

東京湾における沿岸災害---津波、高潮への備え

—災害を分析し、地域の立場から減災戦略を練り上げる—
—日本の経験を整理し、世界に貢献していく—

柴山知也

早稲田大学理工学術院教授

津波、高潮、高波：

世界に共通する災害調査と地域ごとの減災方法の提言

- ① 調査＋数値予測＋水理実験で災害の具体的なイメージを持つ。
住民とそのイメージを共有する
- ② 被災の事情は様々であるが、社会的文脈を読み解くことにより、対応する減災の筋書きを作成し、行政担当者、地域住民とともに有事に備える。
- ③ 地域の実情を踏まえて事前の心構えと準備をする。

海岸工学パラダイム

①海岸域での波浪、漂砂などの自然現象を観察し、数式で表す。

(時間的、場所的変化の様子をとらえるために微分方程式になる。)

②微分方程式を解く。

(多くの場合、単純化の仮定をおく。)

解析解の時代 → 数値モデルの時代

③微分方程式の解と実験結果、現地観測結果を比較して、解の有効性を確かめる。

流速計の時代 災害調査 (津波ハンター) の時代

パラダイムは不変であるが、方法論は変化してきた。

海岸工学界の社会変動 (個人ではなく、世代による変化)

海岸工学研究のテーマの変遷

港湾建設

波動 漂砂 構造物 環境

沿岸防災（津波・高潮・高波）

温暖化と将来予測（シナリオ研究の時代）

若い世代の研究の進め方の変化

国際的なチームを作る。

Journal Paper と H-index

シミュレーション技術の高度化：

オープンソースプログラムの活用と高度化への参加
新規参入障壁が低くなった。

実験、調査法の高度化 ITの活用

国際的な災害研究基盤

津波・地震による 構造物被災の減災技術

鈴木・横浜国大
(津波被災機構)

高木・東工大
(高潮被災機構)

Nistor・カナダ

Thao・ベトナム

Wijayaratna・スリランカ

早稲田大学

柴山

(津波被災機構・総合的対策立案)

三上

(被災機構の解明)

依田・小野(鋼構造物)

秋山(コンクリート構造物)

赤木(地盤)

曾田(制振構造)

佐々木(まちづくり)

榊原(水環境)

関根(河川)

小峯(液状化)

香村(土壌汚染)

長谷見(避難困難者)

大河内(噴火)

中川(地域)

複合災害機構の解明と減災

松丸・東洋大
(復興過程)

Esteban・東大
(避難方略)

Achiari・インドネシア

Rattanapitikon・タイ

Soltanpour・イラン

Jayaratne・スリランカ

Dorji・ブータン

Nobert, Samson・タンザニア

災害事例を迅速に調査し、被災機構を研究する国際ネットワーク

世界各地で発生する自然災害

地震

津波

高潮

噴火

私立大学戦略的研究基盤形成事業

予算:5年間で1.2億円



WAYCEM (Waseda-YNU Advanced Coastal Environment and Management Group, Sept. 15, 2017, at Yuriage, Miyagi Prefecture, Japan.

主な研究分担者(博士卒業生) 外国人26 日本人9 高度で標準的な手法を身につけた研究者

Dr. Nguyen Ngoc An: Department Chair, HoChiMinh City University of Technology

[Dr. Winyu Rattanapitikon: Associate Professor, SIIT, Thammasat University](#)

Dr. Michael Kabling: Taylor Eng. Inc.

Dr. Nguyen The Duy: Senior Lecturer, HoChiMinh City University of Technology

Dr. Wudhipong Kittitanasuan: Wishakorn Consultants

[Prof. Dr. Ioan Nistor: Professor, University of Ottawa](#)

Dr. Nimal Wijyaratna: Senior Lecturer, Moratuwa University

Prof. Li Shaowu: Professor, Tianjin University

[Prof. Mohsen Soltanpour: Professor, K.N. Toorsi University of Technology](#)

Dr. Masimin: Senior Lecturer, Syah Kuala University

Dr. Kweon Hyuck Min: Associate Professor, Kyonju University,

[Dr. Jayaratne Ravindra, Reader, Univ. of East London](#)

Dr. Le Trung Tuan: Vise Director, Vietnamese Institute of Water Resources

Dr. Le Van Cong: Senior Researcher, Vietnamese Science Academy,

[Dr. Joel Nobert: Assistant Professor, University of Dar Es Salaam](#)

Prof. Miguel Esteban: Professor, Waseda University

Dr. Hendra Achiari: Lecturer, Bandung Institute of Technology

[Dr. Nguyen Danh Thao: Director, HoChiMinh City University of Technology](#)

Dr. Thamnoon Rasmeeasmuang: Lecturer, Burapha University

Dr. Matico Samson: Lecturer, University of Dar Es Salaam

[Dr. Cheki Dorji: Principal, Royal Polytechnic University of Bhutan](#)

[Dr. Rafael Aranguiz, Associate Professor, Catholic University of Concepcion](#)

Dr. Tasnim Khandker Masuma, Researcher, Waseda University

Dr. Martin Maell, Assistant Professor, Yokohama National University

Dr. Thit Oo kyaw, Researcher, Waseda University

Dr. Kristina Knuepfer, Researcher, Waseda University

日本人博士: 片山裕之博士(五洋建設技研) 島谷学博士(五洋建設) 鈴木崇之博士(横国大教授) 高木泰士博士(東工大准教授) 松丸 亮博士(東洋大教授) 三上貴仁博士(東京都市大准教授) 高畠知行博士(近畿大学准教授) 中村亮太博士(新潟大准教授) 大平幸一郎博士(中部電力)

私の最近の主な津波高潮火山調査

死者+行方不明者

- 2004 インド洋津波 スリランカ、インドネシア、タイ 220,000
- 2005 カトリーナ高潮 米国(ニューオーリンズ) 1,200
- 2006 ジャワ島中部地震津波 インドネシア 668
- 2007 シドル高潮 バングラデシュ 5,100 (1970: 400,000 1991: 140,000)
- 2008 ナルジス高潮 ミャンマー 138,000
- 2009 サモア津波 サモア 183
- 2010 チリ津波 チリ 500
- 2010 スマトラ(メンタワイ諸島)津波 インドネシア 500
- 2011 東北地方太平洋沖地震津波 日本 死者15,782 行方不明4,086
- 2012 サンディー高潮 米国(ニューヨーク) 170 (USA 80)
- 2013 ヨランダ高潮 フィリピン Death 4,011 Unknown 1,602
- 2014 御嶽山噴火 日本
- 2014 根室の高潮 日本 (2015 イヤペル地震津波 チリ Dr. Aranguiz)
- 2017 新燃岳噴火 日本
- 2017 台風1721号による神奈川県での高潮・高波 日本
- 2018 草津本白根山噴火 日本
- 2018 台風1821号による大阪湾での高潮 日本
- 2018 スラウェシ島津波 インドネシア Death 2,081 Unknown 1,309
- 2018 スンダ海峡津波(火山噴火による津波) インドネシア Death 426 Unknown 29
- 2019 台風15号による神奈川県での高波 日本

調査方法の変化: ブログやYouTubeからの情報の収集

3.11津波で 何が起きたか

被害調査と減災戦略

柴山知也 [著]

Tomoya Shibayama



「震災後」
に考える



004

構造物
だけでは
いのちを
守れない

震災の教訓

防備が破綻され
数世が町や人々を襲った

従来の研究を

根本から問い直す

巨大津波の実態

沿岸防災に必要なものは何か
十分な科学的根拠と

地域の視点から

将来に備える

HANDBOOK OF COASTAL DISASTER MITIGATION FOR ENGINEERS AND PLANNERS

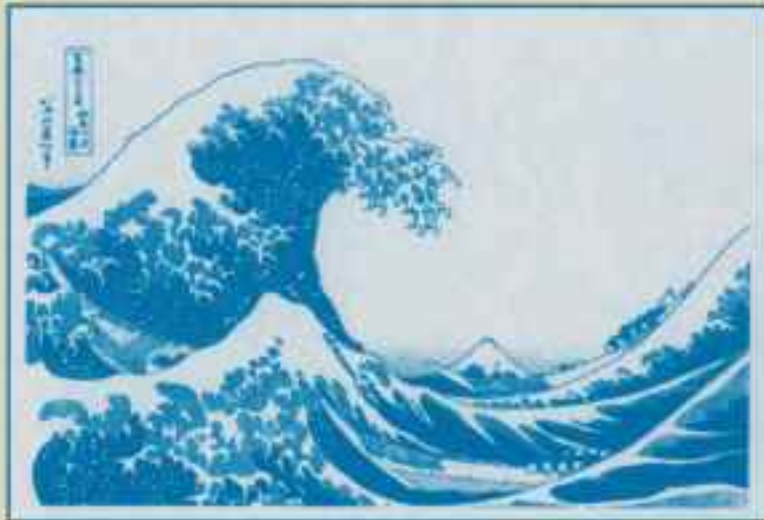
EDITED BY
MIGUEL ESTEBAN, HIROSHI TAKAGI, TOMOYA SHIBAYAMA



Advanced Series on Ocean Engineering — Volume 28

COASTAL PROCESSES

Concepts in Coastal Engineering and
Their Applications to Multifarious Environments



Tomoya Shibayama

World Scientific

図説 Japanese Coasts

日本の海岸

柴山知也 Tomoya Shibayama

茅根 創 Hajime Kayanne

(共著)



朝倉書店

Tsunamis and Storm Surges: Introduction to Coastal Disasters



WasedaX
CosOn101k
Tsunamis and Storm Surges:
Introduction to Coastal Disasters



2016年1月18日開講

受講無料

注) 本講座は全て英語で行われます。

担当教員

柴山 知也

早稲田大学理工学術院 教授
専門分野: 海洋工学・沿岸防災
評級: 高層研究の第一人者



2021年10月1日 第六版新コース スタート

edX:

MIT, ハーバードなど94大学
日本は早大、東大、京大、阪大
東工大

早大・津波講座は
120か国、2500人の受講生
米国(19%) 日本(15%) イ
ンド(6%) 英国(4%) チリ(
3%) カナダ(3%) スペイン(
3%) インドネシア(3%) オラ
ンダ(2%) フィリピン(2%)



(所長) 柴山 知也 (所属) 早稲田大学

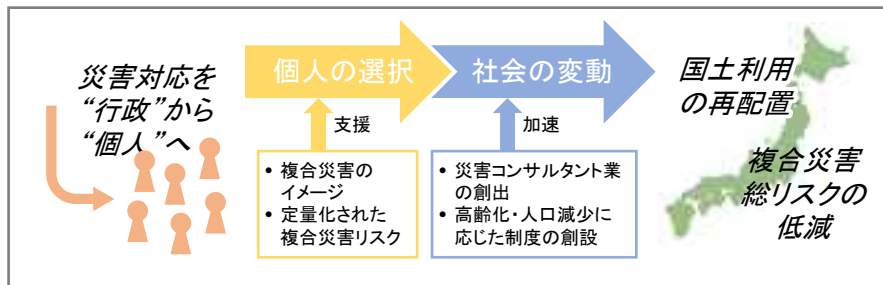
- 1977年3月 東京大学工学部土木工学科卒業
- 1985年3月 東京大学工学博士 (論文博士) を取得 (工学博士)
- 1985年5月 東京大学講師
- 1986年3月 東京大学助教授
- 1987年4月 横浜国立大学助教授 (工学部建設学科)
- 1997年8月 横浜国立大学教授
- 2009年4月 早稲田大学理工学術院教授 横浜国立大学名誉教授

国内外の災害調査、数値予測計算、模型実験により、災害の現実を再構築してきた。国際的に著名な研究者として、国際的研究チームを率いて災害対応技術の開発を進めている。長年にわたりほとんどすべての国内外の津波・高潮災害の調査を行った。テレビ、新聞などで災害の解りやすい解説を行っている。

PMの挑戦と実現した場合のインパクト

✓ 概要・背景

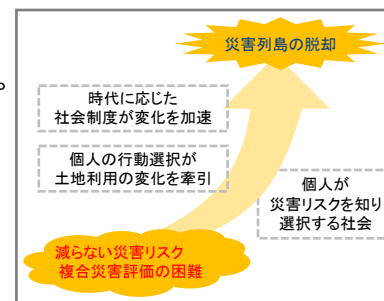
- ・日本列島は災害列島である。
- ・誰もが災害のリスクを避けられるシステムがない。
- ・実現したときに産業や社会に与えるインパクトは何か？
- ・災害対応を行政の視点から個人個人の行動選択の視点に変える。
- ・徹底した個人レベルの複合災害リスクの定量化を行う。
- ・災害リスクを一般市民の「日常レベルの選択」に加える。
- ・個人の選択によって土地利用の将来を変えていく。
- ・上記のプロセスを踏んで、住民の理解を得たうえで、ハイリスクの地域から撤退する。
- ・地域の災害脆弱性が長期的に徐々に克服されていく社会制度を創出し、高齢化、人口減少などの日本社会の変動に対応した国土利用の再配置を促す。



非連続イノベーション

✓ ブレークスルーとなるポイント

従来技術では越えられなかった壁：
 ・災害地域に人々が住み続けることによって災害リスクは減らなかった。
 どのようにそれを突破するのか：
 ・個人個人がリスクを定量化できるようにする。
 その飛躍の程度はどのくらいか：
 ・自然災害では人が亡くならないようになる。



成功へのシナリオと達成目標

✓ 成功に導く解決手段 (アプローチ)

・日本の災害研究の最先端を網羅し、地震、津波、高潮などこれまで別々に論じられていたものを複合災害の観点から整理し直す。①地震・火災・液化化・津波、②台風・強風・豪雨・高潮・洪水あるいは③地震・火山噴火・火山灰降下・洪水など一連の災害が単独ではなく、同時に進行していく新しい災害のイメージを確立する。
 ・個別的にバラバラに研究が行われていたことには限界があることが研究者の共通認識となり、適切な指導者さえいれば多くの研究者が結集できる土壌が既にできている。

✓ マネジメント戦略

・研究の一部を公募する。
 ・当初の2か月ほどで研究分担を吟味するとともに、1年後に研究経過を評価して、課題によっては見直しにより構成メンバーを入れ替える、補強するなどの措置をとる。
 ・マネージャーが日常的に研究会議に参加して、チーム別の情報を共有できるようにする。チームごとに2週間に一回のコンサルテーション、全体では1月に一回のプログレスミーティングを実施する。
 ・これにより開発のスピードが促進され、テーマ間の協調が高まる。

✓ 達成目標

・プログラム成功の判断基準：新しい複合災害リスク評価システムと社会制度の提案が実現可能なパッケージとして提示される。
 ・終了時に実現を目指すレベル：個人の選択が変わるほどの定量化

✓ リスク：複合要因の推定レベルが揃わないと実用化できない。

1) 東北津波来襲後の10年以上にわたる土木工学分野での沿岸防災への技術的な対応への反省 粘り強い構造物

2) 東北津波の調査により、津波研究者の津波災害に関するイメージは大きく変化した。

3) 津波の研究者の間では、津波の陸上への氾濫を表現する際に、孤立波モデル、ダム破壊モデルが用いられたが、新たに海から陸上への流入が長時間にわたって続く一方向流モデルが加わった。

4) 構造物の設計、避難方法について多くの検討が行われてきた。

5) 今後の技術開発の展望について

Critical Infrastructure Resilience

6) 高潮についてもその予測手法が高度化した →
津波と高潮対策を合わせた新たな総合的な沿岸防災の課題

最近の津波・高潮に関する室内水理実験・数値シミュレーションモデルの動向：

現地調査に基づく変化

毎年のように起こった大規模な津波や高潮

現地調査  新たな発見  新たな解析の必要性

津波・高潮の挙動 + 災害機構

特に

水理実験

乱流モデル

陸上に氾濫した津波・高潮

気候-高潮-高波 モデル

避難シミュレーションモデル

現地調査に基づく重要な発見と方法への反映

1. 陸上に氾濫した津波・高潮の挙動

孤立波 (昔のイメージ、ジャワ津波)

ダム破壊波

長時間にわたる一方向の流れ (東北津波)

段波 (崩れつつある波が乱流を伴って進行する)

: 津波・高潮ともに起こる

高潮の例: バングラデシュ・シドル高潮 (Shibayama et al., 2009)

フィリピン・ヨランダ高潮 (Roeber and Bricker, 2015, Nakamura et al., 2016)

2. 長時間にわたる岸向きの流れのために、海岸堤防が破堤する。

東北津波: 15分にもわたる一方向流れ

カトリーナ高潮 (Shibayama, 2015).

3. 海岸防潮林の新たな役割

堤防背後の防潮林が水位を上昇させることにより、局所洗掘による破堤を防ぐ (東北津波, 松葉ら, 2014).

4. 漂流物の移流と衝突による構造物の破壊

港湾のコンテナ、破壊された木造住宅の部材、海岸林の木などが流され衝突する (カトリーナ高潮、ヨランダ高潮、チリ津波、東北津波 (Nistor et al., 2016))

複合災害と災害に強い地域づくり

① 早稲田大学が神奈川県庁に協力する地域災害研究

1. 相模トラフの地震(元禄関東地震、1703)

地震振動 津波 山腹崩壊 火災 山間村落の維持 インフラの崩壊、地域の防災、まちづくり

2. 富士山の噴火(宝永、1707)

噴火、酒匂川水系での洪水

噴火直後にデータを集め数日間を予測する予測モデル

3. 環境変動と集中豪雨、土砂災害

② 早稲田大学をハブとする国際的な災害研究

1. 海外の事例を経験として取り込む。40年間蓄積した母国で活躍する留学卒業生との協働。アメリカと日本の違い。

2. 日本の経験を国際的に普遍化する。世界津波の日

3. 海外に展開した日本企業のサプライチェーンを守る。
タイ、ベトナム、バングラデシュ、インドネシア

Introduction of Tokyo Bay

- Tokyo bay is a major political and economical hub in Japan.

