

## 2011年東北地方太平洋沖地震の津波による人的被害と避難対応

水谷 武司\*

### Emergency Evacuation and Human Losses from the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami

Takeshi MIZUTANI

*\*Visiting Researcher,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
mizutani@bosai.go.jp*

#### Abstract

Human losses from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake amounted to about 20 thousands. More than 99 percent of the losses were caused by gigantic tsunamis. Casualties resulted directly from the seismic vibration are estimated to be less than 2 hundreds. Run-up heights of the tsunamis were about 15 – 30 meters at the Sanriku rias coasts, which are more than two times of the heights at the straight coasts neighboring to the south. Human casualty ratio at the Sanriku rias coast areas was about two times of that at the straight coast areas, though the rias coasts were frequently attacked by high tsunamis and high lands available for evacuation exist nearby. The fundamental factor that induced the large tsunami damage is significant expansion of urban areas onto coastal lowlands which are highly vulnerable to tsunami hazards.

**Key words** : 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Tsunamis, Evacuation, Rias coast , Human casualty ratio

#### 1. 全体被害の概要

2011年3月11日の牡鹿半島東南東130kmを震央とするマグニチュード9.0の巨大地震は、死者・行方不明およそ2万人、住家全半壊約26万棟などの巨大な被害をもたらした。この人的被害のほぼ総ては、地震のおよそ30分後以降に東日本の太平洋岸に襲来した高い津波により引き起こされた。津波の最大遡上高は三陸リアス海岸において40mに達し、岩手・宮城・福島の前延400kmにわたる海岸で10mを超えた。被害はこの3県に集中した(図1)。

気象庁による最大震度は海岸から50km内陸に位置する宮城県栗原市の7であるが、これ以外の市町村における震度は、震源により近い海岸部も含め総て震度6強以下である。震度を直接に反映する住家全壊率は、栗原市で0.2%(震度6弱以下相当)と小さく、津波被災市町村については不明であるが、そのすぐ内陸の町村における全壊率は最大2.3%(震度6強の下限相当)である。このように地震動はあまり強いものではなかった。断層の破壊は

約170秒間継続しており、破壊がややゆっくりと進行したので震動が相対的に小さいという津波地震的なタイプの地震であったようである。強い震動域は南に伸び、岩手県ではほぼ震度6弱以下であるのに対し、震度6強の地域は宮城・福島から茨城・栃木へと北関東にまで広がっている。

警察庁による8月11日(震災5か月後)現在の全体被害は、死者数15,690、行方不明4,735、住家全壊棟数112,901、住家半壊棟数144,598などである(表1)。この住家被害は1995年阪神大震災のそれをやや上回るほどの大きさである。ただし被災地の範囲はより大きい。被害額については、ストック(社会資本・住宅・民間企業設備)への直接被害が約16～25兆円と試算されている(防災白書)。阪神大震災ではおよそ10兆円であった。

被害統計については、8月11日現在の警察庁・消防庁などの集計値を使用した。これらは基本的には市町村の報告値によっているようである。被害度判定の基準が自治体によりかなり異なっている。死者と行方不明の重

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 客員研究員

表1 全体被害表(警察庁資料による。被害軽微の県は除く)  
Table 1 Damages by prefectures.

	死者	行方不明	住家全壊	住家半壊	住家焼損	住家浸水	一部破損
北海道	1			4		874	7
青森	3	1	307	851			105
岩手	4,632	2,063	21,019	3,587	15	2,084	5,326
宮城	9,391	2,418	70,904	70,531	114	16,446	128,320
秋田							3
山形	2		37	80			
福島	1,601	250	16,929	40,604	80	401	127,532
茨城	24	1	2,657	18,141	37	2,319	150,051
栃木	4		260	2,058			60,613
群馬	1			7			16,150
埼玉				5	2	1	1,800
東京	7			11	3		257
千葉	20	2	788	8,712	12	1,482	29,422
神奈川	4			7			279
計	15,690	4,735	112,901	144,598	263	23,637	519,865

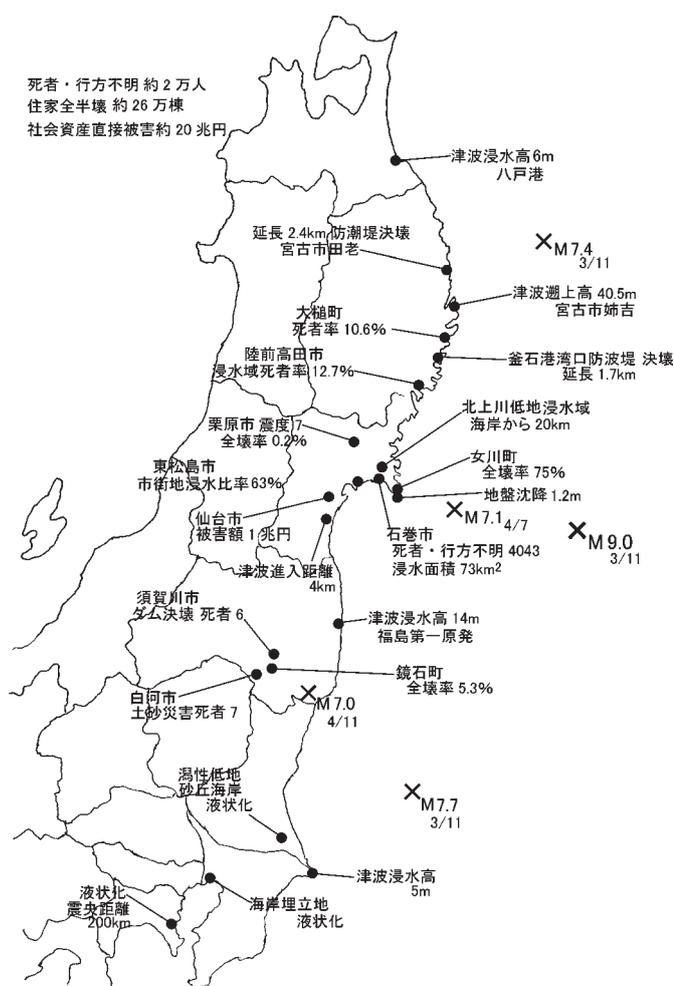


図1 災害発生地の概要  
Fig. 1 Location map of major hazardous incidents.

複計上が行われている、などの問題がこの被害統計にはある。

被害統計は原因別には示されていないので、津波以外の地震動直接の被害高を津波浸水地区以外の市町村の被害高から推計してみる。青森から千葉に至る6県についての市町村別の津波浸水面積等は国土地理院が調査しており、津波の浸水は62市町村にわたっている。消防庁作成の市町村別被害表を使用して、津波地区市町村と非津波地区市町村とに分けて被害を県別に集計したのが表2である。非津波地区の死者・行方不明は94であり、津波市町村における被害を加えても、全壊率と死者率との相関関係などから推定して、地震動直接の死者・行方不明は最大でこの2倍を超えないであろう。福島県・須賀川市における灌漑用ダム決壊(死者6人)、白河市における斜面崩壊(死者7人)など土砂関連の被害も、この地震動直接の被害に含める。

非津波地区の住家被害は、ほぼ全域が震度6であった福島県で非常に多い。県中央部(中通り)には強震動域があり、その南部の鏡石町では住家全壊率5.3%、矢吹町で4.9%と最も高い。郡山市では全壊1,930(全壊率1.5%)、半壊10,637、一部破損48,797と非常に多く、県全体のおよそ半分を占める。なお、宮城県の津波地区ではかなりの住家被害が地震動により生じたと思われる。とくに仙台市では、津波の浸水をうけなかった地区における全壊数は1万棟を超えると、被害統計からは推測される。岩手県では地震動があまり強くない、北関東よりも少ない住家被害高が示されている。一部破損が相対的に非常に少ないのは建物損傷の判定基準がかなり異なることをうかがわせる。

茨城県および千葉県の住家損壊、とりわけ半壊と一部破損が多いのが目立つが、これには砂質地盤の液状化が関係している。強い震動が数分間も続いたことおよび

表2 津波被災、非被災別の市町村被害集計  
(消防庁資料による)

Table 2 Damages of tsunami stricken and not stricken areas.

