

講演②

## 東北地方太平洋沖地震津波に対する建物の脆弱性と津波被害想定の高度化に向けて



越村 俊一（こしむら しゅんいち）  
東北大学 准教授

只今ご紹介いただきました東北大学の越村と申します。どうぞよろしくお願い致します。本日は「東北地方太平洋沖地震津波に対する建物の脆弱性と津波被害想定の高高度化に向けて」についてご報告させて頂きたいと思ひます。



図 1

図 1 は、3 月 11 日に発生した津波による仙台付近の浸水域です。我々のキャンパスはここにあります。我々は被災地に一番近い大学のひとつとして、被害調査や復興計画の策定等の活動を

様々な方々と共同して行なってきました。

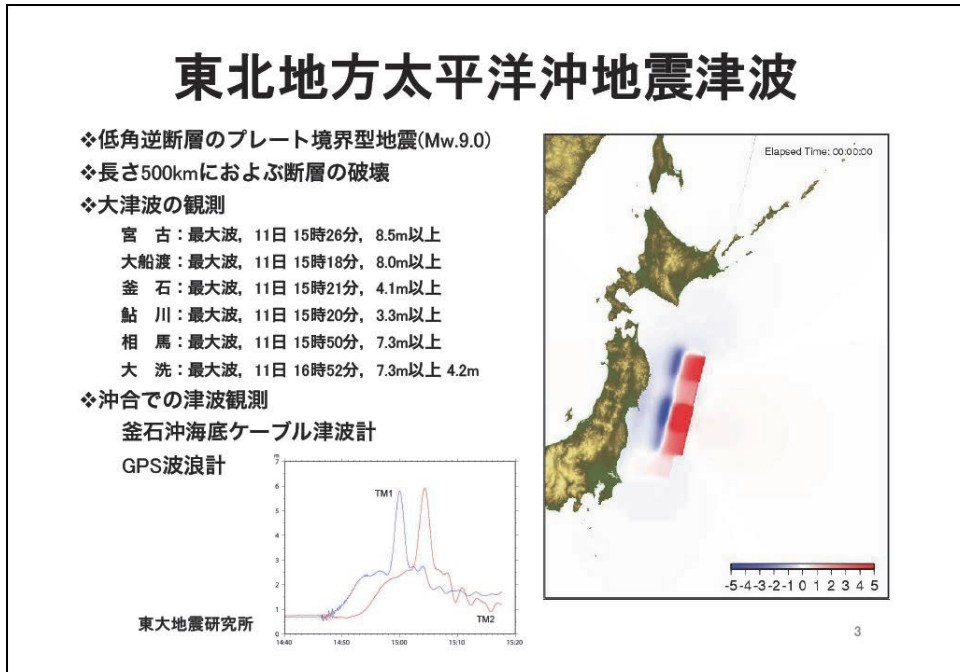


図 2

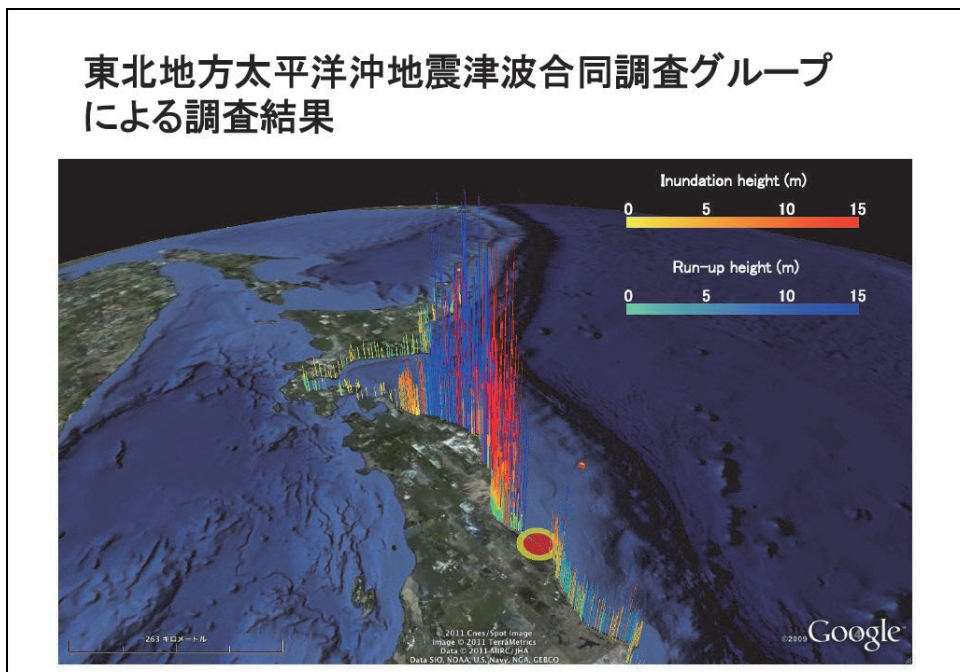


図 3

図 3 はそのひとつの成果である、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが実施した津

波の高さの調査です。これまでに津波の高さの測量地点のデータが6,000点ほど集まってきました。この中の一番高い所で、だいたい40mぐらいの津波の高さが確認されています。1つの災害を通じて6,000点ものデータを得たというのは、おそらく今回の津波が世界でも初めてなのではないかと思います。我々はこのようなデータの解析を通じて今回の津波の発生と被害の全貌を解明し、今後の被害対策に役立てるといふ活動を行なっていかなければいけないと思います。

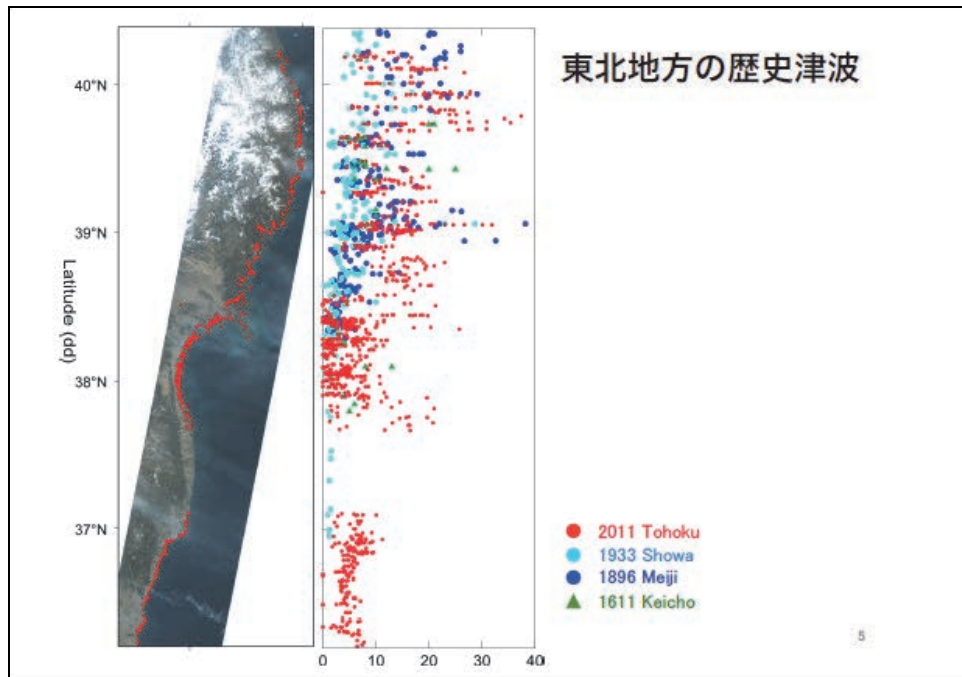


図 4

図 4 は、東北地方の3つの歴史津波と今回の津波の高さの比較を示しています。北部については、今回の津波の規模は1933年の昭和三陸津波や1896年の明治三陸津波と同程度か、場所によってはそれらを上回る規模であったと言えます。一方で、宮城県より南部を含めて考えると、今回の津波は高さも浸水範囲も一番大きかったと言えます。福島第一原子力発電所の事故により、場所によっては津波の来襲状況がまだ分かっていませんが、全体的に見ると今回の津波は我が国の歴史上最も被害の規模が大きかったと言えると思います。

現在、我々はコンピュータによる数値シミュレーションの技術を使いながら、今回の津波ではどのような津波が各地に来襲したのかという状況の全貌の解明に努めています。従来ですと津波の来襲状況を確認する方法は検潮所あるいは沖合での津波観測記録だったわけですが、今回の津波ではその多くが津波によって破壊されてしまいました。

もちろんこれまでも数値シミュレーションを用いて被害想定を行なってきました。しかし、先ほどの瀧瀬先生のお話にもありましたが、我々の想定が不足していたことや我々が予見できなかった事象が今回の津波では多くありました。出来るならば津波災害が起きる前に、被害の全貌をシミュレーションしておかなければいけないということを痛烈に学んだ次第です。

