



Ministry of the Environment
Government of Japan

第2回流域圏シンポジウム
2011/12/15, 京都大学東京オフィス

長江上流域(三峡)

物質循環が生態系機能に及ぼす影響 及び複雑性の評価

国立環境研究所 地球環境研究センター 中山忠暢

釧路湿原内の蛇行河川

Tadanobu NAKAYAMA

National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan

Centre for Ecology & Hydrology (CEH), UK

nakat@nies.go.jp

霞ヶ浦の夕日

都市舗装面での観測システム

黄河下流域(華北平原)
—農地・都市

大連地域—都市・森林

釧路川流域
—湿原・森林

長江及び黄河流域

メガシティが周辺域
へ及ぼす影響

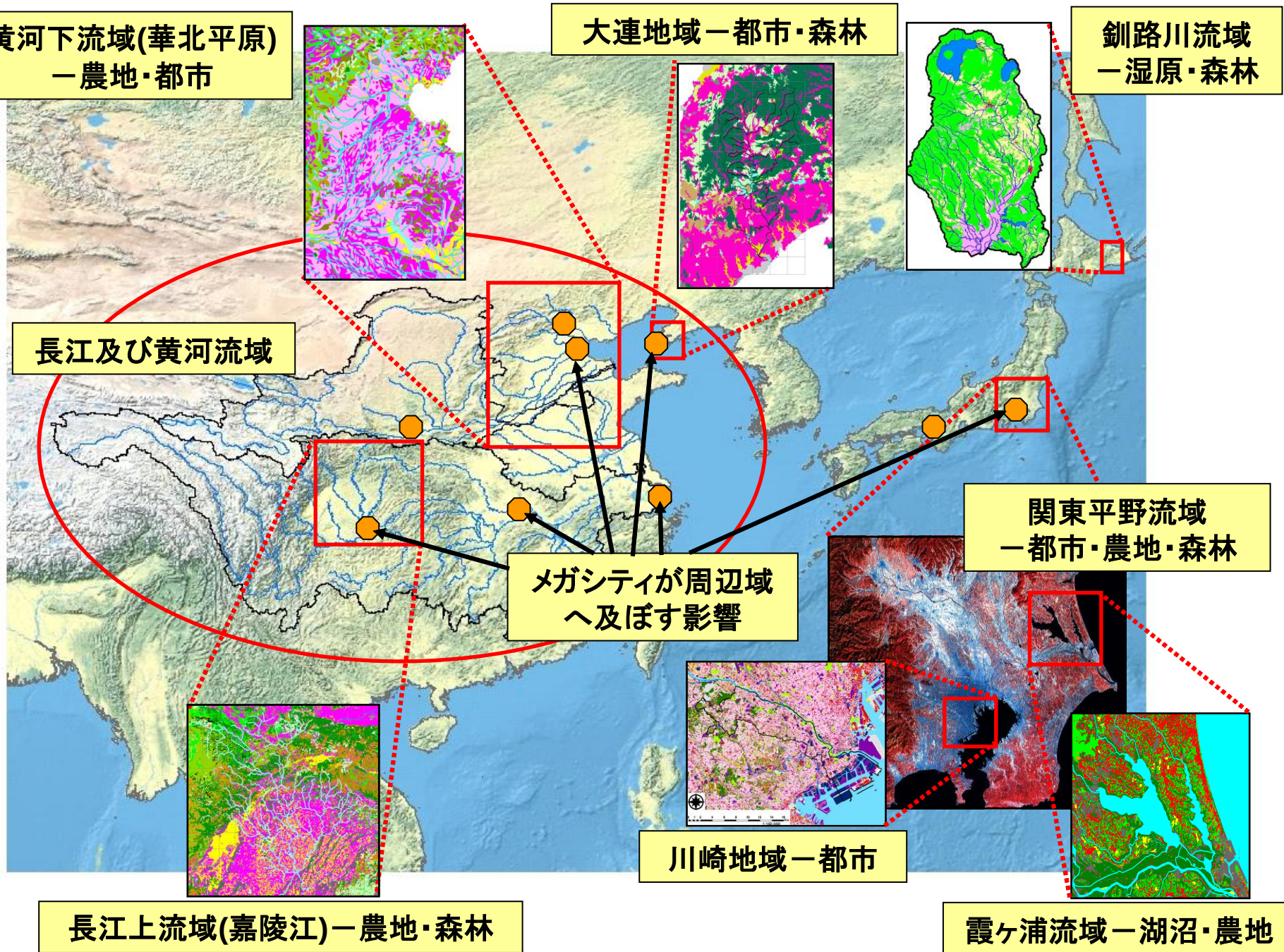
関東平野流域
—都市・農地・森林

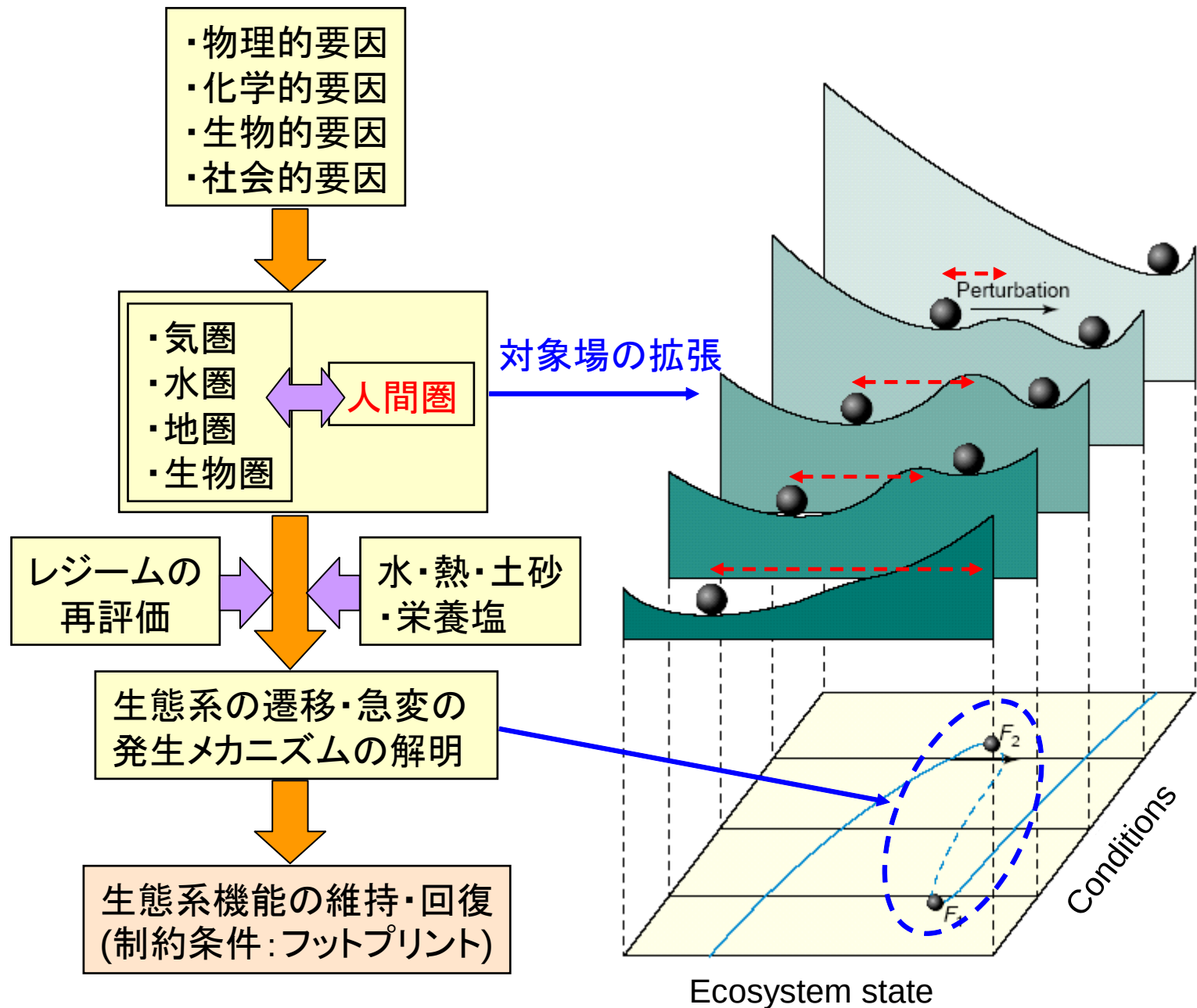
川崎地域—都市

霞ヶ浦流域—湖沼・農地

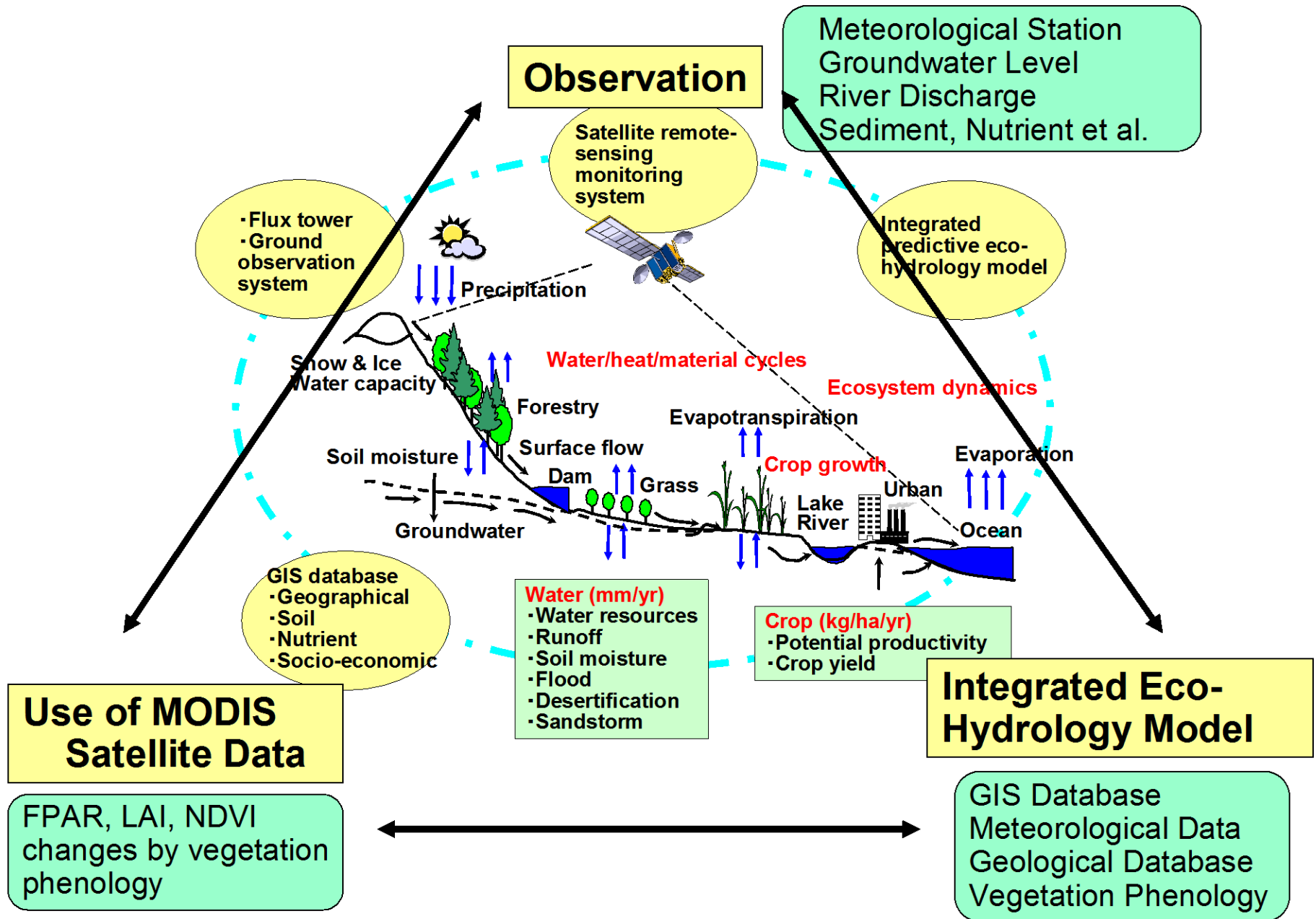
長江上流域(嘉陵江)—農地・森林

様々なスケールの生態系評価 ～これまでの研究を振り返って～



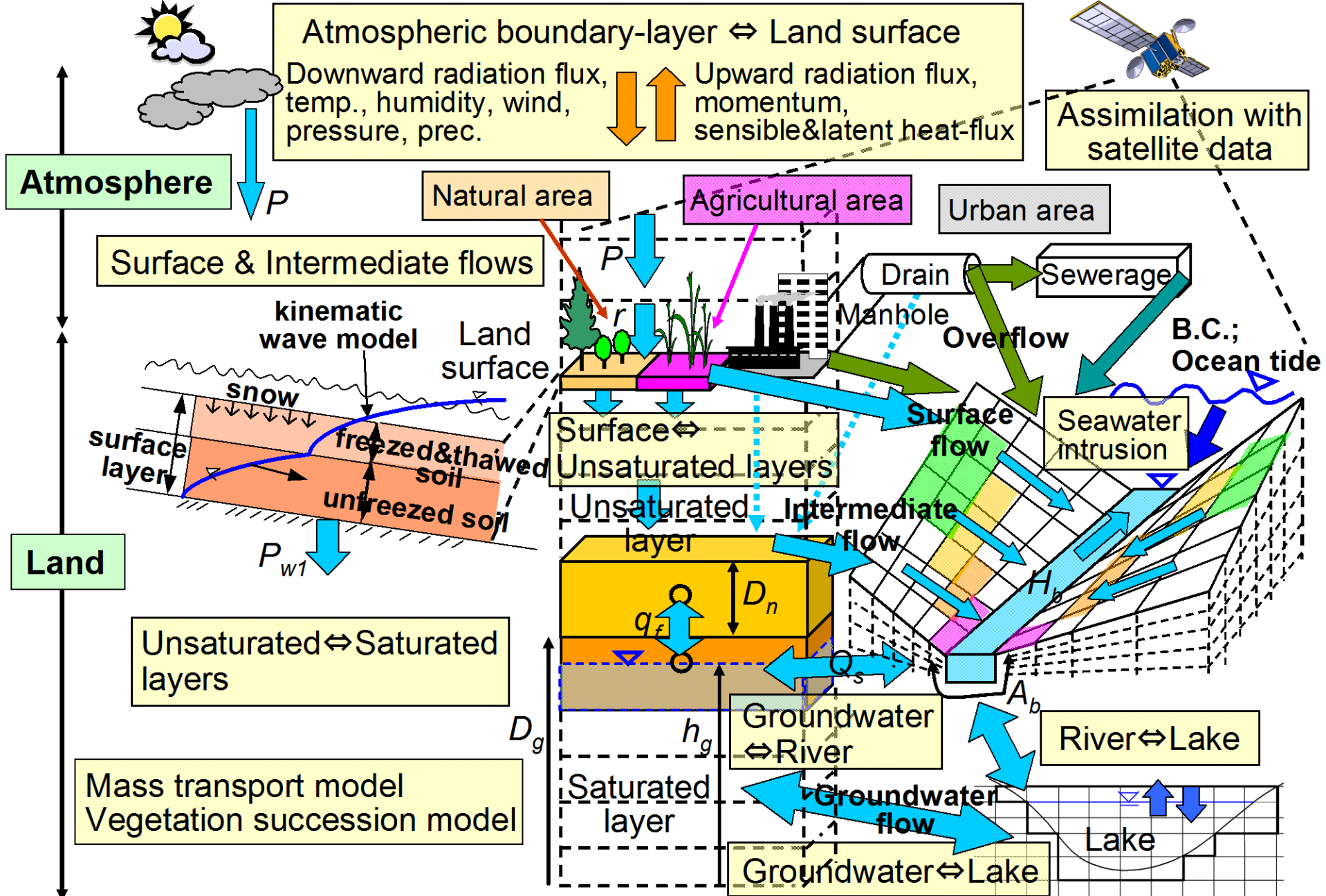


Stability landscapeの新たな展開による生態系の脆弱性・安定性・回復力の評価



数値モデル・現地観測・衛星データの統合化

(Nakayama, NIES CGER'S Supercomputer Monograph Report, 2006, 2008, in press)



National Integrated Catchment-based Eco-hydrology (NICE) model

(Nakayama et al., *WRR*2004;*HESSD*2006;*HP*2006,2008,2011a,2011b;*STOTEN*2007;
*ECOMOD*2008;*FORECO*2008;*GPC*2008,2010;*RRA*2010;*LAND*2010;*ENPO*2011;*AGMET*2011)

Tree diameter growth
- logistic curve -

$$\frac{dD}{dt} = \frac{GD(1 - DH / D_{\max} H_{\max})}{(274 + 3b_2 D - 4b_3 D^2)}$$

Growth rate scalar

$$G = G_{\max} [r(Q_h)r(F)r(M)r(T)r(S_D)]^{1/3}$$

Growth reduction factor (r)

• Light $r(Q_h) = c_1 \{1 - \exp[-c_2(Q_h - c_3)]\}$

• Nutrient $r(F) = c_4 + c_5 F - c_6 F^2$

• Soil moisture $r(M) = \left[\frac{M^* - M}{M^*} \right]^{1/2}$

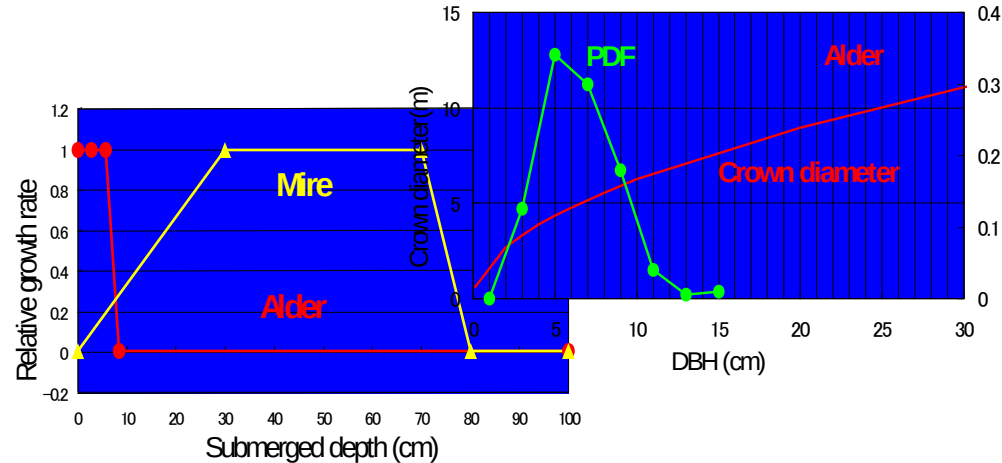
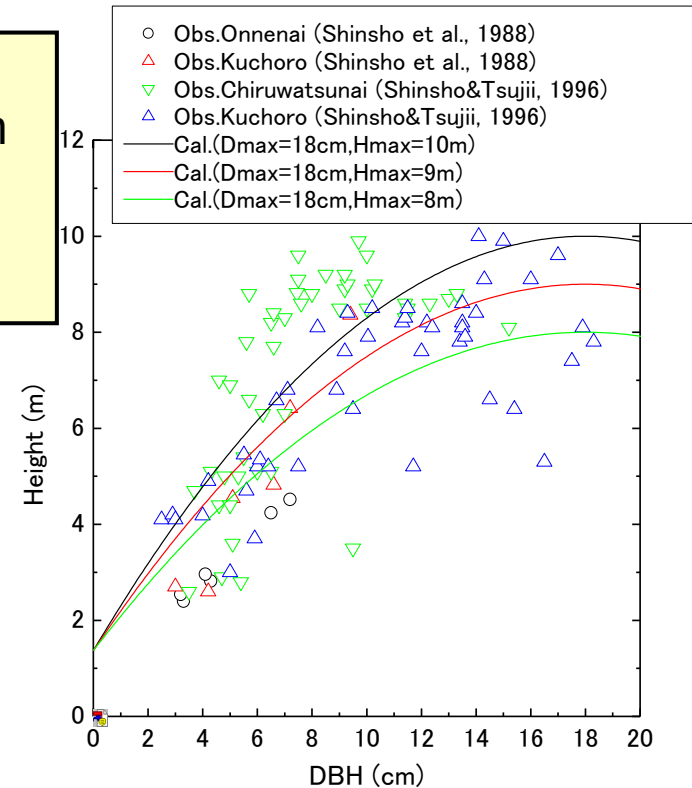
• Temperature $r(T) = \frac{4(T - T_{\min})(T_{\max} - T)}{(T_{\max} - T_{\min})^2}$

• Submerged depth
(Water table depth) $r(S_D)$

