

10/25 10:50~12:10@F-202
横浜市立東高等学校 SDGs探究企画「ESD DAY@関東学院大学」

高潮や津波による「沿岸災害」と その対策を学ぼう！

福谷 陽 准教授

関東学院大学理工学部
土木学系(土木・都市防災コース)

E-mail: fukutani@kanto-gakuin.ac.jp

本日の内容

- 土木工学、海岸工学について
- 沿岸災害(津波や高潮・高波)とは？
- 災害への対策 —ハード対策とソフト対策—
- 質疑応答(Q&A)

土木工学(Civil Engineering)の役割

- 我々の暮らしを支える様々な社会基盤(鉄道, 道路, 橋梁, 港湾・空港, 海岸, ダム等)の整備・維持管理や, 災害に強い都市・街をつくり我々の身を守るための工学



- 土木工学の基礎となる基本の力学(三力)

土質力学・構造力学・水理学

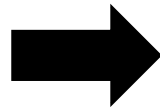
※全て物理学の力学分野が基礎となっている

都市防災を実現するための学問

- 災害に強い都市・街づくりのためには、土木工学の知識が必須
- 周辺の様々な学問分野の知識(幅広い教養)も重要

- ✓ 理学

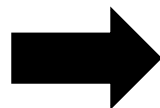
- ・気象学
- ・地震学
- ・海洋学



自然災害を引き起こす
自然現象そのものの理解

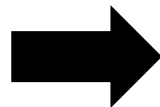
- ✓ 人文社会学

- ・歴史学
- ・文化学
- ・教育学



災害の過去の事例、被災の
歴史、教育

- ✓ 医学・心理学



人的被害の理解

海岸工学 (Coastal Engineering)

- 海洋や海岸での波の性質、海岸構造物の建設、保全、整備計画等について研究する分野
- 津波や高潮等による沿岸災害から我々の暮らしを守り、また、海岸や砂浜を保全するための学問

- 日本列島の海岸線は、
合計3万3,889km(地球の周長の約85%)
39の都道府県が海に面している

海岸線長さの
上位3道県

1位:北海道4,377km

2位:長崎県4,137km

3位:鹿児島県2,722km

国土は、常に津波や高潮による
沿岸災害の危険に曝されている



Japan location map with side map of the Ryukyu Islands.svg, (Chumwa)より抜粋

本日の内容

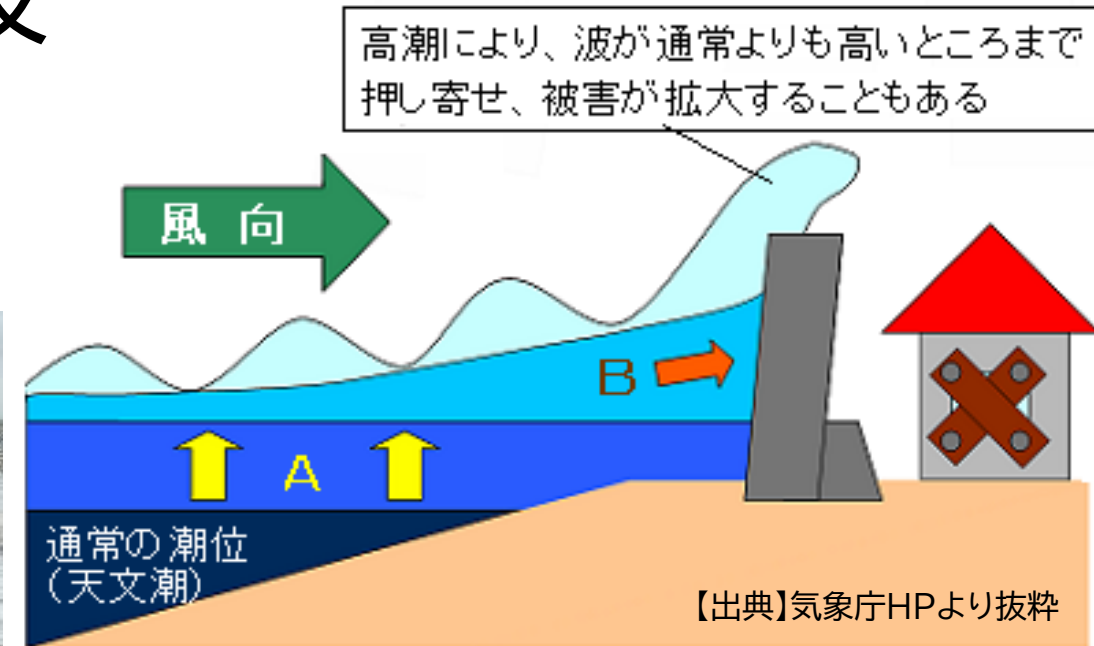
- 土木工学、海岸工学について
- 沿岸災害(津波や高潮・高波)とは？
- 災害への対策 ーハード対策とソフト対策ー
- 質疑応答

高潮・高波と津波

■ 高潮・高波

台風・低気圧 → 気圧低下(A)・強風(B)