これは 10m くらいの空間分解能で、仙台市の海岸における津波の遡上をシミュレーションしたものです(※会場では動画を上映)。

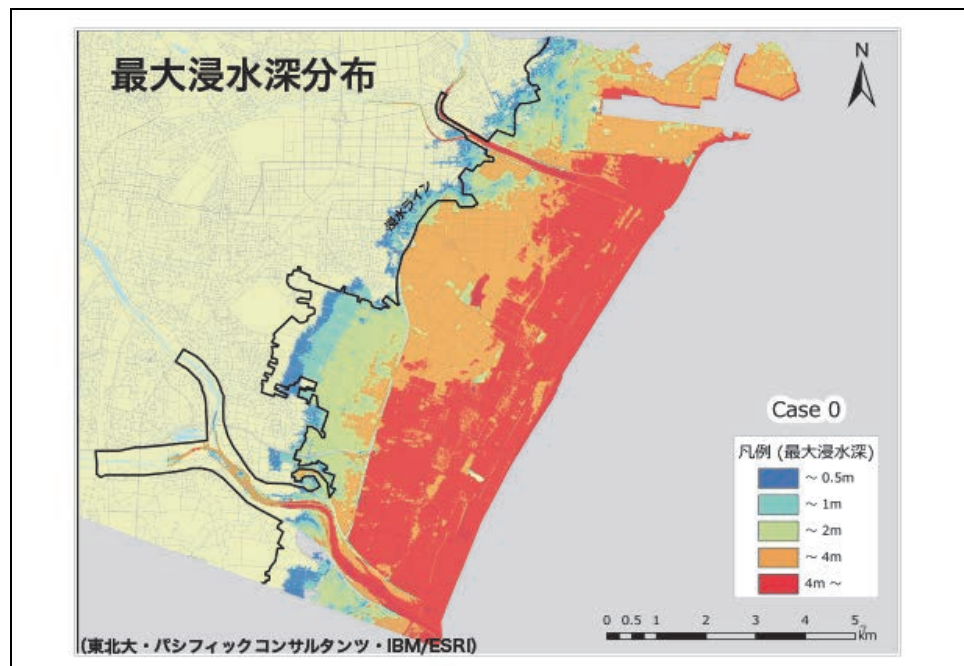


図 5

図 5 は、シミュレーションで再現した浸水深の分布です。地図上に黒い実線で示している部分は、国土地理院によって測定された津波の浸水限界(浸水ライン)です。赤くなっている部分、これは浸水深が4mを越えた部分です。ちなみに浸水深というのは、その場所の地盤からどれだけ津波が浸かったかということを意味した尺度です。このように、シミュレーションによってだいたいどのような津波が来襲したのか、どこまでその被害あるいは浸水が及んだのかということを明らかにすることが出来ました。例えば仙台市で言いますと、東部道路より東の地域は津波による被害が甚大であったことがわかります。このようなシミュレーションを通じて、今回の津波で何が起きたのかの解明や、これからの復興計画に役立てようとしています。

被害の概要です(図 6)。6ヶ月経った時点の情報になりますが、我が国全体で言いますと亡くなった方の数は 15,781 人、行方不明の方々が 4,000 人を超えるという被害でした。特に宮城県は、亡くなった方の数、行方不明者の数でも被害が大きかったということです。

建物被害。流出全壊は、報告されているだけでも 11 万 5 千棟を超える被害がありました。おそらくそのほとんどが津波による被害と考えられます。それによって発生した瓦礫の量、2,300 万トン。これは3県での予測の数値になります。この6ヶ月の時点ではおよそ半分が撤去された。現在のところそのほとんどが撤去済みということになりますが、その瓦礫の行き先というものがまだ依然分からない状況です。





図 6

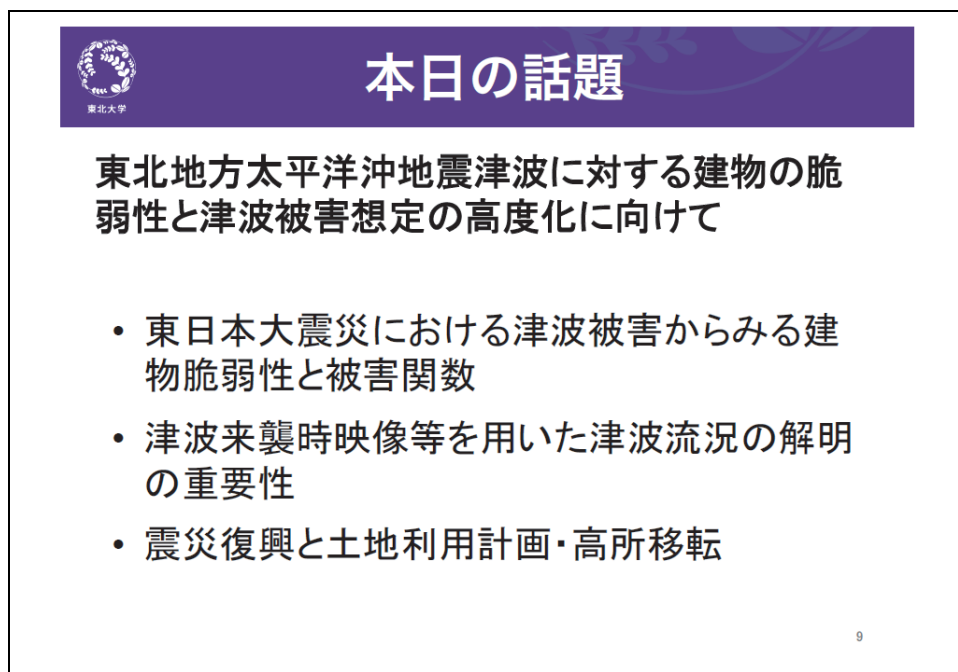


図 7

今日は、3点についてお話させていただきます(図 7)。最初に、東日本大震災における津波被害からみる建物の脆弱性と被害関数についてお話したいと思います。次に、津波来襲の映像等を用いた津波流況の解明の重要性についてです。今回の津波では非常に多くの方が津波を目撃されま

した。その目撃情報というものは貴重な映像として、例えば動画投稿サイトなどの場所で保存されています。こういった情報から何が分かるのか、我々が今後学ぶべき情報は何なのかについてお話ししたいと思います。最後に、時間がありましたら、震災復興と土地利用計画・高所移転についてお話ししたいと思います。

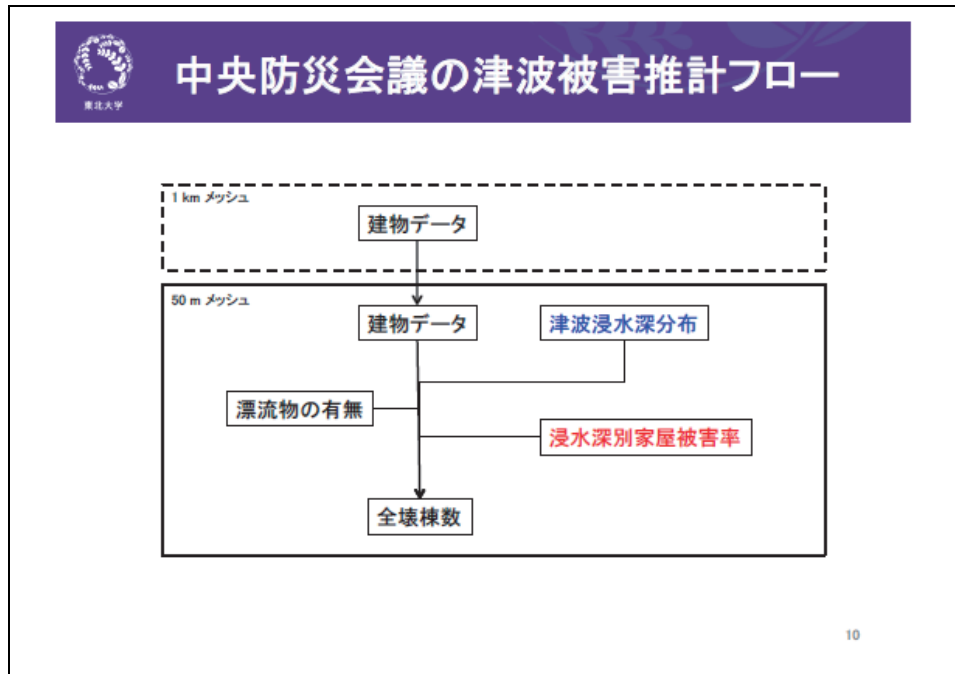


図 8

**津波被害の予測式(首藤, 1992)**

被害区分	浸水深 H	
	木造	非木造
全壊(床上浸水)	$2.0\text{m} \leq H$	—
半壊(床上浸水)	$1.0\text{m} \leq H < 2.0\text{m}$	—
軽微(床上浸水)	$0.5\text{m} \leq H < 1.0\text{m}$	$0.5\text{m} \leq H$
床下浸水	$H < 0.5\text{m}$	$0.5\text{m} \leq H$

首藤伸夫：津波強度と被害，東北大学津波工学研究報告，第9号，pp.101-136，1992.