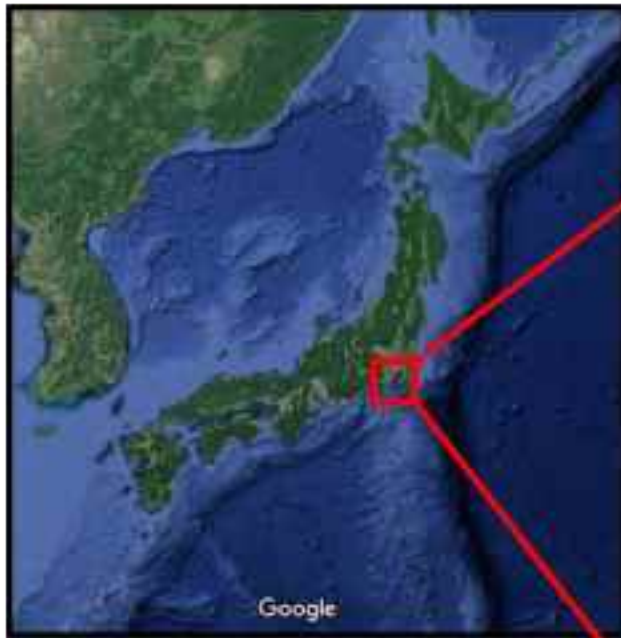
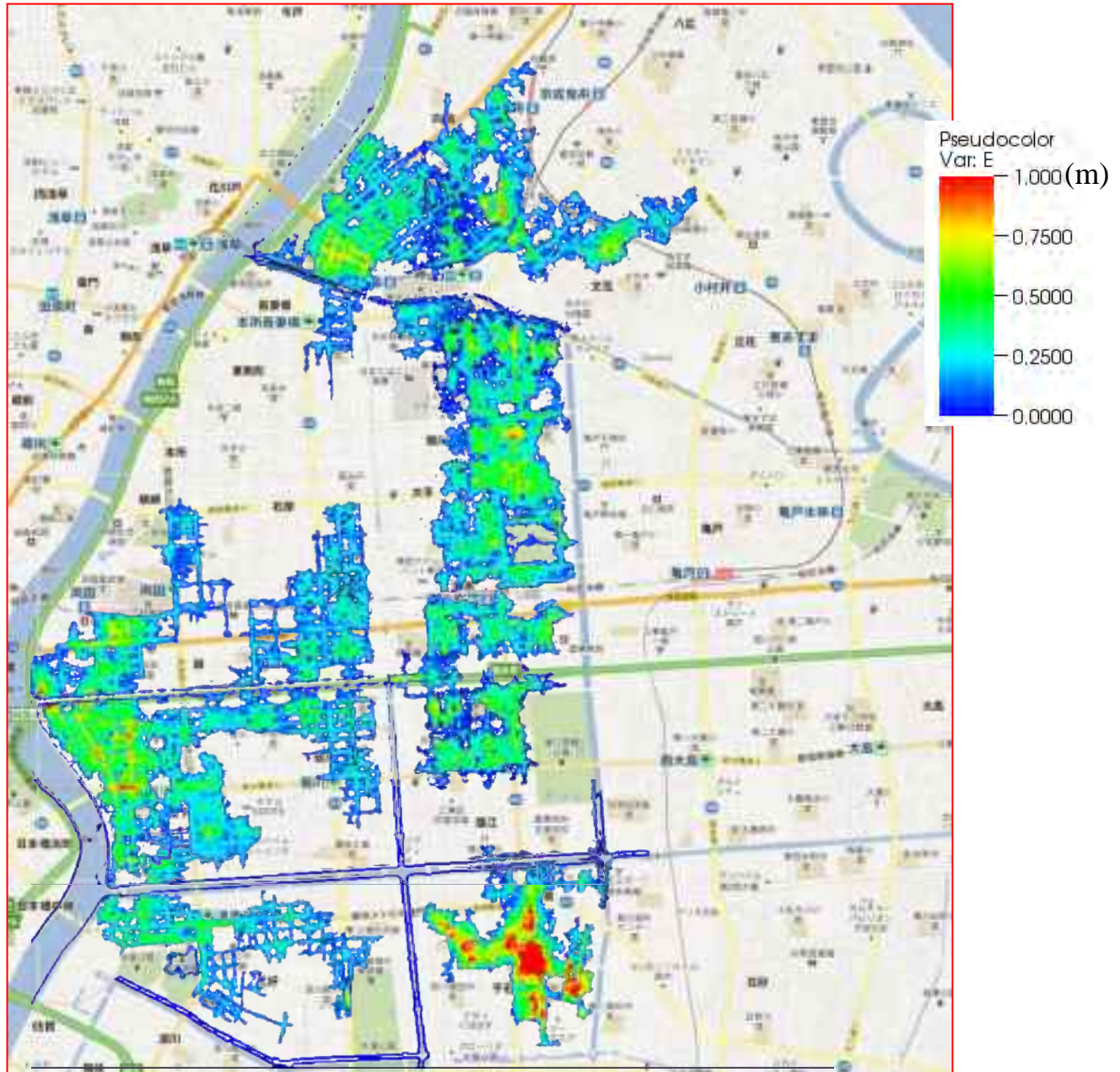


Fig. 1. Overview of Japan and sea.
(Google Map (Image: DATA SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat / Map Data : SK telecom, ZENRIN))



Fig. 2. Overview of Tokyo Bay.
(Google Map (Image : Landsat, DATA SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Data Japan Hydrographic Association, Data LDEO-Columbia, NSF, NOAA / Map Data : ZENRIN)) 17

Flood in Tokyo downtown, Koto ward , if storm surge barriers are destroyed by earthquake.





Ground subsidence in the Tokyo Bay region

- A lot of ground water was pumped up to urbanize the Tokyo Bay region in the past. It caused the severe ground subsidence.

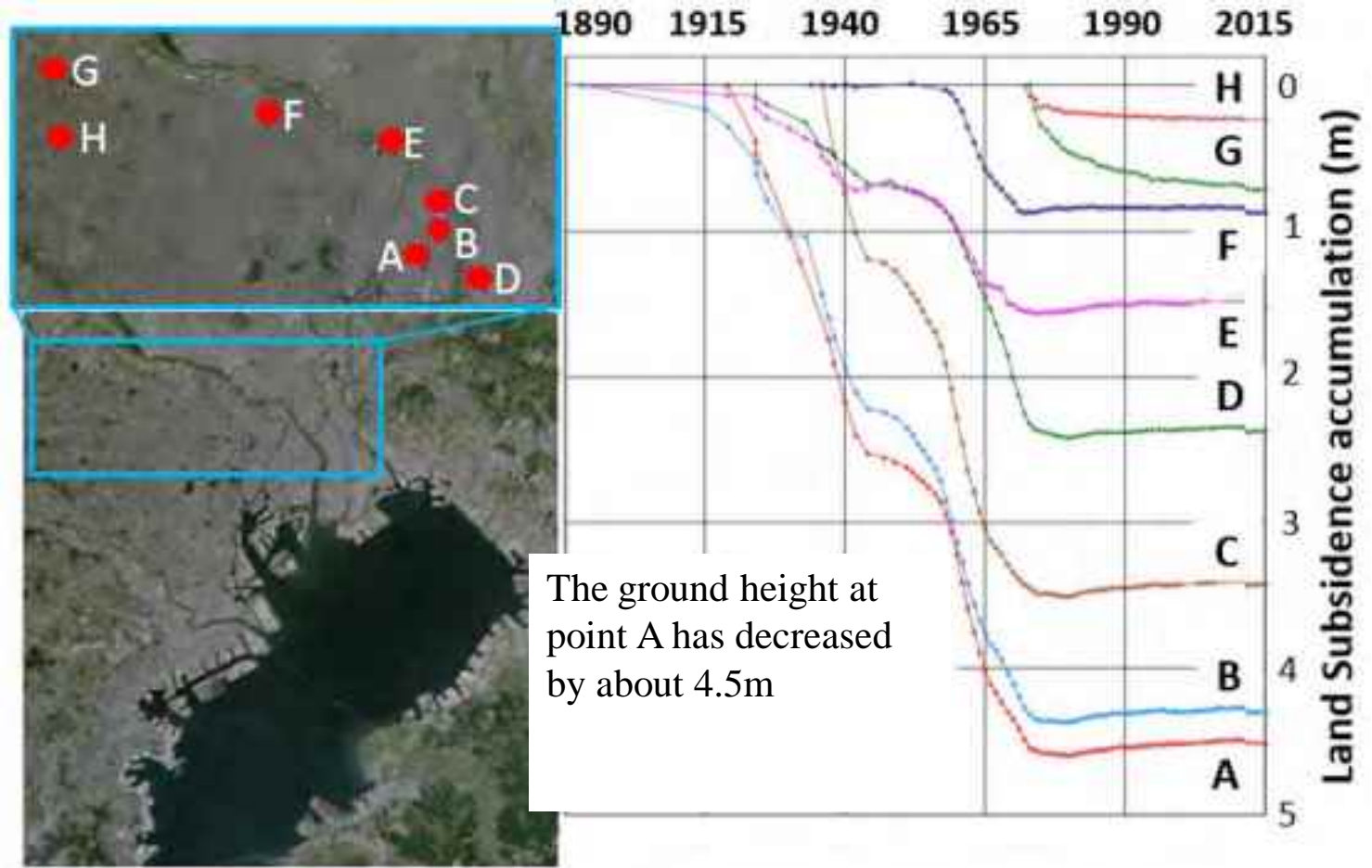


Fig. 4. Observation points of ground subsidence
 (Source : Google Map (Image : Image Landsat, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO))

Fig.5. Time history of ground subsidence
 (Civil Engineering Support and Training Center, Bureau of Construction, Tokyo Metropolitan Government, 2013)

東京湾の高潮被害

高潮被害

当時の高潮は、「大正6年の大海嘯」あるいは「大正6年の大津浪」と呼ばれている。

被害概要(大森(1918)より作成)

死者・行方不明者 (人)	負傷者 (人)	家屋全壊 (戸)	家屋流失(戸)	家屋半壊 (戸)	床上浸水 (戸)	船舶流失沈没 (隻)
1301	2215	43083	2399	21010	194698	8220



当時の様子(京橋区月島付近)(出典:北原(2007))



浸水・被害区域(出典:気象庁技術報告)

首都圏の脆弱性

低平地: (古い埋め立て地) 川崎市: 明治以来の埋立地 (地盤が低く、液状化対策なし)

江東デルタのゼロメートル地帯

(高度経済成長期の地下水利用、バンコク、上海、ジャカルタ)

工場用地: 危険物が多い。地方行政の関心が低い。

東京湾: 埋め立てにより、複雑な地形をしている。

中小河川の流入

東京都: 目黒川、呑川、古川

横浜市: 帷子川 鎌倉市: 滑川 藤沢市: 境川

堤外地

東京港 横浜港 川崎港

地域特性に応じた避難場所の選定

避難計画の選定にあたって

- 避難場所の選定を地域の特性に応じて適切に行う
- 想定値を超える場合についてもシステムが維持できるように設計する

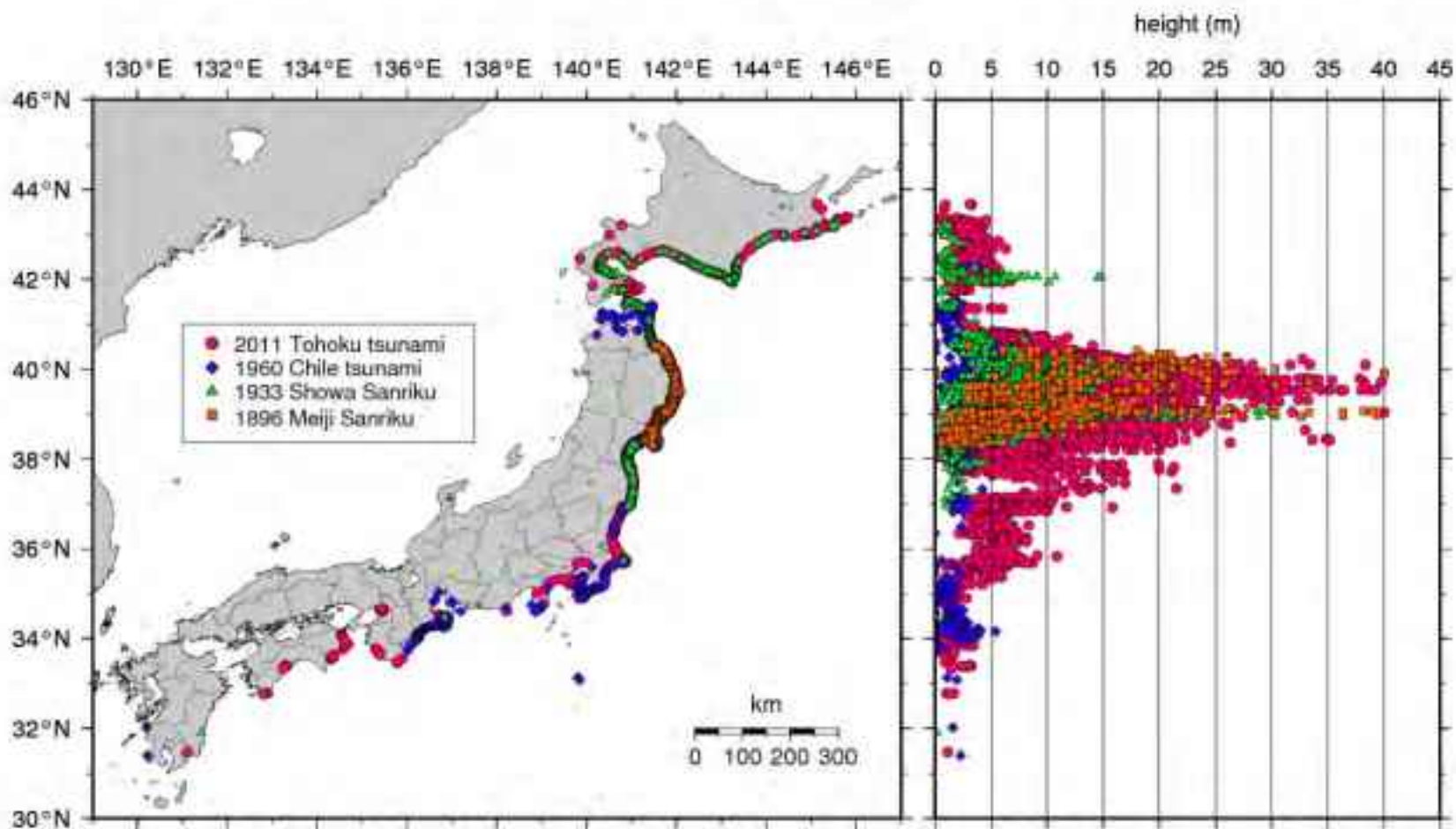
避難場所の分類

- 市町のおかれた地形条件を場所ごとに分析し、**信頼度のカテゴリー** (A, B, C)を付けて指定する
- B, Cは孤立する可能性があることに注意する
- 住民はあらかじめ設定した中から時間の制約を考慮して選択する

A	背後に標高の高い後背地を有する丘
B	堅固な7階建て以上の建物か、20m以上の地盤高の丘
C	堅固な4階建て以上の建物

過去の津波との比較

日本、チリ、インドネシア



2011年東北地方太平洋沖地震津波の痕跡高は、統一補正データ(津波合同調査グループ)データ(リリース 20110826版)による
1933年昭和三陸津波、1896年明治三陸津波の痕跡高は、津波痕跡データベース(東北大学・原子力安全基盤機構)による

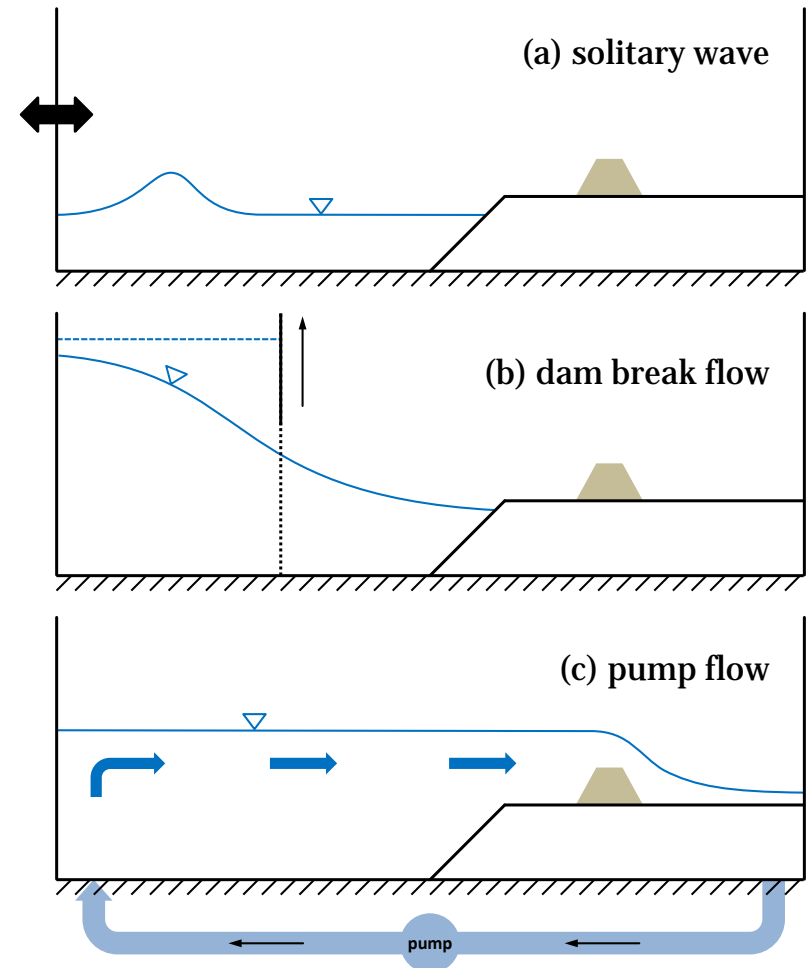


沿岸域での被害

- 消波ブロック（テトラポッド），海岸堤防，海岸林を越えて津波が街を襲った。
- 特に，海岸堤防の被害は大きく，沿岸数kmに渡って堤体内部の流出・堤体背後での洗掘が見られた。

津波造波方法

- 実験水路で使用される津波の造波方法には以下のようなものが挙げられる:
 - (a) 孤立波
 - (b) ダムブレイク流れ
 - (c) ポンプを用いた循環流
- 本研究では, 大井ら(2012)と同様に, 水路に取り付けた環流装置により一方向流れを発生させることで越流する津波を再現することとした.



