

2013 Typhoon Yolandaに伴う高潮の推算, および現地痕跡高との比較

早稲田大学理工学術院 教授:柴山 知也

早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻 修士課程 2年:大山 剛弘

早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻 修士課程 1年:中村 亮太

早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 4年:岩本 匠夢

本日の発表内容

- ◆2013年・台風Yolandaの概要
- ◆シミュレーション使用モデルについて
- ◆Yolandaシミュレーション結果

- ◆RCP8.5シナリオにおける台風の強大化について
- ◆参考文献

About 2013 Super-typhoon Yolanda

General data of Yolanda in the Philippines

Data	Value
Duration	2013-11-04 08:00 ~ 11-11 08:00(PST) ; 7 days
Maximum wind speed	87.5m/s , 315km/h (JTWC)
Minimum central pressure	895hPa
Casualties	5796, as of 7 Dec. (NDRRMC)
Number of affected people	Over 12 million (NDRRMC)



これまでに上陸した中で、
記録上最強の台風であった。

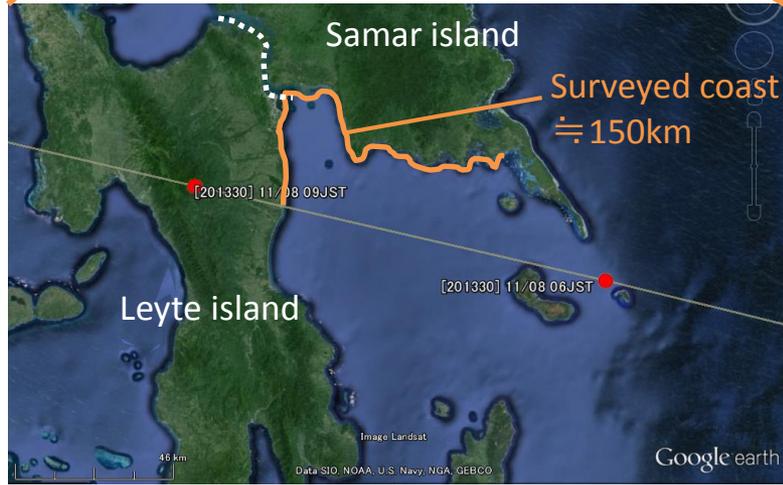


Fig. The track of typhoon Yolanda (Digital Typhoon, 2013)

Scenery in Tacloban after the hit of Yolanda



Tacloban city seen from a plane EPA, SABANGAN



On the way to Tacloban from Ormoc



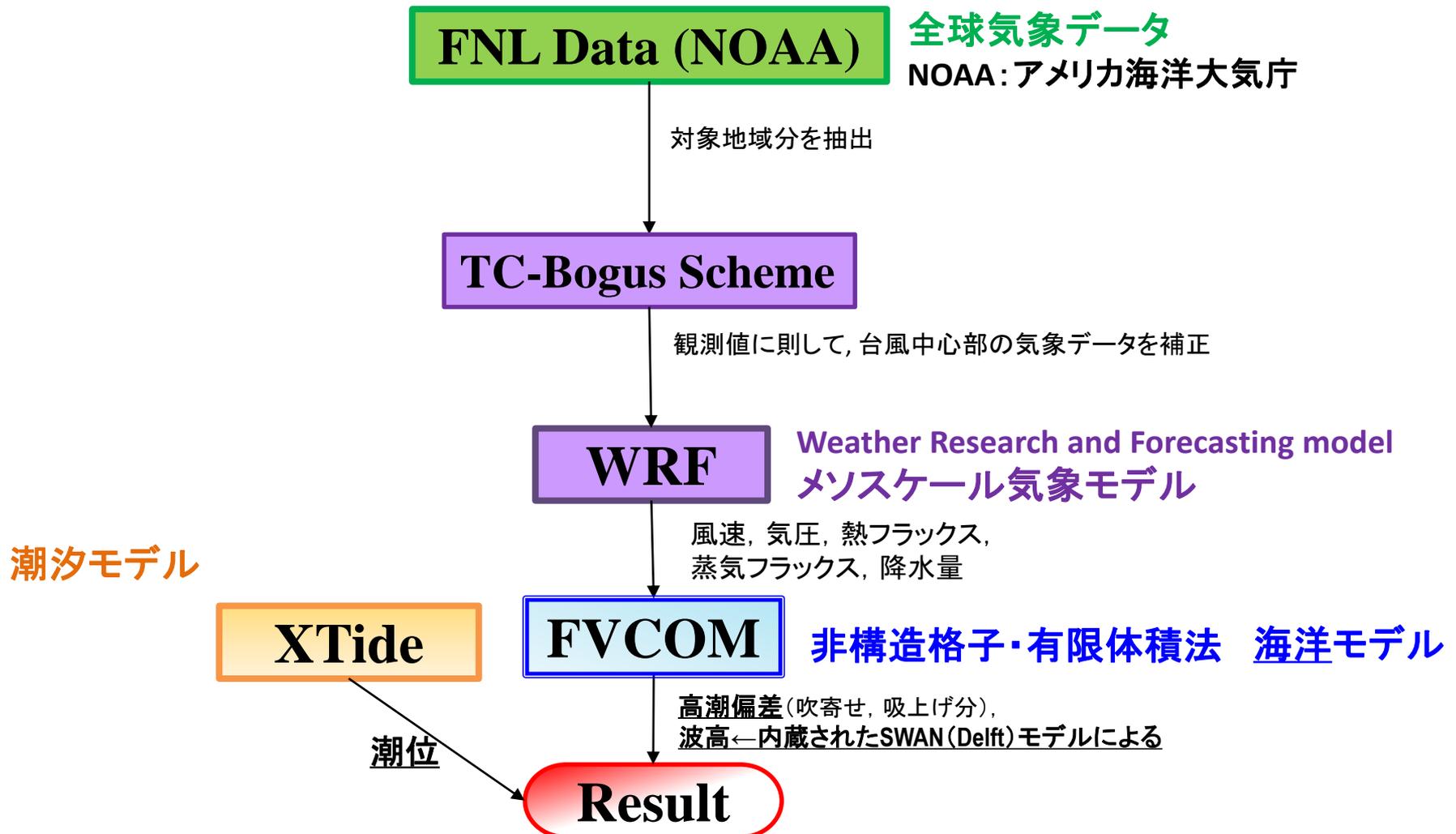
陸に打ち上げられた船



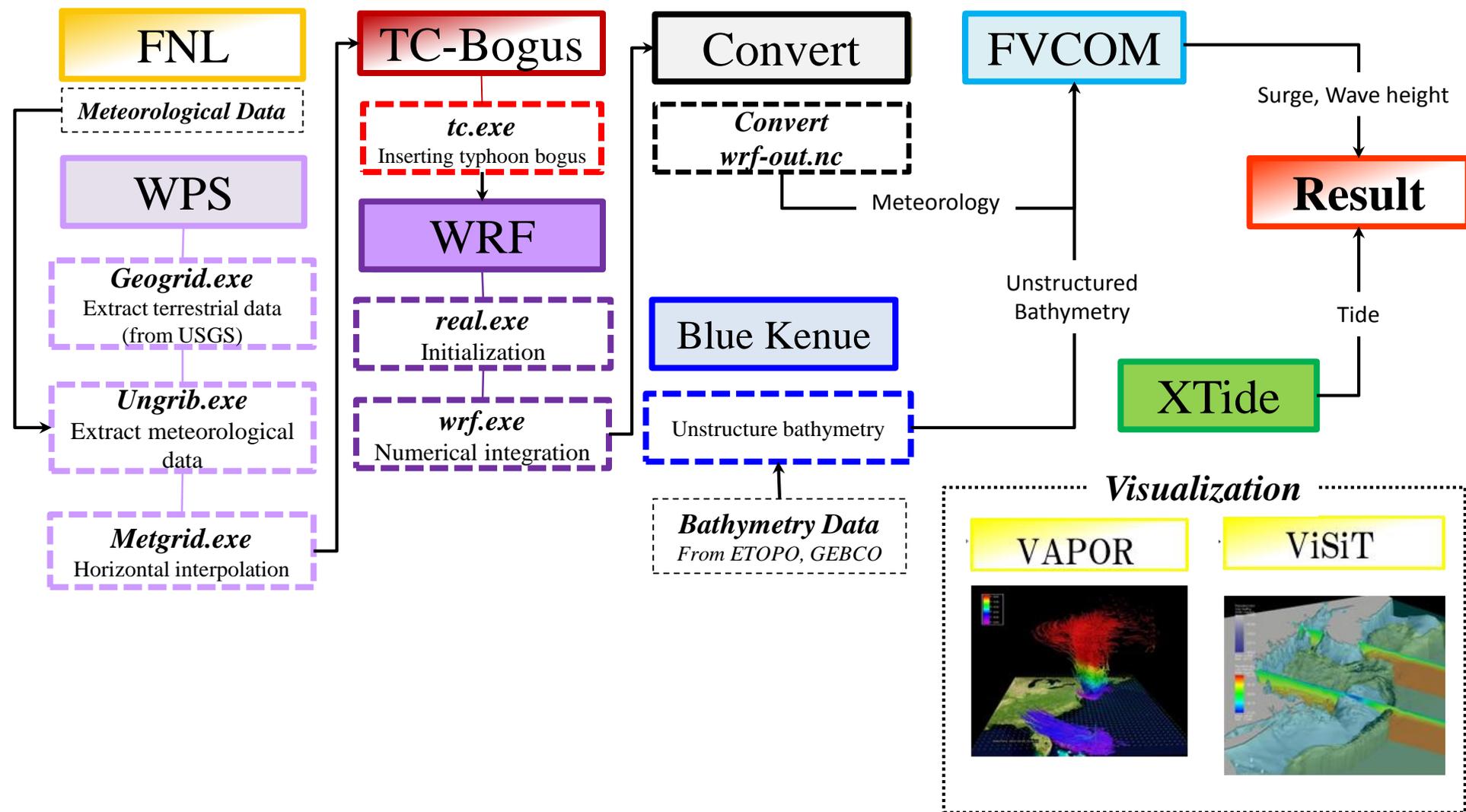
Two residents passing their house, Oxfam