11

図 9

図 8 は、従来の中央防災会議の津波被害推計フローを簡単に示したものです。50m メッシュごとに含まれる建物の棟数に、そこで予測される津波の浸水深に応じた被害率を掛けることにより、被害棟数を算出してきました。

これまでは代表的な津波被害の予測式として、図9の1992年に首藤教授が提案された尺度を用いています。例えば木造建物に関しては、浸水深が 2m を超えると全壊に至るという基準を以って津波の被害想定を行ってきました。

### 津波被害の予測式(飯塚・松富, 2000)

家屋の種類	中 破			大 破		
	浸水深 (m)	流速 (m/s)	抗力 (kN/m)	浸水深 (m)	流速 (m/s)	抗力 (kN/m)
鉄筋コンクリート造	—	—	—	7.0以上	9.1以上	332-603以上
コンクリートブロック造	3.0	6.0	60.7-111	7.0	9.1	332-603
木造	1.5	4.2	15.6-27.4	2.0	4.9	27.4-49.0
被害程度	柱は残存、壁の一部が破壊			壁と柱のかなりの部分が破壊される か流失		

飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.381-385, 2000.

12

図 10

### 津波被害関数とは


- 災害の外力と被害規模の関係式(=フラジリティ関数, フラジリティカーブ)
- 家屋被害, 人的被害の程度(被害確率)を津波氾濫流の流体力学的な諸量の関数として表現する

参考文献:  
越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明, 津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.320-331, 2009.  
越村俊一, 萱場真太郎, 1993年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考 -津波被害関数の構築に向けて-, 地震工学論文集, 第10巻, 第3号, pp.88-101, 2010.

13

図 11

それよりももう少し詳細な予測式として、図 10 のように構造別、被害の種別ごとに、浸水深、流速、あるいは建物に作用する力との関連した基準が示されてきました。こうした情報は過去の津波の経験あるいは被害実態から得られたものです。


 東北大学

## 津波被害関数構築の手順(基礎データ)

1. 津波浸水深現地調査データ(宮城県、仙台河川国道事務所、東北大学)
2. 国土地理院浸水ラインデータ
3. 建物被害情報(国土地理院撮影の航空写真から目視判読(東北大学実施))
4. ゼンリン住宅地図ポリゴンデータ(各戸への被害程度の属性付与)

14

図 12

 東北大学

## 津波被害関数構築の手順(1)

- 建物被害情報の取得(今回は、航空写真の判読による流失・残存の判定)
- 津波ハザード情報の取得(浸水深データおよび浸水域データ)
- 浸水深データの空間分布の取得(空間補間、100m毎の浸水深分布)
- 各建物の被害(流失・残存)とハザード情報(浸水深)の関連づけ

15

図 13





## 津波被害関数構築の手順(2)

- 建物被害および浸水深データセットの作成
- 浸水深に関してデータをソートし, グルーピング
- 各サンプルグループにおいて, 浸水深の代表値(中央値)と家屋被害率(流失率)を算出
- 浸水深と家屋被害率(流失率)の関係から回帰分析

16

図 14

一方、私が最初に申し上げたように、今回の津波では津波の高さのデータだけでも 6,000 点以上のデータが得られようとしています。これまでにない密度で津波に関する情報や知見が蓄積されようとしています。その中で、我々はその情報をどう被害予測手法の高度化に活かすことができるのかということの研究して参りました。

その1つの提案が津波被害関数です(図 11)。もともと被害関数は、地震工学の分野あるいは地震による被害想定では利用されてきましたが、津波による被害想定ではこれまで利用されてきませんでした。今日は、今回の津波などの調査によって得られたデータを用いて津波被害関数を構築した例を幾つかお示したいと思います。どういったデータを使ったか(図 12)、どういった手順を踏まえて津波被害関数を構築したかという、例えば浸水ラインのデータや建物被害に関する情報、津波の浸水深に関する現地調査のデータなどを統合分析して求めていきました(図 13, 14)。

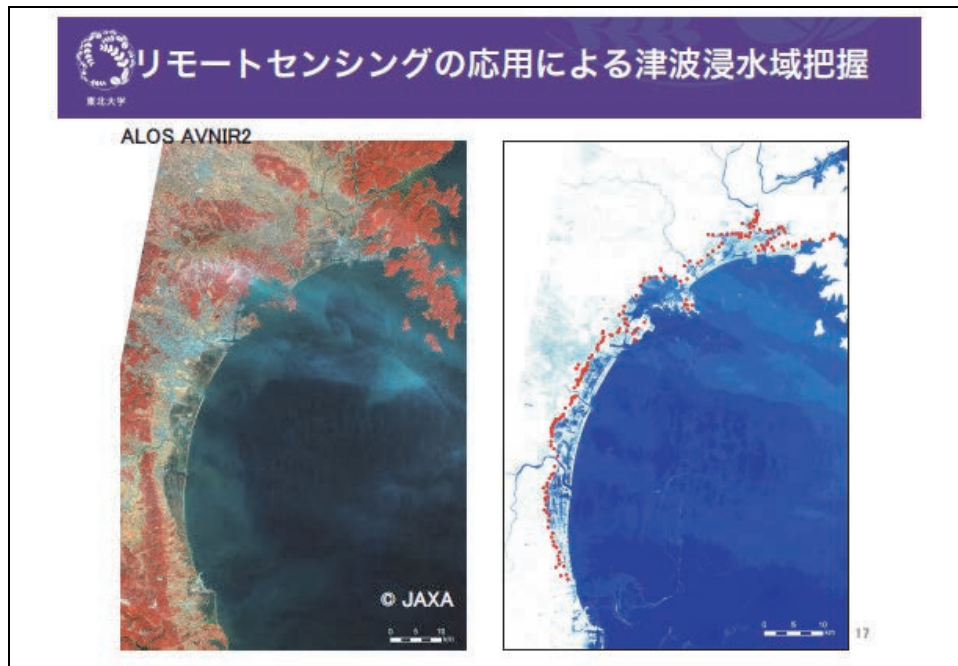


図 15

特に今回のような非常に広い範囲での災害が起こった場合、例えば浸水ラインの調査を現地調査で行なうことは非常に困難でした。そこで、我々は災害後に取得される衛星画像を用いて、被害の範囲を推計してきました。その一例として、ALOS AVNIR2 という可視の光学画像 3 つのバンドと近赤外域が撮れる衛星センサーの画像を使って、水だけが検出できるフィルターを開発しました。図 15 の水色に塗っている部分はそのフィルターをかけた状態の図面です。赤い点は現地調査によって得られた浸水ラインのポイントです。このようなデータの分析を通じて、津波発生直後に出来るだけ早く、津波の被害あるいは浸水が及んだ地域を推計する方法についても非常に多くの知見が得られました。

## 建物被害の分布

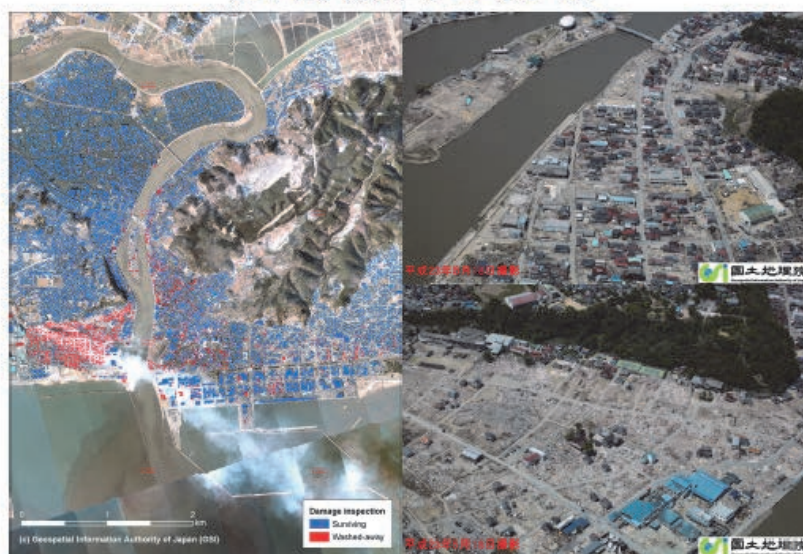


図 16

建物被害についても同様に、非常に多くの建物被害が発生しました。それを1棟1棟現地調査で調べることは非常に困難です。そこで、我々は国土地理院が撮影した直下視や斜め視の航空写真を用いて、家屋1棟ごとの被害を判読する作業を行ってきました。屋根の有無によって、図 16 に示す赤い部分が津波によって流出してしまった家屋、青い部分が屋根の残っている、つまり残存した家屋というように判読してきました。

