

柴山研究室における 高潮数値予測モデル 開発について

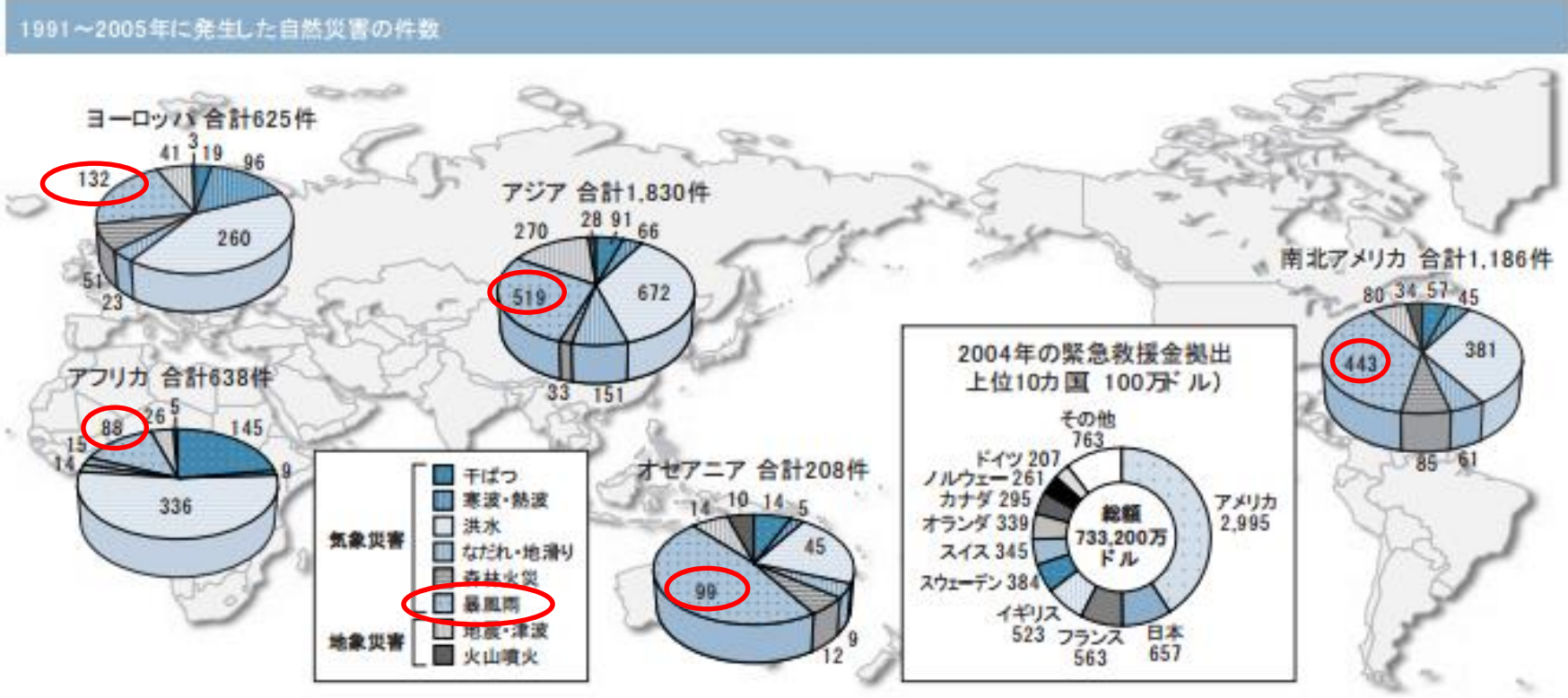
早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻 修士課程2年:大山 剛弘
同 1年:中村 亮太
早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 4年:岩本 匠夢

本日の発表内容

- ◆高潮被害の現状、将来予測
- ◆既往高潮モデルの問題点
- ◆高潮モデル OSIS (Ohira-Shibayama Integrated Storm surge model) について
- ◆OSISの更なる精緻化
 - ◇ HWRF (Hurricane WRF)
 - ◇ 非構造格子・有限体積法モデル・FVCOM
- ◆参考文献

◆高潮被害の現状、将来予測

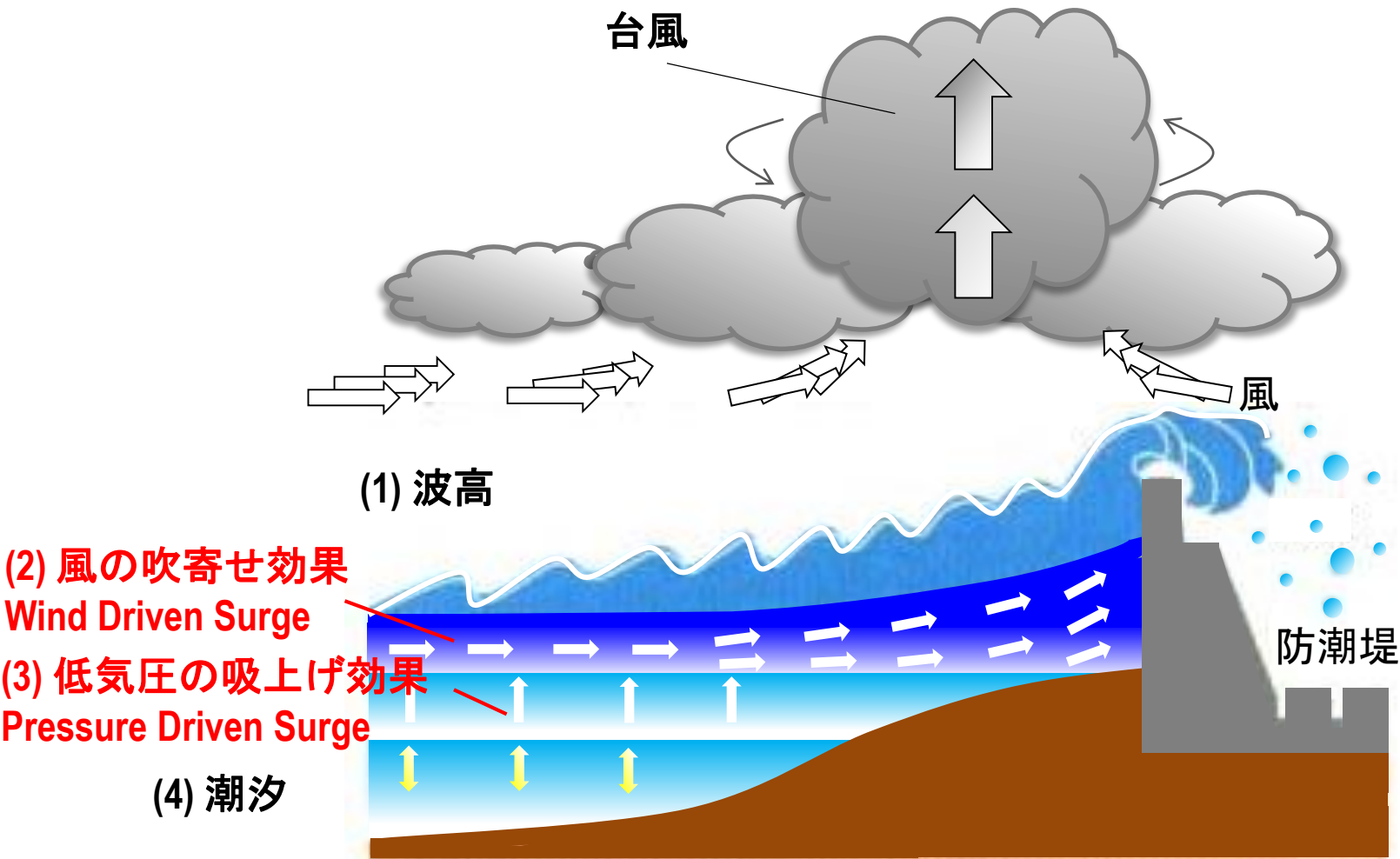
1991-2005年の自然災害件数



出典: JICA(2006)

