2011年東北津波による東京湾のノリ養殖被害に関する考察

On the Mechanism of Damage to Laver Aquaculture in Tokyo Bay Caused by the 2011 Tohoku Tsunami

佐々木 淳¹・山本修司²・Retno Utami Agung WIYONO³・鈴木崇之⁴・田中陽二⁵

Jun SASAKI, Shuji YAMAMOTO, Retno Utami Agung WIYONO, Takayuki SUZUKI and Yoji TANAKA

The 2011 Tohoku tsunami caused severe damage to laver aquaculture in Tokyo Bay. We performed investigations at several fisheries cooperatives and organized spatial variations of damage degree for each of farming facilities. We then carried out numerical hindcasting of the tsunami to elucidate the damage mechanisms using an unstructured finite volume circulation model FVCOM. From the investigation and the numerical simulation results, the degree of damage was found to be correlated to the magnitude of the maximum drag stress on the facilities rather than the maximum tsunami height. We also made a prediction of tsunami damage to seaweed farming caused by each of expected earthquakes and found out that a Keicho-type earthquake may lead to heavier damage in the southern part of the bay.

1. はじめに

2011年東日本大震災の津波は東京湾沿岸でも漁港を中心に浸水や漁船転覆等の被害が見られたが、ノリ養殖では甚大な被害が見られた。津波によるノリ養殖被害は東北地方を中心に多くの内湾で見られたが、そのほとんどが全損であるのに対し、東京湾内では全損から被害無しまで分布し地域による差が大きい。Laknathら(2012)は2011年東北津波によるノリ養殖施設被害の発現機構について詳細な数値解析を行っているが、個々のノリヒビ被害の実態把握に基づくものではない。

そこで本研究では現地調査により東京湾内のノリ養殖被害の程度をノリヒビ単位で明らかにし、数値計算による津波の再現を行うことで被害程度の発現要因を考察する。さらに想定される津波の中から東京湾への影響が大きいと予想されるものを選定して数値実験を行い、2011年津波による被害との比較考察を行う。

2. ノリ養殖被害の把握方法

2012年6月20日および2013年2月18日に三番瀬(船橋漁協)、木更津の盤州干潟周辺(牛込漁協、金田漁協、江川漁協、木更津漁協)、および富津岬周辺(富津漁協、新富津漁協、大佐和漁協)においてノリ養殖被害に関する

ヒアリング調査を実施した。その際、ノリヒビ一つ一つの配置が記載されているノリ養殖漁場図を可能な限り入手し、ノリヒビの空間配置、サイズ、被害程度の把握に努めた。被害程度については全損、半損、被害なしの3段階に分けられており、被害なしにはノリ網やノリ自体に被害はなかったが、一部杭抜け等が見られたケースが含まれている。

入手したノリヒビ平面配置図をスキャナで画像データ化し、ArcGISのジオリファレンスを用いて緯度経度座標系に変換補正した。次にArcGIS上でノリヒビの位置にノリヒビ水平形状に相当する長方形ポリゴンを配置し、先の3段階の被害程度を属性情報として付加した。

3. 数値計算の方法

ノリヒビの被害程度と津波外力との関係を調べるため、津波の数値計算を行う。一つのノリヒビの空間スケールが50m程度であり、岬等の海岸線や水深分布をより精密に再現可能な非構造格子の海洋流動モデルであるFVCOM(Chenら, 2003)を採用する。

(1) 計算格子の作成

格子の作成に際しては東京湾内全域を約100mの格子で解像することを基本とし、さらにノリヒビ周辺海域で解像度を上げ、ノリヒビ自体は約5mの格子で解像することとした。すべてのノリヒビを対象として1つの計算格子を作成すると計算コストが膨大となるため、盤州周辺、富津岬周辺、大佐和周辺を対象とする格子システムをそれぞれ作成することとした。具体的にはまず、Sasakiら(2012)で作成された東京湾内を約100mで解像する格子をベース(大領域)とし、ノリヒビ対象海域毎に小領域を設定して大領域からくりぬく。次に小領域において大領域との境界(開境界)は大領域格子と同一と