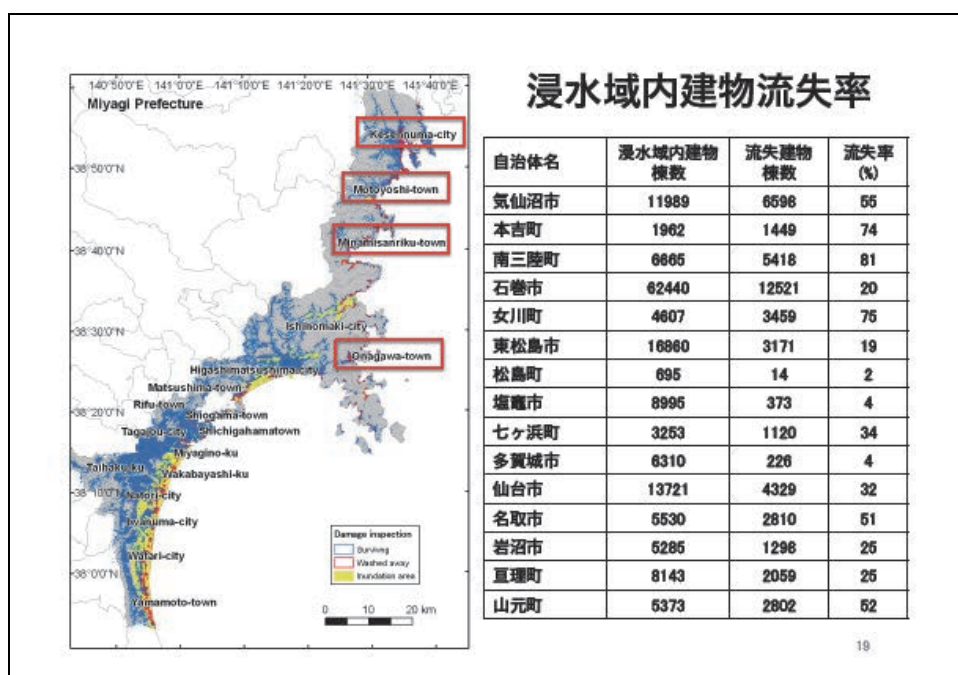


図 17

図 17 は宮城県の各市町における浸水域の解析と建物被害の航空写真による判読を通じて得られた浸水域における建物流失率です。これは宮城県の北から南までの各市町における浸水域内建物の棟数、浸水域の解析、そして建物被害の航空写真による判読を通じて得られた数字です。流出率を見ると、特にリアス式海岸においては津波が増幅した結果、流出率は5割を超えています。場所によって、例えば南三陸町の被害は流出率が8割を超える非常に甚大なものであるということも確認してきました。

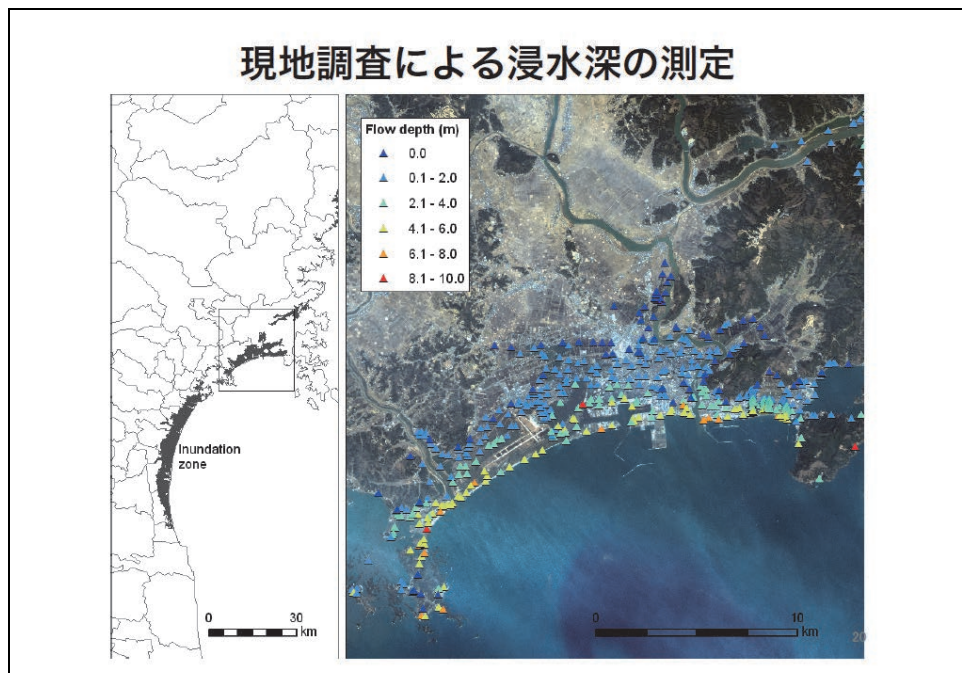


図 18



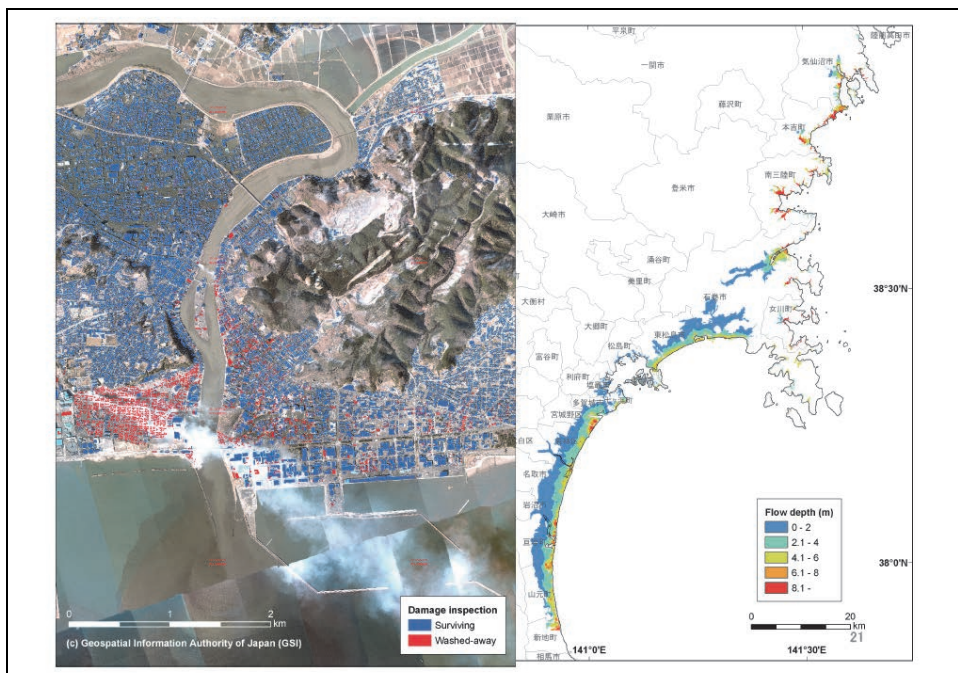


図 19

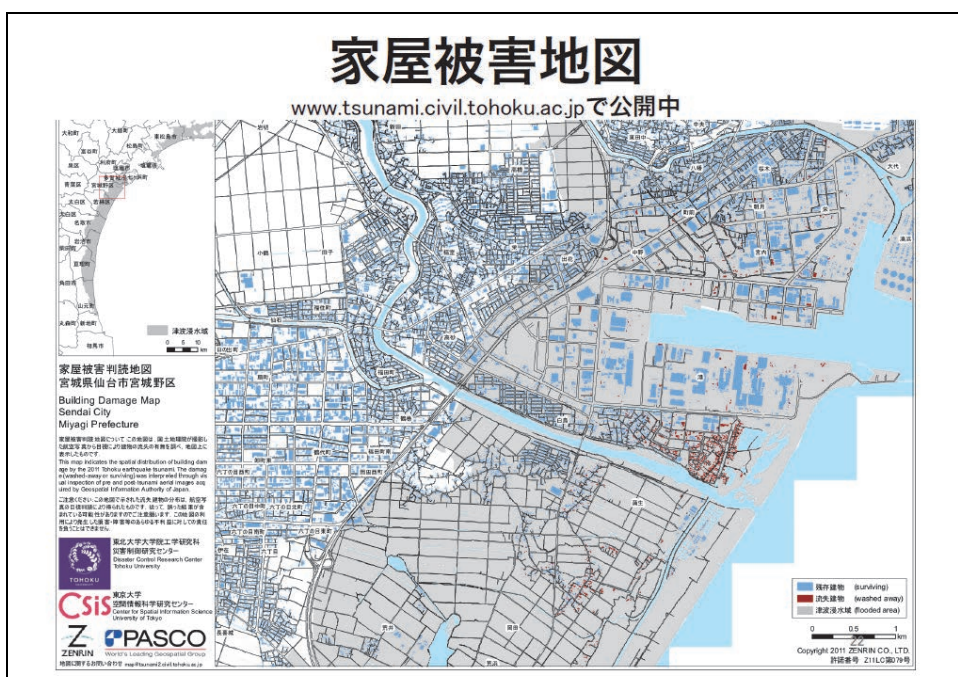


図 20

こういった(図 18, 19)津波の外力についての情報、ここでいう外力とは現地地わかる外力の情報、すなわち浸水深という情報です。これについても我々は震災発生直後から測定してきました。ちなみに建物の被害地図(図 20)については我々の研究室の Web サイトで公開していますので、よろしければご覧頂ければと思います。

