

GoogleMapから判読した 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の侵入過程と津波堆積物*

山形大学地域教育文化学部 川辺孝幸・大沼由佳・佐々木 愛

1 はじめに

平成23年3月11日14時46分頃、三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)が発生し、数分間大きな揺れが続くとともに、10mを越す巨大な津波が発生し、東北地方～関東地方の太平洋沿岸にかけて甚大な被害が発生した。

筆者らは、この津波とその被害の実態を明らかにするために、国土地理院公表の空中写真および地震後のGoogleMapに掲載の衛星写真、ネット上に公開されている各種Web動画等の画像情報によって解析をおこなった。また、現地調査によって、津波被害と津波堆積物のベッドフォームとその断面観察をおこなっている。本報告では、仙台平野における津波の侵入過程と津波堆積物について報告する。

なお、津波を記載するにあたっては、用語の整理が必要であると思われる(志岐ほか, 2011)。特に、津波が陸上に侵入時からの津波の挙動は、流水の挙動そのものであり、津波流(津波遡上流, 津波引き流)ともいべき流れである。流れの先端ではローブ(舌状)をなし、流れの内部は乱流となって表面に波が生じる。海岸部での砕波や障害物に津波流が当たった際の打ち上げがおこる。実際に津波がどのような規模でどのようなところまで遡上したかを推定する場合、浮遊堆積物が建物や木、電柱などに引っかかっていたり、何かがぶつかって傷ができる物痕(tool mark)が付いていたり、草木がなぎ倒されていたり、草木やゴミ、瓦礫が集積していたりすること、また、壁や窓ガラスなどに汚れた喫水線の痕跡が付いていたりすることなどに注目して、痕跡高や遡上高、痕跡高(MSL), 痕跡高(TP)などが求められる(気象庁, 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011)。被害という観点からはこれで問題無いが、実際の津波流の規模(ボリューム, 深さなど)を推定する際には、津波流の、ローブとして挙動する三次元形態や、表面の波高、障害物にぶつかった際の打ち上げなどの現象、また、それらの時系列変化等を考慮する必要がある、今後、記載のための用語も含めて検討される必要がある。

なお、本研究を進めるにあたって、各種判読結果を記載するために、基本的には国土地理院発行CD-ROM版数値地図25000(地図画像)『白河』、『福島』、『仙台』、『石巻』、『一関』、『森岡』に含まれる国土地理院発行2万5千分の1地形図の読み取り画像を使用した。しかし同CD-ROMの掲載年代が古いために現状に合わない部分については、国土地理院のウォッチーズ地図閲覧サービスおよびGoogle Mapを参考に加筆した。

2 沖積平野としての仙台平野の地形的特徴と微地形

仙台平野の沖積平野は、海岸線から西側の丘陵・台地までの幅が約5～9kmで、現世砂丘の内側に発達する2列～4列の砂丘列、七北田川、広瀬川、名取川、阿武隈川の扇状地、自然堤防帯などの微高地、および微高地の間に広がるラグーン、後背湿地および砂丘間低地からなっている(図-1)。

仙台平野の沖積平野は、名取川を境に北側(仙台平野北部)では海岸線からの幅が約8～9kmで、活構造である長町-利府線を境とする台地に接する部分では、扇状地部では標高約15m、後背地部で標高約7mで、

*Incursive process of tsunami by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake reading from GoogleMap and its tsunamiite. Takayuki Kawabe, Yuka Onuma and Ai Sasaki