Crown diameter $C_D = \exp[\ln(D)b_0 + b_1]$

- Multiplicative approach
- Liebig's Law of the Minimum

Stepwise procedure
(Bugmann, 1996)



植生モデル(Gap modelをベースに改良)におけるgrowth reduction factorの役割
(Nakayama, *Ecol. Model.* 2008a; *Forest Ecol. Manag.* 2008b)

Simulation by super computer

Regional simulation with ΔX & $\Delta Y=500\text{m}$
(Nakayama&Watanabe, *Water Resour. Res.* 2004)

Down-scaling through boundary conditions

<Meteorological data>
Temperature
Precipitation
Solar radiation, et al.

ΔX & $\Delta Y=100\text{m}$
220x460x30 meshes
Period: 1970-2000(-2030)

1month
ave.

NICE model
(water,heat,mass)

$\Delta T=1\text{hour}$

<Simulation results>
River discharge
Soil moisture
Soil temperature
Groundwater level
Sediment accumulation
Nutrient loadings(N,P)

1year
ave.

Around mire:
 ΔX & $\Delta Y=10\text{m}$

Vegetation
succession
model

$\Delta T=1\text{year}$

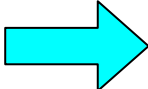
Change in
reed & alder

Feedback process

Originality of this study

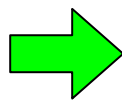
1. Iterative simulation of hydrologic cycle, elevation change, & vegetation succession
2. This complex system may induce irregularly heterogeneous mechanism different from the simple one
3. Evaluation of succession process based on the interaction between ecology & hydrology

Nutrient load:
20% increase
during 1970s-2000s
(Ministry of Environment, 2004)

 $r(F) = 0.5 \rightarrow 1.0$

NICEの拡張によるダウンスケーリング及びフィードバックプロセス
(Nakayama, *Ecol. Model.* 2008a; *Forest Ecol. Manag.* 2008b)

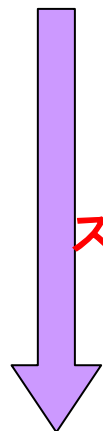
植生分布 (入力)



土壌水分量 (計算値)

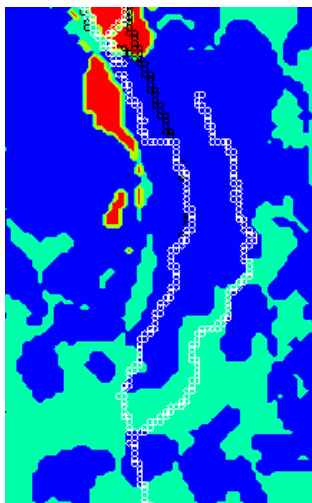
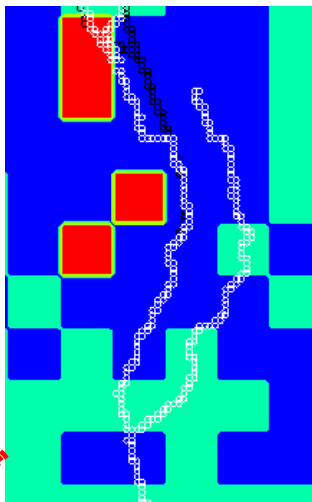
地下水位 (計算値)