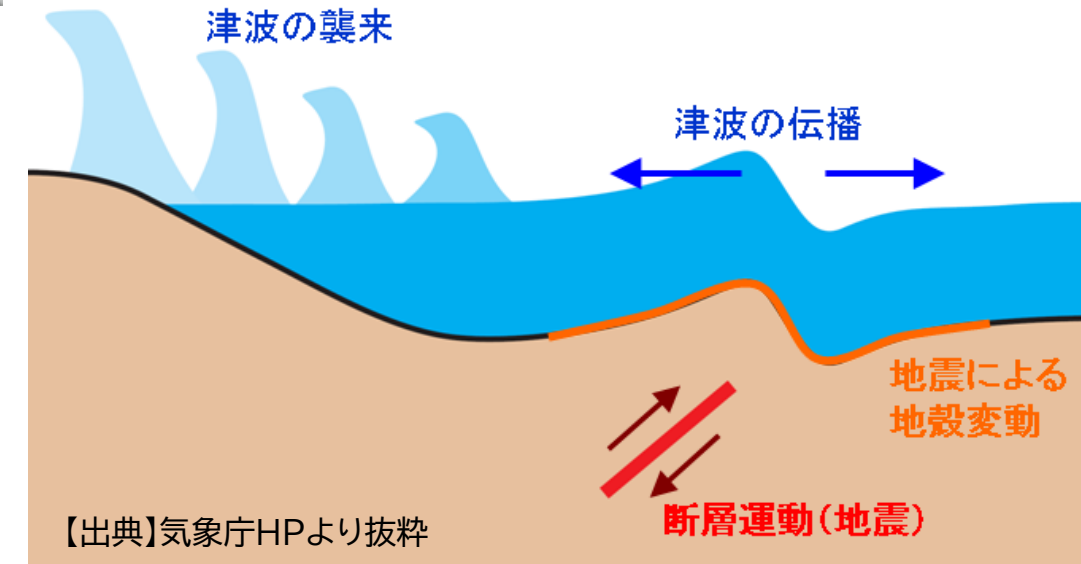
※数日前から予報可能



■ 津波

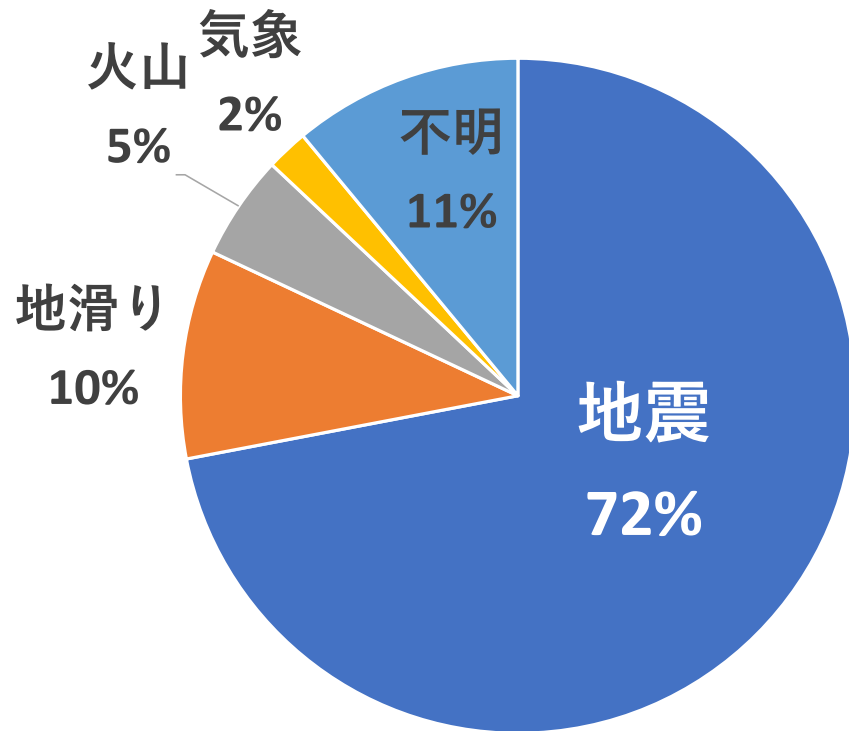
地震 → 地盤変動、海面変動

※事前の予知は難しい

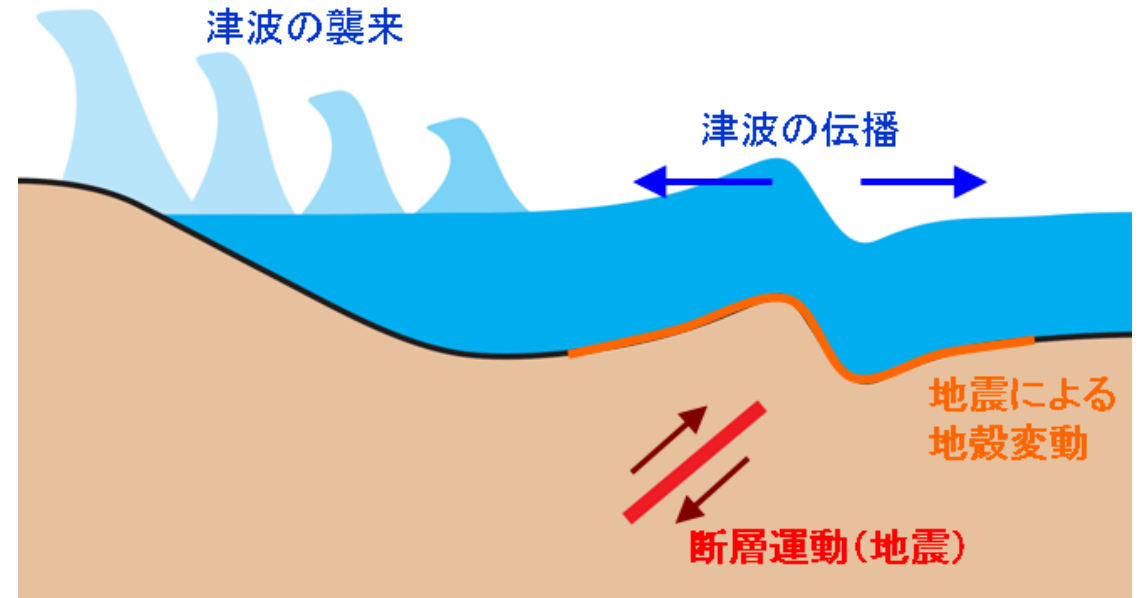


津波とその発生原因

- 津(港)に押し寄せる、異常に大きな波
- 地震断層による津波は、海面変動が伝播して襲来



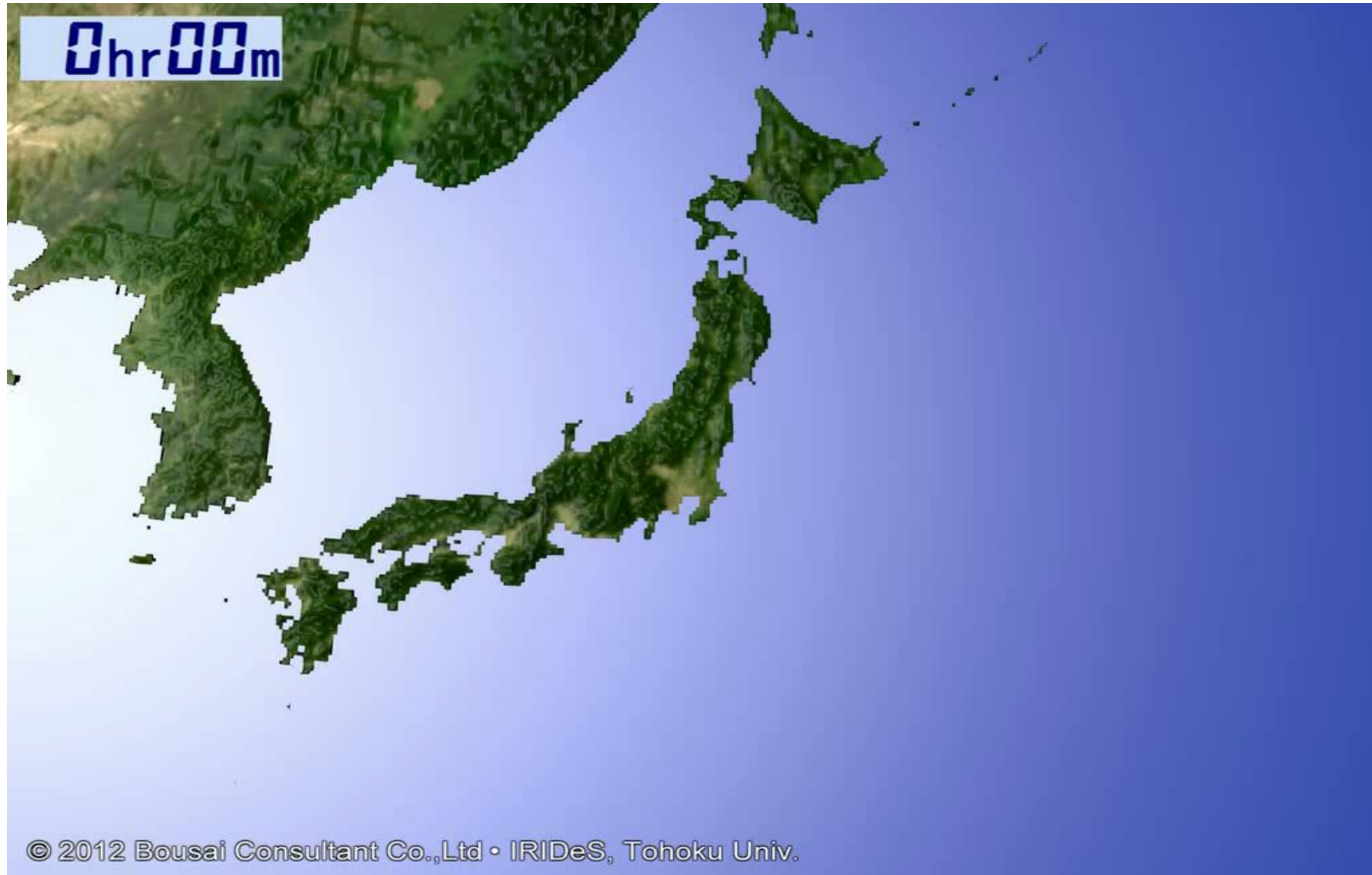
津波の発生原因
(Dr. Gerard Fryer (PTWC)の資料を基に作成)



地震断層による津波発生概念図
(気象庁HP(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq26.html>)より抜粋)

2011年 東北地方太平洋沖地震津波 岩手県釜石市

2011年東北津波の数値シミュレーション



湾奥での集中効果

- 湾や入り江の奥では、津波のエネルギーが集中するため、波高が高くなる

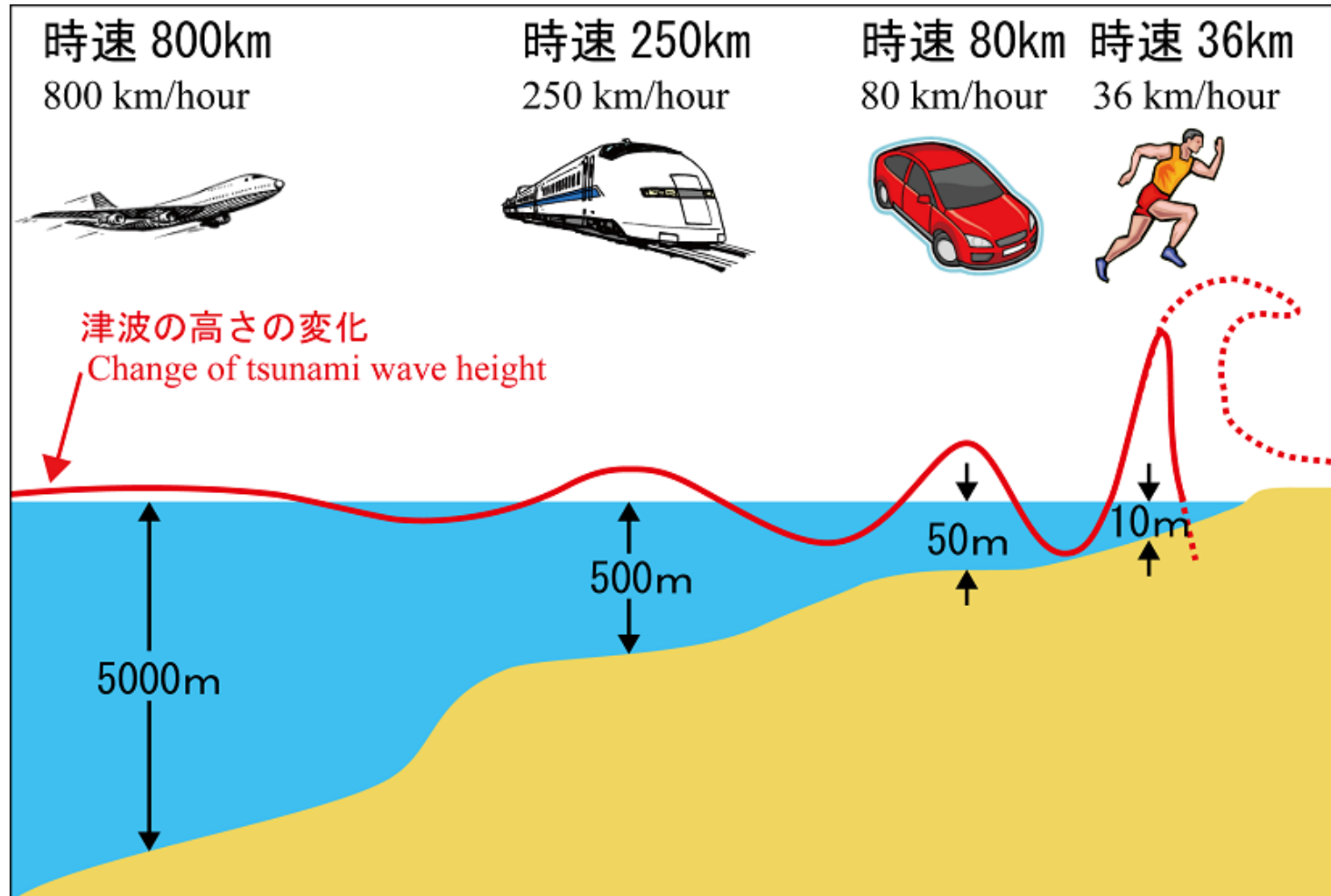
湾内トラップ

- 湾や入り江の形をした海岸地形では、津波が湾内で反射・屈折を繰り返す
- このような地形では波が長時間にわたって何度も繰り返し到達する

想定南海トラフ巨大地震による津波の数値シミュレーション

津波の伝播と増幅

- 津波は水深が深いほど、速い。
- 津波は沖では目立たないが、海岸で増幅される。



津波が伝わる速さ

- 水深が深いところでは、津波の速さは平均的に以下の式で計算できる。

$$c = \sqrt{gh}$$

g : 重力加速度(m/s^2) $\doteq 10\text{m/s}^2$

h : 水深(m)

- 太平洋の平均水深は約4,000mである。このとき、太平洋での津波の速さ(時速)は？

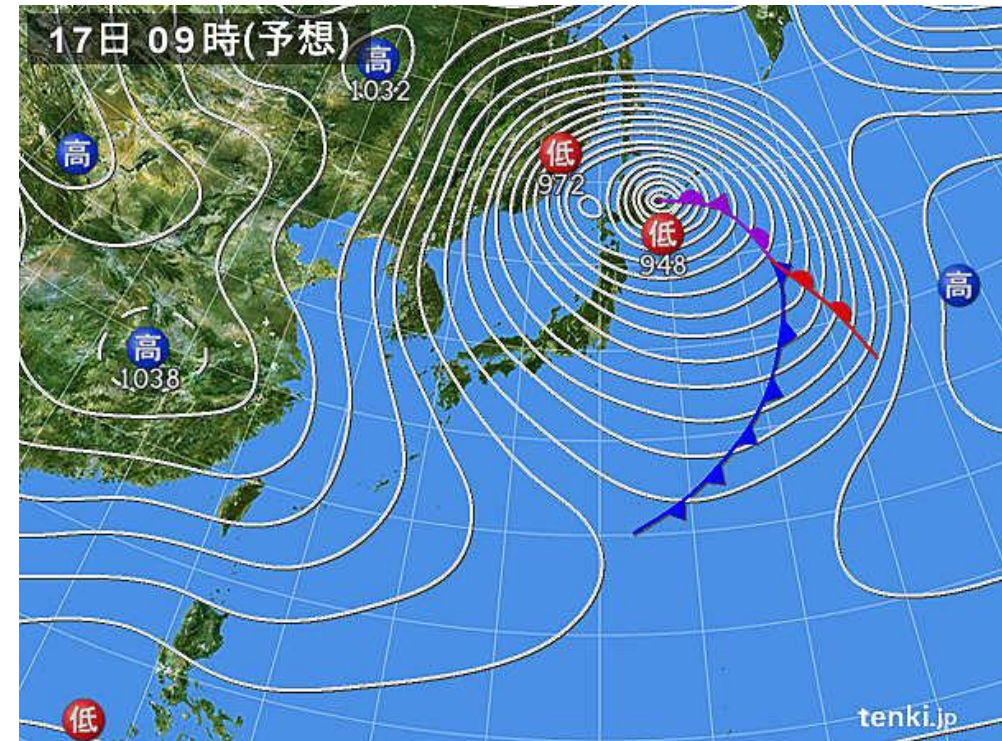
- 日本からチリの直線距離を約18,000kmとして日本で発生した津波がチリに到着する時間は？