このように これらの情報を統合分析した結果が図 21 です。宮城県全体で見ると、多くの建物が

浸水深3m以下の地域にあったということが分かってきました。これを地域ごとにまとめて見たものが図22と図23になります。仙台市であるとか、南三陸町といった具合に、各地での浸水深と建物被害棟数の統計が分かります。

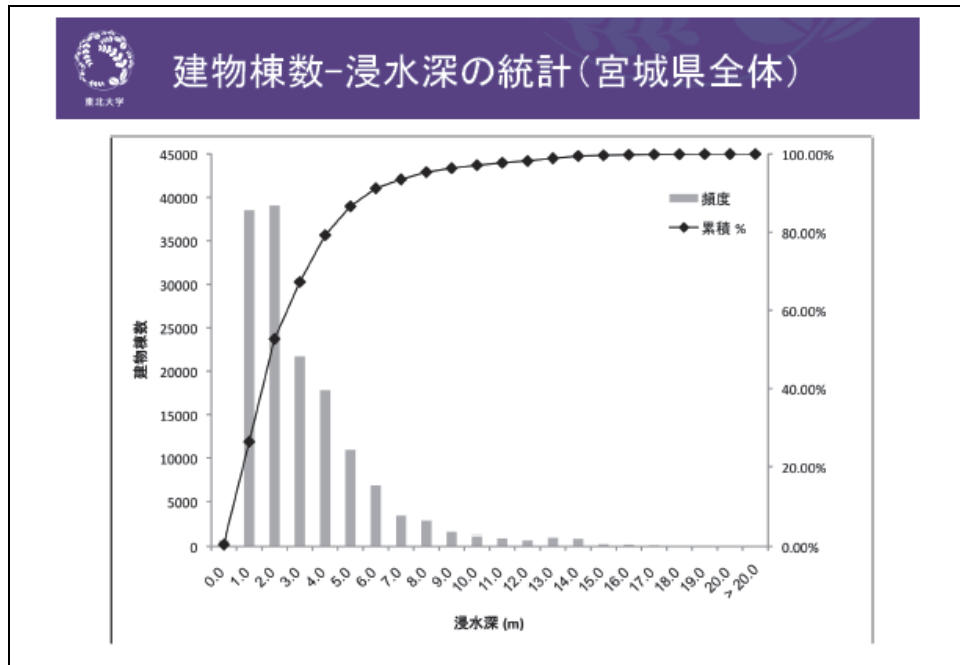


図 21

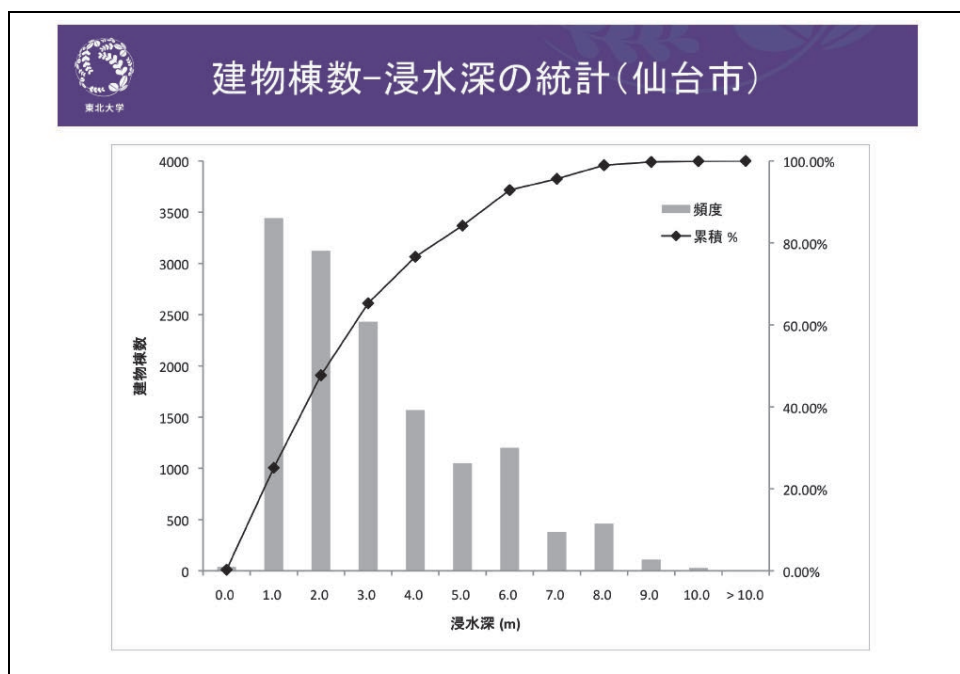


図 22

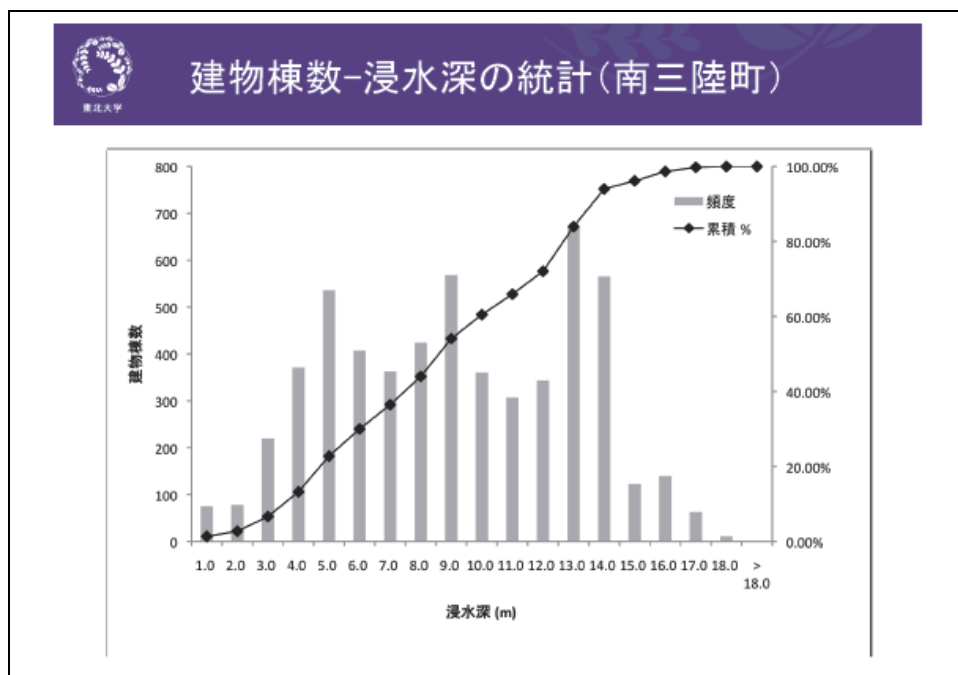


図 23

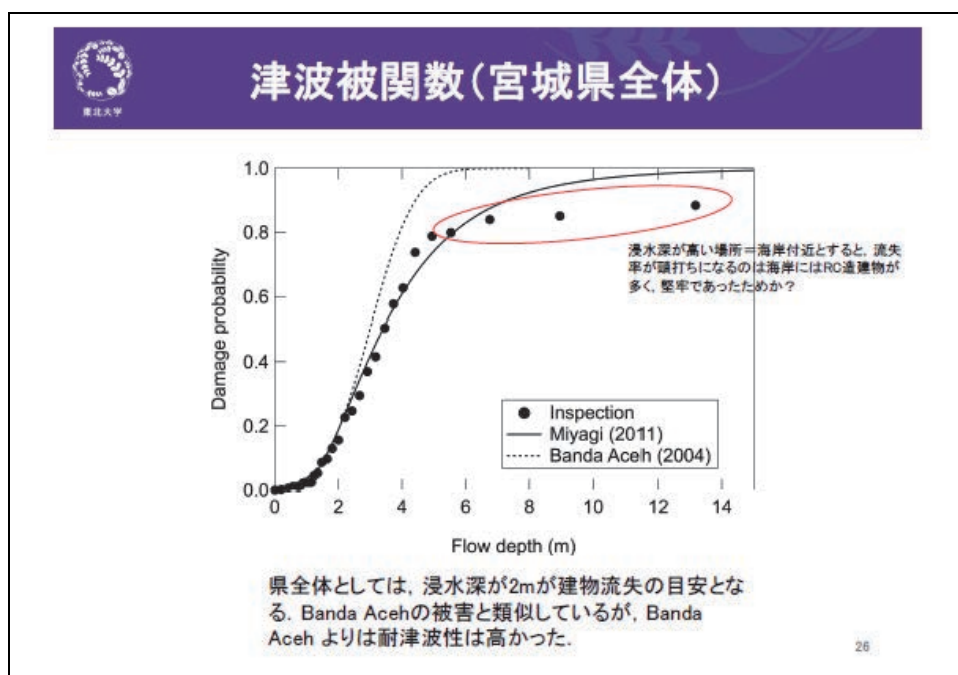


図 24

これを別の尺度で分析します。図 24 は、建物棟数がわかるということは建物の流出率がわかるということですから、それぞれの浸水深に対応する建物の流出率を黒い点でプロットしたものです。そして黒い直線がそれを回帰させたものです。もう1つ、点線で示しているものは 2004 年のスマトラ島のインド洋津波のバンダアチェというところで我々が得た曲線です。これを我々は被害関数と呼んでいます。