$\Delta x = 500\text{m}$

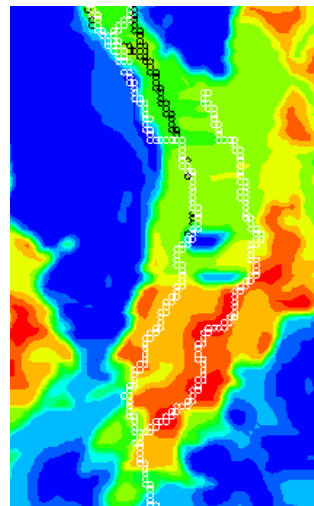
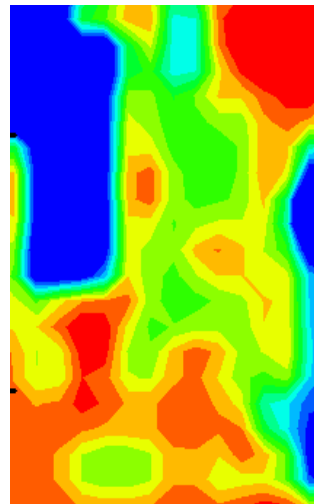


ダウンスケーリング

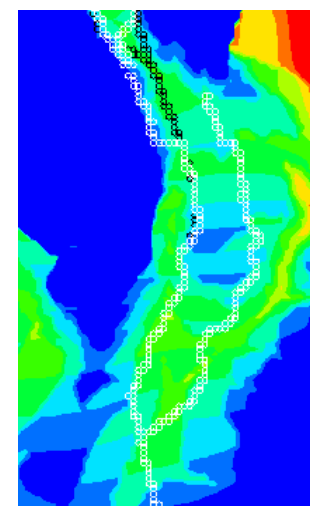
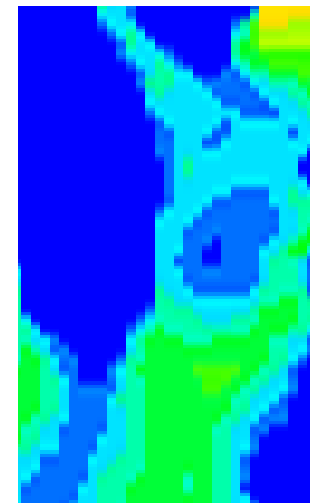
$\Delta x = 100\text{m}$



区分
森林
農地
湿原



(m^3/m^3)
0.90
0.88
0.86
0.84
0.82
0.80
0.78
0.76
0.74
0.72
0.70

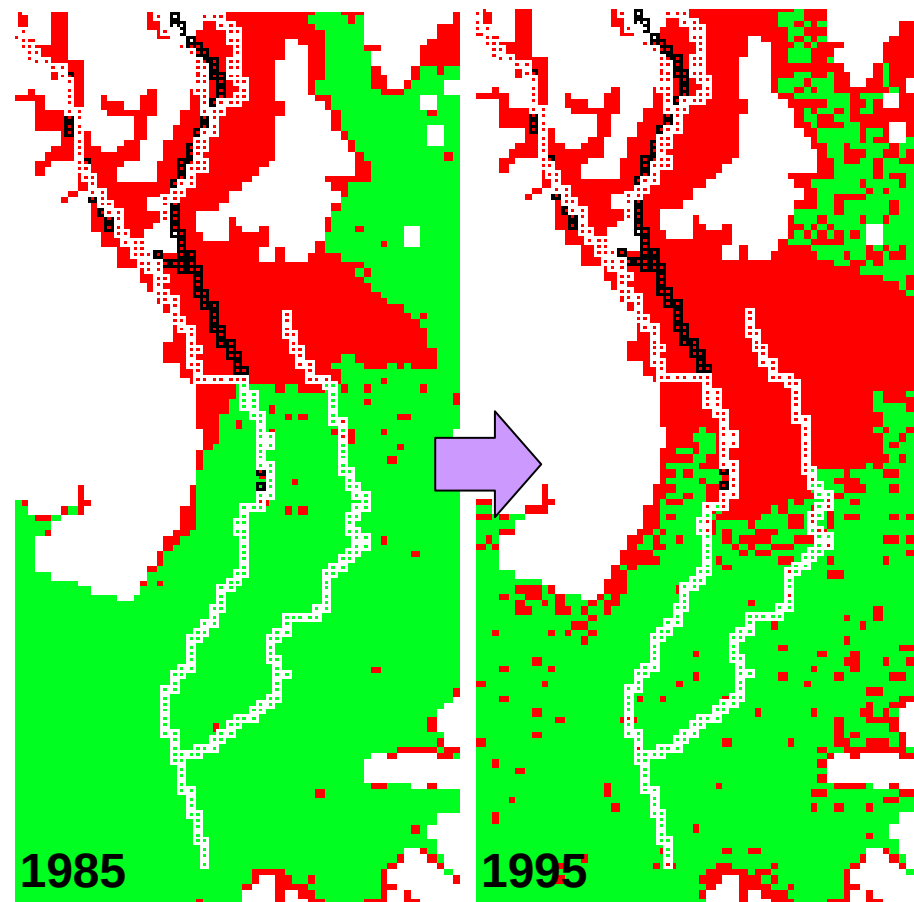
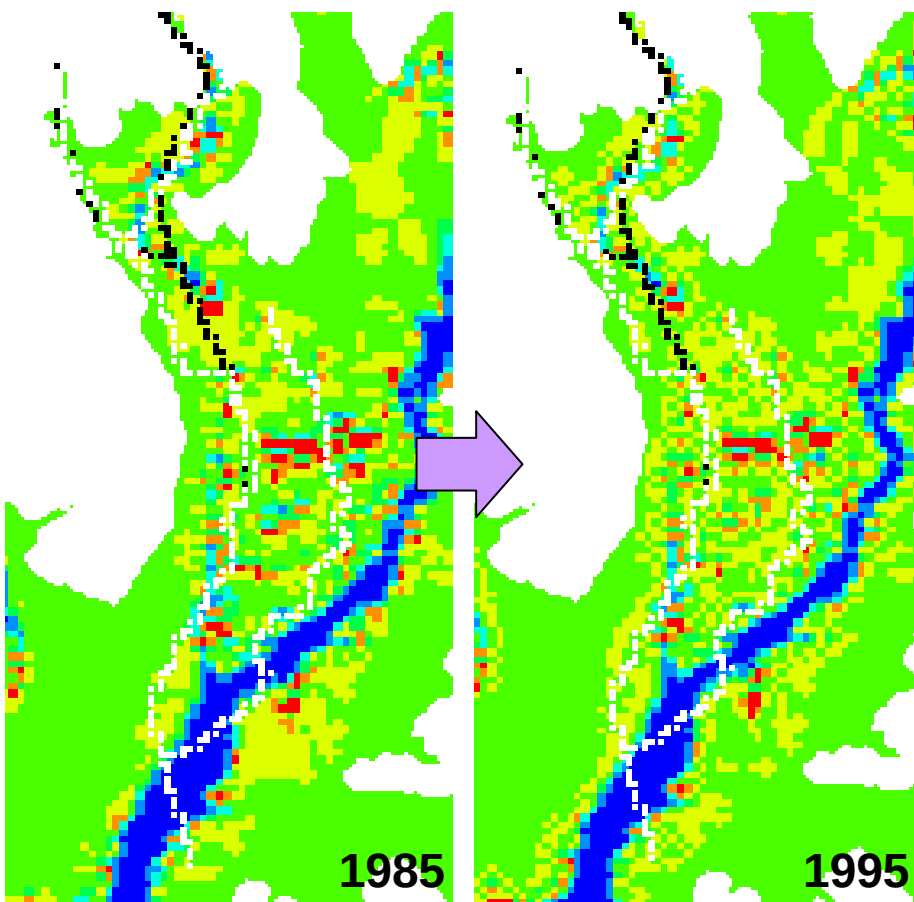


(m)
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2

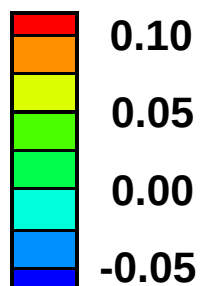
ダウンスケーリングによる湿原域での水循環の高精度化
(上図; Nakayama&Watanabe, *Water Resour. Res.* 2004)

土砂堆積変化

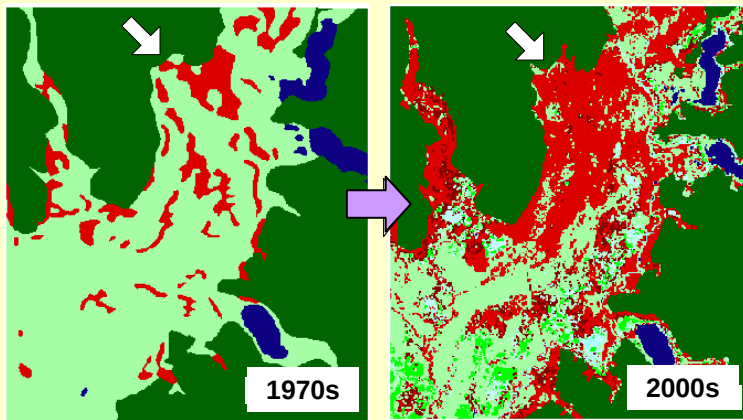
植生変化



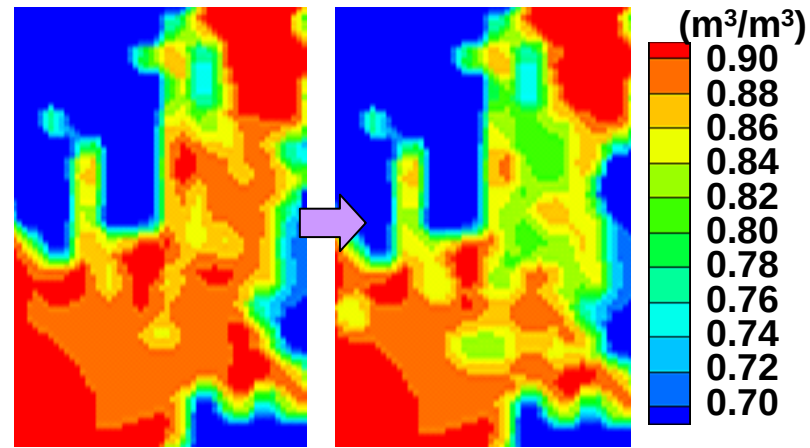
標高変化量 (m/year)



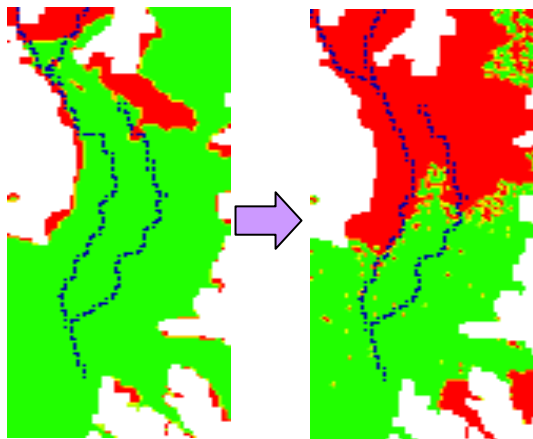
釧路湿原域におけるフィードバックプロセスの計算結果



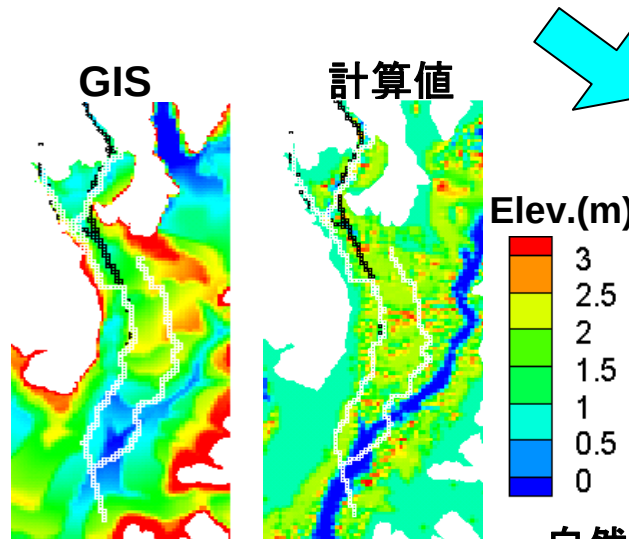
湿原へのハンノキの侵入(GISデータ)