高潮とは

- 台風、低気圧(熱帯低気圧、温帯低気圧)などの気象現象が原因で海面の高さが異常に上昇する現象

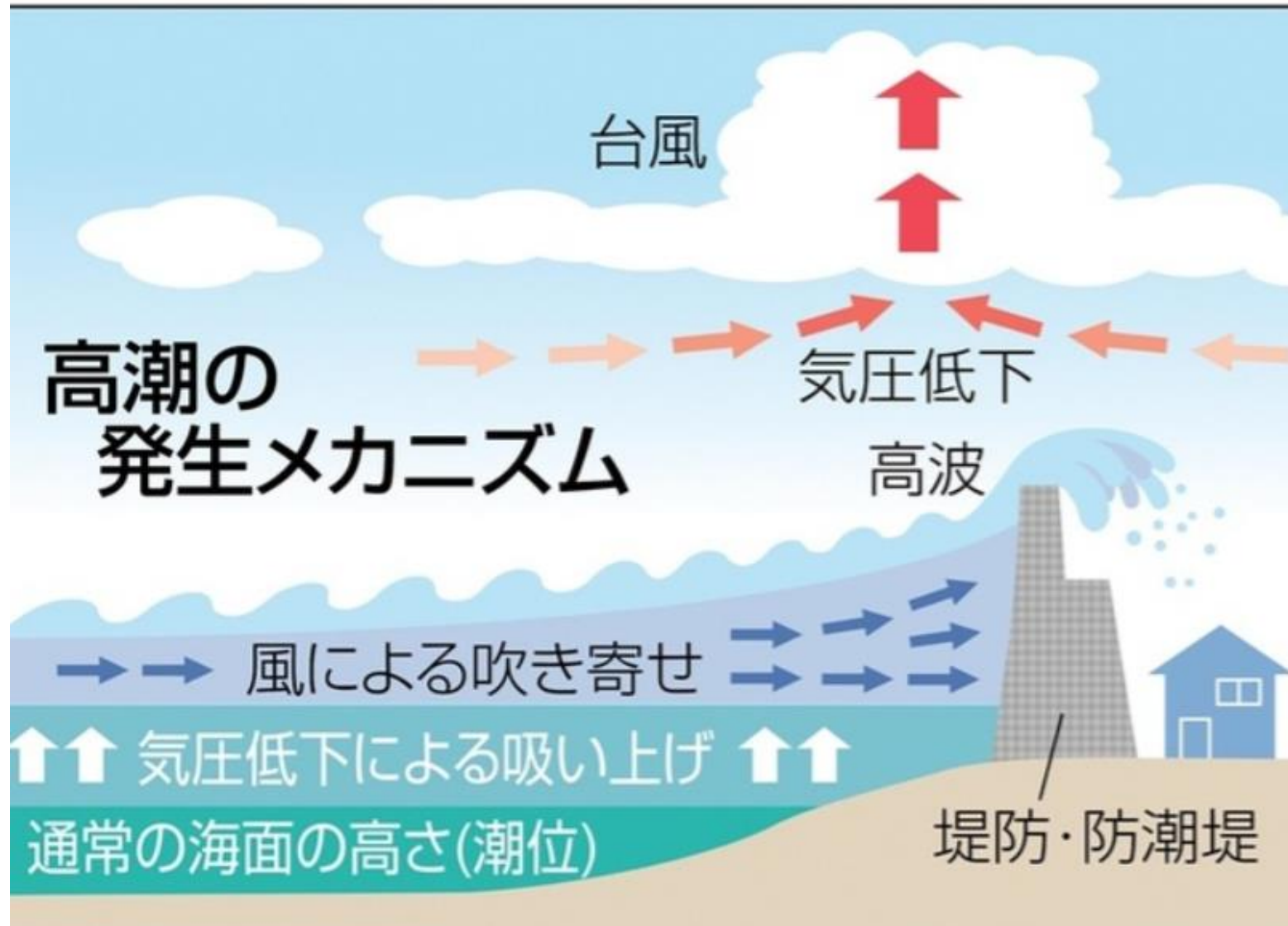


※国際宇宙ステーション(ISS)から撮影された「スーパー台風」に発達した台風4号(アジア名:メイサーク)の写真(2015年3月31日撮影、4月2日提供)。(c)AFP/ESA/NASA/Samantha Cristoforetti



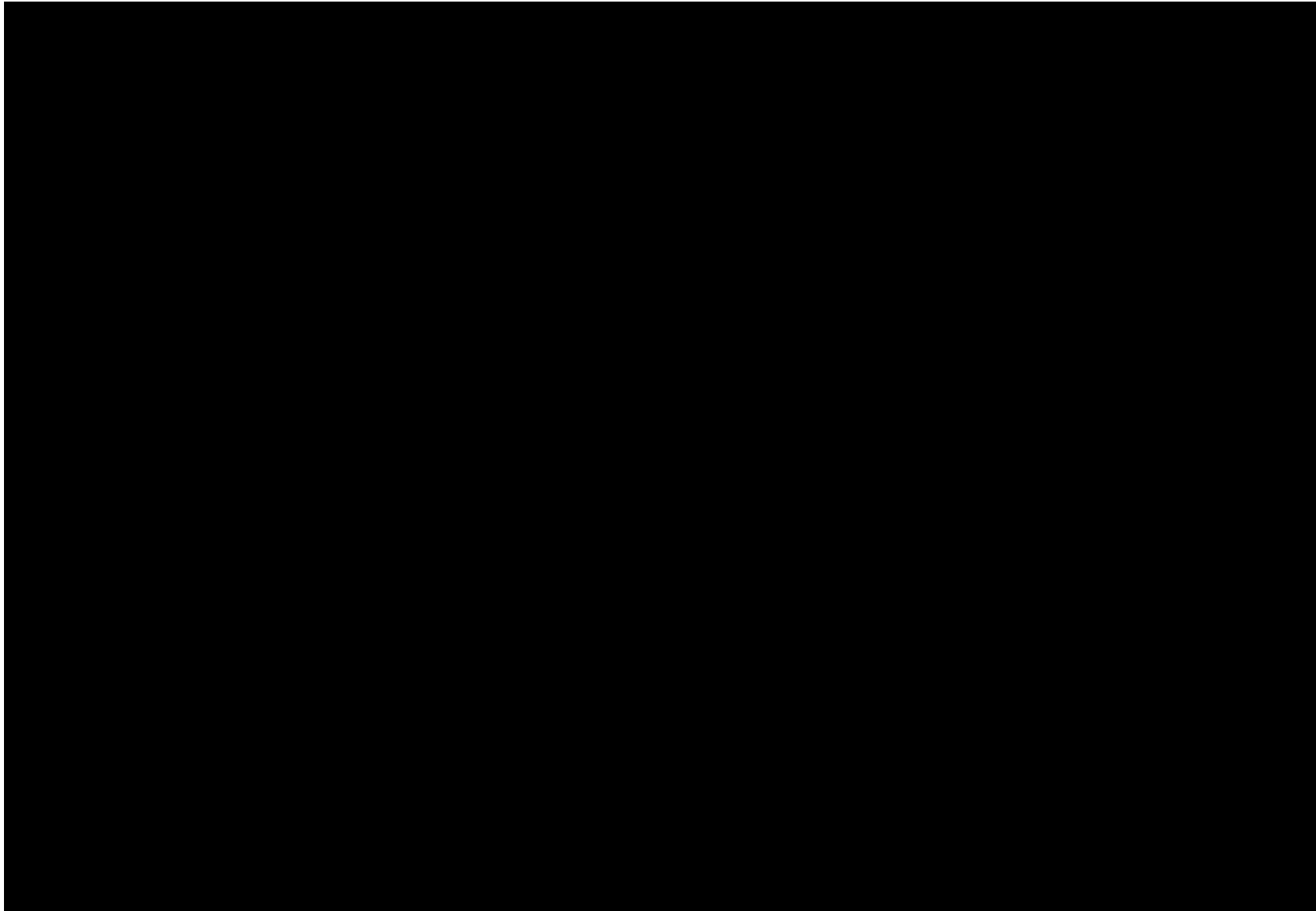
※日本気象協会ホームページより

高潮の発生メカニズム



西日本新聞「博多湾でも起こりうる高潮被害 台風進路と満潮時刻、もし重なれば…」<https://www.nishinippon.co.jp/item/n/636765/>より抜粋

平成25年 台風30号(タイフーン・ハイヤン)の高潮



過去の高潮・高波と津波による主な被害

高潮・高波被害

発生年月	台風名	主な被害地
1934年9月	室戸台風	阪神間
1945年9月	枕崎台風	九州南部
1950年9月	ジェーン台風	大阪湾
1951年10月	ルース台風	九州南部
1959年9月	伊勢湾台風	伊勢湾
1961年9月	第2室戸台風	大阪湾
1970年8月	台風10号	土佐湾
1999年9月	台風18号	有明海
2014年12月	爆弾低気圧	北海道根室
2017年10月	台風21号	静岡、関東地方
2018年9月	台風21号	大阪湾
2019年9月・10月	台風15号・19号	東日本広域

津波被害

発生年	地震津波名称	主な被害地
1923	関東大震災 (M7.9-8.2)	関東沿岸 (熱海で沿岸波高12m)
1933	昭和三陸地震 (Mw8.1)	東北地方太平洋側 (綾里で28.7m)
1944	東南海地震 (Mw8.2)	熊野灘 (沿岸波高6~8m)
1946	南海地震 (Mw8.0)	高知・三重・徳島沿岸 (沿岸波高4~6m)
1960	チリ地震 (Mw9.5)	東北地方三陸沿岸 (沿岸波高5~6m)
1968	十勝沖地震 (Mw7.9)	北海道 (沿岸波高3m前後)
1983	日本海中部地震 (Mw7.7)	東北地方日本海側 (沿岸波高10m超)
1993	北海道南西沖地震 (Mw7.8)	八街道青苗 (沿岸波高10m)
2011	東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)	東北地方太平洋側 (綾里で40.1m)