映像による流体運動の分析

(a) 青森県おいらせ町での事例

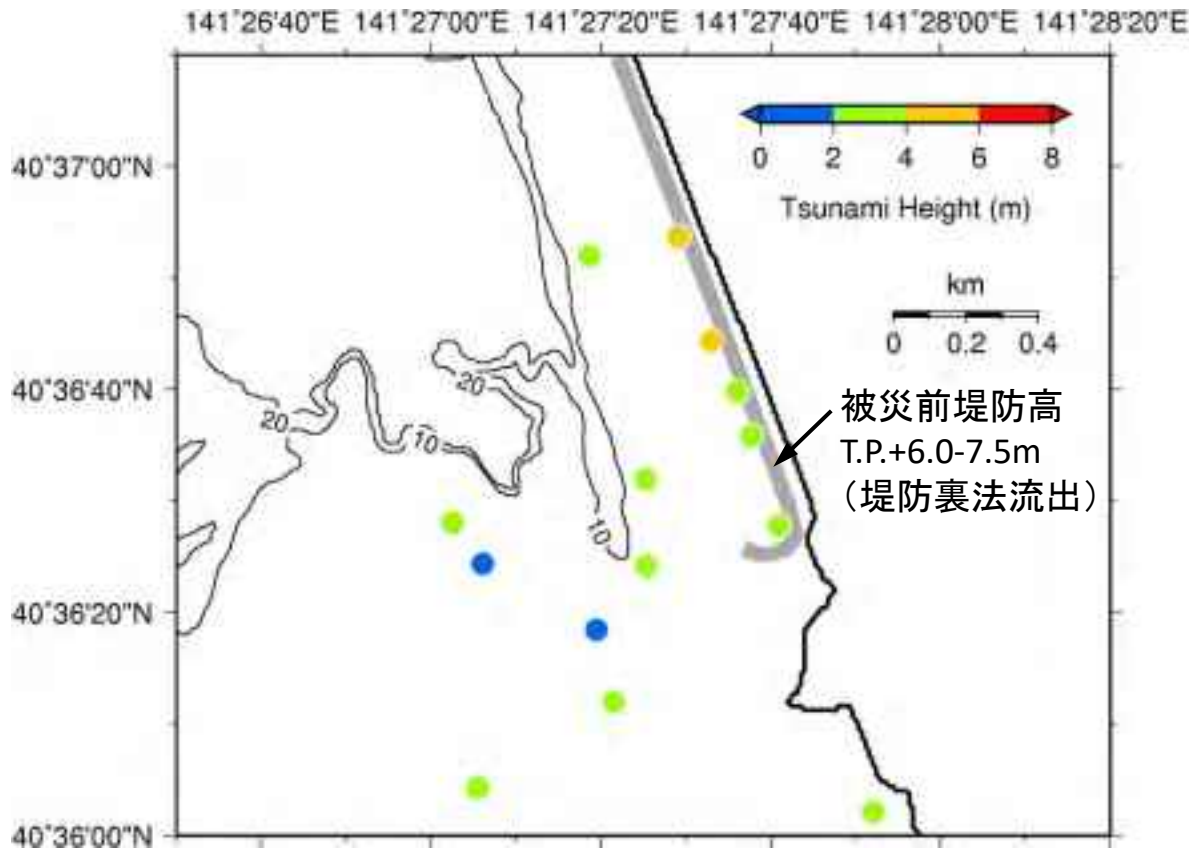
- 海岸堤防を越流した津波が加速しながら流下していく



映像による流体運動の分析

(a) 青森県おいらせ町での事例

- 流れは完全越流に近い状態となっており, これは堤防背後での痕跡高が堤防高よりも低いことからわかる.



地形データ：国土地理院基盤地図情報数値標高モデル（10mメッシュ）
津波痕跡高：東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2012）

数值計算手法

Mikami, T., Shibayama, T. (2013)

Governing Equations – Large Eddy Simulation (LES) Model

- The spatial filtered three-dimensional Navier-Stokes equations along with the continuity equation.
- Smagorinsky Model is used to evaluate SGS (sub-grid-scale) stress τ_{ij} .

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + g_i$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i' u_j'} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

where

\bar{u}_i : velocity component averaged over the grid size

ρ : density of fluid

\bar{p} : pressure

ν : kinetic viscosity

g_i : gravitational acceleration

τ_{ij} : sub-grid-scale stress

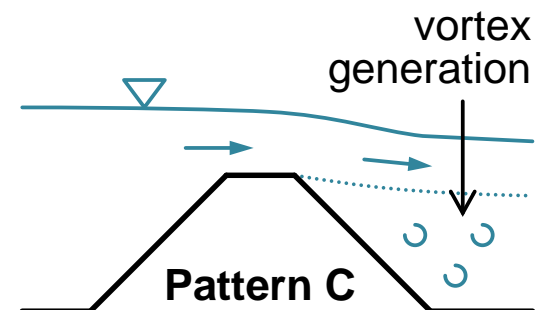
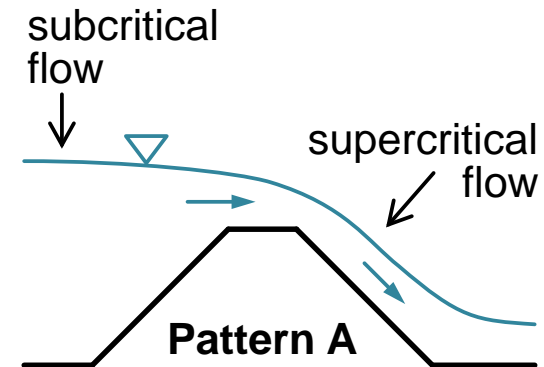
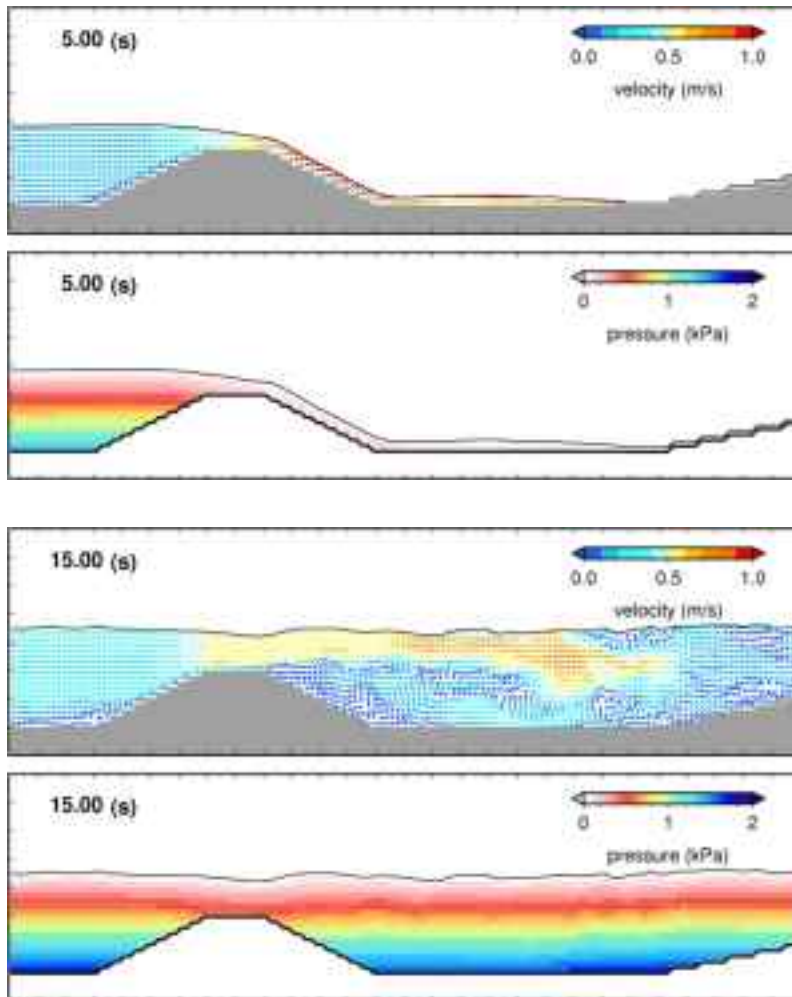
Numerical Scheme

- CIP method is employed to solve the governing equations.
- SOR method is employed to solve the pressure equation.
- The free surface position is calculated by the density function method.

堤防背後の水深を上げることによって流れのタイプを変える

Mikami, T., Shibayama, T. (2013)

Numerical results



新しい津波造波水槽の設置 早稲田大学

利用大学: Univ. of Ottawa(カナダ), Leibniz Universität Hannover(ドイツ)
Univ. of East London(イギリス) KNT Univ. of Technology(イラン)

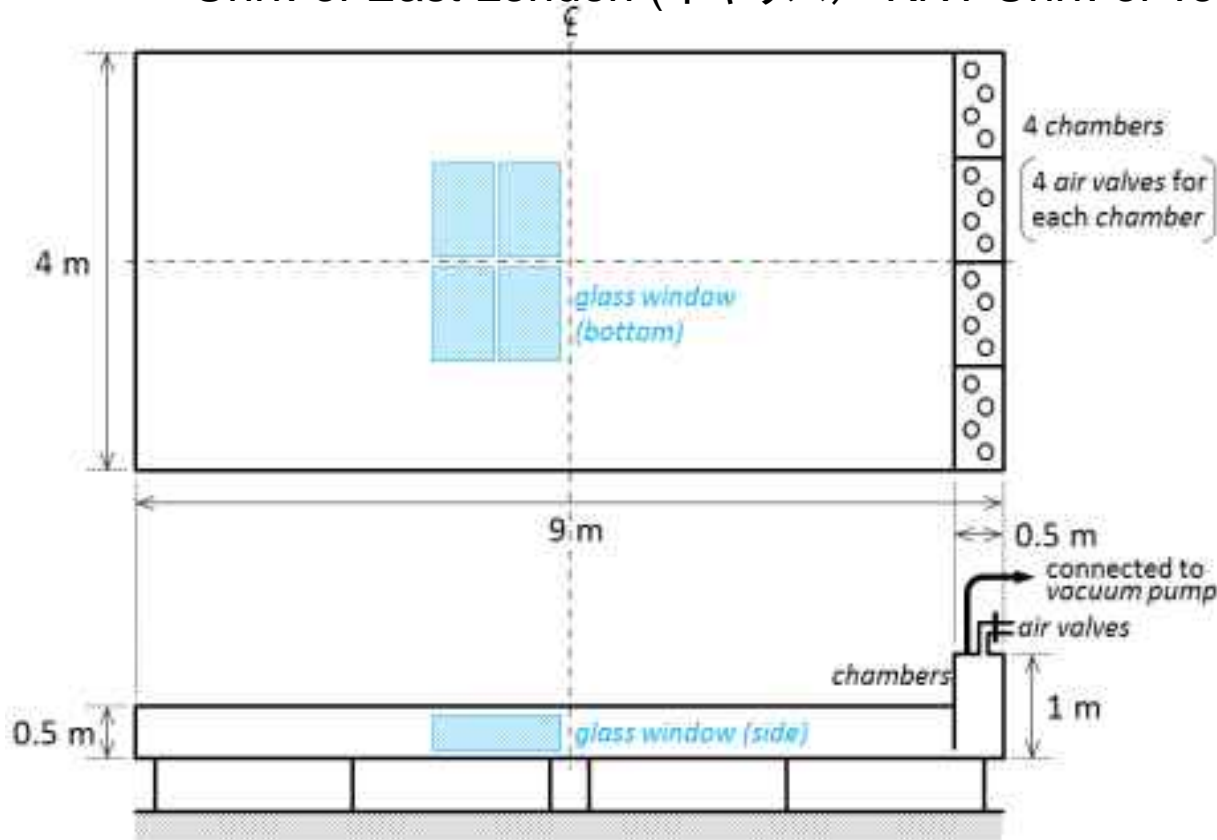


Fig. Plan and side views of the tsunami basin

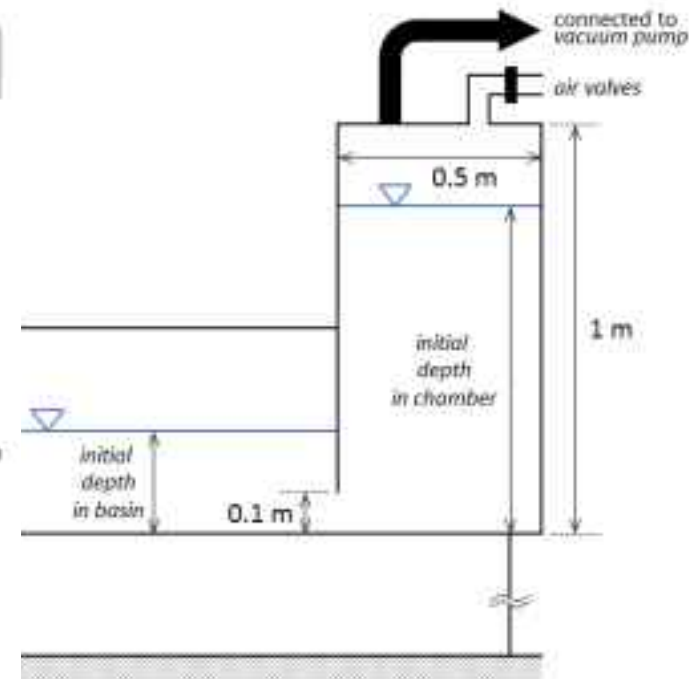
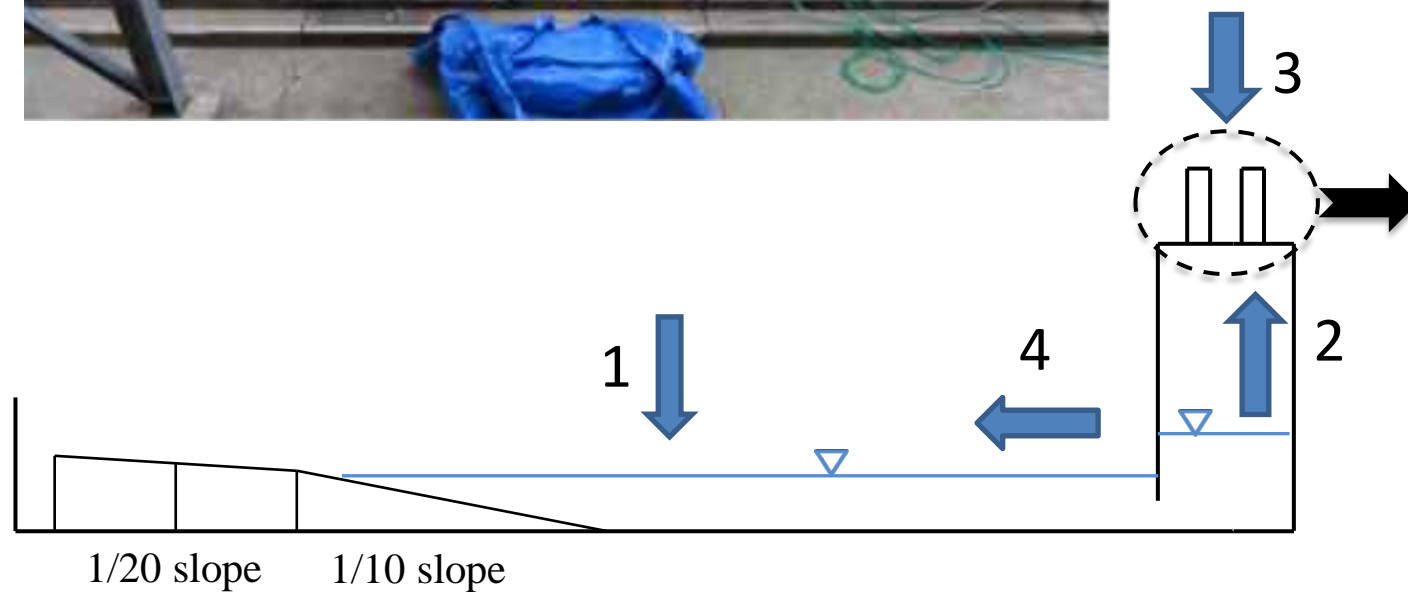