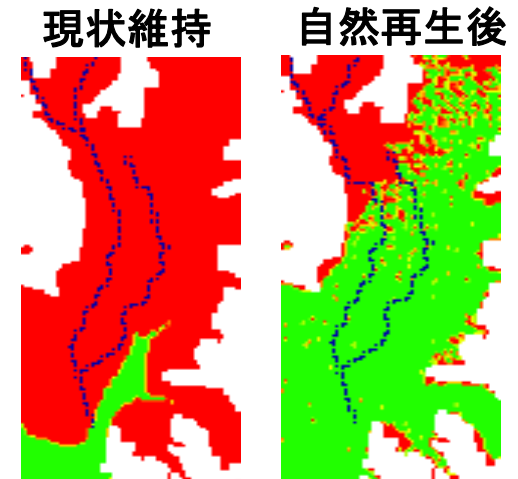
土壌水分量の減少に見られる湿原乾燥化(計算値)
(Nakayama&Watanabe, *Water Resour. Res.* 2004)



ハンノキの侵入(計算値)
(Nakayama, *Ecol. Model.* 2008a)



土砂堆積に伴う標高変化
(Nakayama, *River Res. Appl.* 2010)

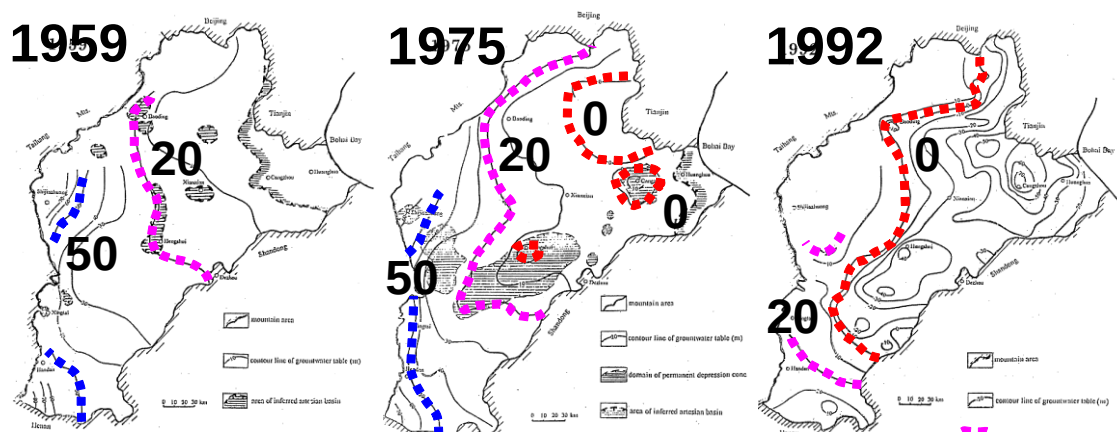


自然再生事業に伴う将来予測(計算値)
(Nakayama, *Forest Ecol. Manag.* 2008b)

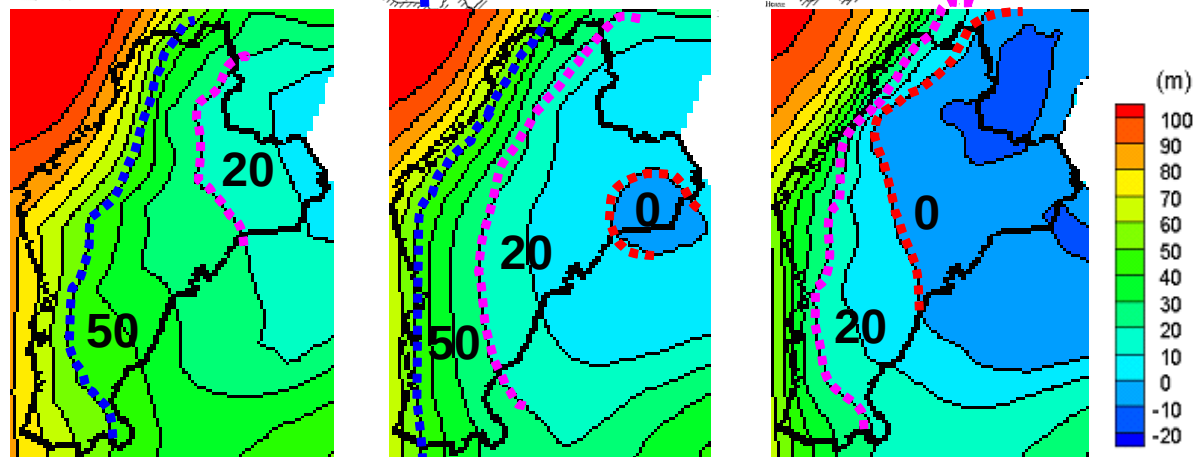
釧路湿原における水・熱・土砂・栄養塩輸送が植生変化に及ぼす影響
及び湿原の回復可能性評価

アジア(中国)に 目を向けると？

観測値
(Shimada, 2000)

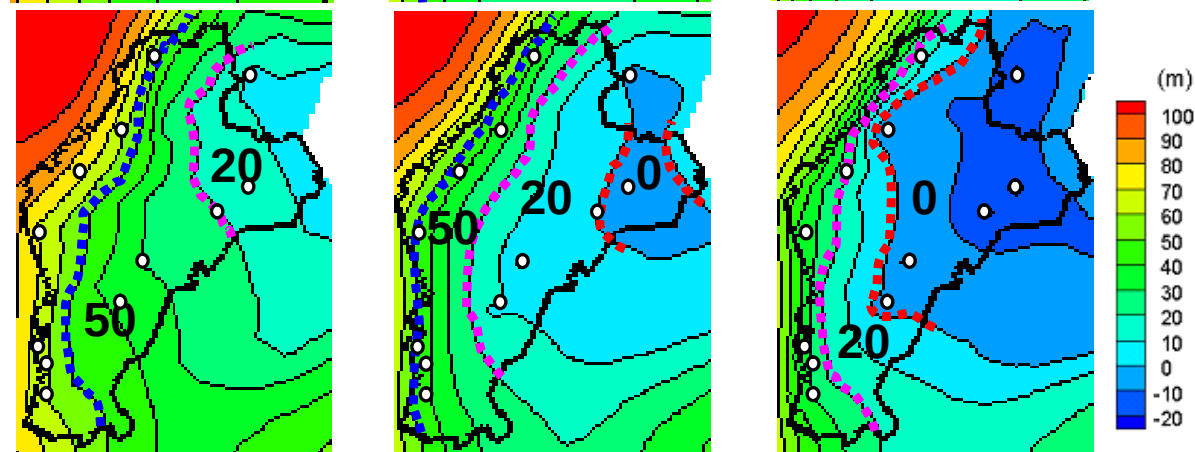


灌漑プロセスを含む計算値
(Nakayama et al,
Hydrol. Process. 2006)



灌漑プロセス+都市水
需要を含む計算値
(Nakayama,
Hydrol. Process. 2011a)

(白丸は水需要を
考慮した都市)

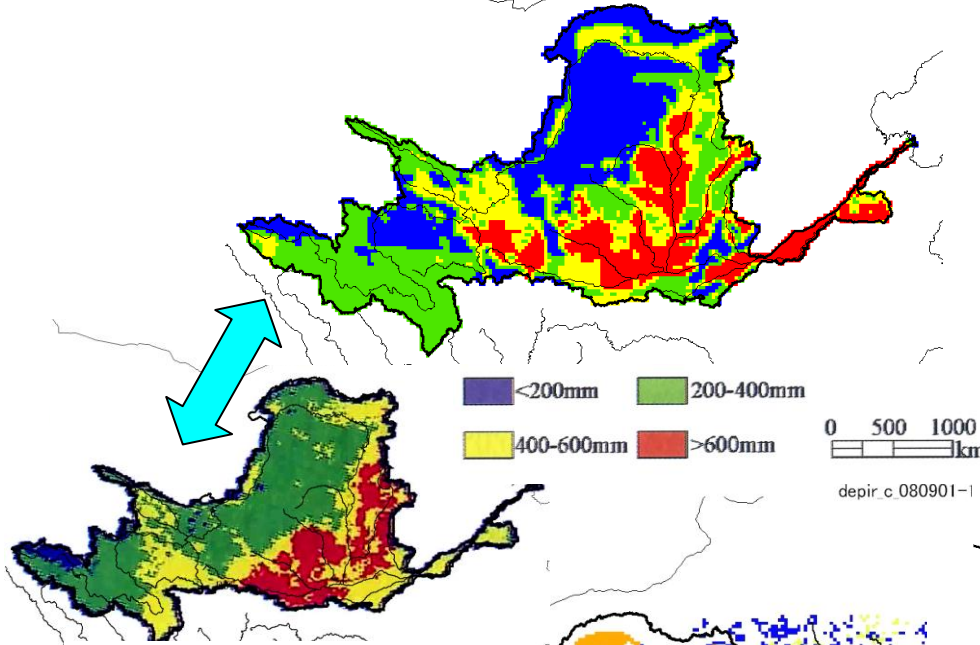


過剰汲み上げにより年々低下する地下水位 (中国・華北平原)

黄河流域



長江流域

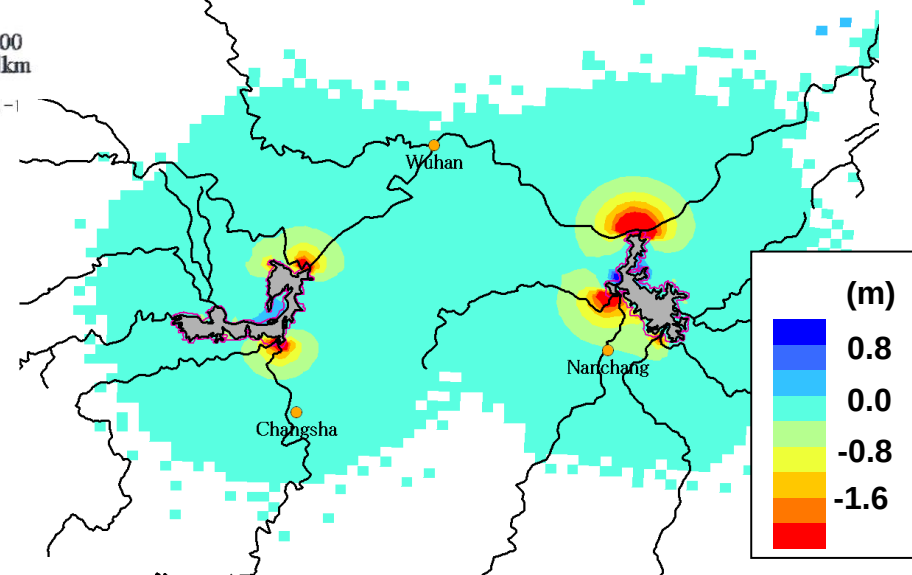
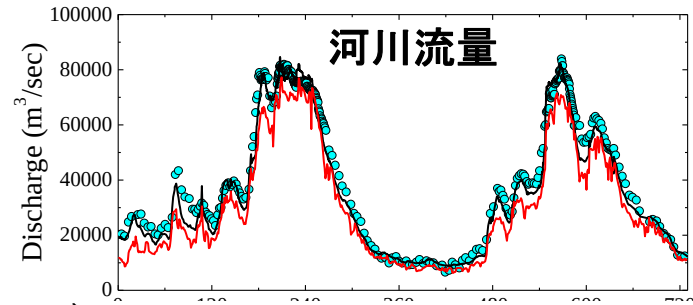


