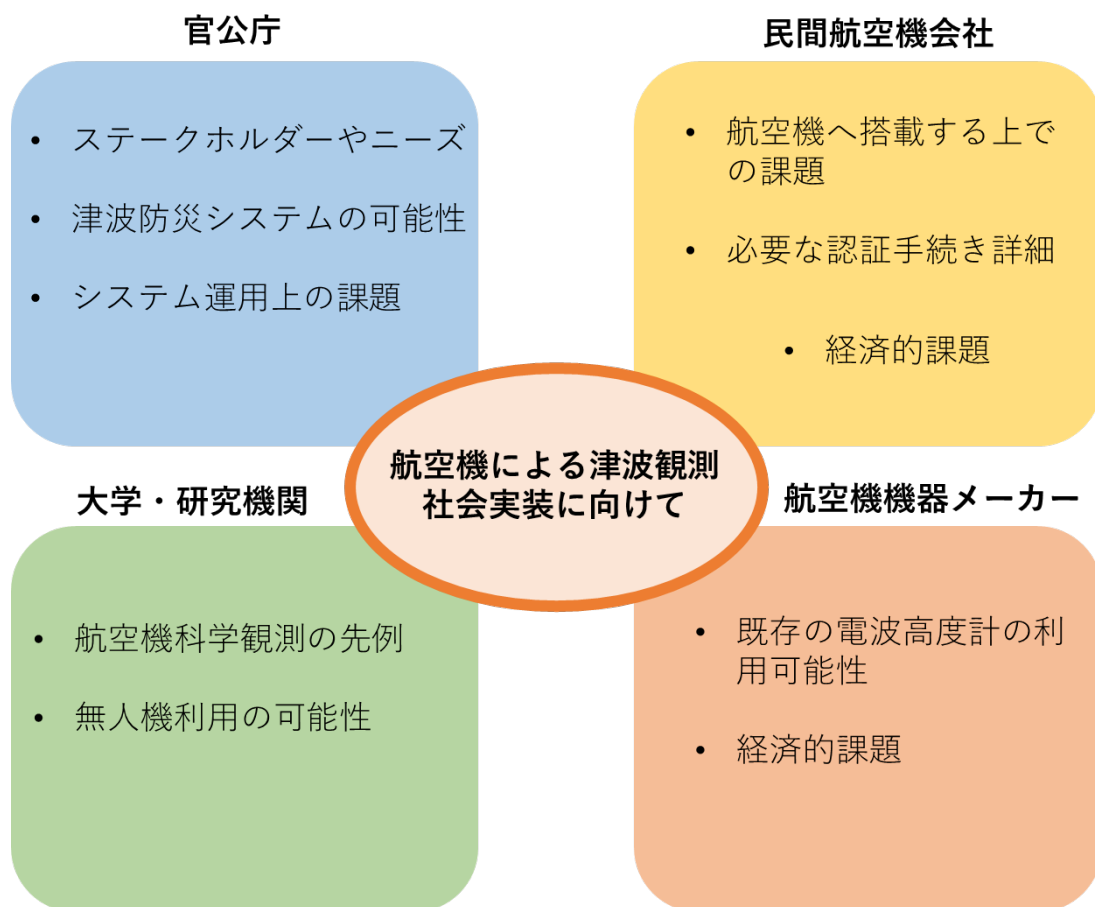


図 4.1 航空機津波観測の社会実装に向けて実施したヒアリング調査の対象となるステークホルダーとヒアリング目的。

表 4.1 ヒアリング調査対象と聞き取り内容一覧

ヒアリング対象	内容
内閣府 総合海洋政策推進事務局	ステークホルダーやニーズに関して
国土交通省 航空局	実際に旅客機に新たに電波高度計を搭載することの可能性と問題点について
文部科学省 地震・防災研究課	津波防災システムの観点からのヒアリング
気象庁	システム運用上の課題について
民間航空調査会社	実際に旅客機に搭載する際に必要な STC 認証取得手続き詳細について
民間航空機会社A	航空機搭載可能性と問題点について
民間航空機会社B	航空機搭載可能性と問題点について
国立環境研究所	航空機への科学測器設置の先例について
航空機機体メーカー	航空機機体メーカー側の意見伺い
航空機電子機器メーカー	航空機高度計メーカー側の意見伺い
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)	無人航空機の現状動向・本システム実装可能性について
無人機メーカー	無人航空機 (中型) 利用可能性について

4.1 ヒアリング結果概要

各機関に対するヒアリング結果を列挙する。

■内閣府 総合海洋政策推進事務局

調査目的： ステークホルダーやニーズに関する調査
ヒアリング結果
<ul style="list-style-type: none"> 各分野でヒアリングを行うことを推奨。 現在の津波防災システムを担う防災科学研究所や気象庁などの関連コミュニティと密着してうまく連携してやるべき。 海洋政策として海洋状況把握(MDA)の能力強化が求められており、国土保全や孤島の浸食を監視するために上空からのレーダー観測は興味がある。

■国土交通省 航空局

調査目的： 民間航空会社へのヒアリング調査前段階としての意見伺い
ヒアリング結果
<ul style="list-style-type: none"> 航空機改装費用は想像以上に高コスト、安全性確保のために多くの試験が求められる。1機につき 5000 万以上かかるかもしれない。 大量の機体への実装には時間がかかる。例えば旅客機への Wi-Fi サービス機器の搭載

なども、数十年のレンジで少しずつ搭載を進めていっている現状。

- ・ 旅客機に搭載されている電波高度計は離着陸時のみ使用されており、通常の運航高度では使用できない。
- ・ 近年大型ドローンの使用も現実味を帯びてきており、可能性がある。

■文部科学省 地震・防災研究課

調査目的： 津波防災システムの観点からの意見伺い

ヒアリング結果

- ・ システムを構築、運用するための費用をどのように確保するかが一つの課題だろう。
- ・ 航空機で社会実装をしていくステップとして、まずは SATREPS（地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム）に応募して途上国支援の過程で実証実験を積む手も考えられる。
- ・ 実証実験を重ねて実際のデータが増えてくれば、津波防災システムを運用する気象庁とも話がしやすいだろう。
- ・ 現在の地震・津波観測監視システム DONET などの寿命が 25 年程度であるため、航空機レーダー津波監視システムの精度・安定性・費用が良いものであれば、将来的に代替システム候補となりえるだろう。

■気象庁

調査目的： 津波予測システム運用上の課題について

ヒアリング結果

- ・ 観測体制を継続的に維持するための費用の捻出をどのようにするか
- ・ 航空機会社側とどのように提携・協力体制を築いてゆくか
- ・ どの程度の遅延時間でデータが取れるかが重要
- ・ データ欠測などが頻繁にあると難しい

■民間航空調査会社

調査目的： 実際に旅客機に搭載する際に必要な STC 認証取得手続き詳細について

ヒアリング結果

- ・ STC 取得に当たっては数年分ほどの実証実験データの積み重ねが必要だろう
- ・ STC 取得経験のある企業から助言を受けるべき

■民間航空機会社A

調査目的： 航空機搭載可能性と問題点について

ヒアリング結果

- ・ 既存の電波高度計は機体購入時にすでに取り付けられているものであり、航空機会社側で改造は不可能

- ・ 新規レーダー設置は十分な安全性とメンテナンスコストを取る必要が生じるため、一般的な同製品よりも通常2桁程度は高コストとなる
- ・ 例えば機内 Wi-Fi サービスを提供するための新規機器設置のためには、1機につき数億円程度の搭載コストがかかっている
- ・ アンテナ用の穴を機体にあけることは整備プログラムの変更も要しハードルが高い
- ・ 航空機会社側としては入口で話の否定はしないが、実際に認証取得など整わなければ動けない

■民間航空機会社B

調査目的： 航空機搭載可能性と問題点について

ヒアリング結果

- ・ データサイズ次第だが、既に搭載されている Wi-Fi サービスでの地上局との通信は可能
- ・ 近年航空局は修理改造検査を認めない方針なので、最初から STC を狙う方が良い
- ・ STC 取得の際は厳しい安全性の証明のため、強度・耐火性・電波干渉影響・様々な環境下での稼働可能性などを試験する必要がある、使用する部品も強度や耐火性に優れた特殊な物に限定される
- ・ レーダー製造は電波技術に明るく、STC 取得経験のある製造会社に相談するのが良い
- ・ 認証さえパスできれば、アンテナのための穴を機体にあけることは可能

■国立環境研究所

調査目的： 航空機搭載科学計測の先例について

ヒアリング結果

- ・ STC 取得には実証実験データの積み重ねはさほど重要ではないが、運用に耐えうる機器の開発には5年程度は欲しい
- ・ STC を1つ取得するのに数千万～1億程度かかっている（STC+旅客機改造費用）
- ・ 航空機会社側には社会貢献として協力してもらえるように理解を募ることが大事

■航空機機体メーカー

調査目的： 航空機機体メーカーとしての意見伺い

ヒアリング結果

- ・ 防災という観点だけでは資金確保が難しく、メーカーだけでは判断が難しい
- ・ 国が主体的に動いてくればメーカー側としては動きやすい
- ・ 開発設計の初期段階であれば、新規システムでも取り入れやすい

■航空機電子機器メーカー

調査目的： 航空機電波高度計メーカーとしての意見伺い

ヒアリング結果

- ・ 航空機電波高度計は航空機旋回時にも直下点を捉えられるように、幅広いビーム幅を持つ
- ・ レーダー反射の弱い山間部などでも距離保証を取る必要があり、また高高度利用のニーズがないため、高度 5000m 程度が利用制限仕様となっていることが多い
- ・ 海面に限れば強い反射が見込めるため、現状の仕様でも上空 10000m 以上の高高度でも利用できる可能性はある

■宇宙航空研究開発機構（JAXA）

調査目的： 無人航空機の現状動向・本システム実装可能性について

ヒアリング結果

- ・ JAXA で監視や防災対策用に研究開発を進めていた無人機は予算の目途が立たずに中断している。
- ・ エアバス社の Zephyr などの solar plane は現実的になってきたが、低速であり、日射時間の関係から高緯度帯での運用に多少制限がある
- ・ 完全自動操縦の無人機利用の法整備はまだできておらず、2020 年代作成予定の国際標準を待つ必要がある

■無人機メーカー

調査目的： 無人航空機（中型）利用可能性について

ヒアリング結果

- ・ 速度 30m/s、航行高度 3000m、航行時間 6 時間程度、ペイロード 5kg 程度あたりが固定翼 UAV の基本スペックである模様
- ・ 各条件トレードオフである程度調整可能
- ・ パラシュート発進・カタパルト発進は震災時に使えなくなる滑走路依存が少なくなり有利、緊急発進に適切か
- ・ 5m/s 以上の横風や乱気流などの気象条件に弱い点が不利
- ・ 機体価格は 4000 万円～1.5 億円、レンタルで数日数百万円

4.2 ヒアリング結果のまとめ

ヒアリングの結果、航空機搭載レーダーによる津波監視システムの社会実装を実現する上で、図 4.2 のような 3 つの実装形態 (1~3) が考えられ、それぞれに大きく 3 つの課題 (A~C) が存在することがわかった。