Fig. Side view of chamber

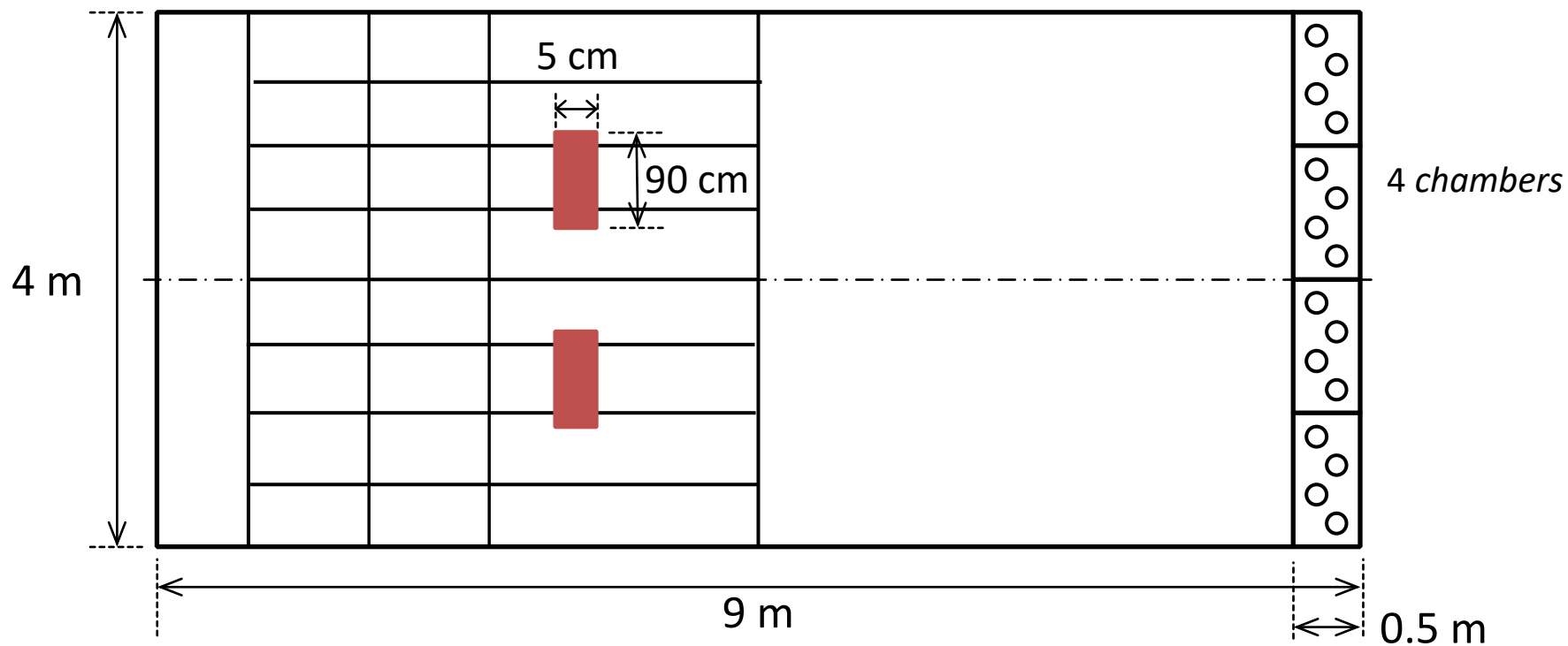
津波発生装置



- 1 水槽に注水
- 2 造波タンクに吸水
- 3 空気注入電磁バルブを制御
- 4 放水による造波



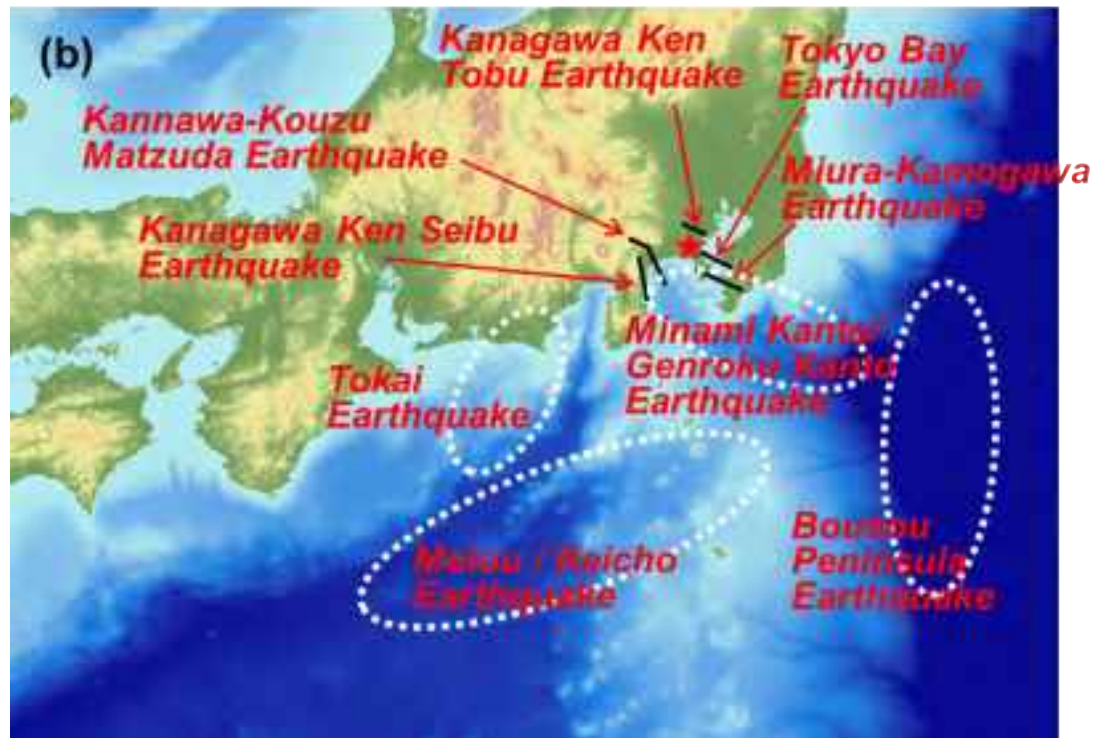
津波に対する離岸堤の効果



2. Study area & Earthquake scenarios

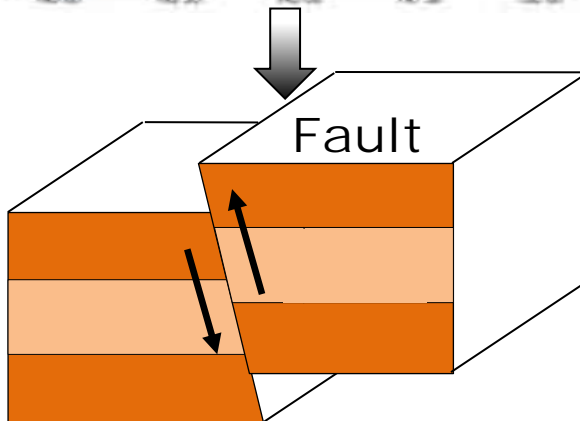
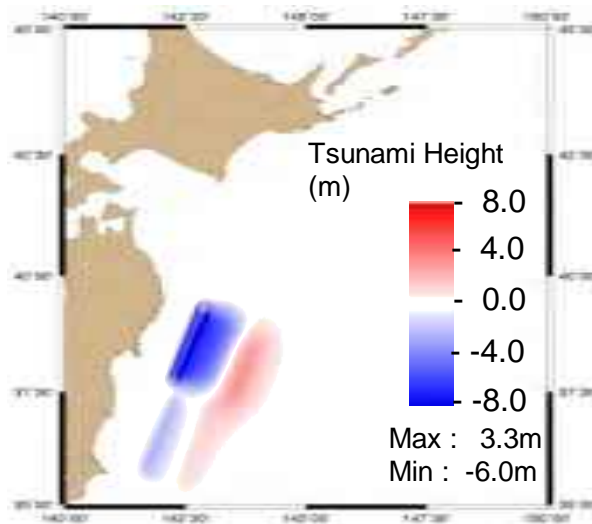
Kamakura City in Japan was selected as a study area

- The study area has suffered a number of earthquakes and tsunamis in the past.
- The Keicho earthquake was selected as the target earthquake, which is regarded as one of the most hazardous event to the study area (Kanagawa Prefecture, 2012)

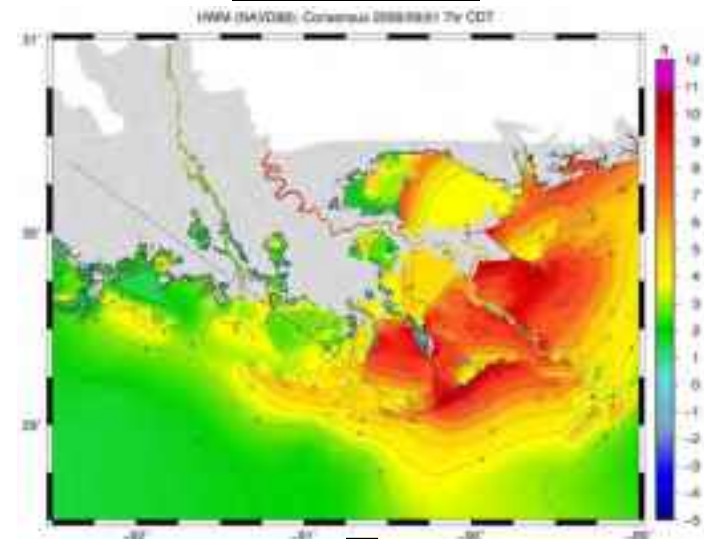


波の起動力の違い

<津波>



<高潮>



2. 高潮のモデル

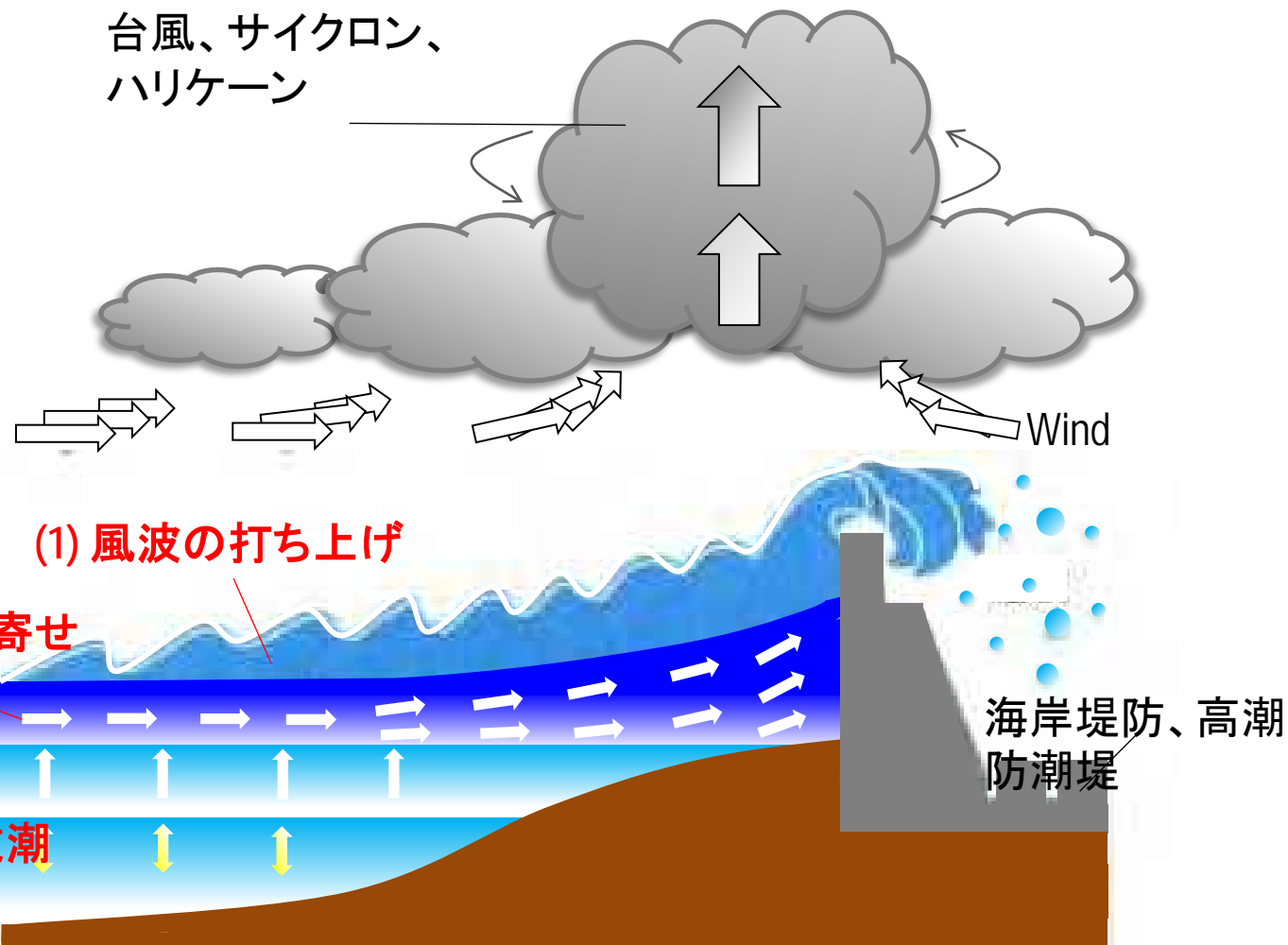
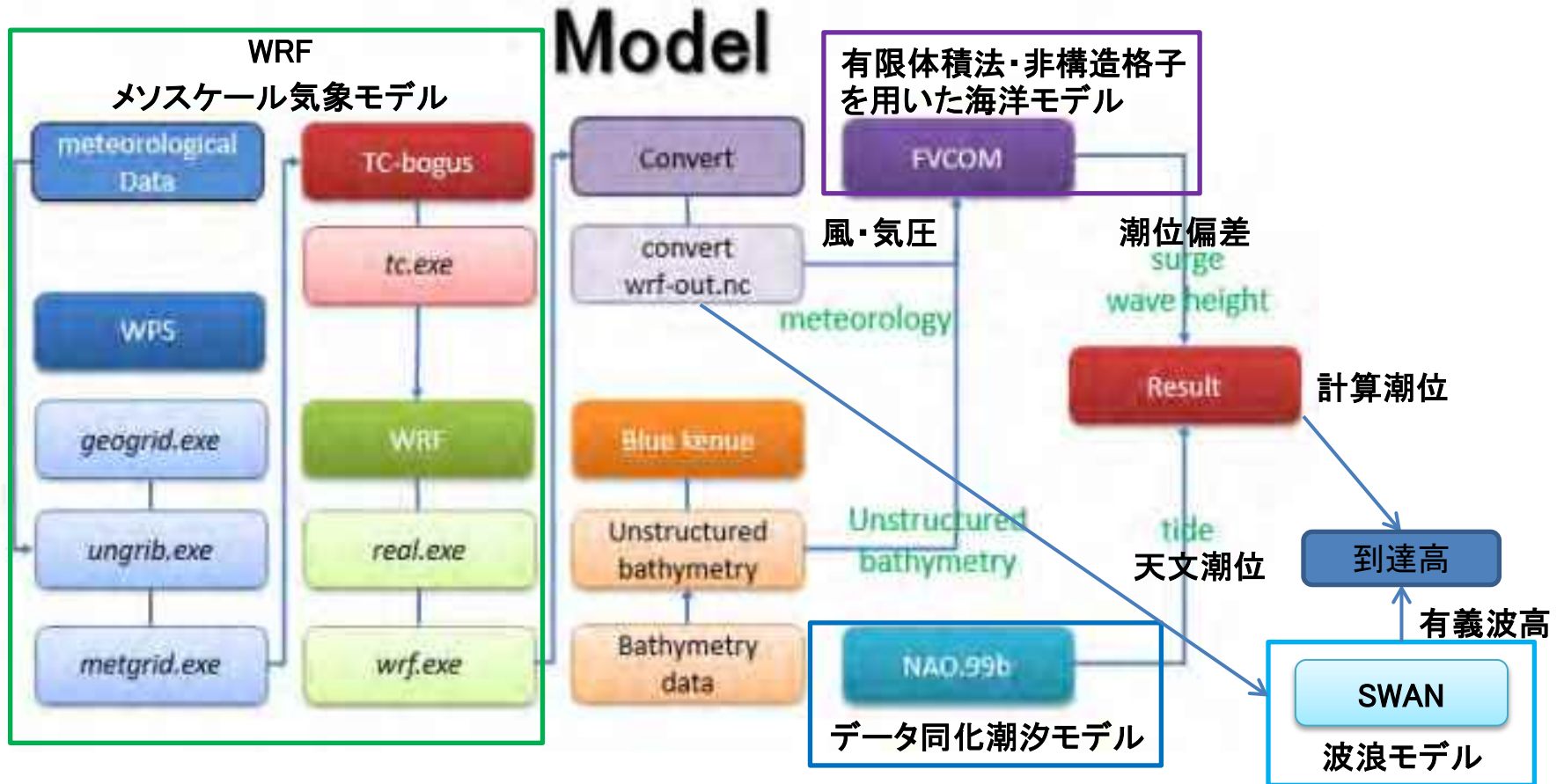


Fig. 1. 台風来襲時の海岸の水位上昇

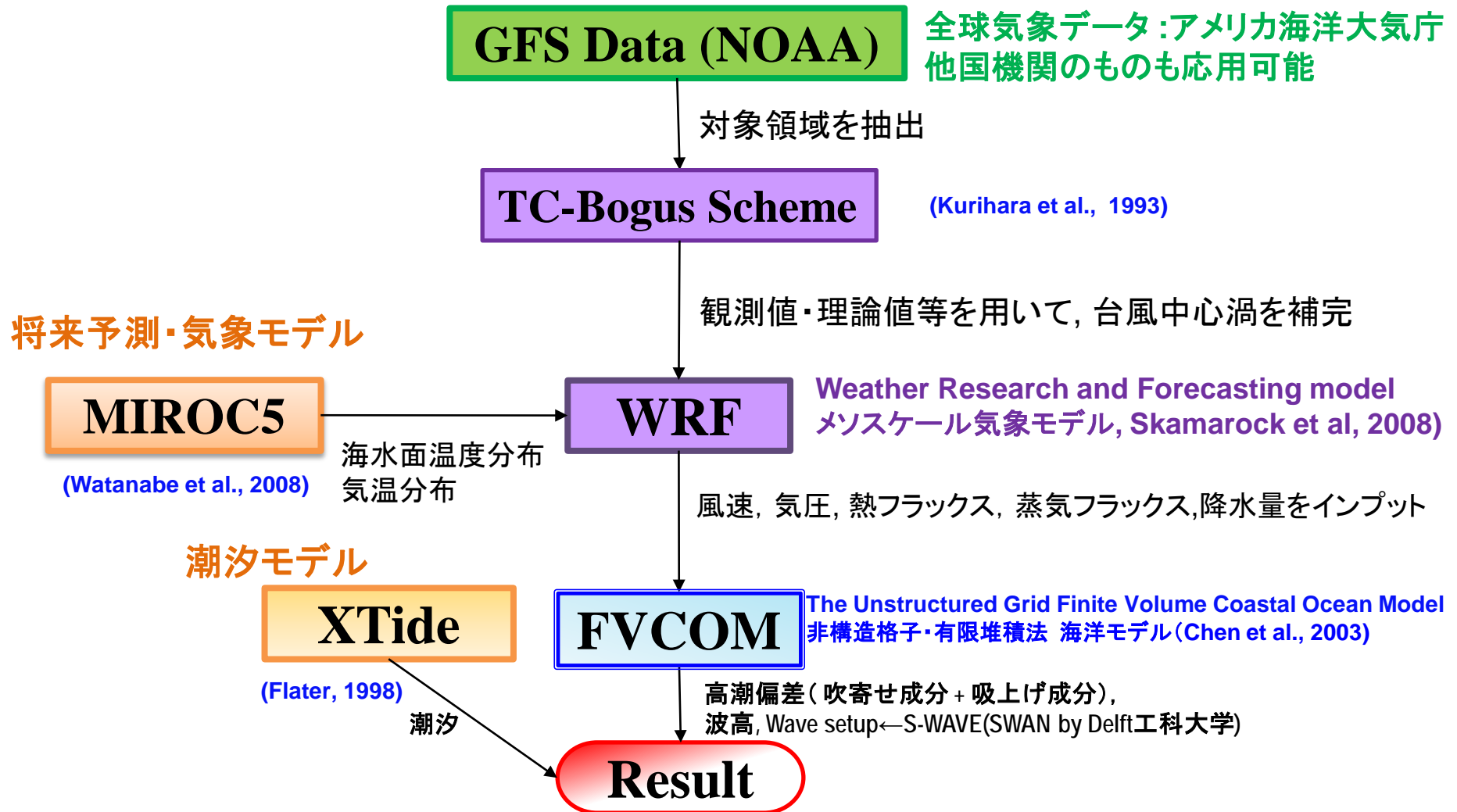
*(2) + (3) = 高潮

計算方法



モデルの概要図

気象—海洋—潮汐—気候変動 統合高潮モデル WRF-FVCOM-Xtide-MIROC5



WRF: Weather Research and Forecasting model) Skamarock et al, 2008)

運動量の保存

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uu) + \frac{\partial}{\partial y} (Vu) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \mu_d \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = F_U$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uv) + \frac{\partial}{\partial y} (Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \mu_d \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = F_V$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uw) + \frac{\partial}{\partial y} (Vw) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega w) - m^{-1} g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r) \right) + m^{-1} \mu_d' g = F_W$$

質量の保存

$$\frac{\partial \mu_d'}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] + m \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0$$

重力ポテンシャル

$$\frac{\partial \phi'}{\partial t} + \mu_d^{-1} \left[m^2 (U \phi_x + V \phi_y) + m U \phi_\eta - g W \right] = 0$$

温位

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U \theta) + \frac{\partial}{\partial y} (V \theta) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega \theta) = F_\Theta$$

スカラーポテンシャルの式

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U q_m) + \frac{\partial}{\partial y} (V q_m) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega q_m) = F_{Q_m}$$

