2009年2月に上甑島で潮位副振動を発生させた気象場に関する解析 Meteorological conditions inducing meteotsunami at Kamikoshiki Island in February 2009

田中健路¹·浅野敏之²

Kenji TANAKA and Toshiyuki ASANO

A large amplified meteotsunami (seiche) occurred at Urauchi bay of Kamikoshiki Island on 24-26 February 2009. This study investigated the meteorological conditions related to the event using surface observation and non-hydrostatic meteorological model. The convective systems around the cold front, changed from the stationary front, evolved as the pressure wave band in the middle of the East China Sea while the extratropical low occurred in the north of the front system. The propagation of the pressure wave bands was 20-30m/s corresponding to the low troposphere wind (about 1.5~4 km ASL). Continuous wavelet analysis showed that the peak frequency of the pressure fluctuation was ranged between 10 and 30 minutes, corresponding to the eigenoscillation period of the Urauchi bay of Kamikoshiki Island.

1.序論

2009年2月24日から25日にかけて,九州北部から奄美 地方の広範囲で,副振動に伴う顕著な高潮位が観測され た.気象庁および海上保安庁による観測では,長崎・枕 崎・中之島で140cmを超える最大振幅を観測した.副振 動に伴う高潮位により,鹿児島県上甑島や熊本県牛深市 で低地の浸水被害や漁船の転覆被害が発生した.柿沼ら (2009)や長崎海洋気象台・鹿児島管区気象台・熊本地 方気象台 (2009)により現地調査が行われ,被害状況に 関する詳細が報告されているが,鹿児島県上甑島浦内湾 (図-1)では、2009年2月25日午前8時30分から40分の 間に290cmの最大振幅が生じたと推定されており,1979 年の長崎で記録した最大振幅279cmを上回ったとされて いる.

あびきと呼ばれている潮位副振動は、気圧微変動をは じめとする気象要因により、海面上で波長数10km、周期 数10分、振幅数cmの長波を発生し、地震による津波と 同じメカニズムで伝播し、海底地形による共鳴効果や内 湾の固有振動により増幅するという特徴が、これまでの 研究で明らかにされてきている.副振動発生時に関わる 気象要因は様々で、志賀ら(2006)の統計解析によれば、 温帯低気圧の発達過程、停滞前線、高気圧の張り出し、 台風の通過などが挙げられている.九州沿岸では、振幅 の大きい副振動が2月~4月の期間に最も多く発生して いる.

従来の研究では、志賀ら(2006)をはじめとする副振 動の事例に関する統計的解析、気圧・風速の観測データ のウェーブレット解析と潮位変動との関係、あるいは、

 1 正会員
 博(理)
 広島工業大学准教授環境学部地球環境学科

 2 正会員
 工博
 鹿児島大学教授工学部海洋土木工学科

気象場を仮定した海洋長波の伝播と副振動の発生に関す る数値シミュレーションなどが多く行われてきた.しか しながら,副振動を発生させる気象場に関しては,総観 規模の場についての考察(Goring, 2009)が中心で,海洋 長波と同程度の空間規模であるメソβ~γスケールの気象 擾乱についての解析が殆ど行われていない.

本研究では、2009年2月に発生した上述の潮位副振動 について、天気図や気象衛星画像を用いて気象場の全体 像を調べ、数値予報モデルWRFを用いて東シナ海上での 気圧波の発生に関する数値シミュレーションを行い、詳 細な解析を行った.

2. 概況

2009年2月22日~25日の地上天気図を図-2に示す.22 日から24日にかけて,北緯28度~30度の東シナ海上に は,太平洋岸を通過する低気圧から延びる前線が停滞し た.翌25日には,西日本上空に新たな低気圧が発生し,







寒冷前線が東シナ海まで延びていた. 甑島をはじめとす る九州西岸の副振動は,24日の21時頃から観測されてお り,前線に伴う海上風の南北収束と低気圧の発生過程が 気圧微変動に関与したものと予想される.

図-3は、2月24日21時の850hPa等圧面天気図である. 日本の南の太平洋上に高気圧が張り出し、樺太から八丈 島付近まで気圧の谷が伸びており、九州沿岸は気圧の谷 の西側の北西風と高気圧に伴う南西風の収束域に対応し ている.上海上空から対馬海峡にかけて、寒気の流入に よる等温線の密な領域が見られる.



