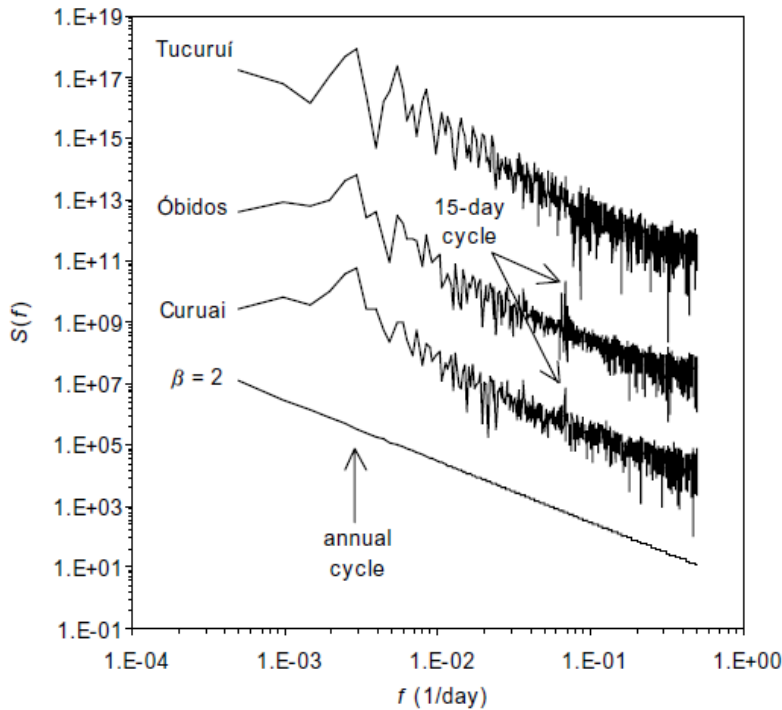


潮汐がアマゾン川の 地表水動態に及ぼす影響： 広域氾濫原モデルによる解析

山崎大⁺、 梶信次郎^{*}、 沖大幹⁺
⁺東京大学生産技術研究所
^{*}東京工業大学大学院

Introduction

世界最大の河川であり広大な氾濫原を有するアマゾン川は、潮汐の影響を大きく受けることで知られている



← Lima et al. (2003),
Advances in Water Resources
中流部でも潮汐成分が卓越

↓ ポロロッカ(川津波)も潮汐が原因



Fig. 4. Power spectra of the water level in Óbidos, Curuai and in the Tucuruí reservoir. Amazon sites show an exponent $\beta \approx 2$, whereas for the Tucuruí reservoir $\beta \approx 2.24$. The arrows indicate peaks of annual seasonal cycles and also 15-day cycles in the Amazon floodplain, due to the bore tide effect. $S(f)$ values were shifted to better distinguish the three spectra.

Introduction

低平地に広がるアマゾン川は、非常に勾配が緩いため：

- > Backwater Effect: 背水効果が無視できない (Maede et al., 1991)
- > 水面標高のわずかな変動が、貯水量や流量にとっては重大な変化となりうる (Alsdorf et al., 2003)

Questions

潮汐の影響を定量化することができるか？

- > 水文モデルを用いて河川における潮汐現象を再現できるか？
- > 潮汐の影響を受けている地域範囲は？ 影響の大きさは？
- > 温暖化による海面上昇で、アマゾン川の水循環は変わるか？

Technical Difficulty

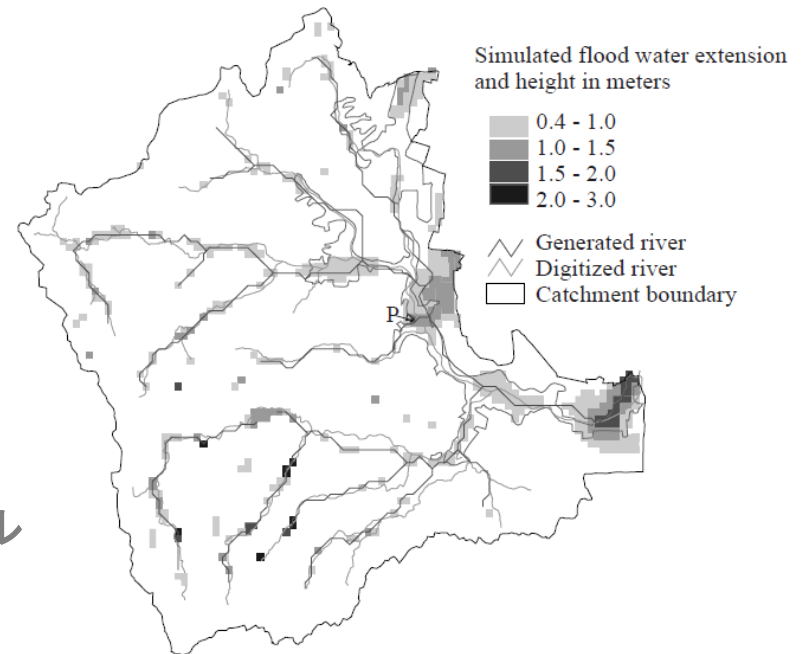
潮汐が河川に及ぼす影響を評価するには、
水面標高がモデルで現実的に再現される必要あり：

> 河道断面形状が分かり、氾濫が起こらない場合：
不等流計算で解析可能。

> 計算範囲が十分に小さい場合は、氾濫原の地形を2次元的に
表現した氾濫モデルで解析可能。

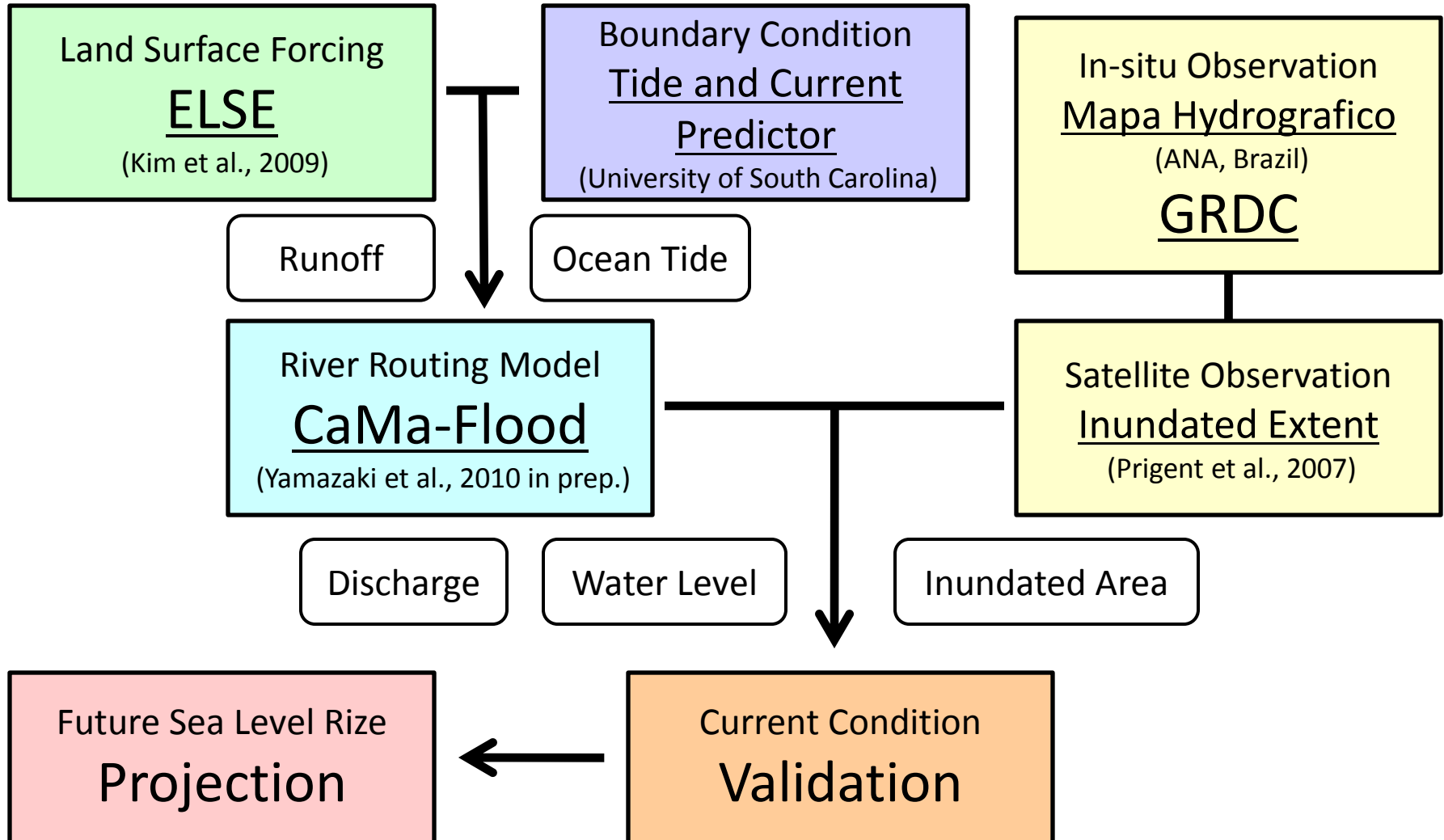
> 広大な範囲で氾濫が起こる
アマゾン川流域で、どのように
貯水量と水深の関係を記述す
るかが、課題となる。