気体の状態方程式

$$p = p_0 (R_d \theta_m / p_0 \alpha_d)^\gamma$$

2013年フィリピン高潮災害

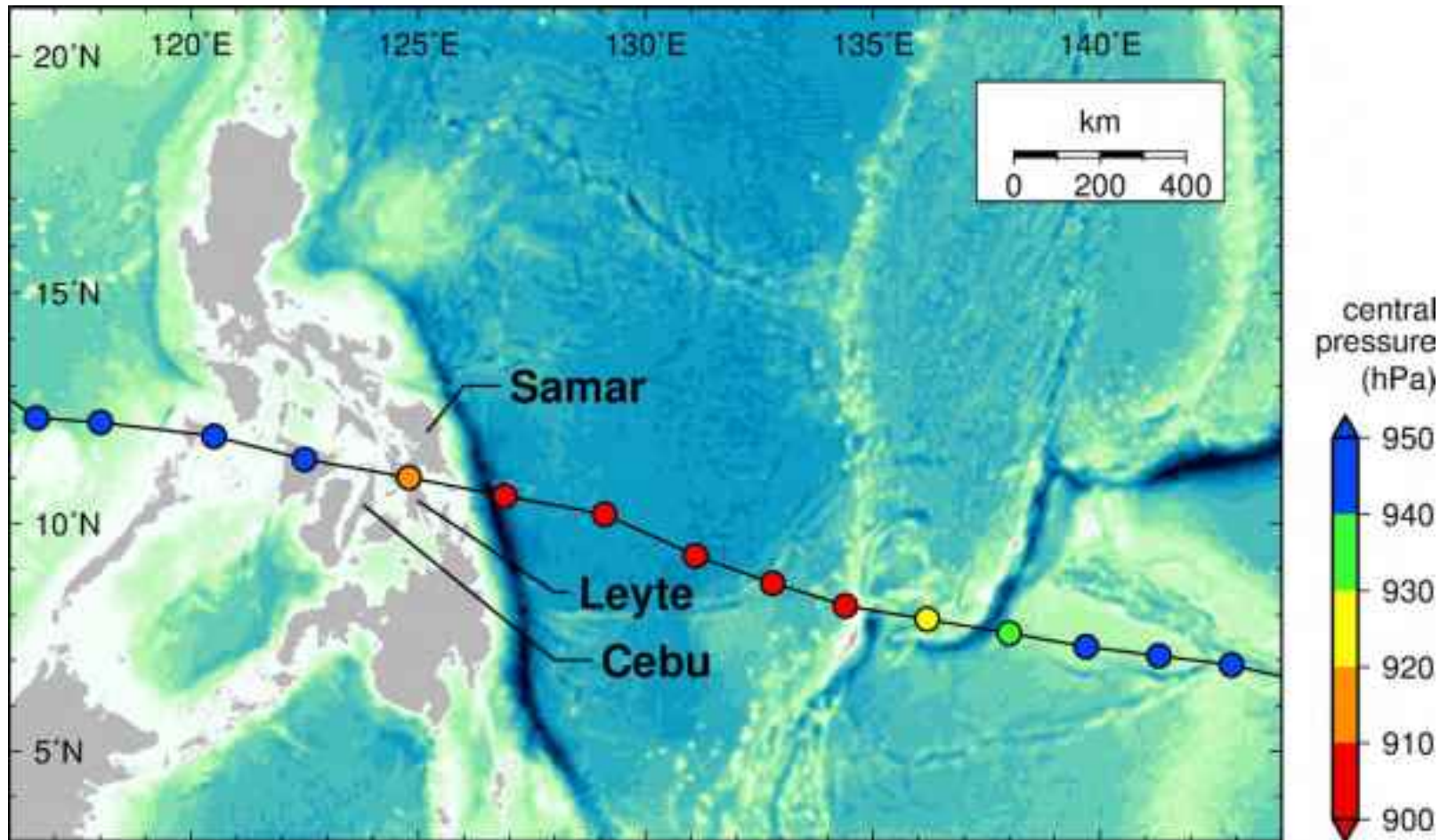
台風ヨランダ (Yolanda、Haiyan、台風30号)

- フィリピンの東海上で発生
- 2013.11.7 PM 勢力を維持しながら速度を上げて接近
- 2013.11.8 4:40 AM サマル島Guiuanに上陸(1回目)
- 2013.11.8 7:00 AM レイテ島Tolosaに上陸(2回目)
- 2013.11.8 9:40 AM セブ島Daanbantayanに上陸(3回目)

台風による被害状況

- 犠牲者数：死者6,183人、行方不明者1,785人
- 影響範囲：3,424,593世帯、16,078,181人が影響を受けた
- 建物被害：全壊550,928、半壊589,404

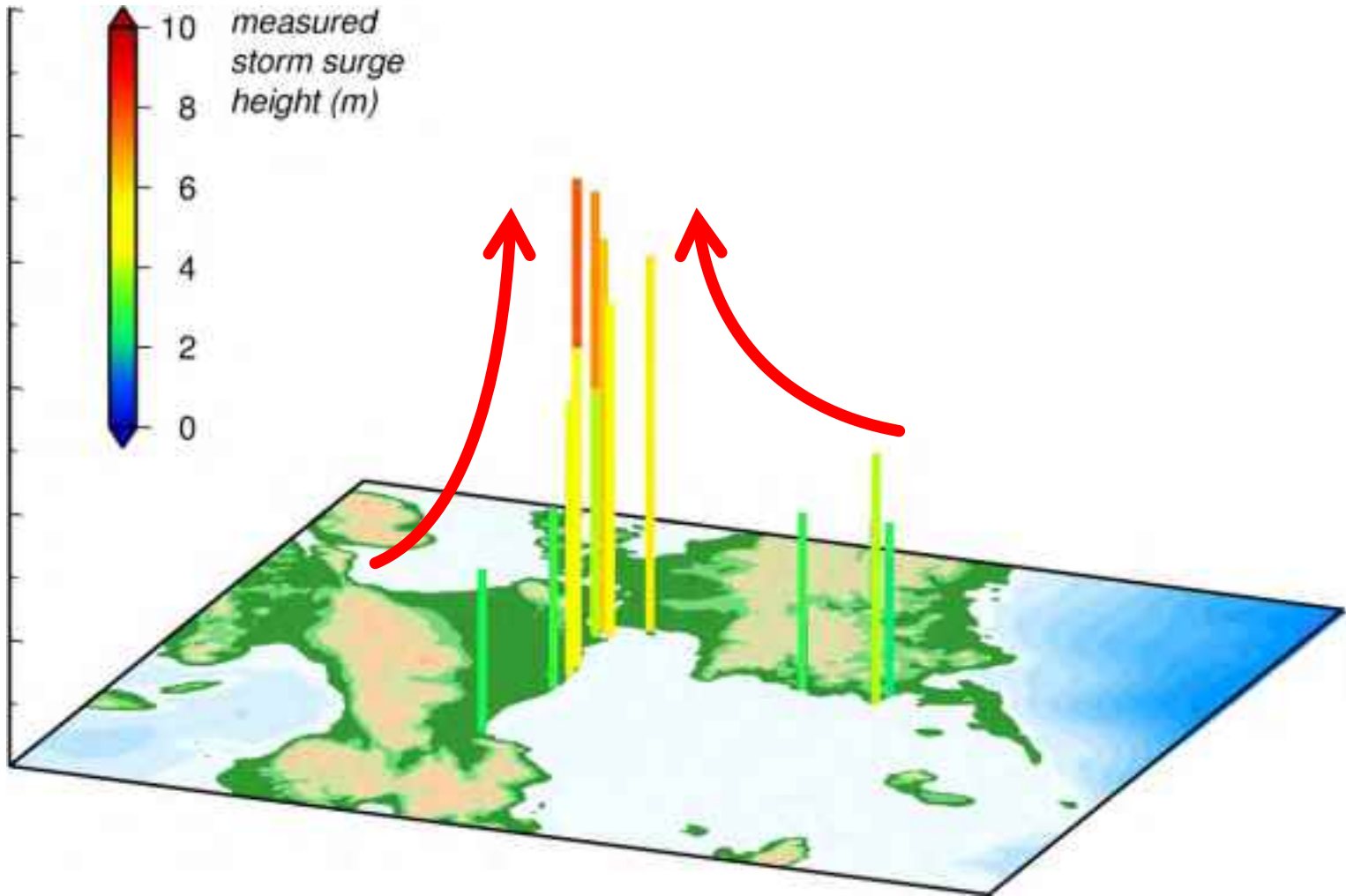
台風ヨランダの経路



Track data: The Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) Tokyo Best Track Data
<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html>

高潮痕跡高さの分布

合同調査隊による計測結果



現地調査結果 — Alejandro Hotel, Tacloban City

- 浸水高: 4.31m (海岸から約350m)
- 襲来時の様子をおさめた映像あり。
- 朝7時半頃から浸水が始まり、水位がどんどん上がり、腰の高さ(90cm)まで水が来た時にホテルへ避難。



痕跡高と計算値の地点ごと一覧

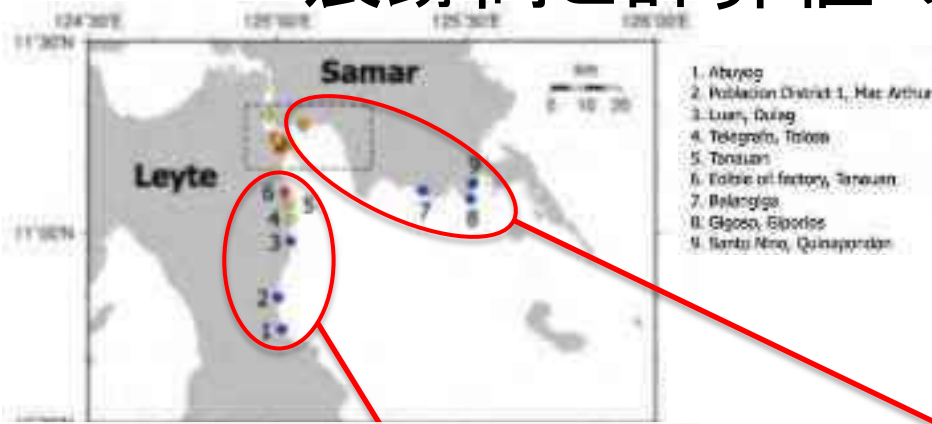


図: 2013年フィリピン高潮合同調査隊(柴山ら)・調査地点

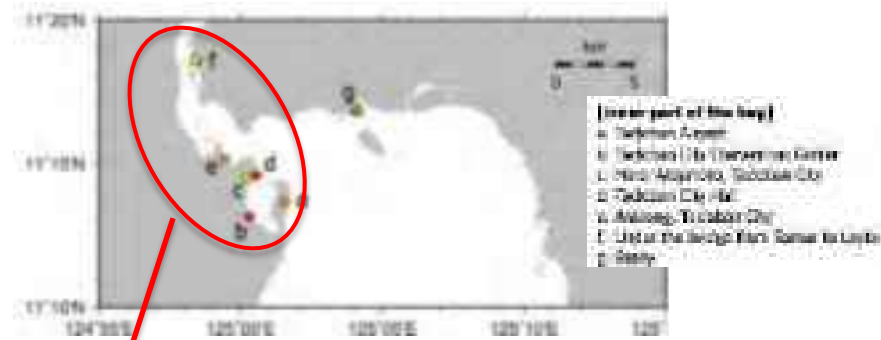


図: Tacloban付近の調査地点

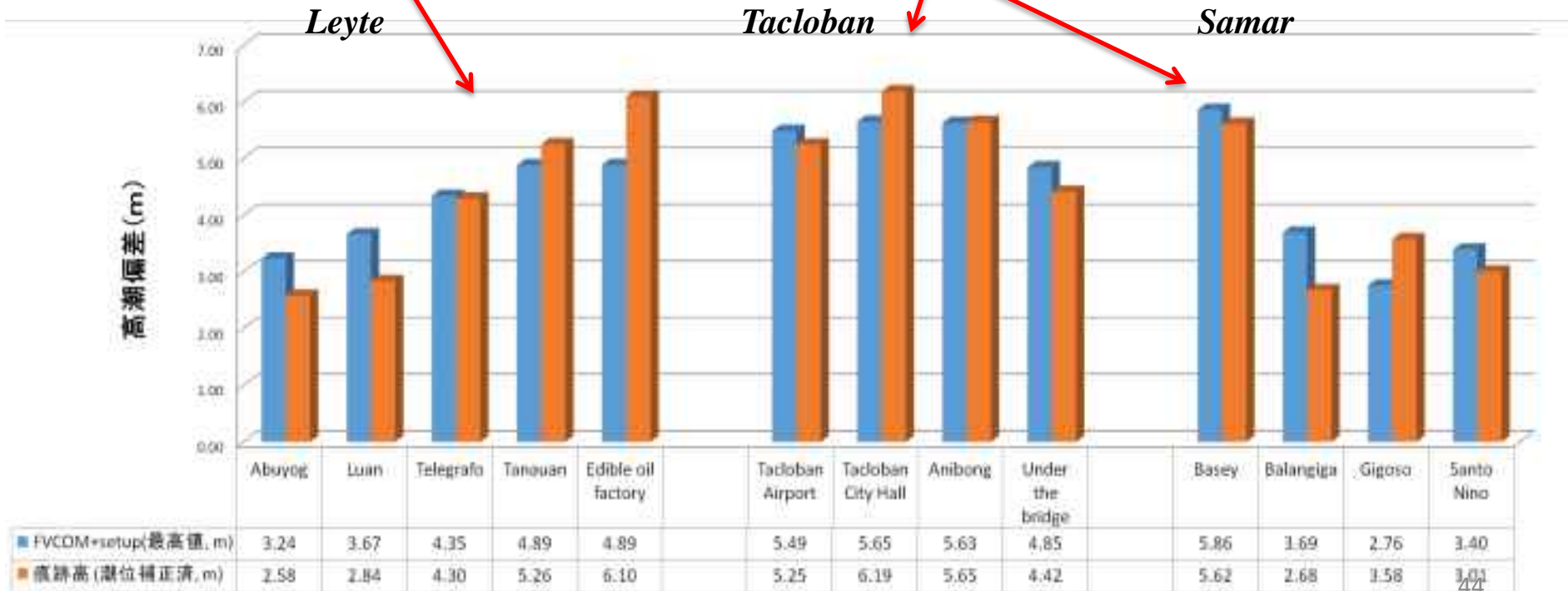


図: レイテ湾の各地点における計算結果と痕跡高

2100年条件下での計算値の地点ごと一覧

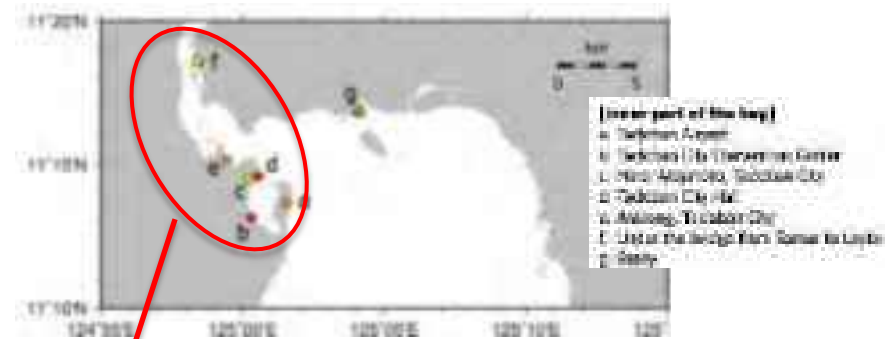
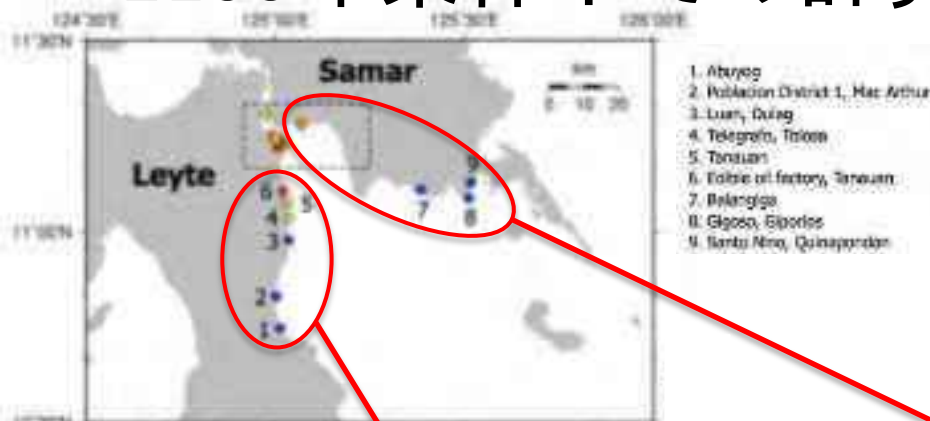


図: 2013年フィリピン高潮合同調査隊(柴山ら)・調査地点

図: Tacloban付近の調査地点

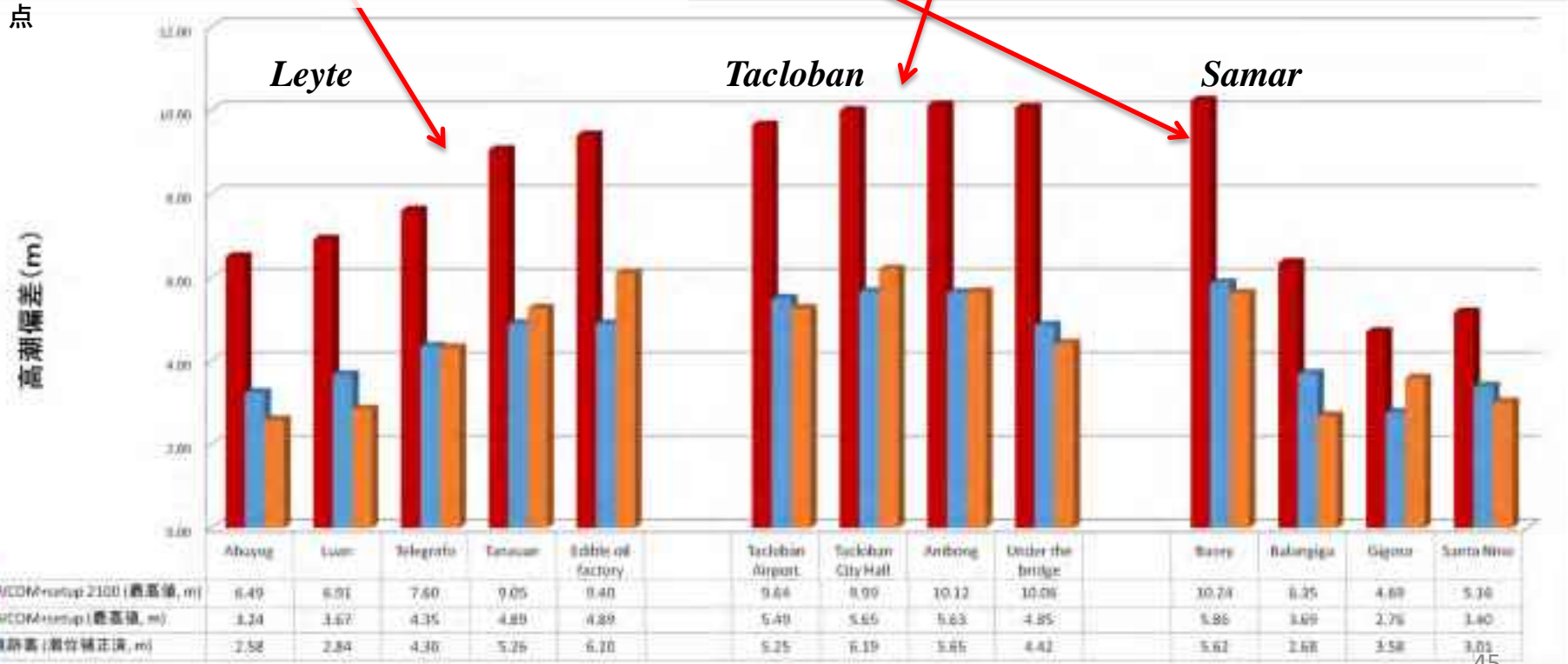


図: レイテ湾の各地点における計算結果と痕跡高 (2100年条件)