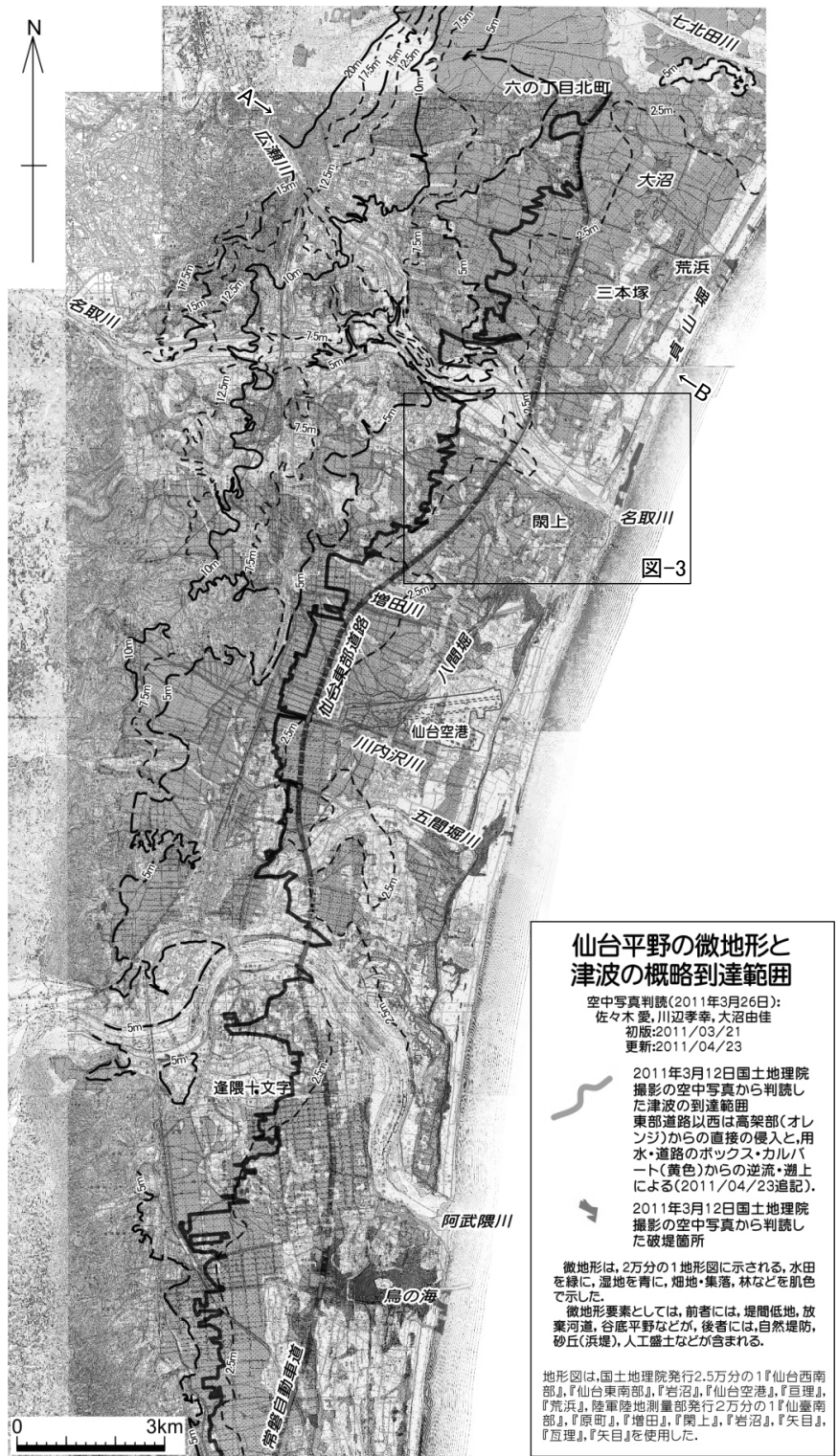


図-1 仙台平野の微地形と津波の概略到達範囲 矢印A, Bは、図-2の断面図の位置を示す。

台地と接続する。名取川の南側(仙台平野南部)では、海岸線からの幅が約5～7kmであり、後背湿地部で表協約5m、扇状地部では約10mで丘陵地に接続する。

海からの津波の侵入に対するフロントとなる現世砂丘は、標高約2.5m～5.5mで、その西部に、河口部に発達する蒲生干潟や北浦、井土浦広浦、鳥の海などのラグーンを繋ぐかたちで、砂丘に並行に、貞山堀が掘られている。

