

2011 年東北津波での岩手、宮城県北部河川における最大水位の河口距離による推移

阿部 邦昭*

概要

2011 年東北地方太平洋沖地震津波において、岩手県の津軽石川、大槌川、盛川、気仙川、および宮城県の八幡川、北上川、鳴瀬川における遡上の実態を痕跡調査の結果を基にして調べ、津波最大水位の河口距離による推移を求めた。最大水位が距離とともに減衰することから、指数減衰を仮定し、最小自乗法で各河川の減衰率を求めた。その結果、減衰率が河川勾配に比例する結果が得られた。川面の高さの標高値を津波の高さに加算することで津波の標高値を求め、減衰率に基づいた減衰曲線に重ね合わせた。その結果、勾配の大きい河川では津波が河口水位と同じ標高を維持して遡上限界まで到達していることが示された。

序論

津波が河川に沿って遡上し、上流で氾濫した例として 1854 年安政南海津波の和歌山県の広川が上げられるが、河川遡上を系統的に調べたものとして 1983 年の日本海中部地震津波の際の日本海沿岸の河川についてのものである (Abe, 1986)。2011 年東北津波では追波湾に注ぐ北上川の堤防が遡上した津波によって破壊され、氾濫した。この津波の河川での氾濫や水位の減衰については、木村 (2011)、田中他 (2012) などの研究がある。川を遡上する津波は長い距離を伝わり、たどりやすい痕跡を残していくので、これを拾い集める事は津波の性質を解明する上での重要な資料を得ることになる。この観点で、2011 年東北津波の岩手県および宮城県北部の 7 河

川で痕跡調査を実施し、最大水位の河口距離による推移のデータを得た。これを紹介し、それに基づいて行った解析の結果を報告する。

方法

調査は河川の岸で津波の痕跡を見出して、その中で最も高いものの高さを川の水面を基準にして測定するものである。高さはレベルで同定し、スケールを使って測定する。測定位置は 2 万 5 千分の 1 地形図で確認し、プロットする。測定時刻を記録し、河口付近での川面の潮位補正に利用する。川面の高さは河口付近では潮汐の影響を受けるが上流部は受けない。そこでこの地域の潮位差を参考に標高 2m を基準にそれ以上では影響を受けず、2m 未満では河口の海水面と同じ変化をするとする。河口海水面は宮古、大船渡、鮎川の中の最近検潮所の予測水面と同じとして決める。津波来襲時を発震時の 1 時間後である 2011 年 3 月 11 日 15 時 46 分とし、その時刻の同じ検潮所の水位と測定時の水位の差を求め、測定時刻の川面の水位を補正する。2m 以上の地点では潮汐の他、流量の変化もないとして津波来襲時と測定時で川面の高さに変わりはないとする。解析で用いる川面の勾配は 2 万 5 千分の 1 地形図上の標高 10m と河口の 0m を基準に 10m の位置の河口距離に対する高さから算出する。その際、津波を起こした地震に伴う地盤沈下の補正を行う。地理院の発表している沈下量の分布をもとに 10m 地点の沈下量を求め、10m から減らし、河口は 0m とし、これは地盤変化の影響を受けないとする。その川の勾配 k は 10m 標高値点の河口距離 D (m) に対する 10 - 補正量 d (m) で定義する。