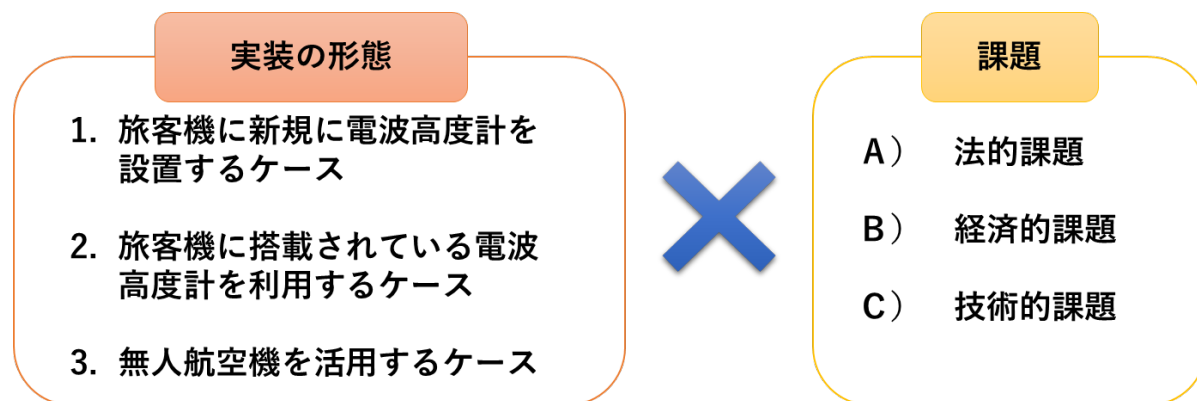


図 4.2 航空機搭載レーダー津波監視システムの社会実装： 3 つの実装形態と 3 つの課題

各実装形態において存在する課題について、表 4.2 にまとめる。とりわけ、1, 2 の旅客機をプラットフォームとするケースにおいて、A の中心課題である STC^(※) 取得手続きの問題、さらにそこに付随する経済的課題が大きな問題となることが浮かび上がってきた。一方で、3.の無人航空機の活用についてはまだまだ発展途上の部分も多いが、将来的には広く普及し、上空からの観測手段の一つとして十分利用できる可能性を秘めている。航空機レーダーによる津波観測の将来展開における各ステークホルダの役割について図 4.3 にまとめる。各実装形態の詳細に関しては次の章で説明する。

※ Supplemental Type Certificate (STC)とは

STC とは日本語では追加型式設計承認とも呼ばれるものであり、既存の機体に機体メーカー以外のものが変更を加えるための制度である（航空法第 13 条 2 号、航空法施行規則第 23 条）。機体に何らかの改造を加えた場合、その都度十分に安全性が確保されていることを証明するための検査を受ける必要がある。しかし、同型の機体に対して同型の製品を追加する場合、各機体に対して厳密な検査を行うことは手間である。ひとたび STC を取得すれば、一部の検査を省略することができる。

表 4.2 航空機搭載レーダーによる津波監視システムの社会実装の実装形態とその課題

	1. 旅客機に新規に電波高度計を設置するケース	2. 旅客機に搭載されている電波高度計を利用するケース	3. 無人航空機を活用するケース
	STC (追加型式設計承認)		
A) 法的課題	<p>旅客機のSTCの安全基準を満たす電波高度計を新規に開発する必要がある。</p> <p>開発にはSTC取得経験が豊富な専門業者と共同に行うことが必要、高い安全基準を満たすために開発にはコストがかかる。</p> <p>・新規にアンテナを設置するため、機体に穴を空けるなどの改造も必要となり、1機当たり5000万円から1億円程必要となる。 (リース機の場合は改造自体が難しい。)</p>	<p>取得の必要性</p> <p>既存の電波高度計を、STC基準を満たしたうえで、洋上高高度に対応可能でGPSと連携できるように改造する必要がある。</p>	<p>大型無人機の法整備は未整備、2024年に国際基準が定まる予定。</p>
B) 経済的課題	<p>既存の電波高度計を改造し、再度STC取得のための試験及び審査を受けるための費用が必要となる。</p> <p>機器メンテナンスの採算をどのように確保するか。</p> <p>長期運用のためには国、航空会社及び社会の理解と経済的支援が必要不可欠。</p>		
C) 技術的課題	<p>地上局とのリアルタイム通信や各機体での観測データの統合・後処理などのシステム実証が必要。</p> <p>無人機自体の安定的な長時間飛行はまだ開発段階。</p> <p>可能か実証試験が必要。</p> <p>長期運用のためには、津波検知以外の目的でも通常時取得した海面高度データを有効活用する必要がある。</p>		

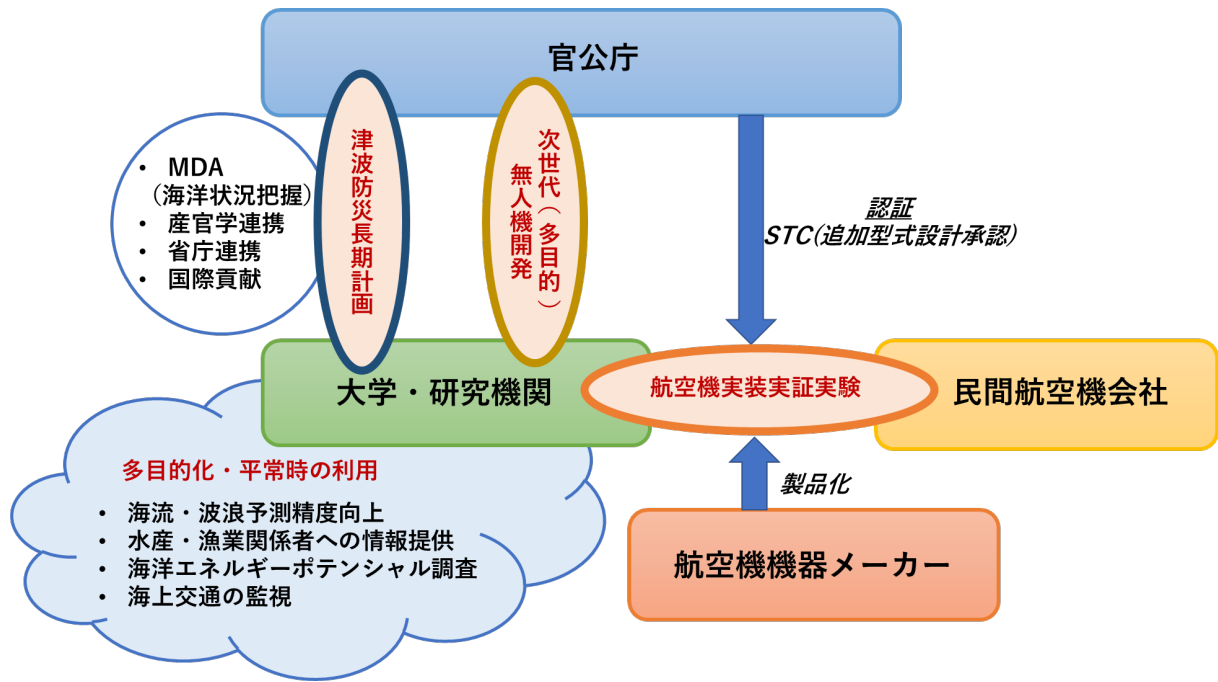


図 4.3 各ステークホルダーの役割と将来展開

5. 航空機を利用した津波観測の実装の形態と課題

前章のヒアリング調査の結果から、図 4.2 や表 4.2 に示す通り航空機津波観測の実装形態として、①旅客機に新規に電波高度計を設置するケース、②旅客機に既に搭載されている電波高度計を利用するケース、③無人航空機を活用するケース、が考えられる。ここでは各ケースの実装形態の詳細とその課題について述べる。

5.1 旅客機に新規に電波高度計を設置するケース

5.1.1 実装の形態

航空機に新たに電波高度計を組み込むケースの実装イメージを図 5.1 及び 5.2 に示す。レーダーアンテナは送信用と受信用にそれぞれ 1 枚ずつ設置する必要がある。機内には解析処理装置を設置する必要があるが、軽量、小型で低出力な装置で十分である。検討の詳細については次章で述べる。海面高度を正確に観測するためには、レーダーによる海面との間の距離推定に伴い、機体の絶対高度を取得するための GPS 解析を行う必要があり、これらの連携が必要となる。GPS 機器は、すでに航空機に取り付けられている機器を利用できる可能性もあるが、GPS 解析精度は海面高度の観測精度に大きく影響するため、利用する GPS 受信機・アンテナは 2 周波以上に対応した高精度なものであることが望ましい。

機上で算出された海面高度データは、その観測時刻と位置と共に地上局へ送信される。地上局では複数航空機からの観測データが収集される。津波が起きた際にはこれらのデータを統合し、3.3 節の数値シミュレーションによる迅速な津波予測が行われる。

5.1.2 実装上の課題

・アンテナ設置に伴う機体の改造

機体の胴体下部に設置するアンテナは 20cm 四方の薄い板状のものである。そのため、機体に直接張り付ける、もしくは小さなレドームの設置のみで取り付けることが可能で、飛行上大きな問題となるような過大な空気抵抗は生じない。アンテナ設置の際は機体にネジ穴とケーブルコネクタ用の穴を通す改造を施す必要があり、機体自体の強度計算やメンテナンス工程の増加などが生じるため、STC 取得の上でもコスト的にも大きな課題の一つとなる。

・GPS データのリアルタイム高精度解析

GPS 情報も単独測位では誤差が大きくなるため、何らかの外部の補正データを用いた高精度解析が必要となる。3.1 節で行った航空機観測では、地上の電子基準点データを補正データとして用い、航空機の IMU データによる補正を加えたハイブリッド解析により航空機の絶対高度を 10cm 以下の精度で求めた。

電子基準点の補正データは衛星回線を通じてリアルタイムに取得することが可能であるため、機上でのリアルタイムな GPS 高精度解析も可能である。また、2018 年度末から日本の準天頂衛星みちびきが 4 機体制での実用サービスが開始した。みちびき衛星から送信される、高精度測位に必要な補正データを活用することができれば、センチメートル級の測位精度で機上でのリアルタイム解析が可能になると期待される[三神, 2018]。現在みちびき衛星の電波に対応可能で、小型軽

量な GPS 機器の開発が進められているところである。

- ・データの地上転送方法

機上で取得した海面高度データを迅速な津波予測に利用するためには、データをリアルタイムに地上へと送信する必要がある。これは旅客機を利用する場合にも無人機を利用する場合にも共通に存在する課題である。沖合上空での観測となるため、データの転送には衛星通信を用いることが考えられる。旅客機の場合、現在多くの航空機にて利用が拡充されつつある機内 Wi-Fi サービスを利用できる可能性がある。衛星を使った回線では利用可能な通信帯域幅は狭く、機上からの海面高度データの送信量は極力抑える必要がある。レーダーの信号波形そのものは膨大なデータ量となるため、機上において解析を行い、海面高度を算出する必要がある。精確な海面高度算出のためには、ある程度精確な GPS 高度算出処理も同時に必要となる。地上局で複数航空機の海面高度データを統合する際に最低限必要な情報は、時刻、航空機の緯度経度と観測された海面高度情報であり、1 レコードにつき必要なデータ容量はせいぜい 50 byte となる。例えば 1 秒間隔で地上へ送信すれば、データ転送量は 400 bps 程度となり、航空機の標準的な巡航速度は 200 m/s～250 m/s を考慮すれば、数百メートル間隔で観測データが送信されることとなる。

- ・民間航空会社との協力体制

今回 3.1 節で行った航空機観測では、特定の観測専用航空機に修理改造検査と呼ばれる手続きを通して観測機器を取り付けたが、複数の旅客機に搭載する場合はより厳しい STC 審査が必要となる。科学観測を目的とした装置を実際の旅客機に導入し運用している先例として、大気中 CO₂ 濃度を連続観測する事を目的とした CONTRAIL(Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner) プロジェクト (<http://www.cger.nies.go.jp/contrail/>) が挙げられる。2019 年 3 月時点で JAL 航空会社の 10 機の機体に CO₂ 濃度観測装置が搭載され、観測が続けられている。このような科学観測は社会貢献の側面を持っており、民間航空会社としても大きなリスクやコストが生じない限りは受け付けられる。もちろんこのような航空会社は民間企業であるため、長期的に運用していくためには民間航空会社側の理解が不可欠である。

