

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12614

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18781

研究課題名（和文）民間航空機を利用した迅速かつ高精度な津波予報システムの開発

研究課題名（英文）Development of a rapid and highly accurate tsunami forecasting system using civilian aircraft

研究代表者

日比谷 紀之（HIBIYA, Toshiyuki）

東京海洋大学・その他部局等・博士研究員

研究者番号：80192714

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、将来、メガ津波を発生させる可能性のある代表的な震源域を常に広くカバーするように飛行している民間航空機に注目し、それらを利用した正確かつ迅速な津波数値予報システムの構築の可能性を検討してきた。近未来に発生が予想される南海トラフの巨大津波を対象にした数値実験では、航空機観測によって津波の初期波源分布が精度よく推定できることがわかった。

実際に、この予測手法を2010年3月に九州西方沿岸域を襲った気象津波の事例に適用し、その有効性を調べたところ、東シナ海を九州西方沿岸域に向かって伝播する気象津波の実態把握に十分適応できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、津波の迅速かつ高精度な予測の実現に向け、民間航空機を利用して震源に近い沖合で発生直後の津波を直接捉える新たな観測方法の可能性を検討した意欲的な研究である。

実際、仮想的な数値実験の結果から、この手法は近未来に発生が予想される南海トラフでの巨大津波の予報や、九州西方沿岸域にしばしば襲来する気象津波「あびき」の予報に向けて非常に有用なものであることが示された。今後解決すべき問題も多いが、民間航空機による津波予測が可能となれば、日本のみならず世界各地で発生する地震津波の早期検知が可能となり、津波被害の著しい低減につなげていけるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have focused on continuously flying commercial aircraft covering a wide range of representative epicenter areas where mega-tsunamis may occur in the future, and evaluated the capability of an aircraft observations in accurate and rapid tsunami prediction. Numerical experiments of the Nankai Trough mega-tsunami, which is expected to occur in the near future, have shown that the initial wave source distribution of the tsunami can be accurately estimated by aircraft observations.

We also applied this method to the case of a meteo-tsunami that actually struck the western coast of Kyushu in March 2010, and found that the method was sufficient to capture the actual waveform of a meteo-tsunami propagating in the East China Sea toward the western coast of Kyushu.

研究分野：海洋物理学

キーワード：メガ津波 民間航空機 南海トラフ 電波高度計 高精度津波予報システム

1. 研究開始当初の背景

我が国は世界でも有数の地震発生数の多い国であるが、地震に伴って引き起こされる津波に関しては高精度な予測が行われているとは言い難い状況である。現在、地震が発生した際に気象庁が発信する津波予報は、あらかじめ代表的な断層における地殻変動を様々に仮定して津波のシミュレーションを行っておき、このデータベースの中から、実際に起きた地震の震源の位置や規模に対応する計算結果を取り出す方法を用いている。しかしながら、震源域が広域にわたるマグニチュード9クラスの巨大地震では、津波の発生原因となった地殻変動を即座に特定することは難しい。そのため、メガ津波の予報精度は、マグニチュード8以下の地震による津波に比べて極めて低いのが現状である。

実際、平成23年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)では津波発生後、合計3度にわたって津波警報が修正され、最終的に正確な津波高の予報値が発令された時は既に遅く、未曾有の大災害につながってしまった。将来、発生が予想される南海トラフ地震は、上述した東日本大震災と同規模の地震が想定されているが、その震源域の陸域からの近さを考えれば、津波予報の迅速性は生死を分ける重要なファクターとなる。

研究開始当初、研究代表者が機構長を務めていた東京大学海洋アライアンス機構は航空機による海面高度観測を実施し、世界中の外洋を航行する多数の航空機を巨大津波の観測プラットフォームとして利用できる可能性を示した。この結果により、津波発生直後、できる限り沖合で民間航空機によって津波の空間パターンの観測が可能となれば、より迅速かつ高精度な津波予報が可能となるのではないかと考え、本研究を着想するに至った。

また、九州西方沿岸域にしばしば襲来する気象津波「あびき」は、観測機器設置の困難さなどからその予報が実現できておらず、被害の甚大さに鑑みて予報システムの構築は喫緊の課題として残されてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、震源モデルに頼らない迅速かつ正確な津波予報システムの開発である。