河川氾濫モデル
[Dutta, 2000]



Method

水文モデルを用いて、潮汐の影響評価を行う



River Routing Model: CaMa-Flood

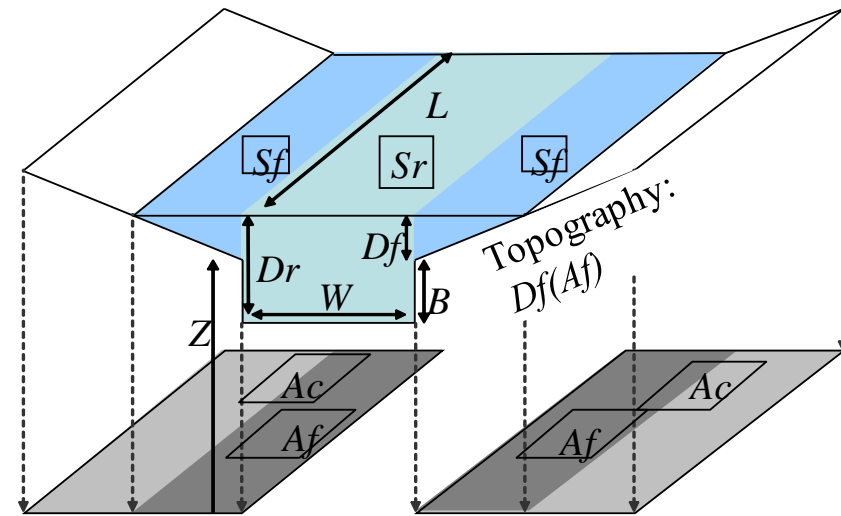
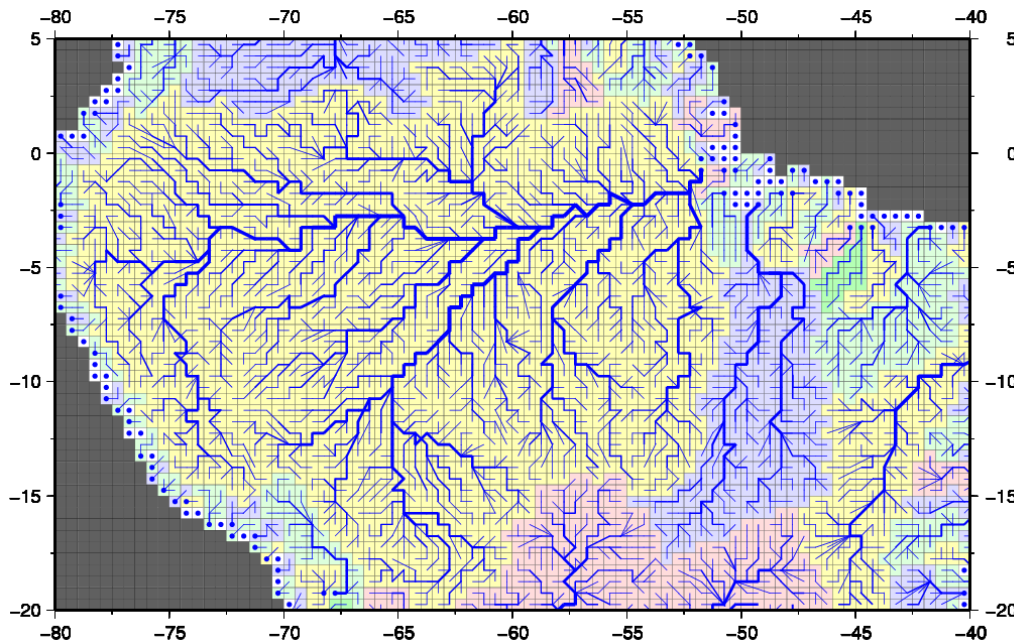
The Catchment-based Macro-scale Floodplain model

>分布型河川流下モデル

>入力 = 陸面モデル流出量; 境界条件 = 河口水位;

出力 = 河川流量, 水位, 氾濫面積, 貯水量

>河道と氾濫原の2つの貯水槽, サブグリッド地形のパラメータ化



Yamazaki et al. (2010), Incorporation of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, JGR (in prep.)

River Routing Model: CaMa-Flood

The Catchment-based Macro-scale Floodplain model

>分布型河川流下モデル

>入力 = 陸面モデル流出量; 境界条件 = 河口水位;

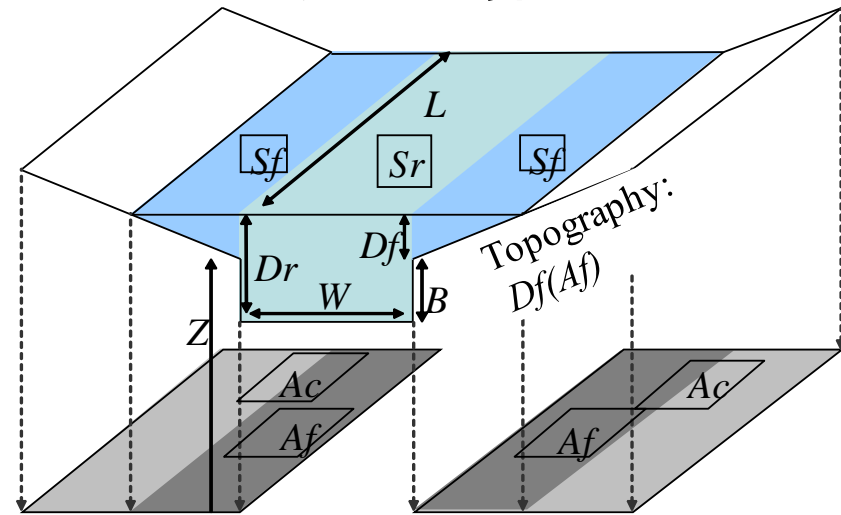
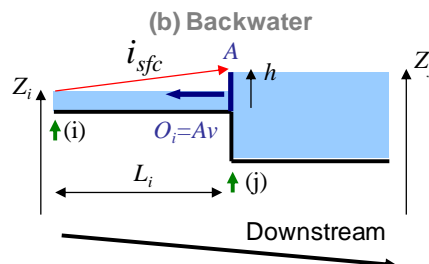
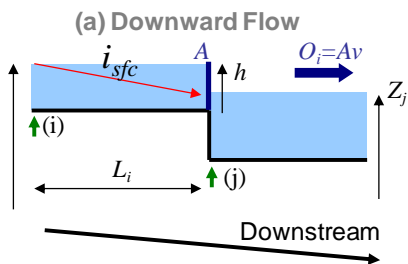
出力 = 河川流量, 水位, 氾濫面積, 貯水量