- ・社会的コンセンサス

近年旅客機に対する安全要求は厳しくなっており、旅客機 1 機からの試験運用であっても、スタートラインの段階で厳格な STC の取得が求められる。搭載する測器にはファーストステップから高い品質が求められ、そのために数億円以上の多大な予算と 5 年以上の開発・試験期間が必要となると考えられる。多額の資金調達が必要となり、複数の民間航空会社や開発メーカーの協力が長期間求められる、国家主導の大型プロジェクトとして進めていく必要がある。

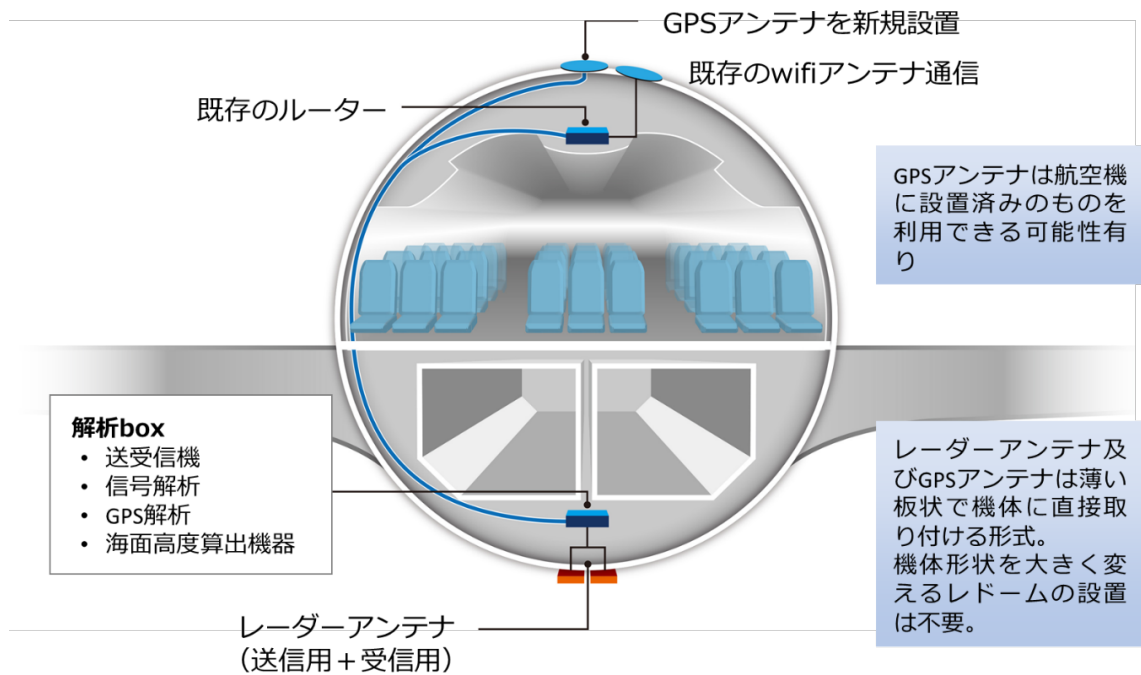


図 5.1 新規に電波高度計を搭載する場合の実装イメージ（航空機断面図）

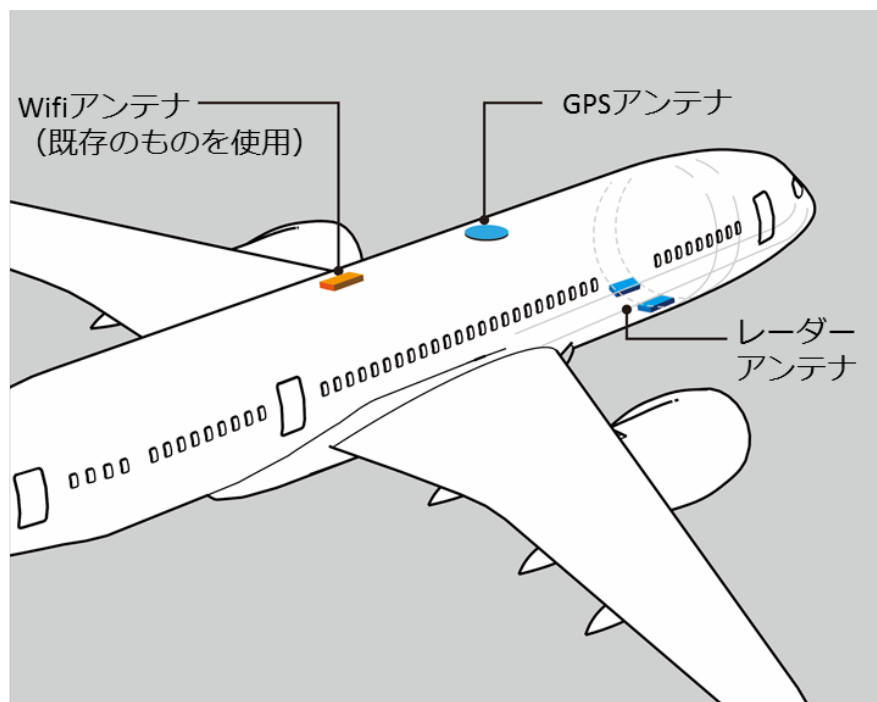


図 5.2 新規に電波高度計を搭載する場合のアンテナ配置イメージ

5.2 旅客機に搭載されている電波高度計を利用するケース

5.2.1 実装の形態

前節では新規に電波高度計を設置することを想定したが、実際のところは全ての旅客機に既に電波高度計が備えられている（図 5.3, 5.4）。航空機に搭載されている電波高度計の情報は、対地

接近時の警告やオートスロットルシステムによるエンジン出力自動制御などに使われている。電波高度計の送受信アンテナは、機首よりやや後方の機体胴体下部付近に配置され（図 5.5）、通常は安全面の冗長性のため 3 セット程度取り付けられている。このように飛行制御にかかわる装置であるため、機体の製品化段階における必須装備として備えつけられているものである。

航空機で使用される電波高度計の利用周波数帯は航空法により 4.2GHz から 4.4GHz までの間（C バンド）と定められており、今回 3.1 節で行った 9.6GHz の周波数（X バンド）での観測とは異なる周波数帯であるが、同様の FM-CW レーダーが用いられており原理的には海面高度観測が可能である。航空機の標準的な巡航高度である上空 12000m 付近においても海面高度の観測が可能であれば、航空機搭載の GPS 機器と連携することで、新規に電波高度計を設置する場合と同様に、機上で海面高度を算出し、Wi-Fi 機器を通じた衛星通信によって地上へリアルタイムに海面高度情報を届けることができ、地上で統合したデータをもとに迅速な津波被害予測と警報が可能となる。

5.2.2 実装上の課題

・既存の電波高度計の利用可能性

既存の電波高度計は基本的に離着陸時の距離計測や山間部を飛行する際に安全な距離を保てるようにする目的で設置されており、比較的低高度での使用が想定されている。高高度では、電波高度計を用いた地上との絶対距離算出は行わず、気圧高度の測定によって高度を保ち、他の旅客機との距離を保った安全な航行を確保している。このような背景があるため、多くの電波高度計は高々上空 5000m 程度までが仕様上の限界とされている。

しかし、地面や山間部を対象とした場合に比べ、海面からの電波の反射は数十倍もの大きさとなる。既存の電波高度計についても、海上での測定に限れば、現在の性能でも十分に上空 12000m 程度の標準巡航高度で直下距離観測ができる可能性がある。（詳細は 6.1 節）そのため、わずかな改造で津波観測に利用できる可能性が高い。今後利用可能性に関する実証検討が必要である。

・既存の電波高度計の改造

将来的に、GPS と連携可能で 12000m 程度の通常運行高度でも洋上の海面高度の観測が可能な製品を、旅客機へ標準搭載する電波高度計として置き換えることができれば、多数の航空機へ搭載し世界的に展開してゆくための法的課題や経済的課題は少なくなると考えられる。しかし、上述の通り既存の電波高度計は旅客機の安全運行上重要な装置の一つであるため、これに航空機の安全運行とは関係のない機能を加えるということ自体が大いにハードルが高く、実現のためには各方面への深い理解を求めていく必要がある。

・民間航空会社やメーカーとの協力体制

機体の標準装備品の電波高度計を利用する以上、機体製造会社の The Boeing Company（米国）や Airbus SE（仏国）の協力が必要となる。また、現在民間航空機に取り付けられている電波高度計の多くは、米国の Honeywell International, Inc. や Collins Aerospace、仏国の Thales S.A. の製品である。例えば、Boeing787 の機体には Honeywell 社製の電波高度計、ALA-52B が標準搭載されて

いる（図 5.3）。これらの企業の理解を得て協力を求める必要がある。このように多国籍の企業の協力が不可欠で、実現のためにはグローバルレベルでの動きが必要となるが、実現した際には、新規に電波高度計を設置するケースと異なり、民間航空機会社の違いによらず、多くの航空機への普及は容易となると考えられる。

- GPS データのリアルタイム高精度解析
新規に電波高度計を設置するケース（5.1 節）と同様。
- データの地上転送方法
新規に電波高度計を設置するケース（5.1 節）と同様。

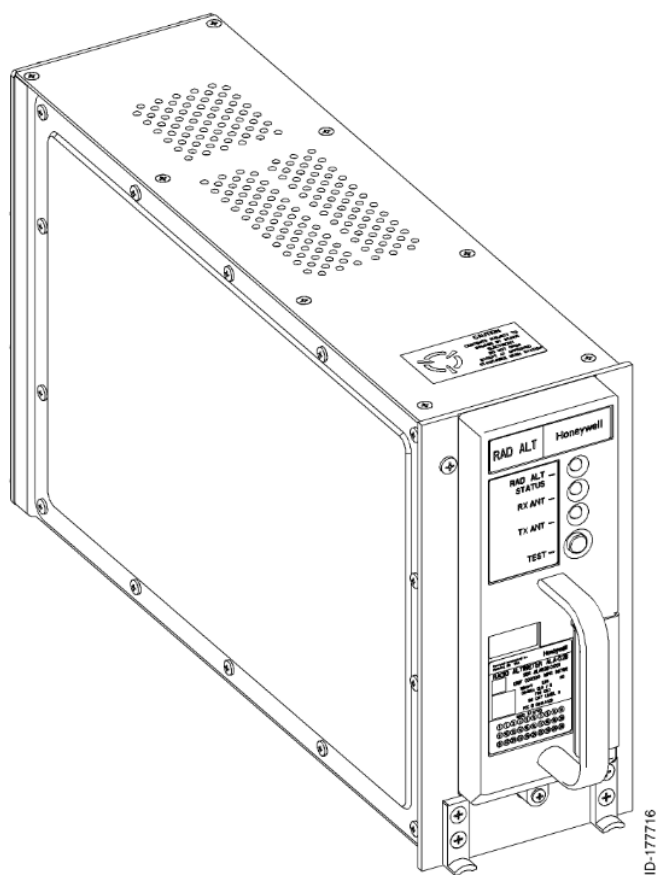


図 5.3 Boeing787 に搭載されている Honeywell 社製の電波高度計（FM-CW レーダー）ALA-52B。4.3GHz の周波数帯で高度 5000 ft (1524 m) が仕様上の測定限界。ALA-52B2 Users Manual (Radio Altimeter) by Honeywell International より引用。