津波予報の精度を高めるためには、津波の高さだけでなく、その時空間スケールの正確な把握が必要である。これを実現するため、本研究では、将来メガ津波を発生させる可能性のある代表的な震源域を常に広くカバーするように飛行している民間航空機の利用に注目し、航空機搭載レーダーを使用した沖合での津波「初期波形」の検知と、その情報を組み込んだ超高速計算機による津波伝播計算を組み合わせ「迅速かつ高精度な津波予報システム」構築の可能性について検証する。

また、この手法を用いることで、気象津波「あびき」の予報可能性に向けても検証する。

3. 研究の方法

(1) 実際に過去の発生した地震の震源モデルを用いて、津波の発生から、その伝播、陸域遡上までの数値シミュレーションを行うことで「仮想津波」のデータを作成する(図1a)。

(2) (1)の「仮想津波」の発生時刻を様々に設定した上で、その発生域上空を航行する複数の民間航空機によって、その直下の海面高度が観測されたと仮定する。この空間離散的なデータを適宜補間して作成した「初期波形」をスーパーコンピュータに組み込むことで、その伝播、陸域遡上などに関する高速数値計算を行う(図1b)。その際、航空機観測によって連続的に得られる1分平均の海面高度データを数分間にわたって計算結果に同化させることで計算結果の精度を上昇させる。

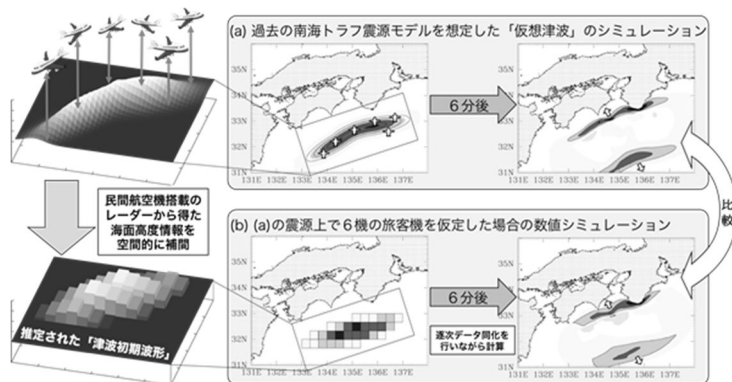


図1 (a) : 過去の震源モデルを用いた「仮想津波」の発生/伝播/陸域遡上の数値シミュレーションの一例。(b) : (a)の津波発生域の上空を飛ぶ複数の航空機により得られた海面高度データを空間補間することで得た「津波初期波形」を数値モデルに組み込んだシミュレーションの一例。

(3) (2)の数値計算により得られた結果が(1)の「仮想津波」によるものと、どの程度合致しているか調べることで、民間航空機を利用した正確かつ迅速な津波数値予報システムの構築の可能性を検討していく。

(4) 上記の結果を、近未来に発生が予想される南海トラフ地震に伴う津波に適用し、津波観測の有効性について検証するとともに、九州西方沿岸域の気象津波「あびき」の過去の事例に適用し、その予測可能性に関するアセスメントを行う。

4. 研究成果

(1) 航空機を利用した津波観測の有効性の検証

近未来に発生が予想される南海トラフの巨大津波を対象に、中央防災会議が設定した南海トラフ津波の初期波源を数値モデルに与えて数値シミュレーションを行った。その結果を「真の解」として取得するとともに、この数値モデル内で複数の航空機を実際の航路に沿って移動させることで仮想的な海面高度観測データを取得した。次に、このデータを使ってインバージョン解析(e.g. Inazu et al., 2016)を行い、推定した初期波源に基づく津波シミュレーションの結果と真の解との比較から津波の予測精度を検証した。

図2は、数値シミュレーションのモデル領域および「真の解」として設定した南海トラフ津波の初期波源の海面高度分布(中央防災会議, 2012)である。また、航空機位置情報サービスである Flightradar24(<https://www.flightradar24.com>)から入手した2018年7月29日12時(日本時間)に南海トラフ沖に存在する航空機(80機)の位置とそこから10分間の航路、既存の津波観測点(ケーブル式津波計、GPS波浪計)も併せて示した。

図3は、図1に示した航空機の航路に沿って得られた津波発生後10分間の海面高度データのインバージョン解析から推定した初期波源分布である。図2と真の解である図1との相関係数は0.92となり、航空機観測によって初期波源分布が精度よく推定できていることがわかった。

また、沿岸に到達した津波の最大波高分布に関しても、航空機観測で推定した初期波源から予測した分布と真の解の分布の相関係数は0.97と高く、特に、航空機交通量が多い昼間には、既存の津波観測網に比べて、より短時間で沿岸波高分布を高精度予測できることが確認できた。