>河道と氾濫原の2つの貯水槽, サブグリッド地形のパラメータ化

>拡散波方程式によって、河道網にしたがって流下計算

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + i_0 - i_f = 0$$

Dynamic Diffusive Kinematic



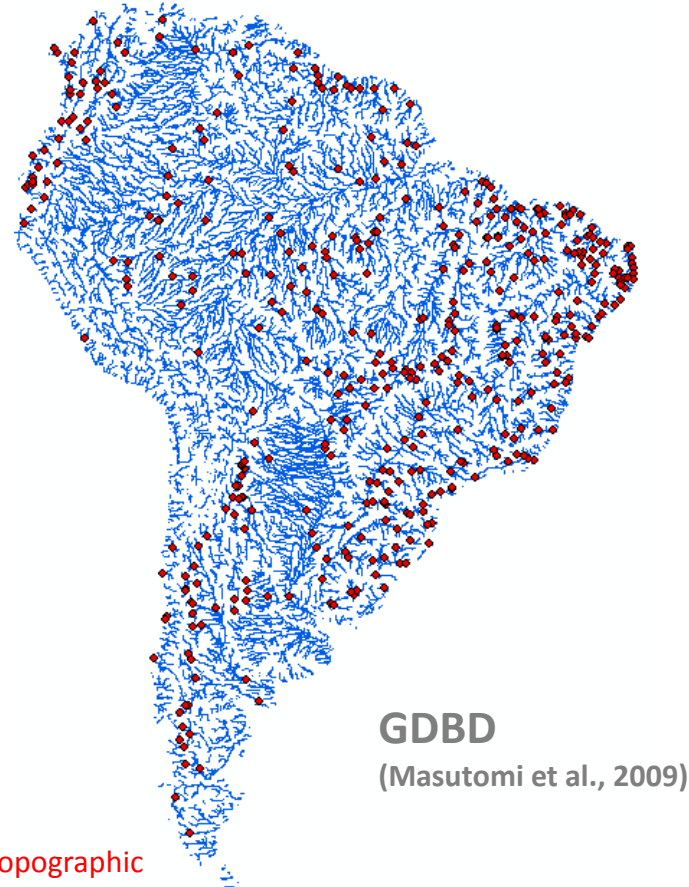
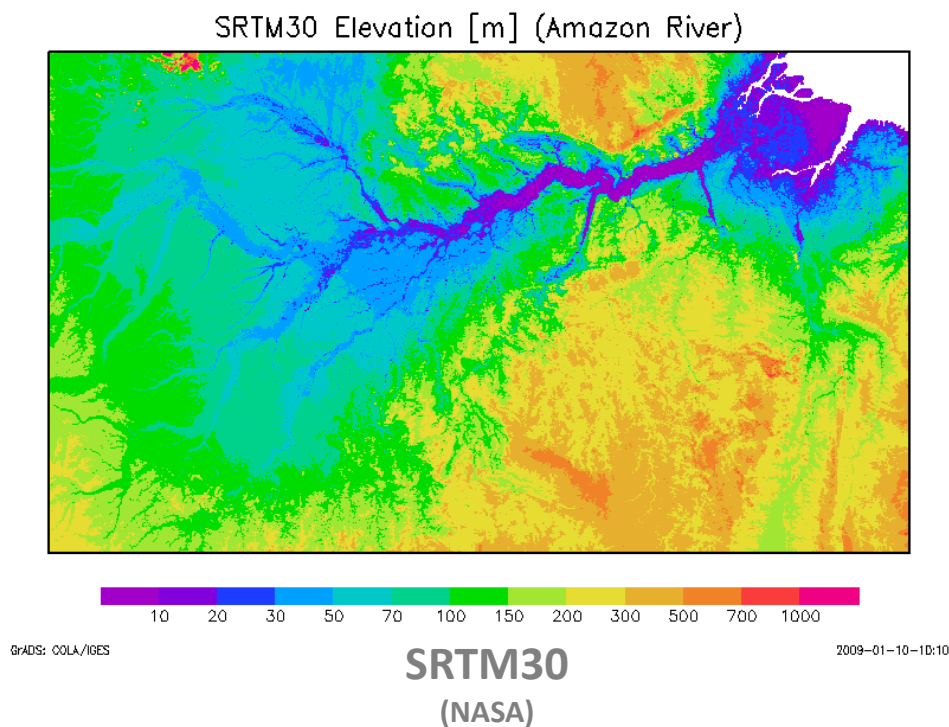
Yamazaki et al. (2010), Incorporation of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, JGR (in prep.)

Sub-grid Topography: FLOW

Flexible Location of Waterways method

>河道網とサブグリッド地形パラメータを客観的・自動的に抽出

>入力 = 1km解像度DEM & 表面流向データ

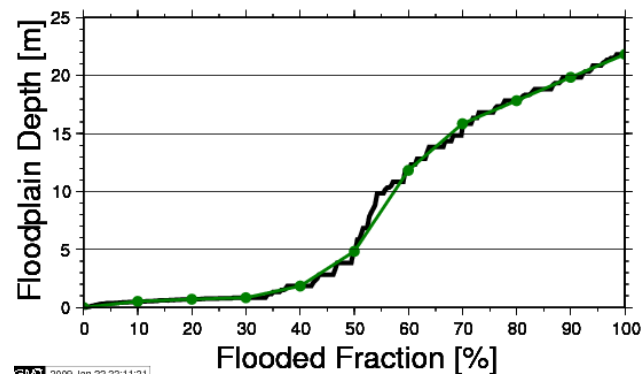
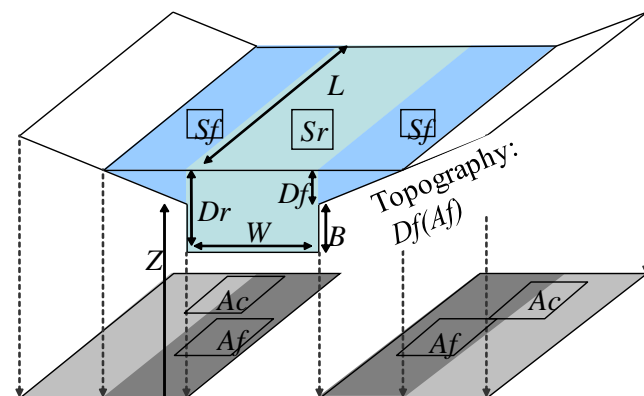
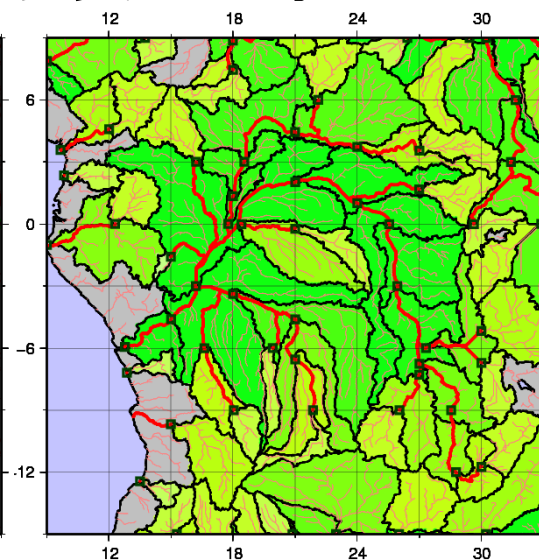
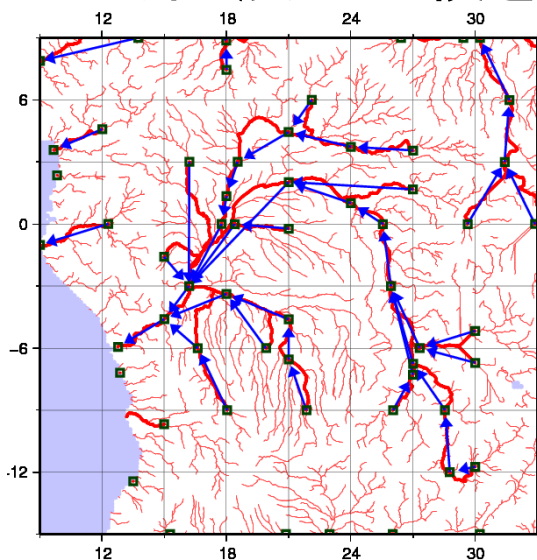


Yamazaki et al. (2009), Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map, *HESS*, **13**, 2241–2251

Sub-grid Topography: FLOW

Flexible Location of Waterways method

- >河道網とサブグリッド地形パラメータを客観的・自動的に抽出
- >入力 = 1km解像度DEM & 表面流向データ
- >出力 = 河道網, 河道標高, 河道長, 集水面積, 氾濫原地形分布
- >水深・浸水面積を現実的に導出



Yamazaki et al. (2009), Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map, *HESS*, **13**, 2241–2251

Boundary Condition: Ocean Tide

潮汐を支配する主要因:

- > 惑星の重力
- > 潮汐の自系列変動は、多数の周期成分に分解できる
それぞれの成分は、特定の惑星の影響に相当する
 - 変動のほとんどは主要4成分で説明することができる:

	Component	Cycle θ [h]	Factor(s)
M_2	Principal lunar semi-diurnal tide (主太陰半日周期)	12.42	Relative position of the Earth - Moon
K_1	Luni-solar diurnal tide (日月合成日周潮)	23.94	Relative position of the Earth - Moon - Sun
S_2	Principal solar semi-diurnal tide (主太陽半日周潮)	12.00	Relative position of the Earth - Sun
O_1	Principal lunar diurnal tide (主太陰日周潮)	25.82	Earth - Moon: (球面調和関数の第2モード) 2nd mode of Spherical Harmonics

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{t-t_1}{\theta_1} 2\pi\right) + a_2 \cos\left(\frac{t-t_2}{\theta_2} 2\pi\right) + a_3 \cos\left(\frac{t-t_3}{\theta_3} 2\pi\right) + a_4 \cos\left(\frac{t-t_4}{\theta_4} 2\pi\right) + \varepsilon(t)$$