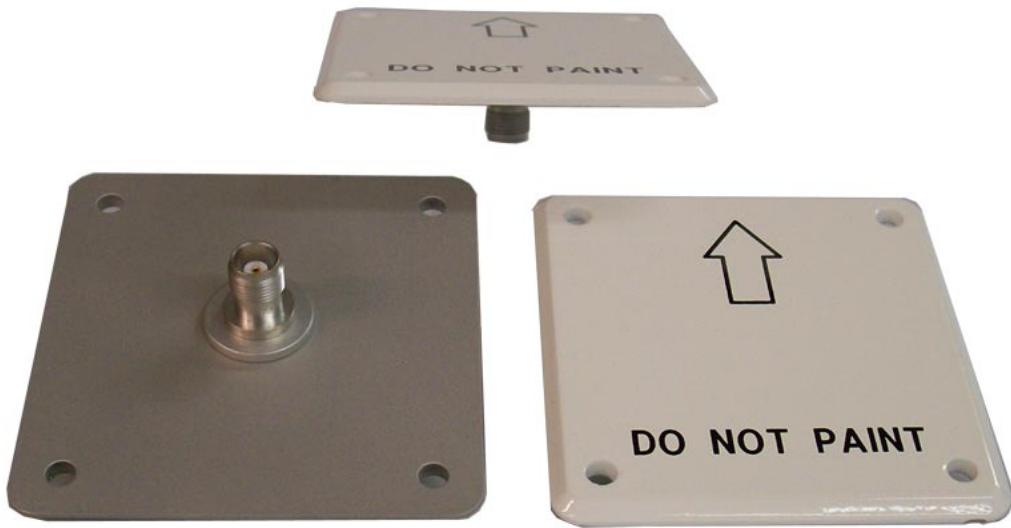


図 5.4 Boeing 727 に搭載されている U B Corp.社製の電波高度計アンテナ RAA ADS43010
(<https://www.ubcorp.com> より)

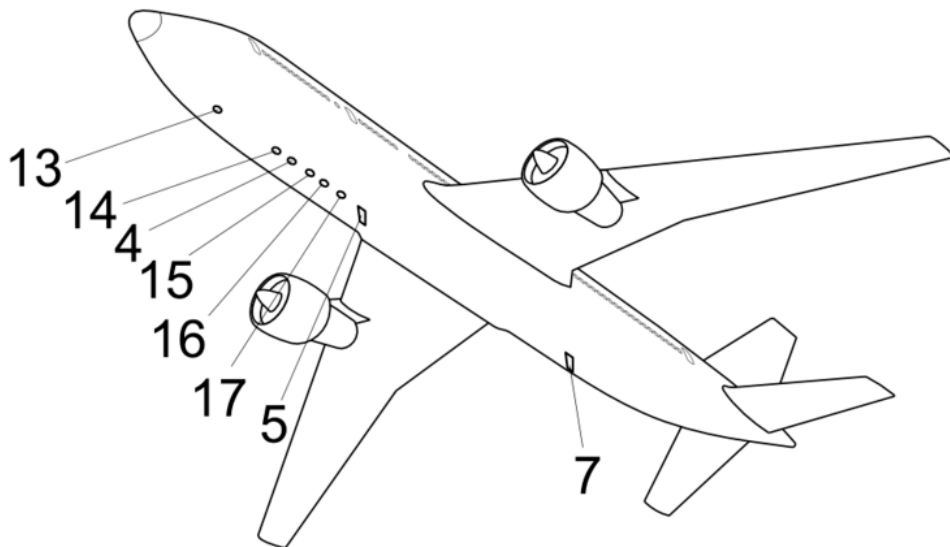


図 5.5 Boeing 777 に搭載されている機体アンテナ配置 [日本航空広報部, 2005]。15 番が電
波高度計送信用アンテナ、16 番が電波高度計受信用アンテナ。

5.3 無人航空機を活用するケース

5.3.1 実装の形態

無人航空機については様々な大きさの形態があり (図 2.4)、どのように運用するかについては

機体のサイズや種類に応じて考える必要がある。無人航空機を利用して沖合で津波を捉える場合、数百キロ以上の距離を連続飛行できることが望ましい。その点を考慮すると、現在広く普及している電動の小型回転翼ドローンは航行時間がせいぜい1時間程度で航行速度も遅いため津波観測には向かず、翼幅3m以上の中型固定翼の無人航空機の利用が考えられる。このような中型固定翼の無人航空機は、12時間程度の連続航行が可能であり、滑走路を使わずカタパルト発進できるものもあるため、地震発生後すばやく沖合に向けスクランブル発進して到来する津波を早期に検出することが考えられる。

さらに大型の無人航空機として、最近では太陽光エネルギーを駆動源として高高度の成層圏を長期間連続的に自律飛行できる無人航空機 (solar plane) の研究・開発も精力的に進められている。2018年にはAirbus社のZephyr Sが約一か月にわたる連続飛行に成功している[Airbus Defence and Space, 2018]。このような高高度を長期滞在する無人機による観測は、大域的だが精度が低い衛星観測と、高精度だが局所的な地上観測の間のギャップを埋める手段として古くから提唱されていたが(High Altitude Long Endurance (HALE) [Hall et al., 1983])、近年その実現が急速に現実味を帯びてきている。将来的にはこのような長期滞在型の無人航空機による津波監視網の構築も考えられる。

5.3.2 実装上の課題

・国際標準の策定

日本では2015年9月に航空法の一部が改正され、無人航空機に関する飛行ルールが新たに導入された。人口密集地や空港などの重要拠点以外で、かつ高度150m以下の有視界下での運用の場合は特に申請など不要であるが、それより上空で運用する場合は有人機との衝突の恐れが生じるため、飛行の際には国土交通大臣の許可が必要となる(図5.5)。夜間における飛行や無視界飛行の場合も同様に承認が必要となる。津波を検知する目的では、電波高度計レーダーのフットプリントを確保する必要があるため、ある程度上空の高度を飛行することが望ましく、許可申請が必要となる。

大型無人航空機の場合、現在日本では有人機に倣ったものとして扱われるため、改造のための手続きなども旅客機並みの厳格なものとなり取り扱いは難しい。現在大小無人機を含めた国際的な標準化が協議されており、2020年代を目標として策定が進められている。

・solar planeの制約

solar planeは太陽光のみを運航エネルギーとすることから、旅客機ほどの速度を出すことは難しく、10 m/s ~ 30 m/sの速度で運行することになり、多少機動性は落ちる。また、高緯度帯では日射量は少な目となるため運航は制限される。さらに日本の緯度帯において上空2万メートル付近の成層圏で運用するケースでは、冬季の強い風の影響も厳しい制約となる。

・GPSデータのリアルタイム高精度解析

新規に電波高度計を設置するケース(5.1節)と同様。

・データの地上転送方法

新規に電波高度計を設置するケース（5.1 節）と同様。

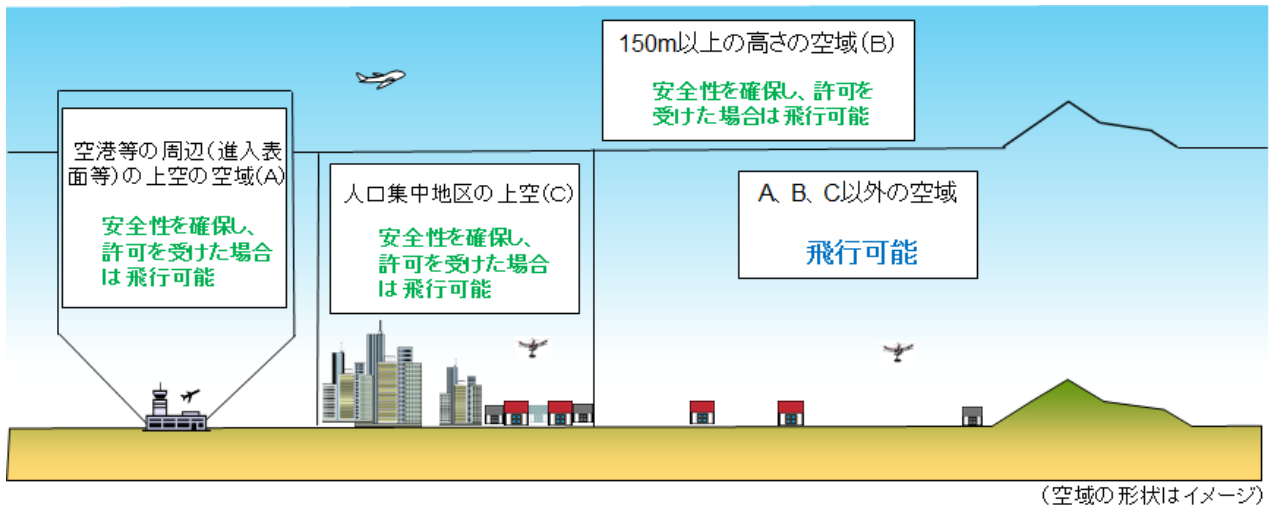


図 5.5 無人航空機の飛行許可申請が必要となる区域。国土交通省 HP (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000041.html) より引用。

参考文献

- Airbus Defence and Space (2018), Airbus Zephyr Solar High Altitude Pseudo-Satellite flies for longer than any other aircraft during its successful maiden flight, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/08/Airbus-Zephyr-Solar-High-Altitude-Pseudo-Satellite-flies-for-longer-than-any-other-aircraft.html>
- Hall, D.W., C.D. Fortenbach, E.V. Dimiceli, and R.W. Parks (1983), A preliminary study of solar powered aircraft and associated power trans, NASA Contractor Report 3699, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840005126.pdf>
- 三神 泉 (2018), 準天頂衛星システム(QZSS)の測位補強サービスとその利用について, 日本航空宇宙工業会会報「航空と宇宙」2月号
- 日本航空広報部 (2005), 最新航空実用ハンドブック, 朝日ソノラマ

6. 航空機搭載レーダーシステムの検討

ここでは、旅客機、民間航空機から無人航空機（UAV）への搭載も可能な海面高度レーダーシステムの概念設計を検討する。要求される設計要件として、航行高度 1000 m–22000 m の幅広い範囲に対応可能で、巡航時の航空機体のロール、ピッチ変動の影響を受けず、中型無人機にも搭載できる小型かつ軽量で電力消費の少ない低出力のレーダーの設計を行った。

6.1 システム設計

ここでは設計要件を満たすシステムパラメータを決定する。

・送受信アンテナ

送受信アンテナは航空機体下部に取り付ける。機体の通常巡航時のロール、ピッチ変動の影響でないようにアンテナのビーム幅は 5 度以上にすることが必要となる。正方形のパッチアンテナを用いた場合のサイズとビーム幅の関係を図 6.1 に示す。ビーム幅を θ 、キャリア周波数の波長を λ 、アンテナ 1 辺のサイズを D とすると、次のような関係性を持つ。