◆シミュレーションに用いたモデルについて

WRF-FVCOM-XTide 統合モデル

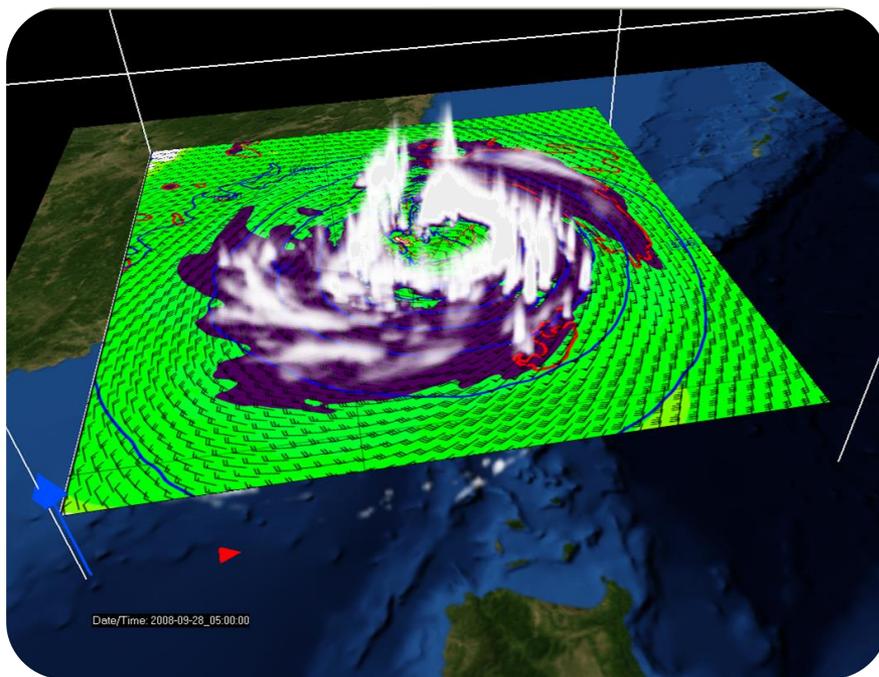


Model



WRF

- 次世代メソスケール気候予測モデル(数m~数千kmまで適用可能), 非静力学モデル
- アメリカ本国では, 実際の天気予報, 気候の長期予測に用いられている
- 本シミュレーションでは, Version 3.5(2013年4月発表)を用いた



WRFの主な支配方程式

運動方程式

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

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

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

質量保存則

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

ジオポテンシャル則

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

温位則

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

スカラー保存則

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

状態保存則

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

TC-Bogus Scheme

- ・台風による気象場をプログラムで設定
(1分平均の最大風速, 最大風速半径,
台風中心の緯度経度)
- ・元データ上の中心渦を取り除き,ランキン渦を挿入

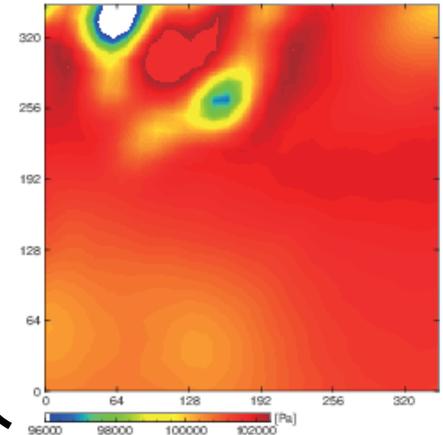


図:元の気象データ

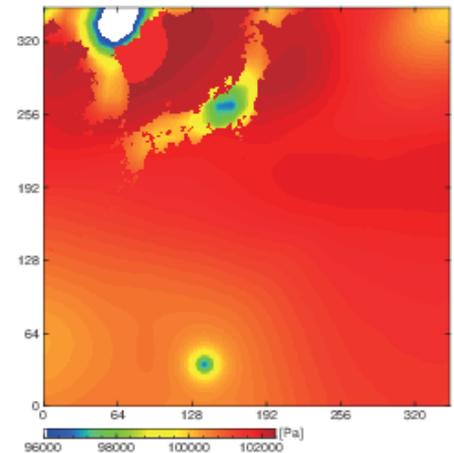
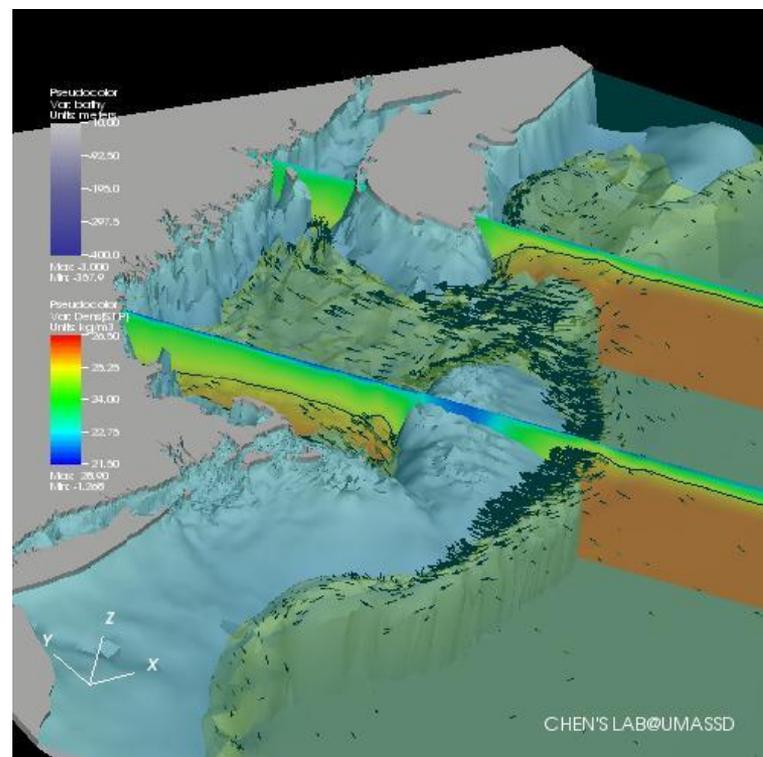
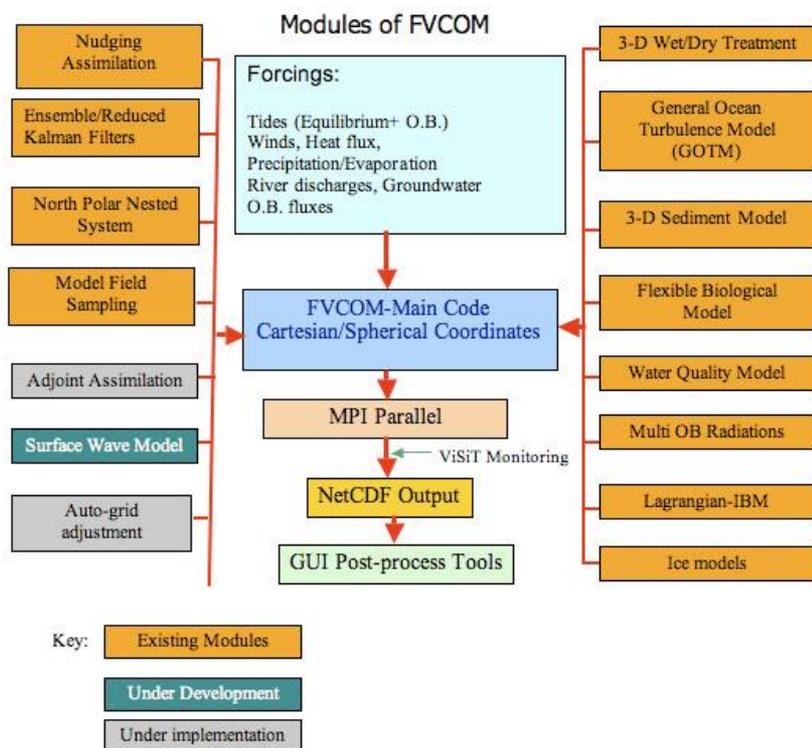