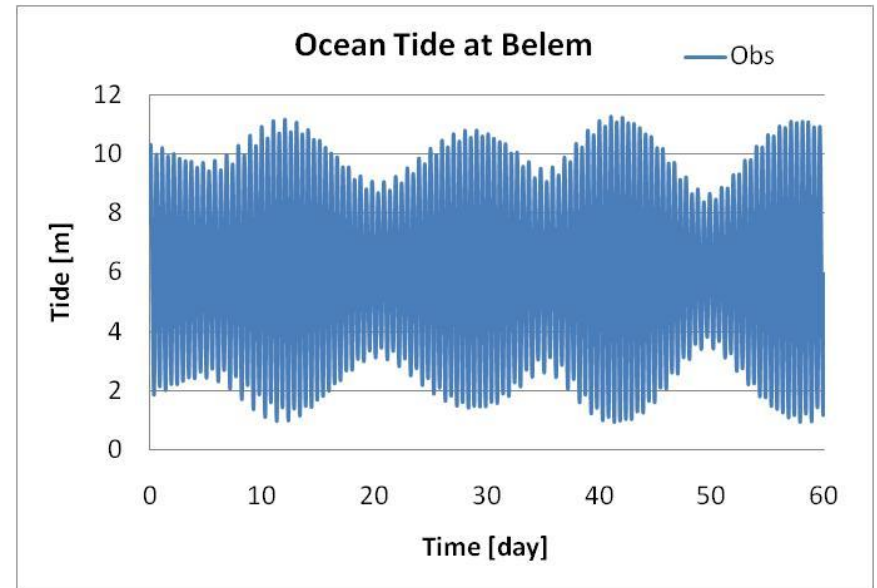
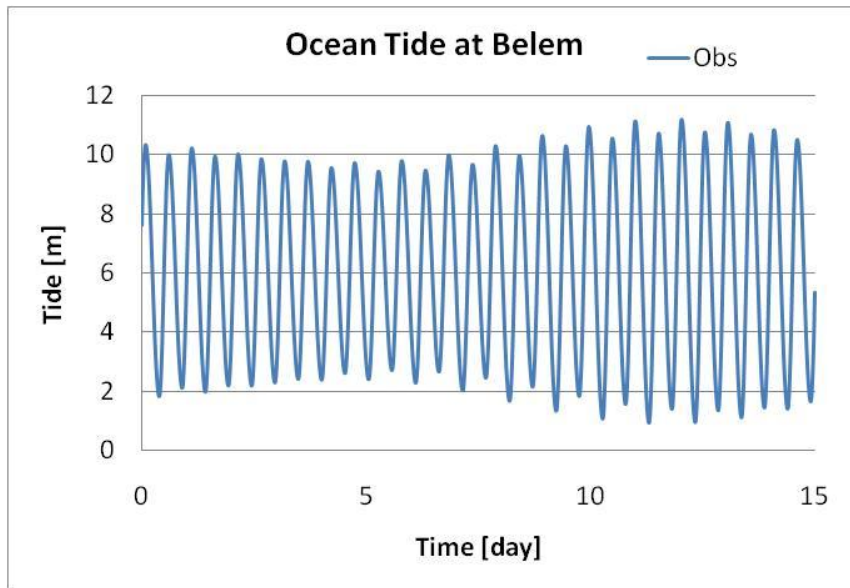
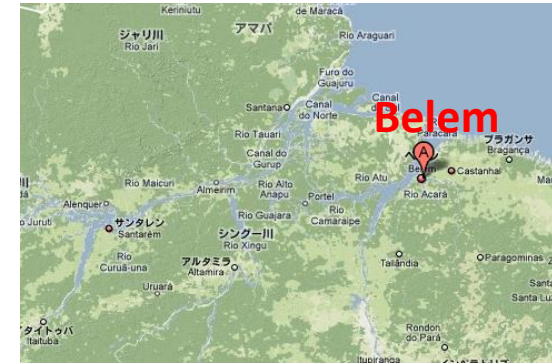
Boundary Condition: Ocean Tide

潮汐のパラメータをどう決めるか？

>物理モデルの結果を用いてカリブレーション

- “Tide and Current Predictor”を真値とする

(University of South Carolina, <http://tbone.biol.sc.edu/tide/>)



$$f(t) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{t-t_1}{\theta_1} 2\pi\right) + a_2 \cos\left(\frac{t-t_2}{\theta_2} 2\pi\right) + a_3 \cos\left(\frac{t-t_3}{\theta_3} 2\pi\right) + a_4 \cos\left(\frac{t-t_4}{\theta_4} 2\pi\right) + \varepsilon(t)$$

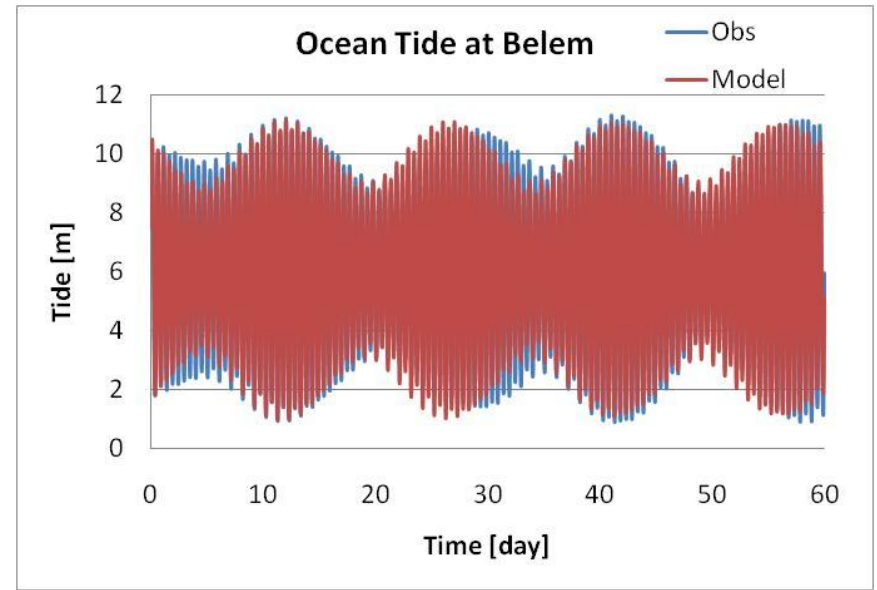
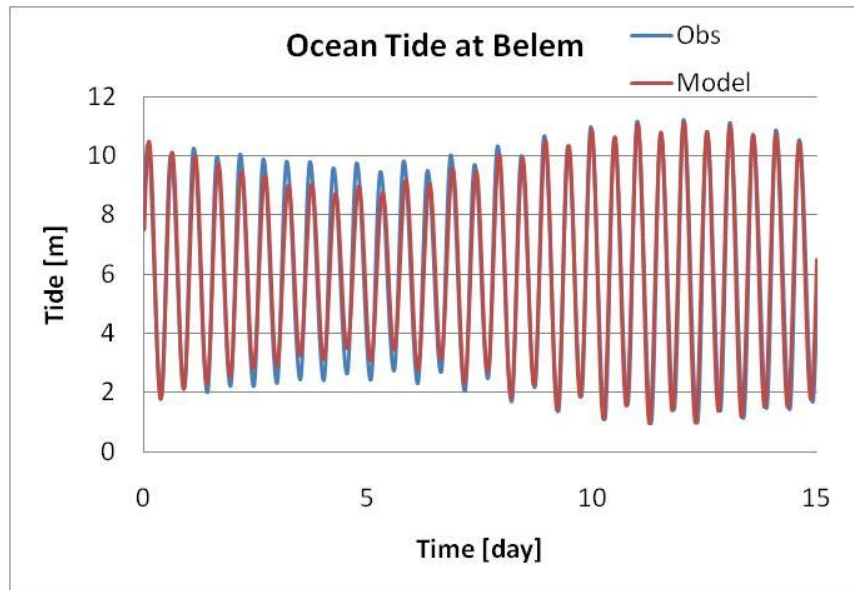
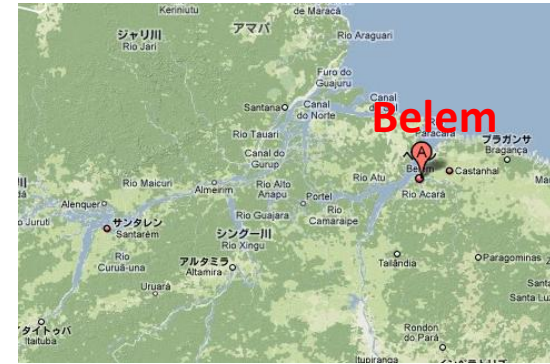
Boundary Condition: Ocean Tide

潮汐のパラメータをどう決めるか？

>物理モデルの結果を用いてカリブレーション

- “Tide and Current Predictor”を真値とする

(University of South Carolina, <http://tbone.biol.sc.edu/tide/>)