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

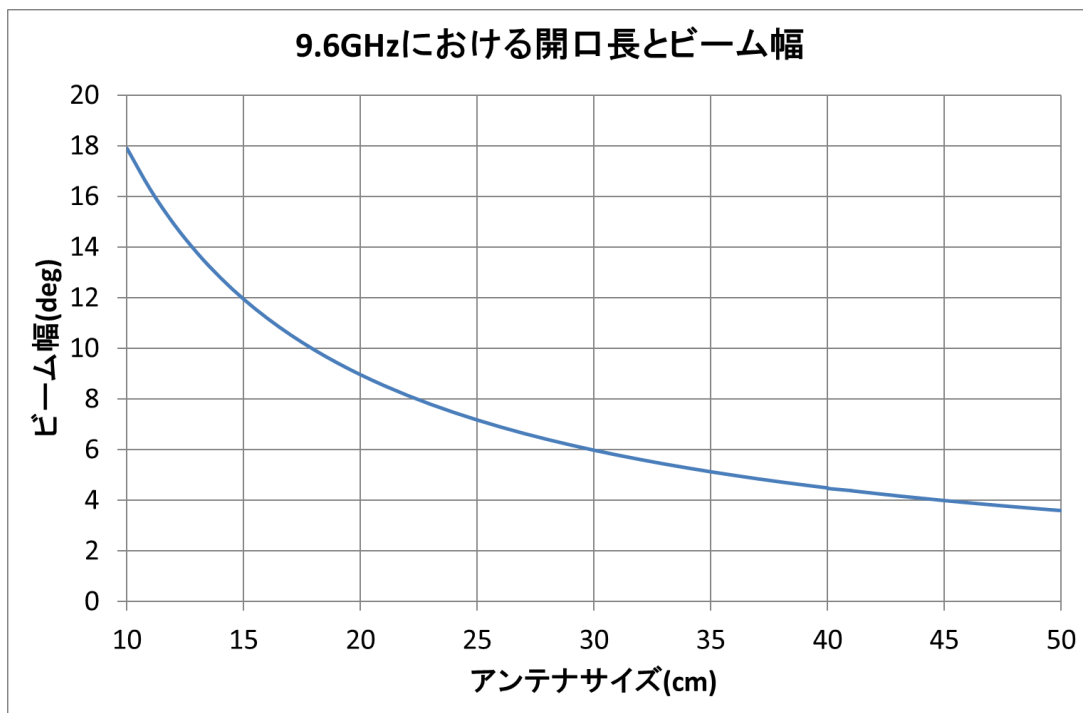


図 6.1 送信周波数 9.6 GHz ($\lambda=3.13$ cm) におけるアンテナサイズとビーム幅の関係

アンテナの利得 G はアンテナサイズ D から次式(2)のように定まる。

$$G = \frac{4\pi\eta D^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

ここで η は開口効率を表し、サイズが 30 cm 程度の場合 0.5 程度と推定される。図 6.2 にアンテナサイズと理論利得の関係を示す。アンテナサイズが大きくなると、給電線長が長くなり、開口効率が低下する、そのため、実際のアンテナ利得は 30 cm 程度ではほぼ頭打ちになると考えられる。

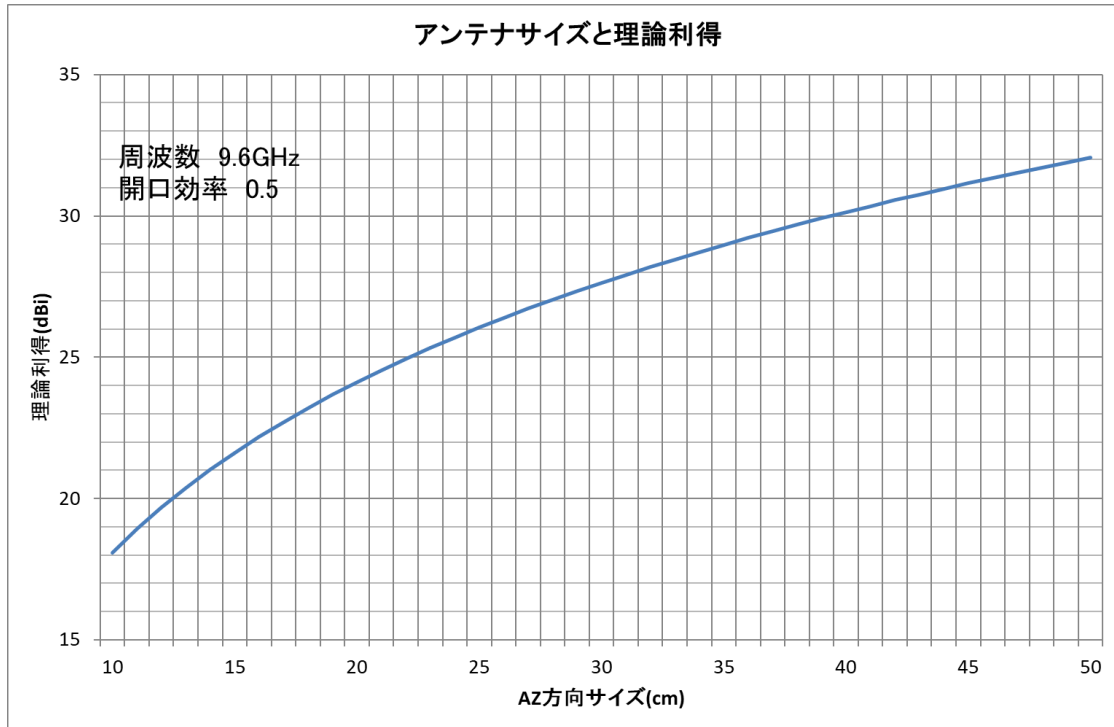


図 6.2 送信周波数 9.6 GHz、開口効率を 0.5 とした場合のアンテナサイズと理論利得

・受信電力と S/N 比計算

海面において反射された信号の受信電力と受信部雑音電力、および処理による S/N 改善率から信号 S/N 比を求め、送信電力とアンテナサイズを検討する。高度 H から海面にレーダー信号を照射したとき、海面での電力密度 S1 は、送信電力を P、送受信アンテナ利得を G とすると、次式(3)のように求められる。

$$S1 = \frac{P \cdot G}{4\pi H^2} \quad (3)$$

海面の反射係数を σ_0 、単位分解能の海面面積を A とすると、受信部入力電力 Pr は、

$$Pr = S1 \cdot \frac{\sigma_0 \cdot A}{4\pi H^2} \cdot \frac{G\lambda^2}{4\pi} = \frac{PG^2\lambda^2\sigma_0A}{(4\pi)^3H^4} \quad (4)$$

となる。受信部雑音電力 Pn は、受信部雑音温度を T、帯域幅を B、ボルツマン定数を k とすると次のようになる。

$$P_n = kTB \quad (5)$$

受信信号の S/N 比 (SNR) は、受信部雑音指数を N_f 、システムロスを L_s とし、FM-CW 信号を用いた場合の繰返し周波数を PRF、チャープ信号帯域幅を B とすると、パルス圧縮処理により改善されて次のようになる。

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{P_n} \cdot \frac{B}{\text{PRF}} = \frac{PG^2\lambda^2\sigma_0A}{(4\pi)^3H^4kTB \cdot N_f \cdot L_s} \cdot \frac{B}{\text{PRF}} \quad (6)$$

・海面の単位分解能面積

レンジ分解能 Res は、チャープ帯域幅 B 、及び光速 c から次のようになる。

$$\text{Res} = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

直下点の単位分解能当たりの面積 A は、アンテナ高度 H に 1 単位分解能の長さ Res を加えた長さの直線が海面上に作る円の面積となる (図 6.3)。面積 A の半径を r とすると、幾何学的関係によって次のように求められる。

$$\varphi = \text{acos}\left(\frac{H}{H + \text{Res}}\right) \quad (8)$$

$$r = H \tan \varphi = H \tan\left(\text{acos}\left(\frac{H}{H + \text{Res}}\right)\right) \quad (9)$$

$$A = \pi r^2 = \pi H^2 \tan^2\left(\text{acos}\left(\frac{H}{H + \text{Res}}\right)\right) \quad (10)$$

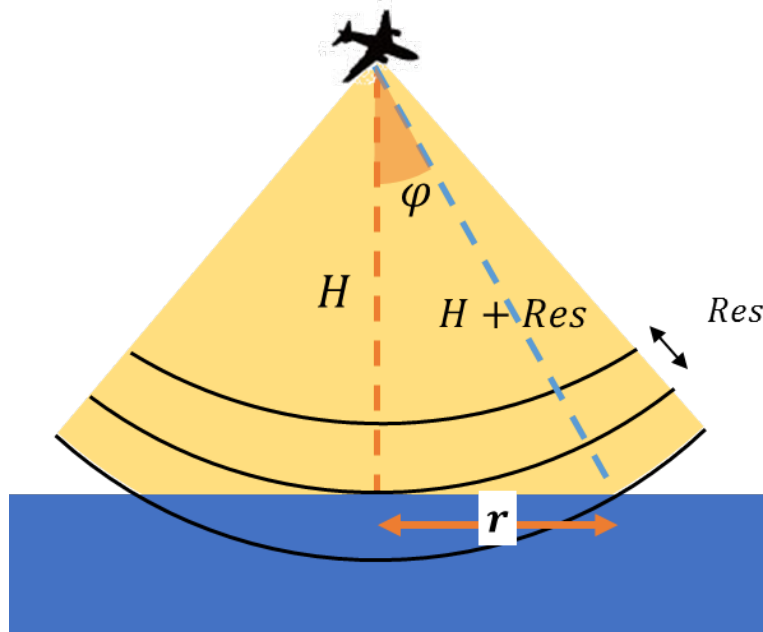


図 6.3 レーダー照射面積の幾何学的関係

・ NESZ (Noise Equivalent Sigma Zero: 雑音等方後方散乱係数)

受信された信号強度がノイズと等しくなる場合の反射係数、つまり、SNR が 1 となる時の σ_0 は NESZ と呼ばれる。式(6)の SNR を 1 とおくと、

$$1 = \frac{PG^2\lambda^2\sigma_0A}{(4\pi)^3H^4kTB \cdot Nf \cdot Ls} \cdot \frac{B}{PRF} \quad (11)$$

となる。 σ_0 を NESZ に置き換え整理すると、次の式のようになる。

$$\text{NESZ} = \frac{(4\pi)^3H^4kT \cdot Nf \cdot Ls \cdot PRF}{PG^2\lambda^2A} \quad (12)$$

NESZ が小さいほど反射信号に対するノイズ影響は小さく感度が高くなるため、信号出力を決定する際の指標となる。

・ パラメータの決定

直下点方向の海面反射係数 σ_0 は経験的に 10dB 程度と推定される。送信電力を 0.1 W、アンテナサイズを 20 cm (利得 24dBi) とし、PRF を 1000 Hz と仮定した場合、高度 1000m から 22000 m での海面観測時の NESZ は図 6.4 のようになる。ここで、受信部雑音指数 Nf を 5 dB、システムロス Ls を 3 dB、受信部雑音温度 T を 300 K とした。図 6.4 より、送信電力 0.1 W、アンテナサイズ 20 cm まで小型化省力化を行った場合でも、高度 22000 m において S/N 比が 10dB 以上確保できる。これは、十分信号検知可能な信号強度である。なお、さらなる送信電力の省力化は、ハードウェア側の制約が厳しくなるため難しくなる。アンテナサイズとアンテナ出力より、アンテナパターンは図 6.5 のように決定される。