図:ランキン渦挿入後の
気象データ

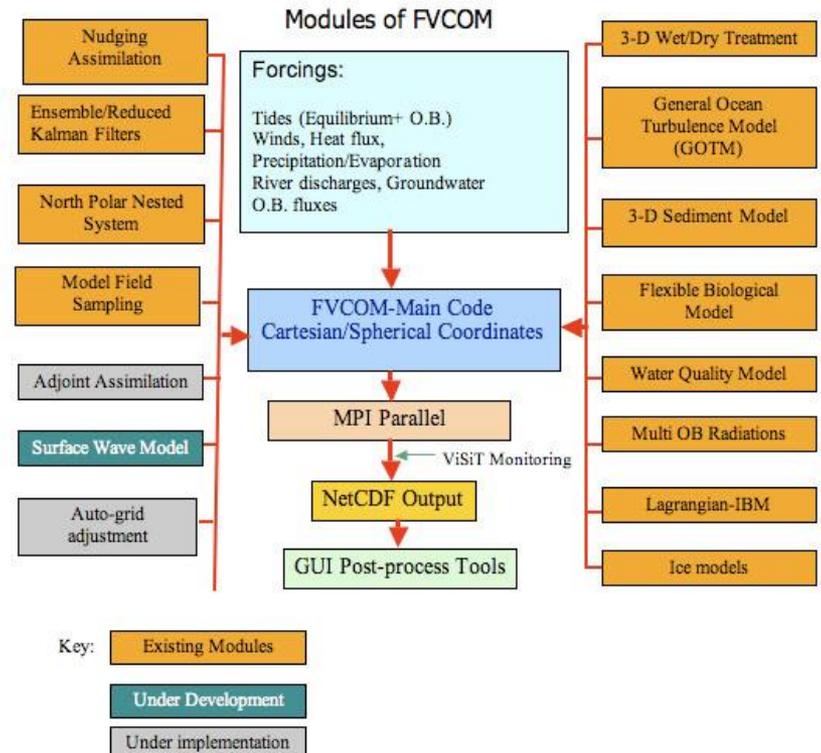
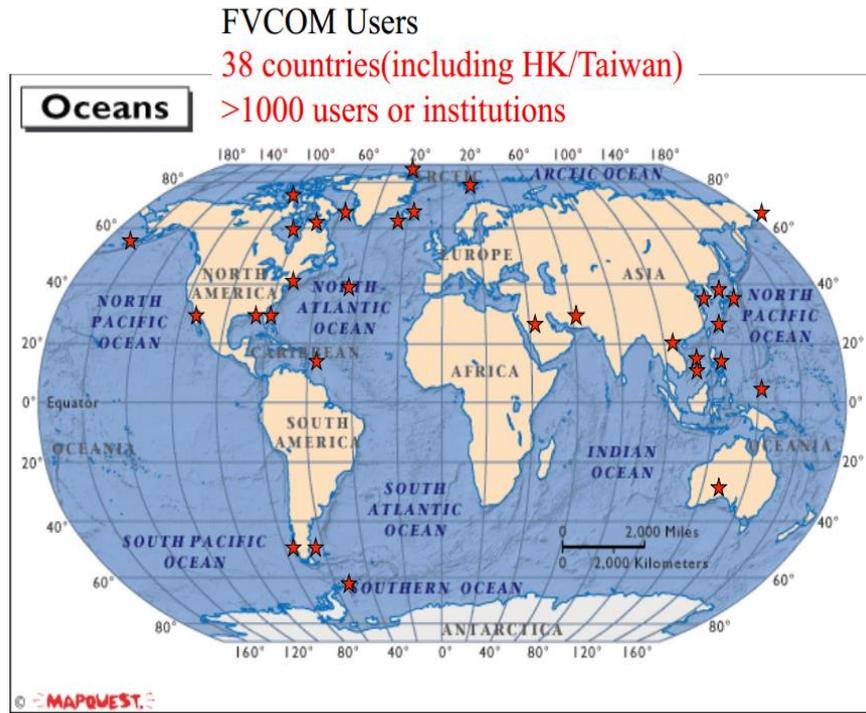
非構造格子 有限体積法海洋モデル FVCOM



◆シミュレーションに用いたモデルについて

FVCOMとは？

- オープンソース非構造格子有限体積法3-D海洋モデル (2006, Chen et al)
- 計算範囲の幅を広げるモジュールの開発を現在も行っている
- このモジュール作成に関して、各研究機関が参加している
- 全世界に約1000人, 研究機関のユーザーが存在する



Australia, Bangladesh, Brazil, Canada, Chile, China, Colombia, Denmark, Egypt, France, Germany, Hong Kong, Hungary, India, Indonesia, Iran, Israel, Italy, Jamaica, Japan, Korea, Kuwait, Malaysia, Mexico, Netherlands, New Zealand, Norway, Peru, Saudi Arabia, Singapore, Sweden, Taiwan, Thailand, Turkey, U.S., UK, Venezuela, Vietnam

◆シミュレーションに用いたモデルについて

FVCOM 支配方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + F_v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + F_w$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + F_T$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + F_S$$

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

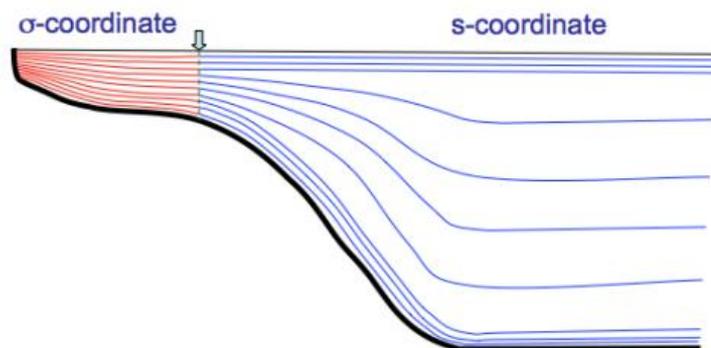
運動量保存

連続式

温度の式

塩分濃度の式

密度式



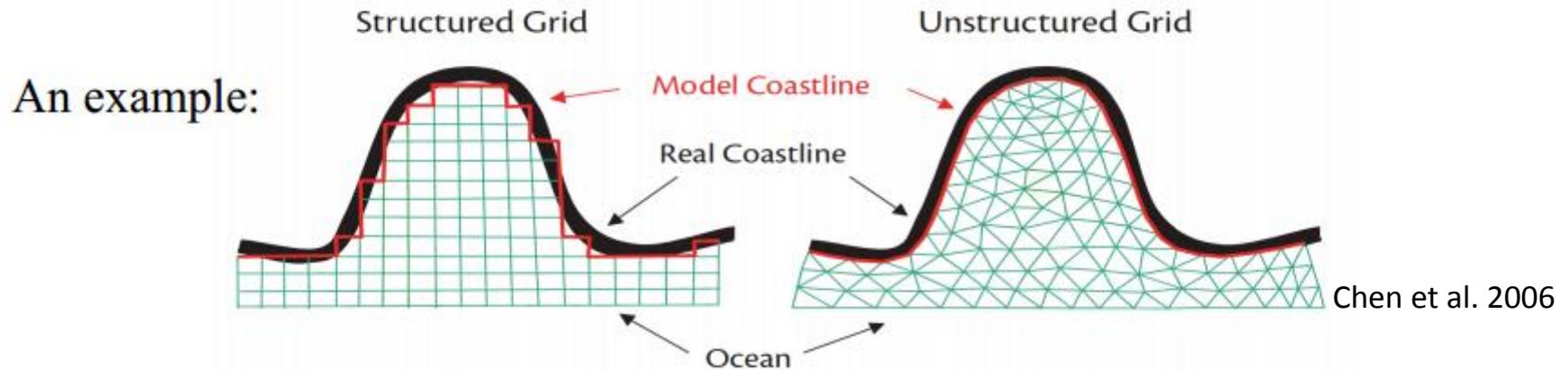
シグマ座標系

Fig. 2.3: An example of a hybrid coordinate consisting of σ - and s -coordinates. The dashed line indicates a transition location of two coordinates at which all layers are uniformly divided in the vertical.

非構造格子モデルの利点と弱点

1. 非構造格子

: 構造格子では不可能な, 大幅に忠実な地形再現が可能



2. 構造格子と非構造格子の比較

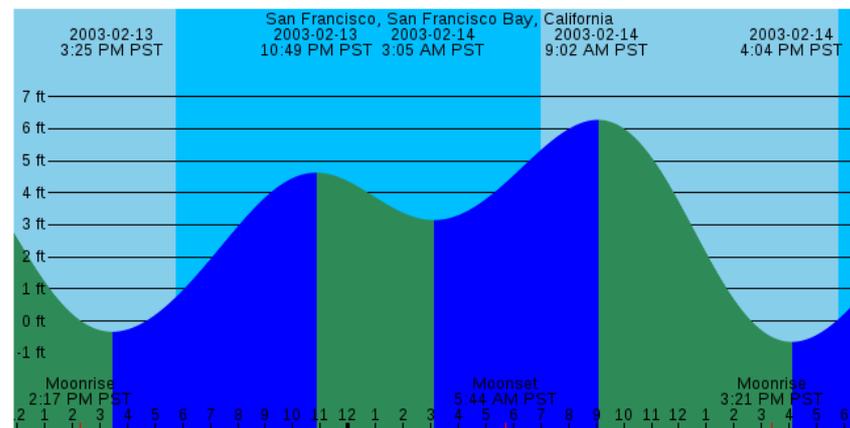
計算方法	構造格子	非構造格子
利点	計算時間が相対的に短い	三角形メッシュにより、複雑な地形を再現可能
弱点	複雑な地形の再現ができない	計算時間が相対的に長い

XTideについて

XTide(全球潮汐モデル)とは

- NOAA(アメリカ大気海洋局)が用いているのと同様のアルゴリズムで、David Flaterによって開発された潮位計算モデル
- 世界に9500の観測点を持ち、その観測結果と計算結果を同化して結果を出す
⇒ 任意の点、任意の時間での潮位を計算可能

XTide: Harmonic tide clock and tide predictor



◆ Yolandaシミュレーション結果

WRF計算条件

表: 計算条件

気象モデル	計算時間(PHT)	2013/11/7 2:00 -2013/11/10 2:00
	計算領域数	3
	ネスティング方法	2 way nesting (ドメイン間で相互に反映)
	投影法	メルカトル図法
	水平解像度	Domain1: 16.2km ² Domain2: 5.4km ² Domain3: 1.8km ²
	水平格子数	Domain1: 南北 280 × 東西 110 Domain2: 南北 91 × 東西 82 Domain3: 南北 115 × 東西 135
	(鉛直)大気層数	27
	計算間隔	10 秒
地形データ	USGS	



