

河川を遡上する津波の波高減衰と簡易推定方法について

Decaying of tsunami wave heights propagating river channel under simple estimating method fore them

株式会社北開水工コンサルタント ○正 員 松川 優一 (Yuuichi MATSUKAWA)
 株式会社北開水工コンサルタント 正 員 山口 甲 (Hajime YAMAGUCHI)
 株式会社北開水工コンサルタント フェロー会員 長谷川 和義 (Kazuyoshi HASEGAWA)

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では、北海道から千葉県までの太平洋沿岸で2.5m以上の津波が観測され、同時に河川津波の発生も全国で確認された¹⁾。

東北地方太平洋沖地震の際には陸上よりも河道内を伝わる津波の伝播速度が速く、遡上距離も長いことが映像に残されている^{2) 3)}。

この河川津波については、地震や津波により水位計などの現地観測機器に異常が生じたり、地震発生直後の情報の少ない中現地に急行し、安全に現地観測をすることは容易ではないことから、実態解明に十分な観測データが蓄積されていないのが現状である。また、予測についても、発災中にある程度の結果を発表できる状況には無く、流域住民に対して的確に注意喚起ができない。

本報では、十勝川で詳細な水位観測記録が残る2006年千島列島沖地震以降の3つの河川津波事例に加え、2011年東北地方太平洋沖地震での津波影響を受けている東北地方の河川記録について影響範囲の把握や減衰について考察した。さらに、簡易的に波高予測を行なう手法を試みた。

2. 使用するデータ

本研究では、十勝川下流部に設置されている水位観測所において河川津波による影響を受けた記録データ、及び報道発表等で公表されている2011年東北地方太平洋沖地震時の東北地方の河川津波記録を用いることとした^{4) 5)} (河川水位の基準高さは全てT.P(東京湾平均海面)である)。

東北地方の河川記録については、十勝川となるべく同じ条件として扱うため、堰や河川堤防から越流した津波の影響を受けていない区間についてのデータを使用した(馬淵川にはKP2.6に馬淵大堰があるが、津波発生時は4ゲート中1ゲートのみ全閉であったため影響が無いものとして扱う⁵⁾)。

なお、河川津波は河川の流量や潮位の変化を受けやすいため、津波の影響が無い場合の感潮区間の水位を、河口近傍の験潮所で評価されている天文潮位から求めるには疑問が残り、それを説明することができない。そのため、本報の十勝川における河川津波の波高については、観測された波の頂上から谷間までの高さの差を用いて算出した。また、東北地方の2河川の観測データについては、公表されている河川津波影響前後の水位記録を使用する。

表-1 水位観測所と対象とする記録

河川名	観測所	キロポスト	対象とする記録
十勝川	大津	3.2	2006年千島列島沖地震
	旅来	9.3	2010年チリ沖地震
	浦幌十勝導水路	10.8	2011年東北地方太平洋沖地震
馬淵川	大橋	4.0	2011年東北地方太平洋沖地震
	楢引橋	9.8	
北上川	福地	8.6	2011年東北地方太平洋沖地震
	飯野川上流	14.9	

3. 対象とする地震及び津波

3.1 2006年千島列島沖地震(仮称)

2006年11月15日20時15分頃、千島列島東方(シムシル島東方沖)を震源とするマグニチュード7.9(暫定値)の地震が発生し、北海道・東北地方で震度2~1を観測した。この地震による被害はなかった。この地震による験潮所における津波の最大波は三宅島坪田の0.84m、北海道での最大波は浦河の0.59mであった。この地震について気象庁では命名していないので、本記録では便宜上2006年千島列島沖地震と呼ぶこととする。

地震発生時の十勝川の河川水位は大津観測所で15日21時51分(地震発生後約100分)に第1波の水位上昇が見られ、その後16日5時16分までの約7時間に7波の津波が観測された。7つの波高は、0.49mから0.20mであり、その津波は上流の旅来・導水路まで遡上している。茂岩観測所での水位変化は見られなかった。