インドネシア・スラウェシ島地震津波被害

(調査実施日:2018年10月27日-31日)

概要

- 2018年9月28日18時02分(現地時間), インドネシア・スラウェシ島のパルにて Mw7.5の地震が発生, その後パル沿岸に津波が来襲
- 死者2,081人, 行方不明者1309人(2018年10月26日現在)
- 横ずれ断層により大きな津波が発生(海底地すべりの可能性が指摘)



Tsunami Survey Team



Members of Tsunami Survey Team 13 members

- Prof. Tomoya Shibayama Team Leader, Waseda University, Japan
- Prof. Miguel Esteban Waseda University, Japan
- Dr. Tomoyuki Takabatake Waseda University, Japan
- Mr. Yuta Nishida Waseda University, Japan
- Dr. Takahito Mikami Tokyo City University, Japan
- Dr. Ryota Nakamura Toyohashi University of Technology, Japan
- Dr. Hendra Achiari Bandung Institute of Technology, Indonesia
- Mr. Muhamad Fadel Hidayat Marzuki Bandung Institute of Technology, Indonesia
- Prof. Rusli State Institute for Islamic Studies Palu, Indonesia
- Dr. Abdul Gafur Marzuki State Institute for Islamic Studies Palu, Indonesia
- Prof. Ian Nicol Robertson University of Hawaii, USA
- Mr. Jacob Stolle University of Ottawa, Canada
- Mr. Clemens Krautwald Technical University of Braunschweig, Germany

Sulawesi Tsunami: Methods Used in the Field Survey

- 1) Survey of tsunami inundation height distribution
- 2) Interviews and questionnaire survey to residents on Tsunami behaviour and their evacuation
- 3) Three-dimensional image processing by using a drone
- 4) Sonner sounding of shallow water bathymetry in Palu Bay
- 5) Survey of local scour around structures and breaking mechanism of broken structures and buildings.

Sulawesi Tsunami: Study Location

USGS (2018)



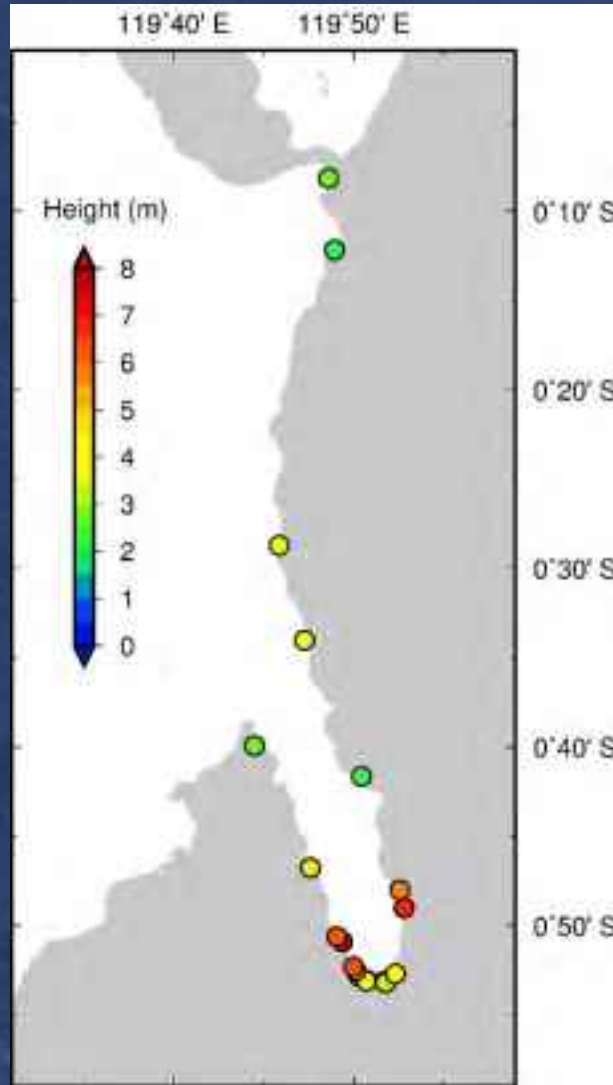
Introduction

Field Investigation of 2018 Palu City Tsunami

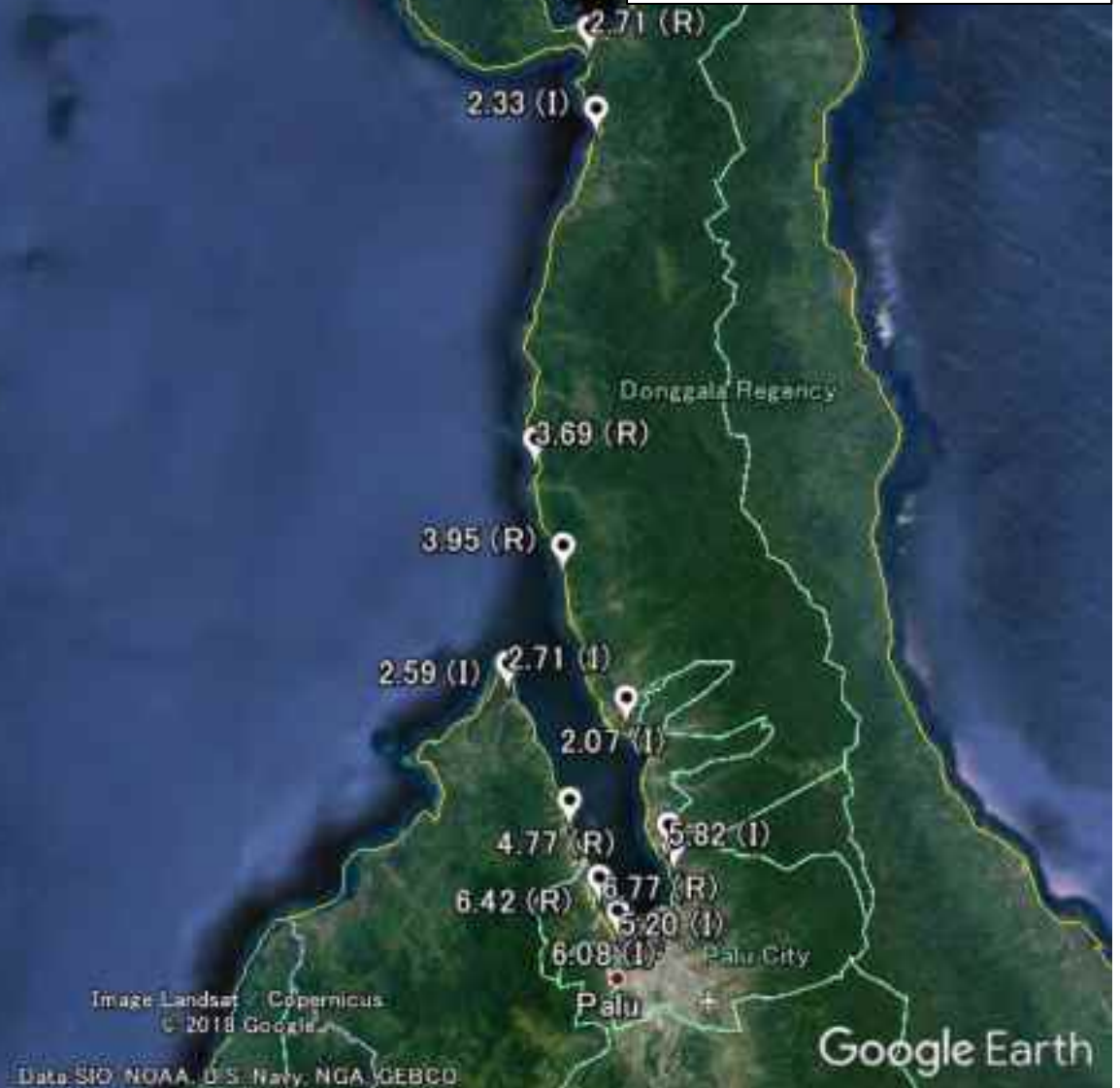
Sulawesi Tsunami: Earthquake Properties

Parameter	Value
Magnitude	7.5 M _{ww} (+/- 0.1)
Earthquake Epicenter	0.178° S 119.840° E (+/- 5.6 km)
Depth	10 km +/- 1.8 km
Time of Occurrence	28.09.2018 10:02:43.480 UTC
Rupture Velocity	4.0 km/s
Fault Area	150 km × 30 km
Type of Fault	Strike-slip
Involved Plates	Sunda Tectonic Plate - Molucca Sea Microplate

Sulawesi Tsunami: Measurement Survey Results



R: Run-up height (m)
I: Inundation height (m)



Sulawesi Tsunami: Wani, Donggala

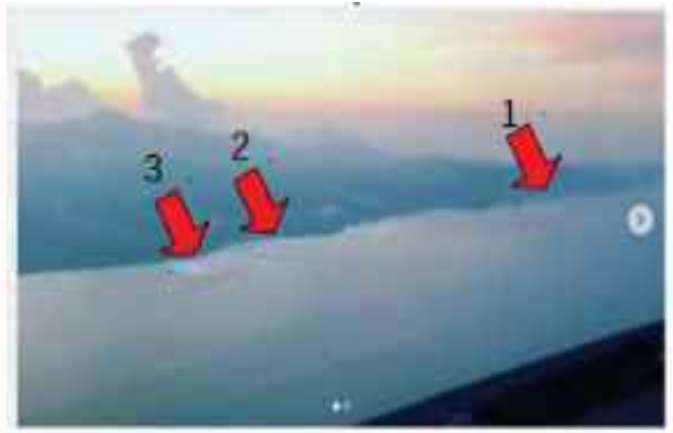


Sulawesi Tsunami: IAIN Palu campus



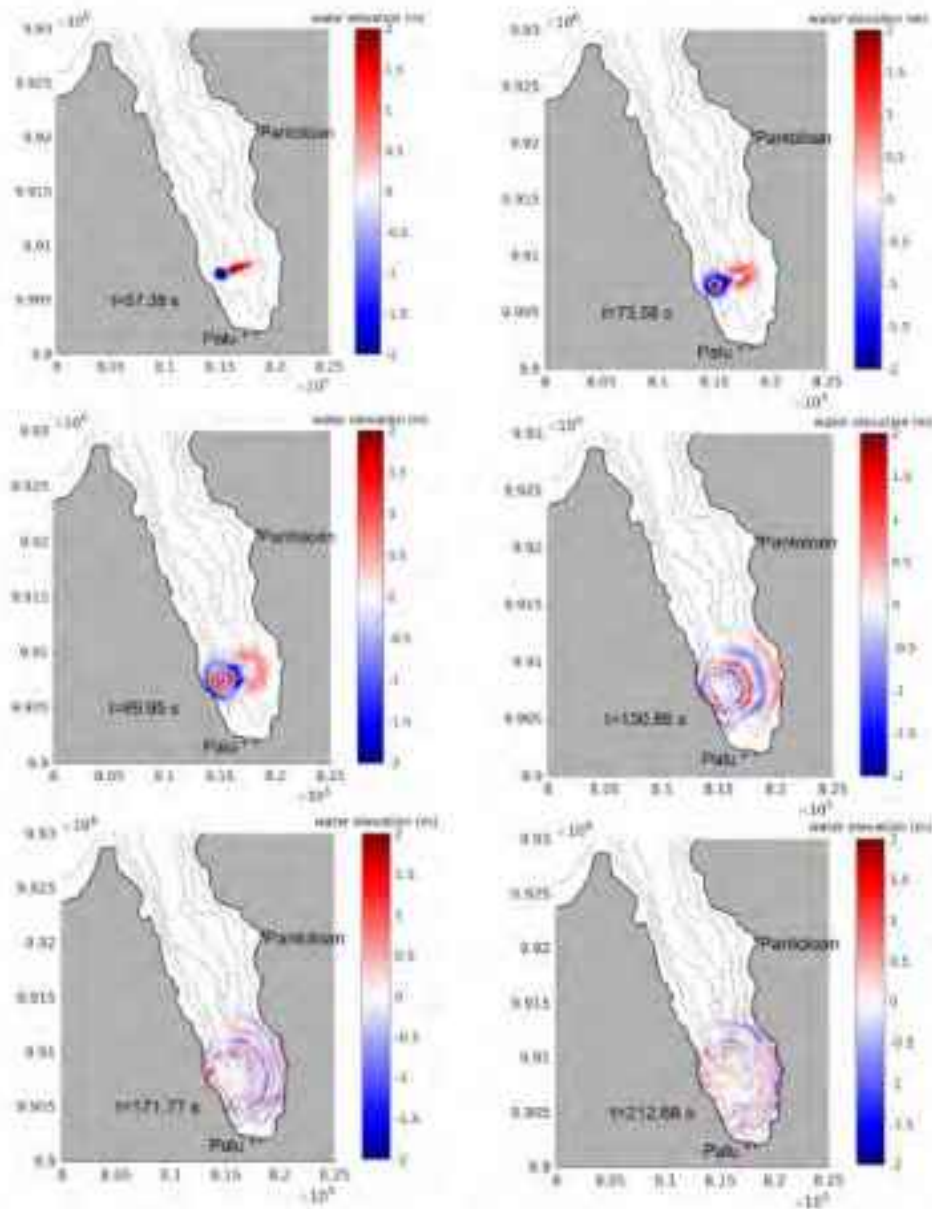
(2) Due to Landslide

Interview to the pilot of Lion Air who observed waves from his airplane.



Pictures of tsunami waves being generated by submarine landslides. They were obtained from a video by Mr. Ricosetta Mafella, at a time when his flight Batik 6321 was at 5000ft.

(2) Tsunami Generation due to Landslide



An Example of Tsunami Generation due to Landslide

Aránguiz, Shibayama et al., 2018

インドネシア スンダ海峡津波被害調査報告

概要

- 2018年12月22日21時30分(現地時間), インドネシア・スンダ海峡周辺の沿岸コミュニティに津波が来襲
- 死者431人, 行方不明者15人, 負傷者46,000人(2019年12月30日現在)
- 津波警報が発令することなく津波が来襲(事前に大きな地震の発生なし)
- クラカタウ火山の噴火(山体崩壊)が津波発生の原因と考えられている



Field Survey: Sunda Strait Tsunami, August 2019

Waseda University and Institut Teknologi Sumatera Team:

- Prof. Shibayama (Team Leader)
- Prof. Esteban, Dr. Achiari, Dr. Takabatake, Dr. Mikami, Mr. Panalaran, Mr. Gelfi, Dr. Nakamura, Dr. Chadwick, Mr. Nishida, Mr. Inagaki, Mr. Oizumi, Mr. Nurisman, Mr. Fauzi, Ms. Tarigan, Ms. Kencan

Survey Team (January 12 to 13, 2019)



Survey Team (January 14-17, 2019)



Survey Team (August 15-18, 2019)



Contributing Members for Research

■ Faculty

- Prof. Tomoya Shibayama *1)
- Prof. Miguel Esteban *1)
- Dr. Hendra Achiari *2), 3)
- Dr. Tomoyuki Takabatake *1)
- Dr. Takahito Mikami *4)
- Mr. Satriyo Panalaran *3)
- Mr. Mustarakh Gelfi *3)
- Dr. Ryota Nakamura *5)
- Dr. Christopher Chadwick *6)

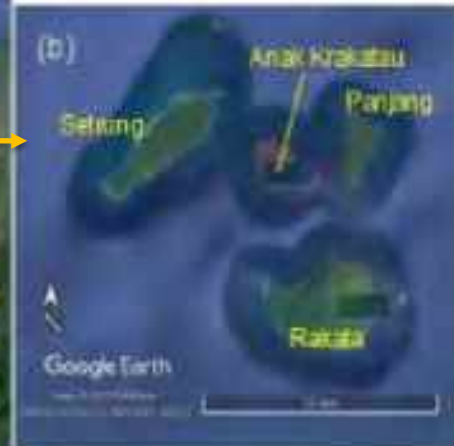
■ Students

- Mr. Yuta Nishida *1)
- Mr. Naoto Inagaki *1)
- Mr. Kota Oizumi *5)

Affiliations

- 1) Waseda University (Japan)
- 2) Institut Teknologi Bandung (Indonesia)
- 3) Institut Teknologi Sumatera (Indonesia)
- 4) Tokyo City University (Japan)
- 5) Niigata University (Japan)
- 6) Liverpool John Moores University (U.K.)