[非津波地区]

	死者	住家 全壊	住家 半壊	一部破損
北海道	1			5
青森				5
岩手	4	122	1,008	4,854
宮城	17	1,179	5,760	28,828
秋田				4
山形	3			37
福島	40	3,429	20,049	102,640
茨城	8	729	6,668	86,486
栃木	4	260	2,058	60,613
群馬	1		7	16,154
埼玉		22	172	15,496
千葉	5	374	7,165	23,258
東京	7	13	164	3,426
神奈川	4			168
計	94	6,128	43,051	341,970

[津波地区]

	死者	住家全壊	住家半壊
青森	4	307	851
岩手	6,673	20,896	2,579
宮城	11,697	69,729	64,771
福島	1,921	13,500	20,555
茨城	17	1,936	11,622
千葉	17	414	1,547
計	20,329	106,782	101,925

M7.7の強い余震が鹿島灘で起こったことのために、霞ヶ浦・北浦・外浪逆浦に囲まれる渦起源の低湿地、鹿島砂丘の内陸縁辺低地、東京湾沿岸埋立地、砂堆列が多数並列する九十九里浜などにおいて、液状化が大規模に発生した。ガス管・水道管など地中埋設物の大きな被害に加え、多数の一般の戸建て木造住宅にも沈下・傾斜・破損などの被害が生じた。震央距離が本震から500 km、M7.7の余震から200 kmもある横浜市南部でも液状化は発生した。

巨大地震が頻繁に発生する日本海溝に直面する東日本太平洋岸は、反復して大きな津波に襲われる宿命にある。海溝型巨大地震が起これば、津波はほぼ等しく海岸の全域に押し寄せ、震源近くの海岸低地は激しい流れに呑み込まれる。高潮とは全く異なり津波は数十メートルにも高くなる可能性がある。リアス海岸ではとくに大きく増幅されることはよく知られている。津波防波堤などの構造物の機能には大きな限界があることは明らかに示された。たとえ緊急避難により人命の被害を防ぐことができたとしても、海岸低地の建物・施設は完全な破壊を受ける。

災害の社会経済的影響の大きさ、とくに復興の困難さは、この広域に及ぶ大規模な物的破壊（市街地の壊滅）に起因しており、これを再び繰り返さないような対策が求められる。

被害統計についての注：死者と行方不明には重複がある。検視済みで身元不明が約1千体あるが、この多くは行方不明にも含まれている。岩手県では8月時点において、「認定死亡者」を死者および行方不明者の両方に含めるよう市町村に通知しており、明らかな重複がある。建物の損傷程度の判定基準は、災害給付金の支払のために、被害程度の大きい方へと変えられつつある。2004年に内閣府は浸水等による被害の判定基準を改め、浸水家屋を浸水深により半壊・大規模半壊・全壊などと判定するようにとの通達を出している。問題はこの判定方法が自治体によってかなり異なることである（全国的に一律になったとしても、過去の被害との比較が出来なくなり、また破壊の実態とかけ離れたものになるが）。たとえば岩手県では、住家全壊に比べ半壊・浸水・一部破損は相対的に非常に少なく、多くが全壊に含まれているものと推定される。液状化による建物のわずかな傾斜や沈下の損傷判定は困難で、自治体により基準がかなり異なっているとと思われる。原発周辺の避難区域市町村では、住家被害は不明となっている。全国や県全体の集計はこれらの数値を単純加算したものである。

ここでは8月11日時点の集計値を使用しているが、これを9月11日時点と比較してみると、警察庁の全国集計表では、全壊2,262増、半壊17,417増（+12%）、一部破損39,439増などと変化しており、被害度判定の見直しはかなり行われていることを示す。行方不明数は身元確認が進んで（またおそらく重複計上を中止して）かなり減少しつつある。9月11日現在、死者・行方不明数は19,868である。

震度と全壊率との対応関係は、計測震度の導入（1998年）以降不明確になり、旧震度における対応関係は適用できなくなった。さらに、建物損傷度の判定基準が緩められ、たとえば天井まで浸水した住家は全壊と判定されるようになり、全壊率や全壊数が物理的破壊の実態を示さなくなってきた。

## 2. 津波被害の概要

被害の大部分は津波により引き起こされた。とくに死者・行方不明では全体の99%を超える。東北地方の太平洋岸はこれまで繰り返し大きな津波災害を被ってきた。明治以降でも1896年明治三陸津波（死者約2.2万）、1933年昭和三陸津波（死者約3千）、1960年チリ地震津波（死者約100）がある。今回の津波による死者数（約2万）は、昭和三陸を大きく上回り、明治三陸に匹敵する規模となった。津波の規模は明治三陸のそれよりもかなり大きかったこと、両三陸津波の被害が牡鹿半島以北のリアス海岸部に限られたのに対し、今回の津波は牡鹿半島から房総に至る延長700 kmの海岸をも襲ったことが被害を大きくした。津波による住家全壊数およそ11万棟は、明治三陸

の約1万の10倍を超える大きさである。この大量の建物被害と、これにかなり比例的な関係で生じる人的被害の多さは、昭和津波以降に、とりわけ1960年津波以降の高度成長期に、低い海岸低地の居住・利用が著しく拡大したことが基本要因になっている。

地震の震源域は、八戸沖から鹿島沖に至る南北500km、東西200kmの範囲に広がり、波源域もほぼこの範囲である。この波源域から発進した津波は、地震の初動のおよそ30分後に三陸南部海岸に到達し、順次東日本太平洋岸全域に伝播していった。房総南端に最大波が到達したのはおよそ2時間半後であった。この時間は情報伝達と避難のための余裕時間を示す。北海道および太平洋南岸にも最大3～4mの波が来襲したが、被害はわずかであった。

津波の高さは、岩手北部から牡鹿半島に至る延長230kmのリアス海岸でおよそ15～30m、最大遡上高40m、牡鹿半島の南からいわきに至る延長150kmのほぼ平滑海岸で10～15m、最大遡上高20m、茨城・千葉の海岸で5～10m、青森海岸で5m程度であった。波高の増幅が著しいことで知られるリアス海岸でやはり波高が高いことが明瞭である。この海域では外洋の水深が大きいので、津波も早く到達して余裕時間が短くなる。最初はわずかな引き波があった海岸が多く、津波の確かな前兆として役立った。

津波の浸水面積は全体で561km<sup>2</sup>、山手線内側の面積の約9倍である(国土地理院資料)。低平な海岸平野の連なる北上川から阿武隈川に至る海岸域での浸水面積は300km<sup>2</sup>に及ぶ。浸水域の総人口は52.7万人、世帯数は18.5万である(総務省統計局資料)。津波による死者・行方不明は約2万であるので、浸水域常住人口との比率で表す人的被害率は3.8%となる。県別の津波浸水域市町村の被害は表2に示した。ここに示されている死者・行方不明はほぼ津波によるものである。

津波の破壊力(流体力)は水深(津波の高さ)が大きいかほど強くなるが、これが3～4mにもなれば破壊力は十分に強大であるから、海面に近い標高の海岸低地に集落があれば、数m程度の高さの津波でほぼ完全な破壊をうけ

る。昭和三陸津波の集落別被害データでは、最大津波高が2mを超えると住家被害率は急速に上昇し4mを超えると100%の集落が出現している。今回の津波でも浸水深が2mを超えると被害が急増するという調査結果が報告されている(国土交通省都市局資料)。

海岸地形(津波の増幅度、低地内での流動、避難用高地の有無、集落立地などに関係)や津波被災経験の有無などは、津波の破壊力、防備態勢、避難対応などの違いを通じて、被害とくに人的被害の規模・様相に反映する。岩手北部の久慈市から牡鹿半島の宮城・女川町に至るリアス海岸部と、北上川河口域の石巻から福島・南相馬までの海岸平野部(平滑海岸部)とに分けて、被害高・被害率・浸水面積率などを比較して示したのが表3である。三陸のリアス海岸部では明治および昭和の津波により著しい被害を受けたが海岸平野部では被害は軽微であった。リアス海岸部の人的被害率は海岸平野部のおよそ2倍である、などの顕著な違いがある。そこで次にこの両海岸部のそれぞれについて、津波被害の発生様相などにつき検討する。