3.2 2010年チリ地震

2010年2月27日15時34分頃(日本時間)、チリ中部沿岸を震源とするマグニチュード(Mw)8.8の地震が発生し、翌28日には日本の広い範囲で津波を観測した。この地震による験潮所における津波の最大波は須崎港の1.28m、北海道での最大波は花咲の0.92mであった。

地震発生時の十勝川の河川水位は大津観測所で12時頃から水位変化が見られ、28日9時から21時までの12時間に少なくとも6波の津波が観測された。その津波は上流の旅来・導水路まで遡上しているが、茂岩観測所では大きな水位変化は見られなかった。12時間に観測された波高は0.35mから0.07mであり、最大波は17:35であった。

3.3 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日14時46分頃、三陸沖を震源とする、日本での観測至上最大のマグニチュード9.0(暫定値)の巨大地震が発生し、日本の広い範囲で震度7~1を観測した。この地震により、東北地方から関東にかけて地滑りや液状化現象、地盤沈下などの被害が発生した。この地震による験潮所における津波の最大波は相馬の

9.3m 以上、北海道での最大波は花咲の 2.86m であるが、観測機器の観測限界を越えていたり、データを取得できない期間があったりすることなどから、この最大値よりも大きい場合がある。

地震発生時の十勝川の河川水位は大津観測所で 15 時 47 分（地震発生後約 61 分）に第 1 波の水位上昇が見られ、その後 3 月 12 日 3 時までの 12 時間に 10 波の津波が観測された。その津波は上流の旅来・導水路まで遡上しているが、茂岩観測所では大きな水位変化は見られなかった。12 時間の間で観測された波高は 1.86m から 1.18m で、最大波は地震発生 7 時間後の 21:57~22:30 に観測された第 7 波（観測水位 2.11m 波高 1.86m）であった。また、地震発生後 1 週間にわたり微小な振幅が記録されている。

馬淵川の河川水位は河口に近い新大橋観測所（KP1.2）で 15 時 50 分から 16 時にかけて第 1 波の水位変動が見られている。

北上川の河川水位は福地観測所で 15 時 42 分に 4.24m を記録している。河口に近い月浜観測所のデータは地震による故障のため欠測となっている。

4. 津波の減衰

3. に示した地震による津波について、十勝川 3 地震 23 波（大津波高 1.85~0.07m）と馬淵川（大橋波高 2.87m）、北上川（福地波高 4.55m）を合わせた 25 波の津波のデータを解析し、下流地点で観測された津波が次の地点でどのように減衰するのか求めることにした（図-1）。データによれば、上流地点の波高 H_i は遡上距離 L_{ii} とともに減衰するので、 $\varepsilon = (H_i + H_j)/L_{ii}$ のように波高減衰率を求め ε の性質を調べる。

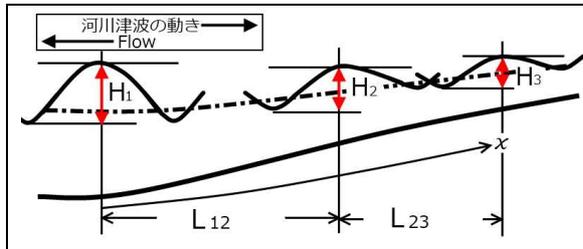


図-1 本報における波高と区間距離

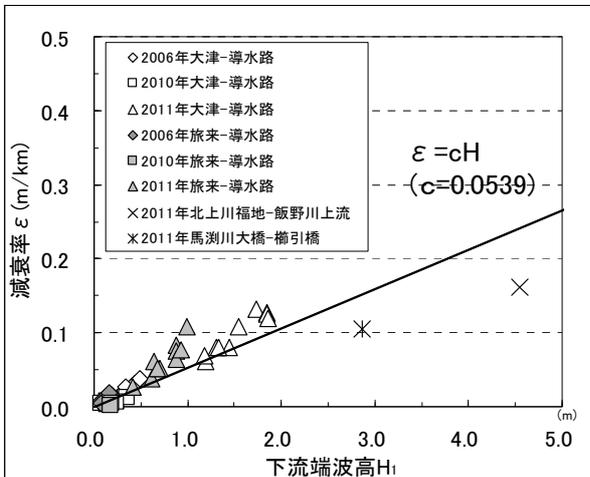


図-2 下流端減衰率 ε (m/km)