さらに、データ同化の手法により、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を調べた。まず、前項と同じく中央防災会議が設定した南海トラフ津波の初期波源を用いた数値モデル内で複数の航空機(計65機)を実際の航路に沿って移動させ、仮想的な海面高度観測データを取得した。次に、既存の観測点(DONETとGPS波浪計)による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用いた数値シミュレーションに、前述した航空機による仮想観測データを10分間同化させることで、予測精度がどの程度向上するかを調べた。その結果、航空機データを同化させることで、予測精度は66.8%から86.7%へと大きく向上することが示された。

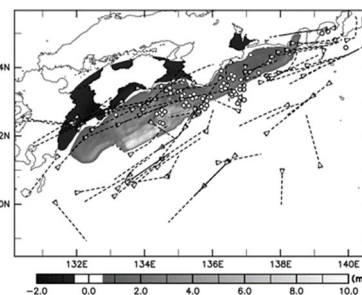


図2: 南海トラフ津波の初期波源の海面高度分布(陰影)。2018年7月29日12時(日本時間)の南海トラフ沖の航空機の位置(三角印)と10分間の航路(破線)、および既存の津波観測点の位置(丸印)。

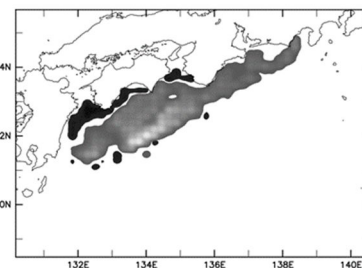


図3: 図1に示した複数の航空機の航路に沿って得られた10分間の海面高度データのインバージョン解析によって推定された津波の初期波源の分布。

(2) 気象津波の増幅機構の解明と予測可能性の検討

2010年3月に九州西方沿岸域で発生した「あびき」は、長崎湾や枕崎湾で共に全振幅1mを超える水位変動をもたらした。この事例について、気象観測データから、微気圧擾乱は、東シナ海上空約500kmを30m/sの一定速度で東南東方向に伝播すると仮定し、両湾における海面変動を数値的に再現した。その結果、第1の増幅は、微気圧擾乱と海洋波がカップリングする Proudman 共鳴によって東シナ海上で発生しており、最大波高は0.2m程度に達した。第2の増幅は沿岸域で発生しており、それぞれの湾の沖合に存在する特徴的な陸棚地形が重要な役割を担っていることがわかった。さらに、それぞれの湾付近のみを切り出した領域で、理想的なフォーシングを与えて振動特性を調べた。長崎湾では、西側・北側に広がる五島列島と平戸島などの地形、枕崎湾では、湾南側で東西に広がる陸棚の東端に位置する開聞岳を含む岬の存在により、それぞれの湾の共鳴周期(長崎湾では~30分、枕崎湾では~12分、~16分)を持つ海洋波が持続的に入射し、その結果、湾口付近では3倍程度まで水位振動の振幅が増幅されることが明らかになった。

気象津波を早期に検知し予測する方法については、これまで様々な検討がなされてきたが実現には至っていない。本研究では、その解決策の1つとして、航空機に搭載したレーダーによって沖合の顕著な気象津波を検知することで、沿岸域で水位振動の増幅が開始する前に「あびき」を予測することが可能かどうか検討を行った。

Flightradar24(<https://www.flightradar24.com>)によると、東シナ海には、五島列島上空を通過する経路(北ルート)と薩摩半島上空を通過する経路(南ルート)の2つの東西ルートが存在する(図4)。航空機に搭載されている高度計の精度(7-10 cm, Hirobe et al., 2019)を考慮すると、Proudman 共鳴により十分に増幅された後の気象津波であれば、その空間構造を捉えることが可能であ