$$k = (10 - d) / D \quad (1)$$

*新潟市中央区網川原 2-28-41

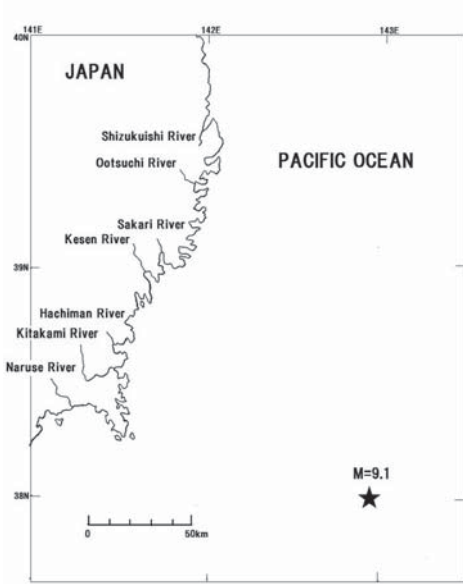


図 1 調査河川と震央（星印）の位置。

勾配は調査した全域で一定としている。河口距離は同じ地図上で、河川に沿ってマップメジャーを回転させて距離を求め、実際の距離に換算する。

結果

調査を行ったのは岩手県では宮古湾の津軽石川、大槌湾の大槌川、大船渡湾の盛川、広田湾の気仙川の 4 河川と宮城県では志津川湾の八幡川、追波湾の北上川、仙台湾の鳴瀬川の 3 河川、計 7 河川である。図 1 に津波を起こした地震の震央とともにその位置を示す。調査を実施したのは気仙川が 2011 年 8 月 22 日、他の 6 河川は 2012 年 4 月 25 日から 29 日にかけてである。図 2 に低地での潮位変化を考慮に入れて求めた川面からの高さを河川ごとに示す。図は河口から遡上するにつれて

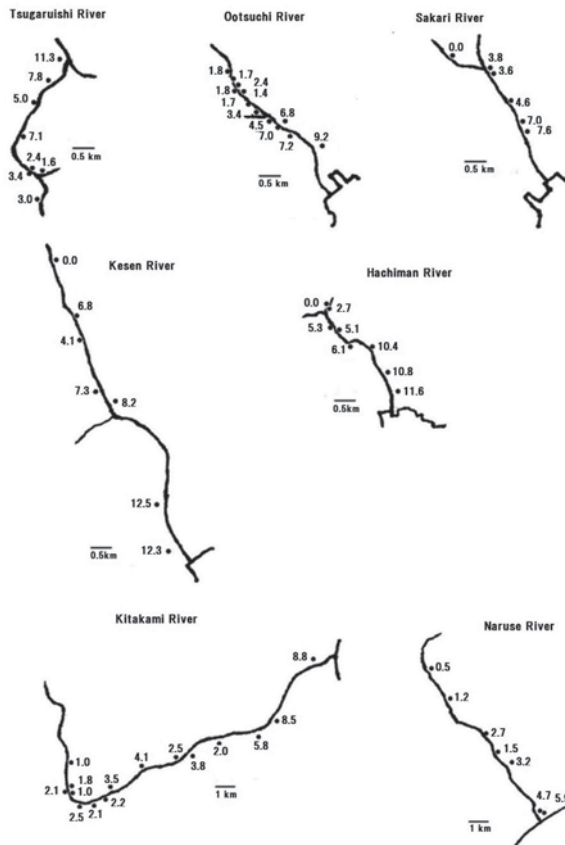


図 2 河川ごとの河川水位からの津波の高さ (m)。

高さが下がる傾向を示す。示されたすべての値の中で最大値は気仙川の河口から 1.6km 地点の 12.5m である。図 3 には横軸に河口距離 x 、縦軸に高さ y の自然対数をとって、高さの河口距離による変化を示す。

この関係が 1 次式で近似できるとして最小自乗法を適用し、得られた直線と式を図中に示す。このとき式、

$$\ln y = \ln a - b x \quad (2)$$

が成り立ち、 $\ln a$ は 0 切片、 $-b$ は傾きを表す。これは y が x の指数関数で表されることを意味する。つまり

$$y = a \exp(-b x) \quad (3)$$

である。プロットされた結果において 1 次

式からの偏差の分布を見ると、盛川は小さく、北上川は大きいことがわかる。図 4 は直線の傾きの絶対値である減衰率を河川ごとにグラフで示す。これによると津軽石川は 4.3×10^{-4} 、大槌川は 6.9×10^{-4} 、盛川は 4.7×10^{-4} 、気仙川は 1.3×10^{-4} 、八幡川は 4.7×10^{-4} 、北上川は 0.97×10^{-4} 、鳴瀬川は 2.2×10^{-4} となる。単位は m^{-1} である。これら減衰率の中で最大は大槌川の 6.9×10^{-4} 、最小は北上川の 0.97×10^{-4} でそこには 7 倍の開きがある。この減衰率が河川勾配とどのような関係にあるかを示すと図 5 のようになる。両者間の相関係数を求めると 0.84 になることから正の相関が指摘される。そこで比例関係が成り立つとして