図: 計算領域の地形図

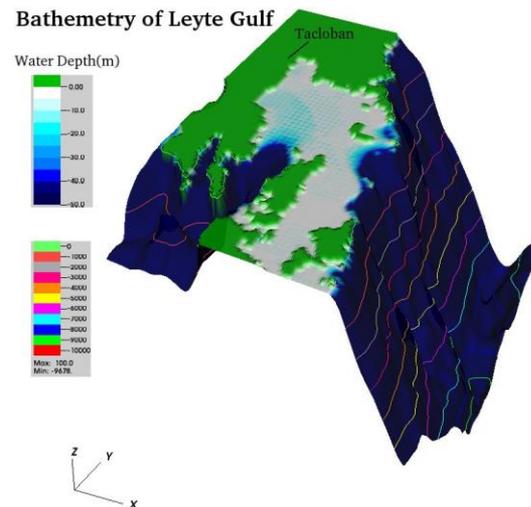


図: 最小計算領域の地形図

TC-BogusによるWRFの気象場再現性向上

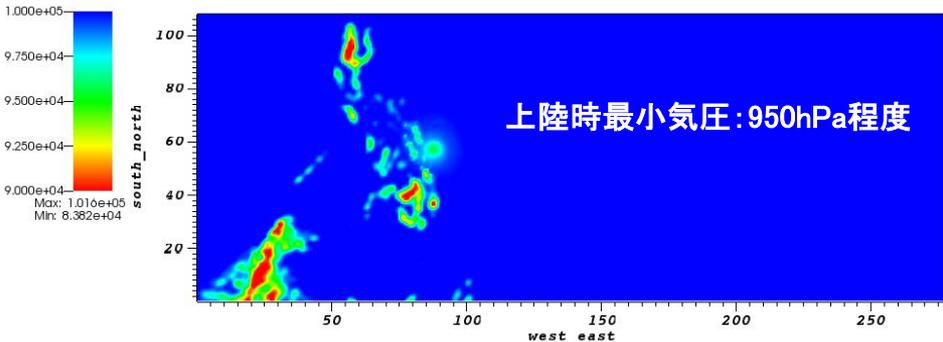


図: 11/7 6:00 時点 (PHT) の表面気圧分布
TC Bogus使用なし

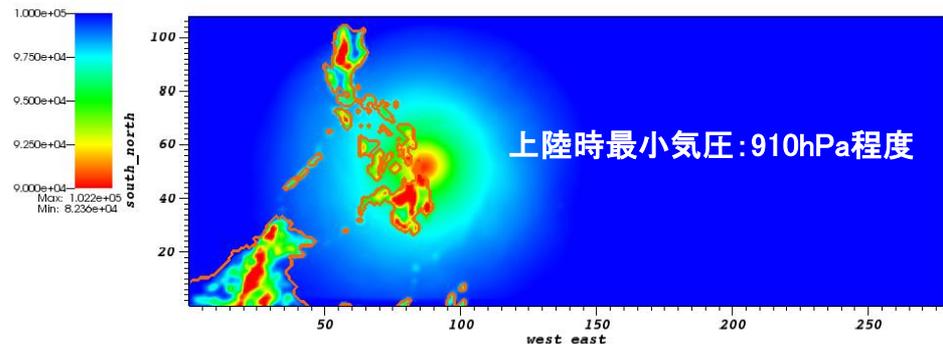


図: 11/7 6:00 時点 (PHT) の表面気圧分布
TC Bogus使用

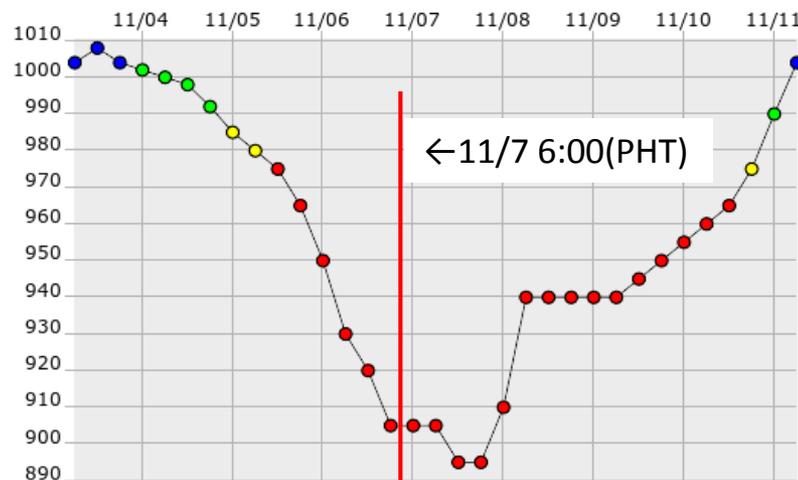


図: 中心気圧時系列グラフ (時間=UTC)
出典: デジタル台風

TC-BogusによるWRFの気象場再現性向上

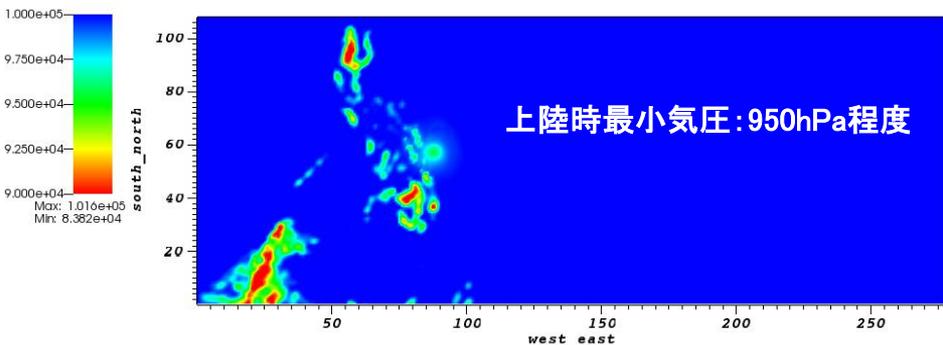


図: 11/7 6:00 時点 (PHT) の表面気圧分布
TC Bogus使用なし

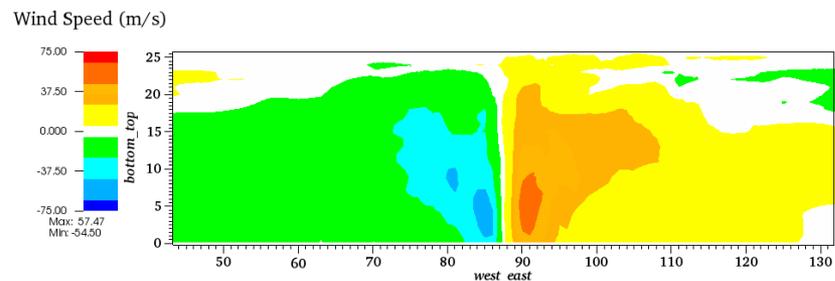


図: 台風の構造断面図
(南北方向の風速分布)

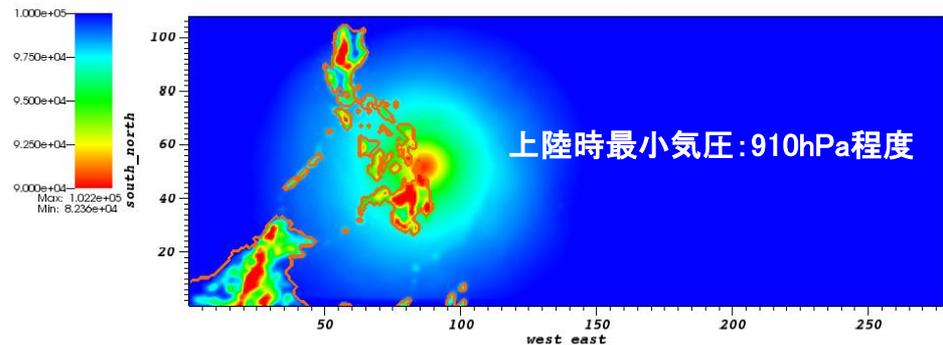


図: 11/7 6:00 時点 (PHT) の表面気圧分布
TC Bogus使用

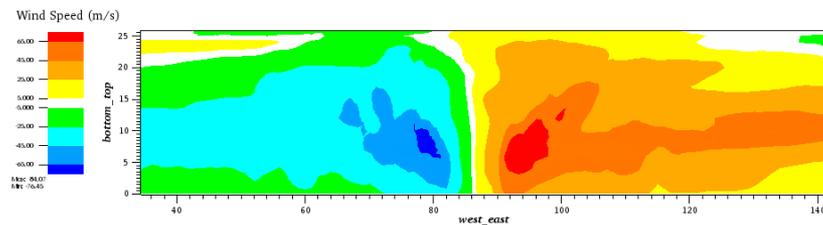
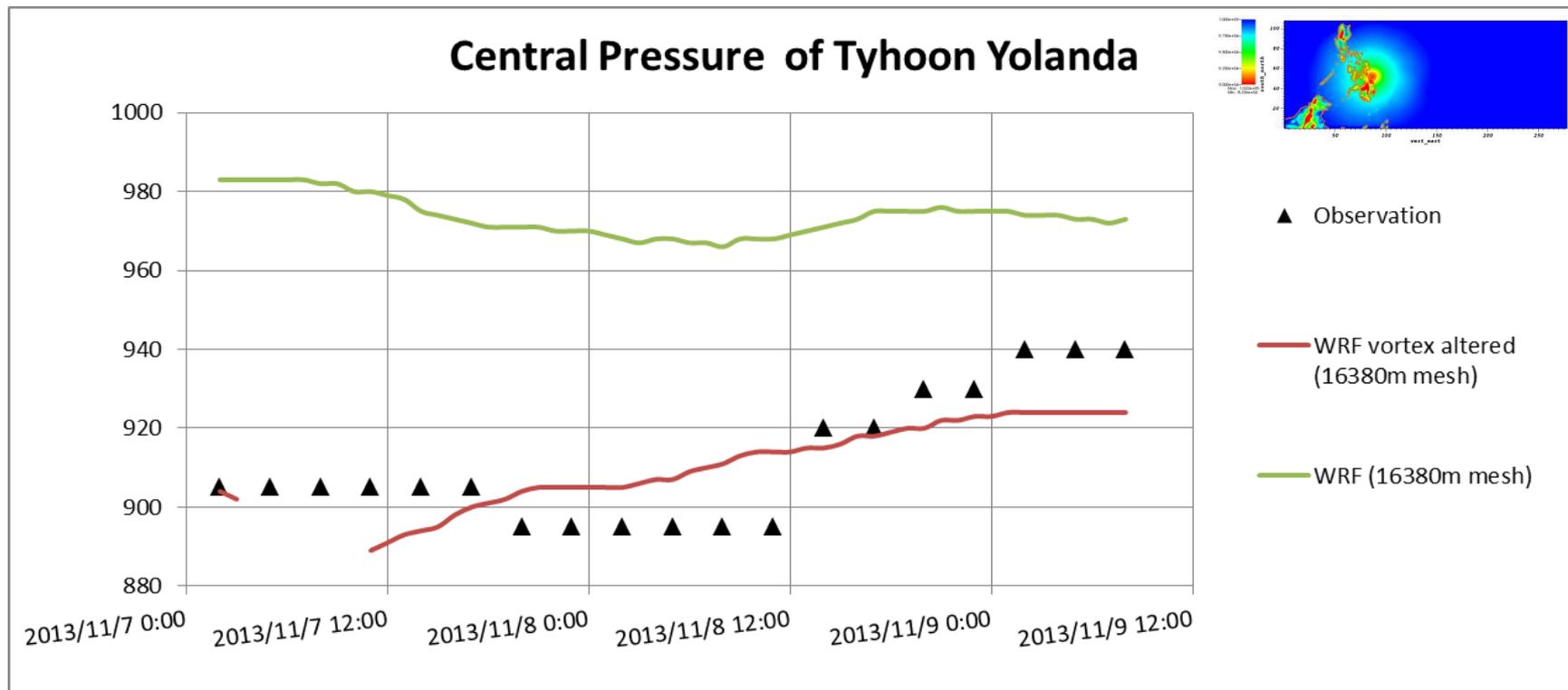