図-2 は ε と下流端波高 H_1 との関係を見たものである。それによると、各河川で実際に観測された津波ピーク波高の減衰率は下流端波高に比例していることが確認された。このことが、局所的な場でも成立するものとするれば、

$$\frac{dH}{dx} = -\alpha H \quad (1)$$

α : 波高の距離的減衰係数
となる。これを、 $x=0$ において、 $H=H_1$ なる境界条件の下で解くと、

$$H = H_1 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

となる。

$x=L_{12}$ において、

$$H_2 = H_1 e^{-\alpha L_{12}}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = e^{-\alpha L_{12}} \quad (3)$$

$x=L_{12}+L_{23}$ において、

$$H_3 = H_1 e^{-\alpha(L_{12}+L_{23})}$$

$$= H_1 e^{-\alpha L_{12}} \cdot e^{-\alpha L_{23}}$$

$$= H_2 e^{-\alpha L_{23}}$$

$$\frac{H_3}{H_2} = e^{-\alpha L_{23}} \quad (4)$$

$$\frac{H_3}{H_1} = e^{-\alpha(L_{12}+L_{23})} \quad (5)$$

ここで、河川津波波高を H とし、

大津、大橋、福地波高 : H_1

旅来、榎引橋、飯野川上流波高 : H_2

導水路波高 : H_3

津波波高の減衰係数 : α

波高を求めたい地点 : x (km) ,

また、区間距離を L とし、

大津-旅来、大橋-榎引橋、福地-飯野川上流 : L_{12}

旅来・導水路 : L_{23} とする。

ここで挙げる 3 河川の河道は太平洋に真直ぐに流入しているため、十勝川の流下方向に対して津波は正面から侵入する。また、3 河川ともに H_1 から H_2 付近まではほぼ直線になっているが、十勝川においては H_2 から H_3 地点へは上流方向へ右に 65 度曲がっている（図-3）。このことから、 L_{23} の区間を遡上する津波については次のように距離の補正を行う。

すなわち、大津-旅来間（ H_2 から H_3 地点間）の直線河道における津波伝播速度を C とすれば、図-3 に示すように旅来-導水路間の伝播速度は $C \cdot \cos 65^\circ$ とみなすことができる。

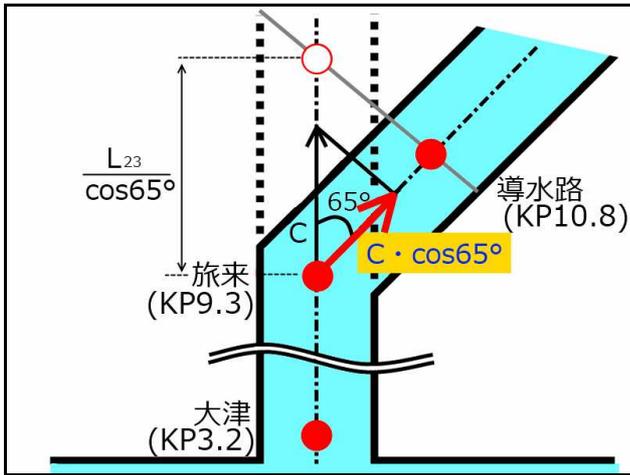


図-3 旅来-導水路地点間の補正

このため、旅来-導水路間を津波が遡上する時間 T は、

$$T_{23} = \frac{L_{23}}{C \cdot \cos 65^\circ}$$

となる。もし津波が旅来より上流においても直進していると考えた場合、津波が旅来から導水路に至るまでの時間に辿る距離は、

$$C \cdot T_{23} = C \cdot \frac{L_{23}}{C \cdot \cos 65^\circ} = \frac{L_{23}}{\cos 65^\circ}$$