各地域で、高潮が主要な被害因子である、
台風による災害の件数が多くを占める

高潮の発生機構



図：高潮の発生機構 *(2) + (3) = Storm Surge

高潮の強度は、台風の強度に依存する

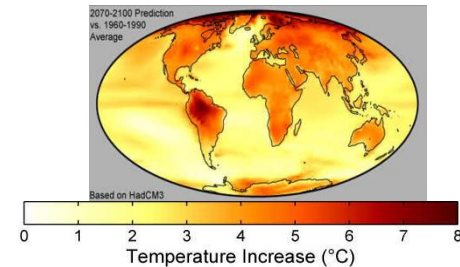
IPCC 第5次報告書 abstract



• 海水温の上昇

- 2000年比で、2100年までに0.3～4.0℃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



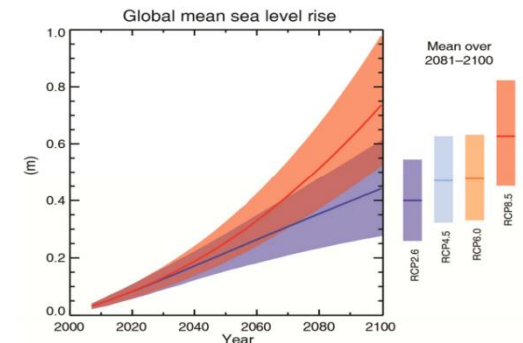
• 海水面の上昇

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

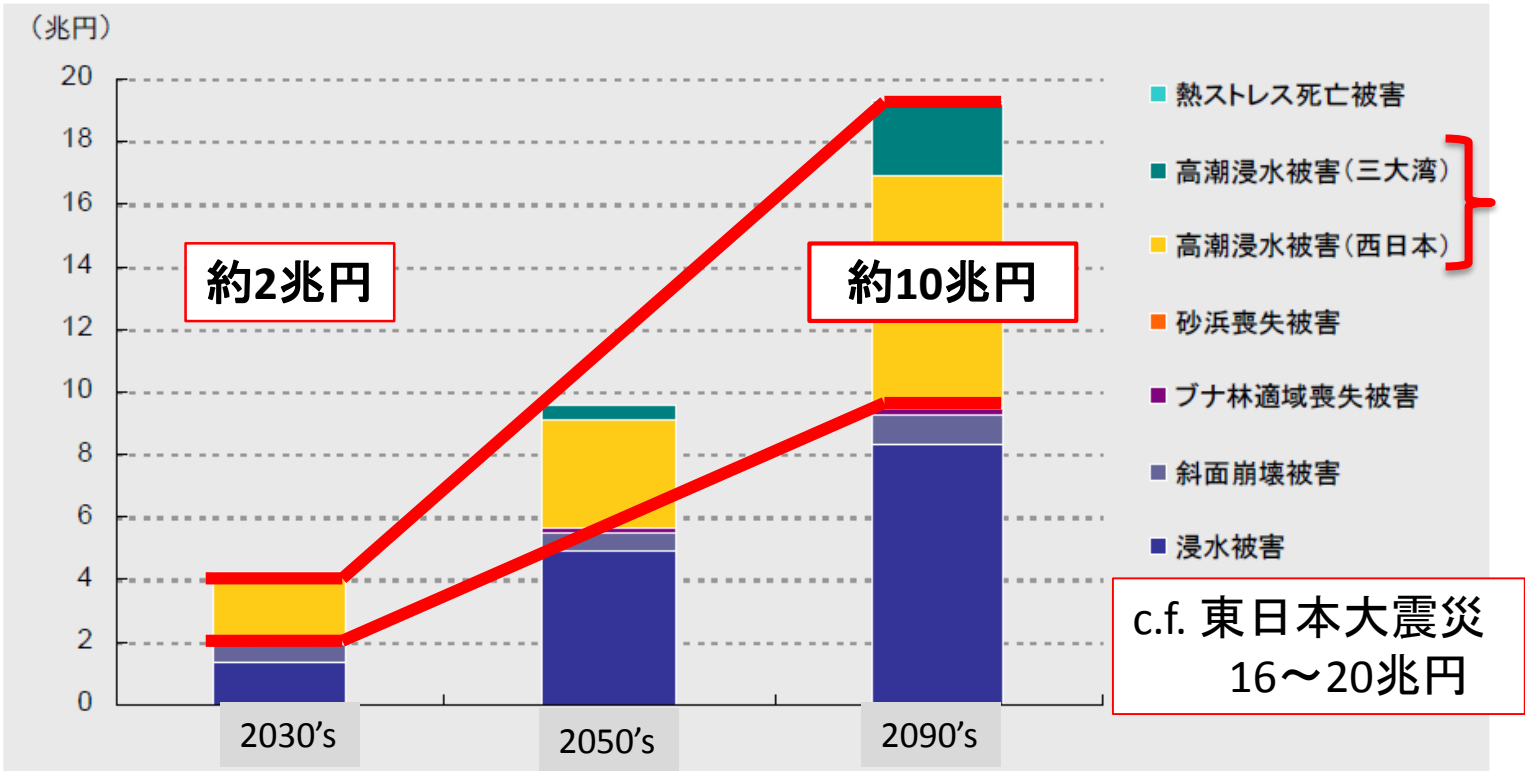
➡ 高潮の水位増加



台風，高潮被害の激甚化



高潮による被害額の将来予測



図：日本における、気候変動に伴う災害被害額予測（気象庁,2009）

長期的な予測に対応した，高潮モデルの必要性

◆ 既往高潮モデルの問題点

◆ 既往高潮モデルの問題点

既往の高潮モデルの例

- 確率台風モデル、統計的手法 →
- 経路設定によるワーストコースの高潮の想定 →

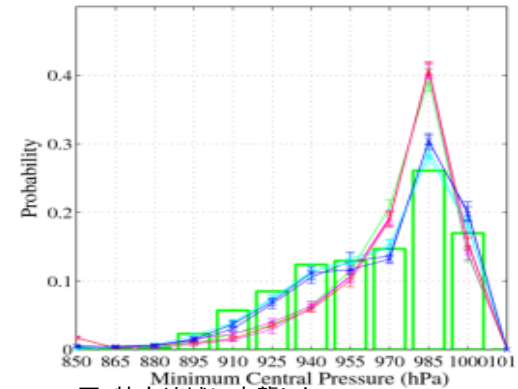


図: 特定地域に来襲した
最低中心気圧の確率分布例(安田,2013)

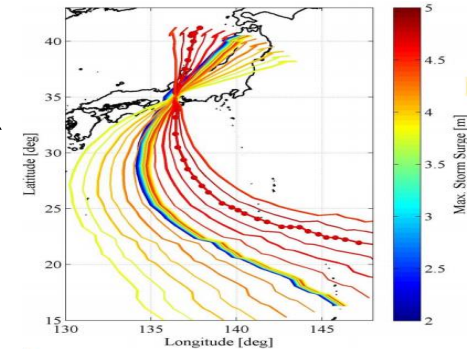


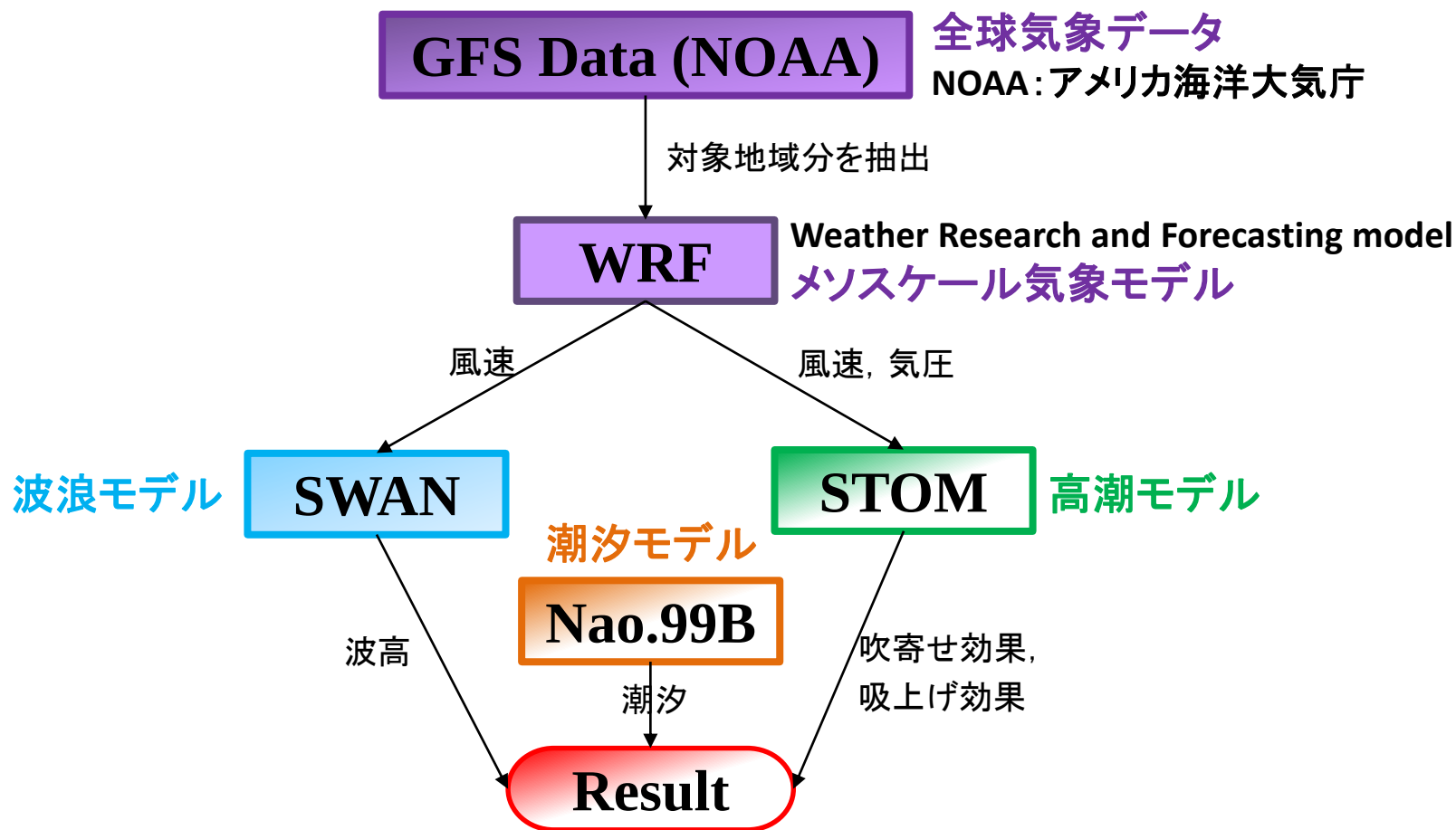
図: 伊勢湾におけるワーストコースと
高潮変化量の算定(安田,2013)

問題点

- 物理学・気候学的な整合性
- 気候変動の、台風・高潮挙動への影響評価が困難な事

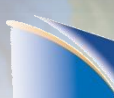
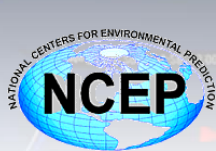
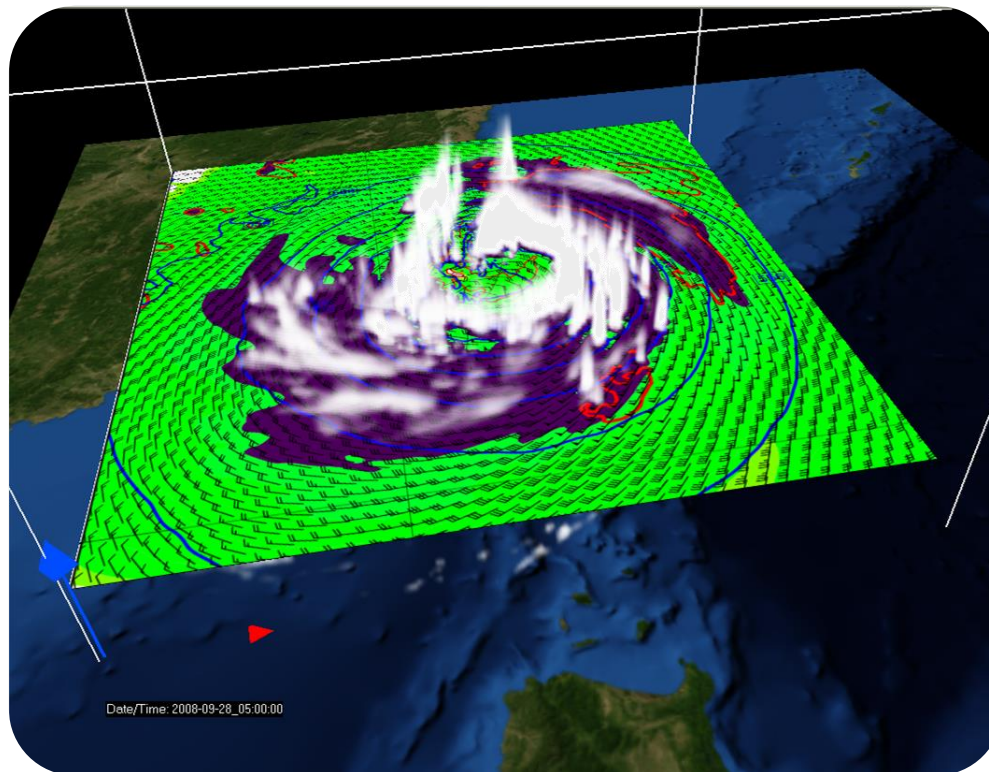
◆高潮モデル OSIS (Ohira-Shibayama Integrated Storm surge model) について

OSIS モデル (大平, 柴山 2012)