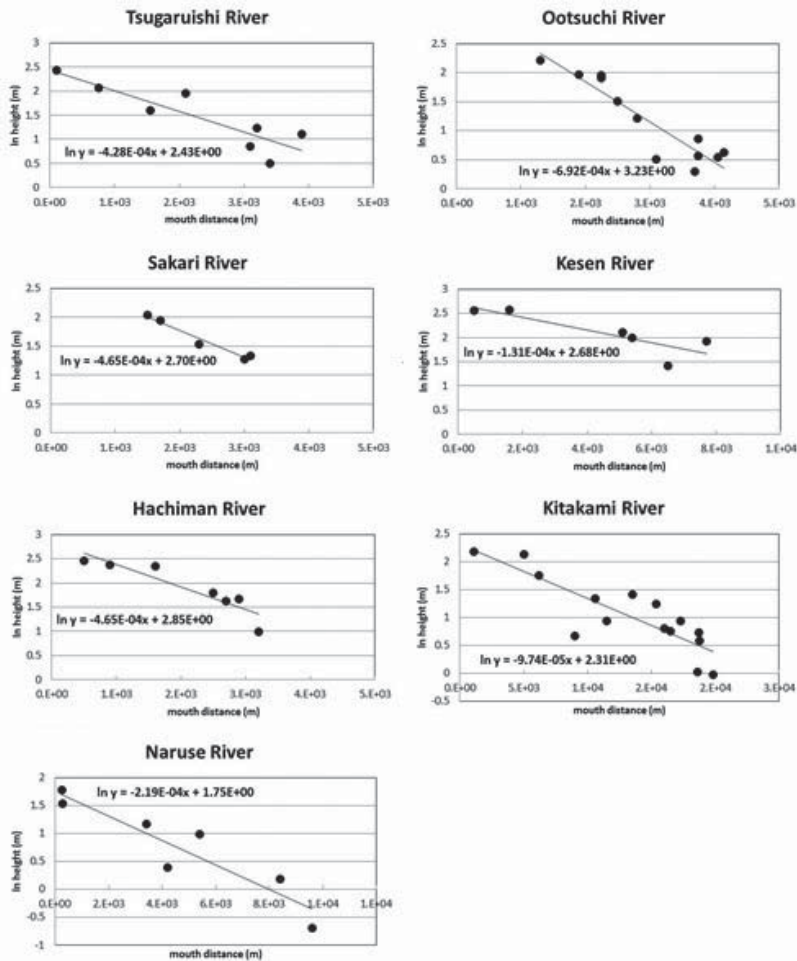


図 3 高さ測定値の対数 (y 軸) の河口距離 (x 軸) による変化。直線は最小自乗法によるもの。

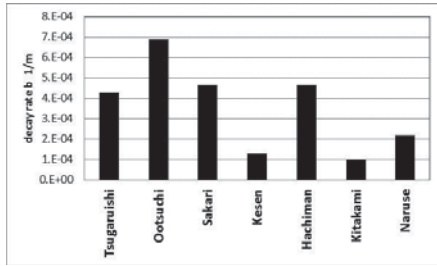


図4 各河川の減衰率。

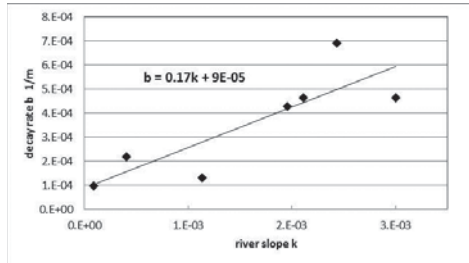


図5 河川勾配(x軸)と減衰率(y軸)の関係。

最小自乗法を適用すると比例定数は0.17となる。

最後に、川面からの高さ y に川面の標高 kx を加えて津波の標高値 Y (TP 値) を式

$$Y = kx + a \exp(-bx) \quad (4)$$

によって求めた結果を図6に示す。勾配の大きい気仙川と小さい北上川の例だけを示しているが、気仙川のように勾配の大きい場合は津波の減衰が川面上昇によって補われ、標高を維持したままで到達限界に到達していることがわかる。ここでは図示していない津軽石川、大槌川、盛川、八幡川は勾配が大きい気仙川と同じ、鳴瀬川は勾配の小さい北上川と同じ傾向の分布を示す。表1には勾配の根拠とした10m標高地の河口距離 D 、地震時の永久上下変位 d 、それを使って得た勾配 k 、川面からの高さの対数分布からえた、初期値 $\ln(a)$ と勾配 b 、初期値を高さに換算した値 $y_0 (= \exp(\ln(a)))$ 、および標高値の平均値を示している。地震時の上下変位は -0.2m から -0.7m で10mに比べると2桁小さく、これによる勾配の変化は小さい。

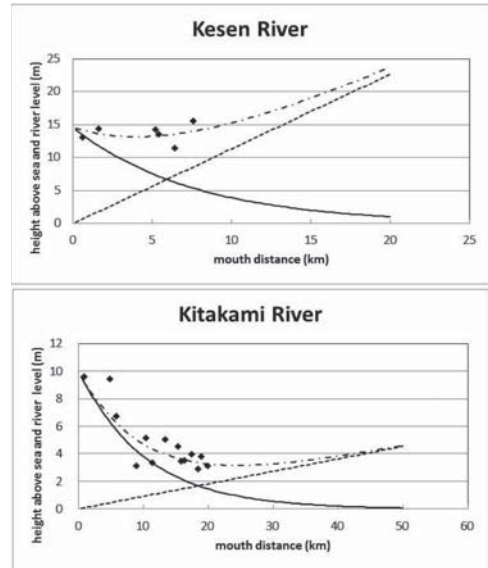


図6 標高値で表した津波水位(ダイヤモンド印)とそのモデル曲線(鎖線)。川面からの津波高さ(実線)と川面水位(点線)を同じ基準で示す。気仙川(上図)と北上川(下図)の場合。

議論