(Sun et al., 2004)



蒸発散量及び灌漑量(計算値)

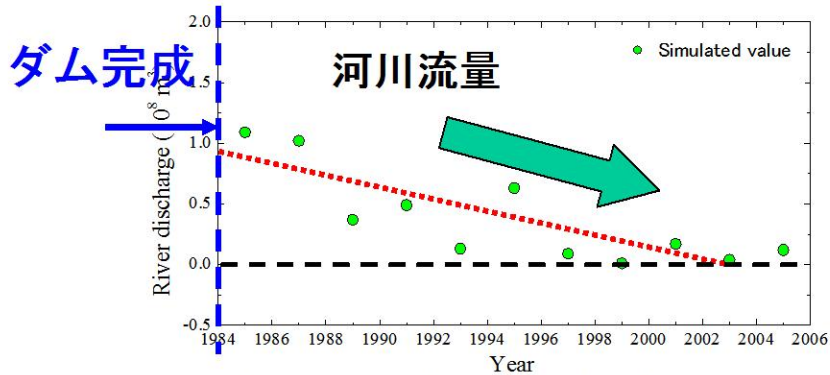
(Nakayama, *Agr. Forest Meteorol.* 2011b)



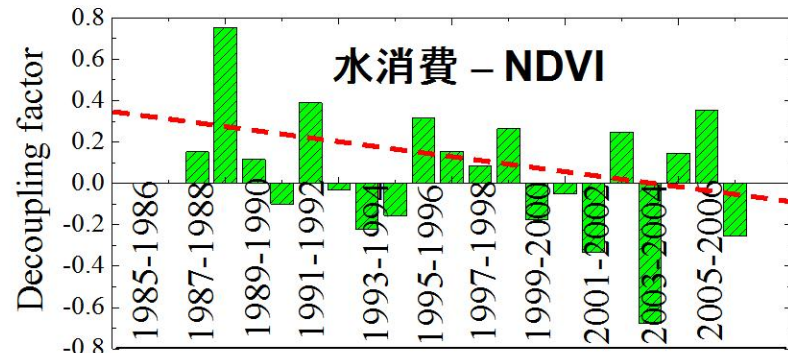
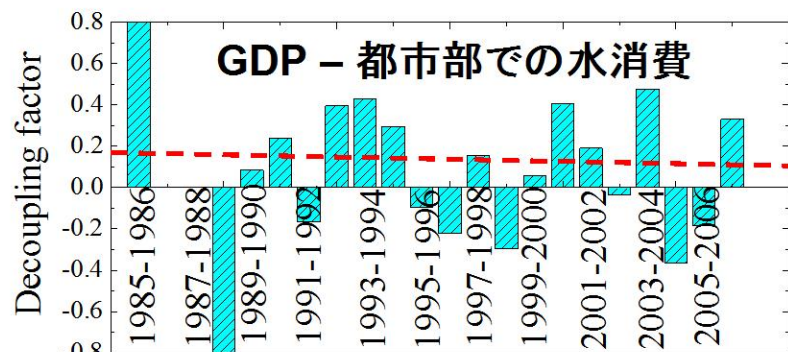
退田還湖に伴う地下水位変化の予測(計算値)

(Nakayama&Watanabe,
Global Planet. Change 2008a)

中国の北部における渇水(黄河)と南部における洪水(長江)

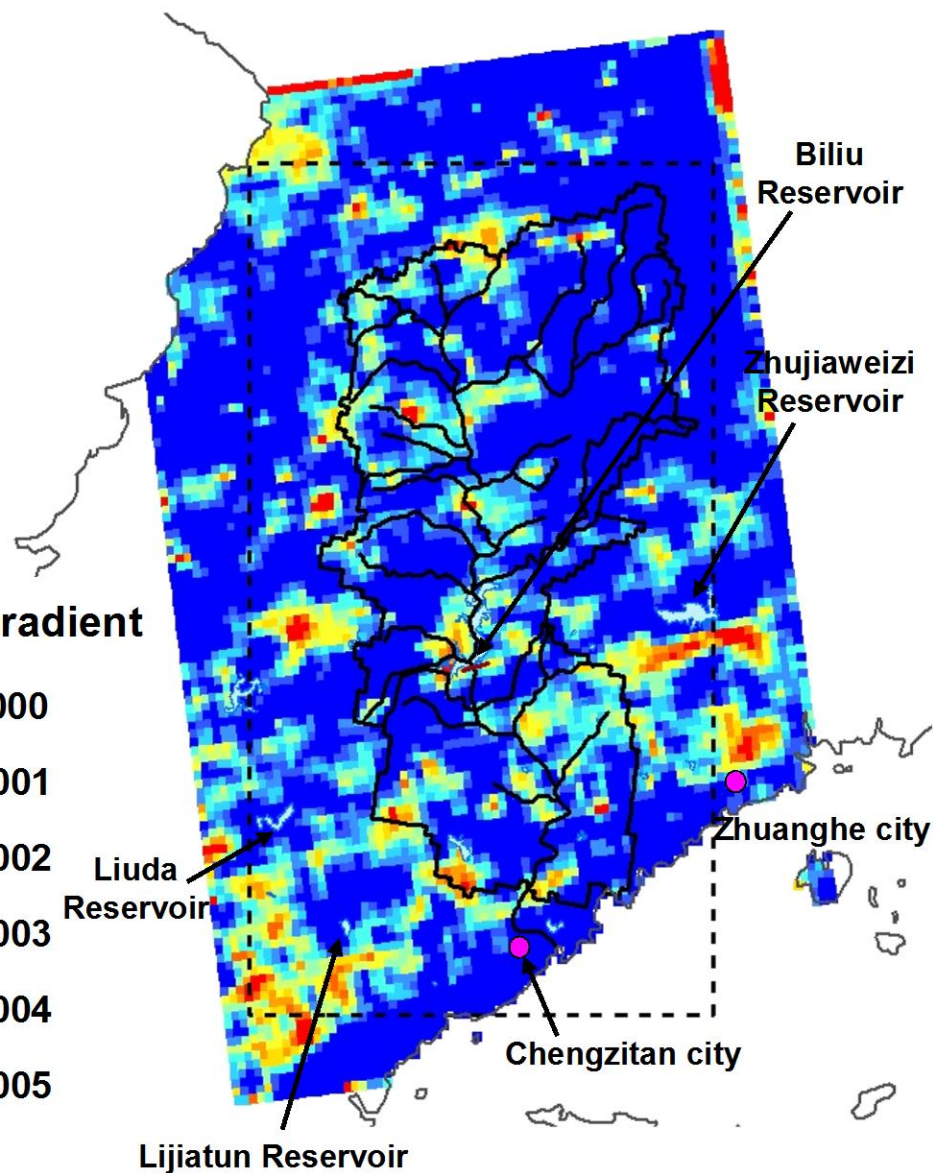


水資源量の変化(計算値)



デカップリング指標の経年変化

NDVI-gradient

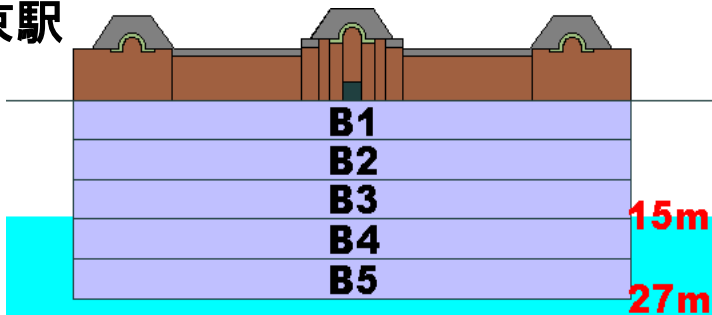


ローマクラブの「成長の限界」を示す？ → 日本を含む先進国では？

中国北部の都市域における水需要の増加と環境劣化の関係
(Nakayama et al, *Global Planet. Change* 2010)

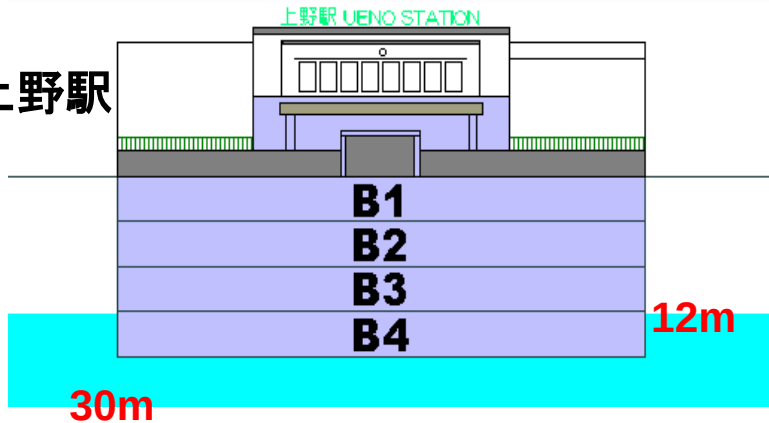
一方、日本での 新たな環境問題は？

東京駅



アンカー(130x200kg)を埋設

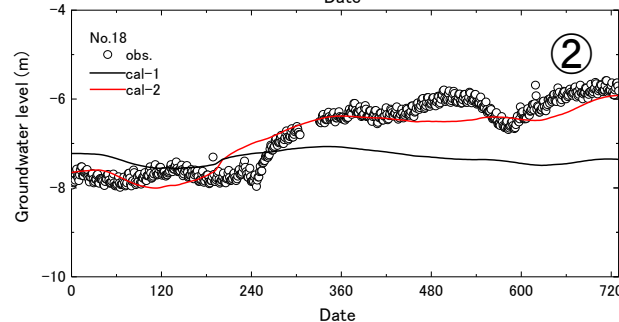
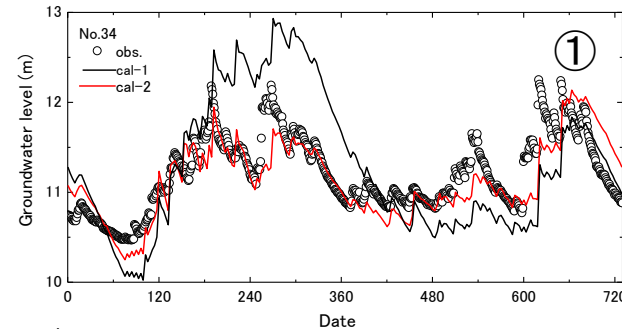
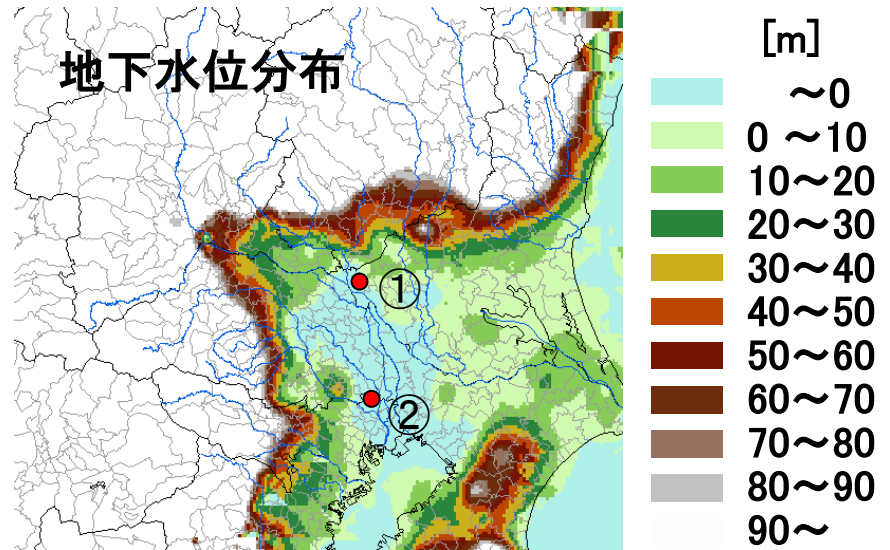
上野駅