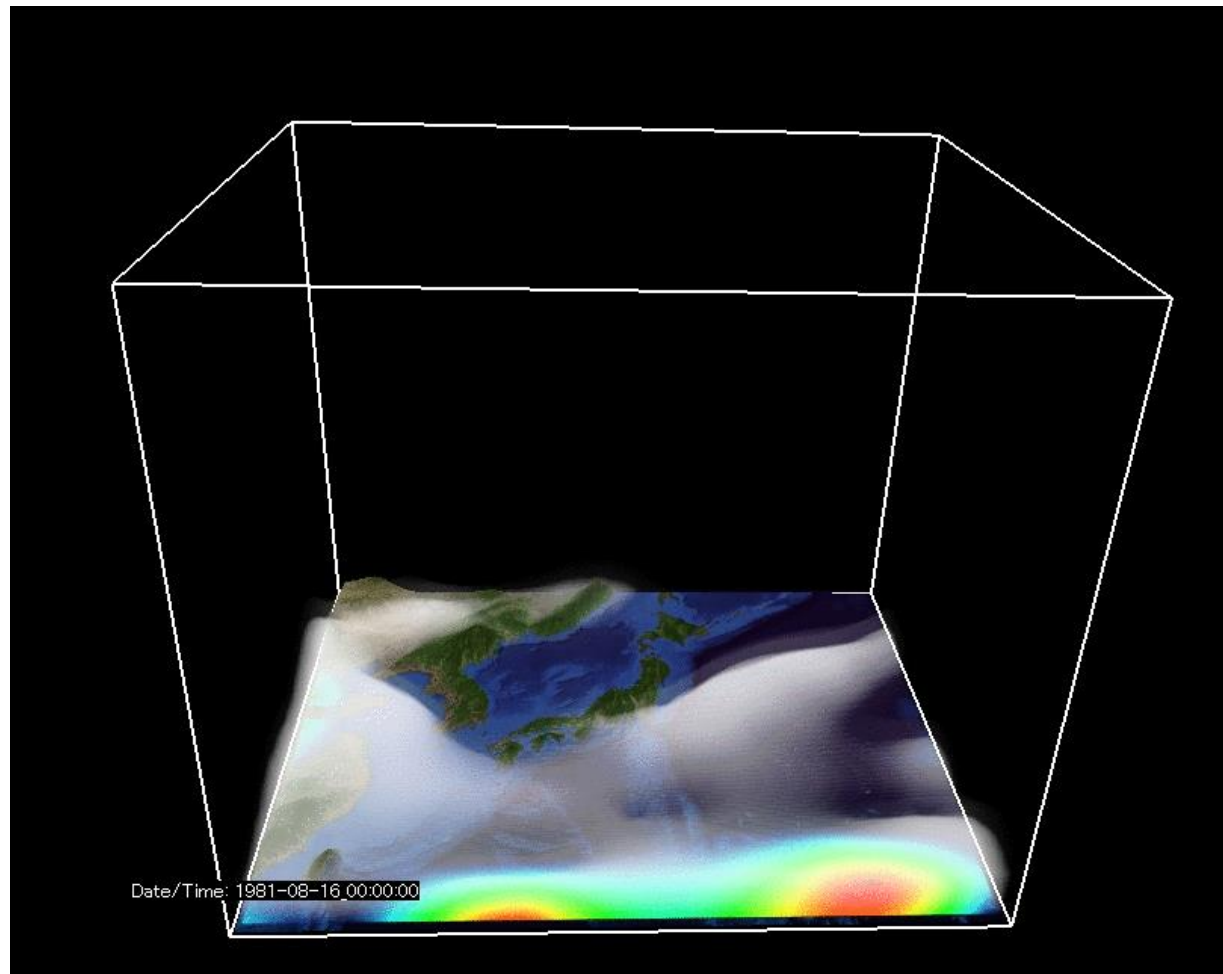


WRF

- ・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



WRF



•日本近海での台風再現例

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

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

温位則

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

ジオポテンシャル則

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

スカラー保存則

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

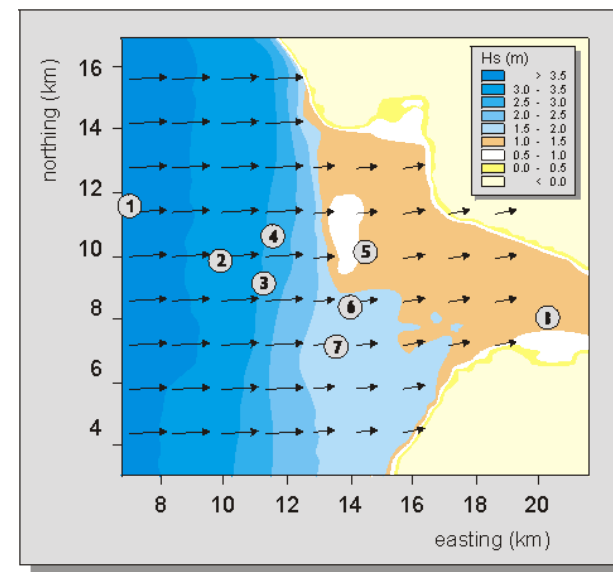
状態保存則

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

SWAN

■ SWANの特徴

- 浅水変形, 屈折, 回折などの浅水域での挙動計算
- 数 m 単位から適用可能



線水域における波浪挙動を正確に再現できる

Nao.99B (全球潮汐モデル) とは

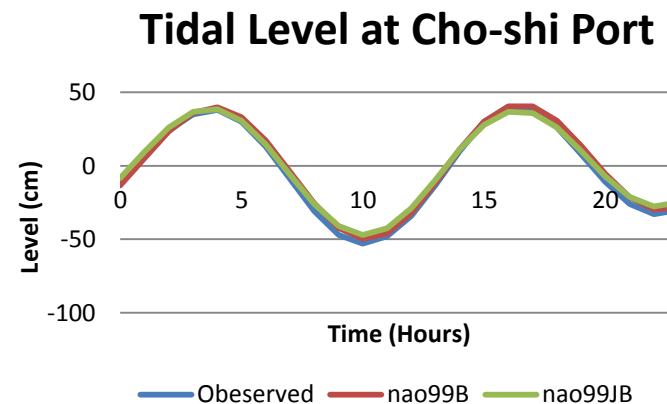
- 国立天文台によって開発された潮位計算モデル
- 流体力学数値計算モデルにTOPEX/POSEIDON海面高度計データを同化して結果を出す ⇒ 観測されていない任意の点、任意の時間での潮位を計算
- 流体力学数値モデルは球座標で記述され、深さ方向に積分された2次元の浅水波方程式を差分化した式を時間積分したものを用いる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \left(\frac{gH}{R \sin \theta} \right) \frac{\partial}{\partial \lambda} (\tilde{\gamma}_2 \eta + \xi - \zeta_0) - 2\Omega V \cos \theta + F_\lambda^b + F_\lambda^e$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \left(\frac{gH}{R} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} (\tilde{\gamma}_2 \eta + \xi - \zeta_0) - 2\Omega U \cos \theta + F_\theta^b + F_\theta^e$$

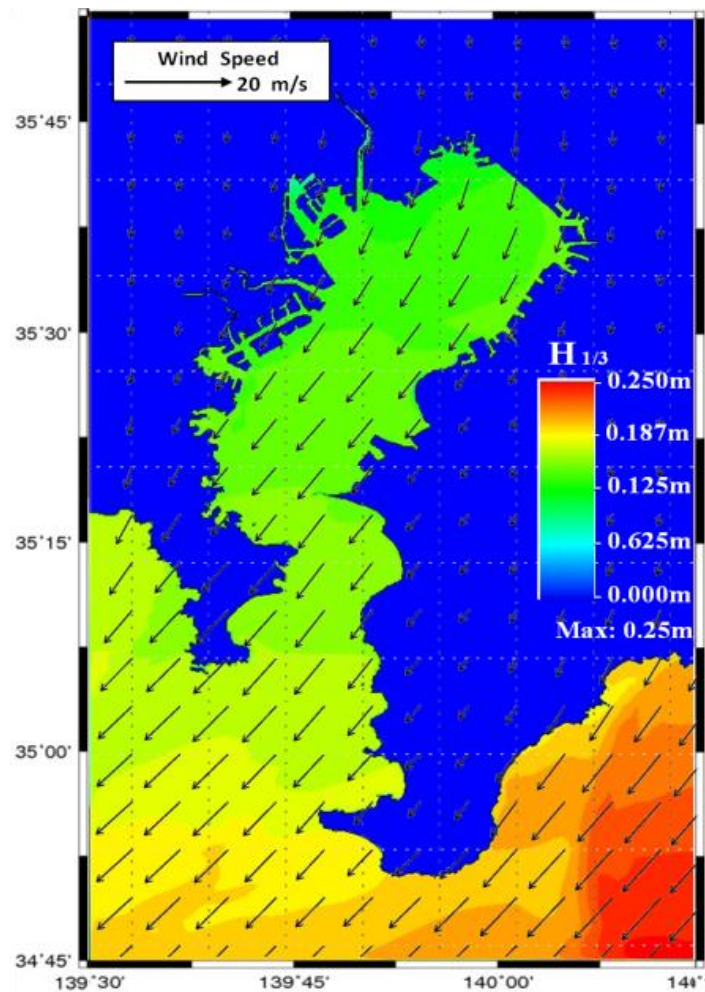
$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = -\frac{1}{R \sin \theta} \left[\frac{\partial (V \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial \lambda} \right]$$

メッシュサイズ 0.5°



OSISの適用例 (大平,2012)

- 台風9号 (Fitow, 2007年)



図：計算対象域(東京湾)

表：計算条件

気象モデル WRF	Time (UTC)	Sep. 3 rd 18:00 (2007) ~ Sep.9 th 18:00 (2007)
	計算領域 I	N34.4366~36.1526, E138.748~140.854
	計算領域 II	N34.8362~35.7404, E139.476~140.197
	水平格子数	I: 80×80, II:139×91
	水平解像度	I: 2700m II: 900m
	投影法	メルカトル図法
	鉛直層数	27 層
	タイムステップ	I: 15 秒 II: 5 秒
波浪モデル SWAN	地形データ	USGS
	計算時間(UTC)	2007年9月3日 18:00~2007年9月9日 18:00
	計算領域	N34.8~35.7, E139.5~140.2
	タイムステップ	3 秒
	水平解像度	900m
	水平格子数	139×91
	投影法	メルカトル図法
	物理モデル	Komen
高潮モデル STOM	地形データ	GEBCO
	計算時間(UTC)	2007年9月3日 18:00~2007年9月9日 18:00
	計算領域	N34.8~35.7, E139.5~140.2
	タイムステップ	3 秒
	鉛直層数	2 層
	水平解像度	900m
	水平格子数	138×90
	投影法	メルカトル図法
潮汐モデル NAO.99b	地形データ	GEBCO
	計算時間(UTC)	2007年9月3日 18:00~2007年9月8日 18:00
	計算領域	各観測地点

OSISの適用例 (大平,2012)