1 正会員	博(工)	東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
2		横浜国立大学大学院都市イノベーション学府都市地域社会専攻
3	修(工)	横浜国立大学大学院都市イノベーション学府都市イノベーション専攻
4 正会員	博(工)	横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院
5 正会員	博(環)	横浜国立大学研究教員 大学院都市イノベーション研究院

図-3 3タイプの地震による津波最大水位の平面分布。(a) 2011年東北, (b) 東京湾北部, (c) 慶長型

図-4 ノリヒビ毎の被害程度と最大水位の関係

の潮位の低い時期に当たることがわかり、津波による水位上昇の影響はあまりなかったものと推察される。

(3) ノリヒビ抵抗応力と被害程度

ノリヒビ抵抗応力は式(1)より流速の二乗に比例する。そこでまず、2011年東北津波による東京湾内の最大流速分布の計算値を図-5(a)に示す。また、同様の意味合いのものだが、ノリヒビごとの抵抗応力計算値を図-6(a)に、さらに対象漁場域を拡大したノリヒビ抵抗応力の計算値と被害程度を比較したものを図-7に示す。

ノリヒビ抵抗応力を漁場間で比較すると、新富津漁場と富津漁場で最も大きく、次が三番瀬市川航路周辺の船

橋漁場となっており、最も抵抗応力の小さかった木更津盤州干潟周辺漁場と富津岬南側の大佐和漁場は同程度となっていることが見て取れる。この抵抗応力の漁場間の分布は被害程度の分布と概ね対応しており、津波の強い流れによるノリヒビ抵抗力で被害程度の分布をある程度説明できることがわかる。図-5の最大流速場からは木更津盤州周辺でも1m/sを超える大きな流速値が分布している様子が見られるが、木更津のべた流し漁場はそのやや沖合の最大流速値が小さいエリアに分布していることから、被害程度が相対的に小さかったものと考えられる。一方、木更津盤州干潟アクアライン北側の牛込漁場では抵抗応力から推定されるよりも被害程度が大きくなっている。この点については後に地震との関係で考察する。

図-8に対象としたすべてのノリヒビについて、被害程度とノリヒビ抵抗応力の関係をプロットしたものを示す。これまで見てきたように、被害程度と抵抗応力にはおおそ正の相関があり、抵抗応力値10N/m²が被害発現の閾値になると考えられる。一方、被害程度の中と大は抵抗応力と相関するものの、重なる部分も多い。また、

図-5 3タイプの津波による最大流速計算値の平面分布。(a) 2011年東北, (b) 東京湾北部, (c) 慶長型

図-6 3タイプの津波による最大ノリヒビ抵抗応力計算値。(a) 2011年東北, (b) 東京湾北部, (c) 慶長型

図-7 被害程度(左)とノリヒビ抵抗応力(右)。上段から三番瀬、盤州、富津、および大佐和

抵抗応力 10N/m^2 未満で被害程度大と判定されるものも少なからず存在している。これらのばらつきについて以下で考察を加える。

(4) 津波による抵抗力と被害程度に関する考察

これまでの議論ではノリヒビの抵抗応力に着目してきたが、被害の主な原因であるロープの切断やロープに接続する杭の抜けはそれぞれにかかる力に依存すると考えられ、その力を推定する際には個々のノリヒビに働く抵抗力を推定する必要がある。一つのノリヒビに働く抵抗力は先に求めた抵抗応力にノリヒビ面積を乗することで見積もることができると仮定する。個々のべた流しのノリヒビ面積は漁協へのヒアリングから、盤州周辺(牛込、金田、江川、木更津)を $50\text{m} \times 100\text{m}$ (漁協による多少の相違がある)、富津を $47\text{m} \times 132\text{m}$ 、新富津を $46\text{m} \times 144\text{m}$ 、大佐和を $50\text{m} \times 77.7\text{m}$ とし、個々のノリヒビの被害程度