### 3. リアス海岸部の津波被害

津波による人的被害の規模を決める主要因には、①津波の高さや流速(津波周期に関係)などの外力強度、②住民の危険認識、地区防備態勢、警報発表・伝達の状況、震度・余裕時間・時刻等の外的条件など緊急避難行動に関わる諸要因(避難対応レベル)、③海岸低地の居住・利用や市街地条件(被害ポテンシャル)が挙げられる。三陸リアス海岸を襲った1896年明治三陸津波、1933年昭和三陸津波、1960年チリ地震津波、2011年東日本太平洋沖地震津波の4大津波につき、市町村単位での被害データに基づいて、これら要因の概略の相対評価を行なう。

対象とした地域は、岩手県久慈市から宮城県女川町に至る延長230kmのリアス沿岸域で、ここにかつては48町村、約190集落があり、明治および昭和の三陸津波災害では、これら集落ごとの流失全壊家屋数・死者数・人口などの統計表が作成されている(宇佐美, 1987)。しかしその後には町村合併が進み、2011年津波については14に統合された市町村ごとの被害数値のみが得られるので、これに合わせて明治および昭和のデータもこれら14市町村単位に集計し直し、被害率などを求めた(表4, 表5)。なお、2011年津波の被害については、8月11日(地震の5か月後)現在での県発表の数値を使用しているが、人的被害はこの後減少し、住家全壊数は増加している。なおここでは、死者数に行方不明を加えて人的被害と表現している。

地震や津波に限らず自然災害の全体について、住家損壊の数あるいは率と人的被害の数あるいは率の間には高い相関があるので、この相関分析を行なった結果に基づいて、人的被害の規模に関わった要因につき検討する。住家の損壊は津波の破壊作用の直接的結果であり、その大きさは人の居住域・活動域に現実に作用した津波の加害力の規模を直接に反映していると考えられる(水谷, 1983)。津波の高さは外力強度を示す代表値であるが、多

表3 海岸タイプ別の被害(国土地理院資料、総務省統計局資料などによる)

Table 3 Damages by coastal landforms.

	リアス海岸	平滑海岸
	久慈～女川	石巻～南相馬
死者・行方不明	10,023	9,587
住家全壊	35,526	61,370
浸水域面積(km <sup>2</sup> )	88	375
浸水域人口	167,568	297,613
浸水域世帯数	60,245	103,450
人的被害率	6.0%	3.2%
住家全壊率	59%	59%
市街地浸水比率	24%	26%
津波の高さ	20～35m	10～20m

表4 三陸リアス沿岸市町村の4大津波による被害

Table 4 Damages from 4 high tsunamis at the Sanriku rias coast areas.

	明治三陸津波		昭和三陸津波		チリ地震津波		2011年津波	
	流失全壊	死者	流失全壊	死者	流失全壊	死者	全壊	死者
久慈市	180	494	117	27	1	0	65	4
野田村	80	260	62	8	9	0	309	38
普代村	76	302	79	137			0	1
田野畑村	53	232	131	83			225	33
岩泉町	132	364	97	156			177	7
宮古市	832	3,010	589	1,127	99	0	3,669	544
山田町	814	2,124	551	20	133	0	2,789	853
大槌町	684	600	483	61	30	0	3,677*	1,449
釜石市	1,192	6,487	686	728	28	0	3,188	1,180
大船渡市	806	3,174	694	423	384	53	3,629*	449
陸前高田市	245	818	242	106	148	8	3,159	2,115
気仙沼市	486	1,887	407	79			8,533	1,414
南三陸町	475	1,234	187	85	601	38	3,167	987
女川町	10	1	56	1	192	0	2,939	949
	6,065	20,987	4,381	3,041	1,625	99	(35,526)	10,023

2011年津波の被害は8月11日現在。死者には行方不明も含む。\*半壊を含む。

表5 三陸リアス沿岸市町村の4大津波による被害率

Table 5 Damage ratios of 4 high tsunamis at the Sanriku rias coast areas.

	明治三陸津波		昭和三陸津波		チリ地震津波		2011年津波	
	全壊率	死者率	全壊率	死者率	全壊率	死者率	全壊率	死者率
久慈市	23.0	4.7	13.2	0.7				
野田村	19.5	10.0	31.0	2.5			19.5	0.8
普代村	23.0	14.8	24.8	9.5				
田野畑村	11.4	7.7	43.1	4.7			17.2	0.9
岩泉町	34.2	17.4	33.4	9.8			4.1	0.07
宮古市	23.4	15.5	11.0	3.5			16.3	1.0
山田町	46.3	23.9	40.1	0.2			42.2	4.6
大槌町	57.4	9.2	55.5	0.5			57.8	10.6
釜石市	54.0	51.9	16.2	5.2			19.8	3.1
大船渡市	40.3	21.8	32.9	3.8	7.2	0.2	22.0	1.1
陸前高田市	10.3	5.4	28.7	1.7	9.3	0.1	40.5	8.6
気仙沼市	29.9	15.5	28.1	0.8			33.3	1.9
南三陸町	44.8	17.3	12.2	0.9	19.1	0.2	59.8	5.7
女川町	2.4	0.04	5.6	0.02			75.1	9.2

市町村全体の人口と世帯数を分母とした値。2011年津波については8月11日現在の値を使用。死者には行方不明も含む。

数示されている測定値には場所・海岸による変化が大きいので、市町村単位での被害と対応させることのできる外力値を、それらの平均化処理などにより得るのは難しい。なお総体的にみて、2011年津波の市街地海岸部での津波の高さ(痕跡高)は、明治津波に比べやや大きく、昭和津波に比べおよそ2倍程度であったと推定される。

図2には、14市町村ごとの住家全壊(流失を含む)数と人的被害(死者・行方不明)数との関係を対数グラフ上に、

図3には住家全壊率と人的被害率との関係を同じく対数グラフ上に示した。なお被害率は各市町村の全人口あるいは全世帯数を分母とした数値である。明治津波のデータは、人的被害の数あるいは率の高い位置に、右上がりのほぼ直線関係を示してプロットされる。2011年津波およびチリ津波のデータは、明治のそれとほぼ平行的な関係で、かなり低い位置にプロットされる。昭和津波のデータはばらつきが非常に大きい、その半数は明治と2011

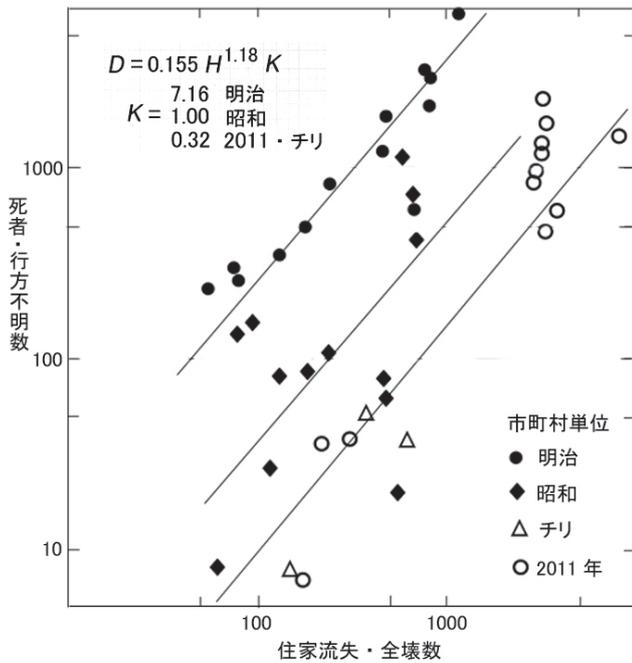


図2 三陸沿岸における4大津波被害の相関関係  
Fig. 2 Correlation graph of 4 high tsunami damages.

