東北地方太平洋沖地震津波の到達による 四国沖・瀬戸内海の水塊構造への影響

宇野 宏司¹・中野 晋²

¹正会員 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

E-mail: uno@kobe-kosen.ac.jp

²正会員 徳島大学 環境防災研究センター (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail: nakano.susumu@tokushima-u.ac.jp

2011年3月の東北地方太平洋沖地震では、東日本だけでなく西日本太平洋岸の各地においても津波の到達が見られた。本研究では、東北地方太平洋沖地震発生時に、四国太平洋岸、大阪湾、播磨灘で観測されていた水位、流向・流速、水温・塩分の連続モニタリング結果を用いて、東北地方太平洋沖地震津波の到達による四国・瀬戸内海域の水塊構造への影響を明らかにした。解析の結果、四万十川沖とその河口ならびに関空MT局では東北地方太平洋沖地震で発生した津波の到達が確認され、水位変動、流速、水温・塩分の鉛直分布に影響を及ぼしていたことがわかった。また、津波到達時には四万十川河口内に形成されていた成層が一時的に弱められることが明らかになったほか、津波到達から10日後には水面変動成分を含む高周波数領域でのパワースペクトルの顕著な減少も確認された。

Key Words : the 2011 Tohoku earthquake tsunami, the Shimanto River, Brunt-Vaisala frequency, spectral analysis

1. はじめに

2011年3月11日14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の太平洋沿岸を中心に津波到達による甚大な被害が出た¹⁾が、北海道地方^{例えば、2), 3)}や関東地方^{例えば4), 5)}をはじめ、四国地方^{例えば6)}などの遠地でもその到達が確認されている。これら各地からの報告の多くは到達時刻や津波高さの言及にとどまっており、津波の到達が遠地海域の水塊構造に及ぼす影響についてはほとんど検討がなされていない。しかしながら、沿岸域で実施されている養殖業などでは、養殖筏が流出する等の津波による直接的な被害を受けない場合においても、水温や塩分の劇的な変化がノリや魚の生育・育成等に影響を及ぼすことが予想され、今回の津波が遠地海域の水塊構造にどの程度影響があったのかを把握しておくことは、こうした観点からも重要である。

このような背景を踏まえ、本研究では、東北地方太平洋沖地震発生時に、四国太平洋岸、大阪湾、播磨灘で観測された水位、流向・流速、水温・塩分の連続モニタリング結果を用いて、東北地方太平洋沖地震津波の到達による四国・瀬戸内海域の水塊構造への影響を明らかにすることを試みた。

図-1 調査地点 (全体図)

2. 調査地点と使用データ

図-1に調査地点 (全体図) を示す。本研究で対象とするのは、四万十川河口 (四国太平洋岸)、関空MT局 (大阪湾泉州沖)、明石川河口 (播磨灘) の3地点である。観測データは、関空MT局と四万十川河口については国土交通省、明石川河口については著者らによって取得されたものである。表-1に各地点での観測項目を示す。

【四万十川河口】

【関空 MT 局】

【明石川河口】

図-2 調査地点 (各地点)

四万十川河口(図-2 上)では、東北地方太平洋沖地震発生当時、3地点で流向流速、水温・塩分が測定間隔10分で計測されていた。このうちSt.2では、遡上した津波によって測定機器が漂流・流失し、解析期間の一部が欠測となったため、この地点でのデータは本研究では使用しなかった。また、水位については河口右岸の初崎水位観測所のデータ(測定間隔1分)を使用した。

表-1 観測項目

調査地点	海域	観測層数	観測項目		
			水位	流向・流速	水温・塩分
明石川河口	播磨灘	1	○	—	○
関空MT局	大阪湾	3	○	○	表層水温のみ
四万十川河口	St.1	6	—	○	○
	St.3	2	—	○	—
	初崎	1	○	—	—