図-8 ノリヒビ毎の被害程度と抵抗応力の関係

図-9 ノリヒビ毎の被害程度と全抵抗力の関係

と全抵抗力の関係をプロットしたものを図-9に示す。

ノリヒビ一つ当たりの面積は富津が最大で、大佐和の約2倍、盤州の約1.4倍となっていることから、富津の抵抗力が他漁場の抵抗力より相対的に大きくなり、被害程度を分ける閾値 (50kN) がより明確になったことが分かる。一方、個々のロープ等に働く力についてはノリヒビ同士の接続等もあってその構造は複雑かつ個々に異なることから、簡単に見積もることはできない。被害の発現としては、一部のロープの切断や杭の抜けが主であることから、少数のロープや杭に選択的に強い力がかかった可能性もあり、ノリヒビの全抵抗力に着目することが被害程度の簡易な予測には有効であると考えられる。

(5) 地震による揺れと被害程度に関する考察

図-7に示したように、木更津盤州北側の牛込漁場ではノリヒビ抵抗応力から推定されるよりも被害程度の大きなノリヒビが見られた。牛込漁協でのヒアリングでは「足砂」と呼ばれる、杭が砂から浮き上がって抜ける現象が見られ、その結果2つのノリヒビが全損となったとの証言を得た。これは地震の揺れによる砂質底質の液状化によるものと思われ、実際、多くの杭が抜けなくても浮き上がっていたとの証言を得た。東京湾内では浦安埋立地の液状化被害がよく知られているが、佐々木ら(2012)の調査でも三番瀬の液状化が報告されており、東京湾北部での液状化被害が顕著に見られる。図-2に2011年東北地震による東京湾岸の震度分布を示すが、木更津以北で震度5弱またはそれ以上、木更津以南で震度4となっていることがおおそ見て取れる。従って、木更津盤州周辺漁場のノリヒビ全損は液状化を主因とするも

のであると推察される。

(6) 想定地震津波によるノリヒビ被害予測

東京湾への影響が懸念される想定津波の内、東京湾北部地震津波と神奈川県による慶長型地震津波を採り上げ、予想されるノリヒビ被害について検討する。

図-3の(b)および(c)のそれぞれに東京湾北部地震および慶長型地震による津波の最大水位分布の計算値を示す。東京湾北部地震は東京湾全体で0.5m以下に収まっており、水位上昇による被害はないものと推定される。一方、慶長型津波では全体に水位上昇が大きく、2011年東北津波の水位上昇を大きく上回っている。2011年東北津波での解析結果から2m程度までの水位上昇の影響は大きくないと仮定すれば、富津岬南側の新富津漁場や大佐和漁場を除くと、対象とした漁場への影響は大きくないと推察される。ただし、津波来襲時の潮位の影響についてはさらなる検討が必要である。

図-5および図-6の(b)および(c)のそれぞれに東京湾北部地震および慶長型地震による津波の最大流速分布とノリヒビに働く最大抵抗応力を示す。東京湾北部地震津波による最大流速およびノリヒビ最大抵抗応力は共に小さく、2011年東北津波による結果との比較からも被害は発現しないものと推察される。一方、慶長型津波の最大流速分布は2011年東北津波と比較すると湾央以南、特に湾口で顕著に大きく、湾奥では同程度と見ることができ。渡辺(1970)が指摘した通り、遠地津波である2011年東北津波に比べ、近地津波の慶長型津波は湾口で津波の高さが非常に高くなり、湾奥に向かって減衰が大きくなる特徴を有しており、流速分布もこれと同様の傾向となっている。ノリヒビ抵抗応力からは富津岬南側の新富津漁場に加え、2011年東北津波では被害が比較的軽微であった大佐和漁場でも壊滅的被害が予想される。さらに盤州干潟南部の木更津漁場でも抵抗応力が大きくなっており、被害の発現が予想される。一方、盤州干潟北部の金田漁場、牛込漁場、および三番瀬の船橋漁場では2011年東北津波と同程度の被害と予想される。