図-4 静止気象衛星 (MTSAT) の赤外画像(上)と水蒸気画 像(下). 2009年2月25日9時(日本時間)の画像



図-5 海面気圧の観測値の時間変化.表示の都合上,長崎は 9hPa,福江は6hPa,阿久根は3hPaそれぞれ海面気圧に 加えた値を示している.



図-5 鹿児島県東市来(いちき串木野市)におけるウィンドプ ロファイラによる水平風の鉛直分布.矢羽の左向きは西 風,長矢羽:10m/s,短矢羽:5m/s.

海面更正気圧の観測値(図-5)によれば、2月24日午 後9時ごろから、低気圧の発達・通過に伴い、1~2hPa 前後の気圧の変動がみられ、2月25日6時ごろと14時ご ろに気圧の急降下と急上昇がそれぞれ観測されている。 前者の気圧の急降下は甑島と阿久根で20分間に2hPaを 超え、後者の気圧上昇は福江で2hPa以上の急上昇を観測 している. 鹿児島県東市来の気象庁ウィンドプロファイ ラ観測点での風の鉛直分布を図-6に示す.地上付近では、 25日午前5時まで南西風が卓越しているが、低気圧およ び前線の通過により、西風~北西風が卓越するようにな る. 高度1.5km~4kmまでの層では、午前7時までは西 南西~西風の強風域(20m/s~30m/s)であったが、午前 7時から8時の間に西~西北西の風に風向が変化し、前線 の背後から寒気が流入していたと考えられる.

以上の気圧配置・衛星画像・地上観測の時系列より, 東シナ海上に発生した低気圧と停滞している前線の間の 対流活動が気圧微変動を発生・維持し,九州南西岸に到 達したことがある程度推察されるが,気圧微変動の規模 と伝播特性について解析を行うため,数値シミュレーシ ョンモデル(WRF)を用いた.

3. 気象モデルWRFによる数値シミュレーション

WRF (Weather Research and Forecast) (Wang et al., 2010) は、NCARやオクラホマ大学等が共同開発した気象予報 モデルで、日本国内でも気象場の数値シミュレーション モデルとして広く普及してきている、WRFは前身の気象 モデルであるMM5と同様に気圧を鉛直パラメータとし たの座標系を用いている、運動量・気温・水分のフラッ クスを保存量として基礎方程式系を構築している。数値 計算のスキームとして、3階のRunge-Kutta法と音波と重 力波モードに関する2階の分離型陽解法 (Wicker and Skamarock, 2002)を取り入れており、5次の風上差分ス キームを導入している (Skamarlock and Klemp, 2007).

本研究では、図-7に示す通り、西日本および東シナ海 全域をDomain1、九州西岸から東シナ海中部域を Domain2として計算を行い、Domain2を数値計算結果に 基づく解析対象領域とした.水平格子点間隔はDomain1 が12km, Domain2が3kmで,計算時間間隔はそれぞれ60 秒と15秒である.初期時刻は2009年2月23日9時(日本 時間)とし、初期時刻から24時間後まではDomain1のみ の計算を行い、24時間後から60時間後までの2月25日21 時まではDomain1、2のネスティング計算を行った.計 算結果の出力として、Domain2の毎10分の格子点データ の他に、上甑島・浦内湾に対応するグリッド(31.833° N, 129.857°E)上の地上気象要素を毎ステップ(15秒間 隔)で出力した.

初期条件と境界条件の入力データは、気象庁数値予報 GPVの6時間ごとのメソ解析値と全球解析値(100hPaよ り上層の大気場)と、NCEP(National Center for



Environmental Prediction)提供の5分間隔の日海面温度デ ータを使用し、計算領域内の気象庁測候所および特別地 域気象観測点の毎時の気象観測データをナッジング処理 のために使用した.格子点データによるデータ同化とナ ッジング処理の両方を行った計算を基本ケースのRun-1と し、グリッドデータの同化のみ行った場合をRun-2,デー タ同化処理を行わない計算をRun-3として計算を行った.

