

社会経済シナリオの統計的ダウンスケールと 災害リスク評価への応用

村上大輔

統計数理研究所 統計基盤数理研究系

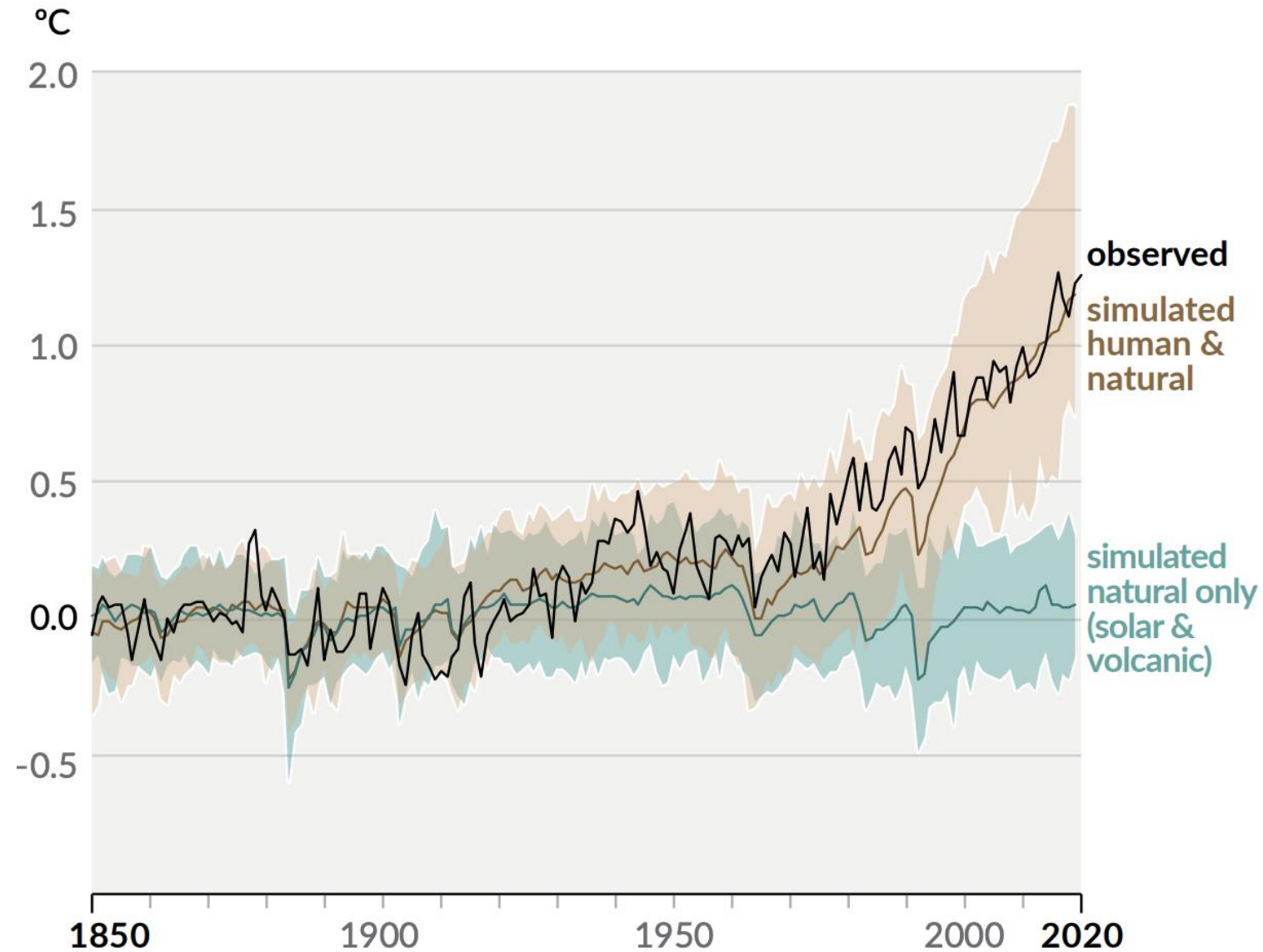
詳細: Tomari, M., Seya, H., Murakami, D., Yamagata, Y., & Oki, T. (2025). Global gridded population projection via spatial econometric model considering rank-size rule. *Environmental Research Communications*, 7(10), 101002.

背景

社会経済活動は気温上昇や
気象リスクに強く影響

社会経済の将来シナリオを考慮
して各種政策を検討する必要

- 気候変動の影響評価
- CO2排出量の将来推計



出典: IPCC Annual Report 6 (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>)

Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

※画像生成にDALL-E3を使用

将来の社会経済の
発展傾向を仮定
したシナリオ

緩和の困難度
(≒排出削減の難しさ)

SSP5 (化石燃料)



SSP3 (地域分断)



SSP2
(中庸)

SSP1 (持続可能)



SSP4 (格差)



適応の困難度 (≒災害対応の難しさ)

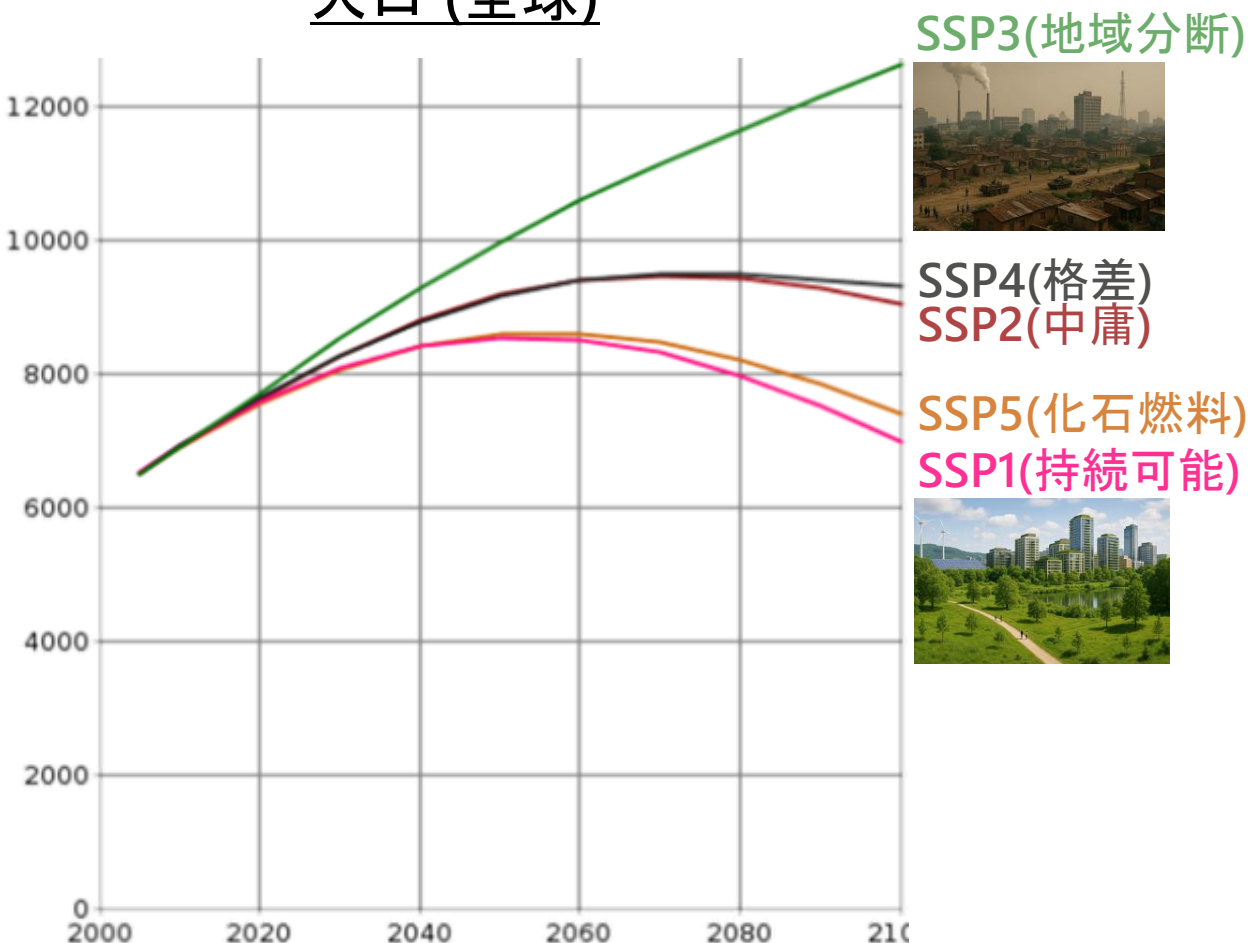
Source: 高橋潔 (2024)IPCC報告での
『(社会経済)シナリオ』・第9回 気候
変動リスク・機会の評価等に向けた
シナリオ・データ関係機関懇親会