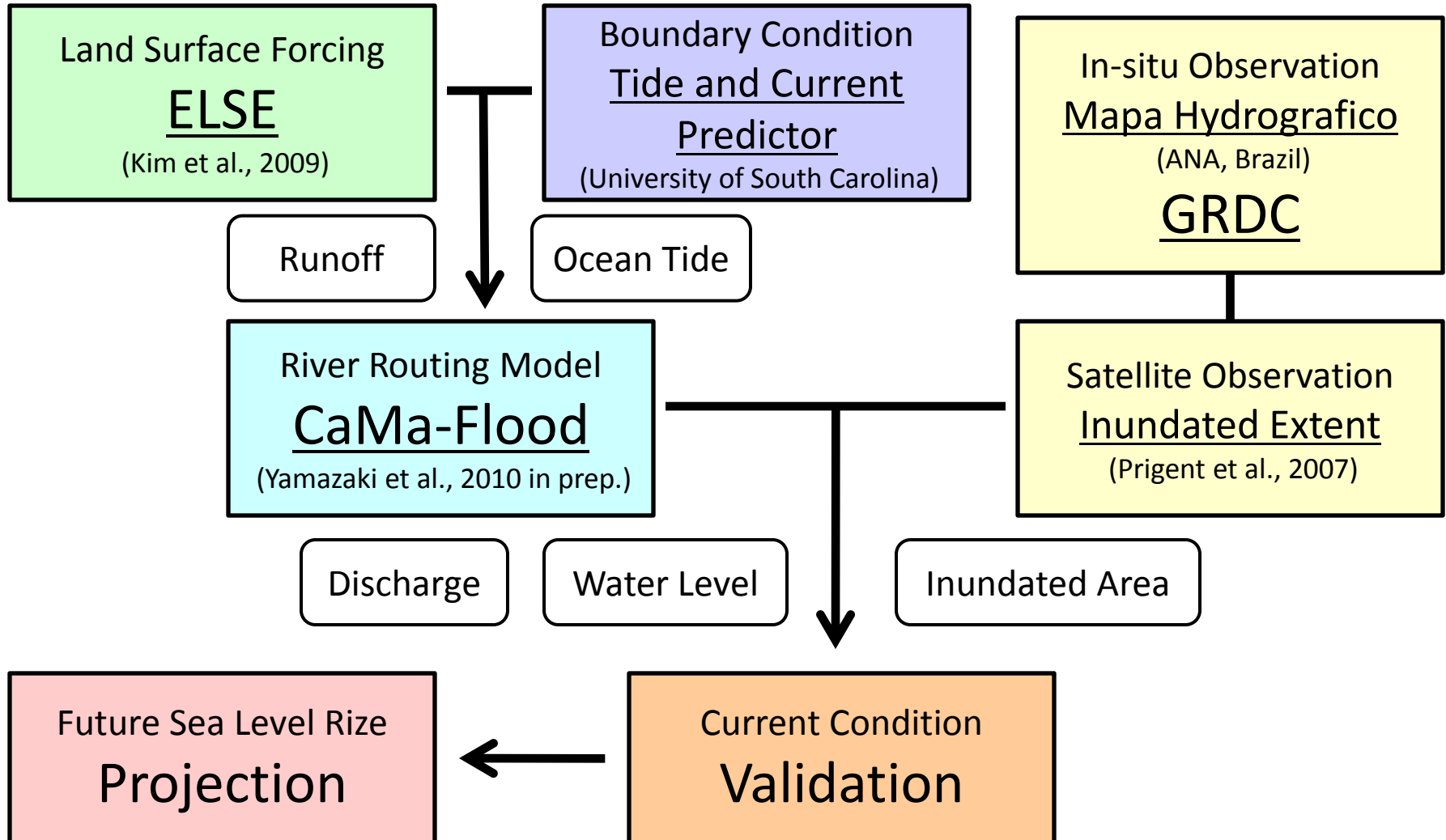


$$f(t) = 6.08 + 3.83 \cos\left(\frac{t-3.21}{12.42} 2\pi\right) - 0.18 \cos\left(\frac{t-7.02}{23.93} 2\pi\right) + 1.07 \cos\left(\frac{t-0.85}{12.00} 2\pi\right) + 0.19 \cos\left(\frac{t-4.30}{25.82} 2\pi\right)$$

RMSE=0.36 [m]

Method

水文モデルを用いて、潮汐の影響評価を行う



Simulation 1

潮汐が河川に及ぼす影響を数値モデルで表現できるか？

> 実験設定

- River routing: CaMa-Flood

空間解像度 = 0.25° , 時間解像度 = 15 min

- Input Forcing Runoff: ELSE

空間解像度 = 1° , 時間解像度 = 1 day, 単純内挿

- Ocean Tide Boundary Condition:

“Tide” = 経験式で潮汐変動を与える

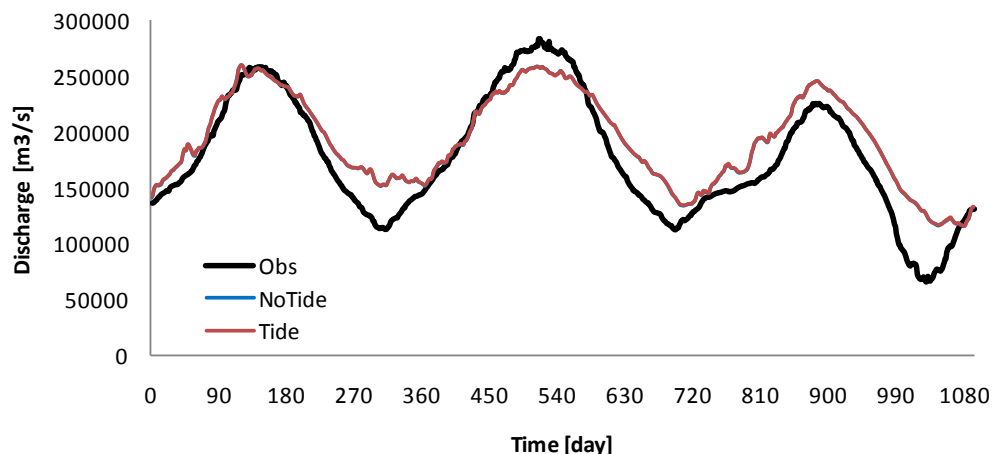
“NoTide” = 平均潮位を与える

Results: River Discharge

河口から800km上流にあるObidosにおいて

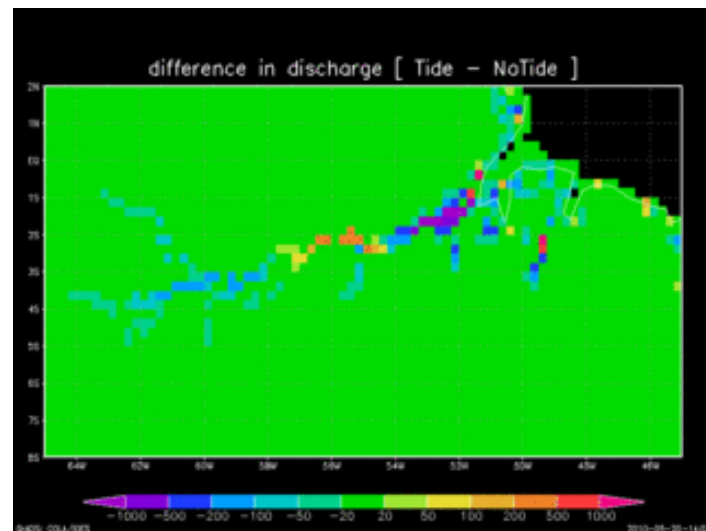
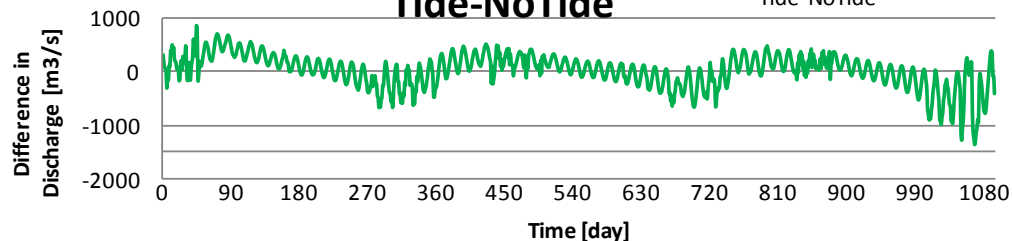
潮汐の影響は計算できるか？