現世砂丘の内陸側には、現世砂丘から約2km内陸部、約3km内陸部および約5km内陸部に北東-南西方向に転々と連続する砂丘列が、比高0.5m～1m前後の微高地として認められる。現世砂丘と約2km内陸部の砂丘との間には、北長沼、南長沼があり、その砂丘の西側には大沼、小沼、川戸沼などがある。また、南長沼より南側では、この砂丘間低地に、もう1列砂丘列が発達する。最も内陸側の砂丘は、海岸線より約6km内陸側で、丘陵の高まりの張り出しに接続するかたちで分布している。

扇状地は、広瀬川および名取川では、比較的明瞭で、沖積平野の出口から扇端まで約5kmの範囲で識別できる。広瀬川は、現在では名取川に、沖積平野への出口から約3kmの下流側で接続されているが、微地形の高まりは、北東側の七北田川河口付近に向かって明瞭に現れている。一方、阿武隈川は、出口付近から扇端まで約3kmの範囲で識別できる。阿武隈川は沖積平野への出口付近から蛇行が顕著であるが、出口から旧河道の両側に発達する旧自然堤防を切きって、放射状にクレバスや微高地が発達しており、洪水時における扇状地特有のフラッシュの流れが認められ、扇状地とみることができる。

自然堤防帯は、広瀬川、名取川、阿武隈川の河川沿いに、放棄河道の低地を挟んで両側に、1m前後の微高地をつくってみられる。名取川および阿武隈川で顕著であるが、これらの河川は、沿岸流の影響を受けて、北北東方向～北東方向に向かって海岸線に平行に伸び、急に東～東南東方向に屈曲して発達するものが多い。

なお、海岸から2～3.5km内陸側、住宅地の発達する2列目と3列目の砂丘の間の低地に、比高約5mの盛り土を中心とした仙台東部道路～常磐自動車道の土手状の高まりがあるが、東西を隔離しているわけではなく、一般道を跨ぐ部分や用水を横切る部分では、高架やボックスカルバートなどの開口部になっている。

このような微地形の発達する沖積平野に、津波が侵入した。

3 津波流の到達範囲とその厚さ(津波深)

仙台平野では、平均標高5m程の現世砂丘を乗り越え、陸側に侵入した津波の遡上流は、盛り土の仙台東部道路～常磐自動車道にまで到達して阻まれ、その西側への遡上は、盛り土以外の高架部や用水路及び道路のボックスカルバートを通っておこなわれている、また、ボックスカルバートをくぐって通り抜けた津波流は、そのまま用水を遡上して、一部は溢れて水田に流れ込んでいる。

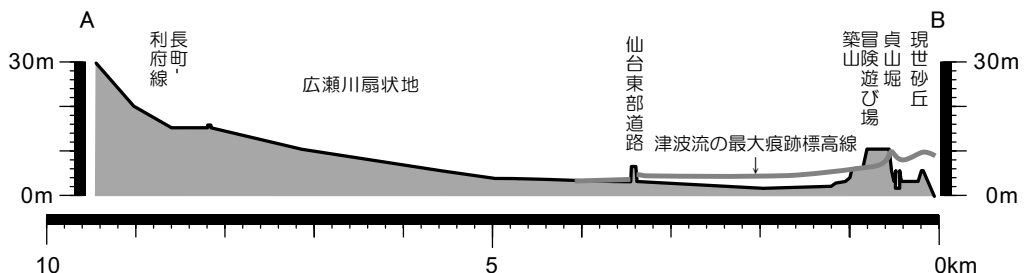


図-2 仙台平野、沖積平野部の海岸部～台地部を横断する北西-南東断面(断面の位置は図-1に示す)津波の最大痕跡標高線は、同一時間における津波流の表面を表したものではなく、時間的に異なるそれぞれの場所での最大痕跡標高を繋いだ線である。

1) 津波侵入時の海岸部での砂丘の乗り越え標高とその厚さ(津波深)

