

テーマ3: 気候変動に対する 地球規模の適応策の費用便益

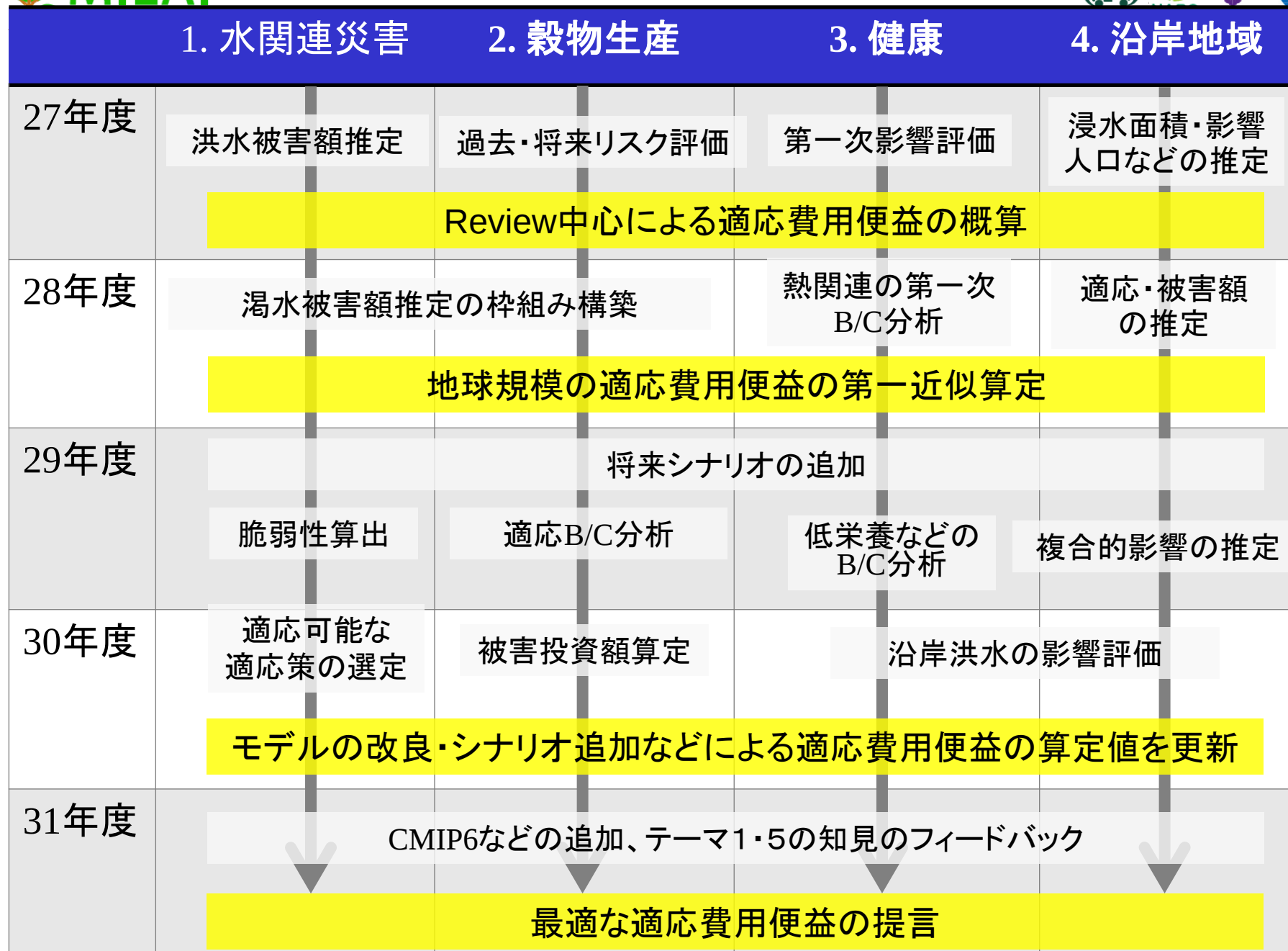
平林由希子, 田上雅浩, 佐々木織江 (芝浦工業大学)

西森基貴, 飯泉仁之直, 櫻井玄, 金元植, 沈志宏

(農研機構・農業環境変動研究センター)

本田靖(筑波大学), 橋爪真弘(東京大学)

横木裕宗, 桑原祐史, 田村誠(茨城大学), 熊野直子(愛媛大学)



(1) 5年間の研究目標

- ① 温暖化レベルごとに地球規模の水
関連災害被害額を算出
 - 洪水被害モデル開発
 - サブテーマ3- (2) へ洪水・干ばつの
頻度・強度変化を提供
- ② 適応策オプションによる被害軽減
額(便益)を算出
 - 適応策オプションの種類と単価費
用の調査と整理
 - 適応策オプションごとに被害軽減額
(便益)を算定
- ③ 各サブテーマから得られた適応費
用と便益を統合し、現実的に実施
可能な適応策オプションを提案

(2) 5年間の成果

- ① 洪水被害モデル開発
 - 気候シナリオ・社会経済シナリオに
対応した被害額・死亡数の推計
 - 洪水や干ばつなどの穀物収量への影響
(サブテーマ3- (2) との共同研究)
- ② 適応による被害軽減額の算出
 - SSPごとに洪水脆弱性変化シナリオを
作成し、自律的適応による便益と追加
的に適応が必要な被害増加分を算定
 - 複数の適応レベルオプションを想定した
場合のハードインフラによる適応費用
と被害軽減額(便益)を算定
- ③ 適応費用・残余被害の統合解析
 - 主要セクターにおける適応による被害
の軽減額、適応費用、残余被害を集計
 - シナリオごとに緩和費用と比較し、経済
的に実現可能なシナリオを抽出