River Discharge at Obidos



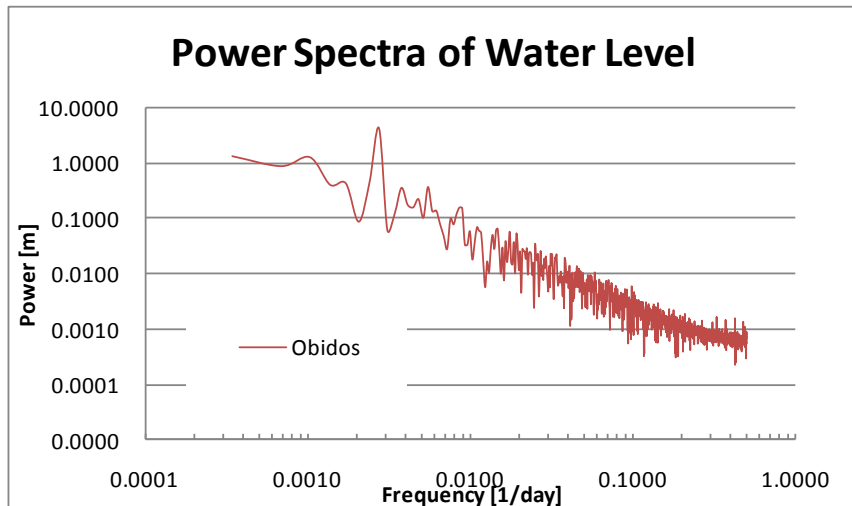
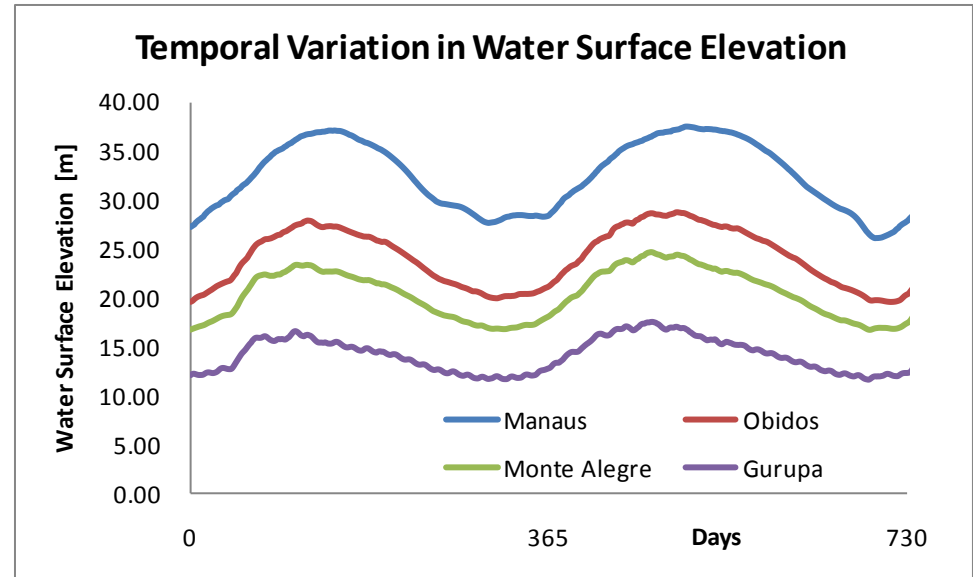
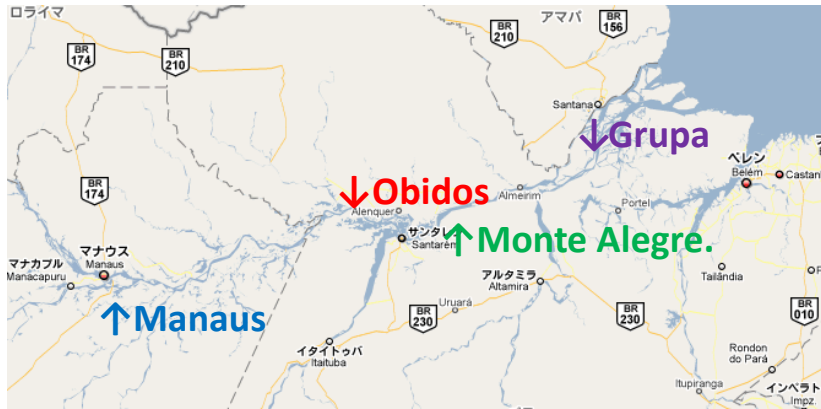
- 1) 河川モデルは日単位で流量をよく再現できている
- 2) Obidosにおいて潮汐由来の周期成分が確認できる
- 3) 流量変動の下流から上流への伝搬を計算できている

Tide-NoTide



Results: Water Level

潮汐に影響を受ける範囲は? どの程度の影響か?



Power-Spectra Analysis

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_k^N \left\{ a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{L} t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{L} t\right) \right\}$$

Fourier Transform

$$f_k = \frac{k}{L}$$

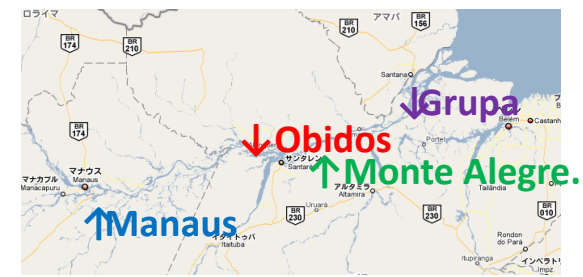
Frequency

$$S(f_k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

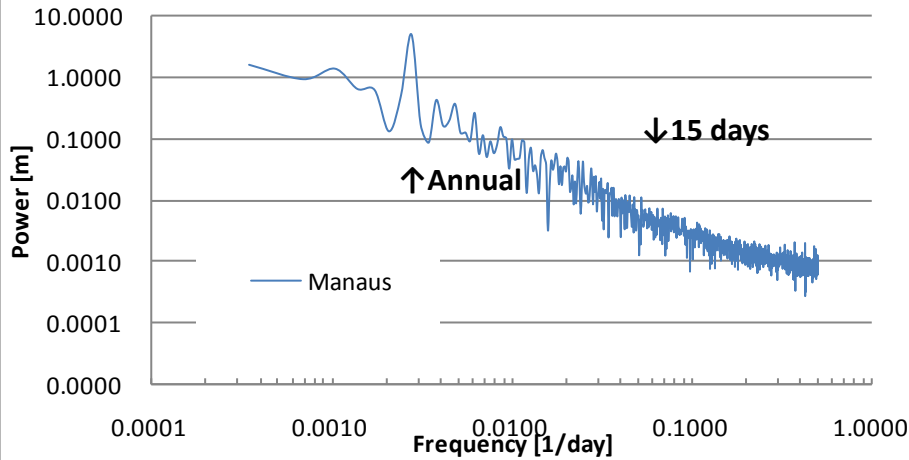
Power

Results: Water Level

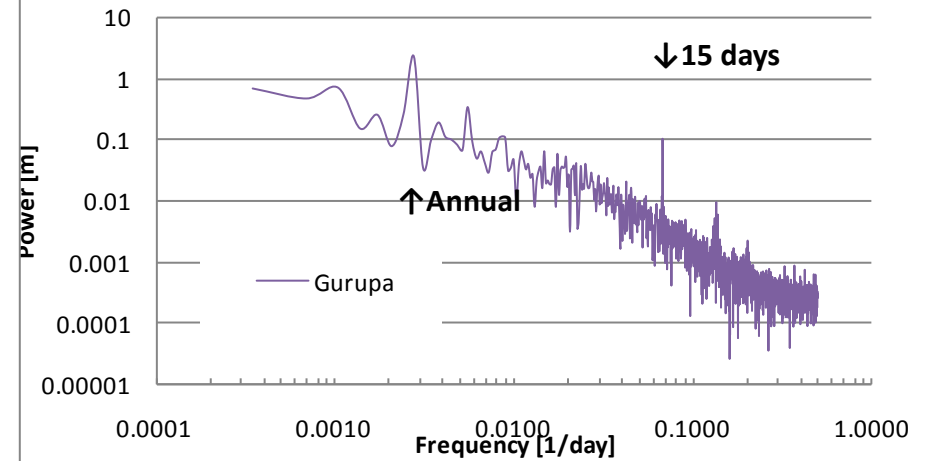
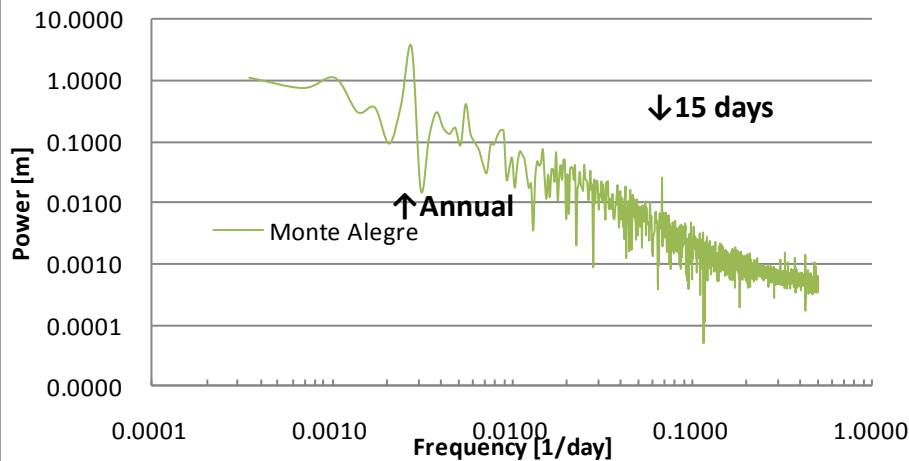
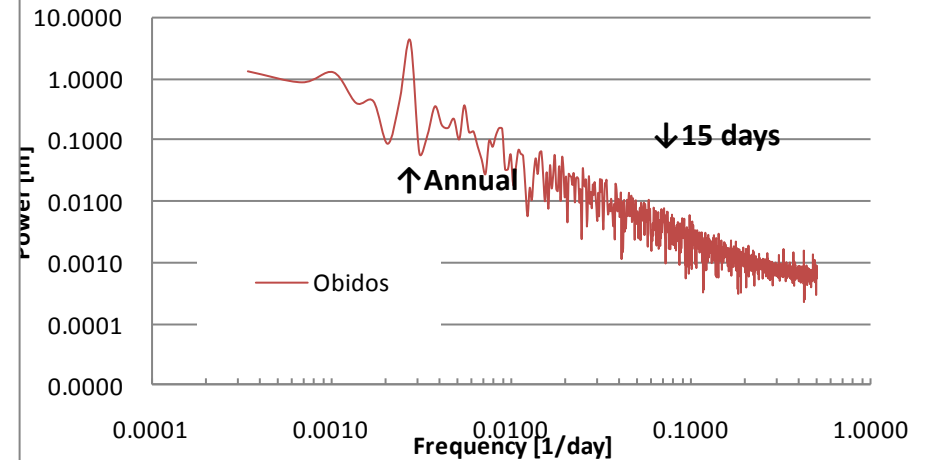
Power-Spectra Analysis