グループとの中間位置に、これらとほぼ平行した関係で並ぶ。

対数グラフ上での直線はべき関数で表される。そこでこれらの3グループが、べき指数値(直線の勾配)は同じで比例定数が異なるという回帰式群で示されるとして統計解析を行い、次の重回帰式を得た。

$$D = 0.155 H^{1.18} K \quad (r = 0.888) \quad (1)$$

$K = 7.16$ (明治津波),  $1.00$ (昭和津波),  
 $0.32$ (2011年・チリ津波)

$$Dr = 0.0340 Hr^{1.26} K \quad (r = 0.815) \quad (2)$$

$K = 6.41$ (明治津波),  $1.00$ (昭和津波),  
 $0.74$ (2011年・チリ津波)

ここで、 $D$ :人的被害数,  $Dr$ :人的被害率,  $H$ :住家全壊数,  $Hr$ :住家全壊率,  $r$ :重相関係数である。

避難対応レベル変数とする $K$ の値は、昭和津波を1とした場合の相対値である。これは質的変数であり0か1かのダミー値を与えて回帰分析を行なっているので、相対値として得られる。式(1)を例にとると、明治津波の $K$ が7.16であるということは、比例定数0.155にこれが乗じられて、 $D$ が昭和津波( $K=1$ に固定)に比べその分だけ大きくなることを意味する。 $H$ のべき指数は1.18であり、 $D$ は $H$ と単純比例ではなく、やや加速的な増加の関係を示すが、これは強震動災害や風水害についても認められることである。

明治や昭和初期の時代に比べ1世帯あたり人数が現在では半分程度に減少しており、人口に比べそれだけ家屋

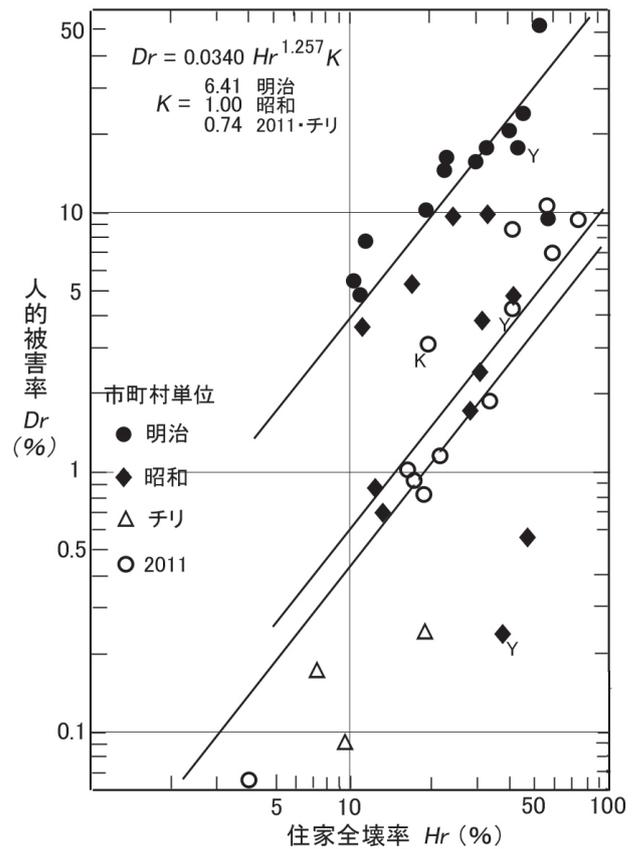


図3 三陸沿岸における4大津波の被害率の相関関係  
Fig. 3 Correlation graph of 4 high tsunami damage ratios.

数が増加していると考えられる。そこで2011年津波およびチリ津波の全壊家屋数を一律に1/2にして回帰分析を行った結果、2011年・チリ津波の $K$ として0.71が得られた。これは式(2)の0.74とほぼ一致するので、2011年・チリ津波の避難対応レベルの相対値としては、被害率の場合の0.74を採用する。

各津波事例における避難対応レベルの差は、 $K$ の違い、すなわちそれぞれの回帰直線間の間隔で示される。明治津波では地震動が小さかったこともあってほぼ不意打ちの状態であり、避難対応レベルが非常に低かった場合の人的被害規模を示すと考えられる。直線的関係は明瞭で、避難があまり行われなかったことをうかがわせる。昭和津波では強い震動が感じられたので明治の経験を活かして、未明の時刻であったにも拘わらず多くの集落で迅速な避難が行われて、人的被害を大きく減少させた。平均的にみると明治に比べ避難対応レベルが約7倍に上がり、死者数を1/7に減少させた。ただし避難が効果的に行われなかった集落も多く、このことが図における非常に散在するプロットとして表れている。2011年津波では避難対応のレベルが昭和に比べ約1.4(1/0.74)倍に上がっているが、昼間であり非常に強い震動があったなどの有利な外的条件を考え併せると、実質の避難対応レベルはかえって低下していたものと考えられる。

浸水域常住人口との比率でみた人的被害率は6.0%であ

表6 海岸タイプ別の市町村被害(消防庁資料, 総務省統計局資料などによる)

Table 6 Damages by municipalities.

	死者・ 行方不明	浸水域 死者率	死者率 <sup>1)</sup> (全区)	住家 全壊数	浸水域 全壊率	浸水面積	市街地 浸水比率
[リアス海岸]							
久慈市	4	0.06%	0.01%	65	0.5%	4km <sup>2</sup>	7%
野田村	38	1.2	0.8	309	19.5	2	32
普代村	1	0.09				1	8
田野畑村	33	2.1	0.9	225	19.2	1	11
岩泉町	7	0.6	0.1	177	4.1	1	4
宮古市	544	3.0	1.0	3669	16.3	10	21
山田町	853	7.5	4.6	2789	42.2	5	30
大槌町	1,449	12.2	10.6	3,677*	57.8	4	50
釜石市	1,180	9.0	3.1	3,188	19.8	7	24
大船渡市	449	2.4	1.1	3,629*	22.0	8	27
陸前高田市	2,115	12.7	8.6	3,159	40.5	13	39
気仙沼市	1,414	3.5	1.9	8,533	33.3	18	30
南三陸町	987	6.9	5.7	3,167	59.8	10	38
女川町	949	11.8	9.2	2,939	75.1	3	48
小計・平均	10,023	6.0%	2.8%	35,526	27.2%	88	24%
[平滑海岸]							
石巻市	4,043	3.6%	1.8%	19,065	33.0%	73km <sup>2</sup>	46%
東松島市	1,148	3.4	2.7	4,589	32.8	37	63
松島町	2	0.05	0.01	213	4.1	2	14
利府町	2	0.37	0.01	59	0.5		
塩竈市	21	0.11	0.04	682	3.4	6	39
七ヶ浜町	72	0.8	0.35	729	11.4	5	28
多賀城市	191	1.1	0.30	1,667	6.4	6	34
仙台市	737	2.5	0.14	19,922	8.4	52	17
名取市	993	8.2	1.4	2,786	11.1	27	22
岩沼市	184	2.3	0.42	720	4.6	29	34
亘理町	261	1.9	0.75	2,459	22.6	35	38
山元町	693	7.7	4.2	2,200	42.0	24	46
新地町	110	2.4	1.3	548	22.3	11	28
相馬市	459	4.4	1.2	1,049	7.9	29	16
南相馬市	671	5.0	1.0	4,682	19.8	39	13
小計・平均	9,587	3.2%	0.78%	61,370	13.0%	375	26%

1) 市町村の全人口を分母とした値 \*半壊を含む

る。とくに大槌町、陸前高田市および女川町では、この2倍の大きさを示す(表6)。一方、仙台平野などの海岸平野部ではこの人的被害率が3.2%と半分近くであった。山が迫ったリアス海岸で避難用の高地が近くにあり、また、度重なる被災経験をもっていたものの、津波が高くてその勢力(流体力)が非常に大きかったことが、高い人的被害率をもたらした主因であろう。流体力は水深(津波の高さ)のほぼ2乗に比例するので、リアス海岸のとくに沿岸部では流体力は非常に大きかった。