鉄板(33,000トン)を敷設

地下水位上昇に伴う
駅浮上の問題

地下水位分布



黒丸：観測値

黒線：地下構造
物の影響なしの
シミュレーション
結果

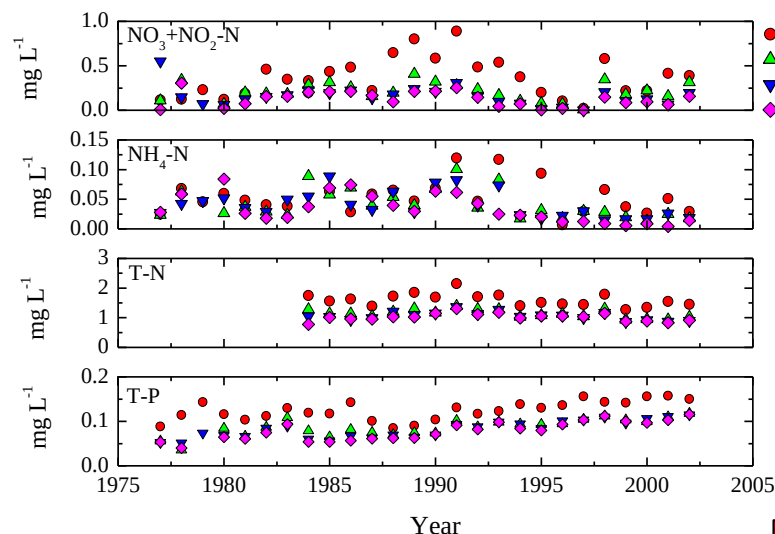
赤線：地下構造
物の影響ありの
シミュレーション
結果

地下水位時系列のシミュレーション結果

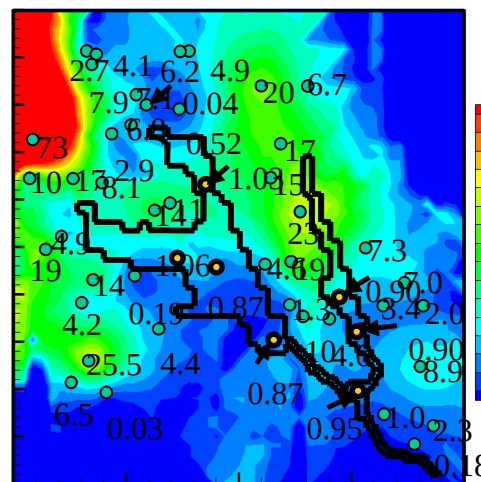
利用規制によって年々上昇する地下水位 (関東平野)
(Nakayama et al, *Sci. Total Environ.* 2007)

豪雨による洪水災害軽減のため
の地下トンネルの設置は？

水質の経年変化

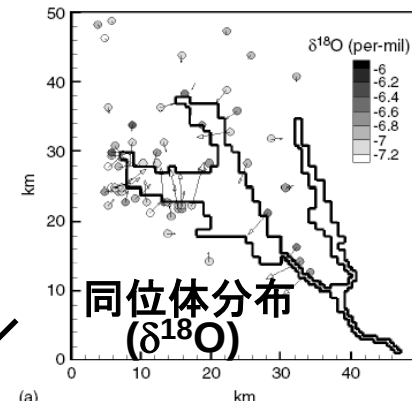


窒素濃度分布(観測値)



$$\delta^{18}\text{O} = [(R_{\text{SP}}/R_{\text{STD}}) - 1] \times 10^3$$

$$R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$$

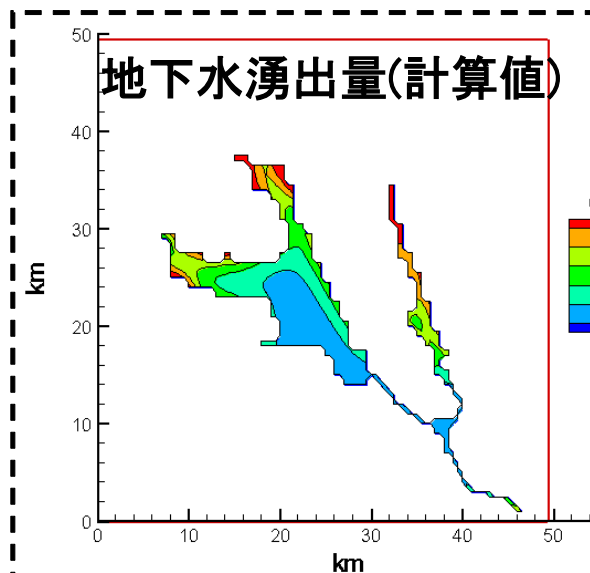


NICEによる地下水影響の評価

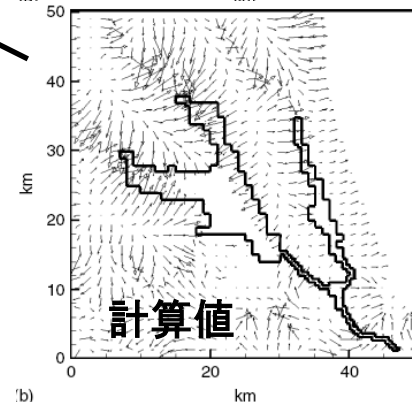
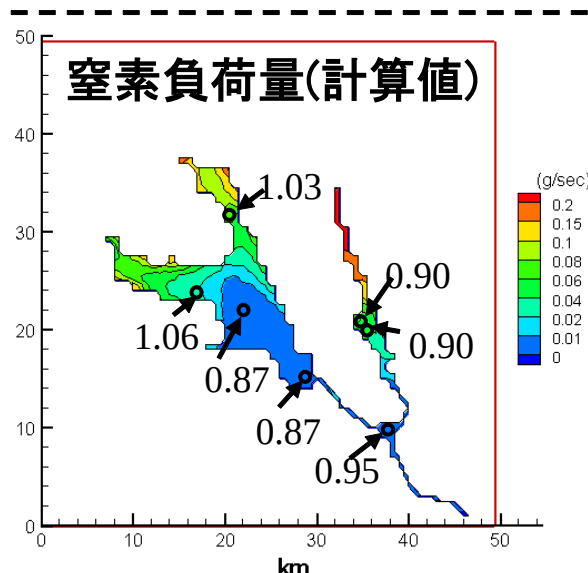
比較・検証



地下水湧出量(計算値)



窒素負荷量(計算値)

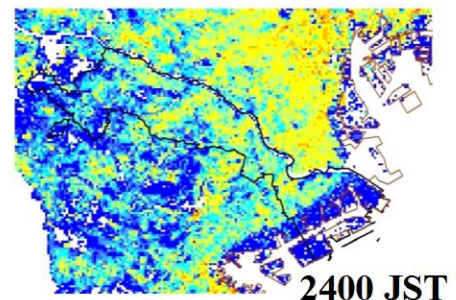
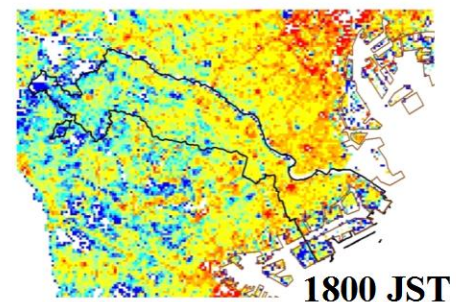
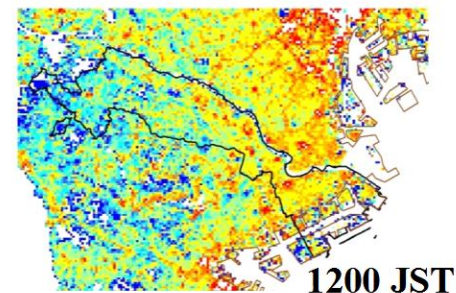
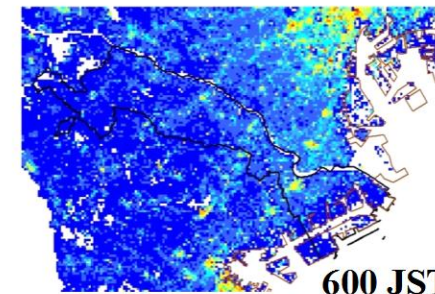
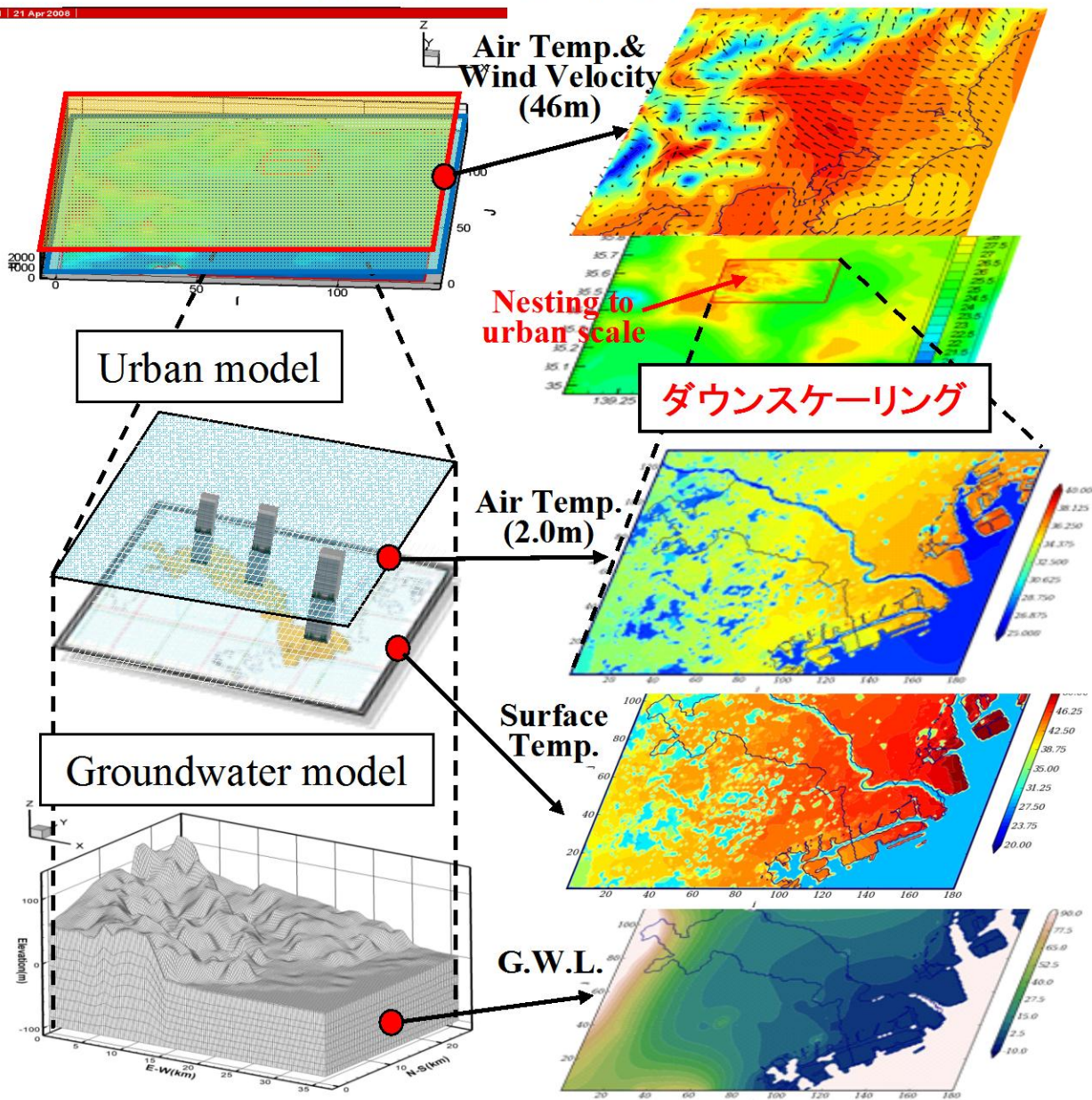