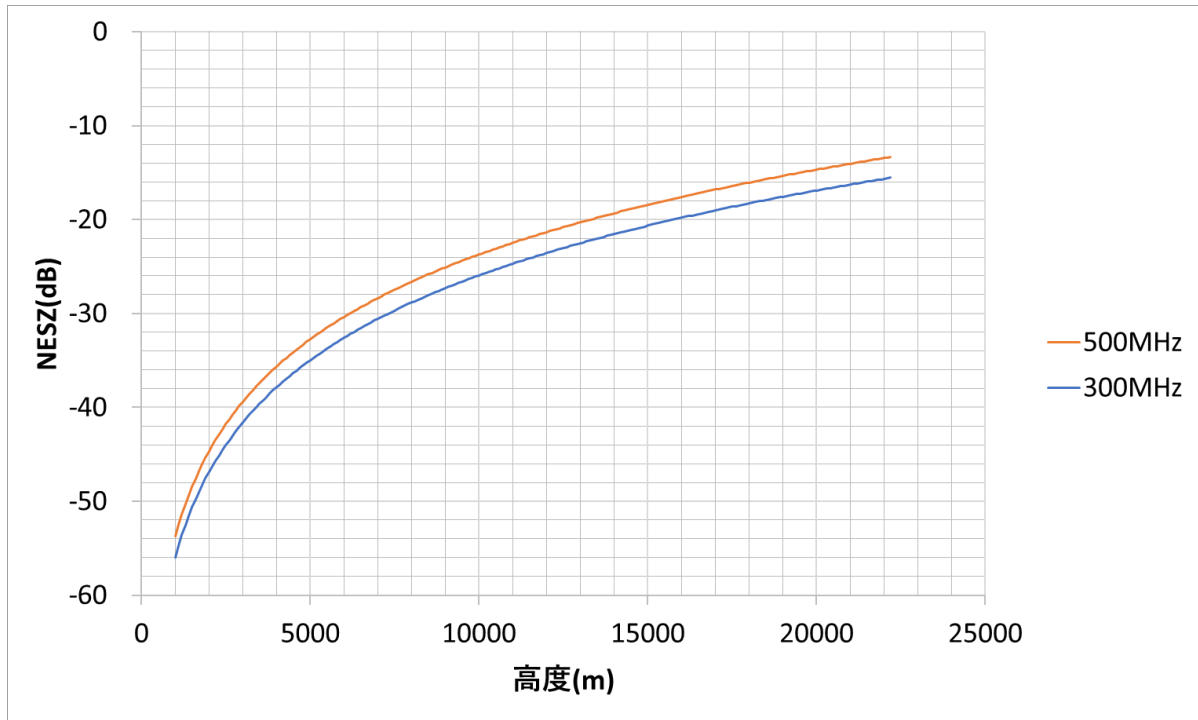


図 6.4 送信電力を 0.1W、アンテナサイズを 20 cm とし、PRF を 1000 Hz と仮定したときの高度 1000 m から 22000 m の海面観測時の NESZ。送信帯域幅 300 MHz の場合を赤線で、500 MHz の場合を青線で示す。

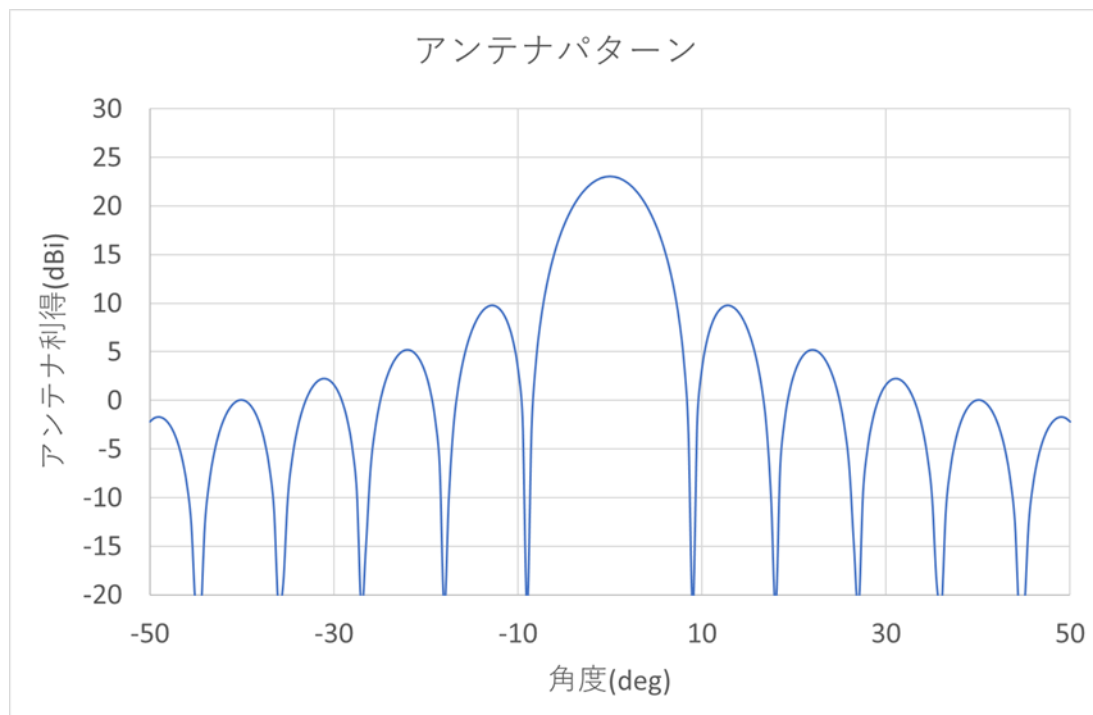


図 6.5 送受信アンテナのアンテナパターン

6.2 システム構成

システム設計を元にハードウェアのシステムの構成について検討を行った。ここでは処理・制御を行うコンピュータは小型組込み用の PC に windows 10embedded を搭載することを想定している。図 6.6 にシステムのブロック図を示す。

システムの挙動は次のようである。まず、機体から電源が供給されると、設定によって自動的にコンピュータが起動する。その後、事前に設定した高度に航空機が到達すると、コンピュータが自動的にレーダーを作動し、観測データの取得を開始し始める。観測が開始とともに、コンピュータは受信データを処理し、GPS から送られる基準高度を元に海面高度の算出を行う。GPS から取得する基準高度として地上から電子基準点情報をもとにキネマティック処理された GPS データもしくは本格運用後の日本の GPS 衛星であるみちびきを使用し観測された高精度データを使用する。この算出された海面高度は機内 Wi-Fi もしくは直接衛星回線を使用して地上に送られる。

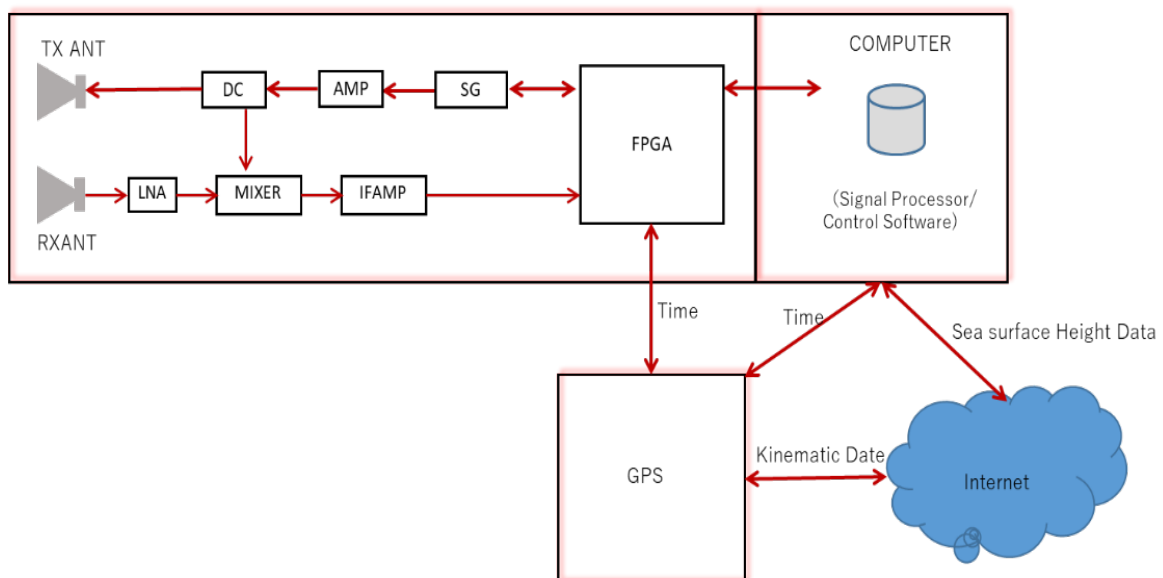


図 6.6 設計システムのブロック図

6.3 ハードウェア構成

レーダーは次の 3 つのハードウェアから構成される。

- ・ アンテナ部
- ・ レーダー信号処理部
- ・ GPS アンテナ

アンテナ部のイメージを図 6.7 及び図 6.8 に、レーダー信号処理部の筐体イメージを図 6.9 に、GPS アンテナのイメージを図 6.10 に示す。また、これらハードウェア間の構成図を図 6.11 に示す。

入力電源は 10 V から 30 VDC で、消費電力は 50 W 以内。動作環境温度は 0 度から 50 度とする。アンテナ部はアンテナを固定する CFRP 製のフレームに、アンテナを保護する FRP のレドロー

ムを被せる。アンテナは20cm四方の平面型アンテナ (Microstrip Patch Array Antenna) を用いる。アンテナ部総重量は1kg程度とする。

レーダー信号処理部は30 cm×15 cm×15cm のアルミ製の筐体に、レーダー本体、処理解析用のコンピュータ及びGPS受信機が搭載される。総重量は1.5 kg程度である。

GPSアンテナは、L1/L2/L5対応の航空機搭載用アンテナを使用する。機体にすでに設置されている場合は、そのアンテナを共有する。

上記ハードウェアは通常の旅客機から大型無人機、さらには翼幅3 m程度の小型無人航空機まで搭載できる重量サイズである。図6.12に小型無人航空機へレーダーを搭載した際のイメージを示す。