であり、波高の直線的な減衰を評価する場合には、この距離を用いるべきである。

これを (4) (5) 式に用いると式は

$$\frac{H_3}{H_2} = e^{-\alpha(L_{23}/\cos 65^\circ)} \quad (4')$$

$$\frac{H_3}{H_1} = e^{-\alpha(L_{12} + (L_{23}/\cos 65^\circ))} \quad (5')$$

となる。

波高は距離的に指数減衰する。 α を逆算すると、

$$\alpha = \frac{\ln H_1/H_2}{L_{12}} = \frac{\ln(H_1) - \ln(H_2)}{L_{12}}$$

$$\alpha = \frac{\ln H_1/H_3}{L_{12} + (L_{23}/\cos 65^\circ)} = \frac{\ln(H_1) - \ln(H_3)}{L_{12} + (L_{23}/\cos 65^\circ)}$$

となり、推定減衰係数を求めた結果を図-4 に示す。図に見られるように α は 0.1m^{-1} 前後の値をもっているが、一定値とは見なし難く、下流端波高 H_1 とともに緩やかに減少している。そこで 2006 年千島列島沖地震と 2010 年チリ沖地震、及び 2011 年東北地方太平洋沖地震を合わせて $\alpha = 0.1287 - 0.0083H_1$ という相関式を導き、これを減衰係数として使用することとした。但し、ここで導き出した減衰係数はあくまでも十勝川、馬淵川、北上川の 3 河川で確認された、堰の影響を受けず河道内に収まっている区間の河川津波であって、4.55m の最大波高の中で得られた値である。