図-3 東北地方太平洋沖地震発生後の水位変動

関空MT局(図-2 中)は、関西国際空港島の南西沖に設けられた24時間体制稼働の気象海象観測塔(平均水深21m)である。この観測塔において自動計測された観測項目のうち、本研究では、水位、流向流速(表層・中層・底層)、表層水温の連続観測データ(測定間隔はいずれも1分)を使用した。

明石川河口(図-2 下)の計測地点は、河口より上流400m地点に設けられているが、水深が非常に浅く、大潮干潮時には計測器が干出することがある。ここでは、水位(HOBO U20, onset社)と水温・塩分(COMPACT-CT, JFEアドバンテック社)を測定間隔2分で計測した。

3. 調査結果

(1) 水位変動

図-3に東北地方太平洋沖地震発生後の水位変動を示す。太平洋に面する四万十川河口(初崎水位観測所)においては、3月11日夕方ごろに津波の到達が確認されると、1mを超える非常に大きな振幅が翌12日午後まで継続していた様子がうかがえる。また、地震発生後から4日目となる3月15日の時点においても、満潮・干潮の滞留時には微小な変動がなお残っていたことがわかる。一方、

【四万十川河口 St1】

【四万十川河口 St3】

【関空 MT 局】

図-4 流速方向成分のイソプレット

関空MT局においては、3月11日夕方ごろに津波の到達と見られる水面変動が確認されているが、四万十川河口に比べてその振幅は小さい。これは津波が大阪湾と紀伊水道の境界にある友ヶ島水道を通過する際に減衰したためであると考えられる。また、同地点では3月15日の時点

には水面変動がかなり収まっており、通常の海域環境に回復するのは四万十川河口よりも早かったといえる。次に、明石川河口域の水位変動についてみると津波の影響はほとんど見られない。これは同河口の地理的な条件に加え、当時、冬季波浪の影響により前面に形成されたテラスと砂州によって、河口が閉塞気味であったためと考えられる。

(2) 流速方向成分の時空間変化

図-4に四万十川河口 (St1, St3)、関空MT局における流速方向成分の時空間変化図 (イソプレット) を示す。東西方向成分では東向き、南北方向成分では北向きを正と定義する。

河川流入の影響を強く受けられる四万十川河口 St1 (図-4 上) においては、河道に沿った北西 (上げ潮時) - 南東 (下げ潮時) 方向の流れの出現が全層にわたって顕著にみられたが、3月11日から14日にかけては明瞭なパターンが検出されず、津波の到達による影響が現れているものと考えられる。

一方、沖合 St3 (図-4 中) においては、河川流の影響は小さく、St1で見られたような周期的な変化は見られない。ここでは時間帯によっては表層と底層で方向の異なる流れを示していることも大きな特徴である。なお、河川流の流出の影響が及びにくいいため、流速はSt1よりも小さくなる傾向が見られる。

関空MT局 (図-4 下) では地震発生当日の11日夕方に全層にわたって北東方向の強い流れが出現しており、津波の到達が検出されたものと判断できる。しかし、津波到来の影響が次第に及ばなくなる14日以降においては、表層で南下する強い流れが次第に顕著となっている。これは大阪湾沿いに南下する東岸恒流帯や大阪湾を時計回りに流れる沖ノ瀬環流をとらえたものではないかと考えられる。

(3) 水温・塩分・密度の時空間変化 (四万十川河口)

図-5に四万十川河口 (St1, St3) における水温・塩分・海水密度の時空間変化図 (イソプレット) を示す。ここで、海水密度は、水温・塩分データをもとにクヌーセンの式を用いて算出した。

四万十川河口内にあるSt1 (図-5 上) においては、河川水流出と外海水流入の影響を受けて、表層で低水温・低塩分、底層で高水温・高塩分となっている。しかし、3月11日午後には津波到達の影響を受け、水温・塩分が鉛直方向に一様化している様子がとらえられている。密度の時空間分布をみれば、津波到達によって破壊された成層が次第に回復していく過程がはっきりと確認できる。