- OSISにより, 観測最大値や傾向を忠実に再現
- Mayersの式などを簡略化した方程式を用いた従来の高潮モデルよりも高精度な結果を得る



図: 観測地点

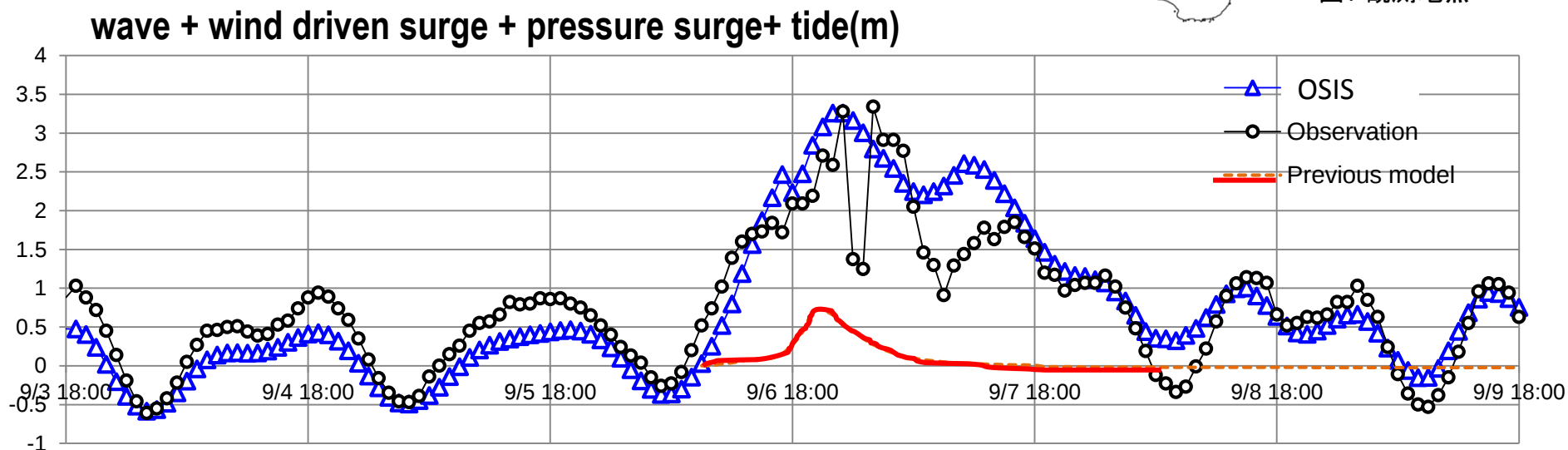
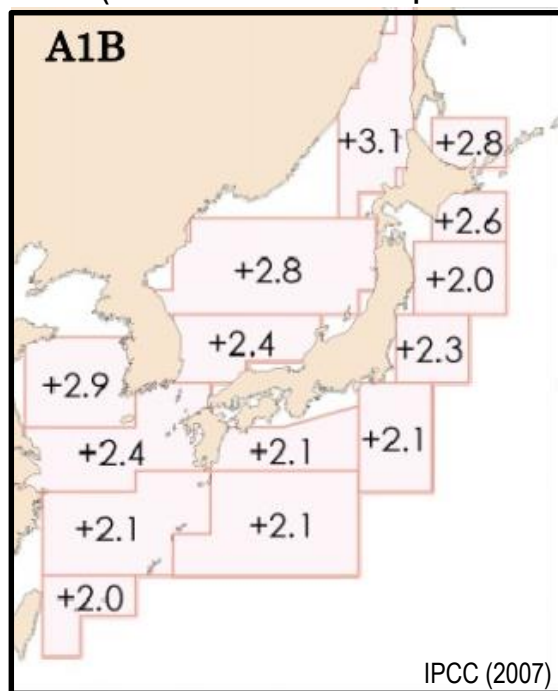


図: 台風9号による高潮の推算結果と観測値 (大平,2012)

OSISの適用例：気候変動条件下(大平,2012)

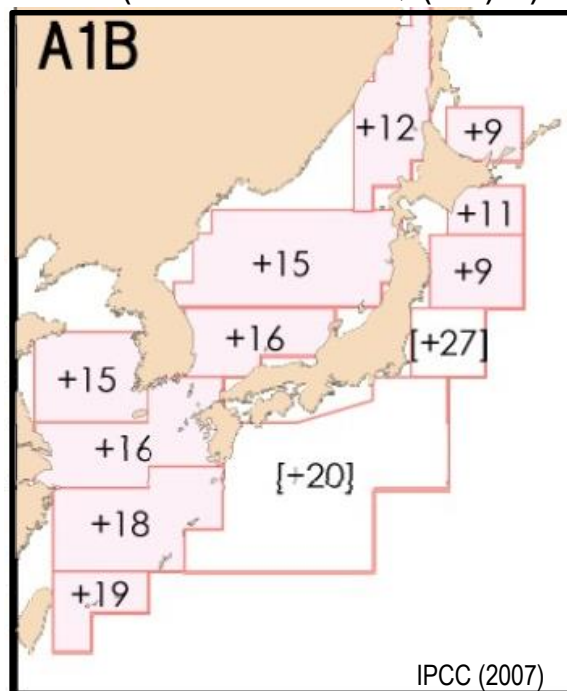
- IPCC 4th A1Bシナリオ (高度経済成長シナリオ, エネルギーバランス重視タイプ) に基づき, 計算領域の条件を設定

SST(Sea Surface Temperature)



図：表面海水温の変化
(° / 100年)

SLR (Sea Level Rise, (cm))



図：海水面の変化 (cm / 100年)

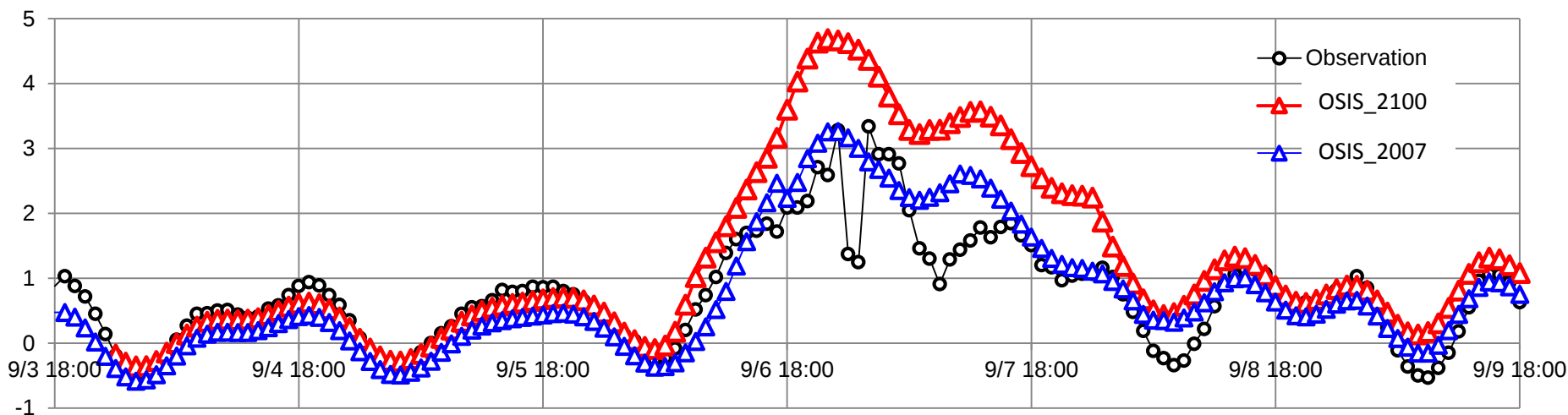
OSISの適用例：気候変動条件下(大平,2012)

- 全時点において, 2100年の気候状態で, より高い数値が得られた



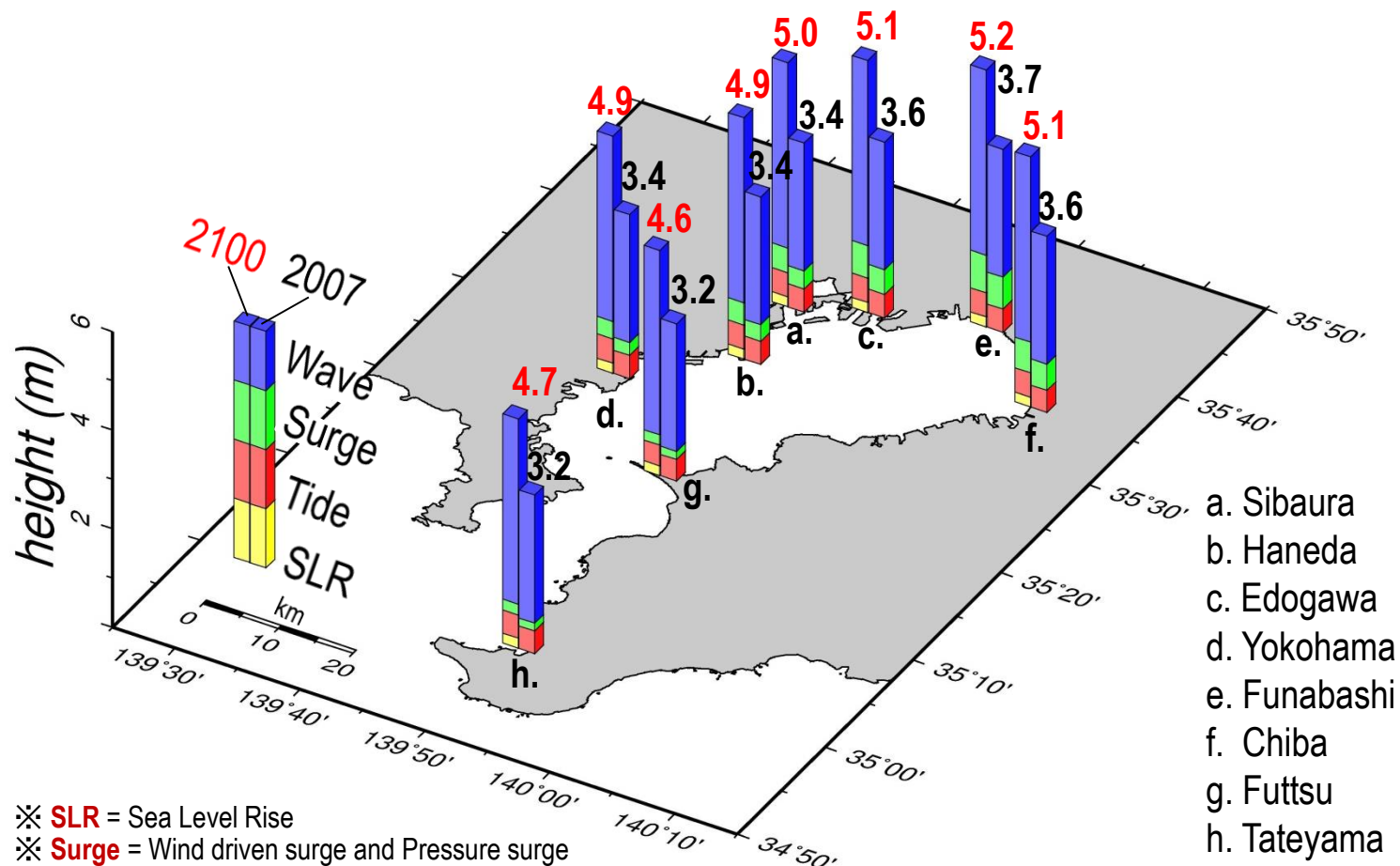
図：観測地点

wave + wind driven surge + pressure surge + tide(m)



図： 台風 9 号による高潮の推算結果と観測値 (将来予測含む) (大平,2012)

OSISの適用例：気候変動条件下(大平,2012)



☒. The comparison between 2007 and 2100

OSISの改善検討点

WRF: 気象モデル

- 台風の初期形成過程の再現が難しい, また気象データの大元である全球モデルでは台風が過小評価されやすいので,
経路・風速・気圧低下の誤差がでる場合があると指摘される
- 台風通過による海水温変化を考慮する為, 海洋モデルとのカップリングが正確な再現に必要と指摘される