田中(2012)は宮城県の6河川で最大水位の距離変化が片対数グラフで直線になることを示し、減衰率を評価している。この中には北上川、鳴瀬川も含まれている。川ごとの具体的な数値は与えていないが、グラフの傾きやプロットした結果から推してここで得た北上川の 0.97×10^{-4} 、鳴瀬川の 2.2×10^{-3} に近い値になっている。また減衰率が勾配の指数関数で表されるとしている。北上川、鳴瀬川に加え、岩手県の4河川と宮城県の八幡川を含むこの解析では、減衰率と勾配の関係はばらつきが大きく、比例関係が近似的に成立するというにとどまる。

Abe(1986)によると1983年日本海中部地震津波では最大水位の河口距離変化で、標高(TP)値ではあるが、最大が河口と到達限界の間で実現している。その原因として入射波と上流で反射した反射波の重なりが生じたためであるとしている。2011年東北津波の場合、標高値でみても、川に入ってから

表1 各河川の勾配と最小自乗法を使って得た係数。右から10m標高値点の河口距離、同地点の地震に伴う変位、勾配、片対数グラフの $x=0$ の値、同グラフの傾きの絶対値、 $x=0$ での高さ、標高値の平均値。

river	10m distance	displacement	slope	ln (a)	b	y_0	TP average
	D x10 ³ m	d m	k x10 ⁽⁻³⁾		x10 ⁽⁻³⁾ 1/m	m	m
Tsugaruishi	4.9	-0.4	1.96	2.43	0.428	11.4	9.6
Ootsuchi	3.9	-0.5	2.44	3.23	0.692	25.3	11.1
Sakari	4.4	-0.7	2.11	2.7	0.465	14.9	10.1
Kesen	8.3	-0.6	1.13	2.68	0.131	14.6	13.6
Hachiman	3.1	-0.7	3.00	2.85	0.465	17.3	13.3
Kitakami	108	-0.2	0.09	2.31	0.097	10.1	4.8
Naruse	24	-0.3	0.40	1.75	0.219	5.8	4.9