一方、沖合のSt3 (図-5 下) においては、河川水流出の影響がほとんど及ばないため、特に塩分は全層にわた

【四万十川河口 St.1】

【四万十川河口 St.3】

図-5 水温・塩分・密度のイソプレッド

り常に30‰を超える状況となっていた。密度の時空間変化を見てもSt.1ほど大きな変化は認められない。また、表層と底層間に明瞭な成層は確認されておらず、河口域よりも鉛直混合が容易に起こり得る状況であったといった特徴も見られる。

(4) 水位・水温・塩分の時間変化（関空MT局，明石川河口）

関空MT局においては、水位、水温（表層）、明石川

図-6 水位・水温・塩分の経過時間変化
（関空MT局・明石川河口）

図-7 ブラント・バイサラ振動数Nの計時変化

河口においては、水位、水温・塩分（表層）が測定されているが、多層での計測は行われていないために、水塊の鉛直構造が津波によってどのように変化したのかを検討することはできない。ここでは、1点での計測データのみで水位、水温・塩分の時間変化を整理する。図-6に関空MT局、明石川河口での水位・水温・塩分の時間変化を示す。

関空MT局の水位変化は、図-3にも示したとおり、3月11日夕方に津波到達と思われる水面変動が確認されているが、当該水域の表層水温にはほとんど影響を及ぼしていない。

また、明石川河口については、当時は冬季波浪によって形成された河口テラスの形成や河口砂州の発達によって、河口は閉塞している状況であった。水位と塩分の挙動を見ると、大潮の満潮時前後に計測地点までの塩水遡上していたが、津波到達による水位・水温・塩分の挙動の変化はほとんど認められなかった。なお、水深の浅い明石川での水温変化は日周性を帯びたものになっているが、外洋性の強い関空MT局の水温は極めて安定している。

図-8 水面変動のパワースペクトル (左：地震発生直後，右：地震発生から10日後)

(5) 密度場の安定性についての検討

密度成層の程度を定量的に評価する指標の一つに、ブラント・バイサラ振動数 N があり、その2乗の値は、次式で定義される。

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz} \quad (1)$$

ここに、 g ：重力加速度、 ρ ：較正密度、 dp ：下層と上層との密度差、 dz ：下層と上層間の距離である。上下層の密度差が大きくなり、成層化が強まるほど、この値は大きくなるが、反対に $N^2 < 0$ だと不安定成層になる。前々項(3)において、四万十川河口で成層化する様子が捉えられたので、ここでは本指標を用いて、津波到達による密度成層の安定性の挙動についてより詳細に検討する。

図-7に四万十川河口の水位(観測点：初崎)とSt1(河口)、St3(沖合)におけるブラント・バイサラ振動数 N の時間変化を示す。なお、水位については平均的な傾向を見るため、25時間の移動平均をとっている。

初崎水位観測点での水位変化についてみると、3月11日夕方に津波の到達によると思われる水面変動が確認され、その後も継続している様子が伺える。

河川水の流出と外海水の流入により明確な密度場が形

成されていたSt1(河口)でのブラント・バイサラ振動数 N の時間変化は、水位変化に対応する挙動を示した。特に下げ潮時は上流からの低水温の河川水が流出するため、成層が弱められやすい状況にある。また、3月11日夕方の津波到達時には一時的に値が低くなっていることがわかる。一方、沖合のSt3に関しては、河川水の流出の影響が小さく、恒常的に水温・塩分とも鉛直方向にはほぼ一様となっていた。そのため、ブラント・バイサラ振動数 N も、河口(St1)よりも小さな値を示している。ここでも、津波到達時の一時的な値の低下が見られた。