Sunda Strait Tsunami: Location of Sunda Strait



Sunda Strait Tsunami: Field Surveys (13-17th January, 2019)

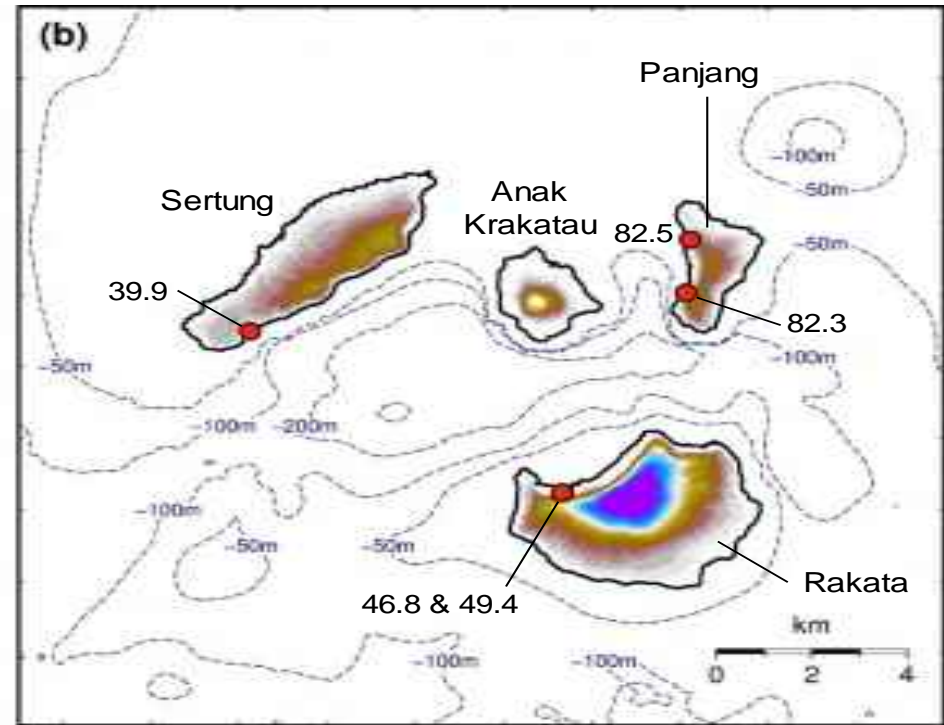
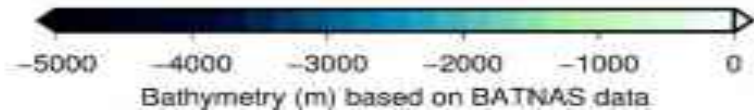
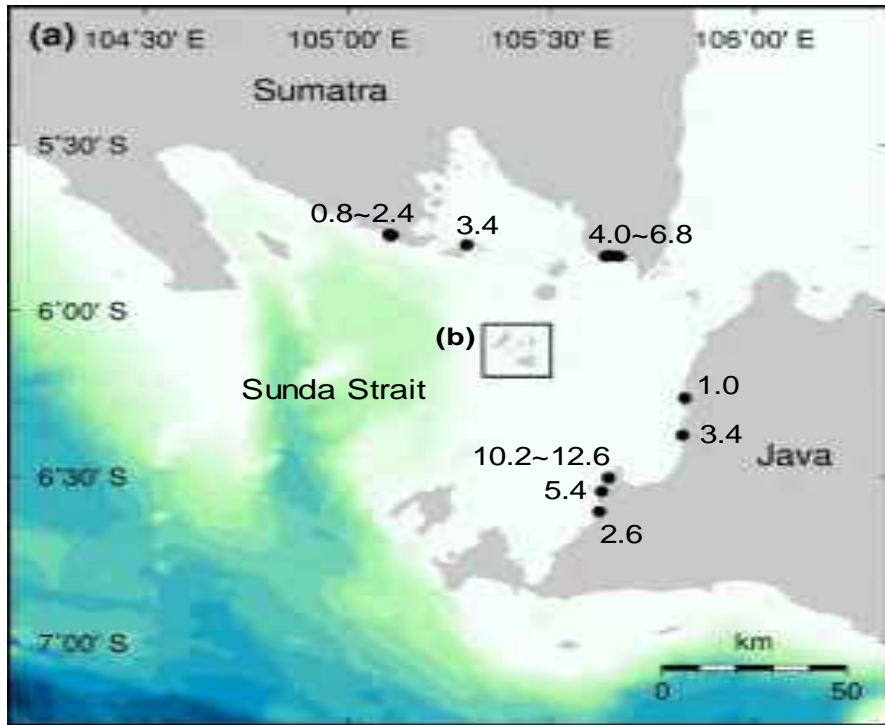


Recording of tsunami damage mechanisms.



Questionnaire survey on tsunami awareness and evacuation behaviour (administered questionnaire, n=104, 34 questions).

Sunda Strait Tsunami: Tsunami inundation and run-ups



Sunda Strait Tsunami: Java Island



Sunda Strait Tsunami: Cipenyu Village



Run-up height was 12.7m.



A half of building was broken.



The whole area was swept away.⁶⁴

Sunda Strait Tsunami: Pulau Sertung

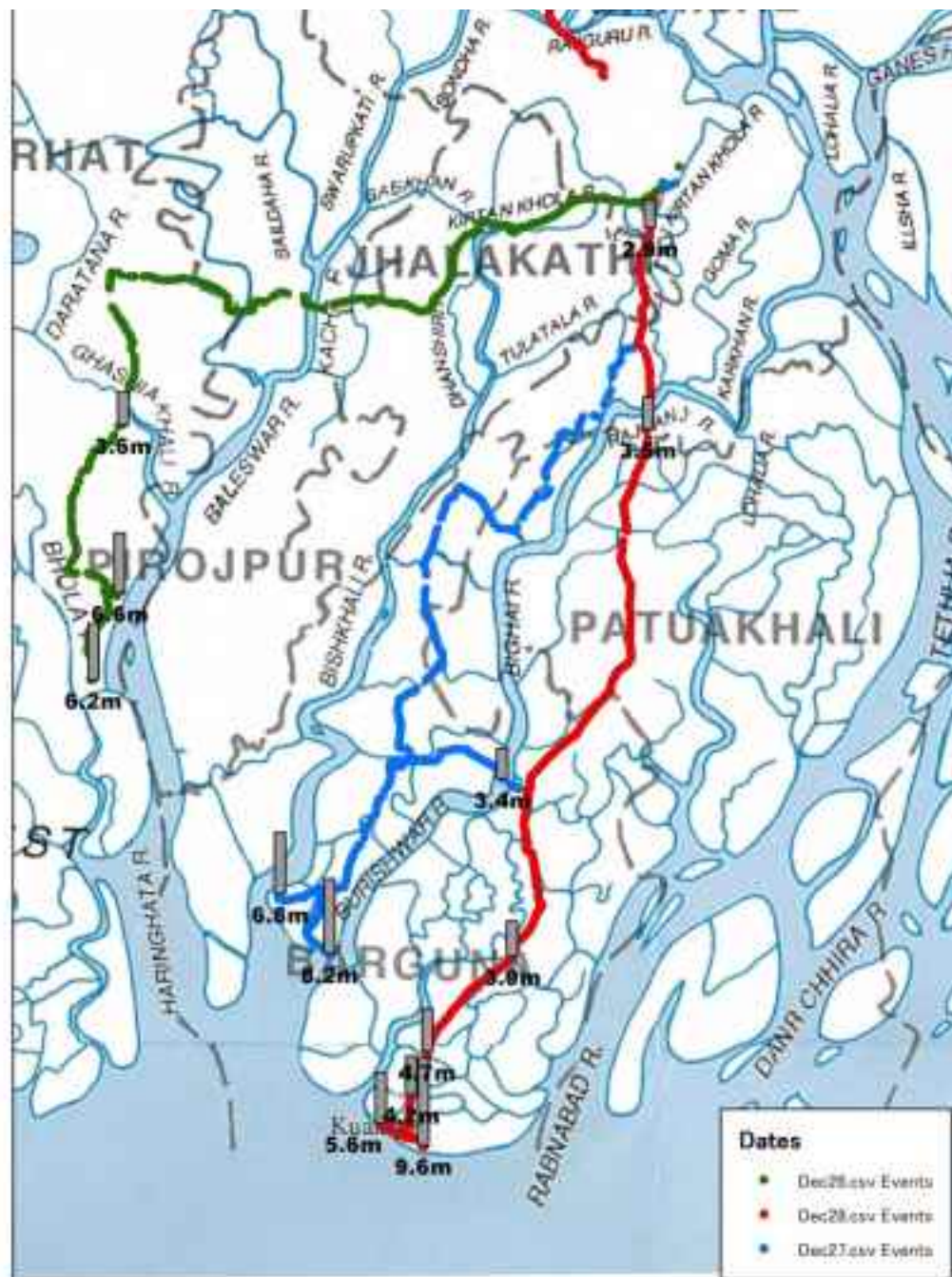
Pulau Sertung



サイクロンSidrによるバングラデシュ海岸・河川 高潮災害の現地調査

柴山知也 田島芳満 柿沼太郎 信岡尚道 安田誠宏
Raquib Ahsan, Mizanur Rahman, M. Shariful Islam







シェルターは有効であるが、偏在している。地元の人々からは、「サイクロンシェルターまでは遠く離れている。いくつか地域にシェルターは、あとは3つか4つ必要」との要望が寄せられた。

高潮が段波を伴って来襲してきたという目撃証言が多く聞かれた。段波の形成メカニズムや、段波による流体力を特に勘案して高潮対策を行う必要がある。

2012年ハリケーンサンディによる高潮災害の ニューヨークにおける現地調査に基づく 臨海都市域の浸水災害と減災策に関する考察

早稲田大学大学院創造理工学研究科

早稲田大学理工学術院

東京大学大学院新領域創成科学研究科

三上 貴仁

柴山 知也

Miguel Esteban

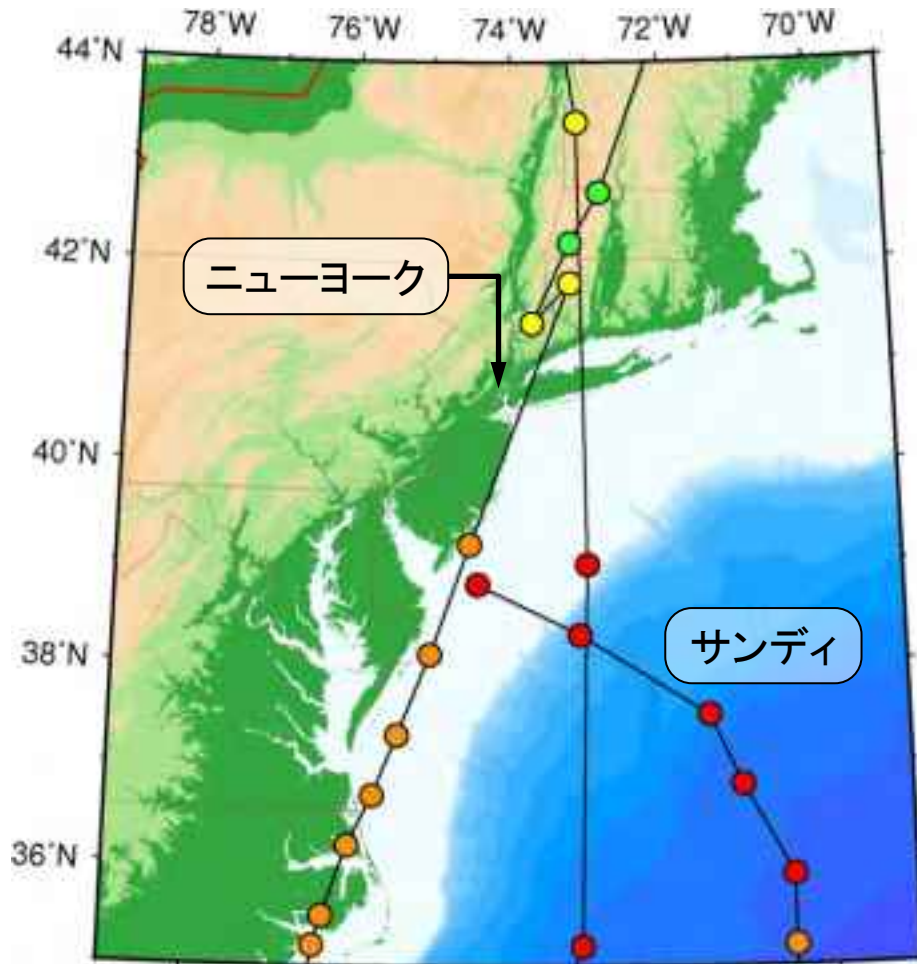


WASEDA University

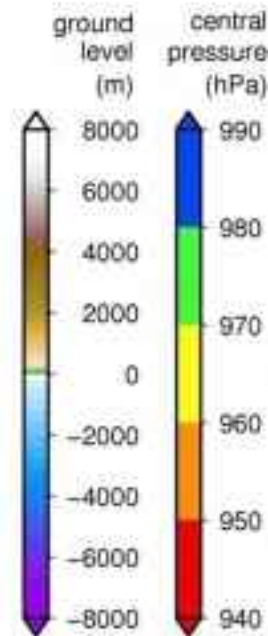
Department of Civil and Environmental Engineering

ハリケーンサンディとそれに伴う高潮の特徴

ハリケーンサンディの経路



- 1938年や2011年のとは違う経路.
- サンディはニューヨークにとって高潮が発生しやすい経路.



高潮による浸水被害に関する現地調査

現地調査の結果 — 痕跡高

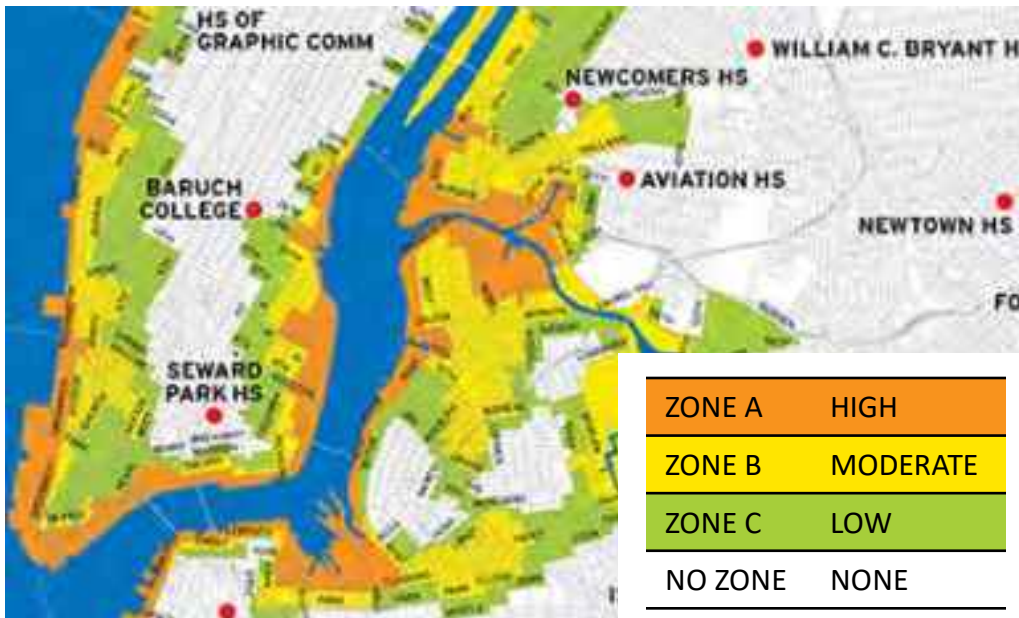
- マンハッタン地区で2.5mから3mの浸水高.
- スタテン島の南部で4m前後の浸水高.



ニューヨーク市のサンディへの対応

ニューヨーク市の対応

- Zone A(浸水可能性の高い標高の低い地域)の住民への避難措置
- 地下鉄とバスの運休(ハリケーン上陸の前日から)
- 2011年ハリケーンアイリーの経験



Let me remind you that during **Hurricane Irene**, these areas were put under a mandatory evacuation order. (Oct. 26, Mayor Bloomberg)

The MTA last suspended service during **Tropical Storm Irene** in August 2011, when it successfully helped people get to safety before the storm (Oct. 26, mta.info)

出典: NYC Hazards: Hurricane Evacuation Zones
http://www.nyc.gov/html/oem/html/hazards/storms_evaczones.shtml

ニューヨーク市：避難が前提（氾濫域が限られている）

→防潮堤では護らない

→避難のタイムライン

東京：防潮堤で護る

ゼロメートル地帯が広い 116 km²

避難人口が多い 176万人

水平避難は困難 → 垂直避難（鉄筋コンク

リートビルの3階以上に避難）

地下空間、地下鉄への浸水

氾濫域に孤立した住民をどのように守るか

根室の高潮

中村、柴山ら(2015)

● 背景

2014年12月17日に発生した急速発達する低気圧は根室市街地に高潮被害をもたらした。

● 既往の研究・研究目的

台風により発生した高潮の研究は多々ある。しかし、急速発達する低気圧に伴う海洋現象の研究は森ら(2013)の暴波浪特性の研究があるが、高潮の研究はほとんどない。

急速発達する低気圧による高潮といった特別な事例を詳細に算定し、災害素因を評価することは、沿岸付近の防災力向上に必要である。

● 研究内容

①発生した低気圧の傾向、②高潮被災の現地調査、③数値モデルによる検討



図2-1 根室における現地調査の様子

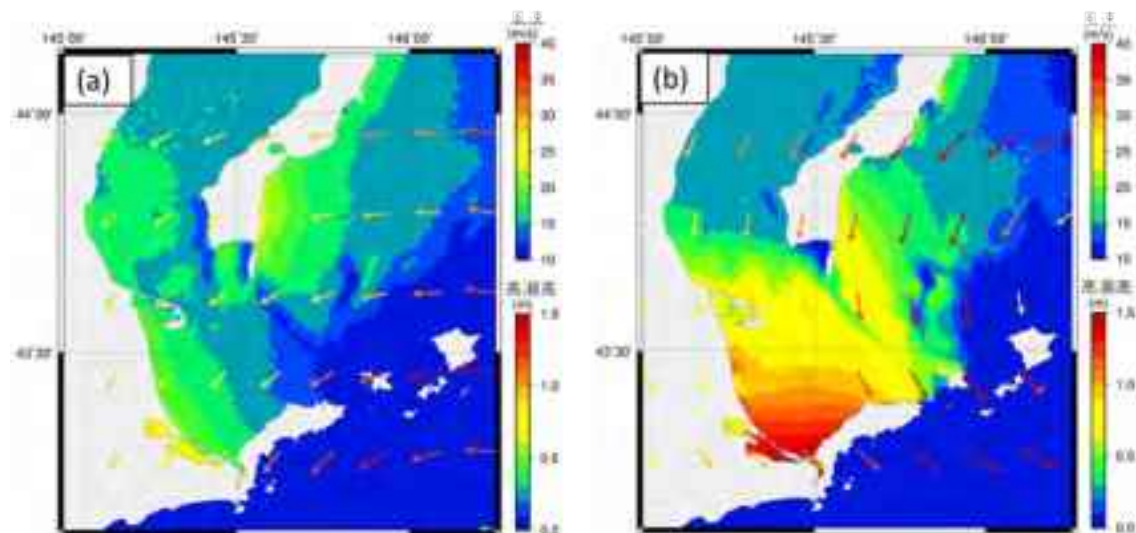


図2-2 海洋モデルFVCOMの計算結果

根室で生じた低気圧と高潮被害について

● 2014/2015年冬季の低気圧の傾向(気象庁, 2015)
中心示度が980hPaを下回る低気圧が北海道の付近を通過する気象現象が例年より多く見受けられた。