2011年東北地方太平洋沖地震津波

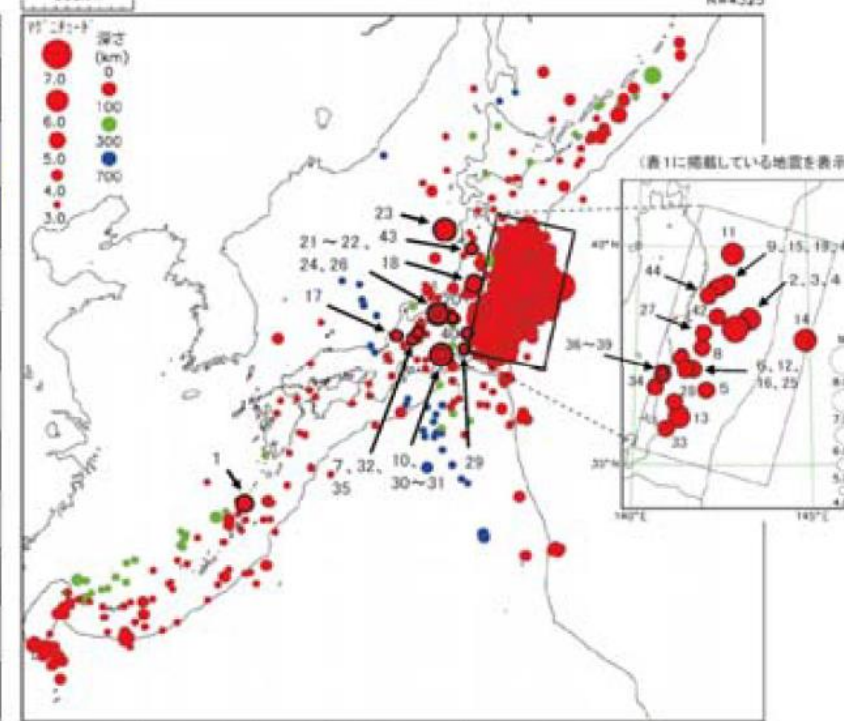
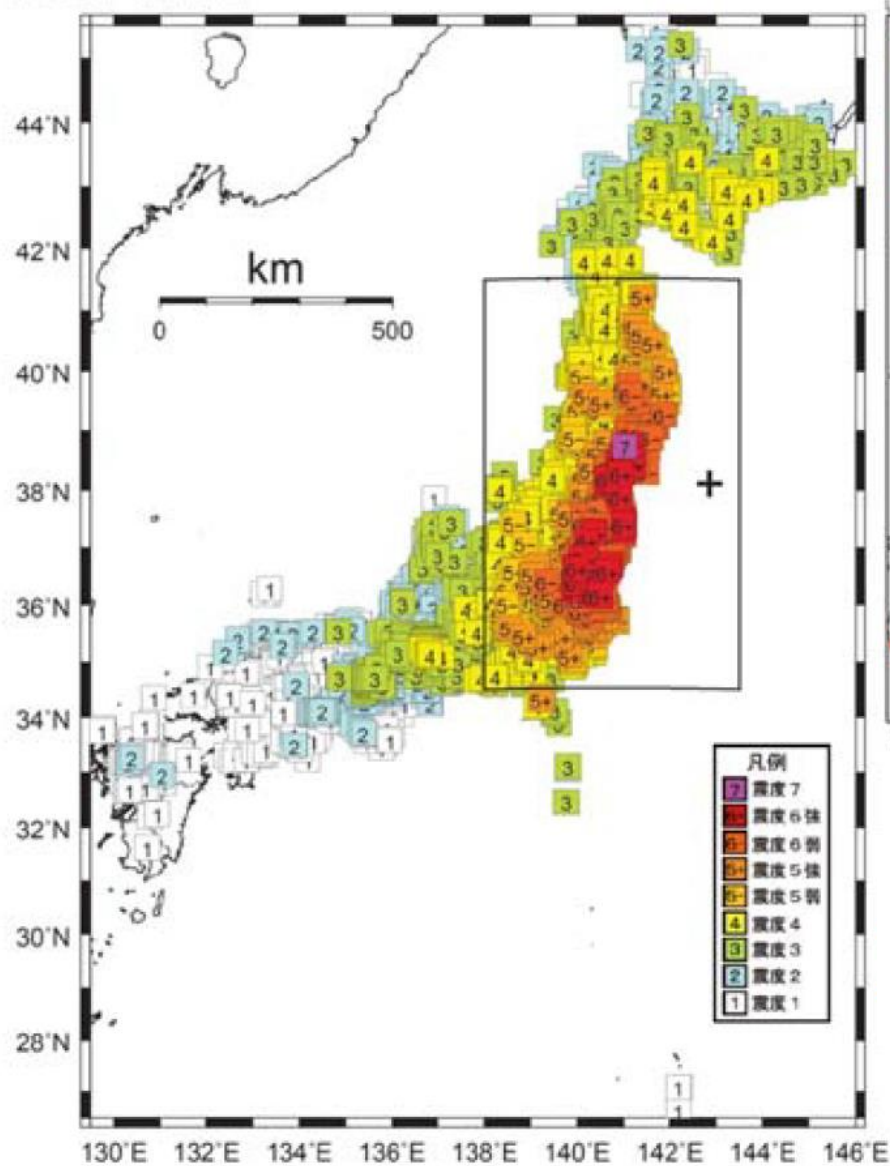


図2 平成23年3月に日本及びその周辺で発生したM3.0以上の地震の震央分布図

**有史以来初めての超巨大地震
(マグニチュード9.0)**

平成23年3月 地震・火山月報(防災編)

2011年東北津波による甚大な被害

■ 地震・津波・液状化による直接被害

- 土木構造物・建築物の被害
- 人的被害

■ 二次被害

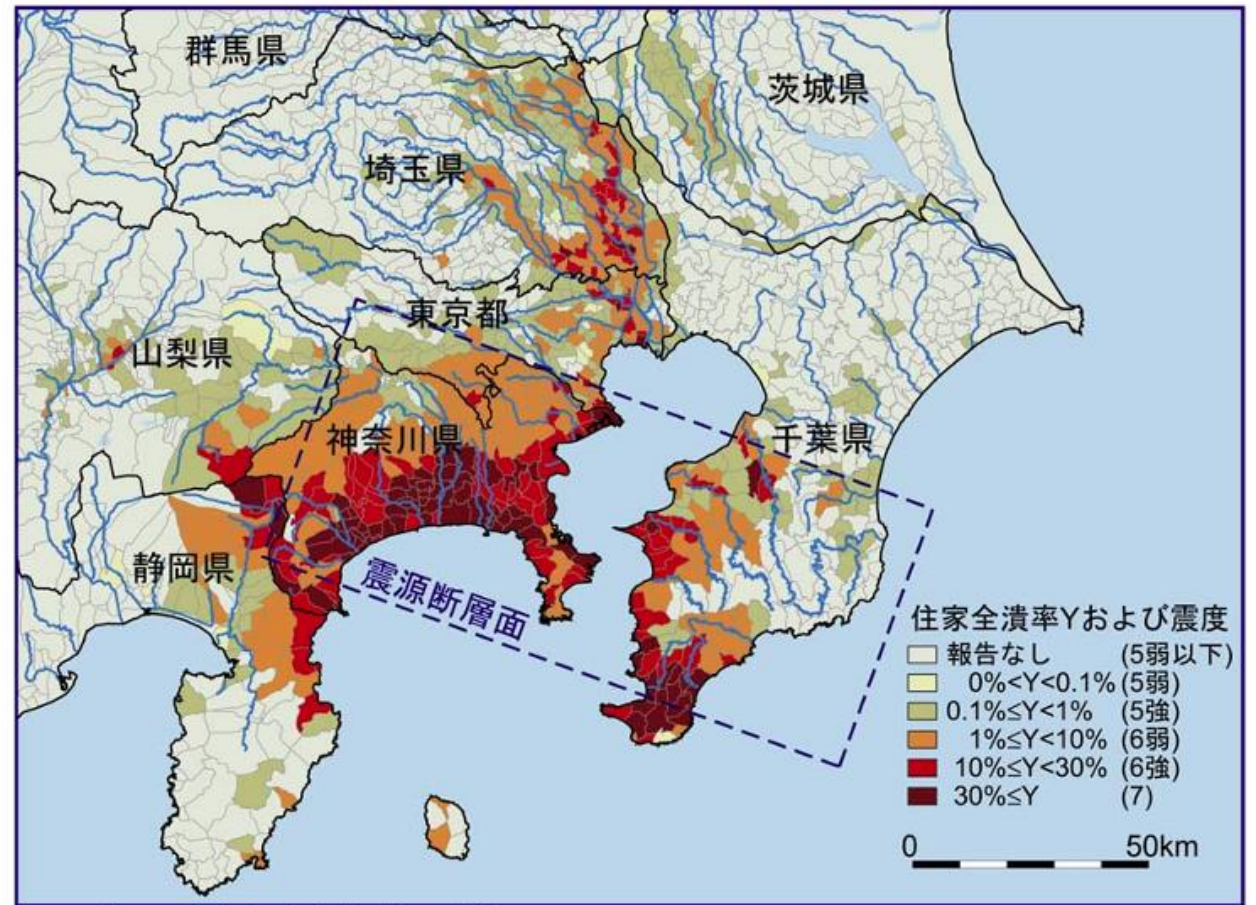
- 津波火災による被害
- ライフラインの被害
- 原子力災害

放射性物質飛散、人体被害、土壌、海洋汚染による農家、
漁業被害、強制的住民避難(ストレス、震災関連死)、
風評被害、廃炉処理費用



1923年大正関東地震

- 1923(大正12)年9月1日11時58分32秒に発生
- マグニチュード7.9
- 近代化した首都圏を襲った唯一の巨大地震
- 死者105,385名、全壊全焼流出家屋293,387に上り、電気、水道、道路、鉄道等のライフラインにも甚大な被害が発生
- 余震:本震3分後にM7.2、4分30秒後にM7.3の地震



口絵 1 住家全潰率と震度の分布 [諸井・武村, 2002 より引用]
(破線は推定された震源断層の地表への投影を表す。) <本文 6 ページ参照>

【出典】内閣府、災害教訓の継承に関する専門調査会報告書、1923 関東大震災、平成18年7月

大正関東地震による逗子の津波



【出典】蟹江由紀・蟹江康光・布施憲太郎:[報告]逗子市小坪における 1923 年大正関東地震と大正津波、2015.

相模湾に襲来した津波

発生時期		地震名	規模 マグニチュード	概要
西暦	元号			
1293	正応6	永仁鎌倉地震 (鎌倉大地震)	7 ~ 8 クラス	<ul style="list-style-type: none"> 『鎌倉大日記』に記載 三浦半島小網代湾の堆積物の分析で13世紀頃の大津波の痕跡
1498	明応7	明応地震	8.2 ~ 8.4	<ul style="list-style-type: none"> 鎌倉大仏殿の堂舎を破壊 溺死200名
1605	慶長9	慶長地震	7.9	<ul style="list-style-type: none"> 三崎で津波4~5m 死者153名
1633	寛永10	相模湾地震	7.0	<ul style="list-style-type: none"> 地震被害大 熱海、伊東に津波
1703	元禄16	元禄関東地震	7.9 ~ 8.2	<ul style="list-style-type: none"> 鎌倉二ノ鳥居まで津波(死者600名) 藤沢~平塚で大波
1782	天明2	相模湾地震	7.0	<ul style="list-style-type: none"> 地震被害大 熱海、安房に津波
1854	安政1	安政東海地震	8.4	<ul style="list-style-type: none"> 江の島片瀬数波きたる 下田で津波7m
1923	大正12	大正関東地震	7.9	<ul style="list-style-type: none"> 相模湾沿岸に津波 鎌倉で津波20数名死者

地震の発生間隔

相模湾M8
クラス大地震

※日本被害地震総覧(2003), 理科年表(2005), 日本被害津波総覧(1998), 「南関東周辺における地震津波」(羽鳥徳太郎, 関東大地震50周年論文集, 1973), 「明応7年・慶長9年の房総および東海南海道大津波の波源」(羽鳥徳太郎, 地震研究所彙報, 1975), 「関東地方の津波」(羽鳥徳太郎, 自然災害資料解析, 1979)等より国土技術政策総合研究所作成