被害関数の傾きが非常に増加するひとつの目安が浸水深2mにあるということがお分かりになると  
 思います。また、宮城県全体で言うと、浸水深が6mを超えると流出率は8割を超え、非常に高くな  
 ることも分かりました。バンダアチェで得られた被害関数との比較することで、我が国の建物群とし  
 ての耐津波性能はバンダアチェよりも高かったということも分かりました。

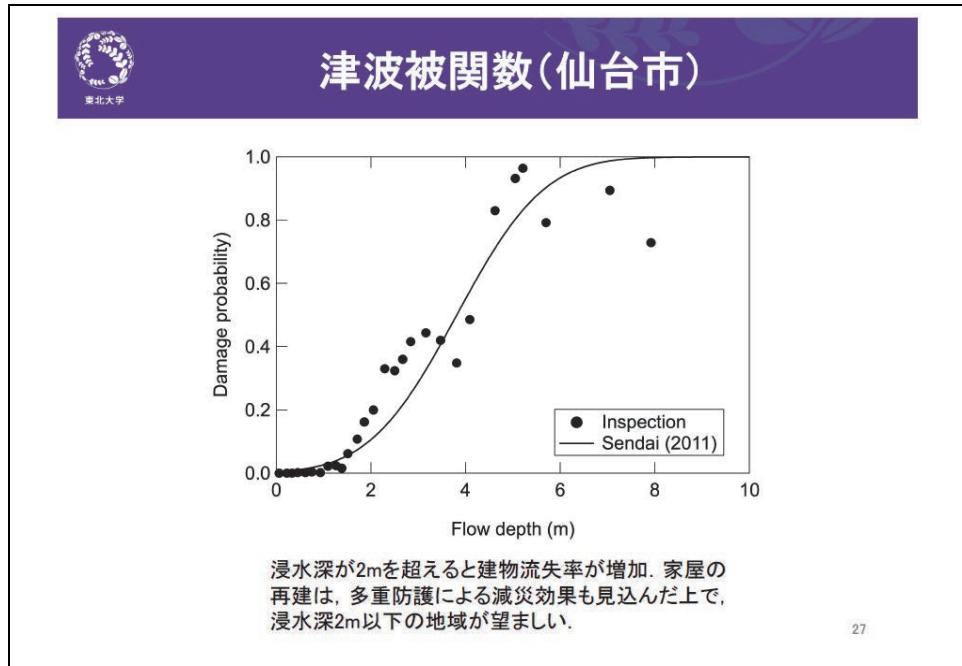


図 25

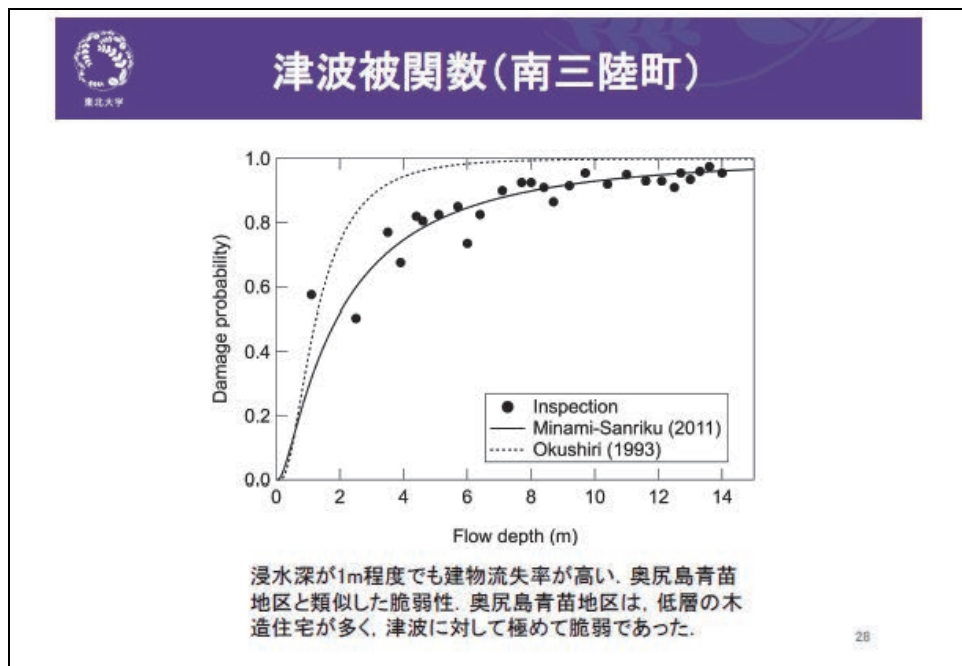



図 26



図 25 は仙台市の津波被害関数になります。図 26 に示します南三陸町はじめ、各市町で関数が出てまいります。場所によってカーブが異なるということも分かってきました。特に顕著なのが図 26 の南三陸町の被害関数です。宮城県全体よりも建物の津波に対する脆弱性ははるかに高いということが、お分かり頂けると思います。何故このような違いが生ずるのか。津波が来襲して建物の破壊に至るには様々な要因があります。水だけでなく、火災、あるいは漂流物の影響もあります。一番大きな要因は「力」です。力が家屋を破壊するわけですので、浸水深は津波に対する脆弱性の全貌をつかむ尺度ではなかったということになります。だから場所によってこのような差が出てくるということが分かりました。望むべきは、これから数値計算等を行なって詳細な津波の流速、あるいは津波によって家屋に作用する力、我々は津波力と呼んでいますが、その津波力を調べることで統一的な関数ができるのではないかと考えております。

## 浸水域内の家屋の再建

### 雪国の家屋をヒントに



http://blog.goo.ne.jp/sumaino\_benriya/

#### 新潟県条例から抜粋

- 1階部分の鉄筋コンクリート（RC造）部分（1.8m以下）は「基礎」とみなされる
- 床下部分の構造耐力上主要な部分は原則として一体の鉄筋コンクリート造、鉄骨造とする
- 建築物の階の算定において、床下部分の高さが1.5m未満の場合は階に算入しない

29

図 27

このことは復興やこれからの東海・東南海・南海地震に向けた事前復興にも関係してくるかもしれません。浸水域内での家の再建や新築する場合にどのように設計をすればよいか。浸水深2mというのが家屋の流失率が上がる一つのラインになると申し上げました。もし浸水域内に家を再建するということであれば、図 27 に示したような雪国、特に新潟県での一般的な家屋の形態をヒントとして、例えば頑丈なコンクリートの基礎が地上 2m までであるような建物に対して税制上のインセンティブを設ける、などしてこれを推奨するということが必要になってくるのではないかと我々は考えています。

また建物の脆弱性だけではなく、死亡率についてですが、これはスマトラ島で得られた死亡率に関する津波被害関数です(図 28)。2つグラフを示していますが、上のグラフの横軸は浸水深です。下のグラフは Inundation height、浸水高です。すなわち、どれくらい浸かったかではなく、その津波の場所ごとの高さの海拔で表現しています。図 29 は 2004 年のスマトラ島沖地震津波で得た死亡

率に関する津波被害関数です。家屋の被害の関数と対応するようにして、浸水深が 2m を超えるとその地域の死亡率は上がってきます。このような被害関数という形での脆弱性に関する知見を、今後我々は今回の津波のデータを使って、きっちり後世に残して行かなければいけないと考えています。