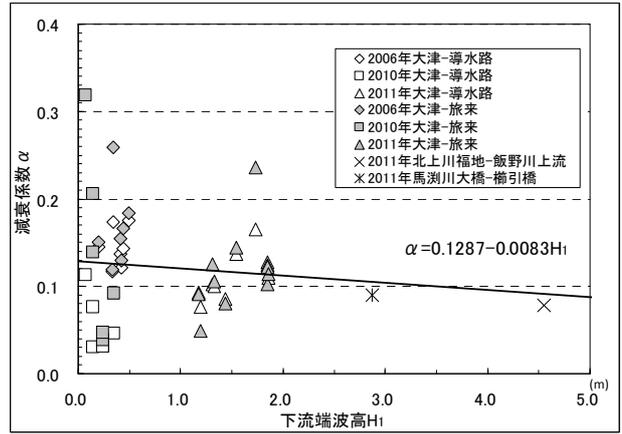


図-4 下流端観測所最高水位 (H_1) と $L_{12}L_{23}$ の推定減衰係数 α

表-2 津波の再現結果

観測所	波形No	実測波高			予測波高				
		最高水位	最低水位	実測Ht (m)	予測Ht (m)	予測-実測	計算水位		
2006年千島列島沖	大津 KP3.2	1	0.31	0.11	0.20				
		2	0.43	0.01	0.42				
		3	0.39	0.06	0.33				
		4	0.35	-0.06	0.41				
		5	0.24	-0.20	0.44				
		6	0.18	-0.31	0.49				
		7	0.05	-0.29	0.34				
	旅来 KP9.3	1	0.39	0.31	0.08	0.09	0.01	0.40	
		2	0.49	0.30	0.19	0.20	0.01	0.50	
		3	0.47	0.31	0.16	0.15	-0.01	0.46	
		4	0.39	0.23	0.16	0.19	0.03	0.42	
		5	0.31	0.15	0.16	0.21	0.05	0.36	
		6	0.24	0.08	0.16	0.23	0.07	0.31	
		7	0.13	0.06	0.07	0.16	0.09	0.22	
	浦幌十勝導水路 KP10.8	1	0.45	0.41	0.04	0.02	-0.02	0.43	
		2	0.53	0.42	0.11	0.05	-0.06	0.47	
		3	0.51	0.42	0.09	0.04	-0.05	0.46	
		4	0.46	0.37	0.09	0.04	-0.05	0.41	
		5	0.41	0.32	0.09	0.04	-0.05	0.36	
		6	0.34	0.27	0.07	0.04	-0.03	0.31	
		7	0.29	0.24	0.05	0.02	-0.03	0.26	
2010年チリ	大津 KP3.2	1	0.71	0.64	0.07				
		2	0.76	0.62	0.14				
		3	0.73	0.59	0.14				
		4	0.76	0.52	0.24				
		5	0.82	0.47	0.35				
		6	0.65	0.41	0.24				
	旅来 KP9.3	1	0.60	0.59	0.01	0.03	0.02	0.62	
		2	0.64	0.58	0.06	0.06	0.00	0.64	
		3	0.58	0.54	0.04	0.06	0.02	0.60	
		4	0.62	0.43	0.19	0.11	-0.08	0.54	
		5	0.59	0.39	0.20	0.16	-0.04	0.55	
		6	0.49	0.31	0.18	0.11	-0.07	0.42	
	浦幌十勝導水路 KP10.8	1	0.72	0.70	0.02	0.00	-0.02	0.70	
		2	0.78	0.68	0.10	0.01	-0.09	0.69	
		3	0.72	0.66	0.06	0.01	-0.05	0.67	
		4	0.73	0.56	0.17	0.05	-0.12	0.61	
		5	0.74	0.53	0.21	0.05	-0.16	0.58	
		6	0.63	0.46	0.17	0.04	-0.13	0.50	
	2011年東北地方太平洋沖	大津 KP3.2	1	1.41	-0.32	1.73			
			2	1.90	0.05	1.85			
			3	1.99	0.14	1.85			
4			1.82	0.28	1.54				
5			1.41	0.22	1.19				
6			1.59	0.15	1.44				
7			2.11	0.25	1.86				
8			1.34	0.03	1.31				
9			1.38	0.05	1.33				
10			1.24	0.06	1.18				
旅来 KP9.3		1	0.41	0.00	0.41	0.86	0.45	0.86	
		2	1.09	0.10	0.99	0.93	-0.06	1.03	
		3	1.11	0.23	0.88	0.93	0.05	1.16	
		4	1.05	0.41	0.64	0.76	0.12	1.17	
		5	1.14	0.26	0.88	0.58	-0.30	0.84	
		6	1.19	0.31	0.88	0.71	-0.17	1.02	
		7	1.38	0.45	0.93	0.93	0.00	1.38	
		8	0.86	0.25	0.61	0.64	0.03	0.89	
		9	0.96	0.26	0.70	0.65	-0.05	0.91	
		10	0.97	0.29	0.68	0.57	-0.11	0.86	
浦幌十勝導水路 KP10.8		1	0.31	0.03	0.28	0.49	0.21	0.52	
	2	0.86	0.41	0.45	0.53	0.08	0.94		
	3	1.02	0.55	0.47	0.53	0.06	1.08		
	4	1.04	0.70	0.34	0.43	0.09	1.13		
	5	1.11	0.60	0.51	0.32	-0.19	0.92		
	6	1.19	0.63	0.56	0.40	-0.16	1.03		
	7	1.29	0.74	0.55	0.53	-0.02	1.27		
	8	1.00	0.58	0.42	0.36	-0.06	0.94		
	9	1.02	0.58	0.44	0.36	-0.08	0.94		
	10	1.01	0.59	0.42	0.32	-0.10	0.91		

※東北地方の河川(2011年東北地方太平洋沖地震)

観測所	実測波高			予測波高		
	最高水位	最低水位	実測Ht (m)	予測Ht (m)	予測-実測	計算水位
北上川(福地 KP8.57)	3.99	-0.56	4.55			
北上川(飯野川上流 KP14.94)	2.28	-0.48	2.76	2.55	-0.21	2.07
馬淵川(大橋 KP4.0)	3.11	0.24	2.87			
馬淵川(樺引橋 KP9.8)	3.05	1.34	1.71	1.56	-0.15	2.90