2023年現在

過去の高潮・高波と津波による主な被害

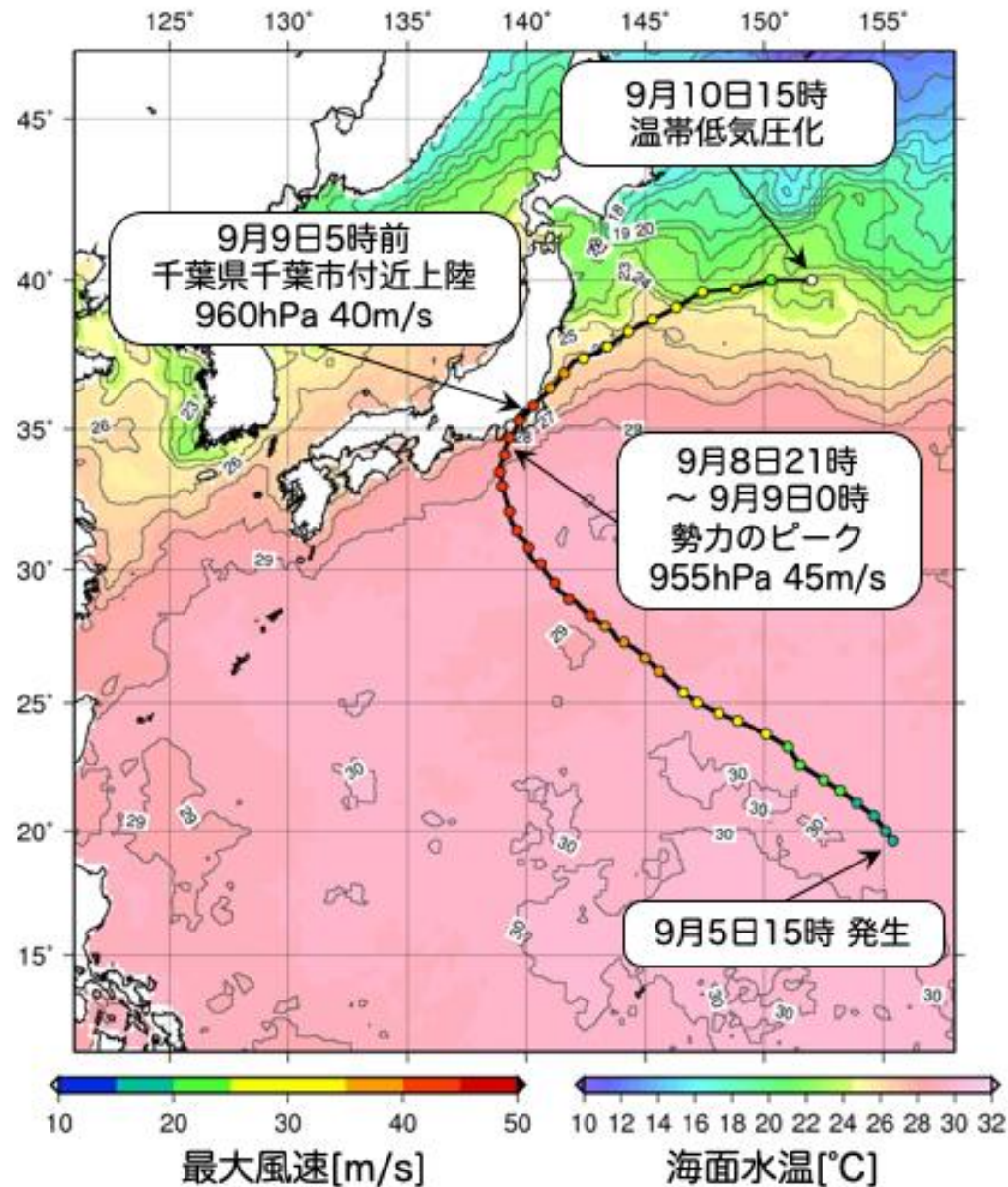
高潮・高波被害

発生年月	台風名	主な被害地
1934年9月	室戸台風	阪神間
1945年9月	枕崎台風	九州南部
1950年9月	ジェーン台風	大阪湾
1951年10月	ルース台風	九州南部
1959年9月	伊勢湾台風	伊勢湾
1961年9月	第2室戸台風	大阪湾
1970年8月	台風10号	土佐湾
1999年9月	台風18号	有明海
2014年12月	爆弾低気圧	北海道根室
2017年10月	台風21号	静岡、関東地方
2018年9月	台風21号	大阪湾
2019年9月・10月	台風15号・19号	東日本広域

津波被害

発生年	地震津波名称	主な被害地
1923	関東大震災 (M7.9-8.2)	関東沿岸 (熱海で沿岸波高12m)
1933	昭和三陸地震 (Mw8.1)	東北地方太平洋側 (綾里で28.7m)
1944	東南海地震 (Mw8.2)	熊野灘 (沿岸波高6~8m)
1946	南海地震 (Mw8.0)	高知・三重・徳島沿岸 (沿岸波高4~6m)
1960	チリ地震 (Mw9.5)	東北地方三陸沿岸 (沿岸波高5~6m)
1968	十勝沖地震 (Mw7.9)	北海道 (沿岸波高3m前後)
1983	日本海中部地震 (Mw7.7)	東北地方日本海側 (沿岸波高10m超)
1993	北海道南西沖地震 (Mw7.8)	八街道青苗 (沿岸波高10m)
2011	東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)	東北地方太平洋側 (綾里で40.1m)

2019年9月台風15号の経路

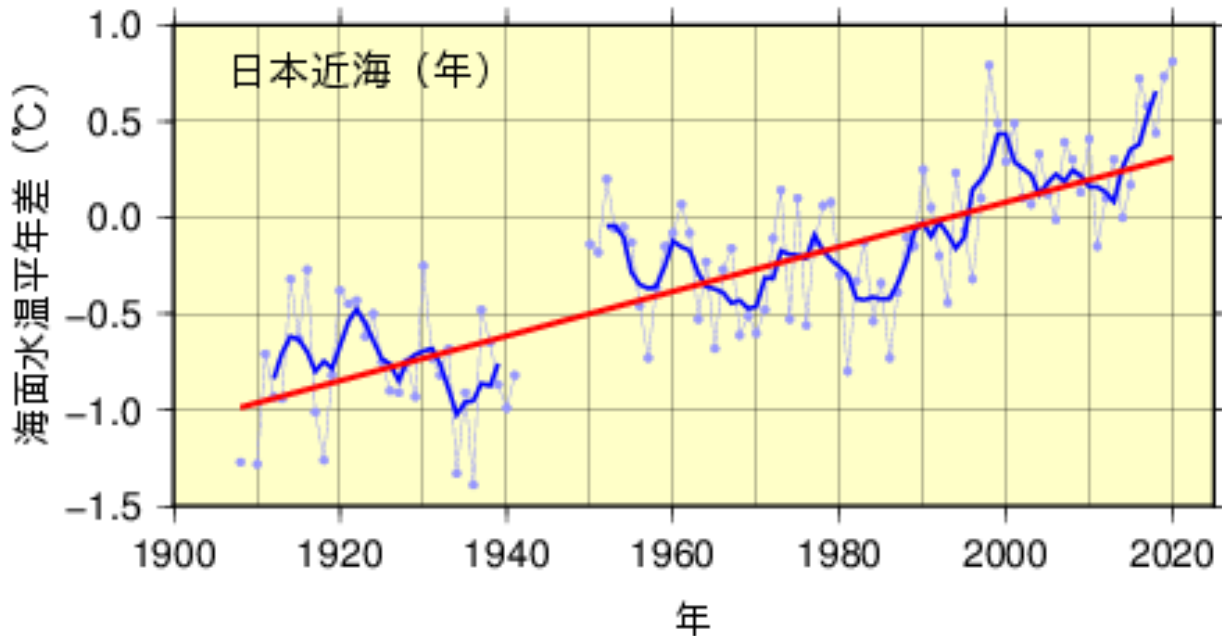


- 台風は海面水温28度以上の海水からエネルギーを供給されて発達

ウェザーニューズ社のHPより

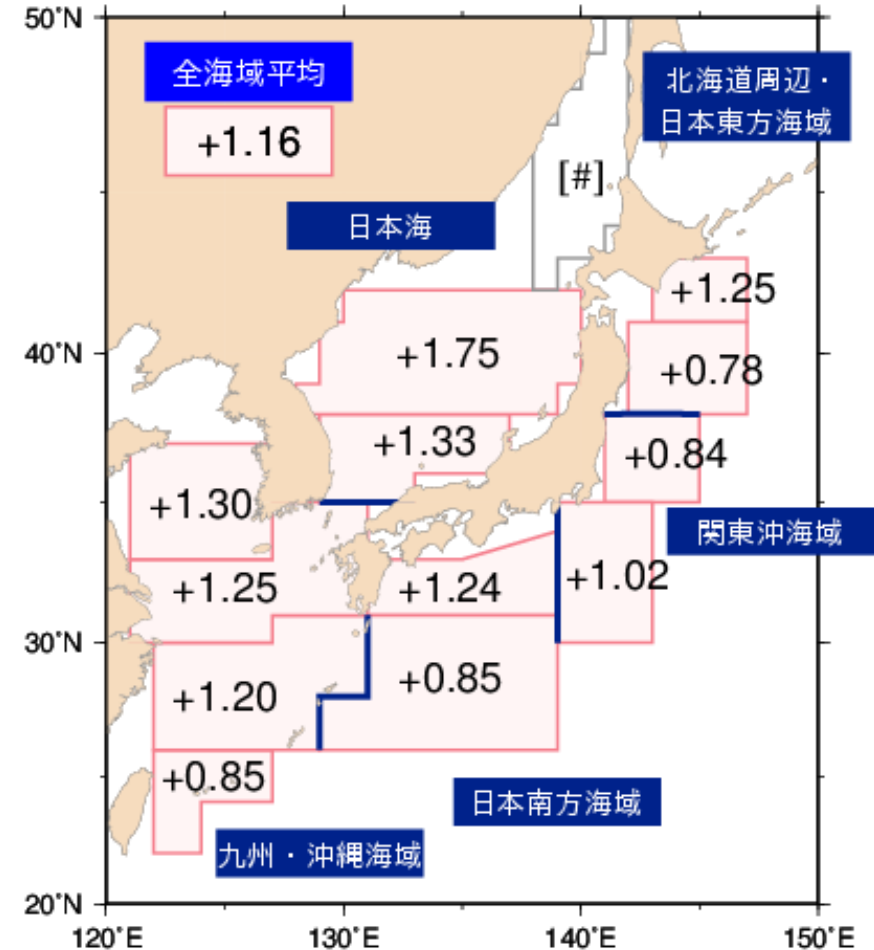
日本近海の海面水温の上昇

- 日本近海の海面水温は近年、上昇傾向
- 関東近辺の海域は、約+1.0°C



日本近海の全海域平均海面水温(年平均)の平年差の推移

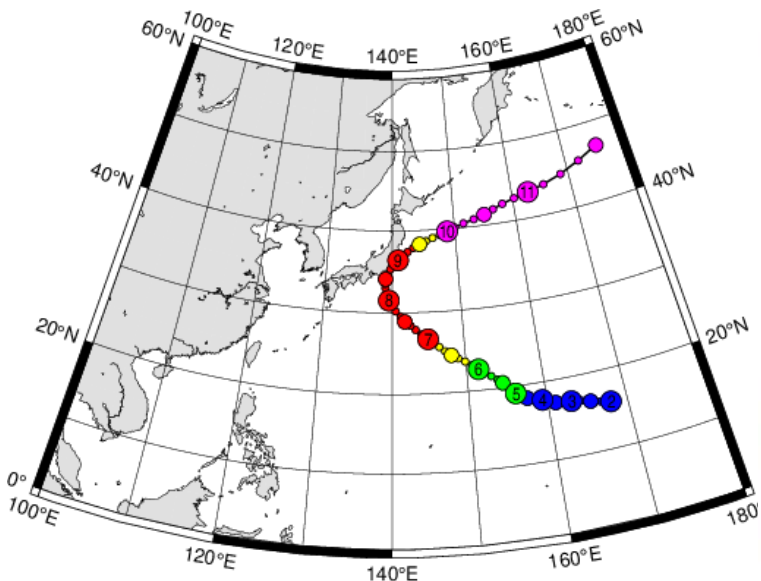
気象庁・海面水温の長期変化傾向(日本近海)(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html)



日本近海の海域平均海面水温(年平均)の上昇率(°C/100年)

