

論文の内容の要旨

Elucidation of the amplification mechanism of meteo-tsunamis originating west of Kyushu Island and proposal for a possible forecasting system

(九州西方沿岸域で発生する気象津波の増幅機構の解明と

その予報システムの提案)

福澤 克俊

1 背景

ハリケーンや低気圧などの気象擾乱や地震など、顕著な前駆現象を伴わないにもかかわらず、振幅 4メートルにも達するような海面水位振動が突如として始まる、あたかも津波のような沿岸災害現象が観測されることがある。様々な研究により、この津波のような現象は、大気擾乱によって突如引き起こされるものであることが明らかになり、「気象津波 (meteorological tsunami, meteo-tsunami)」と呼ばれている。気象津波は、地中海やアドリア海、五大湖など世界各地の浅海域において、その発生が数多く報告されている。我が国においても、九州西側沿岸域、特に、長崎湾や枕崎湾では冬から春にかけて繰り返し発生し、「あびき」現象として古くから知られてきた。周期数十分程度の振幅の大きな海面変動とそれに伴う強流により、人命が失われること、沿岸の人家への浸水、船舶の破損など、沿岸社会への影響が大きいことから、その予測実現が期待されているが未だ実現していない。

気象津波の発生予測には、その起源となる大気擾乱の発生を予測することが直接的であるが、現在のところ高解像度の大気モデルをもってしてもその再現は困難である (Belusic et al.2007 ほか)。

そこで本研究では、九州西方沿岸域で発生する気象津波に注目し、その増幅機構を明らかにし、それに基づいて大気モデルに依らず気象津波の発生を早期に検知し、海洋モデルをベースにした予報システムを提案する。

2 気象津波の増幅機構

2010年3月3日に九州西方沿岸域で発生した気象津波（あびき）は、長崎湾、枕崎湾で全振幅1mを超える水位振動をもたらした。同時帯に、複数地点の地上気象観測によって振幅 $\sim 1\text{hPa}$ ほどの微気圧擾乱が捉えられていた。このイベントの再現実験を通じて、気象津波の発生機構を明らかにする。具体的には、気象観測データから、微気圧擾乱の伝播方向、伝播速度をそれぞれ東南東方向 -5° に $\sim 30\text{m/s}$ と推定し、理想的な気圧フォーシングを仮定することにより、観測と整合的な海洋応答を再現することができた。なお、用いているデータは気象庁による潮位観測（15秒毎）、地上気象観測データ（1分毎）、薩摩川内市による女島、甕島における水圧変動観測（1分毎）と地上気圧観測データ（1分毎）、日本水路協会による日本近海30秒グリッド水深データ、地形データM7000シリーズ、内閣府防災会議による地形データである。非回転浅水長波の運動方程式と連続の式を用いた数値シミュレーションを行った。

第1の増幅は東シナ海上で、微気圧擾乱と海洋波がカップリングする Proudman 共鳴によって生じ、全振幅は0.2m程度までの増幅をもたらされていた。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広がる特徴的な陸棚地形が重要な働きをしていることがわかった。

特にこの沿岸域での増幅機構を調べるため、それぞれの湾付近のみを切り出した領域で、周期的なフォーシングを与え、振動特性を調べたところ、長崎湾にとっては西側・北側に広がる五島列島と平戸島などの地形が、枕崎湾にとっては湾南側で東西に広がる陸棚の東端に位置する、開聞岳を含む岬が気象津波の発生にとって重要な役割を担っていることがわかった。それぞれの沖合地形の存在により、それぞれの湾で共鳴を起こす周期（長崎湾では ~ 30 分、枕崎湾では ~ 12 分、 ~ 16 分）の海洋波が持続的に入射すること、その結果、湾口付近では2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。