霞ヶ浦における水収支及び地下水影響の再評価
(Nakayama&Watanabe, *Hydro. Process.* 2008b)

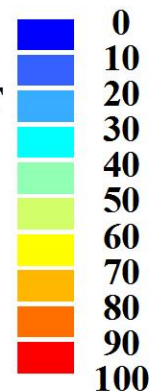
鉛直方向へのマルチスケール

排熱分布(潜熱)

001 | 21 Apr 2008

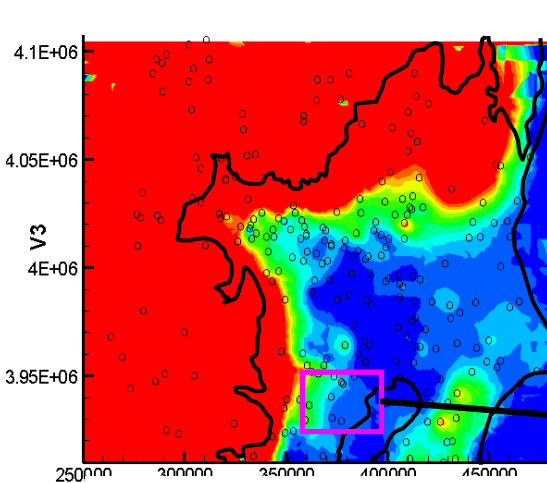


Sensible heat
[W/m²]

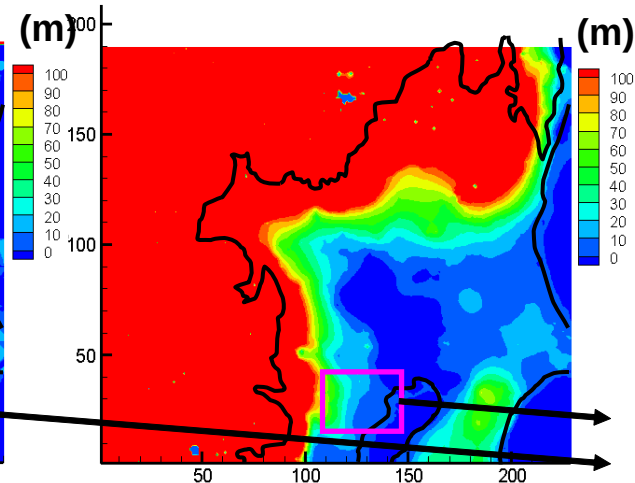


マルチスケールモデルの概念図

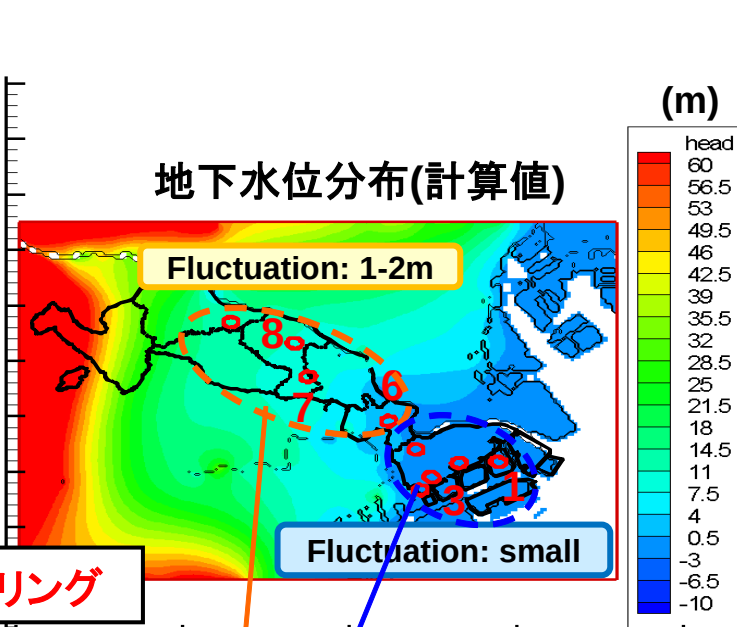
(Nakayama&Hashimoto, *Environ. Pollut.* 2011; Nakayama&Fujita, *Landscape Urban Plan.* 2010)



地下水位分布(観測値)

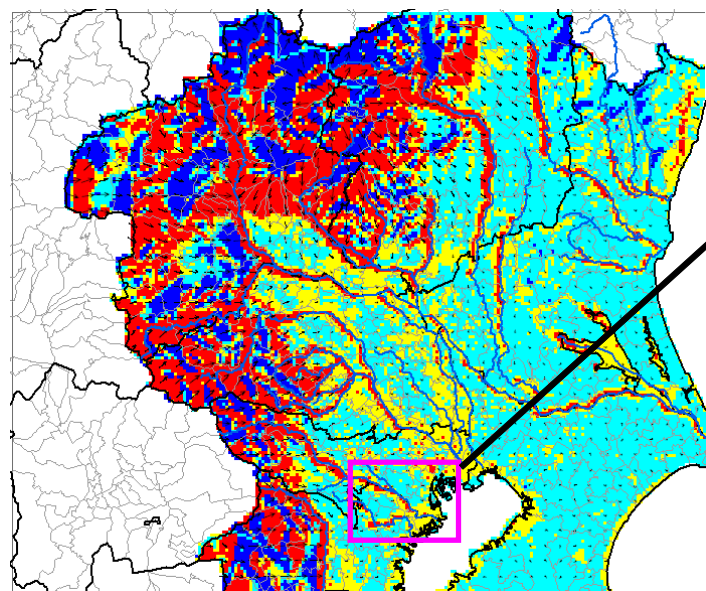


地下水位分布(計算値)



地下水位分布(計算値)

ダウンスケーリング



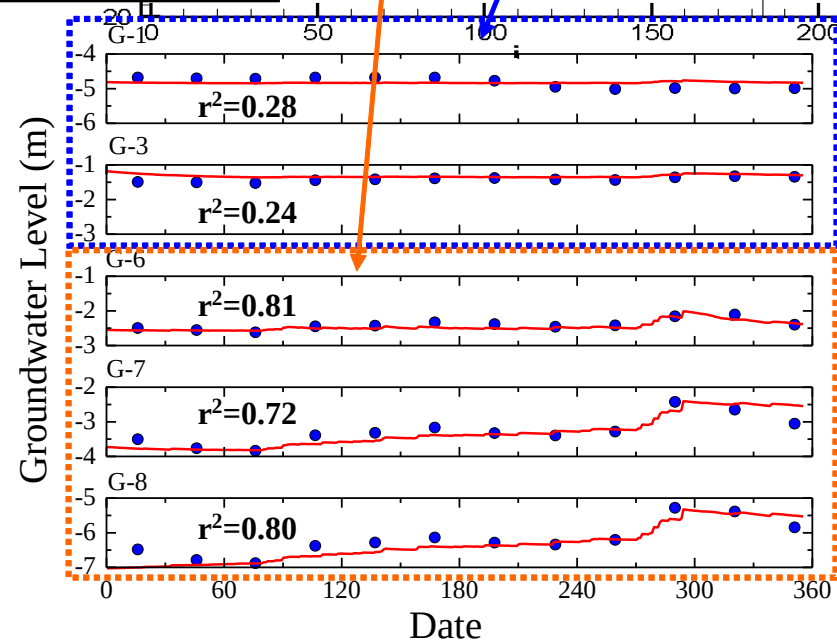
地下水位及びベクトル(計算値)

Horizontal flow
(m/s)

- 0.0
- ^ -3.0e-6
- ^ -5.0e-6
- ^ -8.0e-6
- ^ 8.0e-6 -

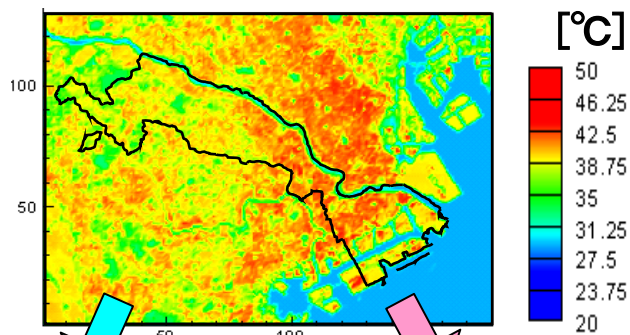
Vertical flow
(m/s)

- 1.0e-8 -
- 0.0 - 1.0e-8
- 1.0e-8 - 0.0
- -1.0e-8

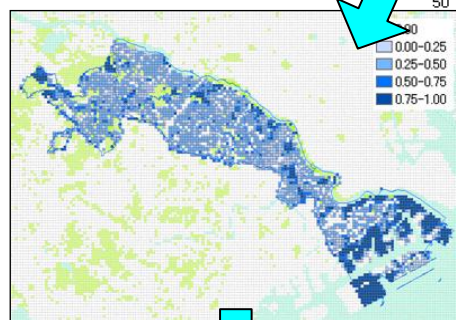


地域スケールから都市レベルへのダウンスケーリングによる地下水位の計算結果
(Nakayama&Hashimoto, *Environ. Pollut.* 2011; Nakayama et al, *Sci. Total Environ.* 2007)

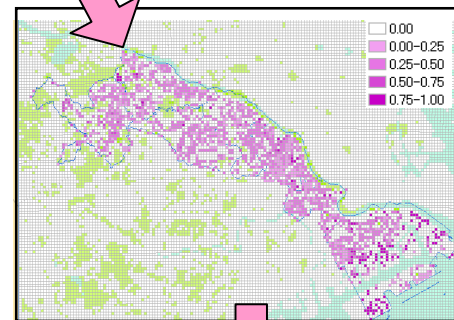
現状の表面温度
(2006年8月5日15時)



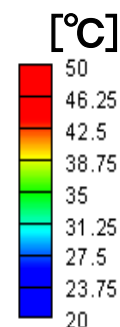
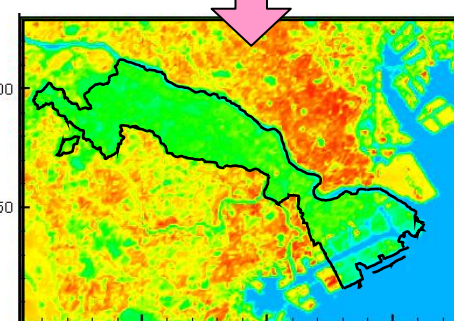
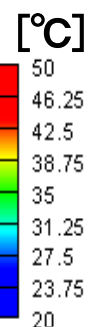
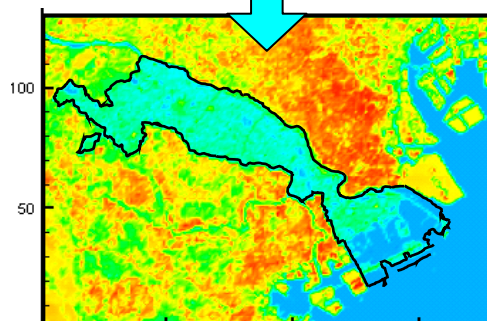
保水性舗装の導入シナリオ



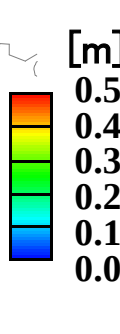
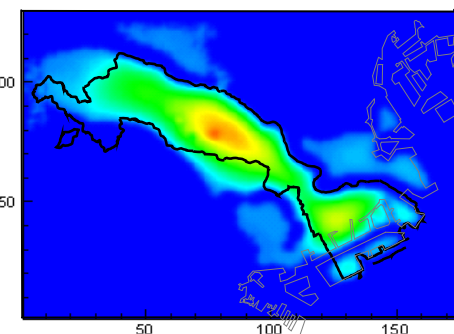
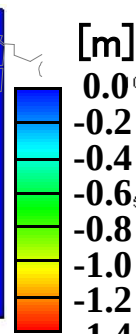
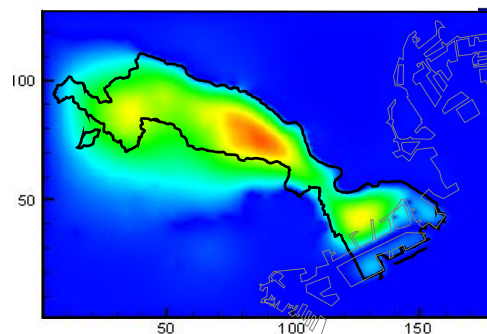
緑地の導入シナリオ