2019年台風15号による高潮・高波被害

- 横浜市金沢区福浦幸浦地区沿岸部の防潮堤が倒壊
- 横浜市金沢区の金沢産業団地(LINKAI横浜金沢)の400社を超える企業に甚大な建築物・機械設備の被害



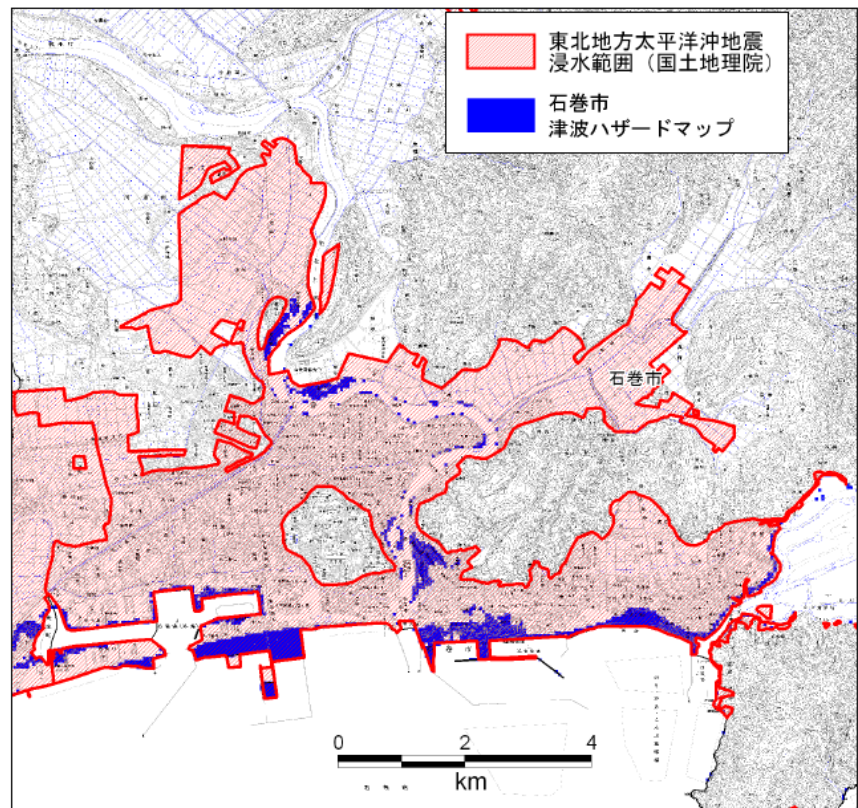
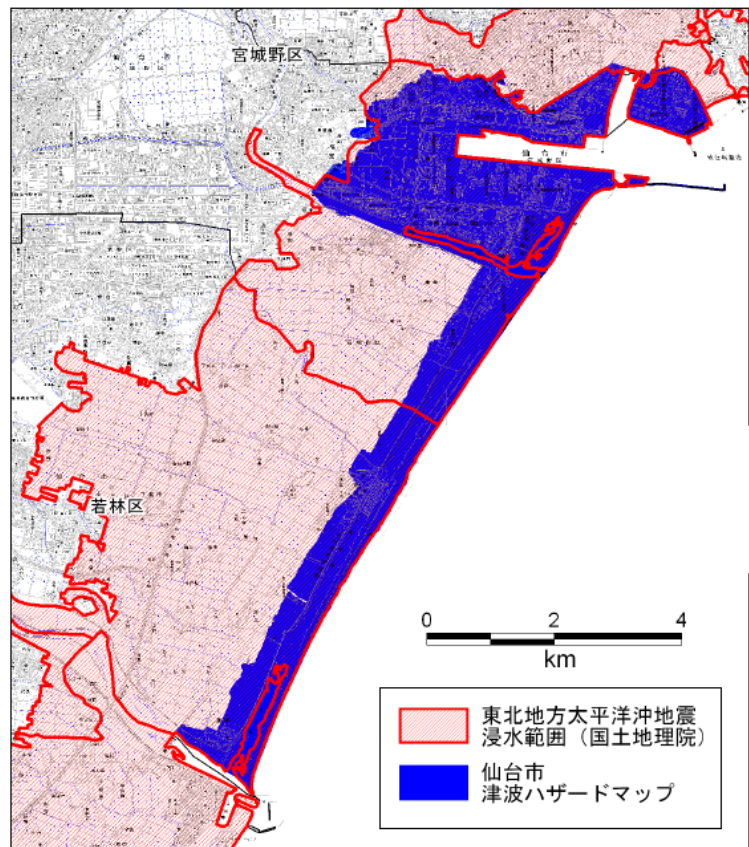
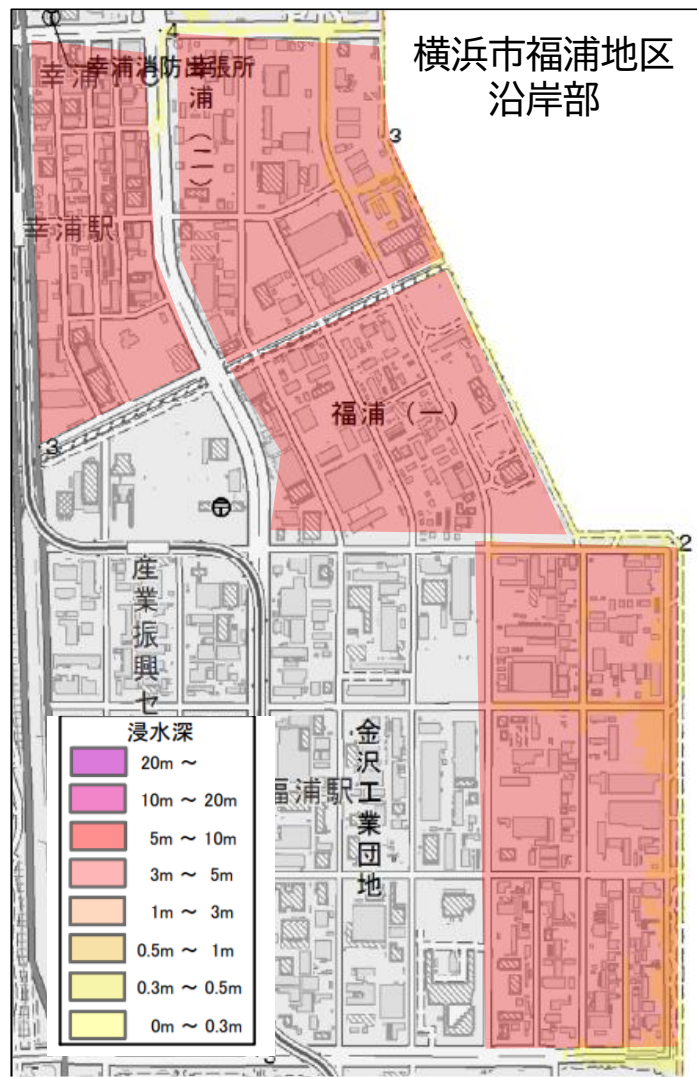
台風15号の経路(出典:デジタル台風)



現地調査の様子

2019年9月 台風15号 当時の浸水想定区域図(黄色) 実際の浸水領域(赤色)

2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震 当時の浸水想定区域図(青色) 実際の浸水領域(赤色)



(出典)・東北地方太平洋沖地震浸水範囲:国土地理院資料より作図
・ハザードマップ:仙台市「仙台市津波ハザードマップ」、石巻市「石巻市津波ハザードマップ」

いずれも当時公表されていたハザードマップを超える浸水が発生

本日の内容

- 土木工学、海岸工学について
- 沿岸災害(津波や高潮・高波)とは？
- 災害への対策 —ハード対策とソフト対策—
- 質疑応答

災害への対策 —ハード対策とソフト対策—

■ ハード対策(Structural Measures)

何らかの構造物による被害軽減手法。

たとえば、防潮堤・防波堤・突堤・水門・耐震補強など

■ ソフト対策(Non-Structural Measures)

構造物によらない被害軽減手法。

たとえば、ハザードマップ、防災教育・訓練、土地利用規制、耐震基準、損害保険など

神奈川県沿岸防護対策(防潮堤)



東京湾

相模湾

神奈川県沿岸防護対策(防潮堤)



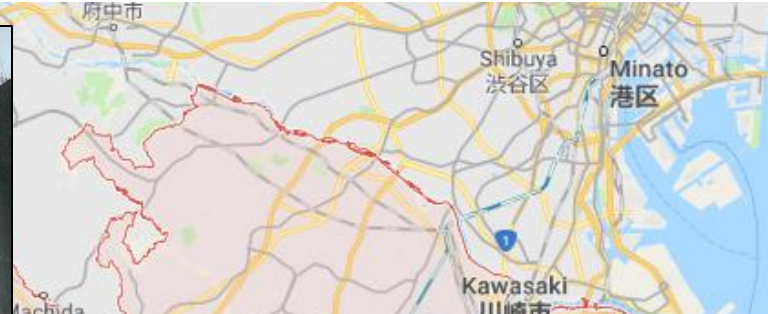
神奈川県沿岸防護対策(防潮堤)



神奈川県沿岸防護対策(防潮堤)



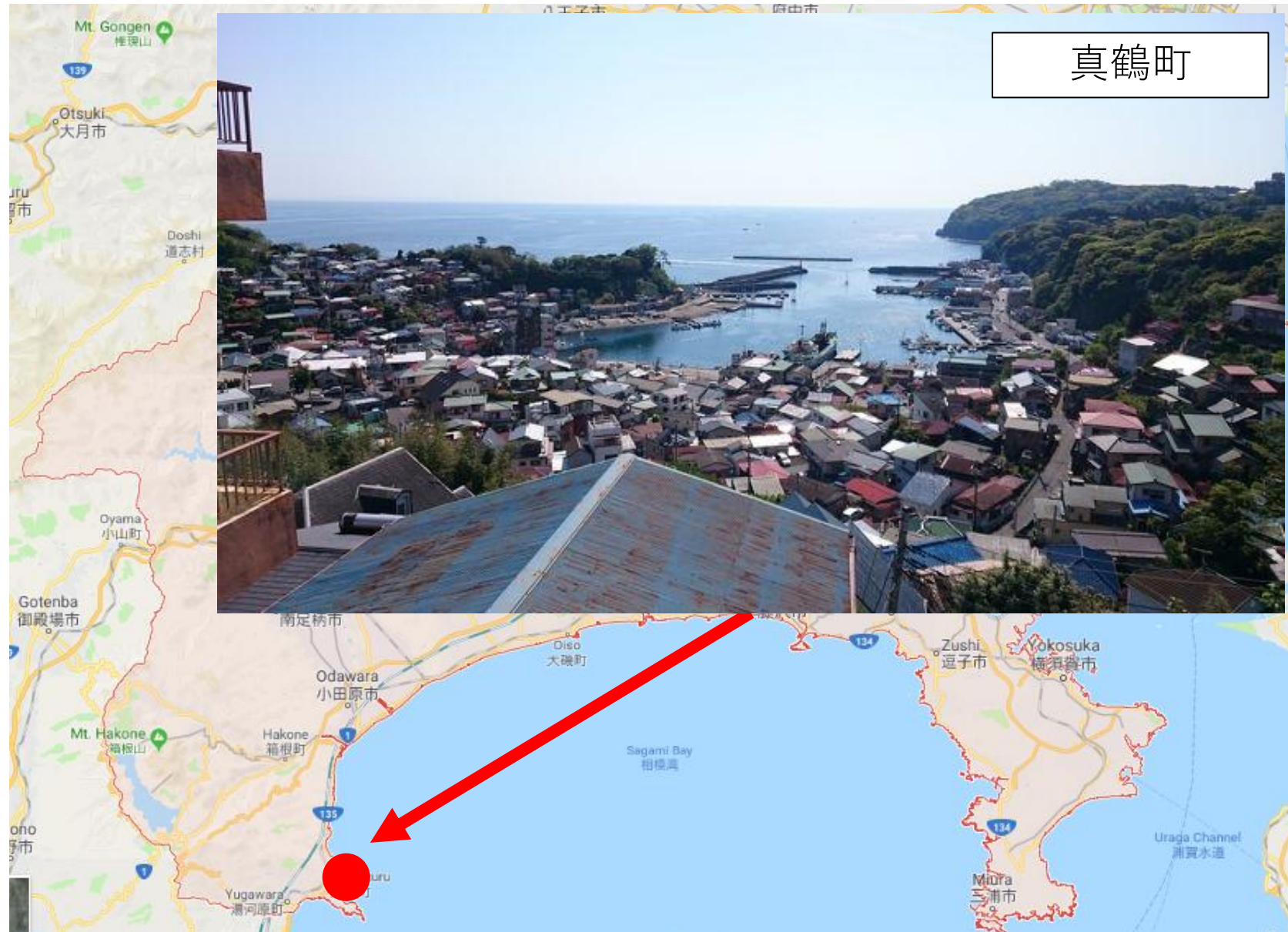
小田原沿岸



防潮堤の避難路



神奈川県沿岸防護対策(防潮堤)