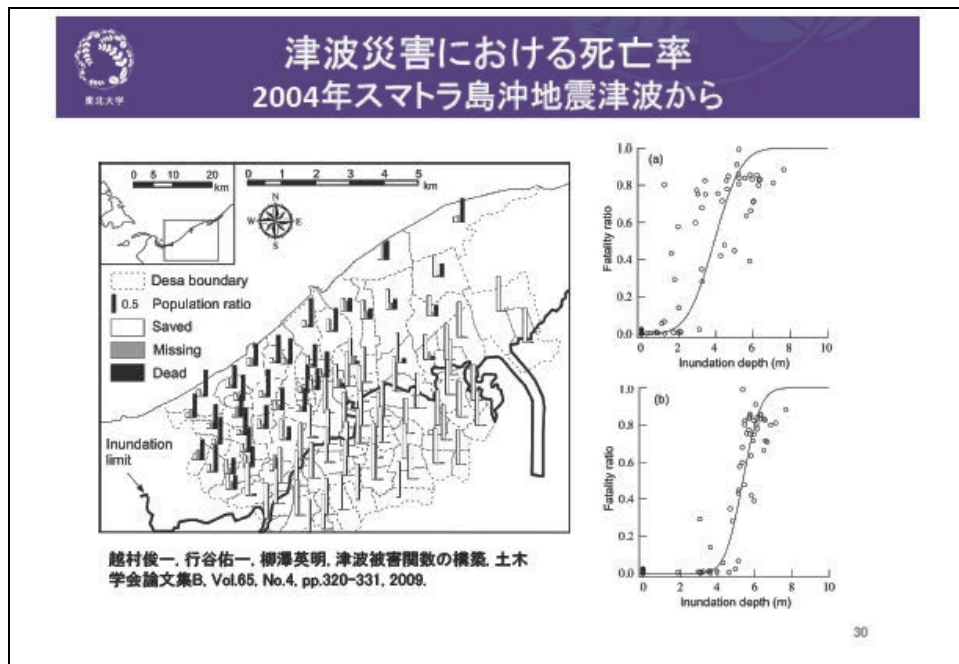


図 28

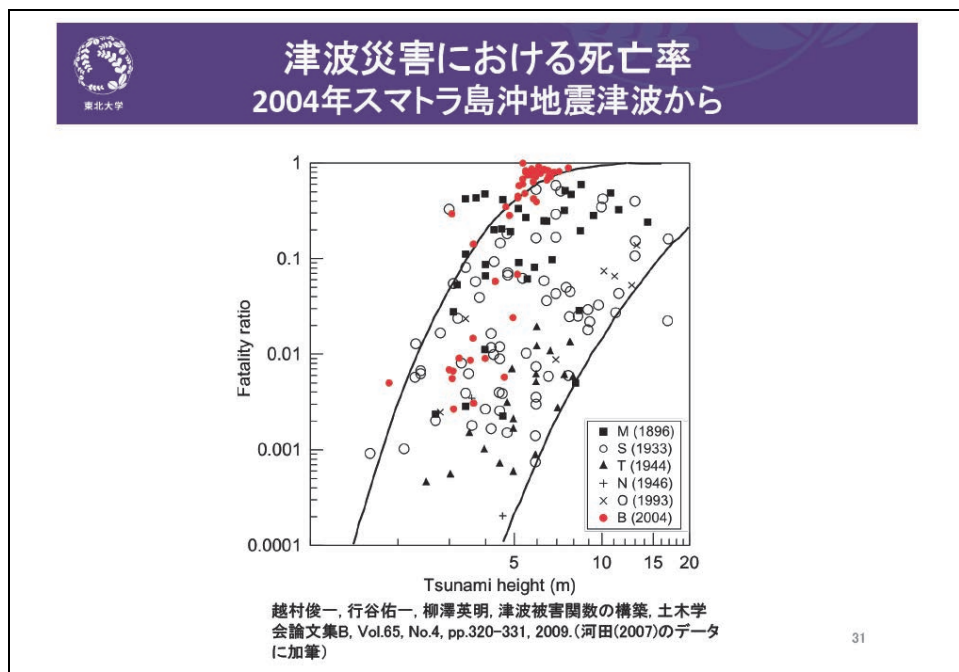


図 29



## まとめと課題

- 宮城県全体：浸水深2mで建物流失率が増加する（流失率2割以上）。
- 浸水深6mを超えると流失率は8割以上。
- 地域により、津波の特性や地形等との関連で被害率は大きく異なる（例：仙台市、南三陸町）
- 地域別の被害関数を構築し、精査する必要がある。
- 建物構造別に整理して被害関数を構築する。
- 数値シミュレーションを併用した被害関数の構築（流速や津波力との関連）
- 人的被害に関する評価式の構築

32

図 30

次に少し津波の特性、局所的な津波の特性についてお話させていただきます。

宮城県女川町では死者・行方不明者が800人を超えました(図31)。人口が1万人ほどですから、およそ1割の方々が亡くなったか行方不明になったという所です。8割の建物が被害を受け、我々が調べた限り少なくとも6棟の鉄筋コンクリート造や鉄骨造のビルが流出したという被害がありました(図32)。図33で転倒しているビルは、元々建っていた場所から50～60m程離れた場所で見つかっています。これまで鉄筋コンクリート造のビルは津波にあっても大丈夫なので、もし近くに高台がない場合には鉄筋コンクリート造の建物の3階以上に避難してくださいというのが定説でした。これが覆されてしまったことで、こういった要因でこのような被害に及んだのかをこれから解明していかなければなりません。



東北大学

# 宮城県女川町



8割の建物が被害, 死者・行方不明者820人

33

図 31



6棟の鉄筋コンクリート(RC),  
鉄骨造(SRC)のビルが流失・  
転倒

34

図 32





図 33

ここで少し映像をご覧ください。(※会場では女川町で撮影された映像を上映)。

これは津波が来襲した直後からの映像で、ちょうど女川港の岸壁を津波が越えて市街地に津波が来襲してきた所からの映像です。浸水深をどんどん増していく途中で、建物が大きな音を立てて流出していく瞬間が見られます。この映像ひとつを取って見ても津波というものの力の強さというのが窺い知れますが、これを科学的に分析すると何が分かるか。

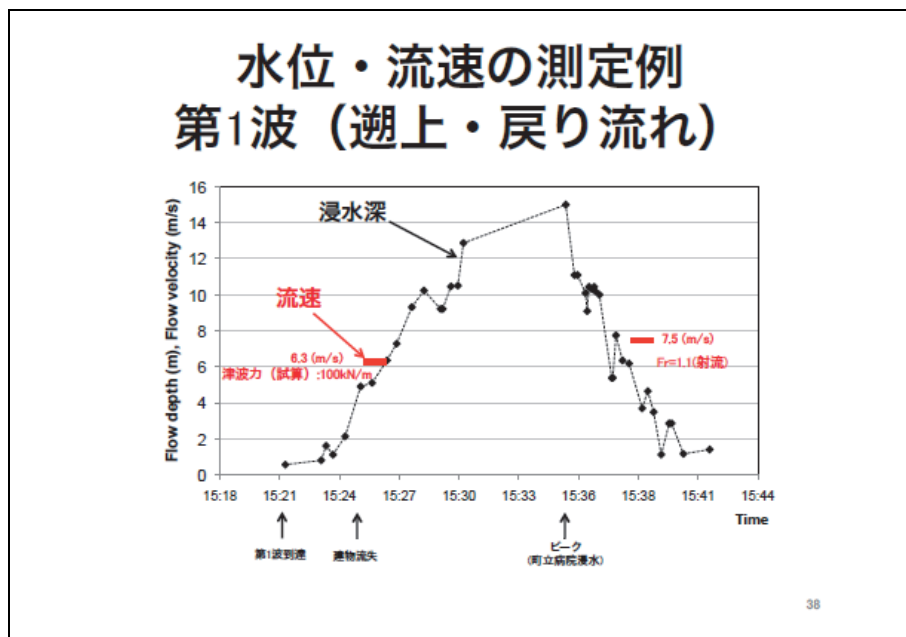


図 34

図 34 のグラフでは津波の来襲時から横軸が時間、黒い点を結んだ線が津波の浸水深の時系列を表しています。女川町においては3時21分に津波の第一波が到達し、ピーク時にだいたい20m以上の高台まで津波が来襲して浸水しましたが、それまでの時間は15分、すなわちピークに達する津波の4分の1周期が15分であったということも分かってきました。


先ほど見て頂いた映像には他にもいろいろなものが写っていました。例えば漂流物です。漂流物が時系列でどう動いたかを解析すると、その場所での津波の流速が分かります。第一波の押し波において建物が流出した瞬間、そこでの浸水深はだいたい5m、流速は6.3m/sあったということが分かりました。これは力にして建物に1mの幅あたりだいたい100kNが作用していたこととなります。また、いわゆる引き波においても流速を調べてみますと、浸水深が同じ5mであっても、流速は7.5m/sと、押し波よりも引き波の方が速かったということも映像から知ることができます。各地で得られた映像を用いてこういった情報を解析することは、津波が来襲した状況の全貌や建物に対してどのような力が作用していたのかを調べるひとつの重要なきっかけになるとと思います。



図 35

最後に、震災復興と土地利用計画・高所移転についてお話させていただきます。

これまでに地方自治体における復興計画の骨子ができあがり、国からも海岸施設に対する考え方について1つの見解が示されました。今後、津波対策を行なうに当たって、津波防護レベル、津波減災レベルの2つのレベルで対策を考えていくという考え方です。

 **海岸施設の施設高の決定**

- **津波防護レベル**  
近代で最大規模の津波を想定（～百数十年に1度発生する規模）して、人命・財産を守れるように防潮堤・防波堤の高さを決定する。
- **津波減災レベル**  
過去最大級の津波を想定（1000年に1度発生するような規模）し、人命を守る、被害の拡大を防ぐ、早期復旧を可能にする、構造物による防護だけでなく、あらゆる対策（ハード・ソフト）により被害を最小化する。

40

図 36

津波防護レベルは主に構造物の高さに関するレベルです。今後、防潮堤・防波堤は百数十年に1度発生する規模の津波を対象としてその高さを決定すると国が見解を示したわけです。従って、地域ごとに百数十年に1度来襲する津波の高さを推計して、防潮堤・防波堤の高さを決める議論が今まさにされているところです。

一方、津波減災レベルについては、過去最大級の津波を想定して人命を守る、あるいは構造物だけでなく被害の拡大を防ぎ、早期復旧を可能にするような、あらゆる対策により津波被害を最小化するためのあらゆる対策を決めることになりました。そういった二つのレベルを通じて今後の津波対策を行っていくことになりました。