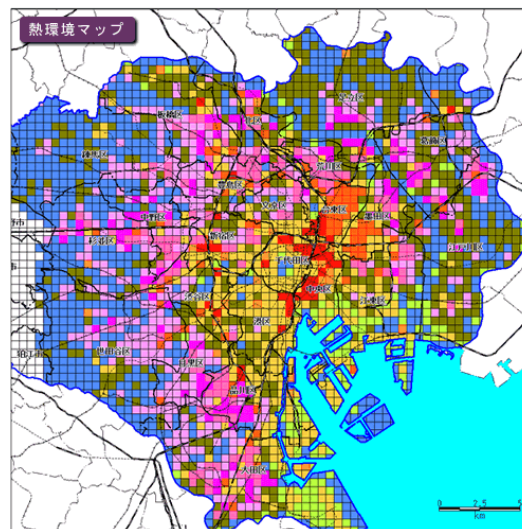
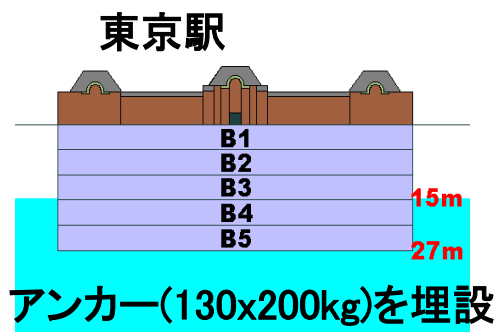


シナリオ後の表面温度
(シミュレーション結果)



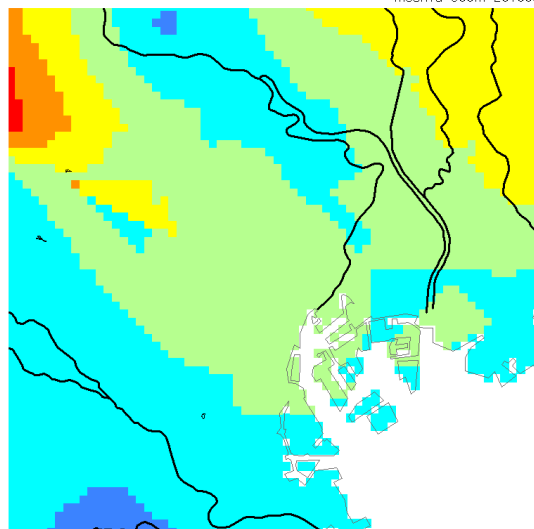
シナリオ後の
地下水位変化
(シミュレーション結果)





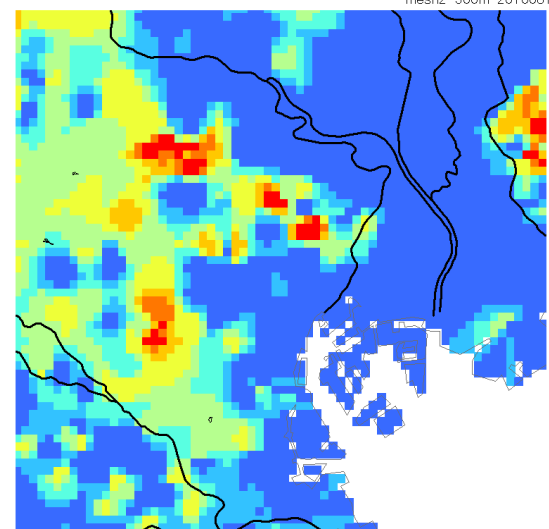
熱環境マップ
(東京都環境局)

ヒートアイランド



相対地下水位(計算値)

水循環のアンバランス



地下水中の窒素濃度分布(観測値)

水質汚染

都市域での複雑な環境汚染

(Nakayama&Hashimoto, *Environ. Pollut.* 2011; Nakayama et al, *Sci. Total Environ.* 2007)

今後の研究について ～環境共生型社会構築に向けた統合的手法の開発～

○水文学・生態学の相互作用メカニズムの研究と、全球レベルと地域レベル間での水循環の相互作用に大きく依存した生態系機能のフィードバック機構評価、の2つをメタエコシステムのような観点・概念から統合的に扱えないか？

- ・人間活動に起因する流域の水・熱・物質循環変化に伴う生態系機能への影響評価
- ・生態系機能の変化に伴う環境負荷・制約要因の分析
- ・最適な対策・適用技術の定量的評価

○数値モデル・衛星データ・現地観測の統合をベースに様々なスケールに対して柔軟性の高い生態系機能のモデル化が必要

①都市域でのダイナミズムを考慮したアセスメントモデル構築、及び、流域の水・熱・物質循環に及ぼす影響評価。マルチスケールモデルの構築、モデル側からの生態系ポテンシャルの定量化、環境改善技術に対するモデルシミュレーション、及びキャリングキャパシティの評価を通じた数値モデルと政策シナリオとの統合。

②様々なストレス要因が生態系機能に及ぼす影響評価手法の開発。全球ー地域ー遺伝子レベルまでのマルチスケール間、水文学ー生態系間でのフィードバック機構及び水循環の相互作用を考慮したモデル開発、及び、スケール依存性を有する生態系機能及び脆弱性の評価。

③上記①及び②の結合を通じた日本のグローバルセキュリティに貢献し得る影響解析。都市域・農地・自然地を中心としたスケールアップ・スケールダウン手法、自然エネルギー・環境資源の再評価、最適な技術・政策シナリオ、及び、多基準意思決定の結合による目的指向型の研究展開。

○並行して遂行が必要な課題

- ・生態系の応答特性に関するフィードバックやヒステリシスの検討
- ・生態系変化を引き起こす閾値の評価
- ・生態系と水文学のレジームについての統合的な解釈
- ・trans-boundary問題への対応策としてのスケールアップ手法開発
- ・スケール依存性とstationarityの関係についての定量的解釈
- ・NASAの衛星GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)による地球の重力場測定を通じた水資源量の計測手法とモデルの統合によるdisaggregationの拡張

○最終的な目標 ～環境劣化に加えてグローバルセキュリティの制約下での持続可能な発展～

(I) 本来生態学の分野でなされてきた安定性・自己組織化に関する研究をベースにして、水・熱・土砂・栄養塩等の移動・反応過程を通しての異方性かつ位相差を伴う生態学ー水文学間の相互作用を考慮し両者に統合的なレジームの評価。

(II) 水文学・生態学の相互作用メカニズムの解明、及び、全球レベルと地域レベル間での水循環の相互作用に大きく依存した生態系機能のフィードバック機構評価、をメタエコシステムの観点から統合的に検討。

(III) 生態系の非線形及び自己組織化プロセスに関して、人為活動に伴う生態系の遷移・不可逆的な急変(カタストロフィックシフト)の発生メカニズムの解明及びシミュレーションの併用によるフィードバックやヒステリシスの検討を通じた最適な環境共生型社会の評価・提案。

(IV) ガイア仮説的な地球システムよりも小スケールについて、社会・生態系システムの適応性の観点から複雑系システムの回復力を解析・評価することでの、長期的な(温暖化・気候変動影響と併せて)生態系のカタストロフィックシフトの原因解明・影響評価及び将来予測。

関連文献 (NICEモデル関係)

- Nakayama, T.: Factors controlling vegetation succession in Kushiro Mire, *Ecol. Model.*, 215, 225-236, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.02.017, 2008a.
- Nakayama, T.: Shrinkage of shrub forest and recovery of mire ecosystem by river restoration in northern Japan, *Forest Ecol. Manag.*, 256, 1927-1938, doi:10.1016/j.foreco.2008.07.017, 2008b.
- Nakayama, T.: Development of process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part II), *CGER's Supercomputer Monograph Report*, 14, NIES, 91p., <http://www-cger.nies.go.jp/publication/l083/i083.html>, 2008c.
- Nakayama, T.: Simulation of hydrologic and geomorphic changes affecting a shrinking mire, *River Res. Applic.*, 26(3), 305-321, doi:10.1002/rra.1253, 2010.
- Nakayama, T.: Simulation of complicated and diverse water system accompanied by human intervention in the North China Plain, *Hydrol. Process.*, 25, 2679-2693, doi:10.1002/hyp.8009, 2011a.
- Nakayama, T.: Simulation of the effect of irrigation on the hydrologic cycle in the highly cultivated Yellow River catchment, *Agr. Forest Meteorol.*, 151, 314-327, doi:10.1016/j.agrformet.2010.11.006, 2011b.
- Nakayama, T.: Development of process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part III), *CGER's Supercomputer Monograph Report*, 18, NIES, 95p., 2011c (in press).
- Nakayama, T. & Fujita, T.: Cooling effect of symbiotic urban pavements made of new materials on water and heat budgets, *Landscape Urban Plan.*, 96, 57-67, doi:10.1016/j.landurbplan.2010.02.003, 2010.
- Nakayama, T. & Hashimoto, S.: Potential of water resource to tackle urban heat island in intertwined environmental pollution, *Environ. Pollut.*, 159, 2164-2173, doi:10.1016/j.envpol.2010.11.016, 2011.
- Nakayama, T. & Watanabe, M.: Simulation of drying phenomena associated with vegetation change caused by invasion of alder (*Alnus japonica*) in Kushiro Mire, *Water Resour. Res.*, 40, W08402, doi:10.1029/2004WR003174, 2004.
- Nakayama, T. & Watanabe, M.: Simulation of spring snowmelt runoff by considering micro-topography and phase changes in soil layer, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 2101-2144, 2006a.
- Nakayama, T. & Watanabe, M.: Development of process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part I), *CGER's Supercomputer Monograph Report*, 11, NIES, 100p., <http://www-cger.nies.go.jp/publication/l063/l063.html>, 2006b.
- Nakayama, T. & Watanabe, M.: Role of flood storage ability of lakes in the Changjiang River catchment, *Global Planet. Change*, 63, 9-22, doi:10.1016/j.gloplacha.2008.04.002, 2008a.
- Nakayama, T. & Watanabe, M.: Missing role of groundwater in water and nutrient cycles in the shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan, *Hydrol. Process.*, 22, 1150-1172, doi:10.1002/hyp.6684, 2008b.
- Nakayama, T., Yang, Y., Watanabe, M., Zhang, X.: Simulation of groundwater dynamics in North China Plain by coupled hydrology and agricultural models, *Hydrol. Process.*, 20(16), 3441-3466, doi:10.1002/hyp.6142, 2006.
- Nakayama, T., Watanabe, M., Tanji, K., Morioka, T.: Effect of underground urban structures on eutrophic coastal environment, *Sci. Total Environ.*, 373(1), 270-288, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.11.033, 2007.
- Nakayama, T., Sun, Y., Geng, Y.: Simulation of water resource and its relation to urban activity in Dalian City, Northern China, *Global Planet. Change*, 73, 172-185, doi:10.1016/j.gloplacha.2010.06.001, 2010.
- Nakayama, T., Fujita, T., Hashimoto, S., Hamano, H.: Multi-scaled analysis of hydrothermal dynamics in Japanese megalopolis by using integrated approach, *Hydrol. Process.*, 2011 (in press).



ロンドン都市部での自然再生事業



UK Environment Agency



Oxford・Thames川の船乗場



Centre for Ecology & Hydrology
(CEH)



Cotswoldsの典型的な家並み

ご静聴ありがとうございました



Ministry of the Environment
Government of Japan