岩手県田老町の防潮堤建設の歴史

1896年： 明治三陸津波 15m

1933年： 昭和三陸津波

1934年： 高さ10mの防潮堤①建設に着手

【防潮堤①】昭和三陸津波を受けて1934
～1957年度に建設し、長さは1350
メートル、工事費は1872万円

1960年： チリ地震津波

1962年： 高さ10mの防潮堤②建設に着手

【防潮堤②】チリ地震津波を受けて1962～
1965年度に 建設し、長さ582メートル、
工事費6078万円。

1973年～1978年：防潮堤③建設に着手

【防潮堤③】73～78年度に建設し、
長さ501メートル、工事費3億 8170万円。

2011年：東北地方太平洋沖地震津波

【防潮堤②】が津波の波力で破壊される。 岩手日報Webnews(<http://www.iwate-np.co.jp/311shinsai/saiko/saiko110505.html>)



岩手県田老町の防潮堤建設の歴史



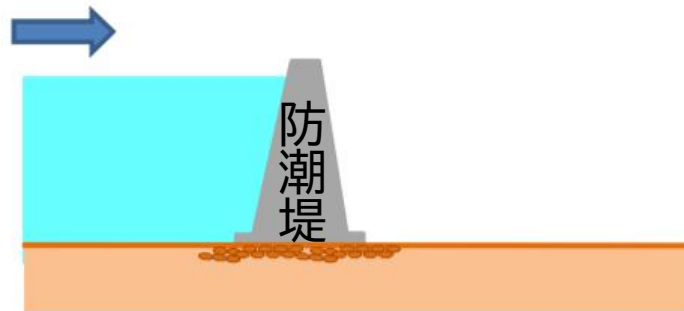
出典 kathy-2nd-life.seesaa.net

「『自然は人間の手に負えない』と昔の人は思っていたが、その意識がハード整備で、徐々に薄れていった(首藤伸夫東北大名誉教授)

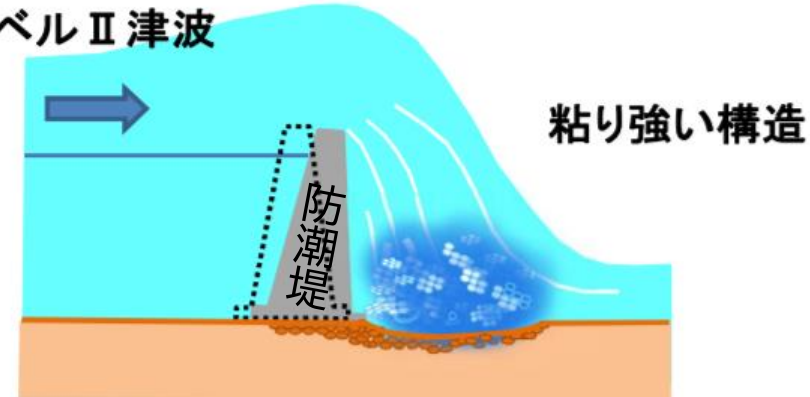
2011年東北津波後の防潮堤

	対象津波	要求性能
レベル1 津波	近代で最大 (100年で1回程度 の発生確率)	防災 ・ 人命を守る. ・ 財産を守る/経済活動を守る
レベル2 津波	最大級 (1000年に1回程度 の発生確率)	減災 ・ 人命を守る. ・ 経済的損失を軽減する. ・ 大きな二次災害を引き起こさない. ・ 早期復旧を可能にする.

レベル I 津波



レベル II 津波



内閣府「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」第4回(平成23年6月26日)資料より抜粋

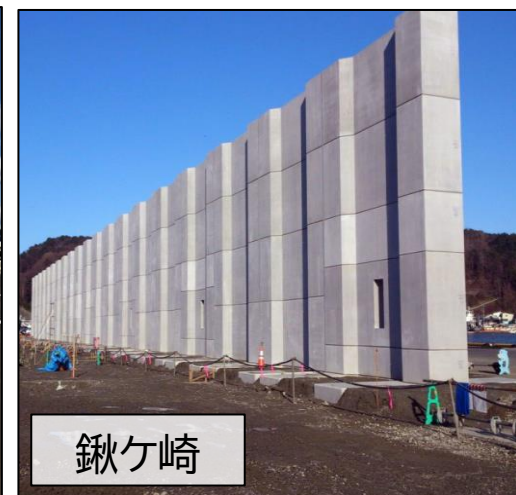
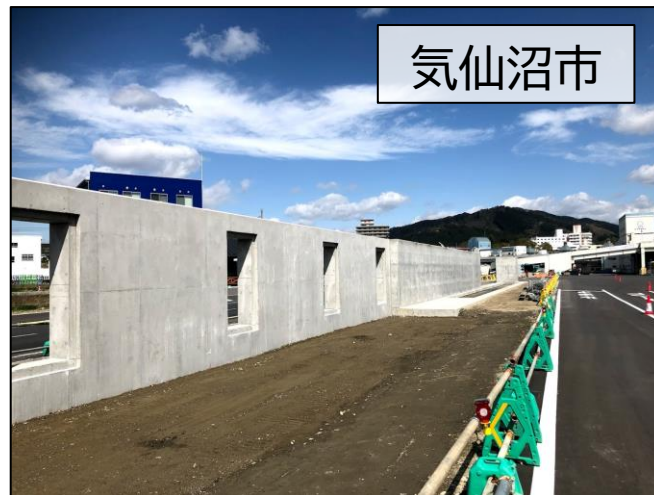
最適な防潮堤の高さとは？

レベル1津波の想定だけで、防潮堤高さを決定できる？



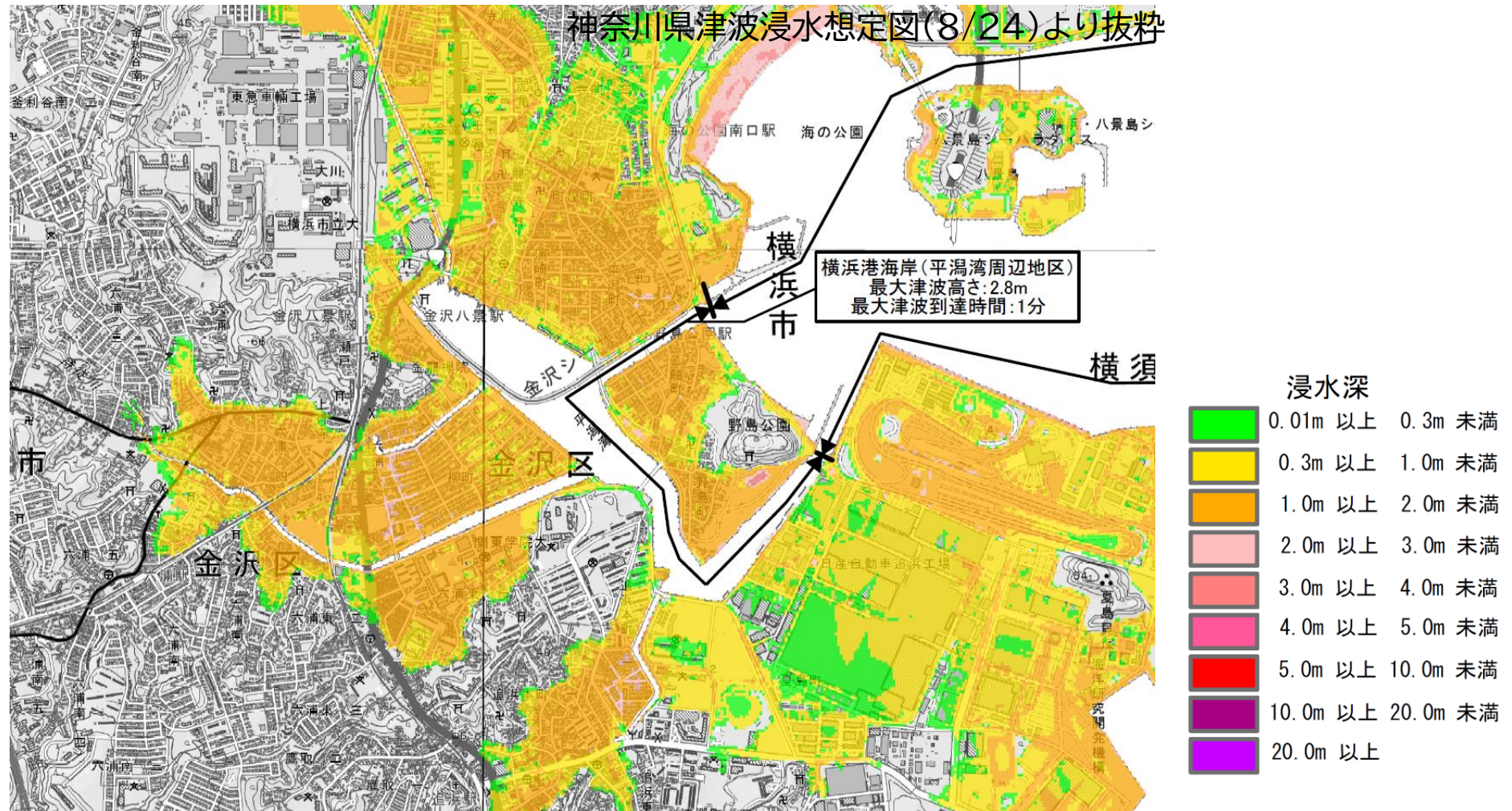
- 防潮堤背後地の利用、避難の実効性、まちづくり計画などにより、必要な防潮堤高さは変化
- 防災施設（防潮堤）や防災まちづくりが、まちの活性化自体を左右。生業の成立や街の発展を考慮すべき