SSP database (<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/>)

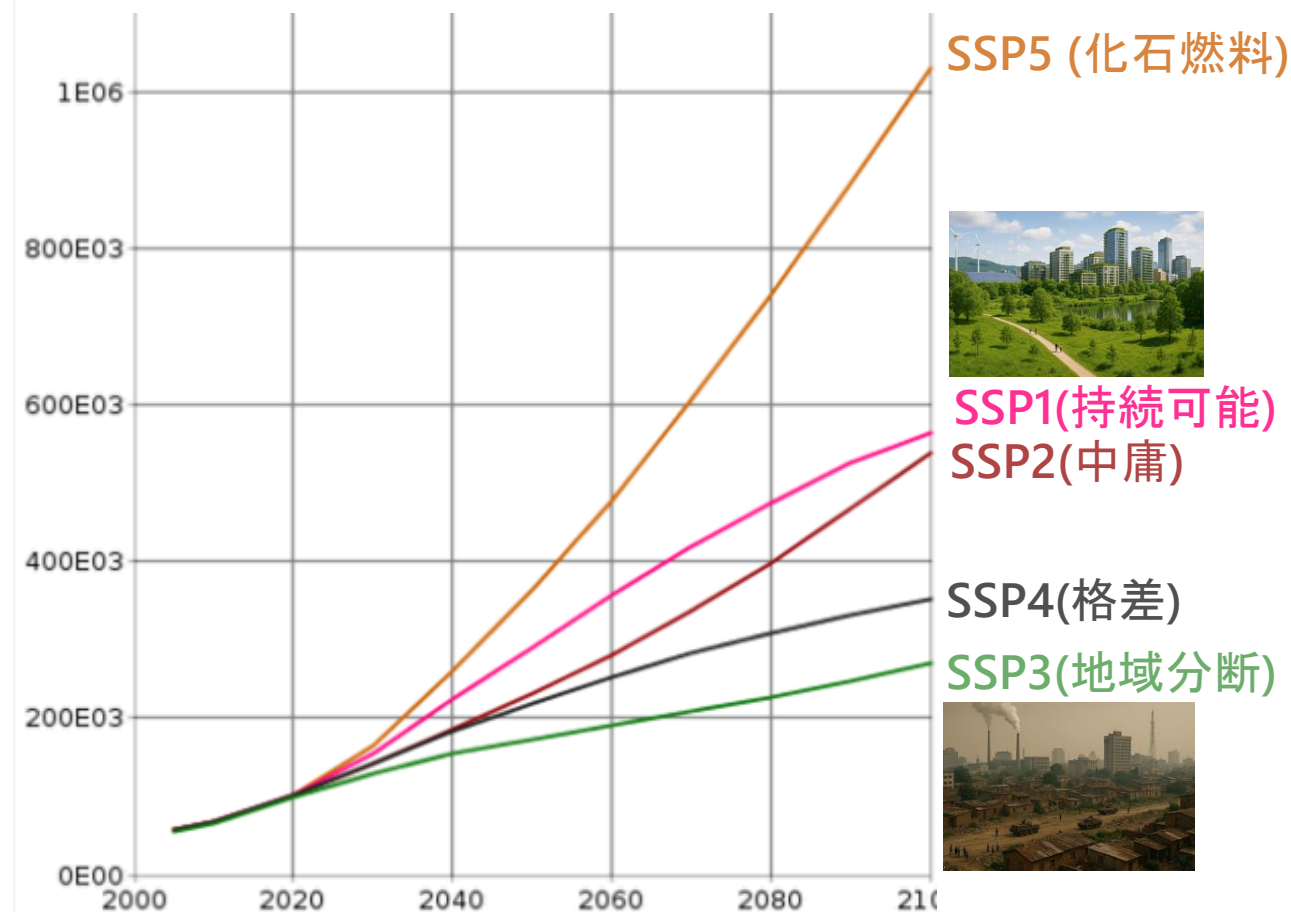
※画像生成に
DALL-E3を使用

– 国別であれば、人口・GDPがSSPシナリオ毎に将来推計されている

人口 (全球)



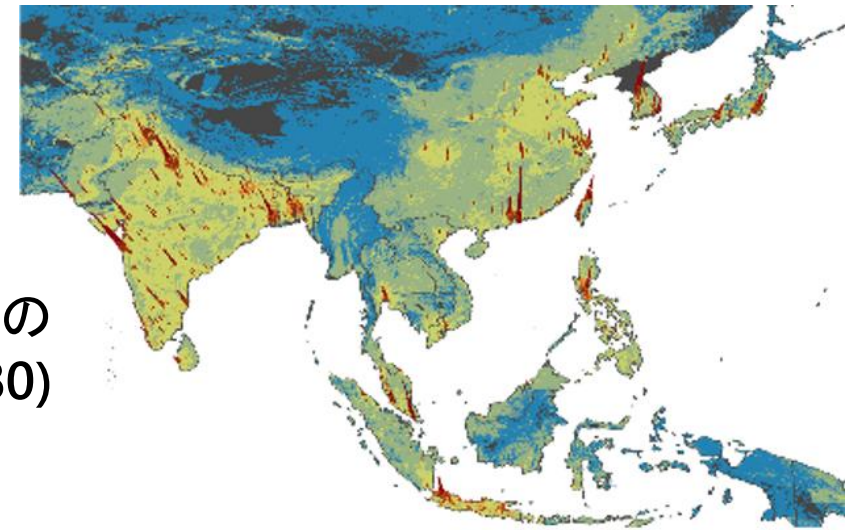
GDP (国内総生産; 全球)



国別SSPシナリオは地域政策に役立てづらい

- **国別SSPシナリオのグリッド別への按分**

- 1kmグリッド, 1/12度グリッド,...
- 人口の按分 : Jones and O'Neill (2016), Li et al. (2022),...
- GDPの按分 : Murakami and Yamagata (2019), Wang and Sun (2022),...



グリッドのGDPの
按分結果(2080)

- **都市の成長/衰退メカニズムの考慮には課題あり**

- ランクサイズルール
- 都市間の相互作用（空間的・経済的波及）

研究目標

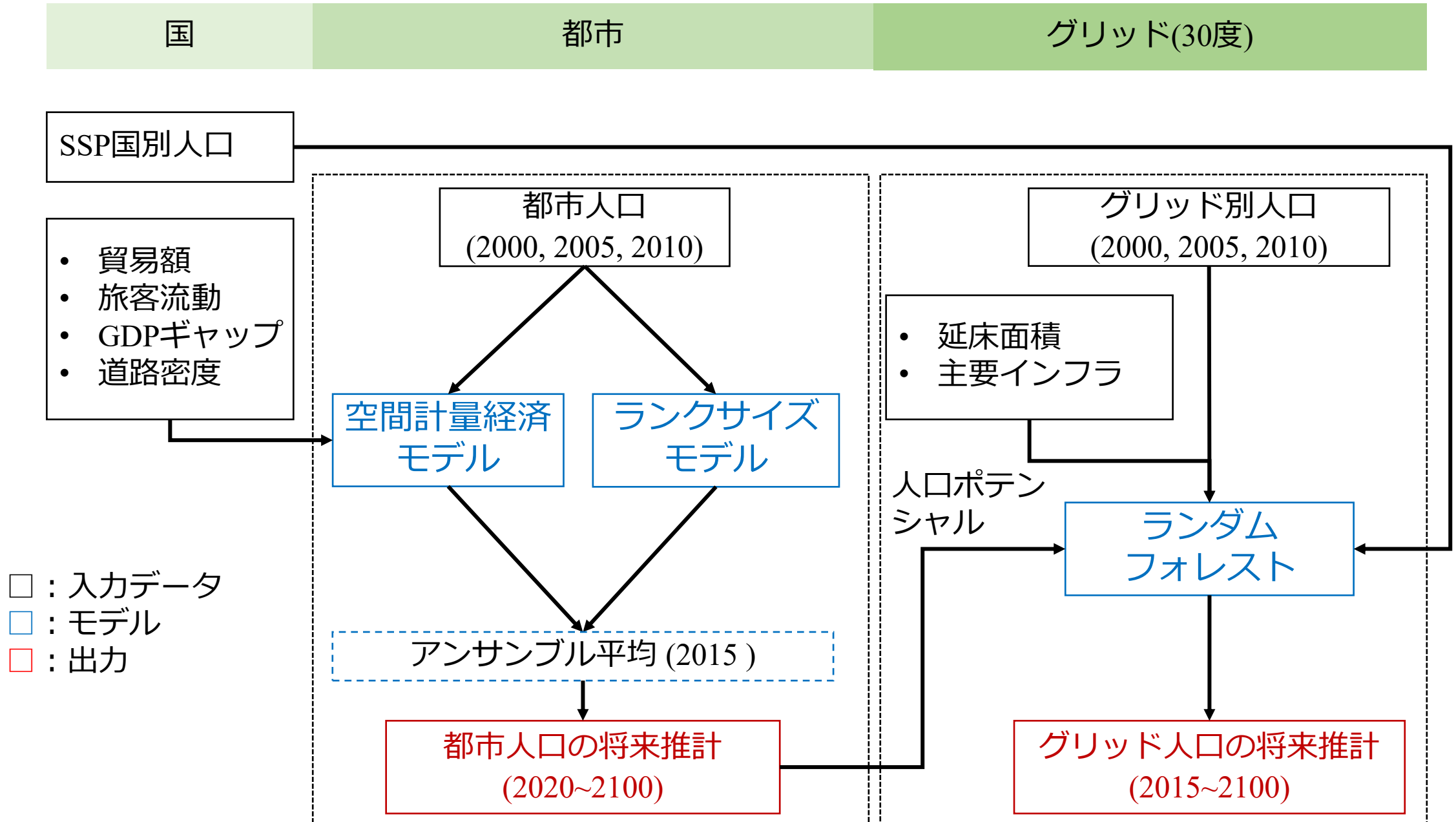
- **都市の成長/衰退メカニズムを考慮したSSP人口シナリオの按分**
 - ✓ ランクサイズルール
 - ✓ 都市間の相互作用（空間的・経済的波及）