5. まとめ

2011年3月11日の東日本大震災の発災時に東京湾ではノリ養殖が行われており、津波等による甚大な被害が発生したことから、被害の実態把握と被災メカニズムの解明を目的とした関係漁協へのヒアリング調査と数値再現計算による検討を行った結果、以下の結論を得た。

・津波によるノリヒビの被害は新富津漁場、富津漁場、および船橋漁場において甚大であり、木更津漁場と大佐和漁場においては相対的に軽微であった。また、直接的な被害の原因はノリヒビのロープ切断や杭の抜けによるノリ網の破損であった。

・被害程度と津波による最大水位には相関は見られなかった一方、津波によるノリヒビの最大抵抗応力とはよい相関が見られ、抵抗応力 10N/m^2 が被害発現のおおよその閾値となっていた。さらに、抵抗応力にノリヒビの面積を乗じた最大抵抗力を用いることで被害程度をよりの確に予測できることが示唆された。

・木更津牛込漁場では地震による液状化に伴う杭の浮き上がりや抜けがノリヒビの被害を引き起こしていると推察される事例が見られた。

・想定津波に関する検討から、東京湾北部津波の影響は軽微である一方、慶長型津波では2011年東北津波と比較して、木更津以南ではより甚大な被害が発生し、木更津以北では同程度の被害が見られるものと予測された。

謝辞：ヒアリング調査では各漁協にご協力いただいた。マサチューセッツ大学ダートマス校FVCOM開発チーム(代表：Changsheng Chen教授)にはFVCOM使用の便宜を図っていただいた。本研究の一部は(独)科学技術振興機構2011年度～2012年度震災関連研究を対象とした「国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)」、および科研費基盤研究(B)課題番号25289152の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 神奈川県県土整備局(2012)：新たな津波予測図解説書, 41pp.
- 佐々木 淳・伊藤一教・鈴木崇之・Retno Utami Agung Wiyono・織田幸伸・高山百合子・羽角華奈子・古田敦史・高木泰士(2012)：年東北津波の東京湾内での伝播特性と被害状況, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_261-I_265.
- 千葉県(2008)：平成19年度千葉県地震被害想定調査結果報告書.
- 八木 宏・石田大暁・高橋亜依・灘岡和夫・田村 仁・小谷正幸(2004)：ノリ養殖施設の流体抵抗と潮流・浮泥輸送への影響, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 1026?1030.
- 渡辺偉夫(1970)：南関東沿岸の津波, 地学雑誌, 第79巻, 第3号, pp. 53-60.
- Chen, C., H. Liu and R.C. Beardsley (2003): An unstructured, finite-volume, three-dimensional primitive equation ocean model application to coastal ocean and estuaries, J. Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 20, 159-186.
- Laknath, D.P.C., T. Honda, K. Ito, J. Sasaki, Y. Takayama and Y. Oda (2012): Study on damages of laver aquaculture facilities in Tokyo Bay from 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, Proc. Coast. Eng., JSCE, Vol. 3, pp. 46-50.
- Okada, Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154.
- Sasaki, J., K. Ito, T. Suzuki, R.U.A. Wiyono, Y. Oda., Y. Takayama, Y. Yokota, K. Furuya and H. Takagi (2012): Behavior of the 2011 Tohoku earthquake tsunami and resultant damage in Tokyo Bay, Coast. Eng. J., Vol. 54, No. 1, 1250012, 26pp.
- Wei, S.A. Sladen and the ARIA group (2011): Updated result 3/11/2011 (Mw 9.0), Tohoku-oki, Japan, Source Models of Large Earthquakes, http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2011_taiheiyu-oki/ (accessed on Jan 23, 2012).