ここで述べた増幅機構は、2012年3月2日、2004年3月1日にそれぞれ発生した顕著な気象津波においても重要な役割を果たしていることが示された。

3 気象津波の予報システムの提案

気象津波の発生を早期に検知し予報を実現する手段は世界各地で様々な検討されてきた。東シナ海は底引き網漁が行われる海域であるため海底水圧計を設置することは困難であり、海面高度観測衛星による観測もその粗い時間解像度のため気象津波の検知には使えない。ひとつの解決手段として、航空機に搭載したレーダーによって東シナ海上で顕著な東進する海洋波の存在を検知することにより、沿岸域で水位振動の増幅が開始する前に「気象津波（あびき）発生警報・予報」を発する方法が考えられる。特に、九州-中国大陸間を飛行している民間航空機は数多く、これらの航空機によって九州西岸の沖合で海洋波の構造を検知することが可能になれば、九州沿岸域を襲う気象津波の発生予報の実現を期待することができる。

水深の浅い東シナ海上では海洋波よりも速い速度で航空機は航行していることから、航行する民間航空機から海洋波の空間構造を迅速に捉えることができる。そこで、本研究では九州の西端に位置する女島に水位計を設置し、さらに民間航空機の電波高度計による観測を組み合わせた観測システムを提案する。そして、その観測システムをベースにした気象津波の予報システムを提案し、2010年3月に発生した気象津波の事例に適用してその有効性を検討した。

Flightradar24 による航空機の航行記録によると、長崎上空と中国上海を結ぶライン上を行き来する航空機は多数存在している。マイクロ波（中心周波数 9.6 GHz）を用いた海面高度計の精度 0.07-0.10 m (Hirobe et al.,2019)を考慮しても、東シナ海大陸棚上での Proudman 共鳴により十分に増幅された後の海洋波であれば、その空間構造が捉えられ得る。そこで現実的な航路上を複数の航空機が一定速度（東向きの場合は 900 km/hour, 西向きの場合は 700 km/hour）で移動しながら海面波形を観測したものとし、それらの波形データの差異をもとに海洋波の伝播方向、波長、周期を推定したところ、推定値にばらつきはあるものの、平均的にはそれぞれ、東南東方向 -3° 、45 km、20 分と、いずれもシミュレーションの設定と整合的な値が得られた。

ここで得られた海洋波の情報を基に長崎湾と枕崎湾の水位振動を予報する。二次元の海洋モデルを用いたシミュレーションを行うには積分時間が必要であることから、地震津波研究でも利用されているグリーン関数法を用いて水位振動の予報を行う。最初期の予報は、東シナ海における航空機観測データのみを依拠したものであるため予報のばらつきが大きい。女島における水位観測、九州沿岸域での航空機観測を考慮することで予報が更新され、ばらつきが軽減される。結果として、最大振幅は 25% 程度の誤差で再現できた。航空機で早期に海洋波を検知した後、即座に警報を発するとともに、航空機観測から得られた情報を入力したシミュレーションを実行することで、各湾の水位振動の予報を発することは十分可能であると結論できる。

4 まとめ

これまでの研究により、九州西方沿岸域で発生する気象津波の増幅機構が明らかとなり、特に沿岸域においては複数の固有振動が連動し、その結果、湾内に共鳴周期をもつ海洋波が繰り返し送り込まれることが重要な機構として示された。その振動系の特性から、大きな水位振動をもたらす海洋波の波長（周期）、波が入射した後の湾水振動の持続時間などが評価できる。今後、世界各地の気象津波において、同様の波連生成機構の重要性が議論されることが期待される。

さらに東シナ海上で、気象津波をもたらす顕著な海洋波を航空機観測によって検知し、気象津波に伴う水位振動を予報するシステムを初めて提案した。2010 年 3 月の気象津波の事例に適用し、この予報システムの有効性を調べたところ、新たな観測システムを用いることで気象津波を早期に予報することが可能であったと考えられた。今後、観測誤差も考慮した上で観測システムを実装することで、気象津波の予報・警報システムが実現されると期待される。