Power Spectra of Water Level

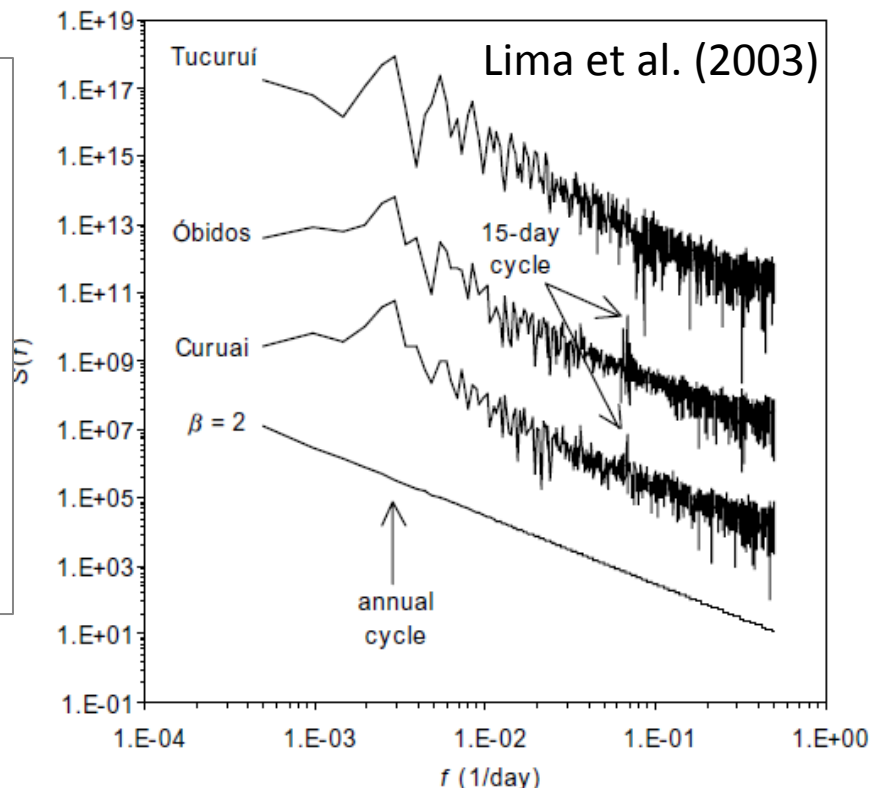
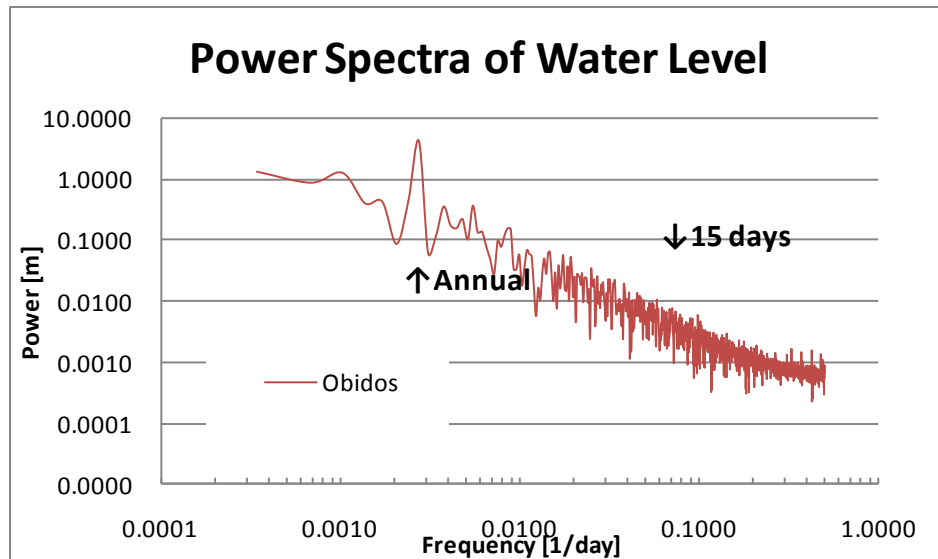
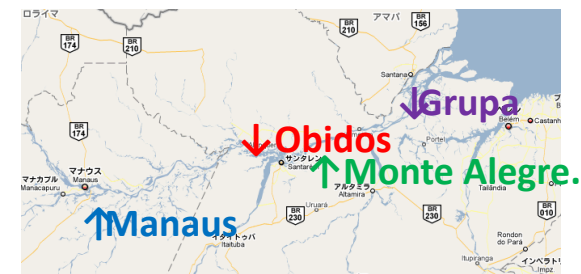


Power Spectra of Water Level



Results: Water Level

Power-Spectra Analysis



Monte Alegre (河口から600km)までは15日周期が見える
Obidos では、観測では15日周期が見えるが、モデルでは見えない
⇒ 潮汐の影響は、ある程度までは再現されているが、まだ不十分

Simulation 2

将来予測される海面上昇は、
アマゾン川の地表水動態にどう影響を及ぼすか？

> Simulation setting

- River routing: CaMa-Flood

空間解像度 = 0.25° , 時間解像度 = 15 min

- Input Forcing Runoff: ELSE

空間解像度 = 1° , 時間解像度 = 1 day, 単純内挿

- Ocean Tide Boundary Condition:

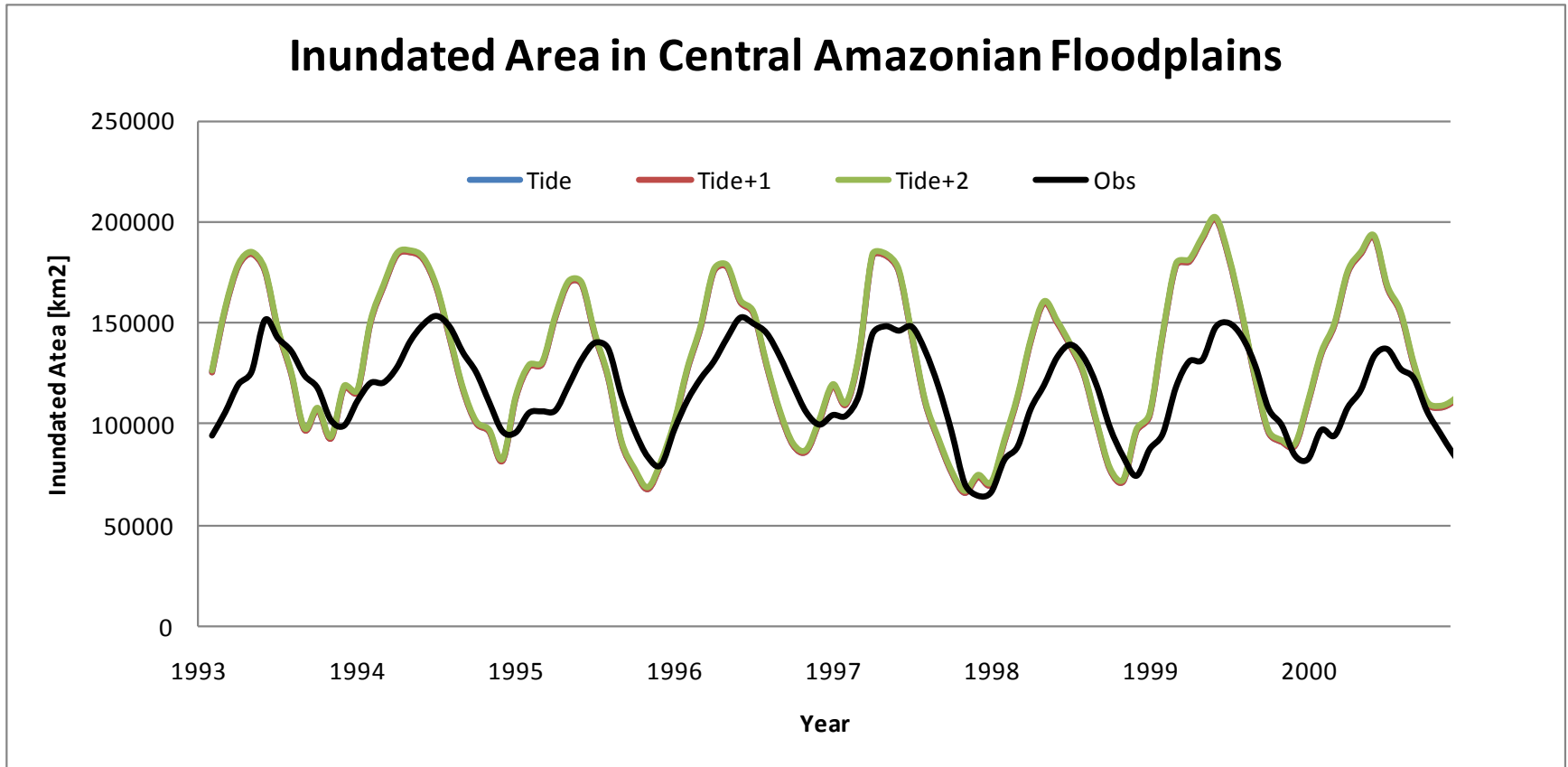
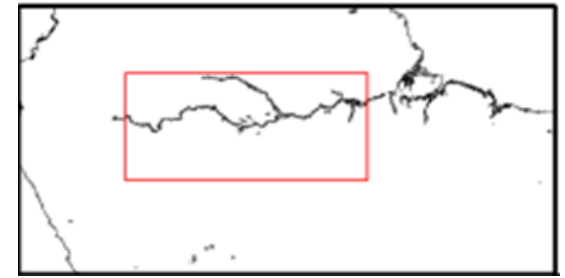
“Tide” = 経験式による現実的な海面潮位