STOM: 高潮モデル

- 特に複雑な地形条件下において, 最小 900m × 900m 程度の格子を採用するため, 高潮偏差に誤差 (特に過少評価) が見られることがある

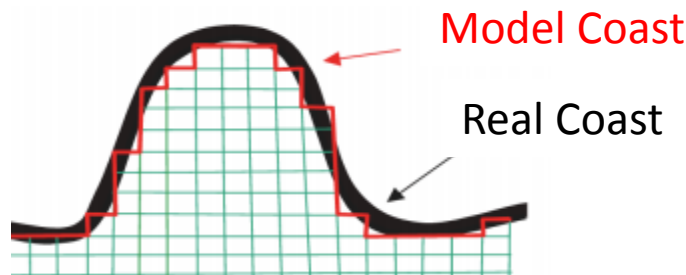


図: 構造格子と実地形

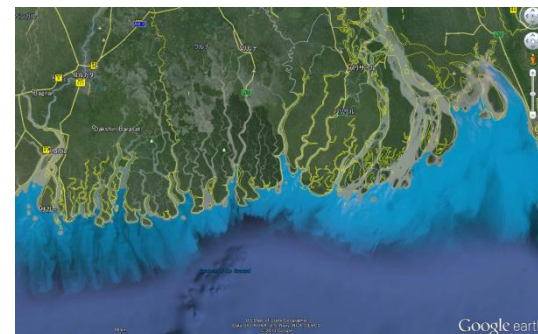
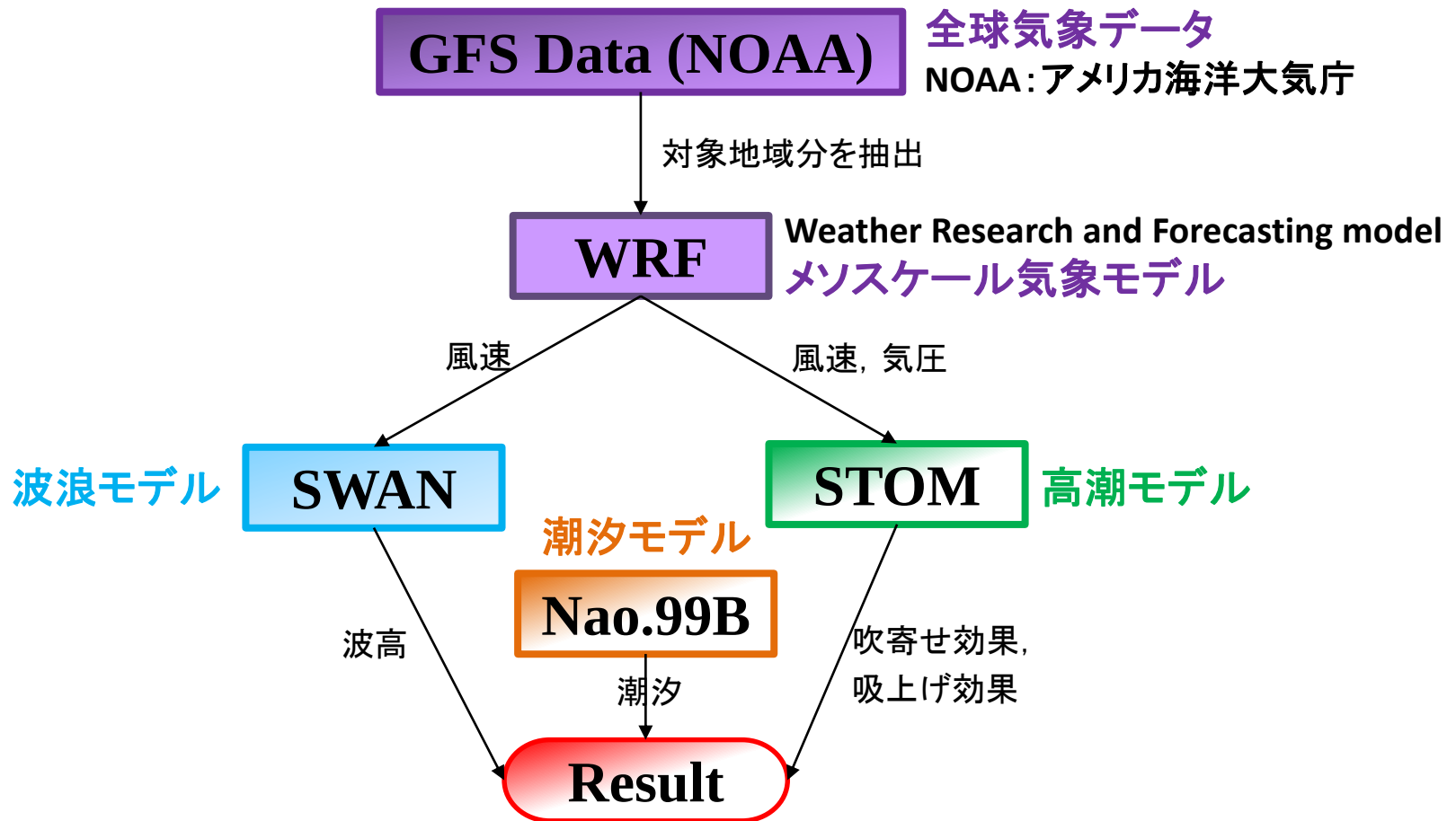


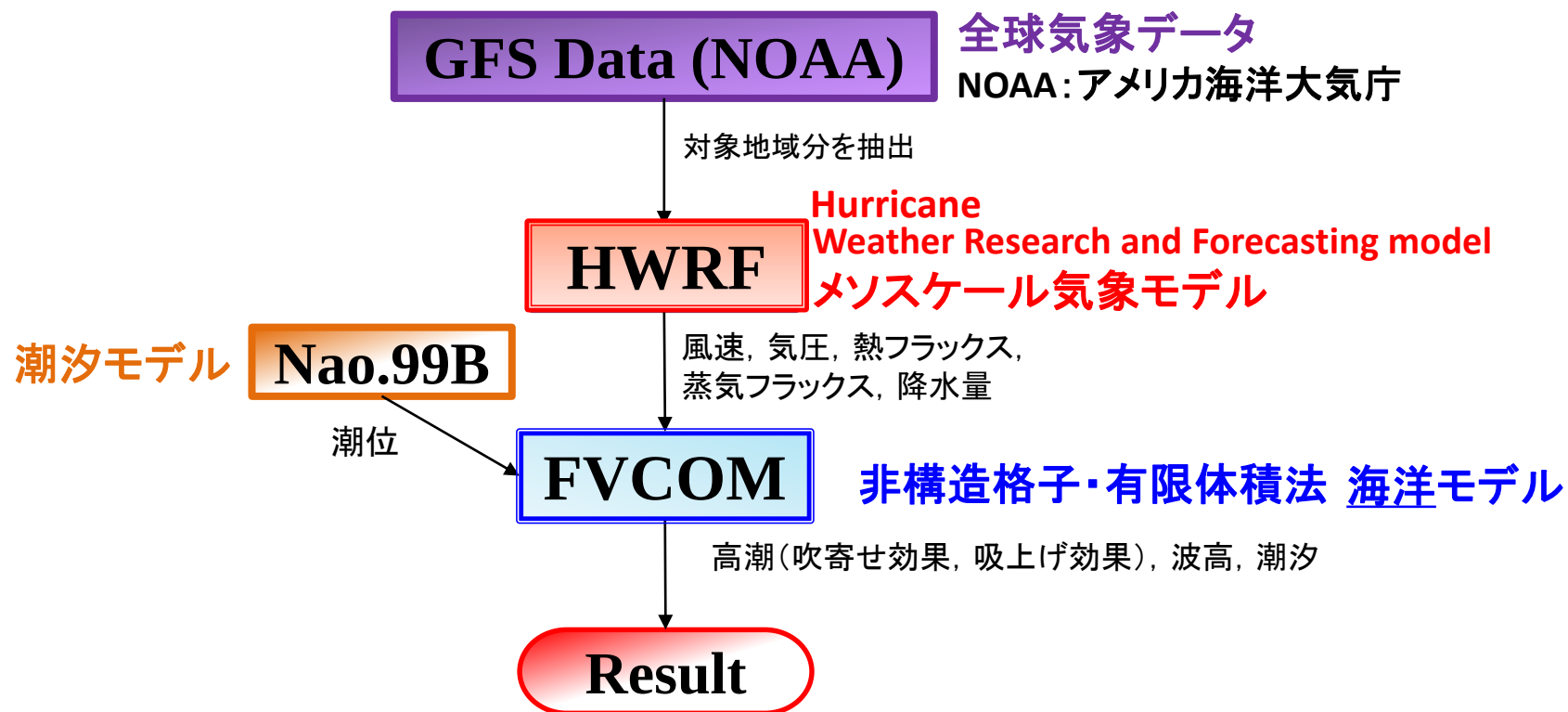
図: バングラデシュ沿岸地域

◆OSISの更なる精緻化

OSIS モデル (大平, 柴山 2012)



新 OSIS モデル (仮)



1. 台風の初期形成過程の再現

・”It is challenging **to initialize** a high-resolution hurricane model ~
because the storm in the global model (ex. GFS) is weak.”(Ligia(NOAA), 2013)



HWRfの台風領域における解決策

1. HWRfの格子にGFSデータを配置
2. GFS内の台風の中心部(渦:vortex)を取り除く
3. 対象時間の6時間前からモデルで計算して構築した中心部を挿入する
4. 台風近接帯の気候条件と同化させる

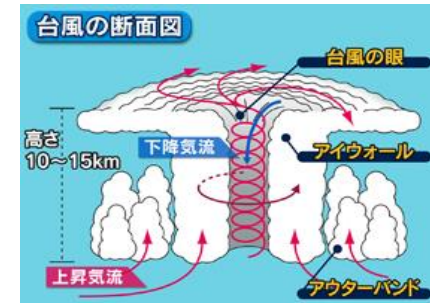


図: 台風の断面図(日本気象協会)

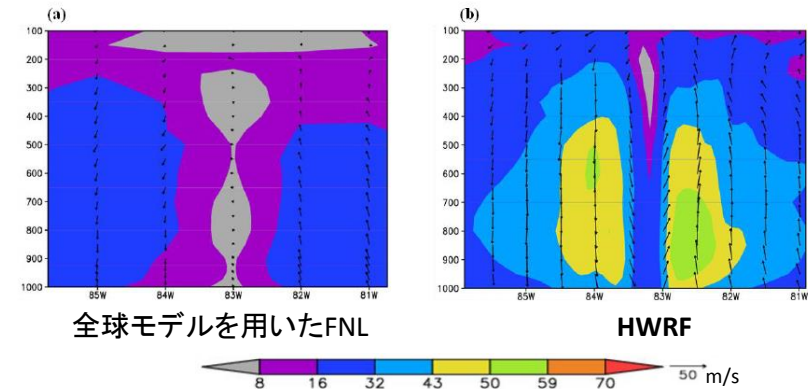


図: ハリケーンKatrinaの断面風速図(Venkata,2011)

台風強度の過小評価が解決できる

2. 海洋モデルPOM-TC とのカップリング

- ・台風は、海水を攪乱して温度変化を起こす

➡ 台風の動力源である水蒸気フラックスに影響

WRFでは海洋モデルは考慮されない為、
強度が過大評価される可能性がある



- ・HWRFは、海洋モデルPOM-TCと同期計算を行う
(POM-TC: Princeton Ocean Model for Tropical Cyclones)
- ・POM-TCでは、タイムステップ毎に
海水温分布を計算し、wrf.exeにフィードバック

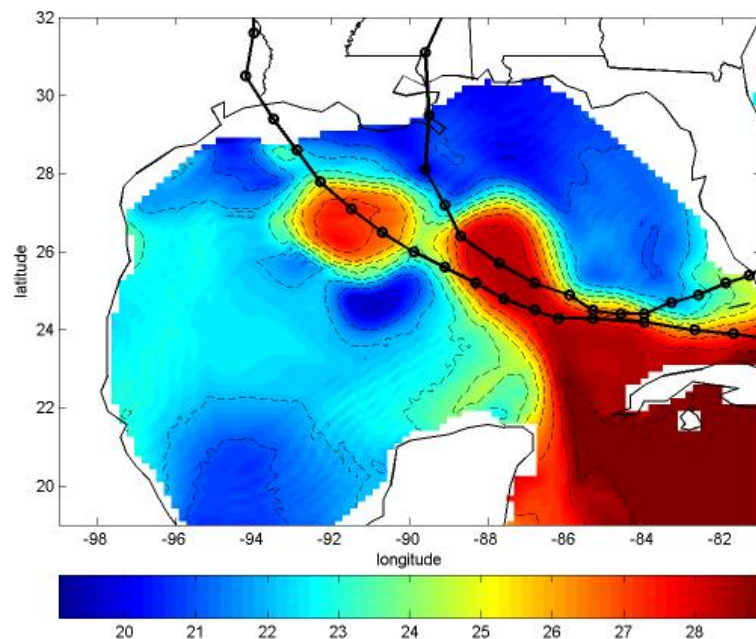


図. Katrina通過後の、深度75m 海水温の変化(URI,2013)

台風強度の過大評価が解決できる

HWRFの再現性評価： ハリケーン Katrina(2005, U.S.)