図: 台風の構造断面図
(南北方向の風速分布)

WRF計算結果



図：中心気圧時系列（時間＝PHT）観測値：デジタル台風

- TC Bogusによって大幅に再現度が改善した

WRF計算結果

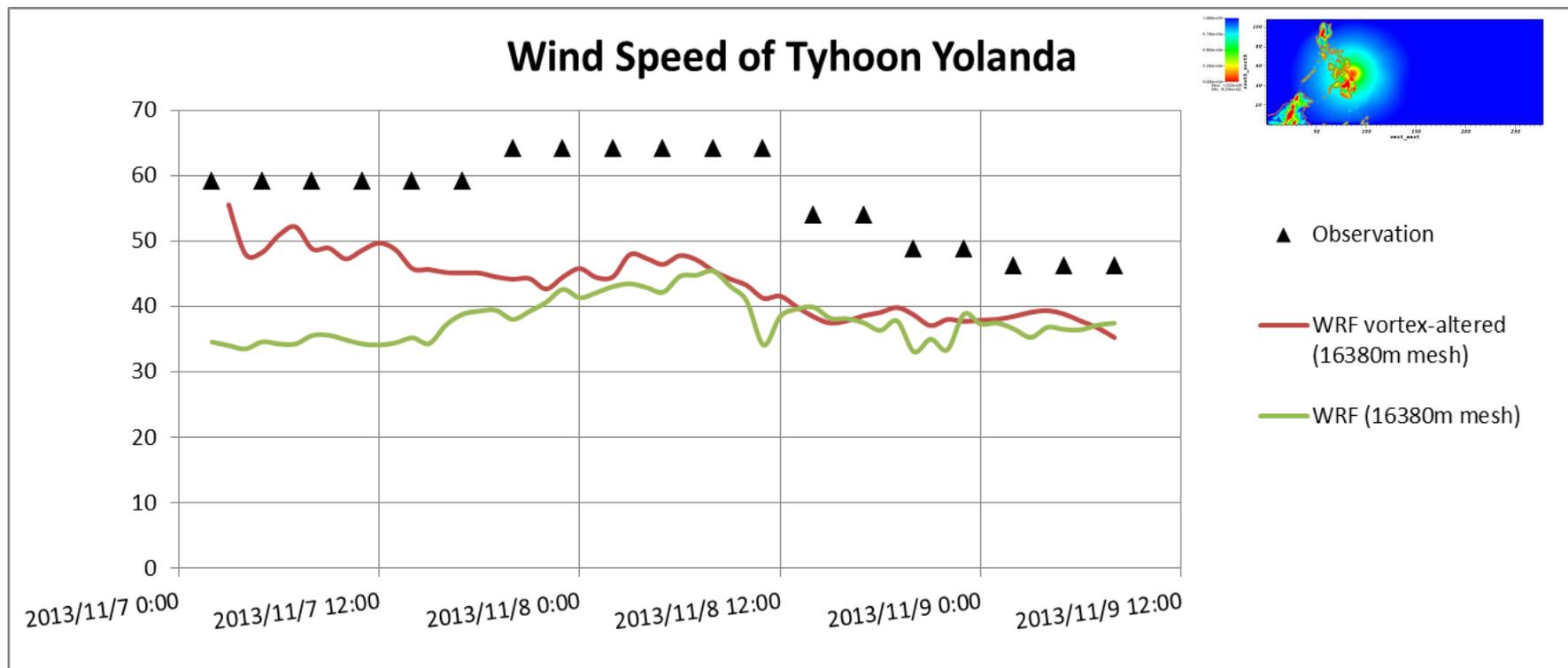
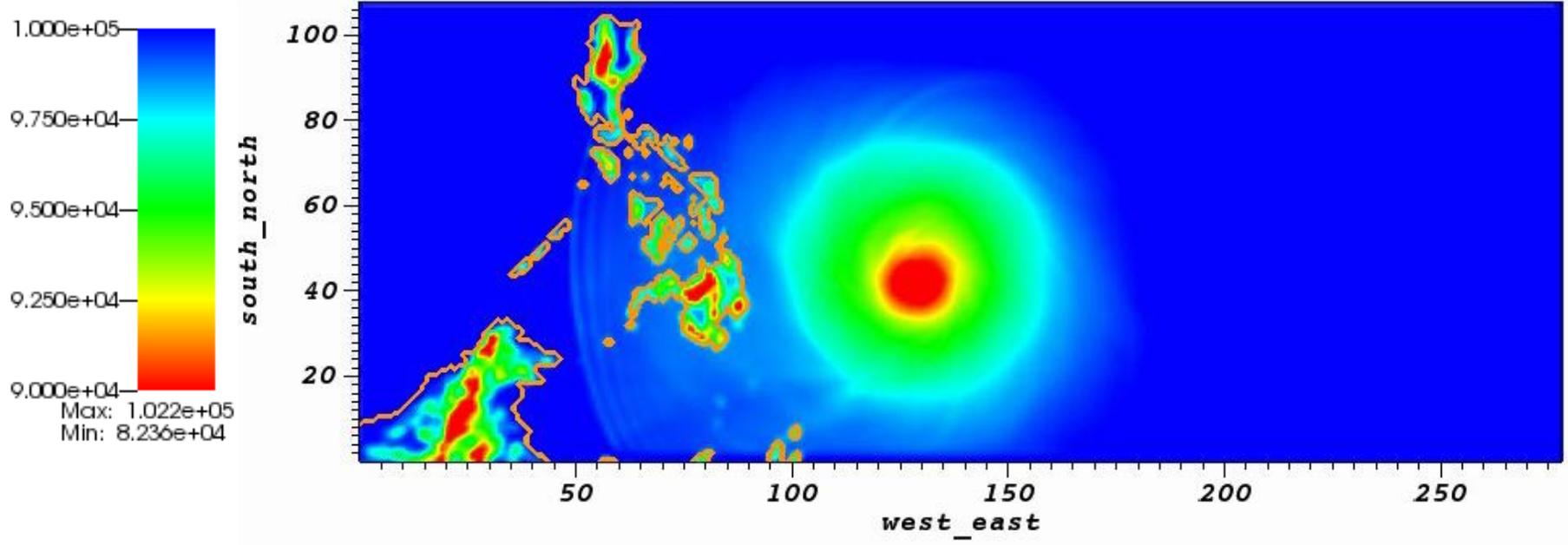