女川町では明治三陸、昭和三陸ともに被害はほとんど生じなかったが(表5)、このきわめて軽微な被災の経験が

今回の非常に大きな被害に関与した可能性がある。大槌町と陸前高田市でも明治および昭和の津波による人的被害率は共にかなり低かった(表5)。巨大な湾口防波堤を建造していた釜石市では、死者数と全壊数との比で表す人的被害度は最も高い(図3のKで最も左上にプロットされる)。山田町(図3中のY)は昭和津波で人的被害率を明治津波の1/100以上にも低下させたが、2011年津波では昭和津波の約20倍と大きく逆戻りした。

このように、2011年津波では避難対応レベルを、津波の規模がかなり近かった明治津波に比べ9倍ほどに上昇させて、人的被害の相対規模を低下させた。しかしその

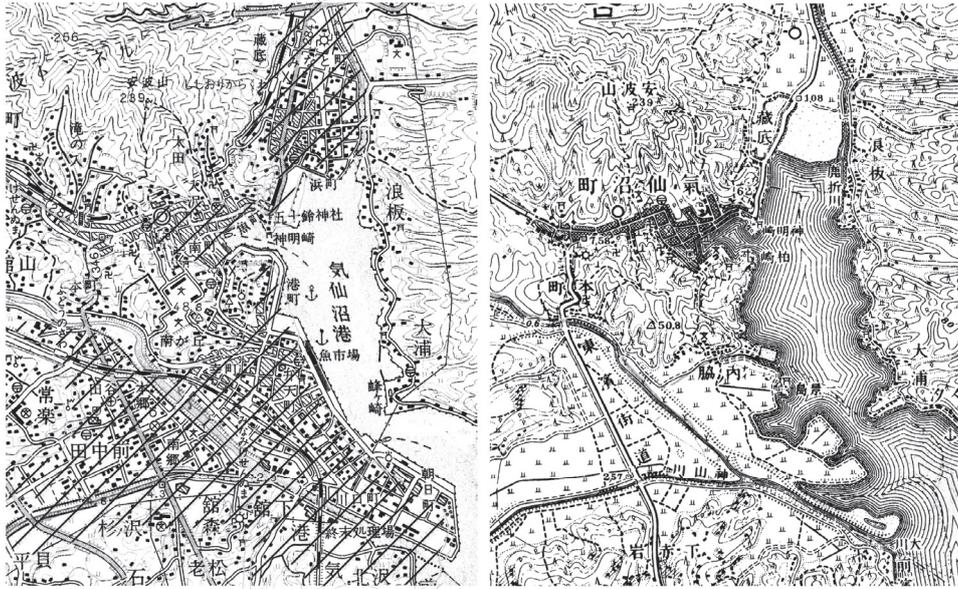


図4 大正初期(右図)と現在の地形図比較—気仙沼(斜線は浸水域)

Fig. 4 Topographic maps of Kesen-numa at present and in 1910's.

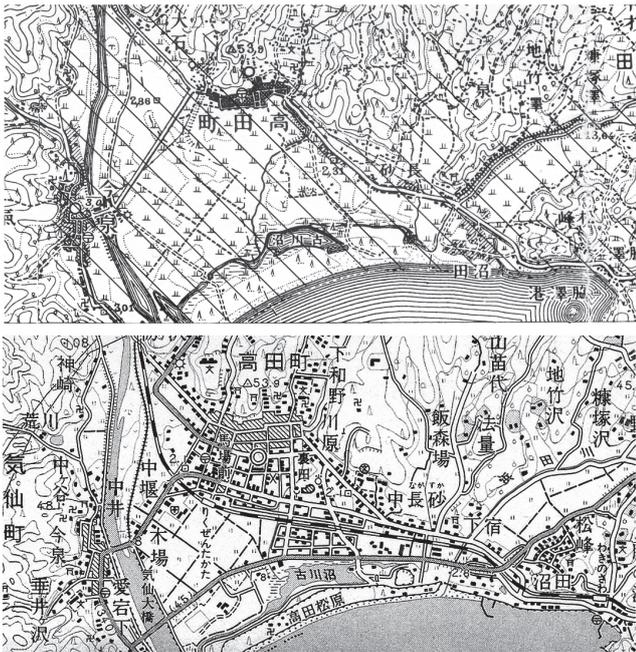


図5 大正初期(上図)と現在の地形図比較—陸前高田

Fig. 5 Topographic maps of Rikuzen-takata at present and in 1910's.

絶対数は非常に大きく、三陸リアス海岸域で1万人にもなった。これをもたらした主要因は被害ポテンシャルの著しい増大である。

明治津波から昭和津波までの37年間、この地域の人口はほぼ30万人のままで、ほとんど変化しなかった。相次ぐ厳しい冷害や世界的な不況がその背景にあったであろう。現在では人口は約3倍に増加したが、その大部分は津波の危険がある海岸低地に市街地が大きく展開した

ことによる増加である。昭和津波当時には、宮古町と大槌町が人口1万をわずかに超えるだけで、現在では人口の多い釜石町、大船渡町、高田町などは、一般の漁村と同じ数千規模にすぎなかった。大正初期の地形図と現在の地形図との比較からも、海岸低地に展開する市街地の規模・人口が著しく増大していることが容易にわかる(図4、図5)。

#### 4. 海岸平野における津波

旧北上川の河口部(石巻市)から阿武隈川河口の南方の福島県北部(南相馬市)までを海岸平野部(平滑海岸部)とする(被害統計の不確かな原発周辺地区を除く)。ここには松島湾の大きな湾入部があるが、これも含めている。2011年津波の人的被害の半分近くがこの海岸平野部にて生じた。ここでは明治津波および昭和津波による被害の記録がない。おそらく津波が高くはなかったことに加え、この低地部の人口が希薄で被害がほとんどなかったからであろう。

北上川はかつて南流して石巻で仙台湾に注いでいたが、1911～1934年に行われた分流工事で東向きを変え、新北上川となって追波湾に注ぐようになった。これ以外の

河川工事も実施されて、北上川下流平野の洪水危険性が低下した。これにより、標高の低い海岸低地部の開発・利用が1933年昭和津波の後に進んだ。とくに石巻は、かつては分離丘陵縁辺の緩傾斜地に立地する小市街であったが、1960年代以降に港湾都市・漁港都市として発展し、標高1～3mの海岸部低地に市街地を大きく拡大させて、最大の被害をもたらす結果となった(図6)。仙台の東部海岸平野は著しい低湿地であったが、高度成長期以降その開発・利用が大きく進展した。

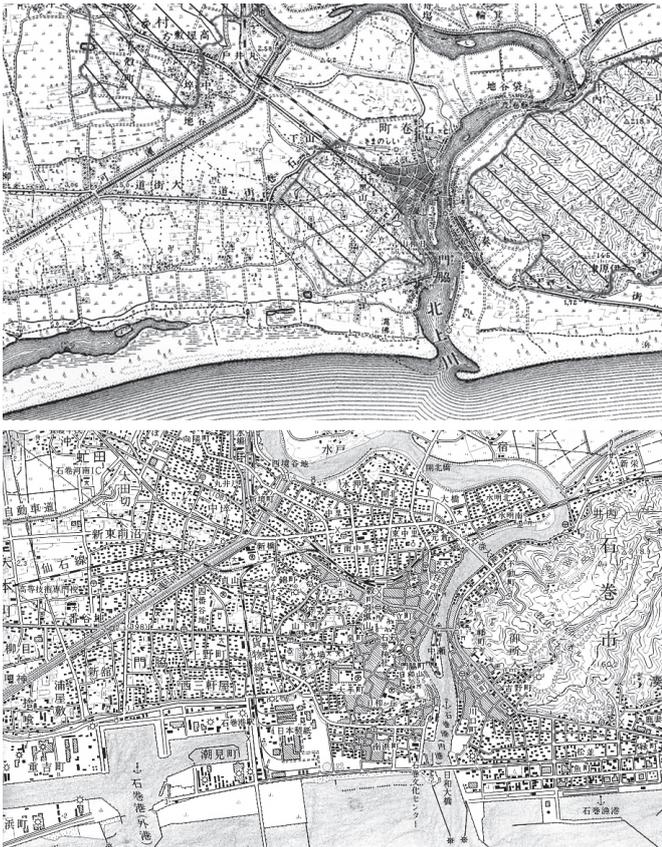


図6 大正初期(上図)と現在の地形図比較—石巻斜線は非浸水域

Fig. 6 Topographic maps of Ishinomaki at present and in 1910's.