仙台市若葉区荒浜の冒険遊び場付近では、津波は、約4~5mの現世砂丘を越え、貞山堀の陸側、標高約1.5mの内陸側現世砂丘では、痕跡痕は、冒険広場にある高台の海側で標高約11mまで、高台中央部では約6.5mの標高まで認められる。また、標高2.7m前後の冒険広場管理棟付近では、標高5m付近まで痕跡痕がある。一方、標高2.5m~5mの現世砂丘を越えた際の津波水面の最大標高は、画像からは最大で約10m程度であったと推定できる。砂丘の標高と津波水面の標高からは、砂丘を越える際の津波の厚さ(津波深)は最大で7.5m前後、平均的には5m程度であったと推定できる。

現世砂丘を乗り越えた津波は、そこから3m前後の標高差を流下して津波流となって、深さ約3mの深さ(厚さ)で、陸側に侵入・遡上していったことがわかる。

なお、現世砂丘を超える際の津波の高さと速さは一様でなく、早くて高い部分とやや遅くて低い部分が、海岸に発達する礫の分布のように、交互に現れている。また、毎日新聞社・手塚浩一郎氏が名取川上空から南を撮影した写真からは、現世砂丘を越えて陸側に侵入した津波流が、逆巻く波を立てて高流領域の流れ(射流)となって流れ込んでいる様子がわかる。

2) 津波流の最大遡上標高と厚さ(津波流深)

仙台平野では、平均標高5m程の砂丘を乗り越えて流入した津波流は、自動車道の盛り土によってかなりの部分が阻止されたが、その各所にある開口部を通して、さらに内陸部に遡上・侵入した。到達した最大標高は海拔3.5m程度であり、内陸側から2番目の砂丘列の手前付近まで到達している(図-1)。

津波流は、図-2に示す断面図の線上では、海岸線から陸側に約2.5km、標高約2m前後の地点では、建物

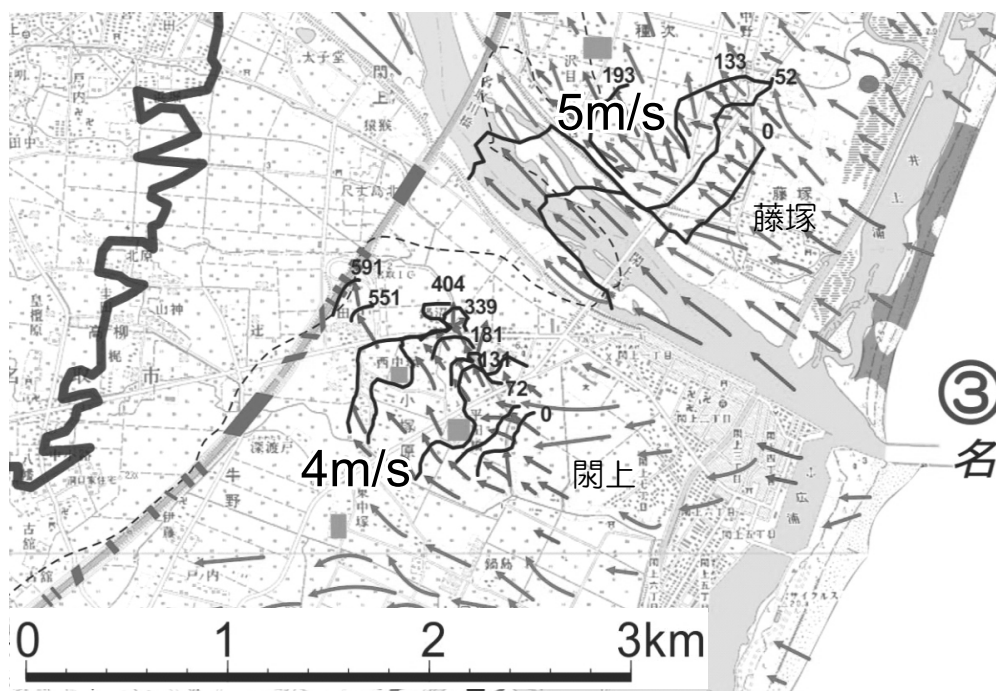


図-3 Net動画から読み取った、名取川両岸の第一波の津波流の等侵入時間線を示す図。線の脇の数字は、それぞれの場所における到達した相対時間(一番海側の線を0として、そこからの到達時間)を示す。また、線の描画範囲内の小さい矢印(赤)はその際の流れの方向を、全体にある長い矢印は、図-4に示すGoogle Mapから読み取ったベッドフォームとそこから推定される津波流の方向を示す。図の位置は図-1に示す