図:最大風速時系列(時間=PHT) 観測値:デジタル台風

▪ TC Bogusによって若干再現度が改善した

WRF計算結果 動画



Xtide計算結果

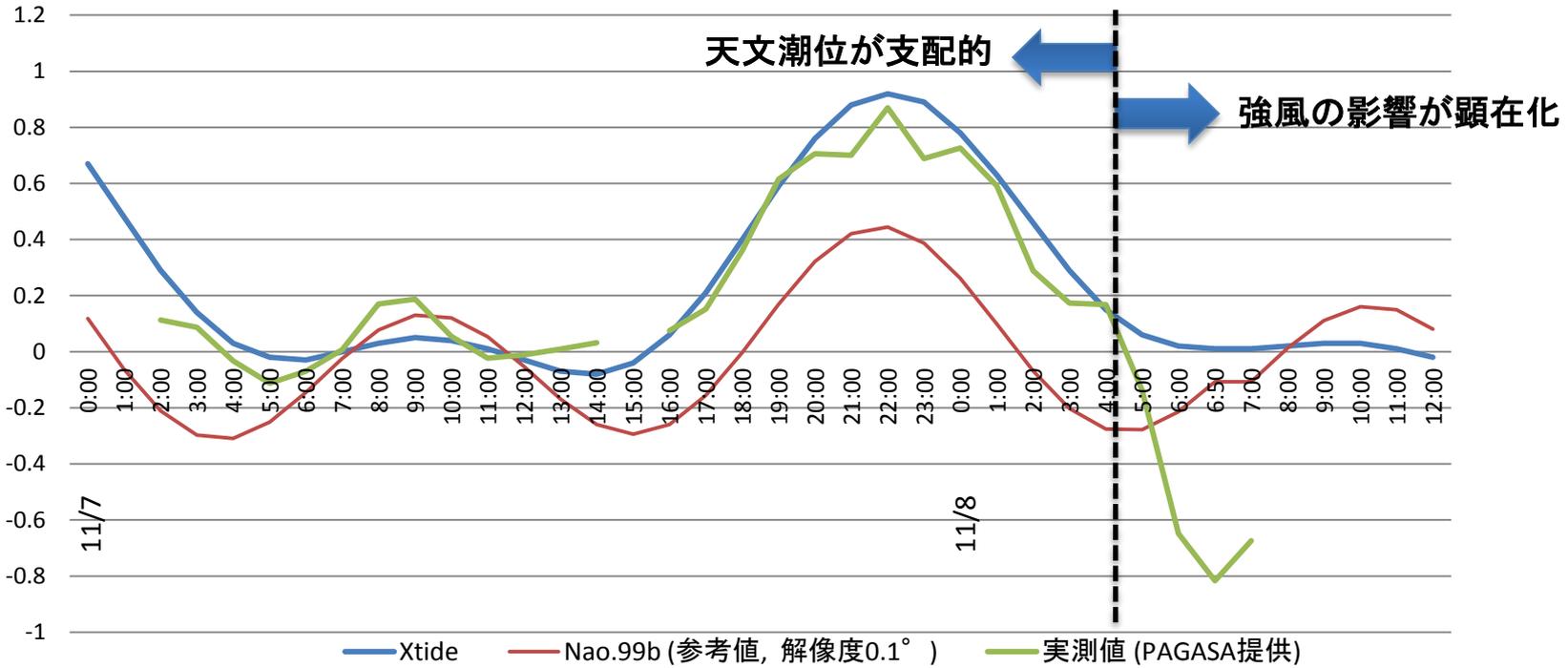


図: Tacloban における天文潮位推算と実測値 (m), 時間: PHT

- Xtideによる結果が, 観測値とよく一致をしている
- 11/8 4:00 付近で 潮位について強風の影響が顕在化

FVCOM計算条件

表: 計算条件

海洋モデル	地形データ	ETOPO 1min
	地形非構造化ソフト	Blue Kenue
	緯度範囲	9.32° - 11.80°
	経度範囲	124.7° - 126.8°
	計算間隔	1 秒
FVCOM	水平解像度	長辺が1800mの直角三角形
	Node 数	19350
	Cell 数	38144
	Element Type	T3

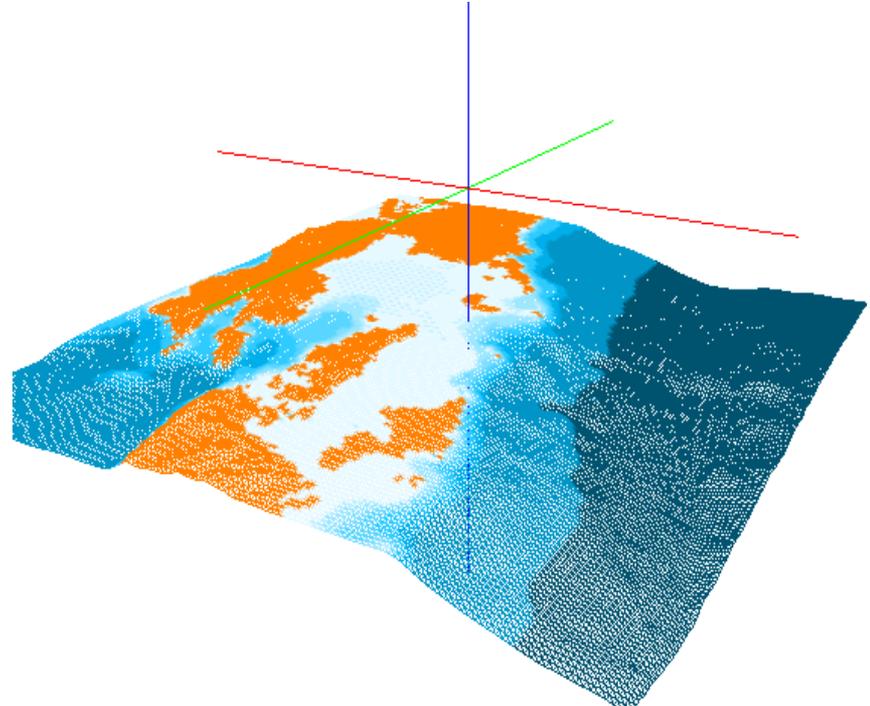


図: 有限要素法による三角形地形メッシュ
* Blue Kenue により3D表示

FVCOMの結果

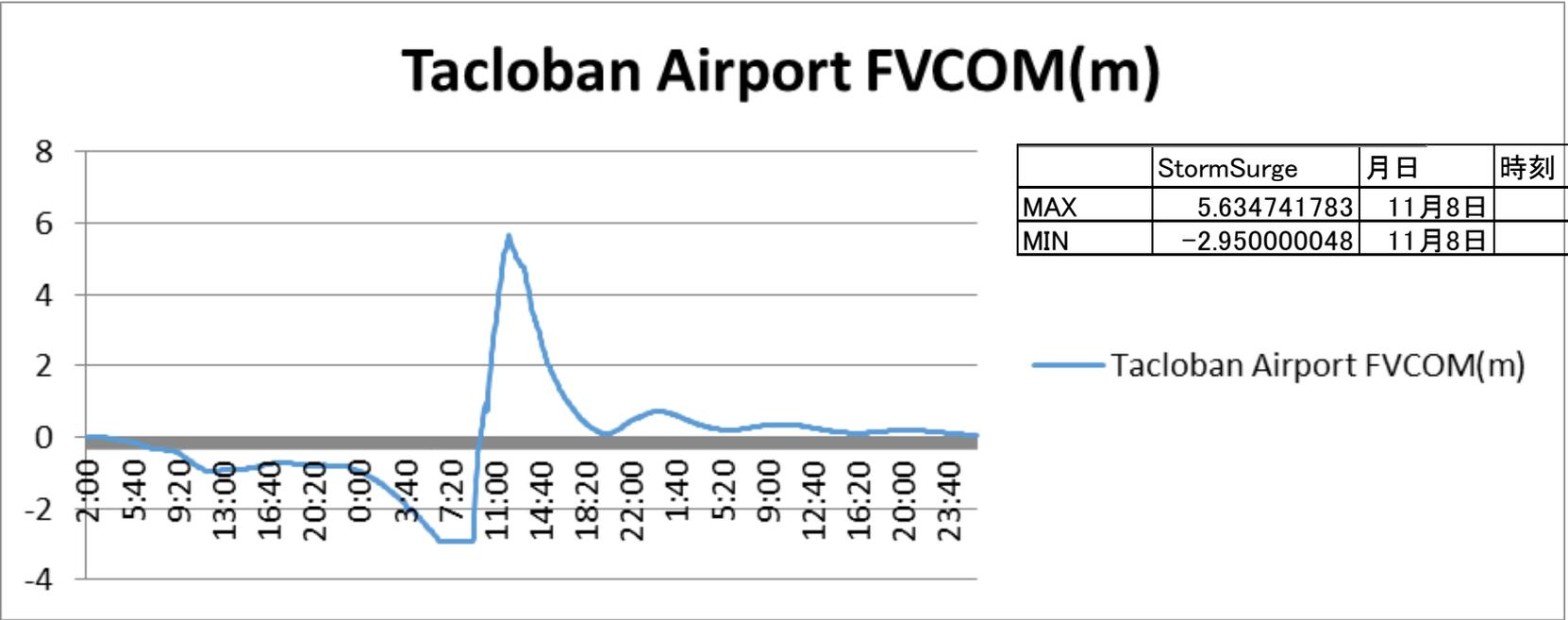
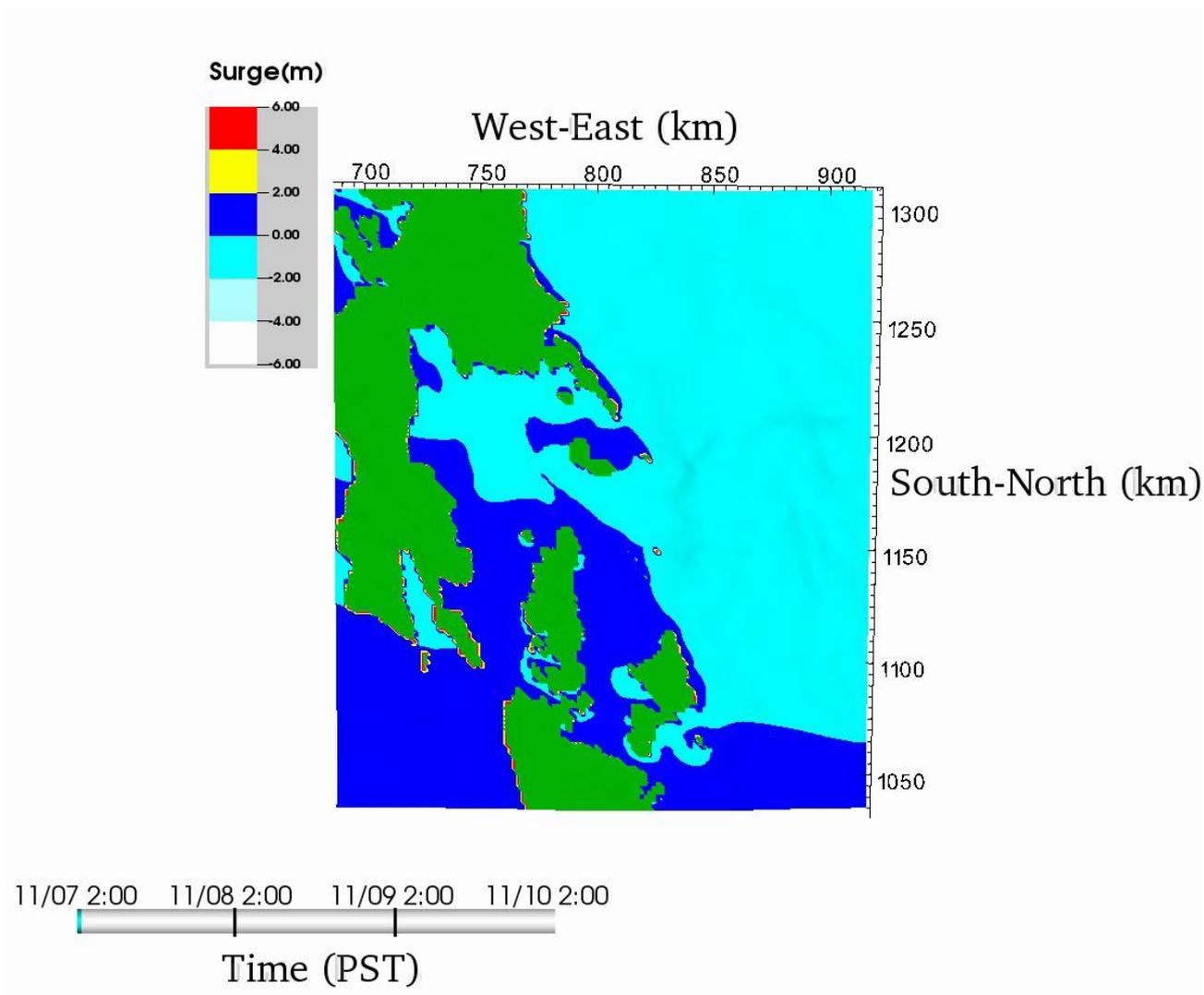
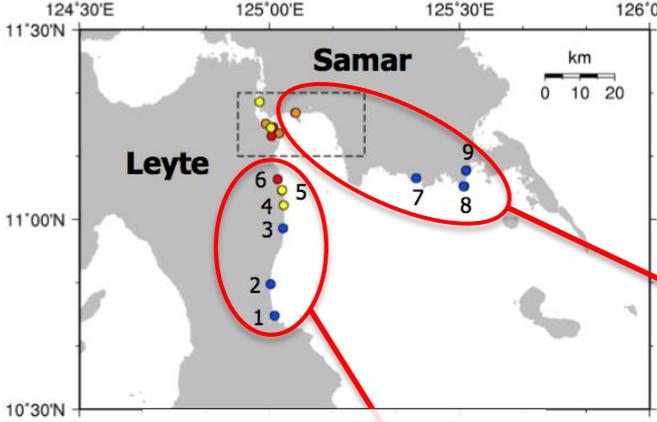