これら海岸平野では、避難用の高地が離れていることもあって、人的被害は多かった。とくに北上川下流部低地の石巻市と東松島市で非常に多く、この両市で5千人(全体の1/4)にも達した。東松島市では市街地の2/3が浸水を被った。一方、この西に隣接する松島湾に面する市町では、浸水域および被害はわずかであった。松島湾内にある多数の島の存在が津波波高を大きく低下させる効果を与えたのであろう。

浸水域の常住人口との比率でみた人的被害率は、リアス沿岸域が6.0%であるのに対し、この海岸平野部では3.2%と小さい。これには平野の地形による津波の運動性状の違いが関わっている。図7に示すように、仙台東部の海岸平野では、浸水域限界は海岸から4kmほど内陸にある3m等高線にほぼ一致している。ここは明瞭な傾斜変換部で、海岸側はほとんど平坦、内陸側は1/400ほどの勾配を示し緩扇状地状である。海岸線には1~2mほどの幅狭い砂州が部分的に連なる。海底の勾配は1/150~1/200と遠浅である。

このような地形の場合における津波の陸地内流動の1次元数値計算を行った(水谷, 1992)。図8中のAは、今回(2011年)の津波とほぼ同じ条件である、海岸での最大波高10m、周期45分、を与えた場合である。粗度係数には、やや市街化が進んでいる場合の値0.12を使用した

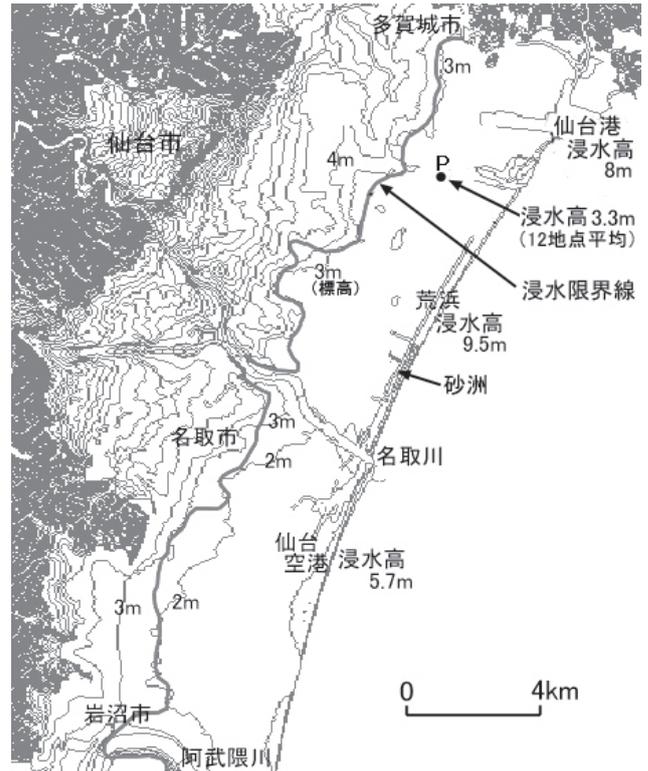


図7 仙台東部海岸平野の地形と津波到達限界

Fig. 7 Contour map of Sendai coastal plain and limit line of tsunami run-up.

(水谷, 2009)。津波波形は単純に正弦曲線を与えた。

流速5mを超える速度で海岸線から流入した津波は、海面低下による引き戻しによって浸水位を急速に低下させながら遡上して、10分後に2kmほど進入したときには、陸地内に残った海水の水深は1~2mである。勾配が非常に緩やかな場でのこのような水深の浅い流れでは、海に向かう流速は非常に小さくなるので、引き戻しの効果はほとんどなくなり、内陸に向かう先端部は速度を急速に低下させながらゆっくりと前進し、標高3mの傾斜変換線で停止している。平野面の勾配が大きいと、遡上はすぐに停止して戻り流れに転じる。後続する第二波は、すでに水深があるので、より速く進行して第一波に重なり、到達限界をわずかながら高くする。P地点における12か所の津波痕跡高の平均は3.3mであり(国土交通省資料)、したがって実際的水深は0.5m程度であった。

このように平野のほぼ中央部を境にして、海側は水位が大きく変化し激しい流れの押し波と引き波が生じる範囲、陸側は水深の小さい流れがゆっくりと内陸に向け進む範囲に分けられる。海岸側では流体力(流速の2乗と水深との積)は非常に大きくて激しい破壊が行われる。第一波の流入開始から5分間における平均流速は4.5m/秒と高速であり、海岸から2km地点では1.5m/秒ほどとなる。その内陸域では、流速は極めて遅くなりまた水深は0.5mほどと小さいので、流体力は非常に弱い。

津波の周期が短い場合には海水の引き戻しがより早く

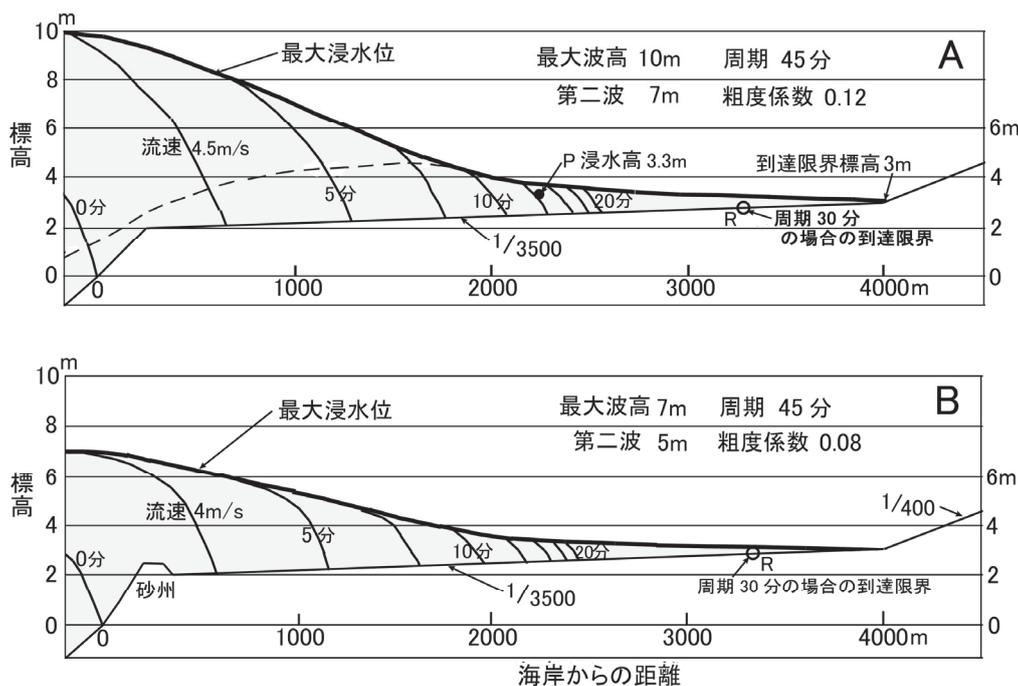


図8 津波の海岸平野内における流動の数値計算  
 Fig. 8 Digital simulation of tsunami run-up onto a coastal lowland.