HWRfの再現性評価:ハリケーン Katrina(2005, U.S.)

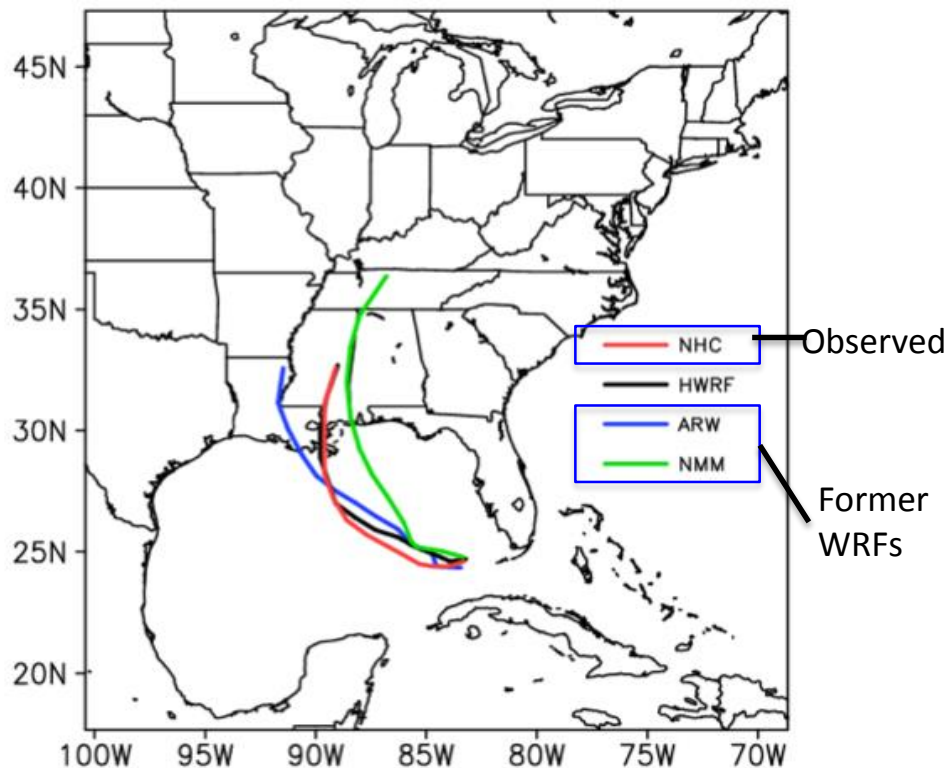


図. シミュレーションと観測結果の比較(Venkata,2011)

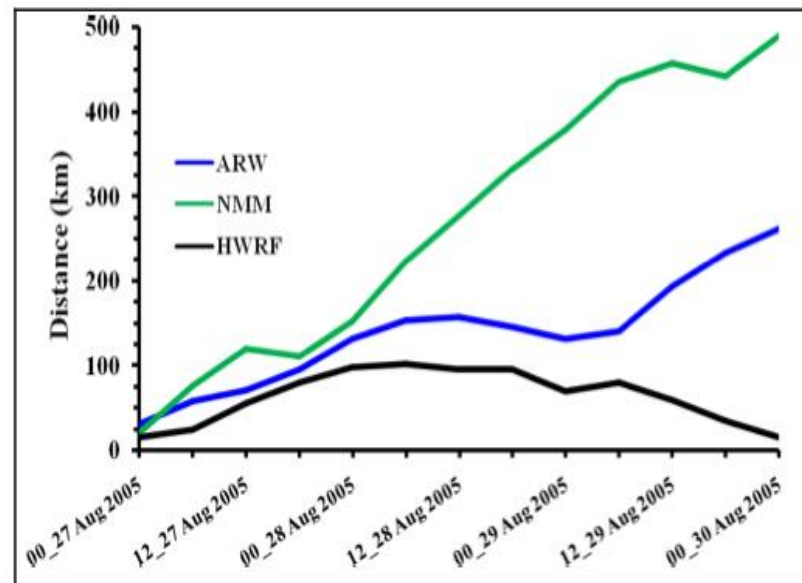


図. 各WRF modelの中心位置の誤差(Venkata,2011)

トラック精度に改善が見られ, この事はローカル地形に大きく依存する
高潮推算において大きな改善となり得る

HWRFの再現性評価: ハリケーン Katrina(2005, U.S.)

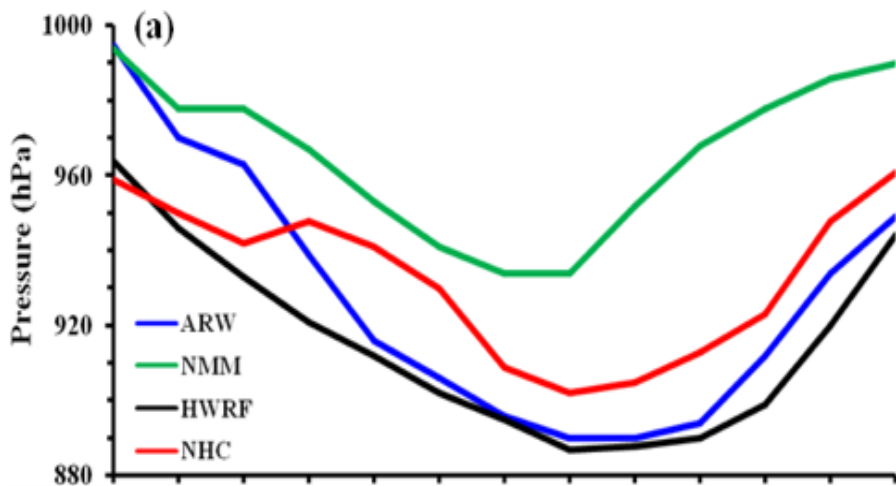


図. 中心気圧推移 (Venkata,2011)

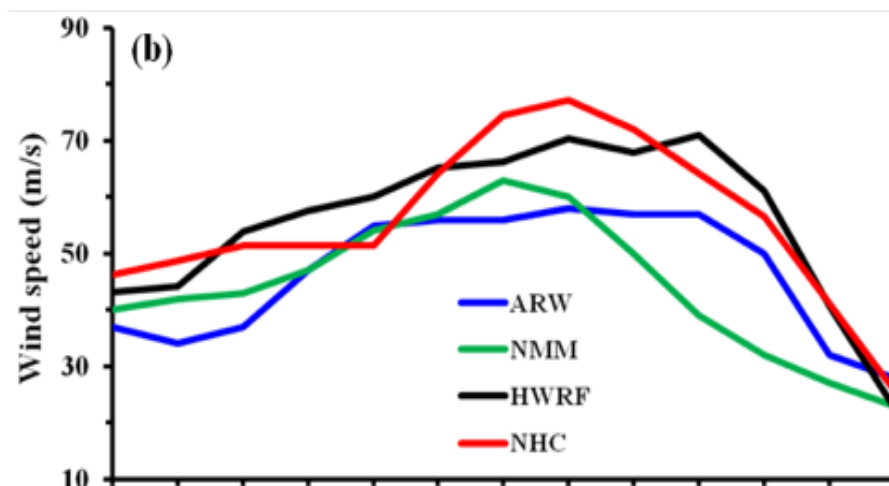
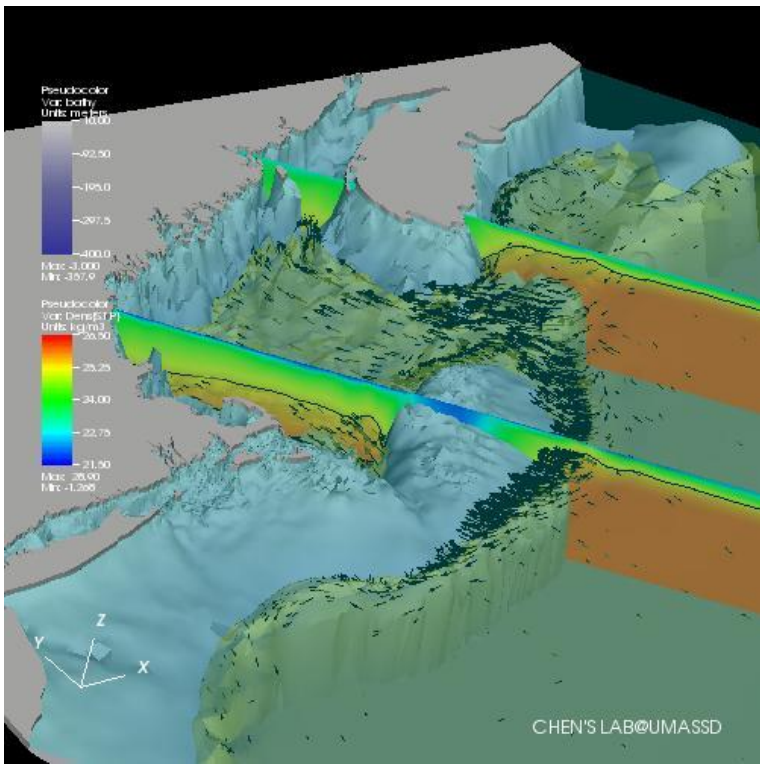
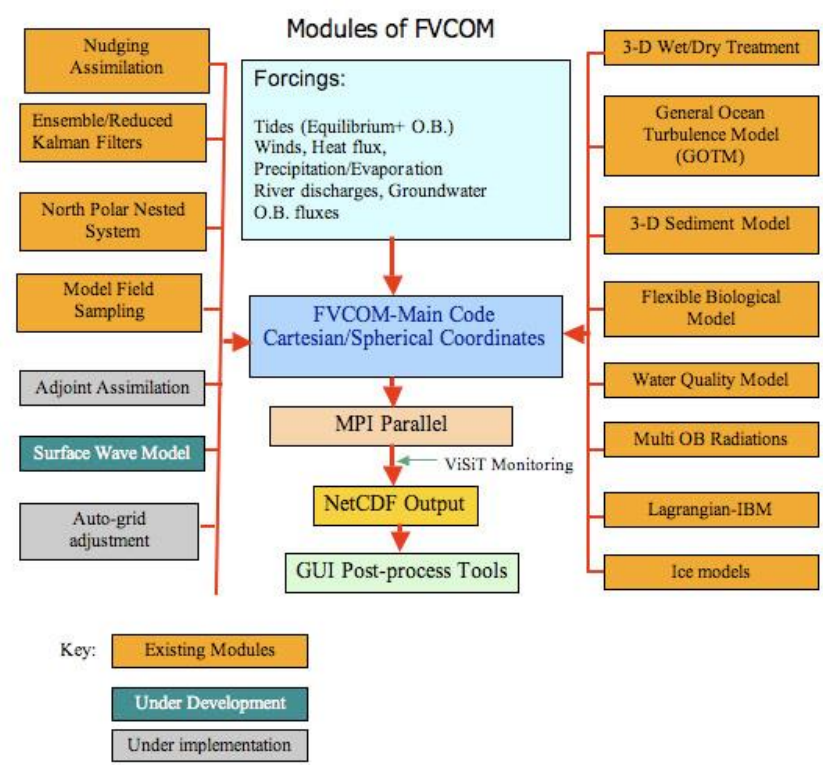