人口按分の詳細

- ✓ シナリオ : SSP1 - 5
- ✓ 対象期間 : 2020, 2025, ..., 2100
- ✓ グリッド : 30度グリッド ($\approx 1\text{km}^2$)
- ✓ 入力データ : 全球で利用可能なもののみ
- ✓ 精度検証 : 首都圏

- **水害リスク評価への応用**
 - ✓ 2100年までの被害をグリッド毎に将来推計

グリッド別人口の推計手順

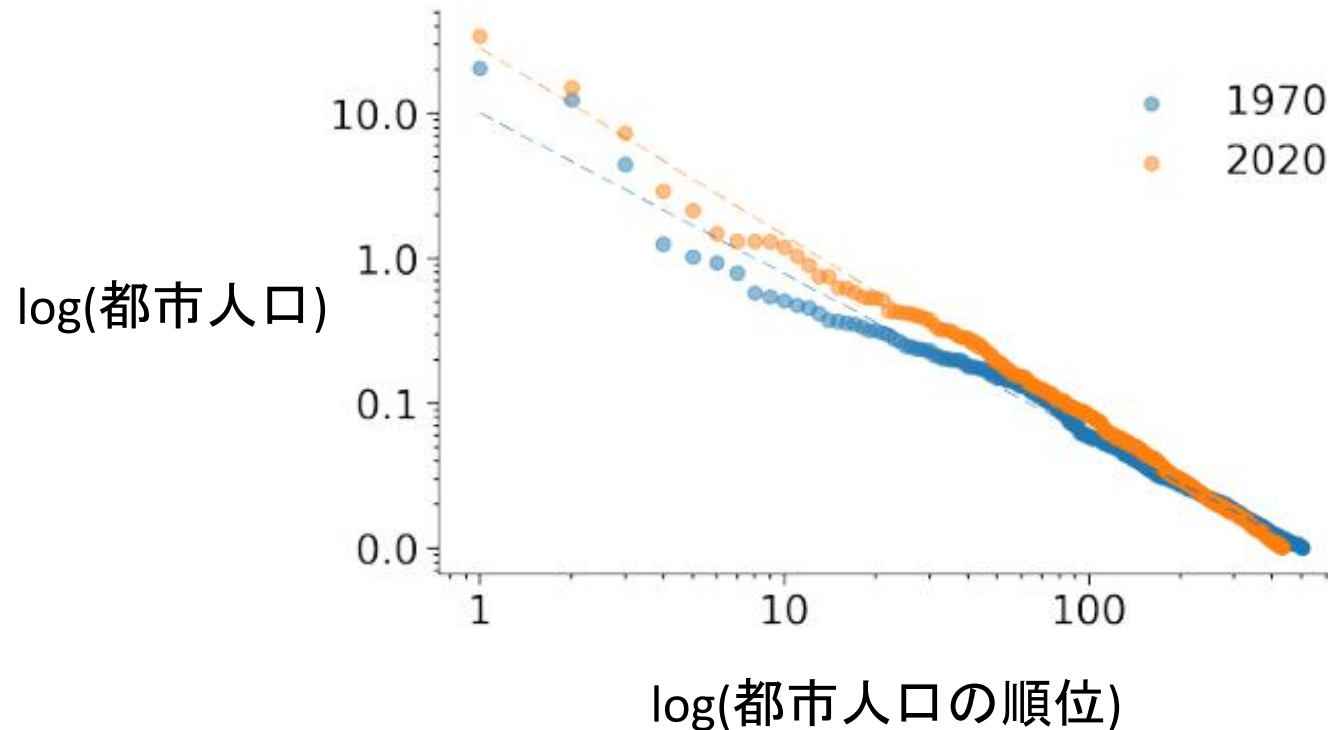


都市人口のランクサイズルール

$$\log(p_i) = \alpha + \beta \log(r_i - 0.5) + \varepsilon_i$$

p_i : 都市 i の人口
 r_i : 都市 i の人口の順位
 α, β : 係数

国内の都市人口の分布



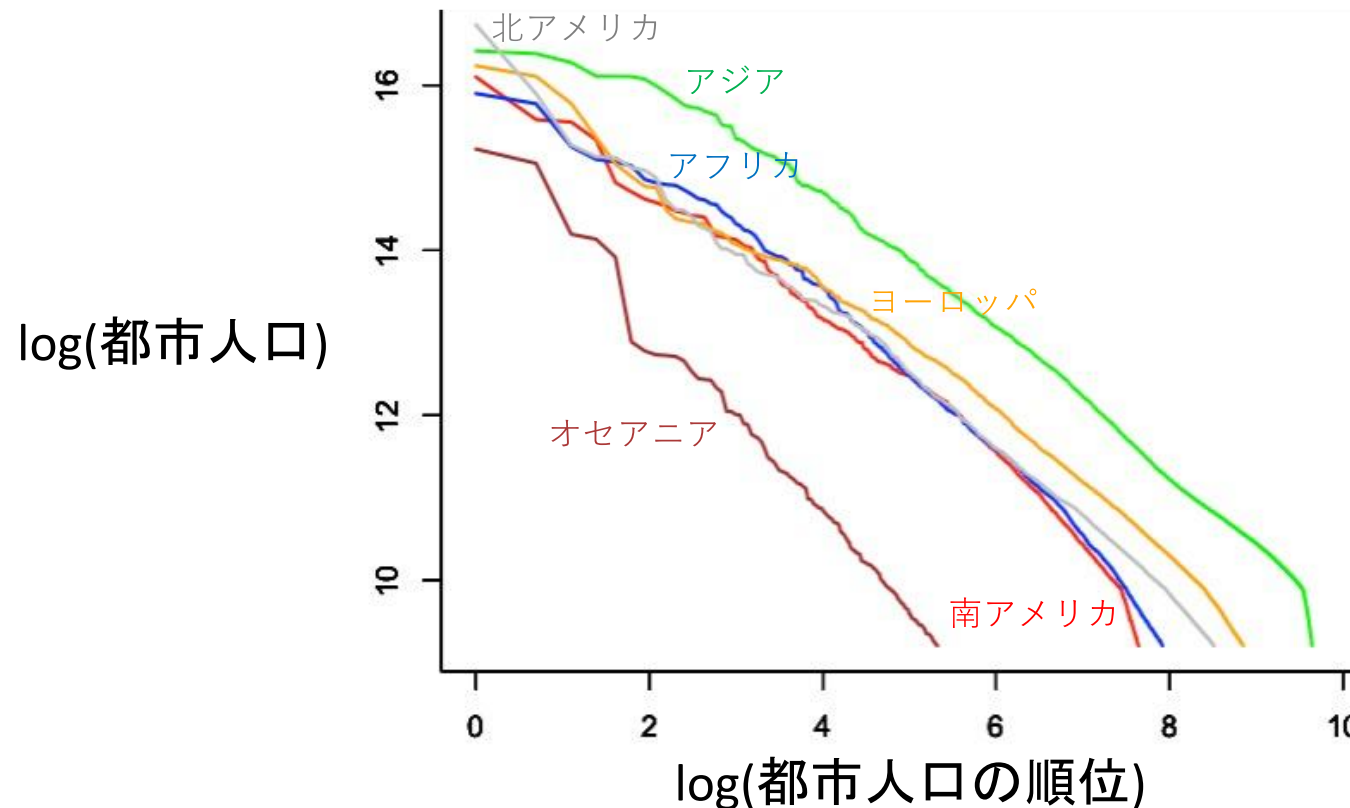
→ ランクサイズルールは
成り立ちそう

都市人口のランクサイズルール

$$\log(p_i) = \alpha + \beta \log(r_i - 0.5) + \varepsilon_i$$

p_i : 都市 i の人口
 r_i : 都市 i の人口の順位
 α, β : 係数

大陸別の都市人口の分布



→ 全球でもランクサイズルールは成り立ちそう

都市人口の空間計量経済モデル

$$\Delta \mathbf{p}_{t+1} = \beta_0 + (\rho_{geo} \mathbf{W}_{geo} + \rho_{trade} \mathbf{W}_{trade,t} + \rho_{flight} \mathbf{W}_{flight,t}) \Delta \mathbf{p}_t + \beta_p \mathbf{p}_t + \beta_{gap} \mathbf{x}_{gap} + \beta_{road} \mathbf{x}_{road} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_t \sim N(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$$