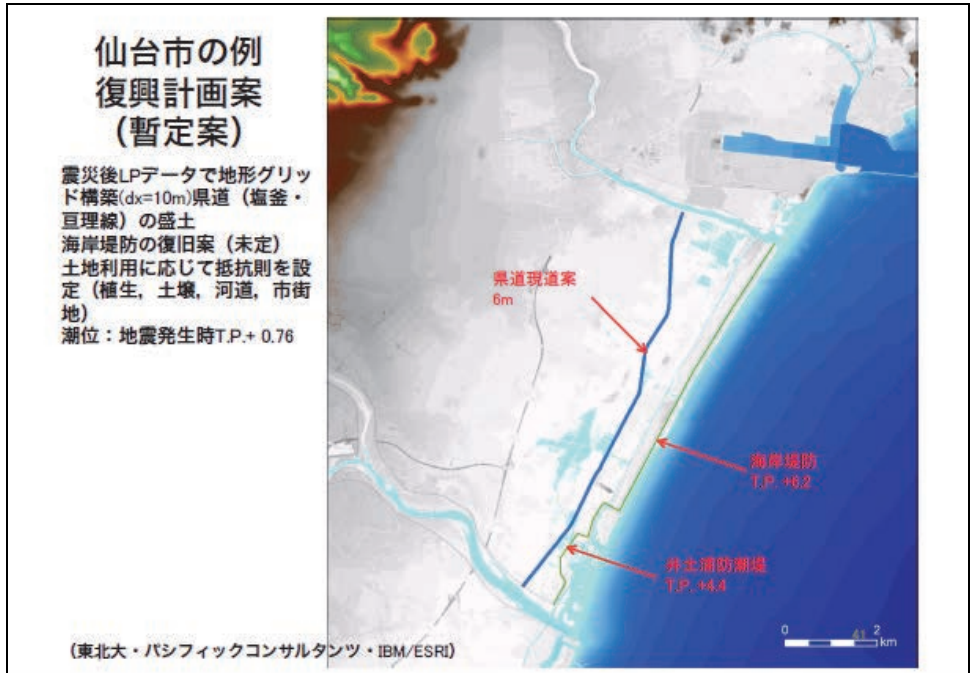


図 37



図 38



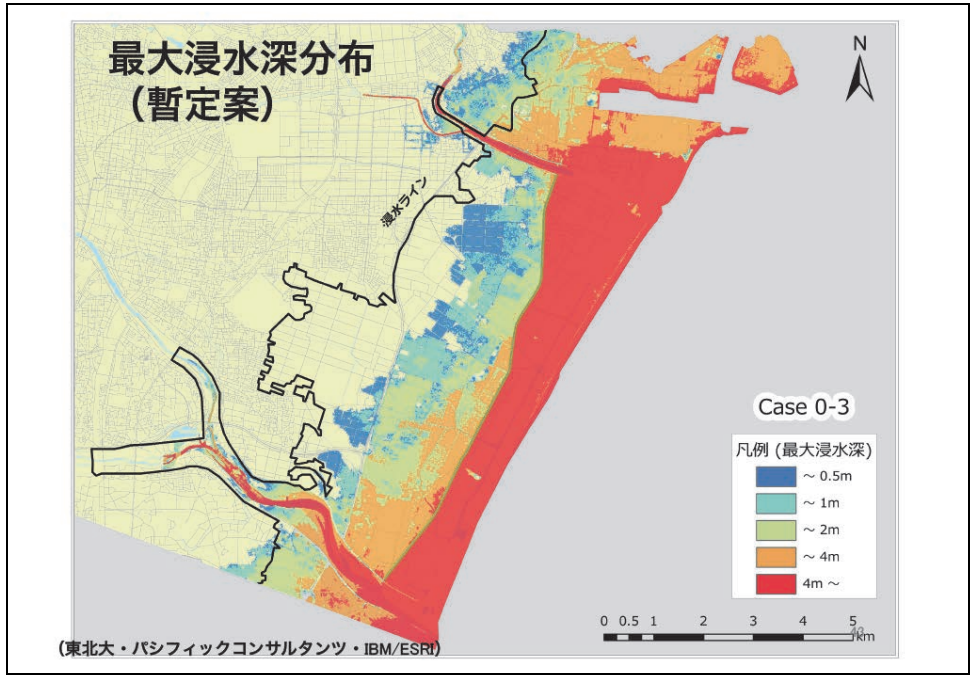


図 39

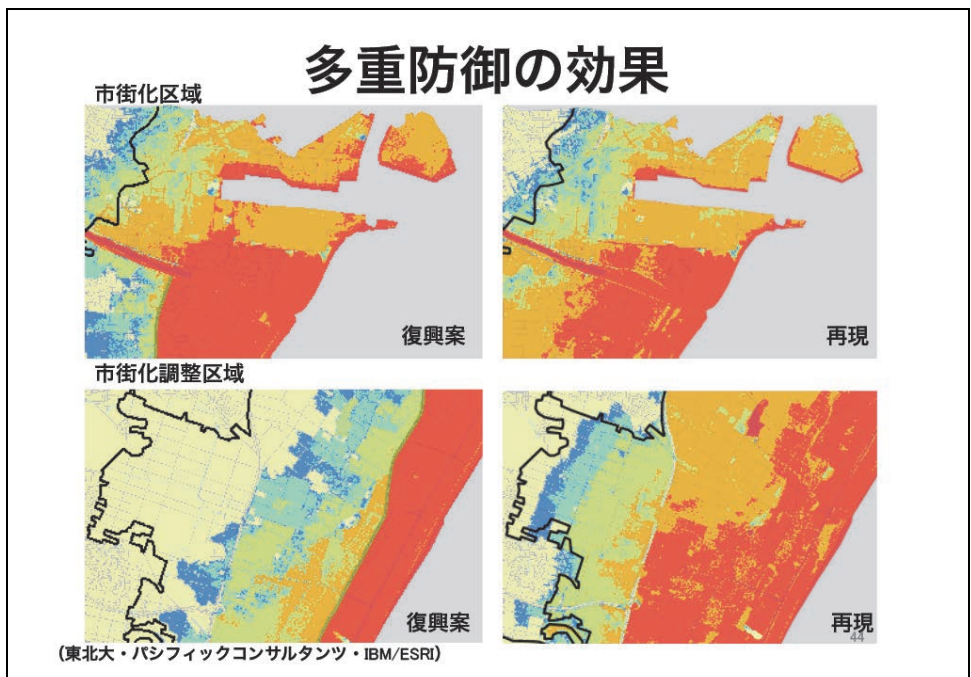


図 40

仙台市の例(図 37)を1つ示しますと、海岸における防潮堤、あるいは県道の盛り土によってどういふ効果があるのかを、工学的に見極めようとしています(図 38~40)。県道を盛り土した場合、その効果は一部ありますが、津波はそこをやや越流してしまっ、被害を完全に抑止するわけにはいかないこともシミュレーションによって分かってきました。

## 津波防護施設の効果の評価尺度

- 浸水面積の減少
- 浸水深の低減（流速も・・・）
- 曝露人口，曝露家屋棟数（市街化区域，市街化調整区域）
- 流失家屋棟数の減少，生存空間の増加
- 費用対効果

45

図 41

我々は震災後に行なった調査、解析によって得られた様々な知見を使って、津波に強い町づくりをしていくための評価尺度を蓄積している段階にあります。ある津波防護施設を考える場合、その効果として、例えば浸水面積や浸水深や流速をどれくらい減らせるか、曝露人口や流出家屋をどれくらい減らせるか、といった観点で様々な試行を行ないながら、町づくりや津波防護施設の設計を行なっています(図 41)。そのような知見は復興・町づくりも少しずつ活かされようとしていて、例えば女川町でも「復興まちづくり案」というのが報道でも出されましたが、高台移転ということで、移転地がこれから準備されることになろうかと思っています。

こういった尺度を使いながらどのような津波に強い町をつくっていくのか、また東海・東南海・南海地震が起きる前に津波被害予測技術を高度化し、その被害予測結果と今回の復興過程での様々な問題を用いて、その津波が起きる前にどこまで対策を進めていけるかが、おそらく今後のテーマになるかと思っています。

最後にまとめますと、図 42 のとおり、我々は今後、巨大津波の発生機構や最悪のシナリオを再考していく必要があります。そして、震災の教訓を踏まえてリスク評価の手法を高度化していく必要があります。今後これらをさらに深めながら活動に取り組んでいきたいと思っています。



## まとめ

### 津波被害想定の高度化に向けて

- 巨大津波の発生機構, 最悪シナリオの再考
- 東日本大震災の教訓を踏まえたリスク評価と減災策
  - 海岸防護施設の効果の再認識
  - 津波に対する建物の脆弱性の理解と減災策
  - 避難・情報伝達(警報, 避難指示, 避難ビル), 生命を守る取り組みの再構築
  - ゾーニング・土地利用(事前復興)
  - 被害が起きることを想定した社会の早期安定回復(減災, 海からの被災者救護・救援)

55

図 42