図: タクロバン空港付近の高潮偏差

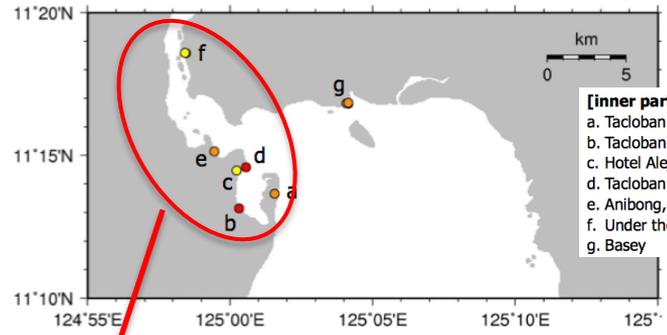
FVCOMの結果 動画



統合シミュレーション結果と痕跡高の比較



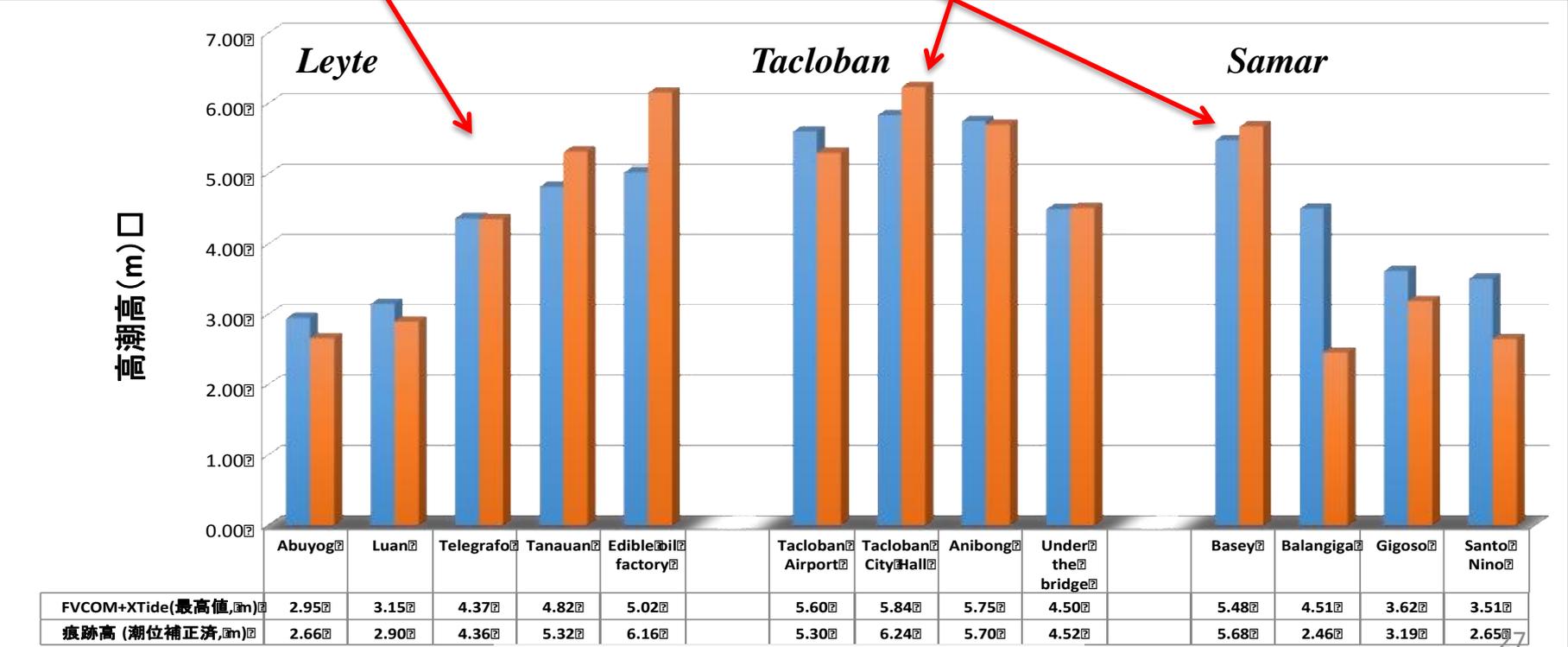
1. Abuyog
2. Poblacion District 1, Mac Arthur
3. Luan, Dulag
4. Telegrafo, Tolosa
5. Tanauan
6. Edible oil factory, Tanauan
7. Balangiga
8. Gigoso, Giporlos
9. Santo Nino, Quinapondan



- [inner part of the bay]
- a. Tacloban Airport
 - b. Tacloban City Convention Center
 - c. Hotel Alejandro, Tacloban City
 - d. Tacloban City Hall
 - e. Anibong, Tacloban City
 - f. Under the bridge from Samar to Leyte
 - g. Basey

図：柴山調査隊・計測地点

図：Tacloban付近の計測地点



図：シミュレーション最高値と痕跡高の比較

◆RCP8.5シナリオにおける 台風の強大化について

◆RCP8.5シナリオにおける台風の強大化について

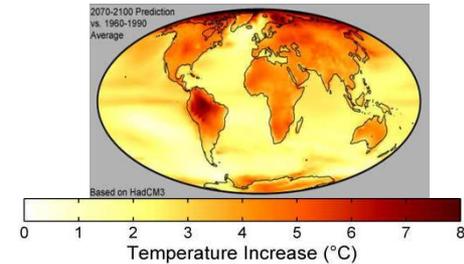
IPCC 第5次報告書 abstract



• 海水温の上昇

- ・2000年比で、2100年までに0.3～4.0°Cの上昇 (IPCC, 2013)