4. 結果

(1) 低気圧と前線周辺の気圧場

基本ケース(Run-1)における,東シナ海中部海域での地上気圧の分布,地上風の水平風速分布とその発散の分布を図-8に示す.水平風の発散については,収束域(divU < 0)のみを示している.気圧の等値線と風の発散は海上の分布のみを示している.2月25日0:00には,済州島の南海上に低気圧が発生し,済州島の西海上と低気圧中心より南側の北緯30~31度の海域に海上風の収束場がみられる.低気圧が発達しながら通過するのとともに,低気圧後面からの寒気の流入が活発となる.

一方,図-3の850hPa面天気図の通り,太平洋上の高気 圧に伴う南からの温かい空気の流入が維持されており,低 気圧南側の風の南北方向の収束域は維持され,その収束域 で,波状の気圧の微変動が発達する(図-8(b)).微変動の 東西幅は約600kmである.この気圧微変動の場(気圧波) が東進し,甑島沿岸域に次々と到達した(図-8(c)).

図-9は、図-8(b)の矢印のライン上の大気の鉛直風速 の分布を示している.前線付近の対流活動に伴う上昇流 と下降流の対が見られ、下降流の風速は1.0m/sを超える ところもある.対流セルの高さは4~5kmとやや低めで あり、図-4の衛星画像の雲頂高度のやや低い領域とよく 対応している.また、この高度では風速30m/s前後の西 南西~西の風が吹いており、地上気圧の等値線の東向き の移動速度は、70~100km/hと良く対応している.当該 領域の平均水深は約90mであり,気圧波の速度は海洋長 波の位相速度とほぼ一致する.

(2) 気圧の時系列

WRFの時系列出力機能を用いて, 鹿児島県上甑島浦内 湾の格子点に対応するグリッドの海面更正気圧の時間変





図-8 東シナ海中部海域における地上気圧(等値線)と水平 風速の収束域(濃淡),および地上風の分布(矢羽の単 位は5m/s).基準ケース(Run-1)の計算結果.





化と3時間の移動平均から差し引いた気圧の変動成分を 図-10に示す.2009年2月24日21:00ごろより,気圧の微 変動が生じており,その振幅は最大で0.8~1.0hPaとな った.3種類の条件の計算のうち,Run-3は気圧の変動成 分が最も大きく出力されている.しかしながらいずれの 計算についても,図-5の10分値観測と比べて変動が小さ い傾向にある.

Run-1の計算結果に対して、変動成分を抽出し、連続 Wavelet変換(Torrence and Compo, 1998)により、気圧 微変動の周波数特性を調べた結果を図-11に示す.図-11 によれば、10分~30分の間にWaveletスペクトルのピー クが現れており、図-9、10で見られる移動速度と波長よ り見積もられる気圧微変動の周期とほぼ同程度である。

山城ら(2009)は、上甑島浦内湾の湾振動特性につい て現地観測データを用いてスペクトル解析を行い、湾口 から湾奥部までの湾全体の振動モード(周期24.8~25.5 分)と湾の分岐部から湾奥部までの間の振動モード(周 期7.2~12.6分)があることを示している.本研究の気 圧の微変動は、湾全体の振動モードの周波数付近にピー クが見られ、内湾の振動を増幅させる海洋長波の励起に 寄与したものと考えられる.







-11 1 11 11日における気圧微変動の連続ウェーフレット変換 (Run-1).ピーク値を用いて無次元化.

5. 議論

上述の気象モデルを用いた数値シミュレーションによ り,2009年2月の甑島で発生したあびきのケースでは, 東シナ海上で発生した低気圧と,その南側で停滞し寒冷 前線として合流した前線との間で発生した気圧の微変動 (気圧波)とそれに伴う水平方向の風の収束が寄与して いることが示された.気圧波をもたらしている対流の高 さは約4kmで,上空の西南西の風に従って移動し,その 速度が海洋長波の位相速度とほぼ同程度である.気圧波 の発生・伝播に関する総観気象的なアプローチとして高 度約5.8km付近の500hPa面の大気場を解析する事例が多 い (Goring,2009; Thomson et al., 2009)が,気圧波をもた らしている対流システム内部の温度湿度分布やリチャー ドソン数などの大気安定度との関係について更に解析を 進める必要がある.