図. 最大風速の推移 (Venkata,2011)

風速に改善が見られ, 風による吹寄せ効果分の大きい
比較的大きな高潮再現の改善になり得る

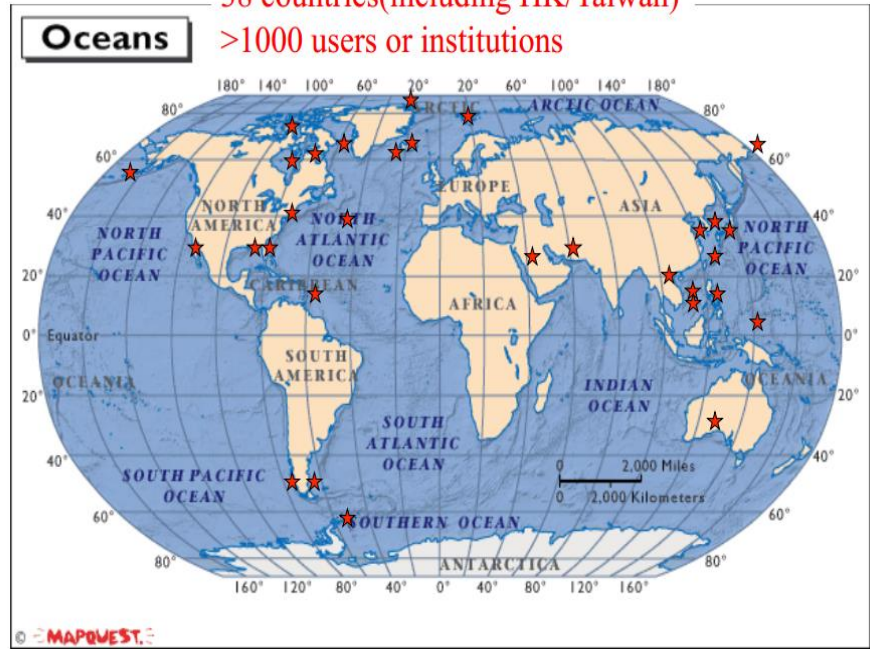
非構造格子 有限体積法海洋モデル FVCOM



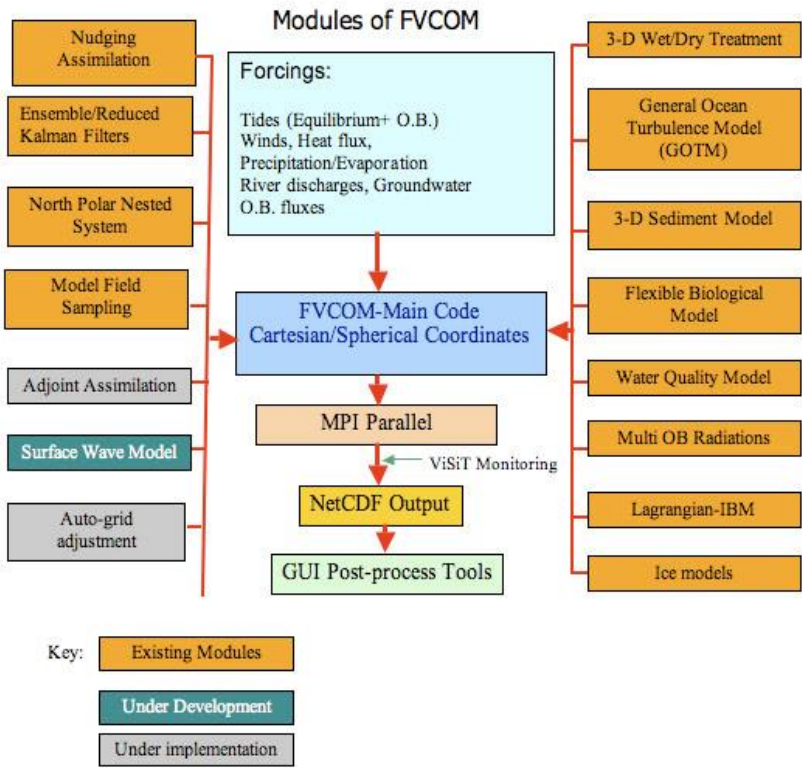
FVCOMとは？

- オープンソース非構造格子有限体積法3-D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1000人, 研究機関のユーザーが存在する

FVCOM Users
38 countries(including HK/Taiwan)
>1000 users or institutions



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

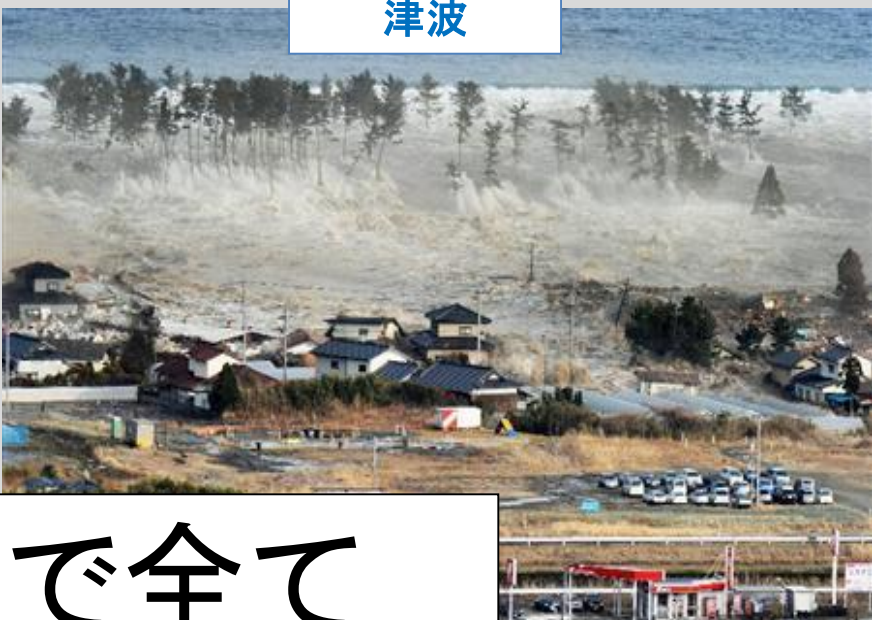


高潮



Fig.1 Storm surge

津波



East Japan
2011.

FVCOMで全て 再現可能



Fig.3 Sample image of Sediment transport



Fig.4 Sample image of Sea Ice Transport

FVCOM 支配方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (p_H + p_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (p_H + p_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + F_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + F_w \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + F_T \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + F_S \\ \rho &= \rho(T, S, p) \end{aligned}$$

従来の高潮モデルの支配方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon_x \frac{\partial u^2}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial u^2}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial u^2}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + \varepsilon_x \frac{\partial v^2}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial v^2}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial v^2}{\partial z^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ 0 &= -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned}$$

方程式はほぼ一致

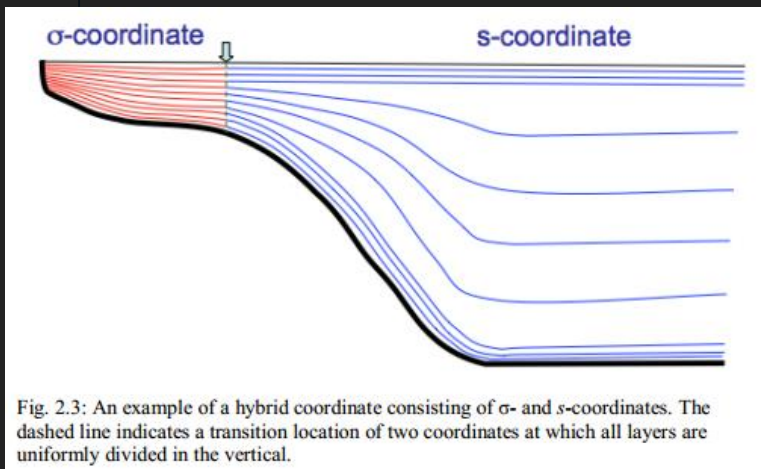
運動量保存 **しかし**



連続式

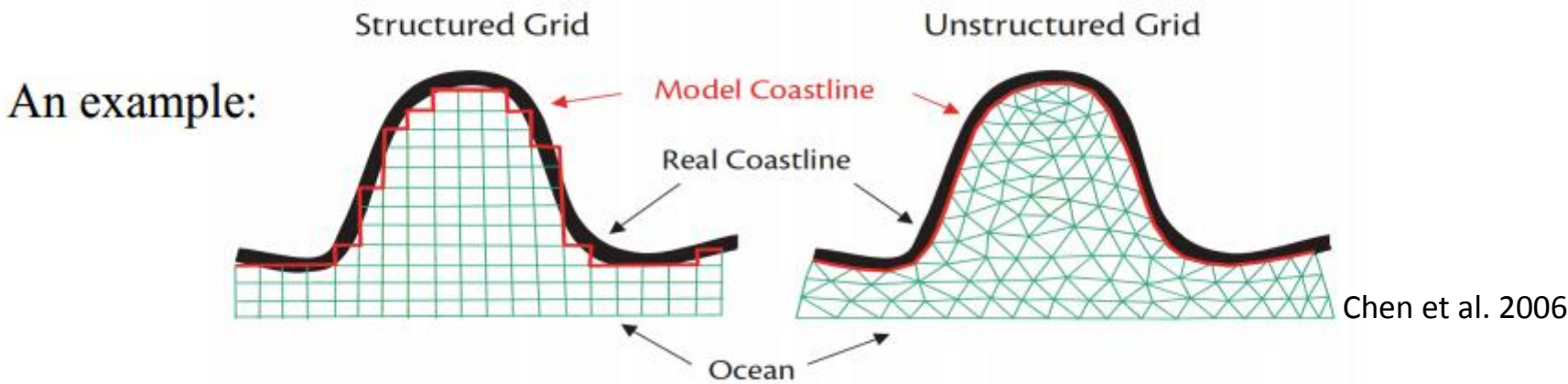
温度の式

FVCOMはZ軸方向は運動量の方程式
:3次元で計算を行っている
従来の高潮モデルのZ軸方向の方程式
はなく、境界条件を設定している
:実質2次元で計算を行っている



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海岸線に沿った地形を再現することが可能



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	単純な計算に向いている 計算時間が早い	複雑な事象を再現可能 複雑な事象での計算結果の信憑性が高い
弱点	複雑な事象の再現性が悪い	膨大な計算時間

論文 1 : 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 , (高潮の浸水計算と韓国におけるハザードマップの作成)