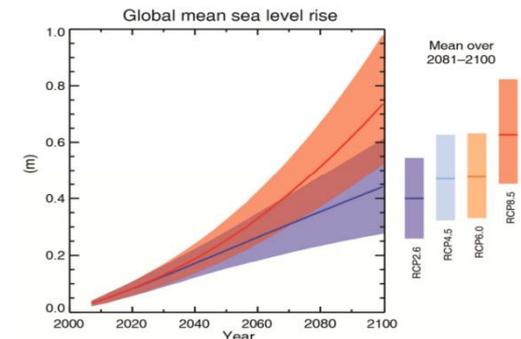
➡ 水蒸気フラックスの増加、台風へのエネルギー供給の増加



• 海水面の上昇

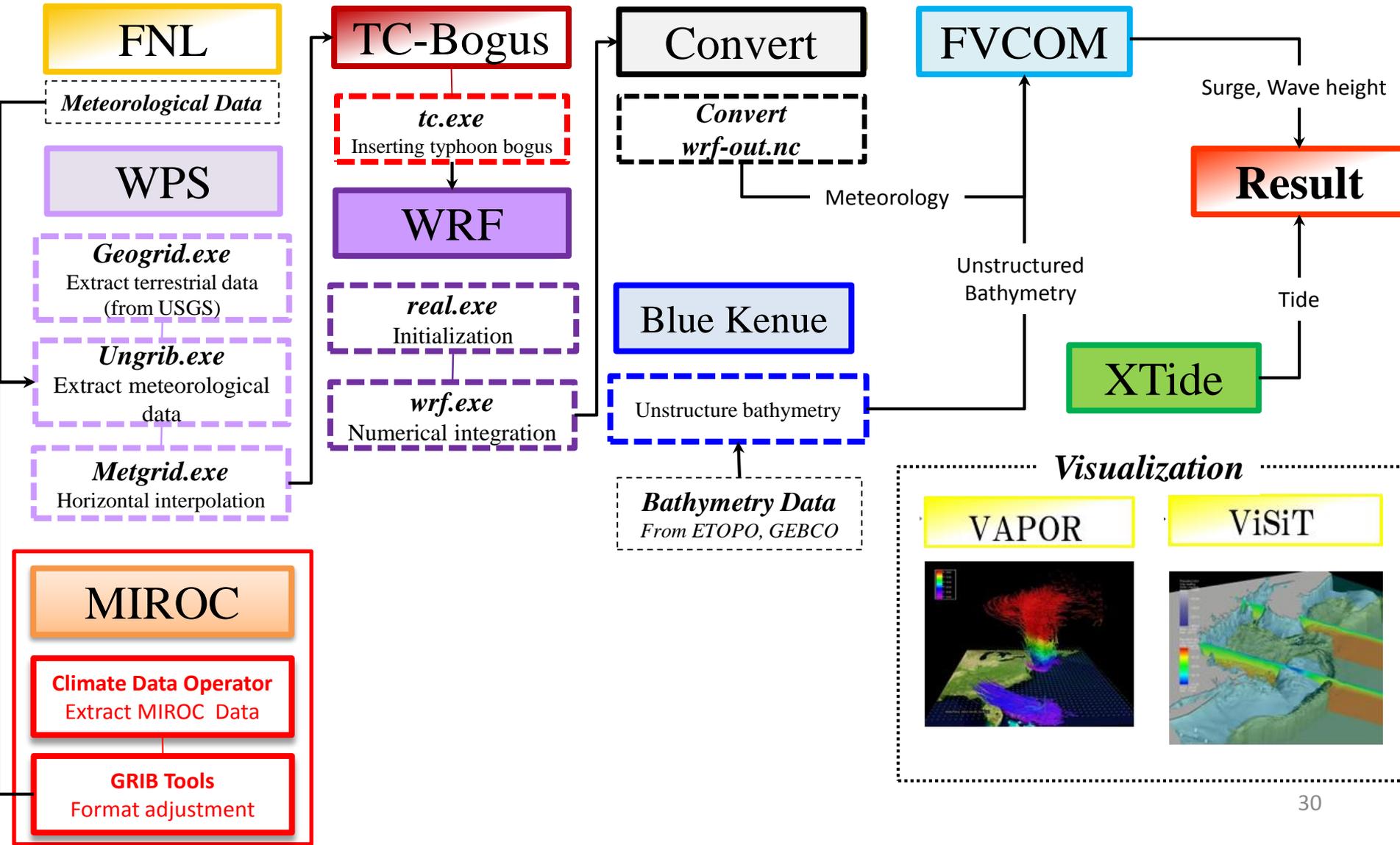
- ・2000年比で、2100年までに0.25～0.82mの上昇 (IPCC, 2013)

➡ 高潮の水位増加



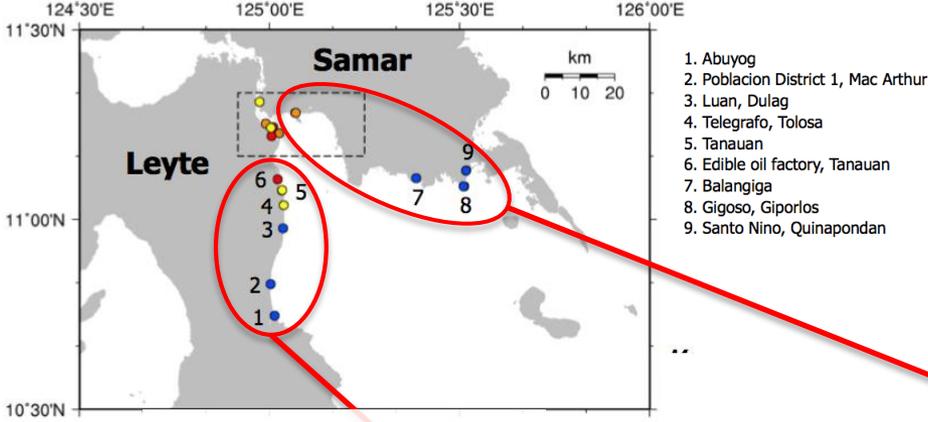
台風，高潮被害の激甚化

Model for future condition

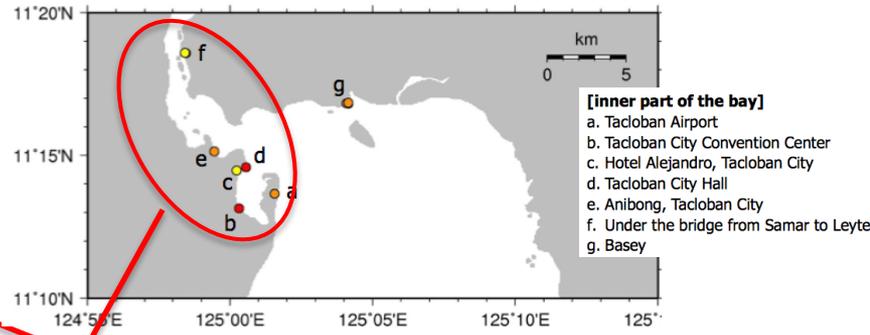


◆RCP8.5シナリオにおける台風の強大化について

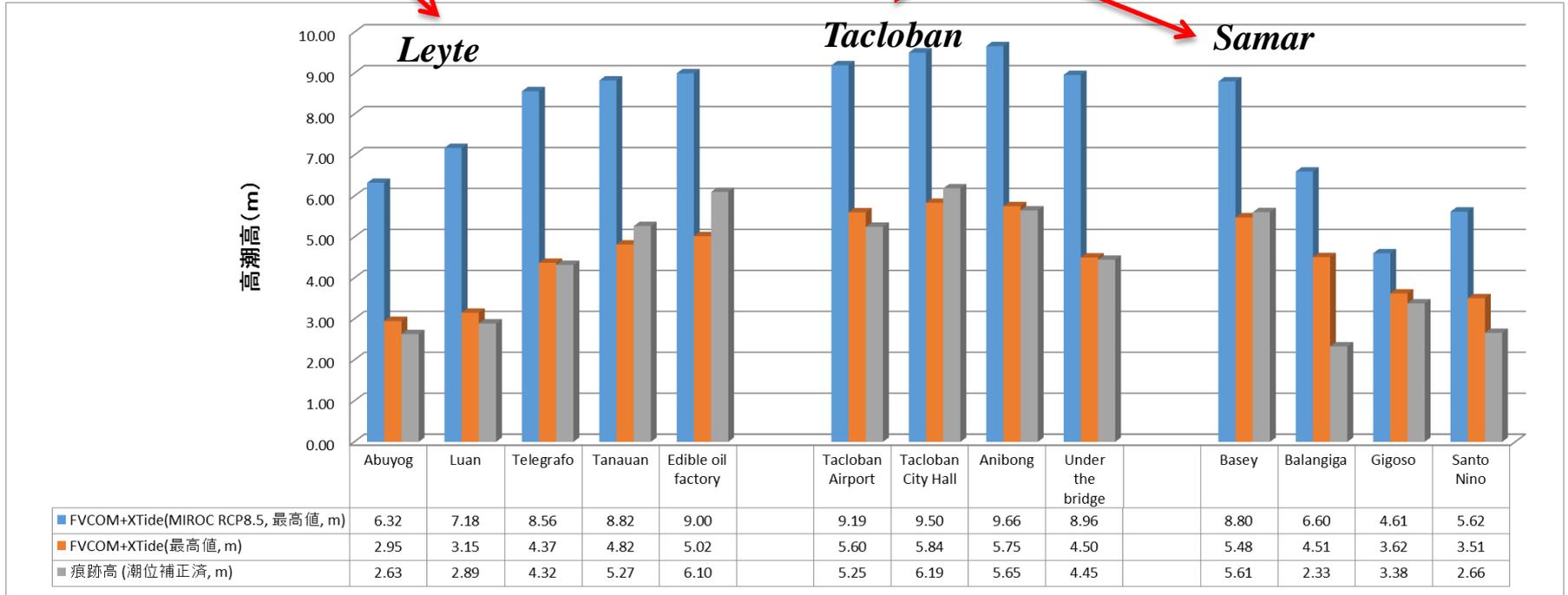
シミュレーション結果と痕跡高の比較



図：柴山調査隊・計測地点



図：Tacloban付近の計測地点



図：シミュレーション最高値と痕跡高の比較

◆参考文献

- Introduction to HWRF, Ligia Bernardat(NOAA ESRL and CIRES), 2013,U.S.
- A Comparison of HWRF, ARW and NMM Models in Hurricane Katrina(2005) Simulation, 2011, Korea : Venkata B. Dodla, Srinvas Desamsetti and Anjaneyulu Yerramilli
- IPCC 5th Report Abstract(2013)
- 気候変動の影響を受けた台風による波浪・高潮被害の変化予測 一気象・波浪・高潮・潮汐藤堂モデルの開発と長期予測一, 大平幸一郎ら(2012, Japan)
- Chen, C, R. C. Beardsley and G. Cowles, 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Special Issueentitled “Advance in Computational Oceanography”, Oceanography, 19(1), 78-89.
- Estimation of storm surge inundation and hazard mapping for the southern coast of Journal of Coastal Research, Special Issue No.65, 2013, Korea : Jong-Joo Yoon, Jae-Seol Shim
- 非構造格子モデルを用いたバンダアチェにおける2004年インド洋津波の追算 土木学会論文集 Vol66. No1. 2010 256-260 小松雄二, 佐々木淳, 松丸亮
- FVCOM User Manual, SMAST/UMASSD-06-0602 Changsheng Chen1, Robert C. Beardsley2 and Geoffrey Cowles1