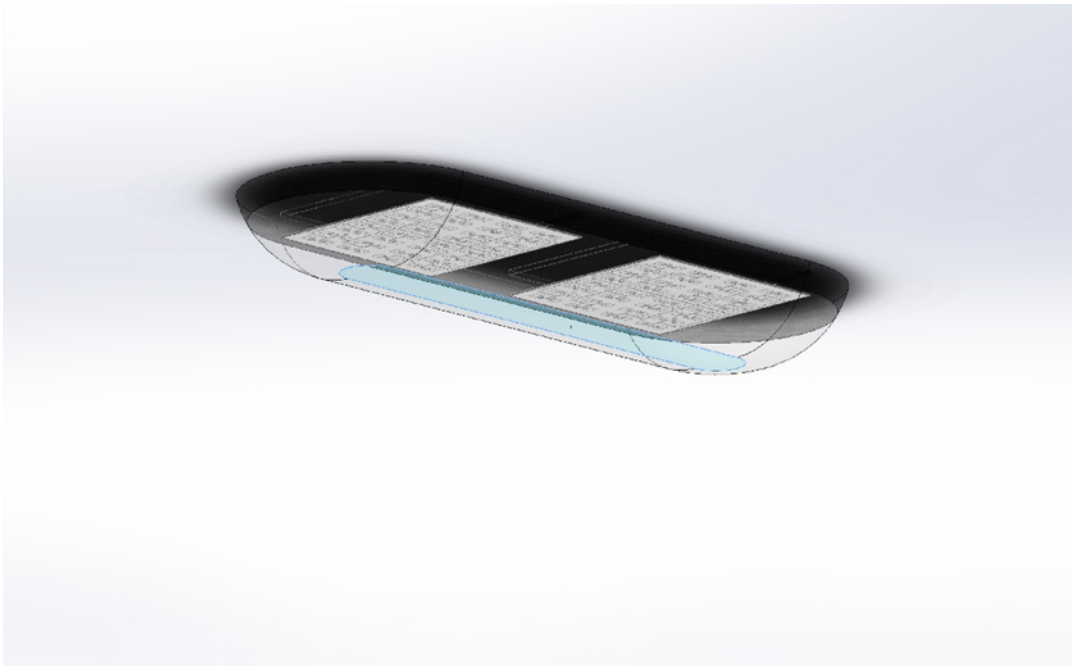


図 6.7 アンテナ部 イメージ1

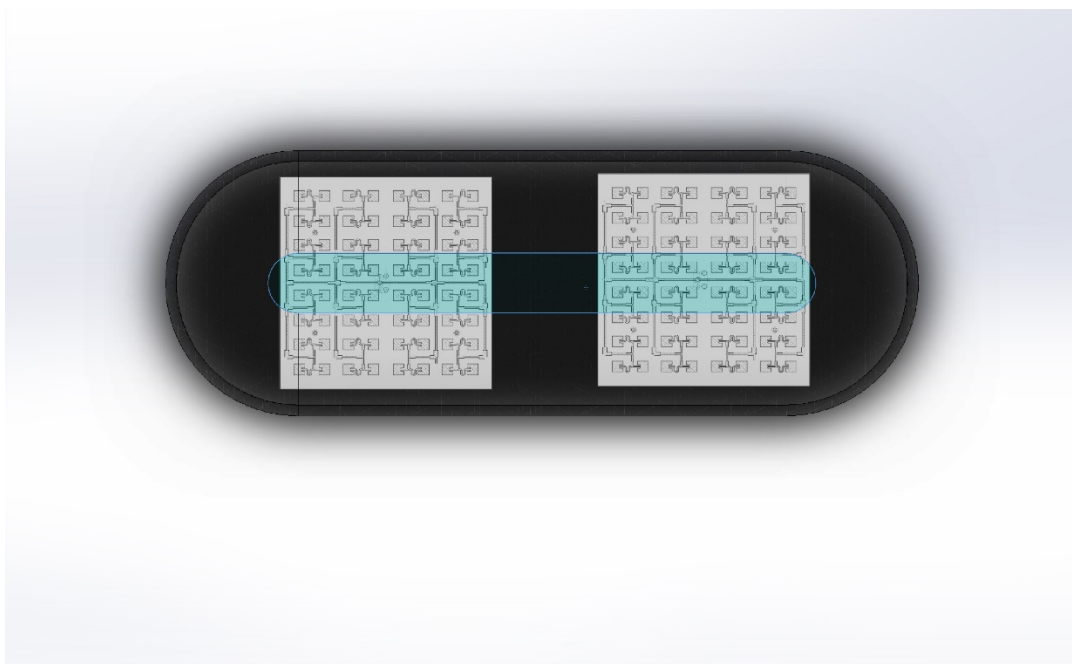


図 6.8 アンテナ部 イメージ2

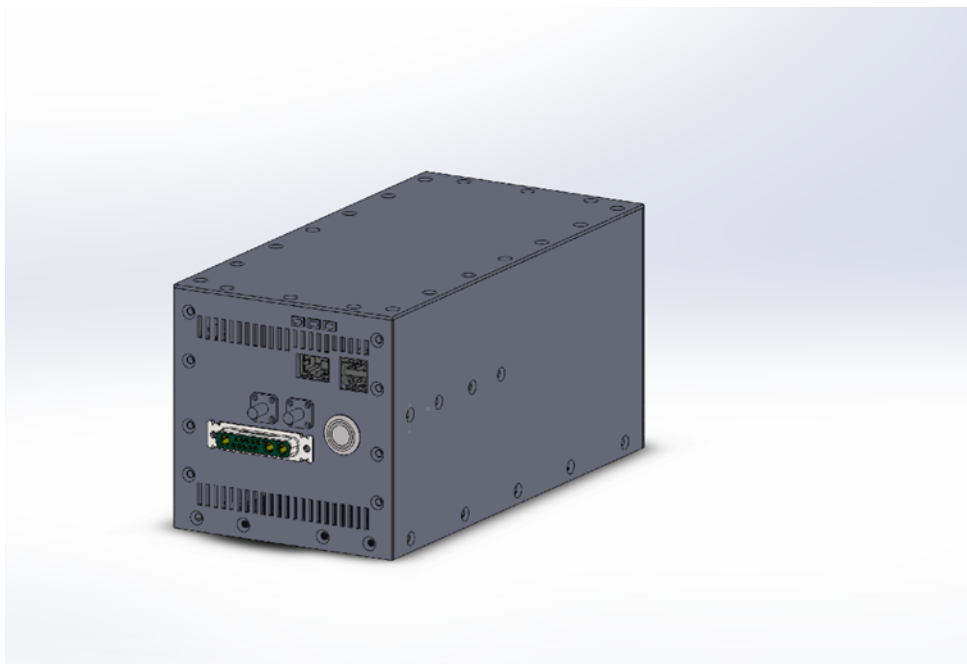


図 6.9 レーダー信号処理部 筐体イメージ



図 6.10 航空機搭載用 GPS アンテナ イメージ

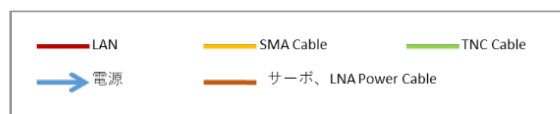
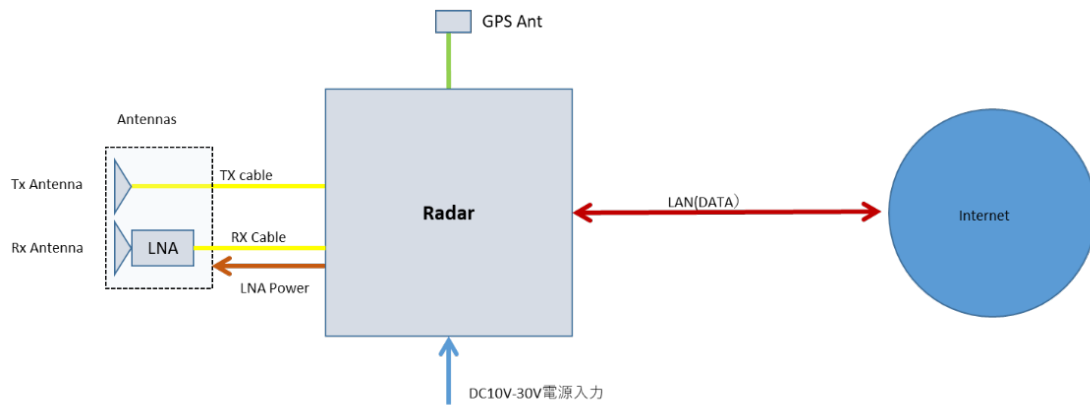


図 6.11 レーダーアンテナ、レーダー信号処理部、及び GPS アンテナ構成図

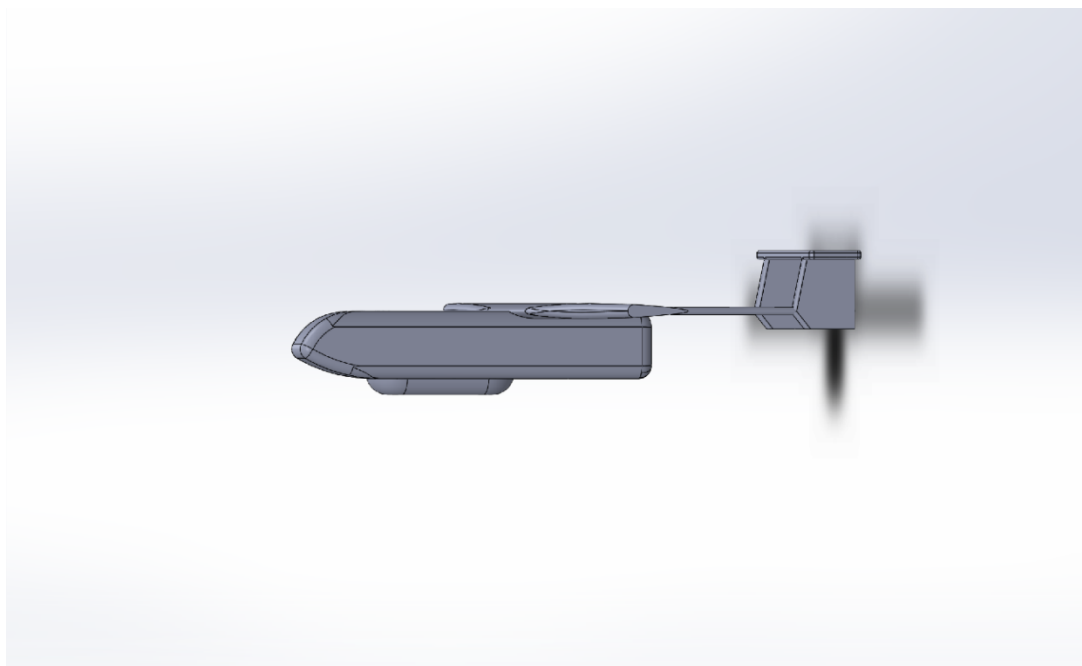


図 6.12 小型無人航空機へのレーダー搭載イメージ。機体下部にレーダーを設置している。

7. 提言 「航空機による巨大津波の広域観測網の構築」

本報告書では、次世代の沖合の津波の観測方法として、航空機を観測プラットフォームとして利用する方法を提案し、その有効性と実装課題について調査・研究を行ってきた。その結果を提言としてまとめ以下に示す。

提言

航空機による巨大津波の広域観測網の構築

東京大学海洋アライアンス総合海洋基盤（日本財団）プログラム
メガ津波から命を守る防災の高度化研究

提言の背景

巨大津波による被害を最小限に抑えることは、我が国のみならず世界中の沿岸国の共通の課題である。そのためには、震源に近い沖合で発生直後の津波を直接とらえることにより、危険な地域はどこかを迅速に予測する必要がある。我が国では東北地方太平洋沖地震後に日本海溝や南海トラフの周辺に多数の海底水圧計を海底ケーブルでつないだ津波観測網が整備された。しかしながら、このような津波観測網の構築には大規模なインフラ整備が必要であり、グローバルに展開するのは困難である。このことから、次世代の津波観測システムとして、大きな整備負担をかけずに全世界の海洋を効率よく密にカバーすることができる新たな津波観測システムの構築が求められている。

提言

沖合の津波を観測する新たな方法として、航空機を観測プラットフォームとして利用する方法を提案する。航空機に搭載したレーダーと GPS を組み合わせることによって、津波に伴う海面高度の変化をとらえる。この方法によって約 10cm の精度で海面高度が測定できる。これは発生直後の巨大津波を検知するには十分な精度である。さらに、複数の航空機で同時観測することによって、既存の津波観測網よりも迅速かつ高い精度で定量的な津波予測が可能となる。

現在、世界には計 2 万機以上の航空機が運用されている。これらの航空機に備え付けられている電波高度計レーダーを沖合での海面高度観測に対応できるように拡張することによって、グローバルな津波観測網を効率的に構築することができる。また将来的には、現在開発が精力的に進められている長時間航行可能な無人航空機を津波監視に利用することも考えられる。

提言の実現に向けて

本提言の実現には、産学官民の協力・連携が極めて重要となる。現在、我が国の海洋政策として海洋状況把握(MDA)の能力強化が推進されている。MDAの目的に自然災害対策があり、本提言の津波観測システムをMDAの柱の一つとして位置づける必要がある。民間航空会社の理解・協力を得るためにも、経済的支援を含む国のバックアップが必要不可欠である。さらに、民間航空機に搭載するレーダーには追加型式設計承認(STC)が求められる。STC取得には高い安全基準をクリアしなければならず、専門企業・民間航空会社と協同してレーダー開発を行う必要がある。また、航空機レーダーの観測システムを長期的に運用するためには、津波監視以外に平常時での利用も重要となる。航空機による観測は従来の人工衛星による観測に比べて高い機動性で高分解能の情報を取得できる点で大きな利点を持っており、得られるデータを有効活用して海洋活動や環境保全を推進させるための研究・開発を進めていく必要がある。