“Tide+1” = Tide から単純に 1-m 海面上昇

“Tide+2” = Tide から単純に 2-m 海面上昇

Results: Inundated Area

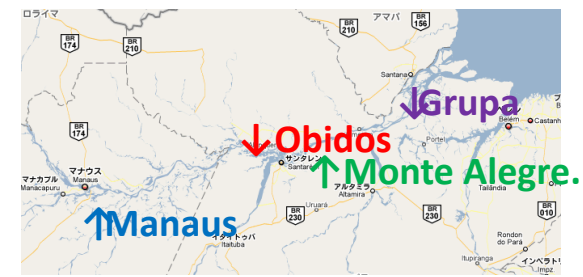
Obs: [Prigent et al., 2007, JGR]



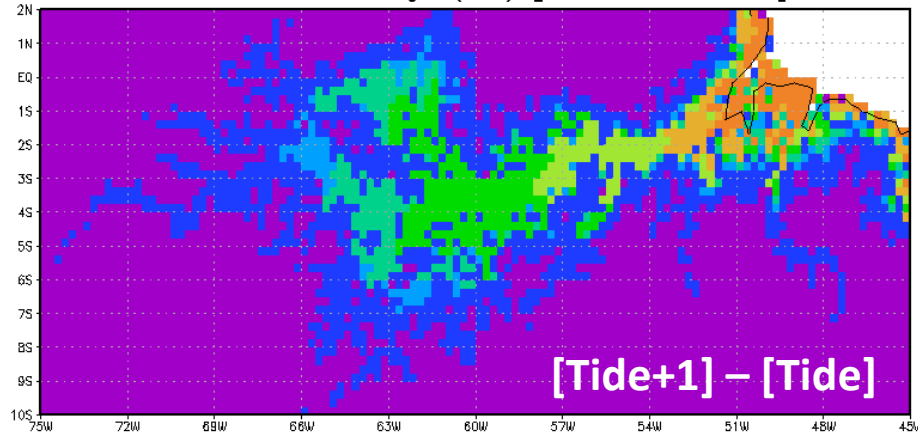
> 海から離れたところでは、
海面上昇は氾濫面積に大きく影響を与えない

Results: Water Level

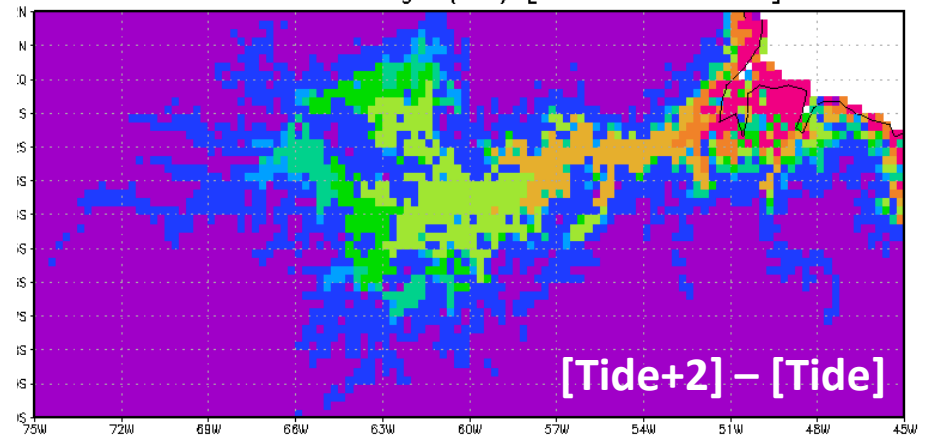
Changes in Maximum water level.
(Max. during 1993-2000)



Water Level Change (cm) [Tide+1 - Tide]



Water Level Change (cm) [Tide+2 - Tide]

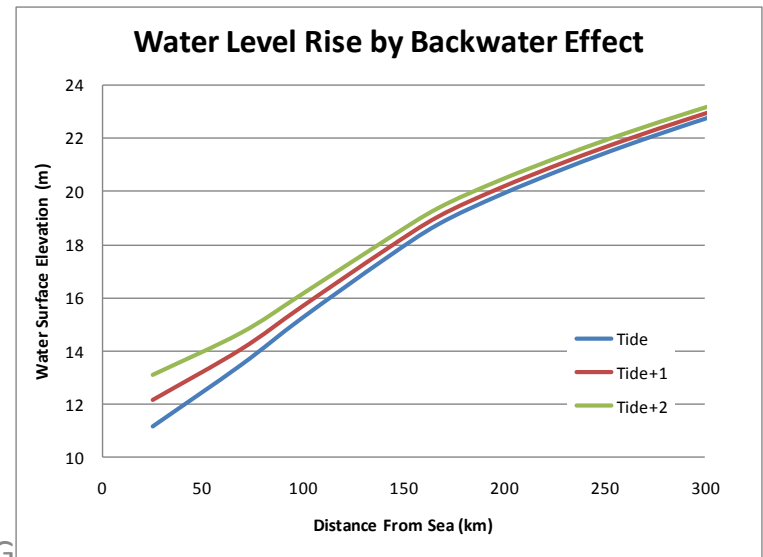


> 中流でも水位上昇

Tide+1では5~10cm, Tide+2では10~50cm

> Backwater Effectで海面上昇が
上流側まで伝わっている

影響範囲は、基準海面標高+2mではない



Summary

潮汐がアマゾン川の地表水動態に及ぼす影響を
広域氾濫原モデルを用いて評価した

- > 経験式で潮位変動を与えることで、
CaMa-Floodは潮汐の影響を再現することができた
 - 河口から約800km上流のObidosで、
河川流量に潮汐由来の成分が検出できた
 - 水面標高のスペクトル解析では、
河口から約600kmまでで15日周期成分の卓越が見られた。
(ただし、観測ではさらに上流でも検出できている)
- > 海面上昇がアマゾン川の地表水動態に及ぼす影響を評価した
 - 中流部における氾濫面積はほぼ変化しない
 - 年最高水位の上昇は、Backwater Effectによって
海面水位上昇分よりも標高差が大きい地点まで伝搬する。

Thank you for your kind attention!

Impact of Ocean Tide
on Surface Water Dynamics
in Amazon River

D. Yamazaki, T. Oki, and S. Kanae
IIS, U-Tokyo

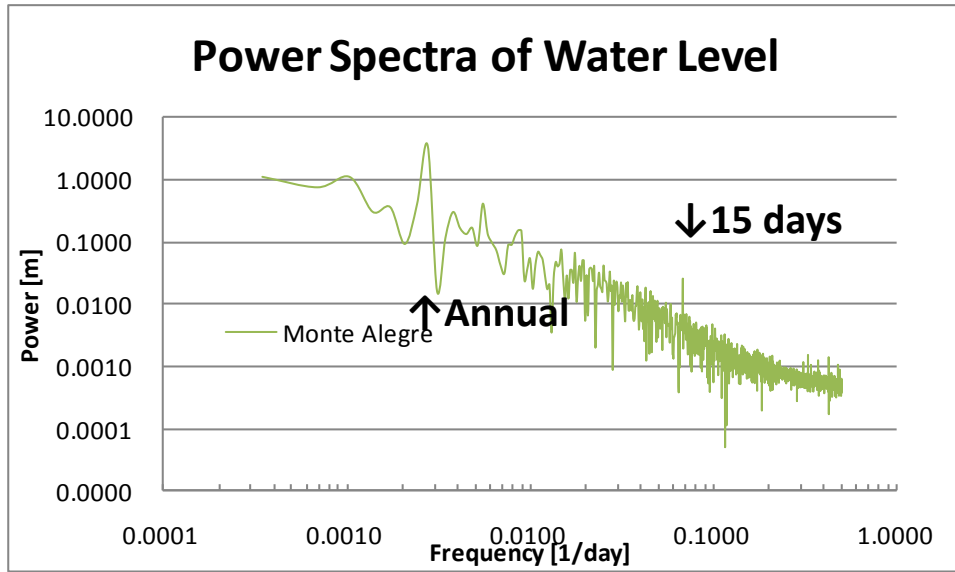


Figure: Power-spectra analysis of water level at Monte Alegre (800-km upstream from the river mouth)