空間波及

(距離が近いと相互影響)

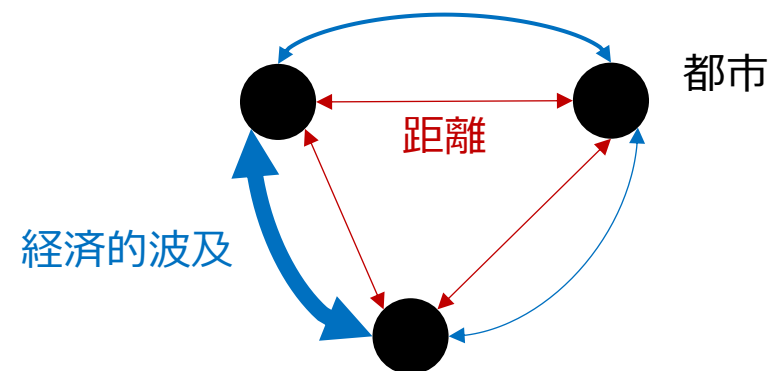
$$\mathbf{W}_{geo} = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & 0 & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

経済的波及

(貿易額と旅客流動が多いと相互影響)

$$\mathbf{W}_{***} = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & 0 & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

t : 時点 (5年ごと)
 $\Delta \mathbf{p}_t$: 都市人口の変化
 \mathbf{p}_t : 都市人口
 \mathbf{x}_{gap} : GDPギャップ
 \mathbf{x}_{road} : 道路密度 (m/m²)



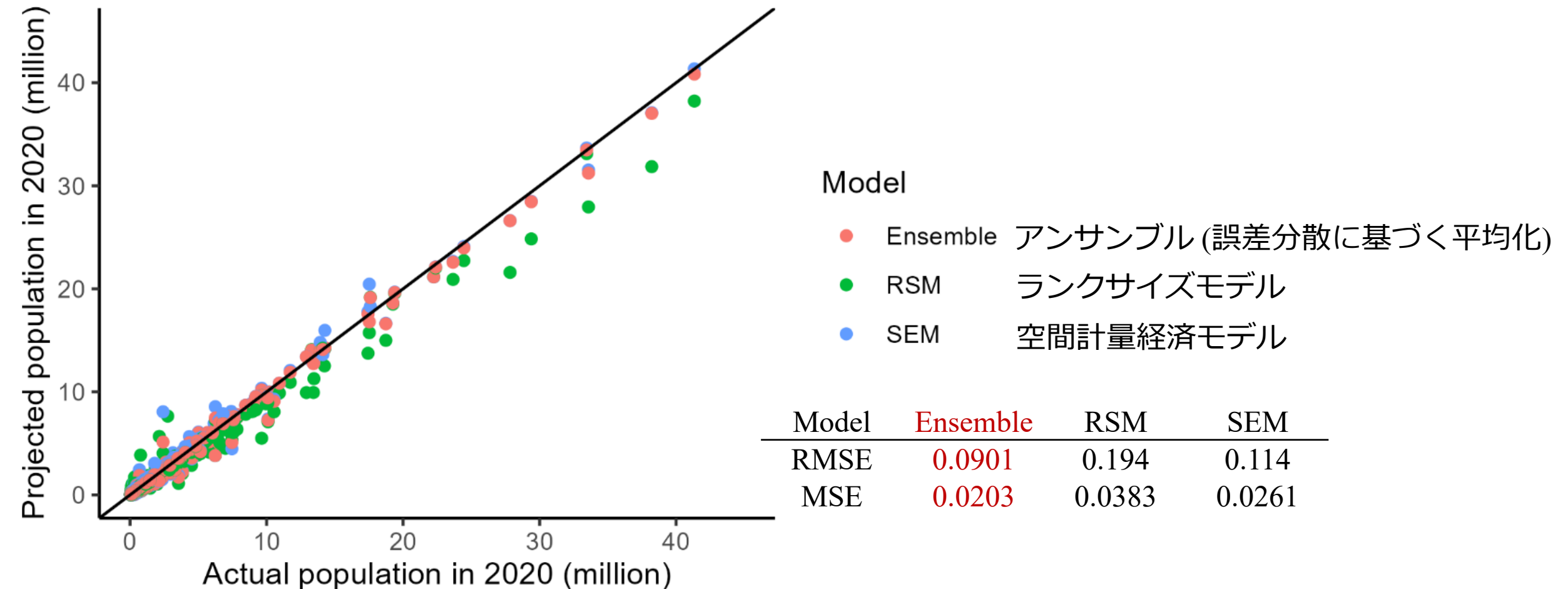
SSP毎のパラメータ設定

	2100	SSP1 (持続可能)	SSP2 (中庸)	SSP3 (地域分断)	SSP4 (格差)	SSP5 (化石燃料)
空間波及	ρ_{geo}	1	1	1	1	1
経済波及	ρ_{trade}	1	1	0.5	1	2
	ρ_{flight}	2	1	0.5	1	2
格差	β_{gap}	0.5	1	1	2	1

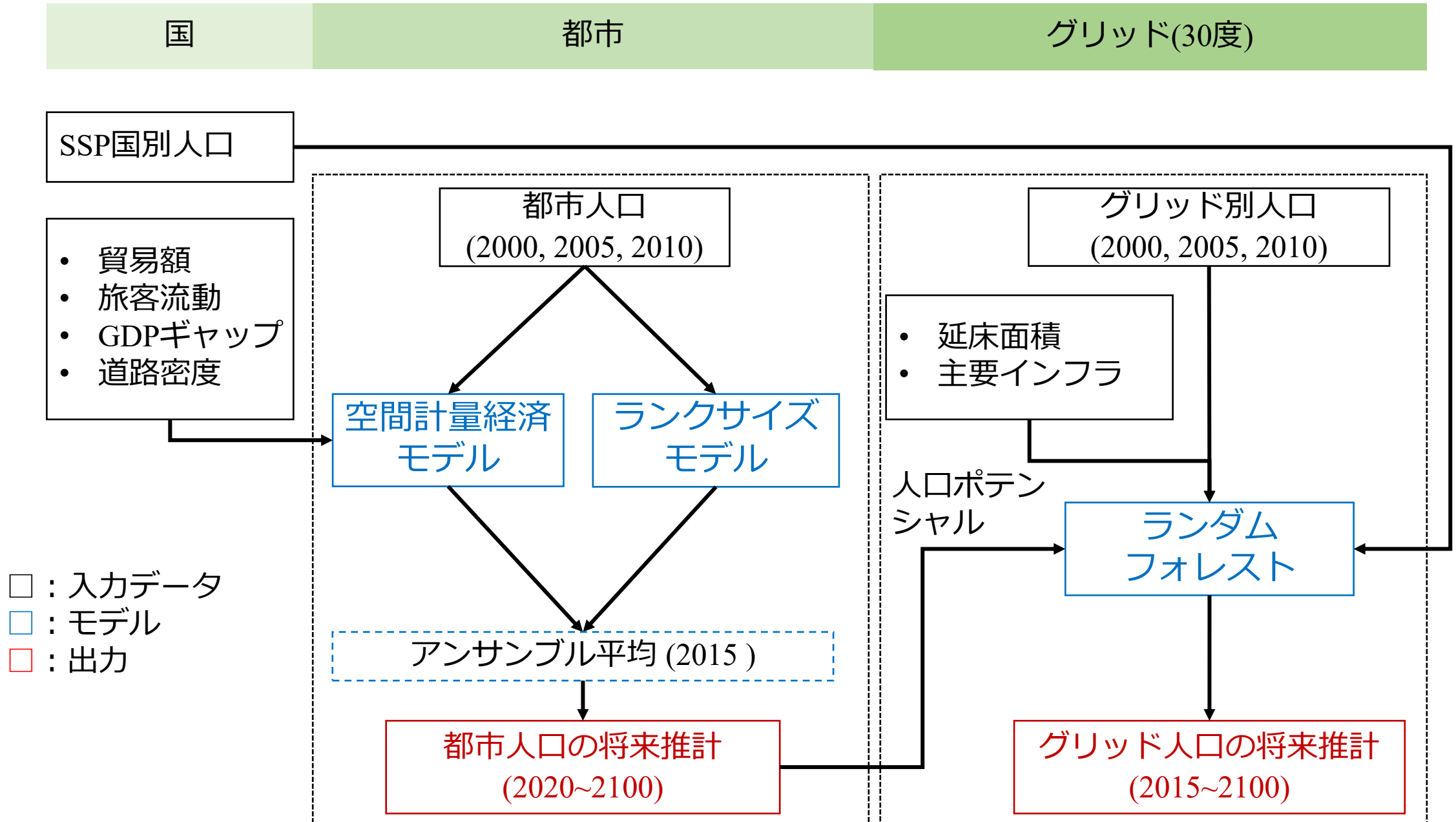
O'Neill et al. (2017)

		SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Economy & lifestyle	International trade	Moderate	Moderate	Strongly constrained	Moderate	High, with regional specialization in production
	Globalization	Connected markets, regional production	Semi-open globalized economy	De-globalizing, regional security	Globally connected elites	Strongly globalized, increasingly connected
	Inequality	Reduced across and within countries	Uneven moderate reductions across and within countries	High, especially across countries	High, especially within countries	Strongly reduced, especially across countries

5年後予測の精度検証: **都市**レベルの人口予測 (2020)



グリッド別人口の推計手順



グリッド人口の将来推計

O'Neill et al. (2017)を参考に、都市の拡大/縮退度合いを調整

被説明変数

- グリッド別の人口変化: $\log(p_{t+1}/p_t)$

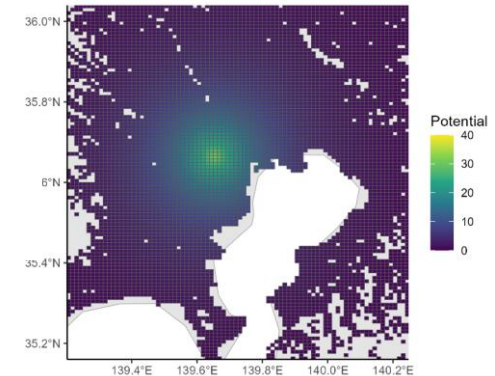
説明変数

先ほど推計した都市別人口(SSP別)

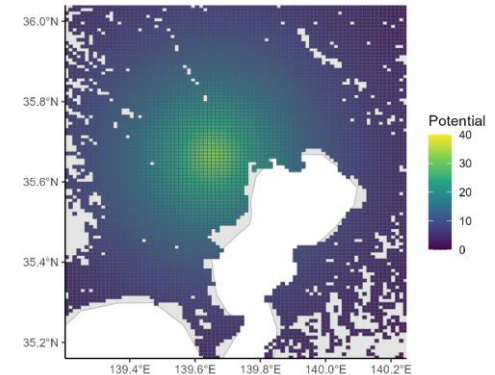


- 人口ポテンシャル: $q_{g,t} = \sum_{c=1}^C \hat{P}_{c,t} \exp\left(-\frac{d_{c,g}}{r_t}\right)$
- グリッド別の人口変化(5年前): $\log(p_t/p_{t-1})$
- 土地被覆: Chen et al. (2020)
- 延床面積: GHS-BUILT V R2023A
- 人口(初期時点のみ)
- インフラ: Nirandjan et al. (2022)
 - 主要道路
 - 空港
 - 鉄道路線

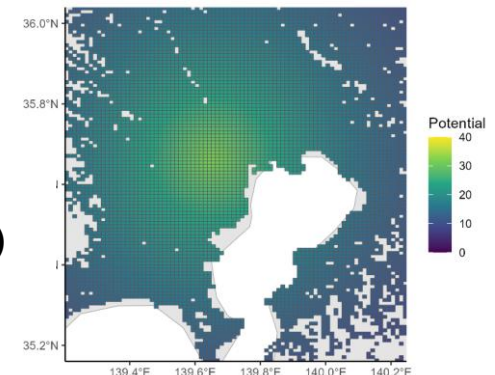
SSP1
(持続可能)



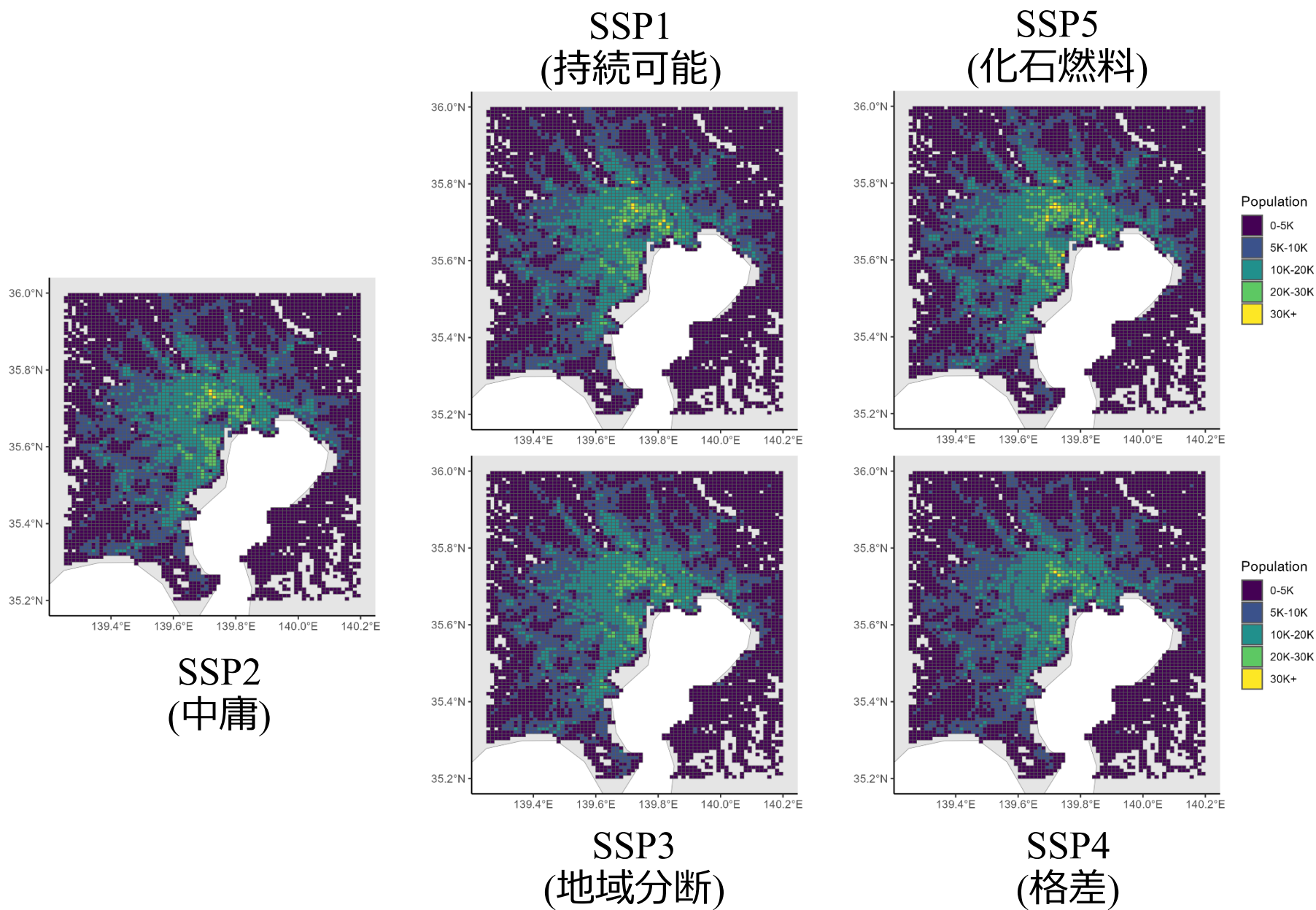
SSP2
(中庸)



SSP3
(地域分断)