航空機による巨大津波の 広域観測網の構築に関する構想

東京大学海洋アライアンス
総合海洋基盤（日本財団）プログラム
メガ津波から命を守る防災の高度化研究



東京大学 海洋アライアンス
UTokyo OCEAN ALLIANCE



日本 THE NIPPON
財団 FOUNDATION

1. 問題背景・提起



東京大学 海洋アライアンス
UTokyo OCEAN ALLIANCE



日本 THE NIPPON
財団 FOUNDATION

1

高精度な津波の予測には、
震源に近い沖合で津波に伴う海面水位
変化を直接観測することが必要不可欠。

現在の沖合津波の観測網の
設置・維持には高いコストがかかる
→全国的、全世界的な展開は困難

海洋上を航行する
多数の航空機を津波の
観測プラットフォームとして
利用する。

現在の沖合津波の観測網

ケーブル式海底圧力計
ブイ式海底圧力計、GPSブイ



日本近海の航空機の分布



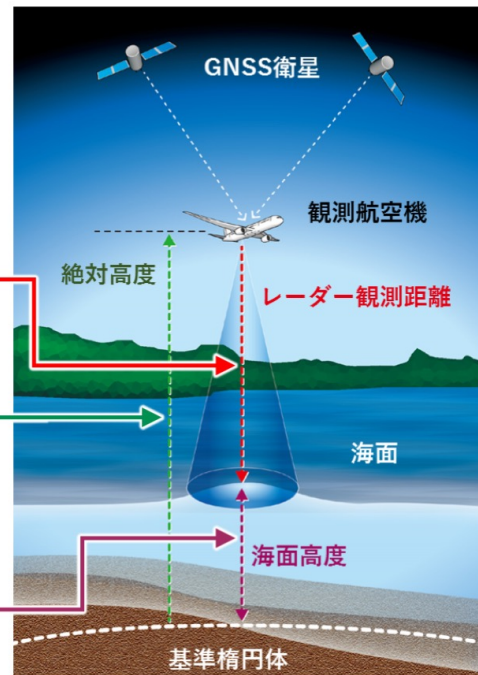
2. 測定原理

航空機に搭載した**高精度GPS**と
レーダー高度計を組み合わせ
て海面高度を測定する

レーダー高度計
航空機からの海面までの距離を測定

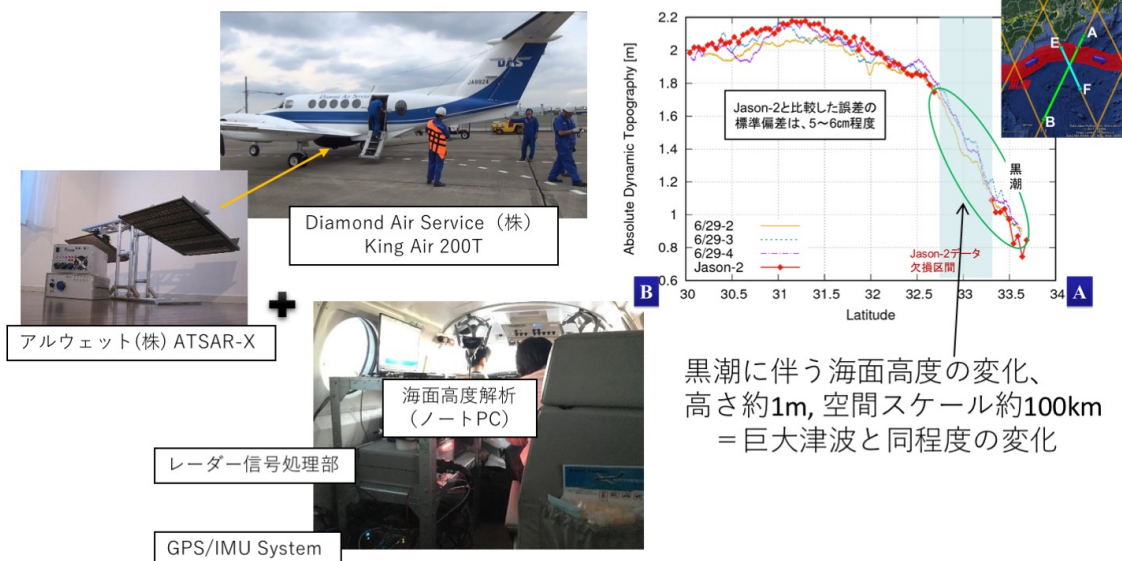
高精度GPS
基準地球楕円体に対する航空機の
絶対高度を測定

GPSとレーダー高度計の差
→海面高度を測定



3-1. 実証試験観測

本州太平洋沖合にて実験用航空機による試験観測を実施。
→黒潮による海面高度変化を確実に捉えられることを確認

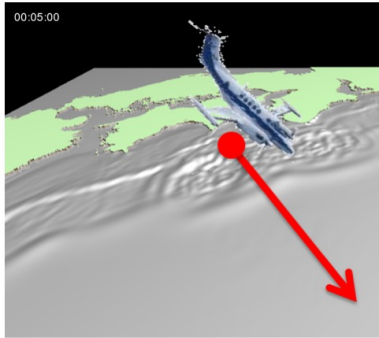


黒潮に伴う海面高度の変化、
高さ約1m、空間スケール約100km
= 巨大津波と同程度の変化

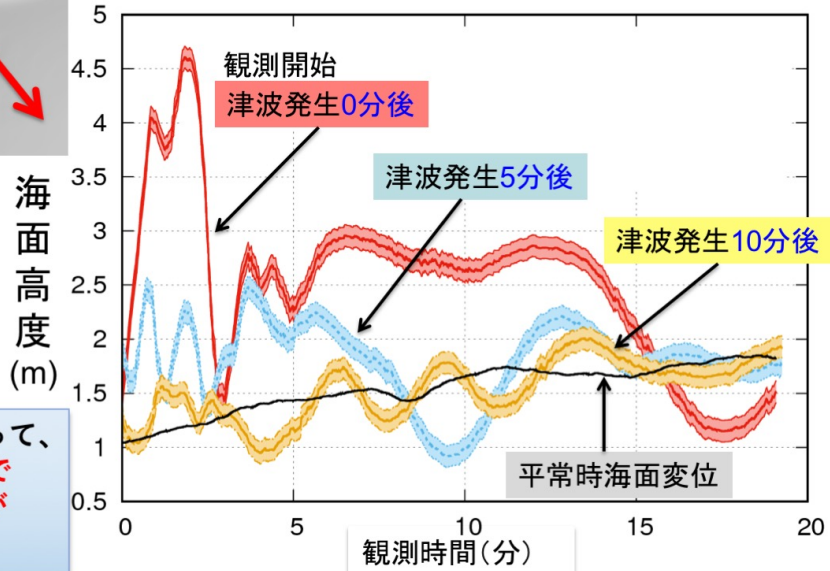
10cm以下の精度で海面高度の測定が可能

3-2. シミュレーションによる航空機津波検出例

4



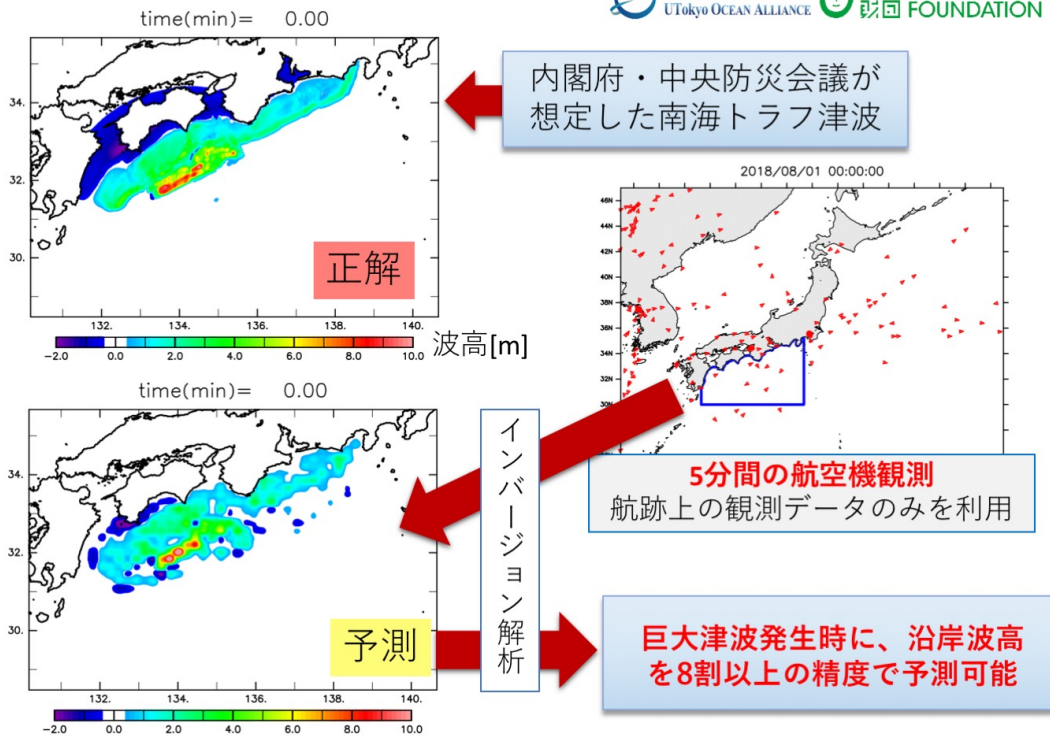
南海トラフ津波(数値シミュレーション) 航空機レーダー仮想観測



航空機レーダーによって、発生から約10分間まで津波シグナルの検知が可能

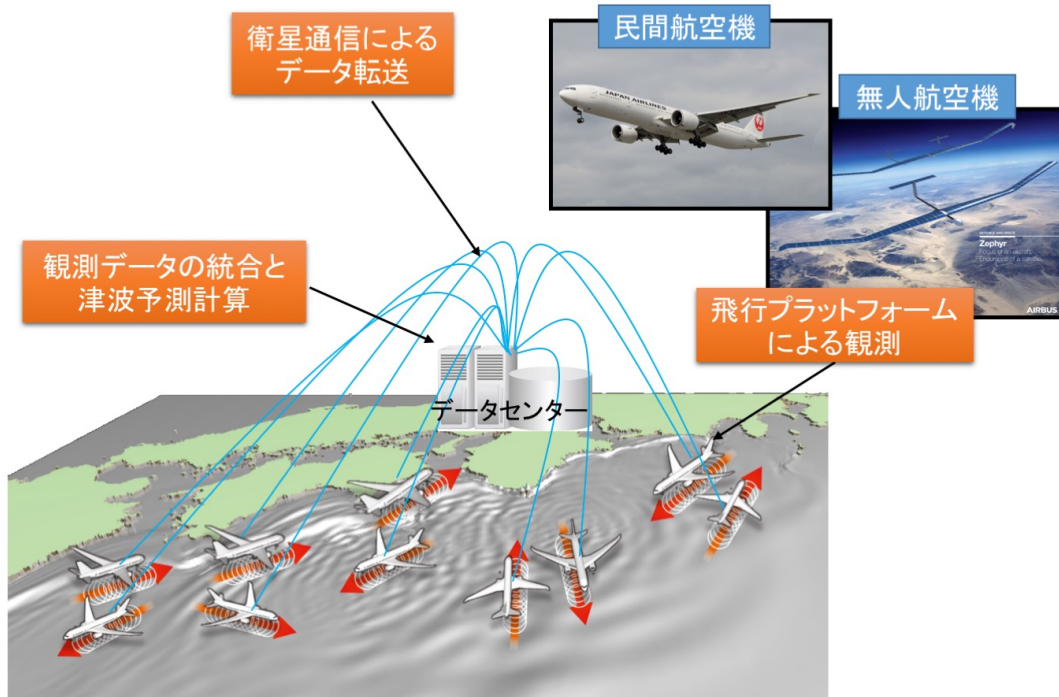
3-3. 複数の航空機の観測に基づく津波予測 (仮想数値実験)

5



4. 複数の航空機による津波の常態観測

6



5. ステークホルダーの役割と将来展開

7