や林などにみられる痕跡からは、津波流深は2m弱、水面標高で約4m弱であることがわかる。

仙台東部道路を越えた西側では、開口部を除いて数10cmであり、徐々に減じて、津波流の遡上限界に達する。到達限界標高は、若林区下飯田～今泉では2.6m付近である。一方、自動車道をくぐる用水部分では、用水内をさらに遡上して、その上流部で溢れ出ている例もある(図-2, 阿武隈川右岸の逢隈十文字など)。

4 Net動画から読み取れる津波流の運動形態

津波襲来時の状況に関しては、YouTubeなどのNet動画が多数存在している。それらの動画から、個々の動画撮影範囲において、同一時間における津波の到達地点およびその進行方向を読み取り、到達時間・地点ごとに色分けして線で表し、進行方向を矢印で示して地形図上に記載することで津波の侵入状況を表した(図-3)。

Net動画からの判読では、仙台平野に到達した津波は、まず、河川の河口から侵入して河川を逆流遡上し、その後、砂丘を超えて沖積平野へと侵入する。同時に、津波は河川から溢れ出て後背地に津波流を流しながら、さらに奥へと侵入する。沖積平野内では、津波流は、用水路や道路に沿って運動しやすく、障害物がない水田では流向を変えずに幅広いローブの集まりとして前進していく。これに対して、建物や樹林などの障害物がある場合には、津波は障害物にぶち当たって障害物の無い方向へと障害物を避け、その脇に集まってローブをつくって進んでいく。

Net動画から判読した津波流の流速は、名取川右岸の閑上地区で最大約4m/sec, 名取川右岸の藤塚地区の西方で最大約5m/sec である。

5 津波後、3月末撮影のGoogle Map衛星写真から判読できる津波の流向

地震後に公開された3月末撮影のGoogle Map衛星写真からは、津波による地表の被害状況とともに、津波流による侵食状況や、流木や瓦礫・車、砂などの津波堆積物の堆積状況などが読み取れる。

オリエンテーションを持つ流木や瓦礫、車(エンジンのある方が重く、反対側は軽いので、エンジンのある方を流れの上流側に向けて堆積する)などや、砂のベッドフォームの形態などから、流れの方向を判読できる