アブストラクト

□ 本論文では有限体積法海洋モデルであるFVCOMを使用して、韓国のマサン、ヤオス、プサンにおける、高潮の挙動、浸水計算を行った。

□ 台風Maeniを対象台風として高潮推算を行っている。

数値計算結果

□ 韓国のマサン、ヤオス、プサンの湾奥の地域においても計算結果が観測値と非常に一致した。



FVCOMは高潮推算に対して、計算可能である。

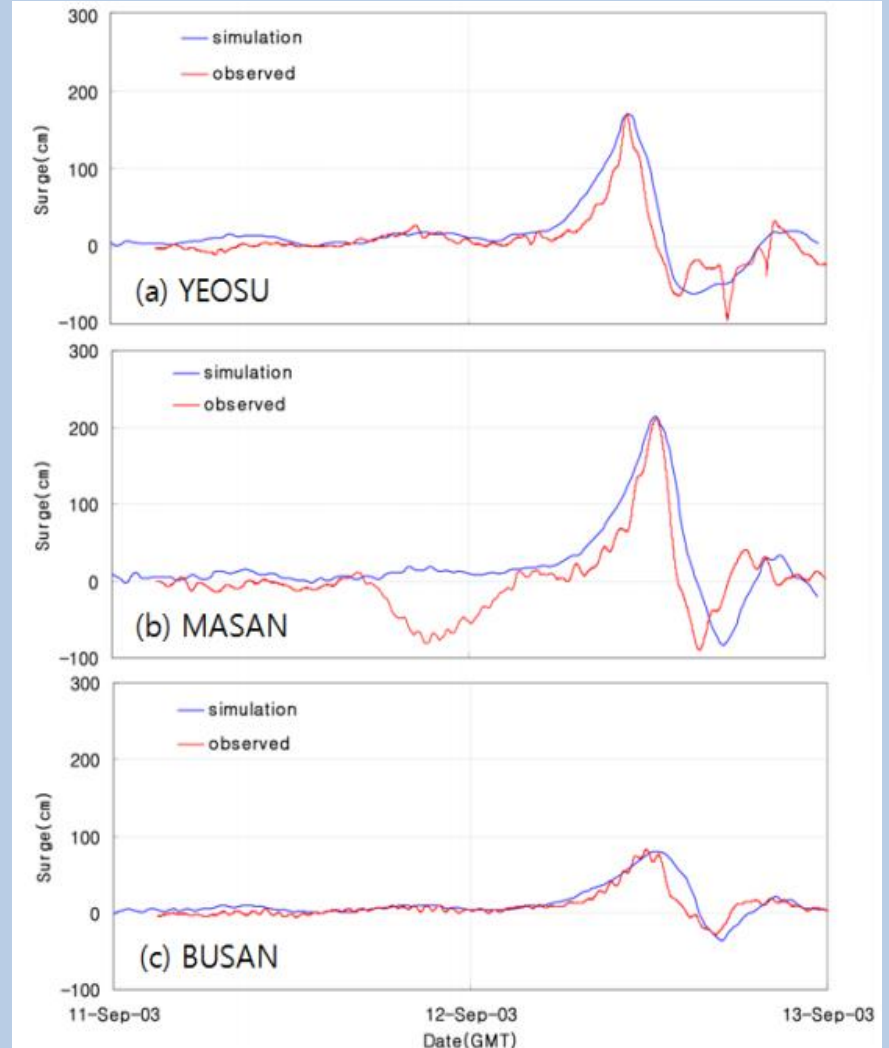


Figure 4. Comparison of observed (red lines) and simulated (blue lines) storm surge heights at Yeosu, Masan and Busan.

◆ OSISの更なる精緻化 ◇ 非構造格子・有限体積法モデル・FVCOM

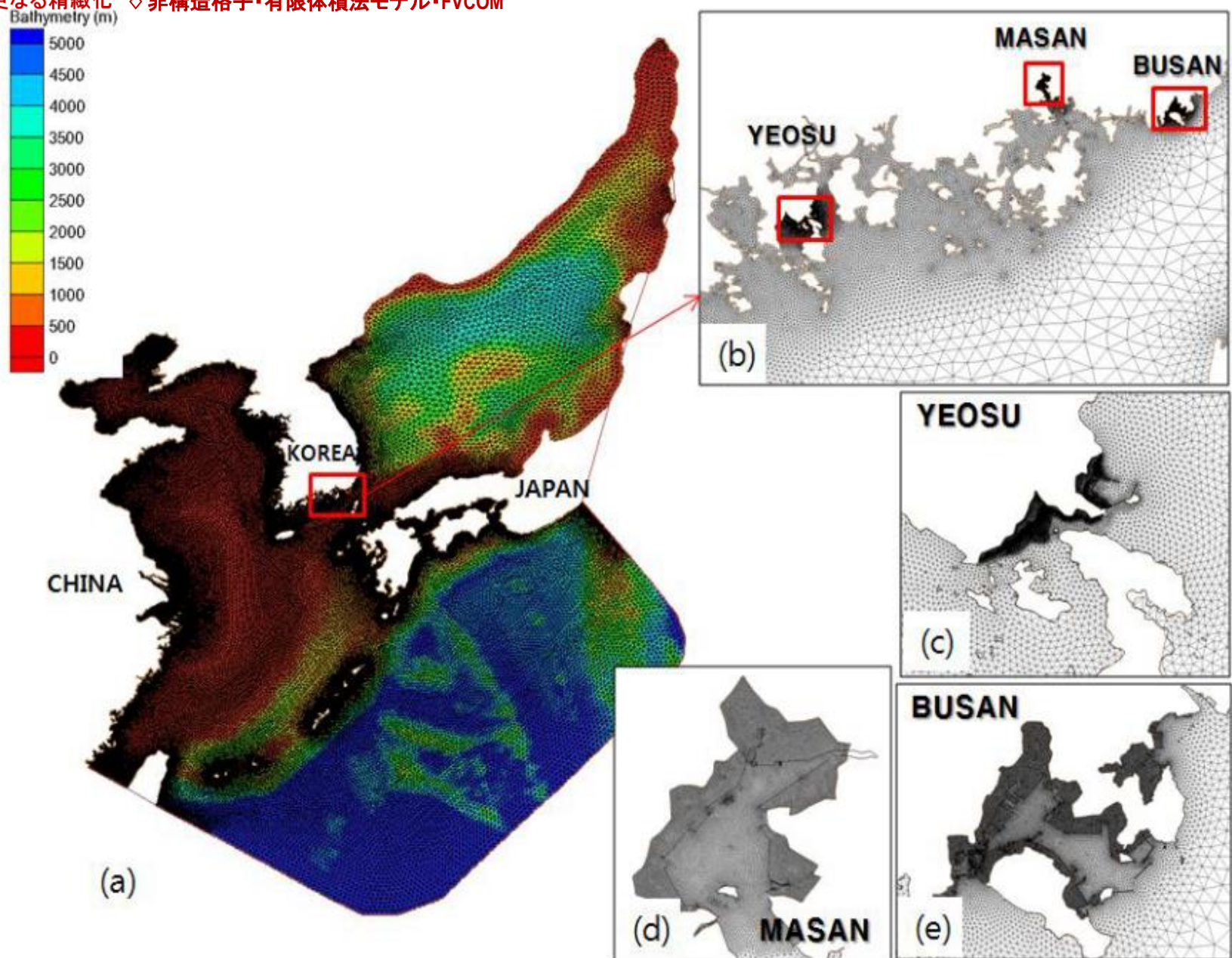


Figure 2. An overview of model domain, (a) Grid composition and bathymetry distribution, (b) Enlarged view at the southern coast of Korea, (c)–(e) Nested grid area for inundation simulations at Yeosu, Masan, and Busan.

論文 2: 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

アブストラクト

- 非構造格子の海洋流動モデルは近年発展がめざましい
- 海洋物理分野で注目を集めているFVCOMを津波へ適用した最初の論文
- FVCOMを2004年インド洋大津波の伝播計算とバンダアチェでの遡上計算を行っている。

数値計算結果

- 赤線 : 浸水域の最大範囲
- 黒線 : 遡上計算範囲



計算の整合性は高い
遡上範囲が若干過小評価になっている個所は建物の高さの情報が標高に反映されているため

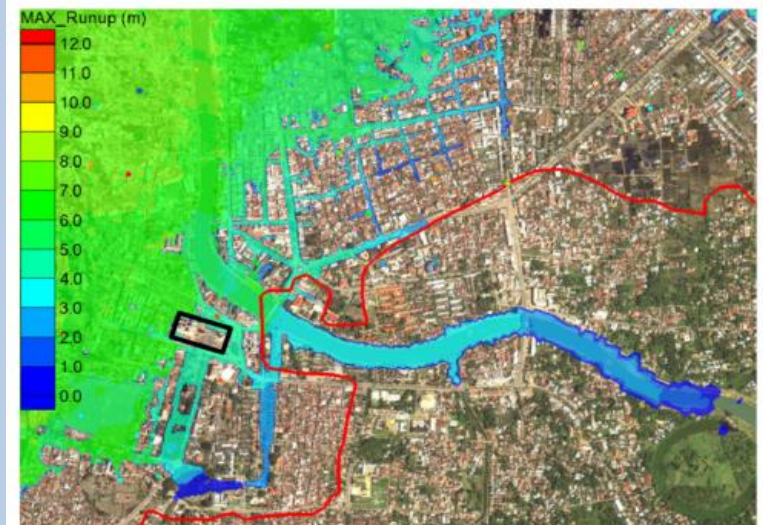


図-10 グランドモスク（図中の矩形）周辺の遡上高の計算値

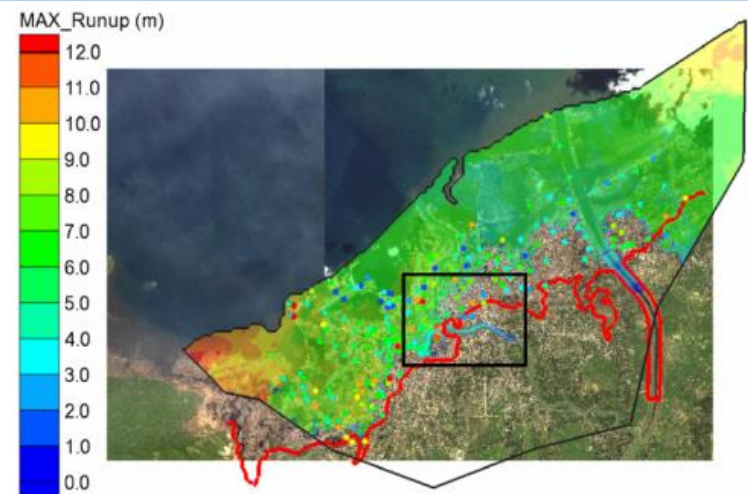
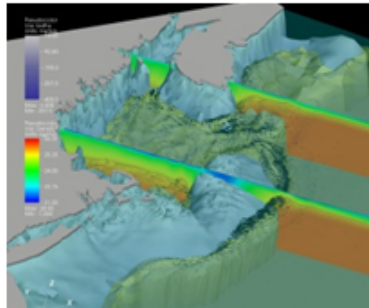


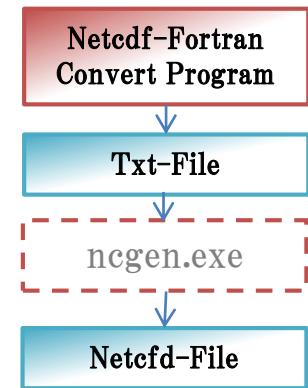
図-9 バンダアチェにおける遡上高の計算値と実測値（色丸）。赤実線は最大遡上域の実測値を示す。



現状の課題

現状の課題

1. NETCDFファイルの作成の際に一度txtファイルに落とし込み、ncgenというコマンドを使ってNetcdfファイルを作成する。
→txtファイルが重くなり、Linuxがフリーズすることがある。
2. FVCOMのマニュアルは非常に難解であり、説明されていない部分が多々存在する。
→Run Fileの操作方法について研究中



◆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ー, 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