なるので、到達限界の距離・高さはより小さくなる。周期30分の場合の到達限界は図のR地点に退く。近地津波の周期10～15分の場合には、到達限界は大きく海側に後退することとなり浸水域はかなり狭くなる。したがって、最大波高が10mを大きく超える場合でも、周期が短ければ到達範囲は拡大しない。

図8のBは、最大波高が7mで、海岸に比高0.5mの砂州があり、平野内は自然状態にあるとして粗度係数を0.08と小さくした場合の数値計算結果である。このような低い砂州でも海水の戻りをかなり妨げるので、津波到達限界は標高3mの傾斜変換点近くに達している。仙台東部の海岸平野では、名取川の河口の北には比高1～2mの沿岸砂州が連続している。地震による地盤の沈降(今回は0.5mほど)は海水の陸地内滞留をより著しくする効果がある。

過去の大きな津波の浸水域は、このような平野地形の条件に支配されて、津波の規模にあまり関係なく、標高3mの傾斜変換部がほぼ限界になったと考えられる。浸水範囲と津波規模とは単純な対応関係にはない。

### 5. 津波避難に関わった要因

緊急避難対応には種々の外的条件、地区防災態勢、人間行動要因などが関与して、避難が促進されたりあるいは阻害されたりする(水谷, 1978)。今回の津波の際の三陸沿岸域について、これらの要因を他の三陸域津波と比較しながら示す。

地震の発生時刻と三陸海岸への押し波第一波到達は、明治津波が午後7時半で約35分後、昭和が午前2時半で

約30分後、2011年津波は午後2時46分でおよそ30分後であった。地震の震動は、明治では震度3程度の弱い揺れ、昭和では震度5の強震、2011年では震度6強の激しい震動であった(計測震度と以前の震度とは単純比較できないが)。いずれの場合も余裕時間は、強い揺れが収まってからでも25分以上はあった。チリ津波の第一波到達は午前3時ごろ、最大波到達は6時ごろ、津波警報の発表は5時ごろであった。2011年では大津波警報が即座に出された。このように2011年では緊急退避の行動に一番良い外的条件があったことになるが、人的被害は昭和津波を大きく超える規模になった。

最後に被った災害の規模は、備えのレベルに大きく影響する。1960年チリ津波は三陸において高さ2～4mほどで、大多数の湾で被害は小規模であった。2010年2月にチリ沖から来襲した津波は最大で1m程度であり、10cmオーダーの津波観測値(これは海岸にある検潮所の値)がテレビなどを通じて延々と報道され、津波という現象について甘い判断を人々に植えつけた可能性がある。地震の直後に出された大津波警報は、高さ3m以上の津波が来ると予想されることを警告するもので、3mあるいは6mといった数値が警報の中で伝えられたが、これを単に3mあるいは6mの津波が来る(だからそれ以上の高さのところは安全だ)、と受け取った人が多数いたと推測される。

今回の地震では、地震発生後の3分後の14時49分に大津波警報が出された。岩手県の海岸に対しては、14時50分に3mの津波が予想されるとの発表があり、15時14分に6mに切り替えられ、15時31分には10m以上と変更された。実際に津波が到達したのは15時15分～30分ご

ろで、高さは10mを大きく超えた。津波が起こる可能性とその規模の予測は、種々の条件を与えた非常に多数の津波数値計算をあらかじめ行なっており、観測した地震の最大振幅・震源位置・深さなどと照合して類似の津波計算例を検出する、という方法に基づき迅速に行われている。

津波防災計画を1960年チリ津波に主として基づき決めた地区がかなりあった。この低い設定条件に基づいた防災情報の提示や避難所など防災施設配置等は、住民の危険性認識を誤らせた可能性がある。地区危険情報の代表であるハザードマップは一般に、ある特定条件の場合の危険域などを示すものであり、必ずしも安全情報ではないことを伝えなければ、かえって危険を招くおそれがある。防災の啓発・訓練は盛んに行われたが、甘い設定条件によるものであれば逆効果にもなりかねない。実際、低い標高のところに避難場所が指定されていたことは、多くの人を危険に陥れた。

海岸堤防や湾口防波堤などが建造され、ギネス記録に認定されるというものでつくられた。海岸低地に住んでいる人々はこれに信頼したくなるのは自然である。しかし、これらの海拔高は7～8m程度、最大でも10mで、明治や昭和のような大きな津波が来れば安全でないことは明らかである。これらの防災構造物の存在が安心感を与え避難を妨げたことは十分に考えられる。

家族が離れ離れになっている昼間であったことが、高所へまっすぐ向かうという退避行動を妨げた。ちょうど低学年児童の下校時にあったことが、緊急行動を複雑にした。緊急異常時にはまず家族の安否が気懸かりになる。家族が離ればなれになっていると、まず一緒になろう、無事かどうか確かめに行こう、連れ戻そうといった行動が先にたつ。とくに、家族の誰かが海岸近くにいることが分かっている場合にはそうである。あらかじめよく話し合っておいて、めいめいが独自に最も手近な高所を目指している、という確信が持てるようにしておく必要がある。

高齢化は迅速な避難行動の大きな障害となった。高齢者や病人の避難・移送に手間取っているうちに共々逃げ遅れるという事態がかなり生じた。高齢者収容施設、病院、幼稚園、小学校などは高台に立地するのが望まれる。避難場所はもちろん十分に安全を見込んだ高所に指定しなければならぬ。

自動車の普及は今回が初めての状況である。強い震動や警報により津波の危険が迫っていると知ってはいても、家の中へ戻って貴重品などを取り出し、間際になって自動車で避難するという対応行動をとった人は多かったと思われる。しかし、高所へ通じる道路には車が集中して渋滞し、津波に追いつかれてしまう。道路が通じていることの多い緩やかな傾斜の先細まりの谷間では、津波の駆け上がり高が大きくなる可能性がある。車を乗り捨てて近くの高い建物などに逃れるというとっさの決断が要求される。

避難は、人命への危険だけは回避するという、文字通

り緊急避難的な防災対応である。明らかな高危険地では、その土地に居住しない、高度土地利用を行なわない、つまり避難の必要がないようにする、街が破壊されないようにする、というのが基本であって、避難はそれを実現するまでのやむを得ない過渡的な対応に位置づけられるものである。

## 6. 集落移転地区の被災

災害危険地からの住居移転は、いわば建物ぐるみの恒久的な避難であり、人命だけでなく資産被害も防ぐ抜本的な防災対策である。しかし、大きな危険が指摘されている場所でも、さらには、危険地に住んでいて大きな被害を受けた場合でも、移転にまでは踏み切れないのが現実である。本来、災害高危険地には初めから住まないという選択が基本であって、住んでしまっただけからの移転は次善の策に位置づけられるものである。

三陸海岸は、中世の昔から繰り返し大津波災害を被ってきたという世界で最大の津波危険地帯であるが、海岸低地から高地への住居移転はなかなか進まなかった。1896年明治三陸津波では死者2.2万人の大被害を受け、三陸の多くの町村で安全な高地への集落移転が検討されたが、実施したのは一部の地区にすぎなかった。その理由としては、被災地区の大部分が漁村で海浜から離れるのは漁業に不便である、零細漁民が多くて資金的に困難である、地区民の利害が一致せず合意形成は非常に難しい、移転地の選定・買収に当たり地主との対立が生じる、などが挙げられた。また、傾斜地の土地造成は当時の土木技術の面から制約があった。このため各戸が任意に行う分散移動が主として行われた(国土地理院、1961)。

結局、大部分の被災集落は原地再建を選択したので危険は解消されず、昭和の再被災につながった。少数ながら行われた集落移転の跡地には、移転者の一部が復帰したり、その分家や他村からの移住者が住みついたりした。

1933年昭和三陸津波では、明治の貴重な経験を活かして迅速な避難が行われ、死者数は実質で1/7に低下した。しかし、建物はもちろん避難できないので多数の地区が壊滅的な破壊を受け、集落の再建が必要になった。そこで、集落の高地移動が主要復興事業の一つに取り上げられ、県はこれを積極的に推進し、国は国庫補助および低利資金利子補給で支援した。これにより当初は岩手・宮城両県で約100の集落が移転のための宅地造成計画をたてた。適地の条件は、海浜に近いこと、既往津波の最高浸水線以上に位置すること、海を望み得ること、南面の高地であること、飲料水が容易に得られることなどであった。しかし、適地が得難いことに加え、資金調達困難、農地転用上の障害、地主との対立などの問題があって、結局、およそ100集落で約3,000戸が、分散あるいは集団で集落移転を実施した。

移転先の土地の平均標高は約11m、海岸からの平均距離は約300mである(山口、1960)。過去の津波の最大遡上高よりも高いところを選定した文字どおりの高地移転は多かったものの、これらではできるかぎり元集落に近い



写真1 陸前高田市・長部地区の集団移転  
(Google Earth の画像を使用)  
Photo 1 Group relocation of Osabe, Rikuzentakata-shi.