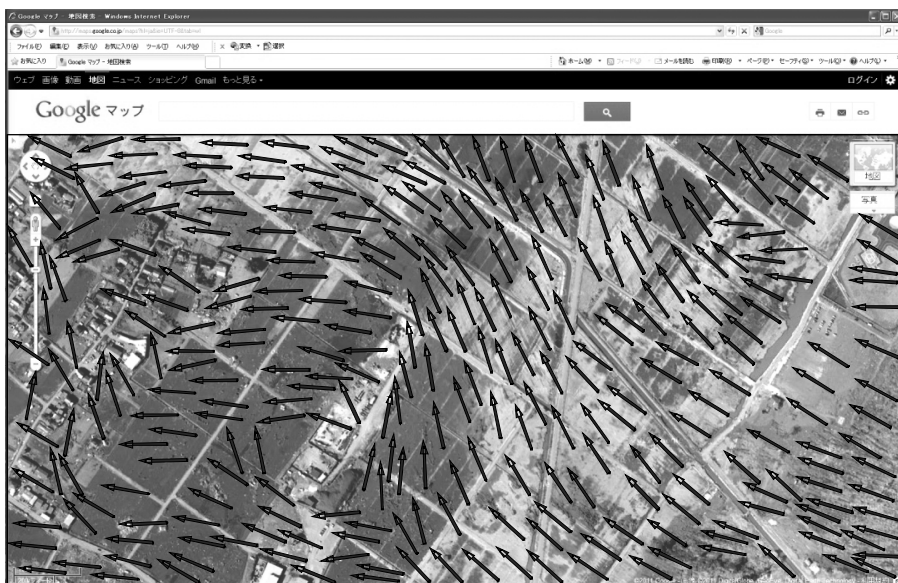


図-4 震災後に公表された Google Map衛星写真からの流向の判読例 矢印の向きが津波流の方向

(図-4). これを地図上にプロットしたものの一部を図-3に示す.

なお, Google Map衛星写真で撮影されているベッドフォームは, 次に述べるように, 3回押し寄せた津波流のうちの, 最後の津波流によるものである.

6 津波堆積物と推定される津波の性質

現地での断面観察から, 仙台平野の津波堆積物が3層準の押し流れと引き流れのセットからなっていて(西城, 2011), 験潮所等の津波の観測結果(一般財団法人日本気象協会, 2011)と調和的である.

断面観察結果からは, 動画のものは最初の津波遡上流に, Google Map衛星写真のベッドフォームは, 3回目の津波流によって堆積した砂がつくるベッドフォームであることがわかった.

仙台平野の津波堆積物は, 最下部のセットが, 細粒分の少ない瓦礫を含む粗粒な堆積物からなるのに対し, 中部のセットは厚い瓦礫や泥層の偽礫を含む泥質な堆積物を主体とし, 最上部のセットは細粒分の少ない堆積物からなっている. このことから, 津波堆積物を運搬してきた津波流の状態は, 3回のうち, 最初のものとは最後のものは比較的細粒分の少ない状態=濁りの少ない状態であるのに対して, 2回目の津波流は, 細粒分を多く含んだ, 非常に濁った状態の流れで違ったことが推定される.

このような堆積物とそれらから推定される津波流の状態の違いは, それぞれ押し寄せてくる津波の性質の違いを反映している可能性がある.

すなわち, 最初の津波は, 海底をあまり浸食せずに, 水面が上昇しながら押し寄せる津波のエネルギーと, 現世砂丘を乗り越えて陸側に落ちる際の位置エネルギーが, 陸側への津波流になっている. 2番目の津波流は, 外浜の泥底まで露出するまでに低下していく1回目の津波の引き波の際に, 外浜の泥底を侵食することによって, 浸食した外浜の泥質堆積物を多量に含んだ海水が押し寄せたと推定される. 一方, 3番目の津波流は, 細粒分が少なく, すなわち, 水の濁りが少ないことから, 沖合の海水の表面付近海水が津波として押し寄せ, 津波流となって遡上した可能性がある,

7 おわりに

現時点では, 津波堆積物の観察は断片的であり, 今後面的に調査をおこなって, 遡上とともに変化していく津波流の状態を面的・時系列的に復原していく必要がある.

最後に, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震で命を落とされた多数の方々のご冥福をお祈りするとともに, 津波の襲来を受けた地域地域における安全・安心な復興計画に向けて寄与することを念頭に調査を進めていきたい.

文 献

一般財団法人日本気象協会, 2011, 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>.

気象庁, 津波について. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq26.html>.

西城光洋, 2011, 南三陸町(宮城県)における津波の被災状況と, 仙台市北東部に位置する蒲生干潟における津波後の地形変遷観察の取り組み. 地学団体研究会総会講演要旨・巡検案内書, 65, 40-41.

志岐常正・池田 碩・川辺孝幸・鈴木寿志・橘 徹・三上楨次, 2011, 東日本大震災の津波による被害とそれからの復興の関する堆積学的問題—地形的条件による津波と津波流の違いに着目して. 日本堆積学会 2011年長崎大会プログラム・講演要旨集, 58-59.

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011, 津波の高さの定義. <http://www.coastal.jp/ttjt/index.php?%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E3%81%AE%E9%AB%98%E3%81%95%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%BE%A9>