(6) スペクトル解析結果

地震発生当日および地震発生から10日後の水面変動データ(4,096個)を用いて、スペクトル解析を行った。

図-8にパワースペクトル密度を示す。四万十川河口、関空MT局においては潮位変動に起因する日周期、半日周期がいずれも卓越していた。また地震直後のデータを対象とした解析(図-8左)では、津波の到達に起因すると思われる高周期数成分の出現も見られた。これらの高周期数成分については到達から約10日後には大きく減衰していた(図-8右)。

一方、明石川河口では河口閉塞の影響を受けてパワースペクトル密度も他の2地点と比較して全体的に小さな

値をとっていたことがわかる。

4. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震発生時に、播磨灘、大阪湾、四国太平洋岸で観測されていた水位、流向・流速、水温・塩分の連続モニタリング結果を用いて、東北地方太平洋沖地震津波の到達による四国沖・瀬戸内海域の水塊構造への影響を明らかにすることを試みた。得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 四万十川沖とその河口ならびに関空MT局では東北地方太平洋沖地震で発生した津波の到達が確認され、水位変動、流速、水温・塩分の鉛直分布に影響を及ぼしていたことがわかった。
- (2) 密度成層の強さを示すブラント・バイサラ振動数 N の挙動から、津波到達時には四万十川河口内に形成されていた成層が弱められることが確認された。
- (3) スペクトル解析の結果、津波発生直後とそれより10日後のパワースペクトルの検出状況を比較すると、津波の到達が確認された四万十川沖や関空MT局において、特に津波によって引き起こされた水面変動成分を含む高周波数領域での減少が顕著であった。

今後は、解析データの対象範囲を拡げ、台風襲来時等の他の時期の成層破壊・回復過程との比較を行い、その特性をより明らかにするとともに、生態系への影響につ

いて他の海域での事例も含め検討していくことが今後の課題である。

謝辞： 四万十川河口のデータについては国土交通省中村河川国道事務所より、関空MT局のデータについては関西国際空港株式会社よりご提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本気象協会：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震津波の概要（速報），<http://www.jwa.or.jp/static/topics/20110329/touhokujishin110329.pdf>（2013 年 3 月 31 日 確認），11p., 2011.
- 2) 松川優一，荒繁彦，加藤三明，油川曜佑，渡邊幸一，長岡宏樹，山口甲，2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した北海道十勝川河川津波の観測，土木学会論文集 B1（水工学），第 68 巻，No.4，pp.I_1513-I_1518，2012.
- 3) 阿部孝章，吉川泰弘，安田浩保，平井康幸：2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上，土木学会論文集 B1（水工学），第 68 巻，No.4，pp.I_1525-I_1530，2012.
- 4) 赤穂良輔，石川忠晴：平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波における利根川下流の津波遡上再現計算，土木学会論文集 B1（水工学），第 68 巻，No.4，pp.I_1543-I_1548，2012.
- 5) 福本幸成，助川博之，岩前信幸，池谷毅：銚子沖で観測された東北地方太平洋沖地震津波の水理データ，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 68 巻，No.1，pp.1-5，2012.
- 6) 国土交通省四国地方整備局：四国の河川における東北地方太平洋沖地震津波の影響範囲について，<http://www.skr.mlit.go.jp/pres/h23backnum/kasen/110422/110422-1.pdf>（2013 年 3 月 31 日 確認），10p., 2011.

EFFECT ON WATER MASS STRUCTURE IN WEST JAPAN BY THE 2011 TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Kohji UNO and Susumu NAKANO

The 2011 Tohoku earthquake tsunami devastated the coastal zone in east Japan. It was also reached to the Pacific coast in west Japan area. The most reports were limited reaching tsunami time and its height. However, it is important to consider the effect on water mass structure by tsunami waves from the viewpoint of sustainable fisheries industry or conservation of marine ecosystem.

In this study, from the analysis for monitoring data in Shikoku and Seto Inland sea, temporal breaking the stratification by tsunami waves and the appearance of high-frequency component were confirmed.