ところを選んでおり、また、海岸低地内に盛土をし、あるいは防波堤で囲んで原地居住を行った集落が全体の20%ほどあったので、集団移転地の平均標高はこのように高いものではなかった。したがって、10mを大きく超える今回(2011年)の津波により、全体のほぼ2/3が全面的にあるいは部分的に被災した。

全面被災した例に陸前高田市の長部地区がある(写真1)。この移転前集落は標高2m以下という低い海岸低地に位置していたので、明治津波(高さ5m)で死者42, 流亡27の被害を、昭和津波(高さ4m)では死者32, 流亡・倒壊102という大きな被害を被った。昭和津波後、台地状の丘陵際に2mの盛土を行って地盤高3.5m以上の土地を造成し、周囲を高さ6.5mの防波堤で囲み、86戸を收容することとした。明治と昭和の津波の高さが5m以下と大きくはなかったことがこのような選択をさせた一因であったであろう。チリ地震津波は高さ4.5mであって直撃を免れたが、道路の開口部から浸水した。今回の津波の高さは丘陵際に14mに達し、この地区内の建物は完全に破壊された。

宮古市の田老地区(旧田老町)は、慶長の津波、明治津波、昭和津波と繰り返し全滅の被害を被った。昭和津波の後、海岸低地の西縁に500戸を收容できる幅200m, 延長1,300mの土地(地盤高4~6m)を区画整理し、外縁を延長1,350m, 海拔高10.7mの防波堤で囲んだ。15mを超えた今回の津波はこの地区を完全に破壊した。

山田町の田の浜地区(図9)は部分的に被災した例である。この地区は明治津波(高さ10m)によりほぼ全滅の被害をこうむったので、背後の傾斜地に敷地造成をおこなったが、結局原地再建に終わった。昭和津波(6m)では原地再建集落の256戸中185戸が流亡・倒壊した。この津波の後に高地移転の実行を決断し、海岸から400m離れた谷奥の標高15~20mの緩斜面に、長さ500m, 幅100mの長方形の整然とした区画の宅地を造成し、240戸を收容可能にした。しかし土地は造成したものの住宅の建設は進まず、1950年の地形図では、区画内の住宅はわずかであり、元の集落地には以前とほぼ同じように建物が分布している。今回の津波は傾斜地中央の浅い谷地形のところを18mの高さまで這い上がり、およそ20棟を破壊した。

写真2の釜石市本郷(旧唐丹村)の移転地区は津波の襲来をかわらうじて免れた例である。明治の津波により、ほぼ全戸が流亡・倒壊し地区民の半数以上が亡くなる大被害を受けた。この災害後、わずか4戸が背後の高地に移動し、その他は原地再建した。7年後には野火によりほぼ全戸焼失したものの、やはり原地に再建した。昭和の津波では、流亡・倒壊101戸, 死者326人の大被害を再度受けたので、集落近くの谷斜面を移転先地として選び、明治津波の到達限界よりも高い斜面部分を切り盛土して階段状に宅地造成し、101戸全戸が移転した。移転跡地は非住家地区とされ、その後復帰者はないという数少ない例になっていた。今回の津波では、移転地区の下端を限る道路(R)が津波侵入限界になり、この下方の低地内に新たにつくられた30棟ほどの建物が全壊を被った(D)。

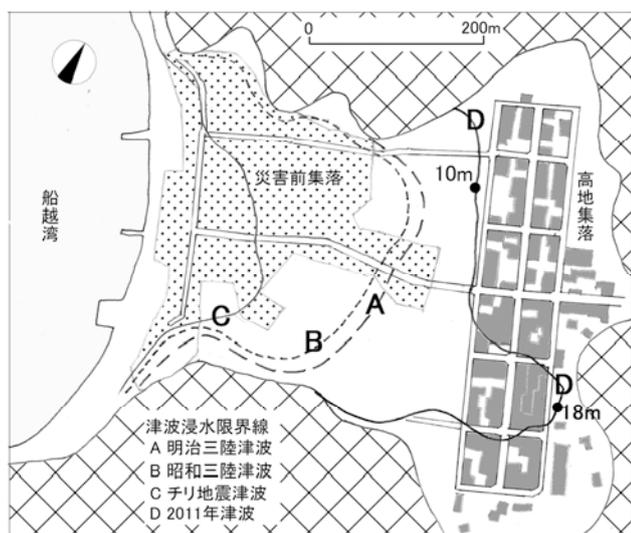


図9 山田町・田の浜地区の集団移転地と津波到達限界線  
Fig. 9 Group relocation of Tanohama, Yamada-cyo.



写真2 釜石市・本郷地区の高地移転  
(Google Earth の画像を使用)  
Photo 2 Group relocation of Hongo, Kamaishi-shi.

被災して、現地再建するか集団移転に踏み切るかは、厳しい選択である。次に何時来るかわからない危険に備えることよりも、日常の生活・生産活動や経済的問題が優先されるのは、やむを得ないことかもしれない。しかし、一旦市街地が形成されればそれは永続して、必ず再来する次の大津波により破壊されるのは必須であり、再び復興の難問に直面する。将来の災害を防ぐという防災の本来の役割を中心に置くとしたならば、繰り返し大災害を被ってきた極めて危険な海岸低地からの移動を基本にした再建しかありえないであろう。

#### 参考文献

- 1) 国土地理院(1961)：チリ地震津波調査報告書—海岸地形とチリ地震津波—。100pp.
- 2) 水谷武司(1978)：最近の災害事例にみられる避難の阻害および助長要因。防災科学技術研究資料，**29**，26pp.
- 3) 水谷武司(1983)：地震による人的被害の規模について。総合都市研究，**20**，15-28.
- 4) 水谷武司(1992)：津波の陸上遡上に及ぼす海岸地形の影響。地形，**13**(1)，35-48.
- 5) 水谷武司(2009)：伊勢湾台風災害のインパクトと戦後台風災害の経年変化。防災科学技術研究所研究報告，**75**，11-32.
- 6) 宇佐美龍夫(1987)：新編日本被害地震総覧。東京大学出版会，434pp.
- 7) 山口弥一郎(1960)：三陸の津波。日本地誌ゼミナールⅡ，大明堂，143-150.
- 8) 警察庁緊急災害警備本部：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置。平成23年8月11日，警察庁 Web サイト。
- 9) 国土地理院：津波による浸水範囲の面積(概略値)について(第5報)。平成23年4月18日，国土地理院 Web サイト。
- 10) 国土交通省都市局：東日本大震災による被災現況調査結果について(第1次報告)。平成23年8月4日，国土交通省 Web サイト。
- 11) 消防庁災害対策本部：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について(第136報)。平成23年8月11日，消防庁 Web サイト。
- 12) 総務省統計局：浸水範囲概況にかかる人口・世帯数(平成22年国勢調査人口速報集計結果による)。平成23年4月25日，統計局 Web サイト。  
(2011年10月24日原稿受付，  
2011年11月7日改稿受付，  
2011年11月7日原稿受理)

## 要 旨

震災の死者・行方不明約2万人の99%以上は津波によるものであった。地震動直接の死者は200人以下と推定される。住家全壊率が示す震度の最大は6強の下限相当である。津波の高さは、リアス式の三陸海岸でおよそ15～30m、最大遡上高40mで、この南方の平滑海岸部におけるその2倍以上であった。度重なる被災経験をもち、近くに避難用高地があるものの、この流体力の大きい高い津波に襲われたため、リアス海岸部では人的被害率が平滑海岸線の海岸平野部に比べほぼ2倍の大きさを示した。仙台東部の広い海岸平野では、津波が激しく流動したのは海岸からほぼ2kmの範囲(浸水域の約半分)である。津波の人的・物的被害を巨大にした基本要因は、昭和津波以降に津波の危険が大きい海岸低地の居住・利用が著しく拡大したことである。

**キーワード**：東北地方太平洋沖地震，津波，避難，リアス海岸，人的被害率