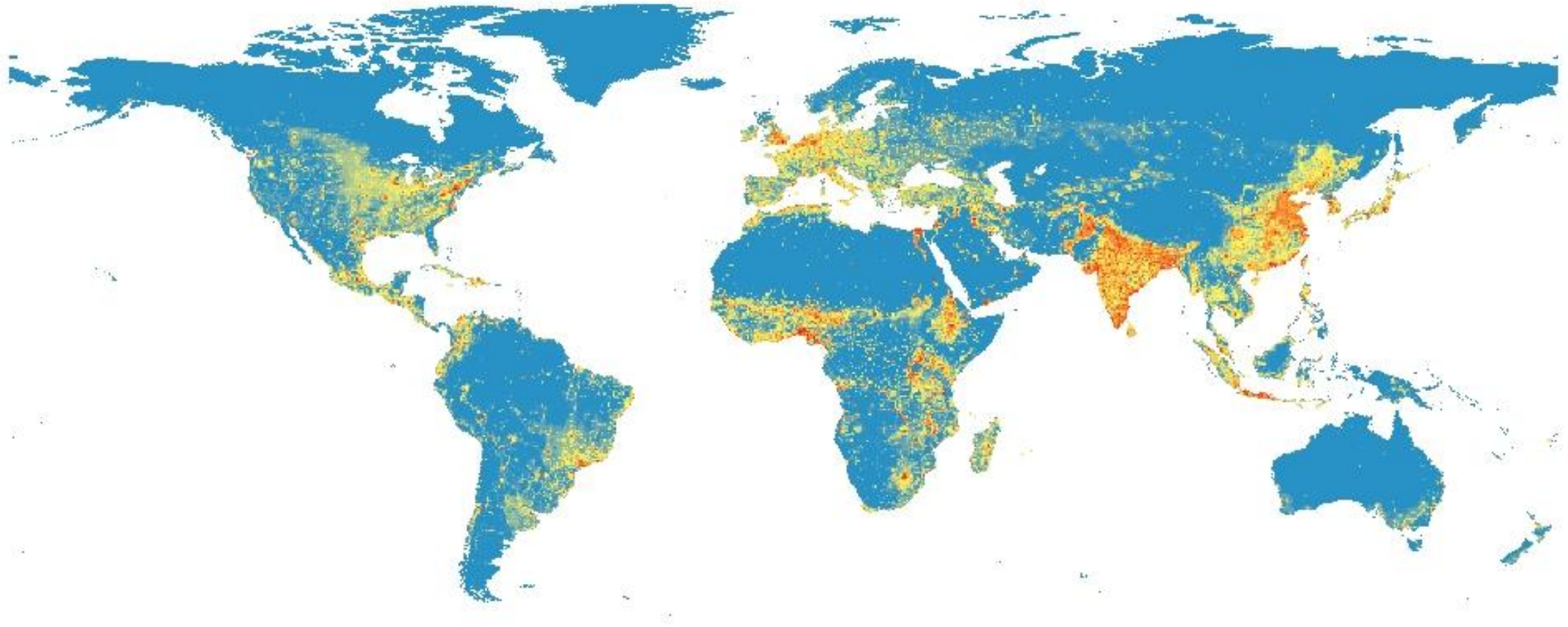


SSPシナリオ毎の人口推計結果(2070)



人口推計結果（2080）

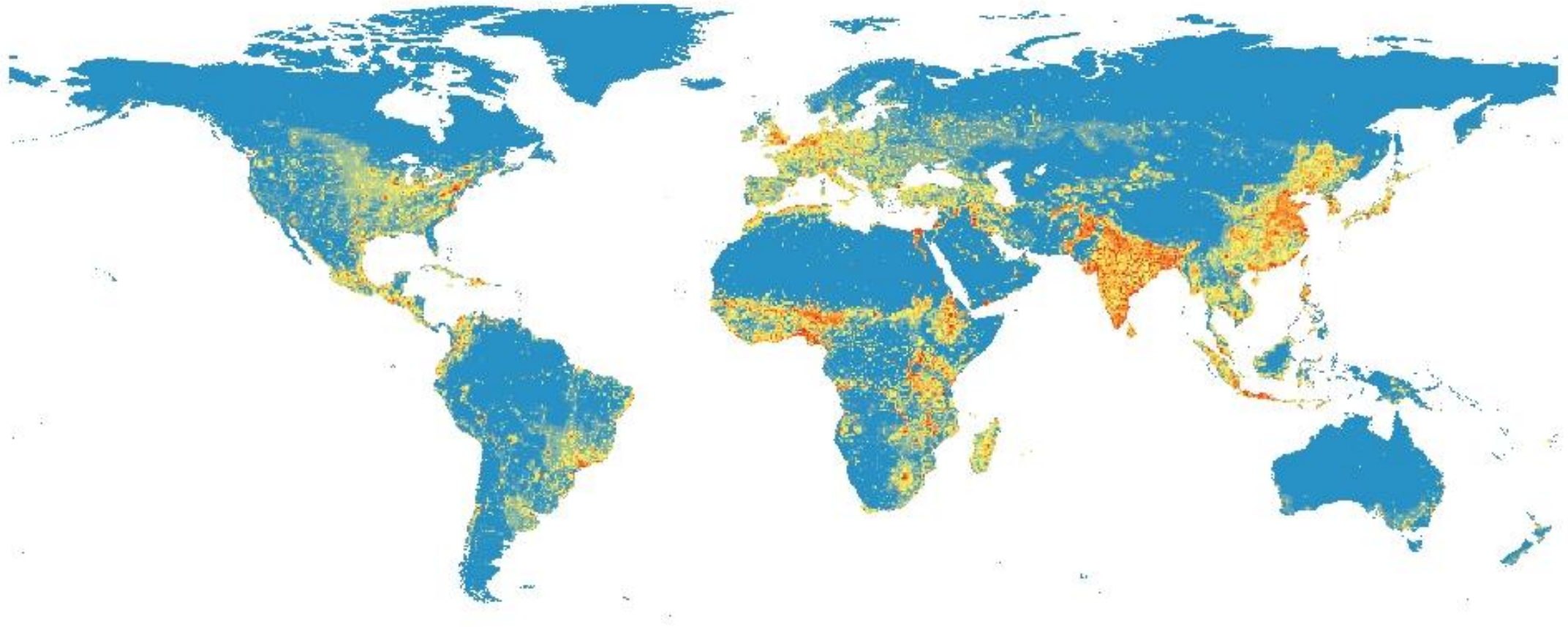
SSP1 (2080)



- SSP1:コンパクトな都市成長、SSP3:スプロール
– 特に東欧やアフリカで差異が顕著

人口推計結果（2080）

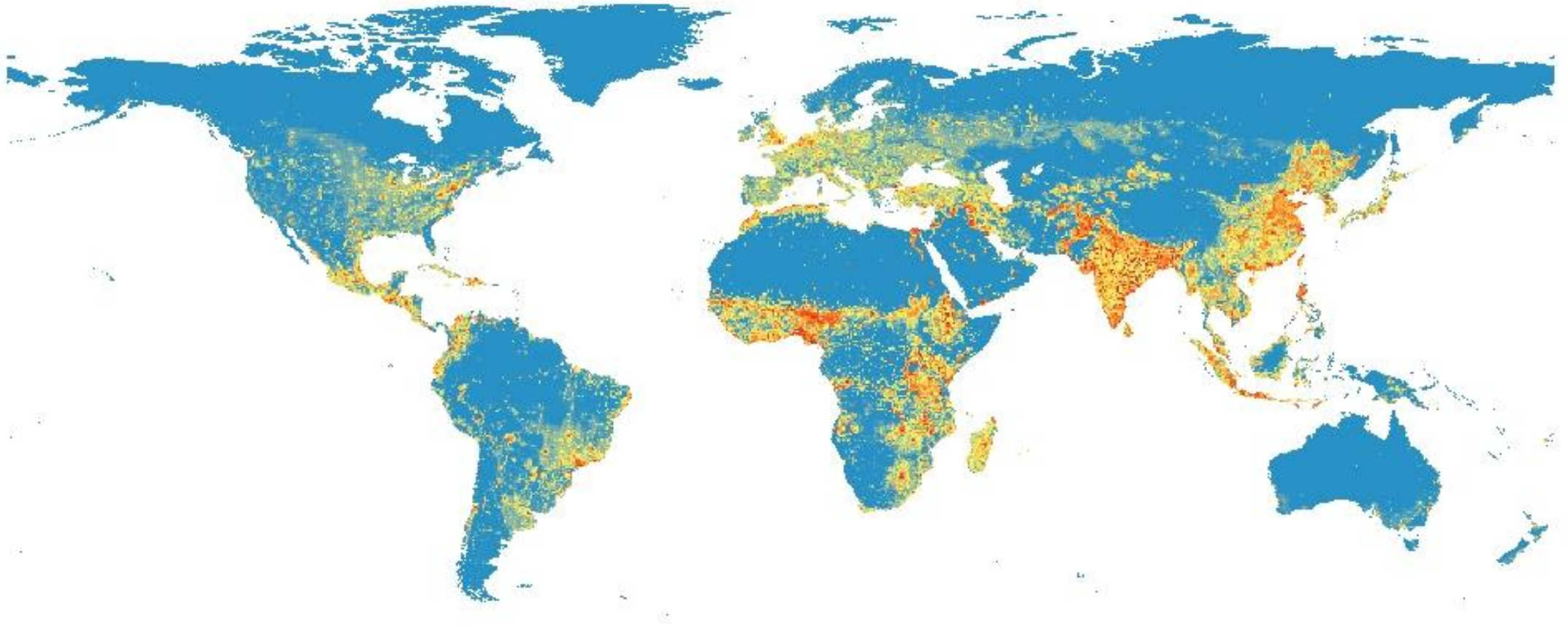
SSP2 (2080)