現地の住民・自治体・有識者・技術者等で合意形成を図る必要

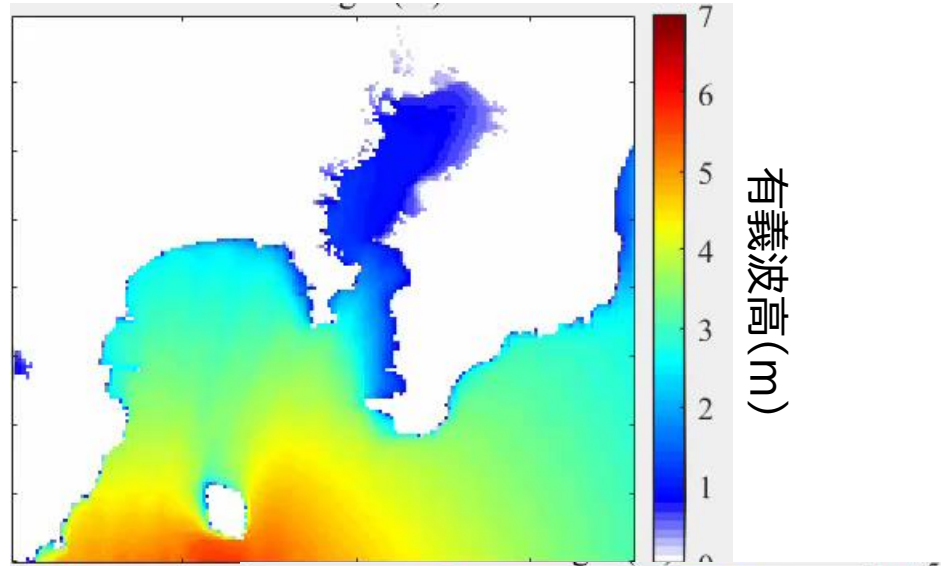


ハザードマップの整備

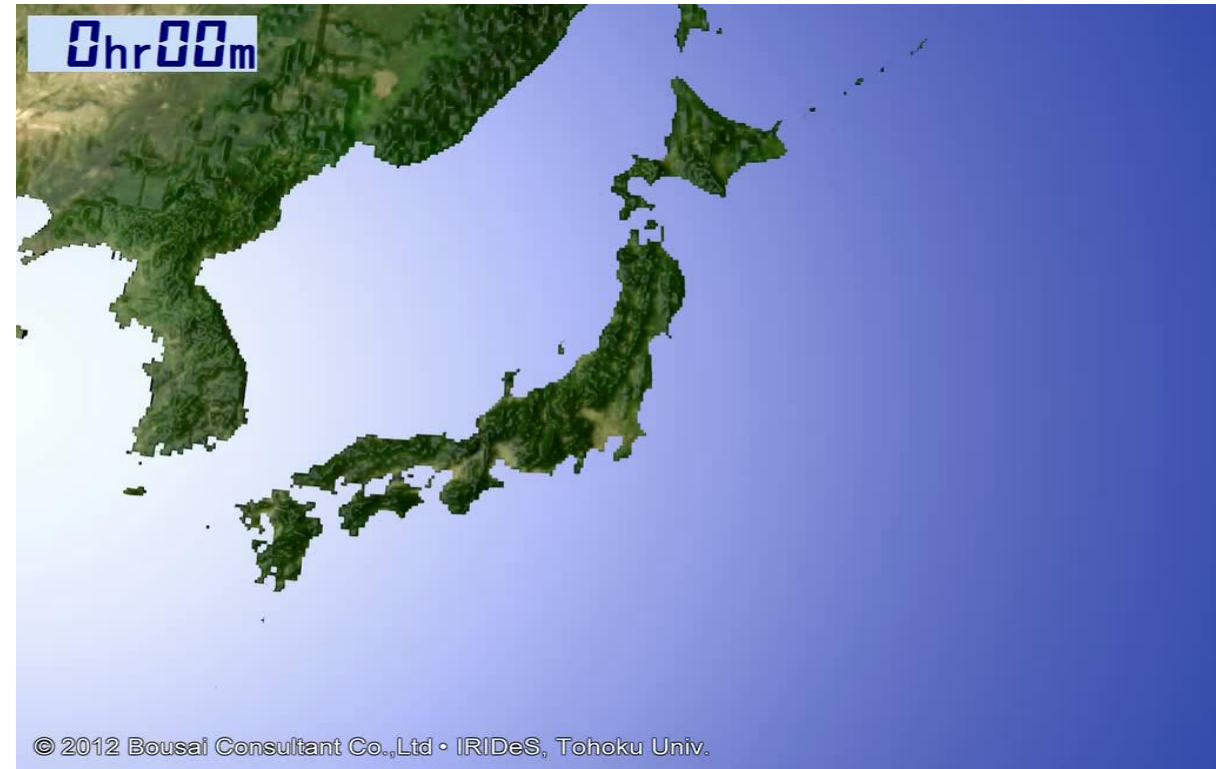
- 浸水シミュレーションを実施し、想定津波浸水区域、水深、津波到達 時間等を地図上に表わし、津波避難計画等を立てる前提とする



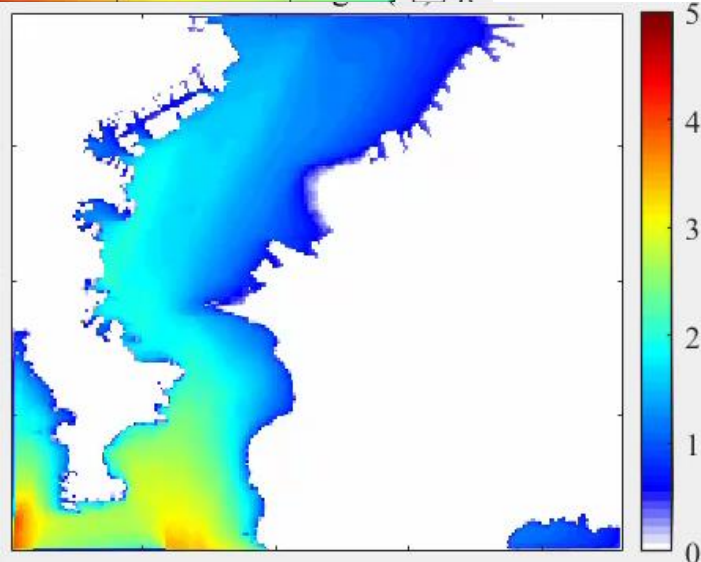
数値シミュレーションによるハザード評価



2011年3月11日 東日本大震災時の津波



※高潮数値モデルSuWATによる解析



2019年9月 台風15号(FAXAI)による高潮

※東北大学災害科学国際研究所TUNAMI(N2)モデルによる解析

ハザードマップ作成の元となる技術

津波数値シミュレーションで使用される方程式

- 津波や高潮の伝播、遡上過程は以下の非線形長波理論式で概ね表現できる

(連続の式)
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

(x方向の運動の式)
$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

非線形項 非線形項 摩擦項

(y方向の運動の式)
$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

非線形項 非線形項 摩擦項

x, y : 座標軸

t : 時間軸

M : x 方向の流量フラックス

N : y 方向の流量フラックス

D : 全浸水深

η : 水位

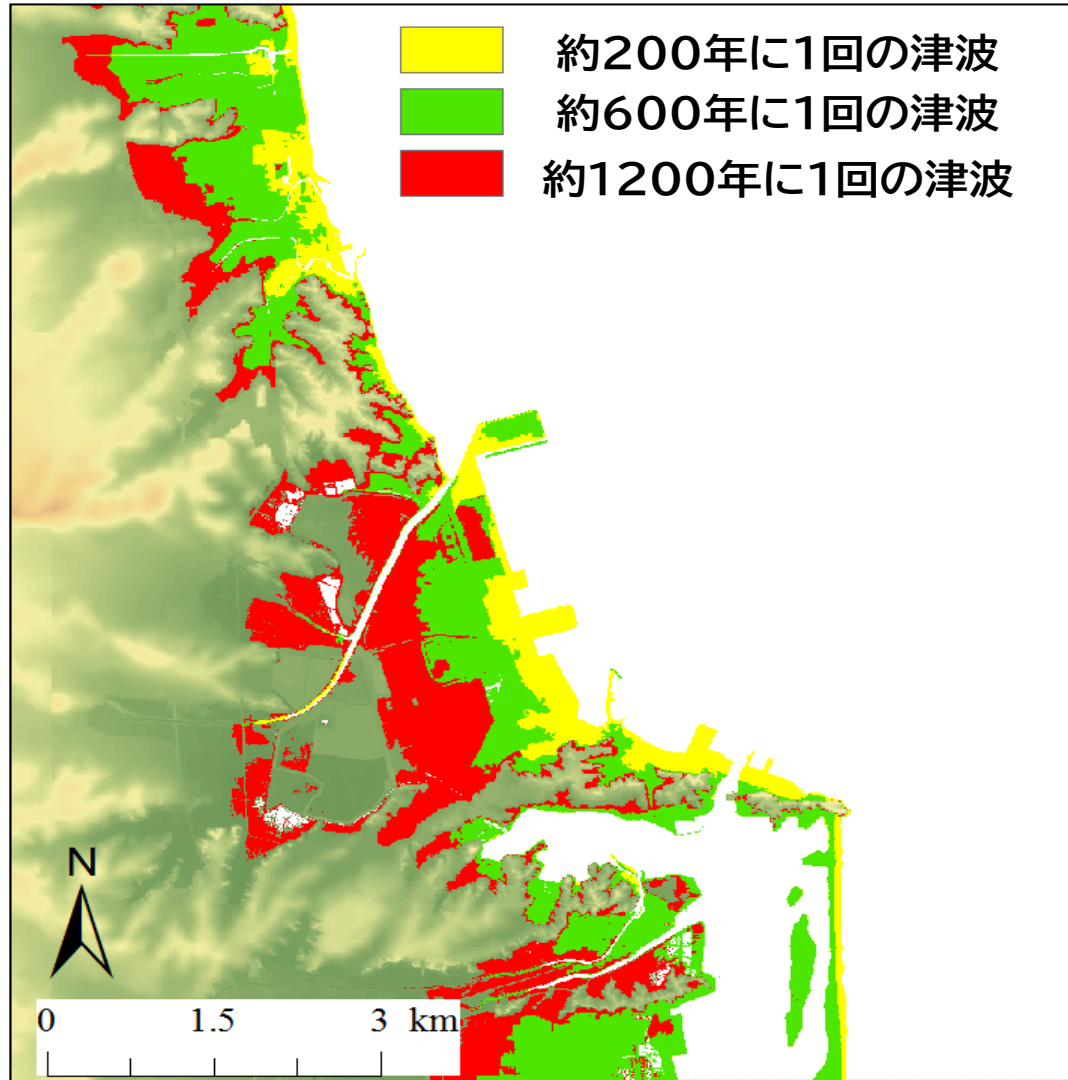
g : 重力加速度

ρ : 水の密度

p : 水の圧力

n : Manningの粗度係数

確率論的ハザードマップ



発生確率別の津波浸水領域

- 発生確率(1200年に1回、600年に1回など)別の津波浸水深と浸水領域
- 一つのケース(決定論的)ではなく複数のケース(確率論的)で浸水領域が確認できる
- ある地点で〇〇m以上の浸水深が発生する確率〇〇%

様々な現象の想定が可能となり、
考え得る災害対策の幅が広がる！

最後に (現在の主な研究テーマ)

- 最大クラスの津波や高潮とは？
- 気候変動による海面上昇や台風強度の変化にどう対応するか？
- 数値シミュレーションによる災害リスク評価の信頼性は？(評価の不確実性)
- 自治体や我々住民が取るべき対応は？

本日の内容

- 土木工学、海岸工学について
- 沿岸災害(津波や高潮・高波)とは？
- 災害への対策 ーハード対策とソフト対策ー
- 質疑応答(Q & A)