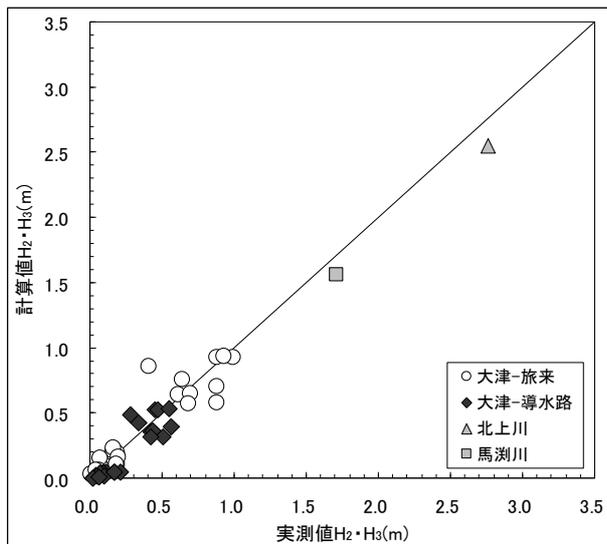


図-5 河川津波実測値と計算値

5. 津波の再現

(3), (5) 式により 2006 年千島列島沖地震と 2010 年チリ沖地震, 及び 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波についていずれも下流端波高 H_1 から上流側波高 $H_2 \cdot H_3$ の再現性について表-2, 図-5 に示す. 再現性について, 2006 年千島列島沖地震では実測値より十勝川旅来地点で平均+0.03m, 導水路地点では平均-0.04m, 2010 年チリ地震では十勝川旅来地点で平均-0.02m, 導水路地点では平均-0.09m 2011 年東北地方太平洋沖では, 十勝川で第 1 波が実測値より約 2 倍(旅来+0.45m, 導水路+0.21m)となったが, 第 2 波以降は旅来地点で平均-0.06m, 導水路地点では平均-0.04m となった. その他東北地方の河川では, 馬淵川櫛引橋地点で-0.15m, 北上川飯野川上流地点で-0.21m となった.

6. まとめ

本研究においては, 2006 年 11 月 15 日に千島列島シムシル島東方沖で発生した地震と 2010 年 2 月 27 日にチリ中部沿岸で発生した 2010 年チリ地震, および 2011 年 3 月 11 日に三陸沖で発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震の 3 事例を対象とし, 十勝川のほか東北地方の 2 河川のデータによる河川津波による影響範囲の把握や減衰, さらに, 簡易的に波高予測を行なう手法を試みた結果, 次のことが得られた.

1. 河川津波は, 2006 年千島列島沖地震では十勝川大津地点 (KP3.2) で最大波高 0.49m. 2010 年チリ沖地震では十勝川大津地点で最大波高 0.49m. 2011 年東北地方太平洋沖地震では十勝川大津地点で最大波高 1.86m, 馬淵川大橋地点で最大波高 2.87m 北上川福地地点で最大波高 4.55m であった.
2. 3 つの地震から, 各河川で実際に観測された津波ピーク波高の減衰率は下流端波高に比例していることが確認された.
3. 十勝川の旅来 (H_2) から導水路 (H_3) 地点について, 大津地点 (H_1) から真っ直ぐに流入した河川津波は上流方向へ右に 65 度曲がることから, L_{23} の区間を遡上する津波については距離の補正を行うことにより再現性を良くすることができた.
4. 本研究で対象とした 3 河川 25 波において, 下流端波高からこれから到達する任意の上流地点の波高を簡易的に求めることができた.
5. これらの結果は, 最大 4.55m の津波観測で得られた結果であり, 事例を増やすためデータの蓄積を図る必要がある. また, 更に予測精度を向上させるため, 河川流量や勾配, 形状などの考慮する必要がある.

謝辞: 本報の作成にあたり, 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部より, 貴重な水位記録等をご提供いただいた. また, 関係各位からは有益なご助言をいただいた. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 気象庁:災害時地震・津波速報, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震, 2011.
- 2) 日本放送協会: 津波の様子(宮城県名取市), http://www3.nhk.or.jp/news/jishin0311/movie/chapter_01.html
- 3) 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, 水工学論文集, 第56巻, in press.
- 4) 国土交通省東北地方整備局青森河川国道事務所:平成23年東北地方太平洋沖地震に伴う被害状況報告, 記者発表資料, 2011.
- 5) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会: 東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計, 操作のあり方について, 資料編, 2011.