- SSP1:コンパクトな都市成長、SSP3:スプロール
– 特に東欧やアフリカで差異が顕著

人口推計結果（2080）

SSP3 (2080)

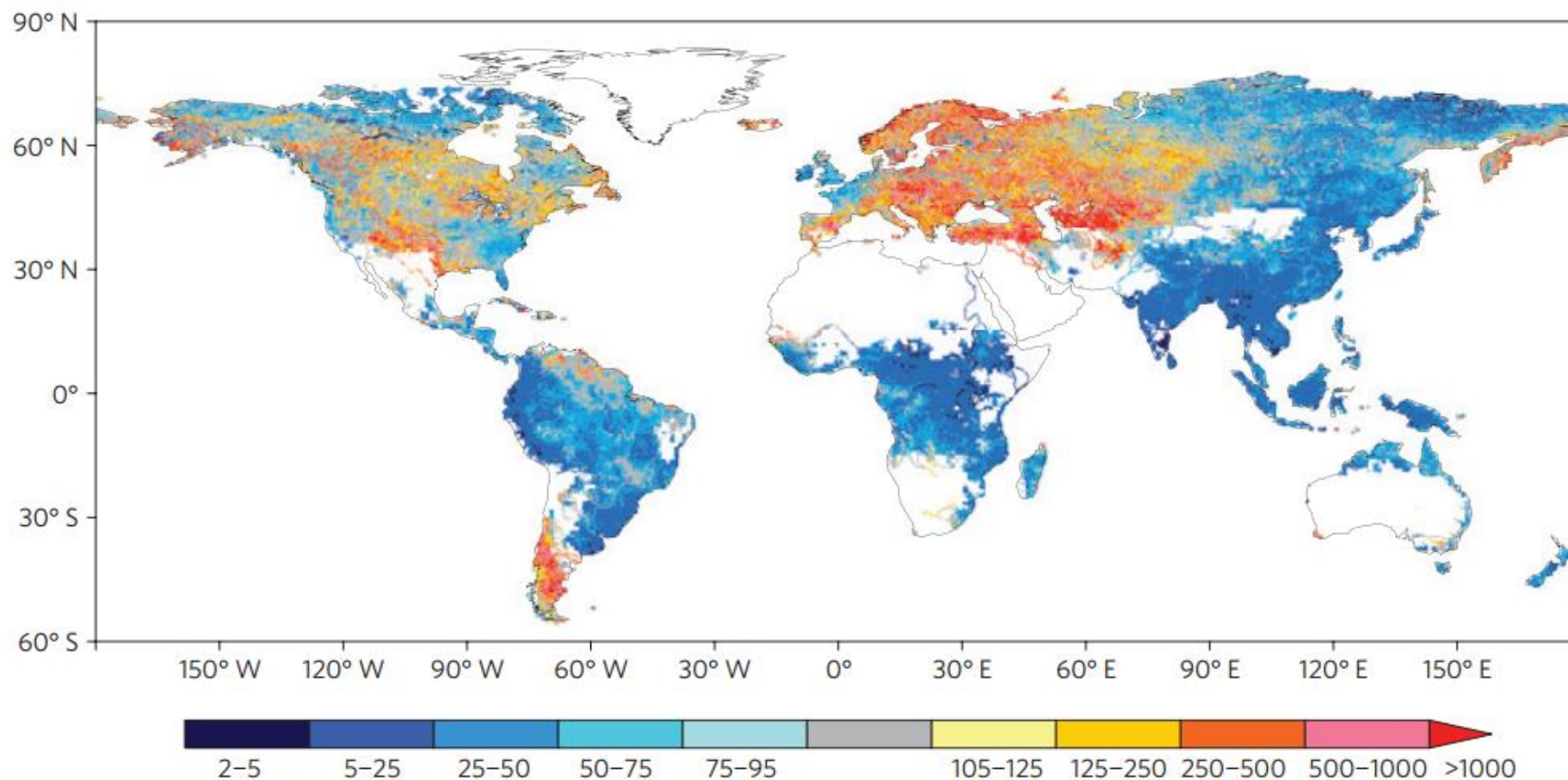


- SSP1:コンパクトな都市成長、SSP3:スプロール
– 特に東欧やアフリカで差異が顕著

応用例：グリッド別の水害被害の将来推計

- 今後、大規模水害の頻度が増えるとの予測(Hirabayashi et al., 2016)
 - 都市に対する影響評価が重要な課題

20世紀における
100年に1度の洪水が
21世紀に何年に1度
起きるか

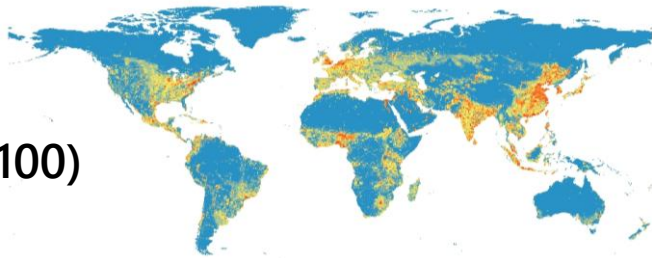


応用例：水害被害の将来推計

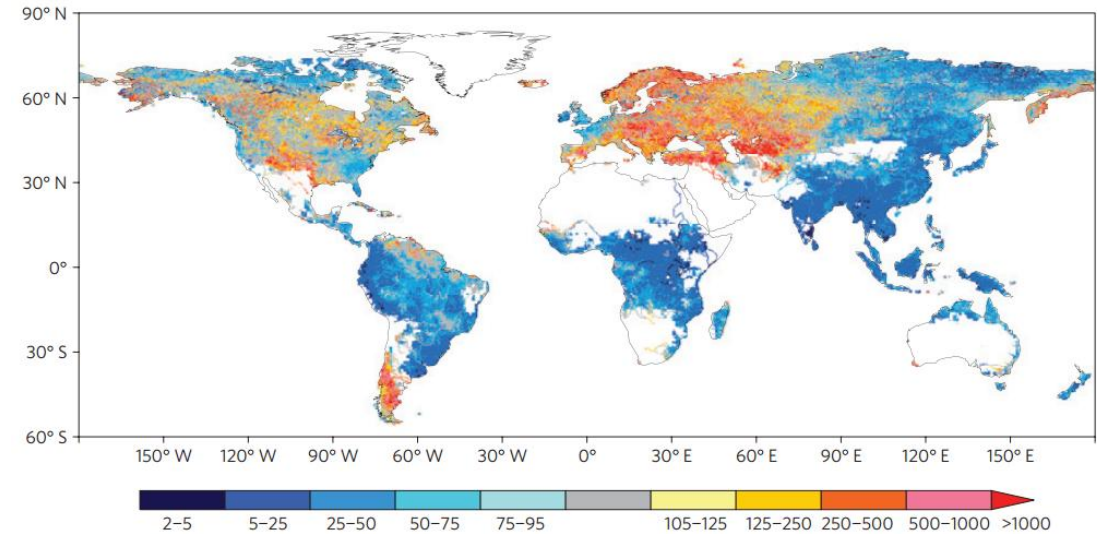
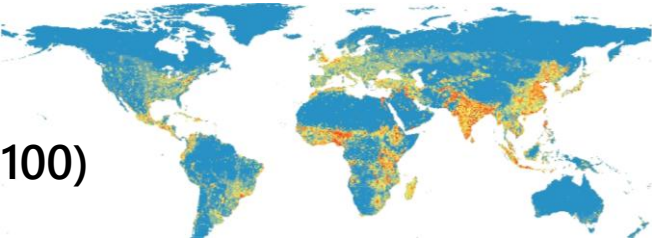
将来の水害頻度 (Hirabayashi et al., 2013)

グリッド別人口・GDP

人口
(SSP2; 2020-2100)



GDP
(SSP2; 2020-2100)



事例別被害想定 (EM-DAT)