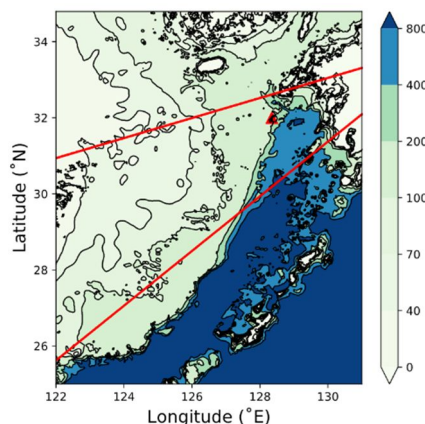


図4: 東シナ海の大陸棚上を東西に横断する航空機の航路(上:北ルート 下:南ルート)。

るため、これらの航路上の海面高度を航空機から観測することで気象津波の伝播に関する情報が得られる。

そこで、2010年3月に発生した気象津波の事例において、現実的な航路上を一定速度(東向きの場合は900km/hour、西向きの場合は700km/hour)で移動させた仮想的な航空機が観測する波形を記録し、複数機体で記録したデータの差異から海洋波の伝播方向、波長を推定した。その結果、2本の航路が近接し始める男女群島付近では、このデータ解析により、それぞれ -3° (東南東方向)、45Kmと、いずれもシミュレーションと整合的な値が得られ、東シナ海を九州西方沿岸域に向かって伝播する気象津波の実態の把握が十分可能であることが示された。気象津波の実態が検知される男女群島付近(仮想観測地点)から九州西方沿岸域に到達して各湾内で水位振動が開始するまでに約1時間の猶予があることから、この間に住民への避難警報などの発令は十分可能である。これらの結果から、東シナ海の東端で、航空機により早期に気象津波を検知することができれば、長い間の懸案であった「あびき」の予測システムの実現は可能であることが示された。

本研究の成果は、津波の早期かつ高精度予測に非常に有用であると考えられる。民間航空機による津波予測が可能となれば、我が国のみならず世界各地で発生する地震津波に対しても早期検知が可能となり、津波被害の著しい低減につながるものと期待できる。しかしながら、民間航空機が飛行するルートや時間帯によっては予測にばらつきが生じることや、航空機で観測された波形情報を補完するスキームの構築などの課題も多い。今後、より高精度な予測システムの構築を目指すとともに、社会実装に向けた提案を行っていきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mulia Iyan E., Hirobe Tomoyuki, Inazu Daisuke, Endoh Takahiro, Niwa Yoshihiro, Gusman Aditya Riadi, Tatehata Hidee, Waseda Takuji, Hibiya Toshiyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Advanced tsunami detection and forecasting by radar on unconventional airborne observing platforms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-59239-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fukuzawa Katsutoshi, Hibiya Toshiyuki	4. 巻 76
2. 論文標題 The amplification mechanism of a meteo-tsunami originating off the western coast of Kyushu Island of Japan in the winter of 2010	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 169 ~ 182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-019-00536-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirobe Tomoyuki, Niwa Yoshihiro, Endoh Takahiro, Mulia Iyan E., Inazu Daisuke, Yoshida Takero, Tatehata Hidee, Nadai Akitsugu, Waseda Takuji, Hibiya Toshiyuki	4. 巻 75
2. 論文標題 Observation of sea surface height using airborne radar altimetry: a new approach for large offshore tsunami detection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 541 ~ 558
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-019-00521-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Endoh, T., D. Inazu, T. Waseda, and T. Hibiya	4. 巻 157
2. 論文標題 A parameter quantifying radiation damping of bay oscillations excited by incident tsunamis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Continental Shelf Research	6. 最初と最後の頁 10 ~ 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.csr.2018.02.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inazu, D., T. Ikeya, T. Waseda, T. Hibiya, and Y. Shigihara	4. 巻 5
2. 論文標題 Measuring offshore tsunami currents using ship navigation records	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-018-0194-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 松浦 浩巳, 木田 新一郎, 上原 克人, 日比谷紀之
2. 発表標題 九州北西岸におけるM2潮振幅減少トレンドについて
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsuura, H., K. Uehara, S. Kida, and T. Hibiya
2. 発表標題 The decreasing trend of M2 tidal amplitude observed along northwestern Kyushu
3. 学会等名 Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukuzawa, K., and T. Hibiya
2. 発表標題 The amplification mechanism of a meteo-tsunami originating off the western coast of Kyushu Island of Japan
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukuzawa, K., and T. Hibiya
2. 発表標題 The amplification mechanism of the meteo-tsunami originating off the western coast of Kyushu Island in Japan in the winter of 2010
3. 学会等名 The First World Conference on Meteotsunamis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲津大祐、池谷毅、早稲田卓爾、日比谷紀之、嶋原良典
2. 発表標題 船舶航行データから見る津波の水平流速
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福澤克俊、日比谷紀之
2. 発表標題 枕崎湾における気象津波(あびき)の発生機構 -増幅過程の定量的評価-
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Inazu, D., T. Ikeya, T. Waseda, T. Hibiya, and Y. Shigihara
2. 発表標題 Offshore tsunami currents found in navigating ship records
3. 学会等名 10th ACES International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日比谷研究室ホームページ
<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hibiya-lab/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------