● 根室に高潮をもたらした低気圧(気象庁, 2014)
2014年12月16日12時に日本海と四国の南部に存在した低気圧の規模は992hPa, 1002hpaであった(図-1)。
その後, 急速発達し, 17日の午前中に根室の東部の海上で, 中心示度は948hPaとなった(図-2)。

最大風速: 根室市納沙布市で 30.7 ms^{-1}

最大瞬間風速: 根室市弥栄町で 39.9 ms^{-1}

● 根室における高潮被害(気象庁, 2014)
根室では, 急速発達した低気圧の接近により, 17日午前中に潮位がTP+ 1.7 m ~ 1.9 mとなった。
高潮による住居の床上・床下浸水が発生した。

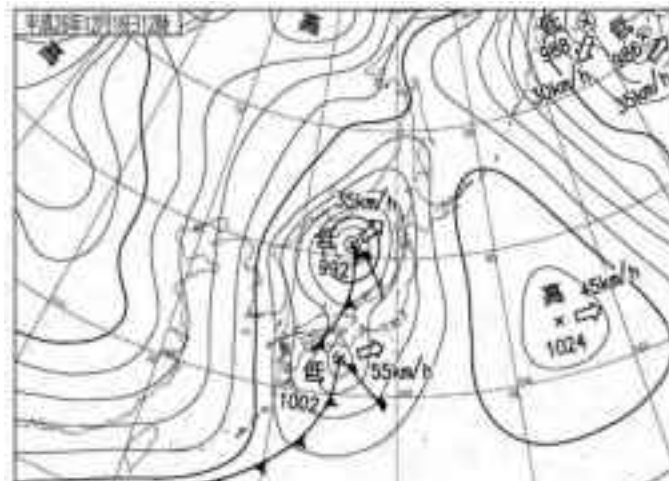


図3-1 気象庁速報天気図の一部抜粋⁶⁾
(12月16日の午前12時から17日午前12時)

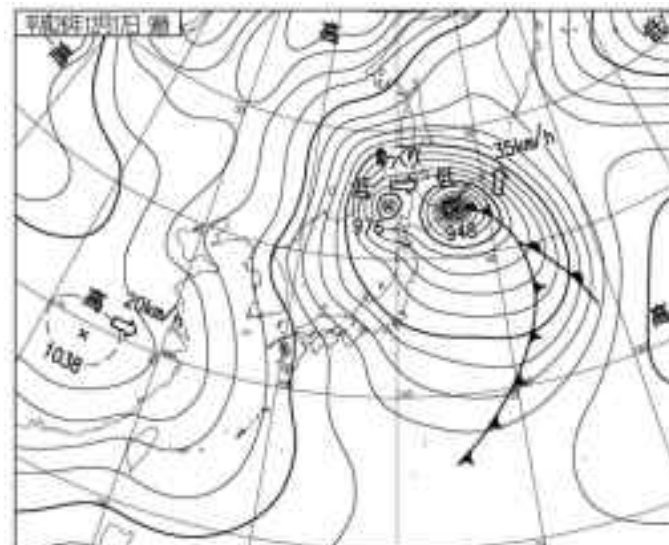


図3-2 気象庁速報天気図の一部抜粋⁶⁾
(12月17日の午前6時)

根室の高潮被害調査

ソーシャルネットワークサービスに投稿された写真で、これらの地点で高潮の浸水が見られたという情報を得た。

図 4-2: 根室付近の概要 (Google Mapより作成)

図 4-1: 北海道の東部の釧路, 根室付近 (Google Mapより作成)

根室の高潮被害調査



図 5-1: 建造物内部の浸水被害を計測している様子



図 5-2: 弥生町交差点付近での計測調査の様子



図 5-3: 弥生町交差点付近の様子(奥が陸地, 手前が海)

- 計測日は被害発生日から2日後であったため、浸水跡がはっきりと残っていた。
- 建造物の破壊は特に見られなかった。
- 住民の話では、腰の高さくらいまでの浸水が見られた。

数値計算結果(高潮)

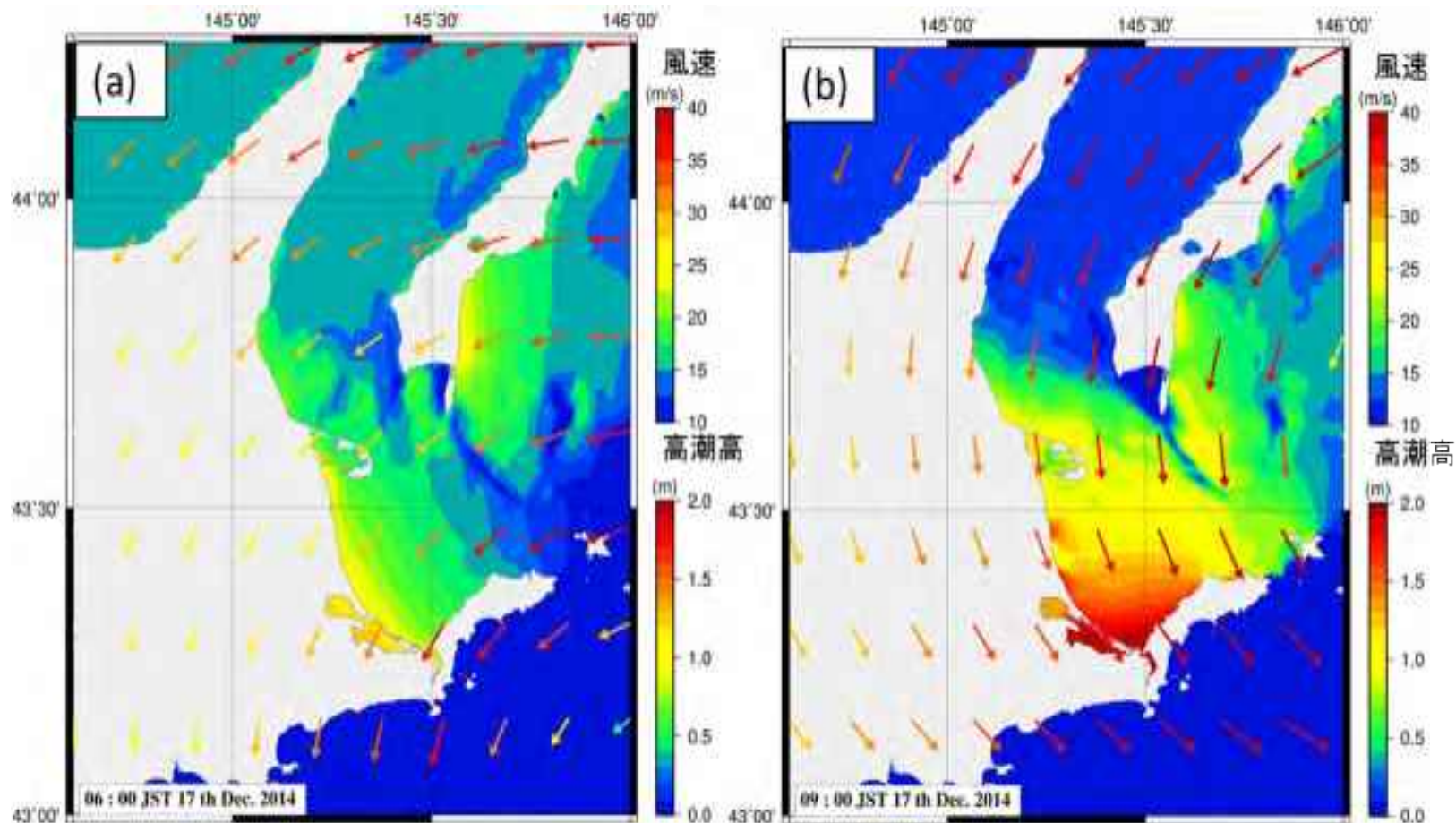
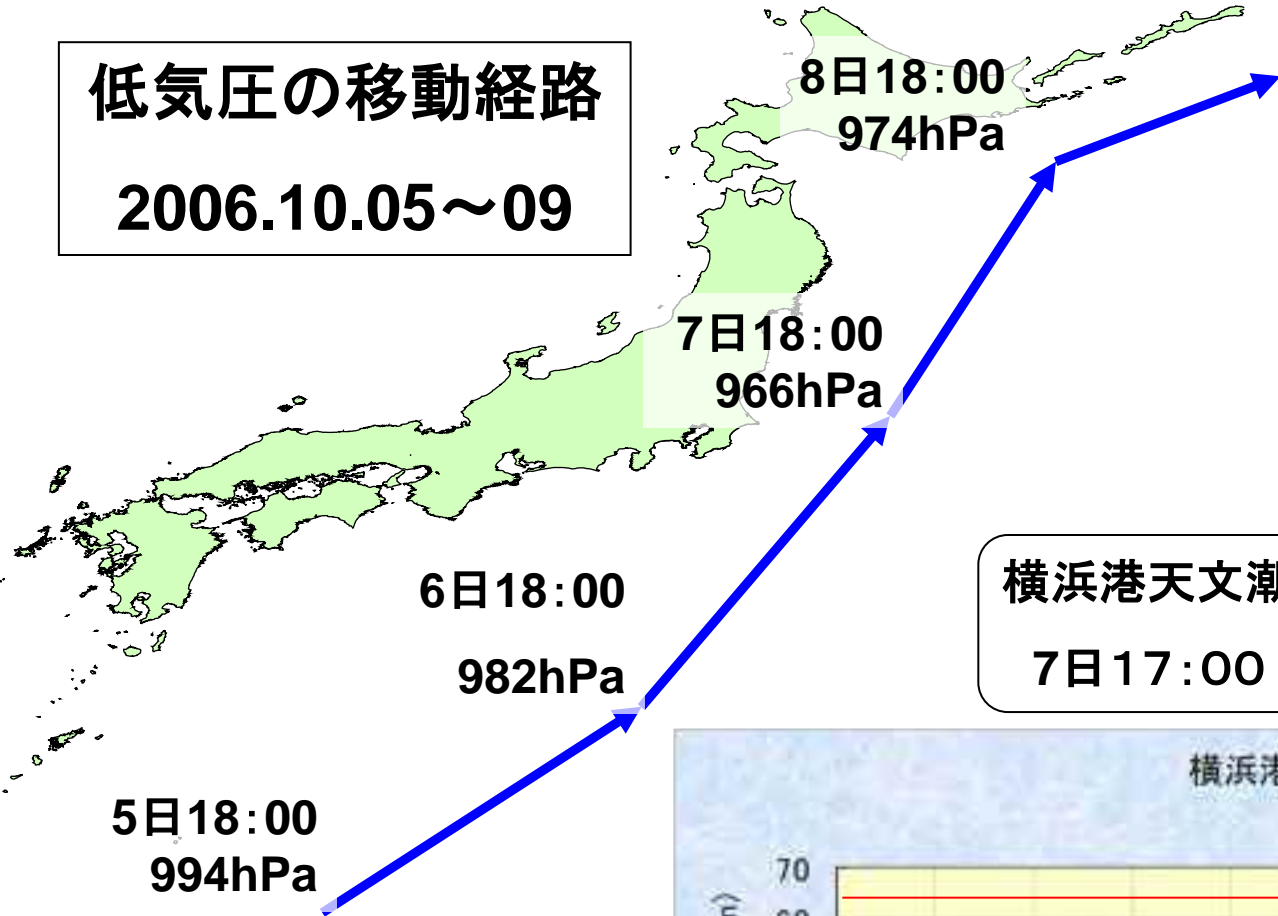


図13 TCボーガスを用いた、最大風速半径80kmの場合における、根室周辺の高潮偏差と風速(矢印の色が風速を示す) (a) 17日6時00分, (b) 17日9時00分

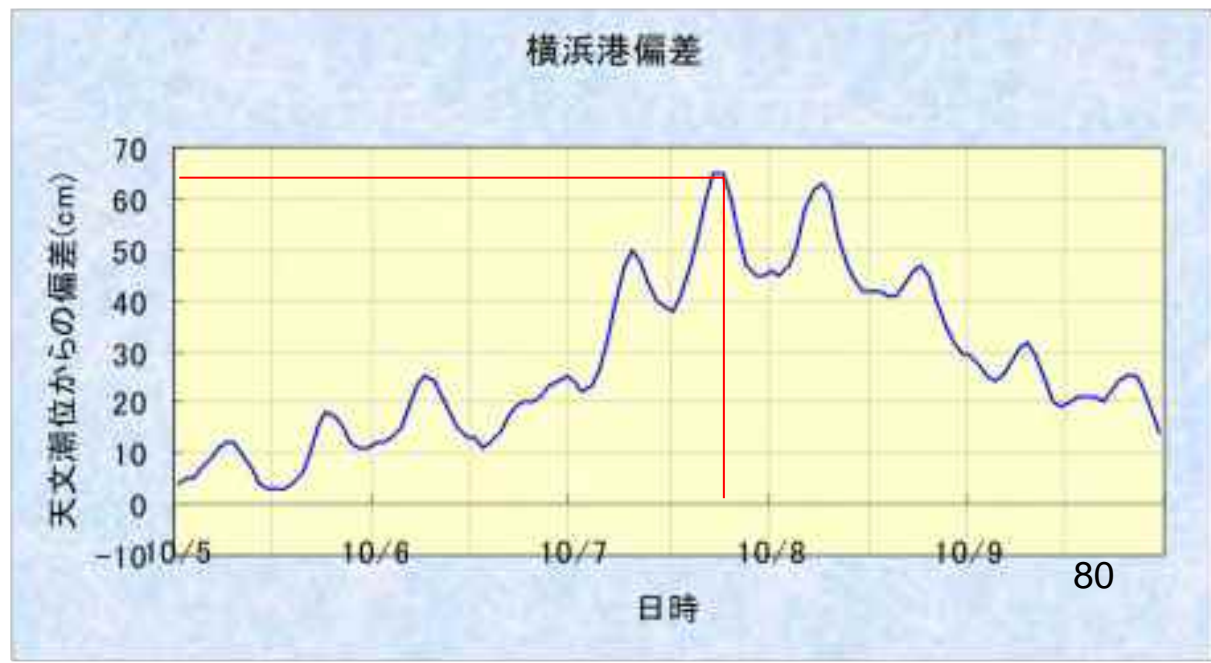
1. 東風が吹き、根室湾の水位が上昇した(a).
2. 北風に変わり、根室半島北部海域の水位が上昇した(b).

低気圧の移動経路

2006.10.05~09



横浜港天文潮位からの偏差
7日17:00 最大**65cm**





2006/10/8 横浜駅西口

横浜市内の被害

横浜駅西口・・・道路の冠水・非住家4棟冠水

大黒ふ頭・・・道路の冠水

〈大黒ふ頭冠水状況〉

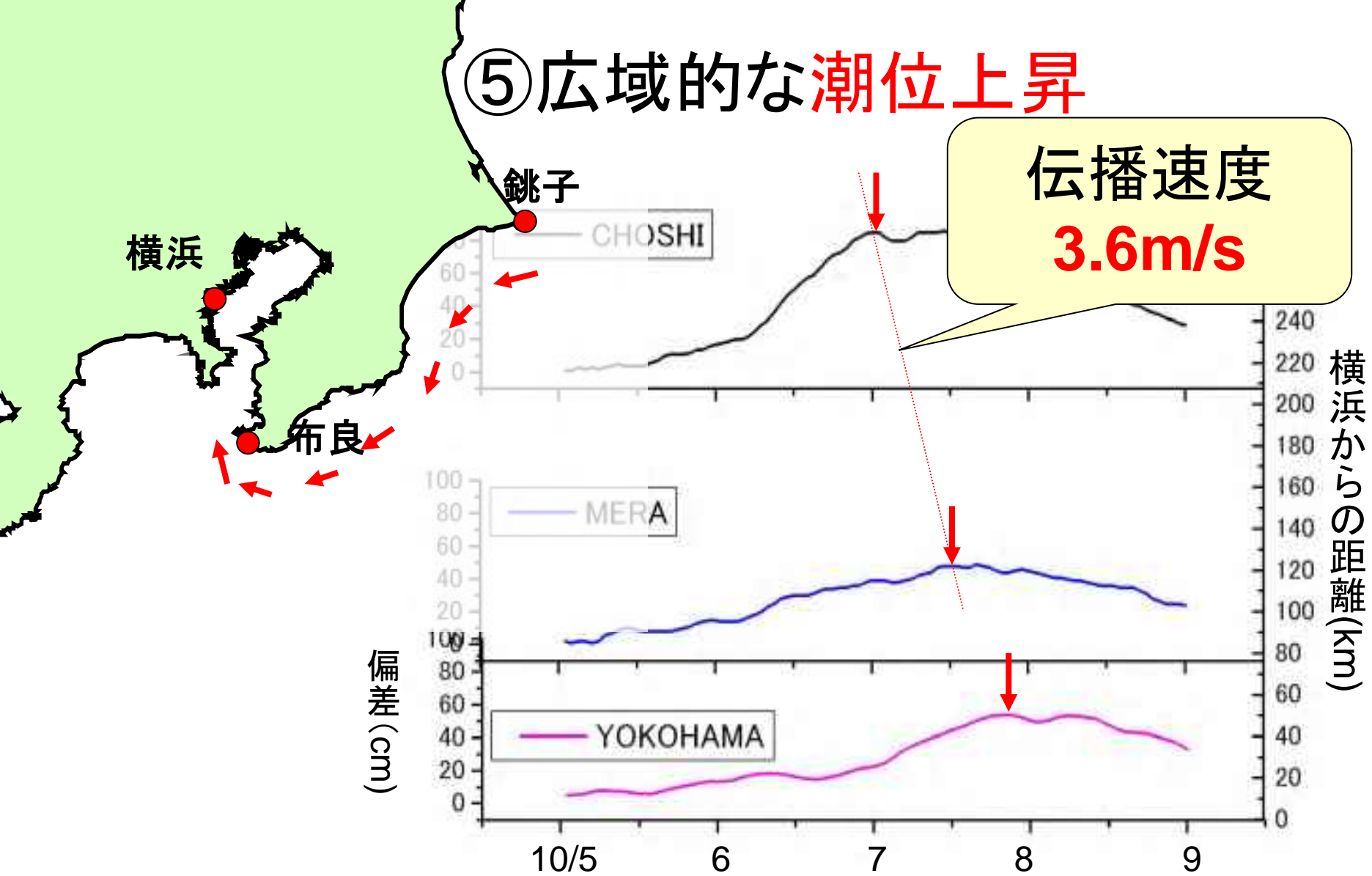


浸水時



通常時

⑤ 広域的な潮位上昇



水位変動が東から西に伝播



陸棚波