- 人口・GDPと水害被害の関係を推定

被害の評価

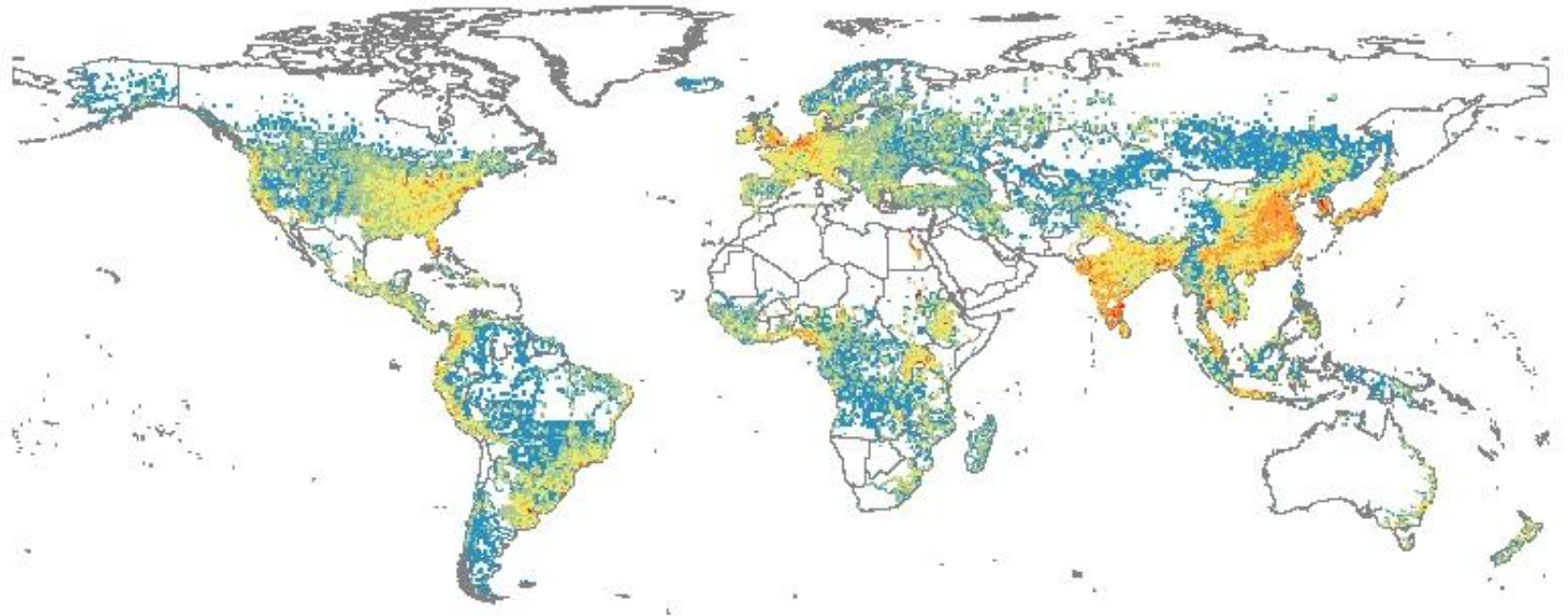
経済損失（SSP2シナリオ）

- 推計モデル: $\log(\text{経済損失}) = \beta_0 + \log(\text{暴露人口})\beta_{\text{人口}} + \log(\text{暴露GDP})\beta_{\text{GDP}} + \varepsilon$
 - 係数は水害事例別データ(EM-DAT)から推定
 - 推定された係数: 暴露人口 = -0.6、暴露GDP = 1.0

推計経済損失額(2020-2100)

- 推計経済損失額

- 経済発展する
東アジアやヨーロッパで
大きい



死者数（SSP2シナリオ）

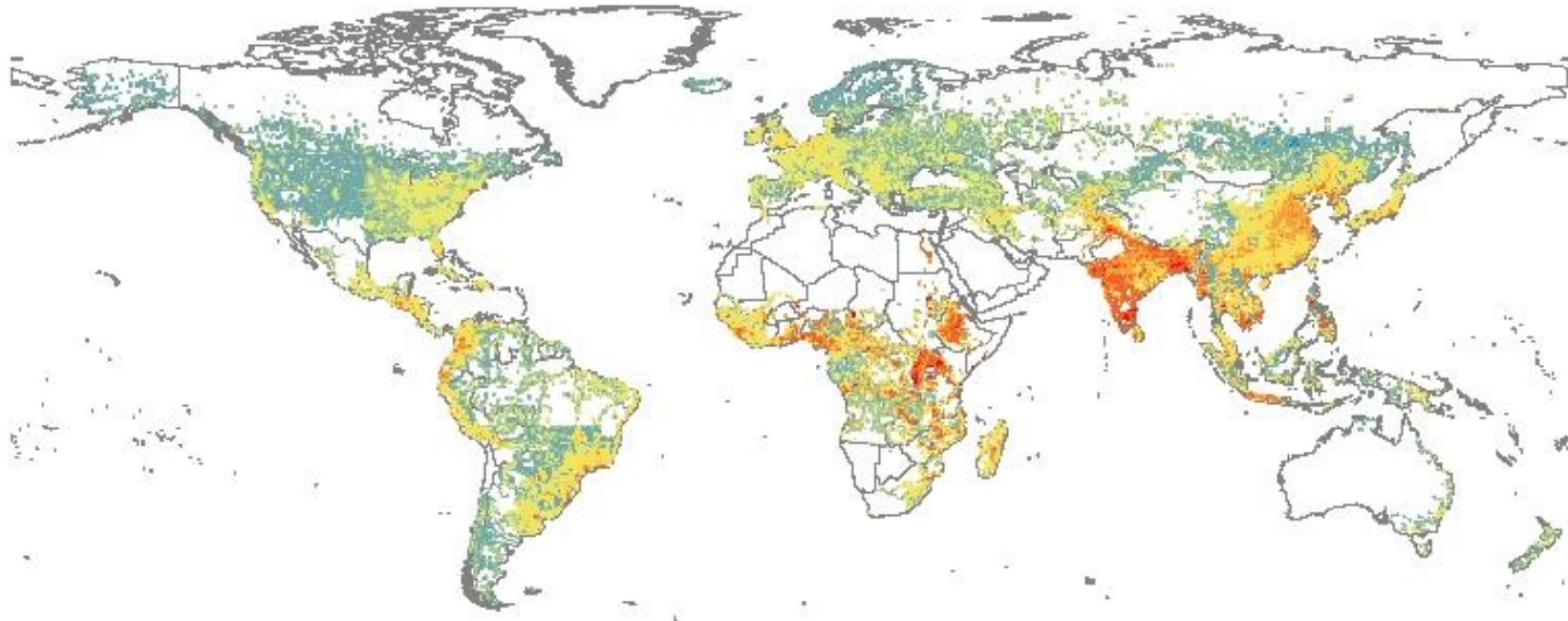
- 推計モデル: $\log(\text{死者数}) = \beta_0 + \log(\text{暴露人口})\beta_{\text{人口}} + \log(\text{暴露GDP})\beta_{\text{GDP}} + \varepsilon$

- 係数は水害事例別データ(EM-DAT)から推定
- 推定された係数：暴露人口 = 20.2、暴露GDP = -9.6

推計死者数(2020-2100)

- 推計死者数

- 人口が大きく、比較的
経済発展していない
南アジア・中央アフリカで
死者が多い



まとめ

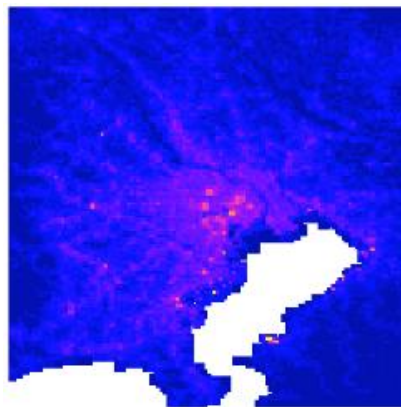
- 都市の成長/衰退メカニズムを明示的に考慮したSSP人口の按分
 - ✓ ランクサイズルール、空間的・経済的波及
 - ✓ 水害リスク評価に対する有用性を確認
- 今後の課題
 - ✓ 個別建物への按分：都市政策に役立てるために必要
 - ✓ より幅広い災害リスク推計、エネルギー消費推計、CO2排出等への応用

建物毎の生産額の将来推計(SSP2; 2080)

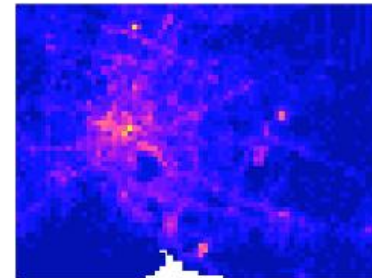


主要都市圏における生産額の将来推計(SSP2; 2080)

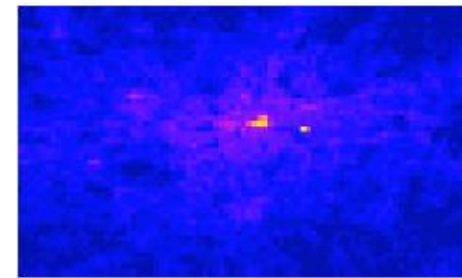
東京



バンコク



ロンドン



参考文献

- Tomari, M., Seya, H., Murakami, D., Yamagata, Y., & Oki, T. (2025). Global gridded population projection via spatial econometric model considering rank-size rule. *Environmental Research Communications*, 7(10), 101002.
- Murakami, D., & Yamagata, Y. (2019). Estimation of gridded population and GDP scenarios with spatially explicit statistical downscaling. *Sustainability*, 11(7), 2106.