最大水位が顕著に増加する事はなかった。これは図6で示されている。この事は大振幅の波が孤立して来襲し、反射波として戻るとき、次に来る波との重ねあわせがあっても孤立波の水位を超えることがなかったことを意味する。

考察

1. 河川勾配が大きい場合、津波の川面からの高さは減少するが、川面の標高が上がるため、両者は補完しあい標高値は変化しない。これはエネルギーの観点から見たとき、河口に侵入したときの位置エネルギーが、運動エネルギーに変化することなく、そのまま維持されることを示している。反対に勾配が小さいときは、標高値でも減少することから、河口侵入時に持っていた位置エネルギーが運動エネルギーに転化し、位置エネルギーが減少したことを意味する。この場合、川は運動エネルギーの受け取り手になったことになる。運動エネルギーは堰や壁に当たると再び位置エネルギーに変わることもあるが、なければ熱エネルギーになって、力学的エネルギーは失われると解釈される。

2. 勾配の大きい場合は河口での標高を保ったまま、標高が河口での津波高さと同じレベルの上流まで到達し、そこが到達限界になっている。この場合、到達限界までの標高値の

平均値は河口での標高値でもある。一方、川面からの高さの河口での値は、標高値でもあるから、両者は一致することが期待される。このような観点で表1を見てみると、両者の差は大槌を除けば1-5mで食い違いが小さいが、大槌は14mと大きい。勾配が最も大きい八幡川はその差が4mである事を考えると、勾配が主要な原因ではなさそうである。大槌川の場合河口からの距離が小さいときに、高さが急減するため、これから逆算した河口の津波高さが大きく評価された。安定な解を得るには高さが急変するところでは、密な測定値が必要とされる。

3. 河川内で川面からの最大水位は一律に減衰するわけではなく、ばらつきながら減衰した。ばらつきの要因として、氾濫や流路の曲がりやが挙げられる。国土地理院のホームページにはこの津波の氾濫域が示されているが、これらの河川の氾濫域の上流方向への広がりや河川の周囲で大きく、氾濫が河川を媒介として生じたことを示している。最大水位が急速に減少している場所は、氾濫域の広がりが見られる場所に多く見られる。たとえば北上川の右岸で河口距離9kmの地点である(図2)。ここでは6.2kmでの6.2mから2.3mと急減している。流路の曲がりとの関係では、曲がりの外側では大きく、内側では小さい。津軽石川の場合、河口距離3.2kmの左岸は外側で3.4m、3.1kmの右岸は内側で2.4mで1mの

差がある。また曲がりの通過前後での水位の変化も認められる。八幡川の曲がり手前の河口距離 1.6km での 10.4m から曲がり通過後の河口距離 2.5km の 6.1m への減少がそれである。これは津波が伝わる際、直進して曲がりの外側に衝突し、運動エネルギーを位置エネルギーに変えるためである。衝突は反射をもたらす、その分透過するエネルギーが減少する。

結論

2011 年東北津波の際に岩手県と宮城県北部の 7 河川で、河川を遡上した津波の最大水位の河口距離による変化を調べた。その結果、距離減衰が片対数グラフで直線になることを確認した。減衰率を河川勾配と比較すると減衰率は勾配に比例する。川面からの水位に川面の標高値を加えて津波の標高 (TP) 値を

求め、河口距離による変化を見ると、勾配の大きな河川 (北上川, 鳴瀬川以外の川) では河口での高さを維持したまま到達限界に至ることが示される。

参考文献

Abe, K., Tsunami propagation in rivers of the Japanese Islands, *Continental Shelf Research*, 5, 665-677, 1986.

木村一郎, 震災の工学特別セミナー「津波と河川遡上」, 北海道大学 HP, 2011, <http://www.eng.hokudai.ac.jp/edu/course/civileng/document/seminar20110729-4.pdf>, 参照日 2015 年 3 月 23 日

田中 仁, 津波の河川遡上特性に関する研究, 2012, <http://www3.kasen.or.jp/docs/2012/01/241213002.pdf>, 参照日 2015 年 3 月 23 日