今回解析された気圧波の特徴は、Hibiya and Kajiura (1982) などに代表される気圧ジャンプのみではなく、 大規模な波群として接近し、海底反射や浅水変形により 持続的な共鳴が起こり増幅した可能性が考えられる。1 波長の波を与えた場合の増幅効果に関する数値解析は比 較的多くの研究例があるが、波群のもたらす共鳴効果に 関しては今後更なる解析が必要である。

本研究の計算の中で、低気圧の発生から通過する過程 でのマクロな気圧変化傾向は比較的良く捉えられている が、2月24日午前の気圧の峰の通過による気圧上昇が十 分に再現されていない.入力データとして使用した気象 庁数値予報GPVの全球・メソ解析値の気象庁の観測点に 対応するグリッドの数値と観測値を比較したところ、最 大で0.5hPaであり、格子点データの精度の影響の可能性 は低く、Domain2の計算開始から収束するまでに生じる バイアスの可能性が高い.

6. 結論

本研究では、2009年2月の甑島で発生したあびきの気 象場に関する解析を地上観測,天気図などの資料と気象 数値予報モデルWRFを用いて行った.

気象場に関して得られた結果は以下の通りである.東 シナ海上にある停滞前線の北側に低気圧が発生し,発達 しながら東へ移動する.低気圧の西側では,北西寄りの 寒気が前線に向かって流れ,停滞前線から寒冷前線へと 前線の構造が変化する.これにより,前線の北側では対 流活動が活発となり,空気の上昇下降により,波長 30~50km東西方向に約600kmに拡がる大規模な気圧波が 生じた.この気圧波が海洋長波の位相速度と同程度の速 度で東に進み甑島沿岸に達した.気圧波のピーク周波数 と内湾の振動モードが非常に近接しており,内湾での増 幅に寄与したとされる.気圧波の大気側の伝播は,図-8, 図-9に象徴される数100km~数10kmの水平規模(メソβ ~γスケール)の対流システムの移動と関連しており, 今回のケースでは,高度4kmまでの対流圏中~下層の西 南西~西の風がその役割を果たしたとされる.

ただし,数値計算で得られた気圧波の振幅は,現地観 測のそれと比べてやや小さく,計算領域の拡大や雲物理 過程を含め更なる検討が必要である.また,温帯低気圧 の初期における気圧微変動の発生に関して,甑島をはじ め離島での気圧微変動観測を進める必要もある.

参考文献

- 柿沼太郎・浅野敏之・井上太介・山城 徹・安田健二 (2009) :上甑島浦内湾における2009年2月潮位副振動の 被害調査,土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.1391-1395.
- 志賀 達・市川真人・楠元健一・鈴木博樹 (2007) :九州か ら薩南諸島で発生する潮位の副振動の統計的調査,気象 庁測候時報,第74巻特別号, pp. S139-S162.
- 長崎海洋気象台・鹿児島地方気象台・熊本地方気象台 (2009) :平成21年2月24日からの潮位の副振動,災害時 気象資料, 13p.
- 山城 徹・安田健二・久保山知明・城本一義・柿沼太郎・浅 野敏之(2009):上甑島浦内湾で観測した副振動の特性 について,海洋開発論文集, Vol.25, pp.1365-1370.
- Goring, D.G. (2009) : Meteotsunami resulting from the propagation of synoptic-scale weather systems, Phys. Chem. of the Earth, Vol. 34, pp. 1009-1015.
- Hibiya, T. and Kajiura, K. (1982) : Origin of the abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp.172-182.
- Skamarock, W. C., and J. B. Klemp (2007) : A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. J. Comp. Phys., special issue on environmental modeling.
- Thomson, R.E., A.B. Rabinovich, I.V. Fine, D.C. Sinnott, A. McCarthy, N.A.S. Sutherland, and L.K. Neil (2009) : Meteorological tsunamis on the coasts of British Columbia and Washington, Phys. Chem. of the Earth, vol. 34, pp.971-988.
- Torrence, C., and G.P. Compo, (1998) : A practical guide to wavelet analysis, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol 79, pp.61-78.
- Wang, W., C., Bruyere, M., Duda, J., Dudhia, D., Gill, H.-C., Lin, J., Michalakes, S., Rizvi, and S., Zhang (2010) : ARW Version 3 modeling system user guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 312 pp.
- Wicker, L. J., and Skamarock, W.C. (2002) : Time splitting methods for elastic models using forward time schemes. Mon. Wea. Rev., Vol. 130, pp.2088-2097