◆ S14開始以前

- ◆ 11気候モデル、4気候シナリオによる洪水影響人口の算定 (Hirabayashi et al., 2013)

◆ S-14におけるブレークスルー

- ◆ 脆弱性シナリオの提案 (Tanoue et al., 2016, Sci. Rep.; Kinoshita et al., 2018, ERL)

- ✓ 自律的適応による被害軽減効果→気候変動適応分のみを推計

- ◆ 現在と将来の洪水防護基準を考慮した経済被害・損失の推計

- ✓ これまでは気候モデルの流出量のバイアスを無視して年最大流量の再起確率から被害を算定(世界の既往の研究でも同様)

- ✓ バイアス補正したCMIP5気象外力(サブ3-2)による河川氾濫計算
→浸水日数、浸水深、浸水面積率などが妥当な値として算定可能に

- 浸水深-被害関数による直接被害推計の精緻化、経済損失(産業停止、応急費用)および他産業への波及効果の推計 (Tanoue et al., 2020)

- ✓ 現在の防護基準データを活用し、複数の適応オプション(防護レベルのシナリオ)における将来の防護レベル変化も考慮

- ◆ 全球規模での洪水に関する適応策の費用便益分析

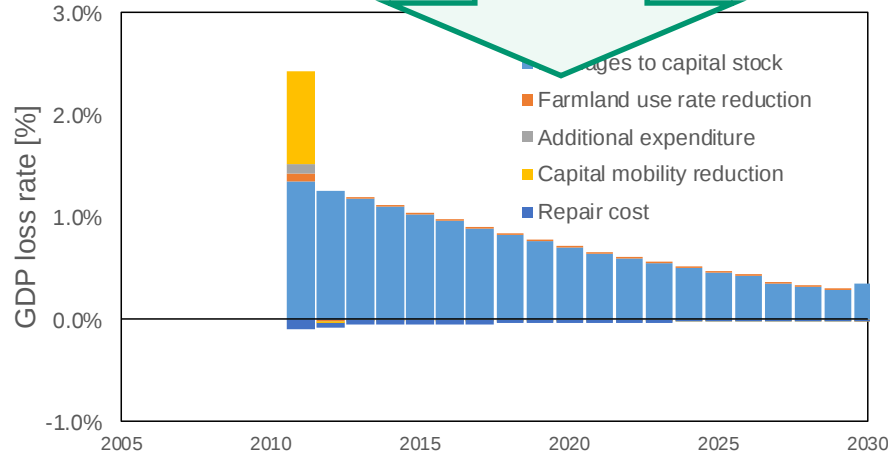
- ✓ 500地点以上のハードインフラの単価費用、防護基準の情報を収集し、複数の適応オプションシナリオおよび費用便益モデルを構築

- ✓ 5GCMs×4RCPs×5SSPsによる費用便益分析をグローバルに実施

サブテーマ3-(1): 水関連災害

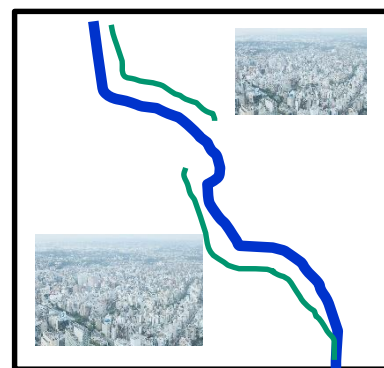
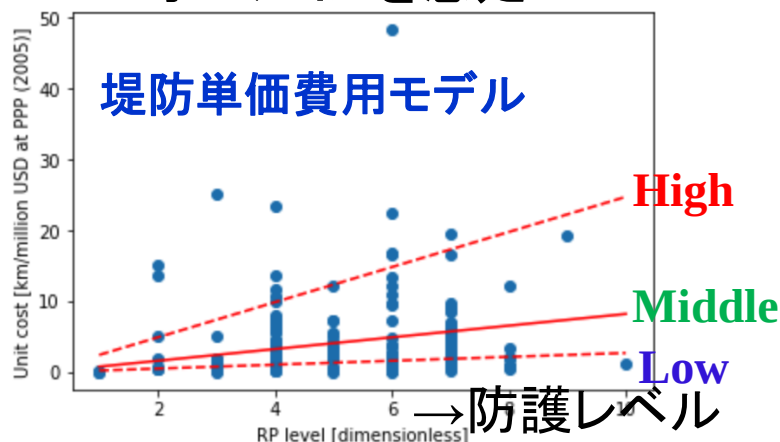
	報告書 & 文献	モデル推定値	AIM/CGE(テーマ5)におけるモデル内での解釈
資産への被害	\$11.8 B (World Bank)	\$13.2 B	農業・林業・漁業・工業・製造業部門における資産ストックへの被害
機会損失		\$5.9 B	資本移動の減少
家庭における 応急対策費用	\$9.2 B (World Bank)	\$3.5 B	家庭セクターにおける追加的な費用
事業所における 応急対策費用		\$0.6	事業セクターにおける追加的な費用
浸水した農地面積	18,291 km ² (Komoti et al. 2011)	14,850 km ²	
30日以上 浸水した農地面積		4,018 km ²	

農地面積使用率の低下



- ◆ タイ2011年洪水を対象に、CGEによる経済波及効果を算定。(Tanoue et al., 2020, WRR)
- ◆ 全球規模の機会損失も算定。(Taguchi et al., 準備中)

- ◆ 将来必要な洪水防護のための堤防費用推計モデルを構築。
 - ◆ 既往文献による堤防費用、社会インフラの単価費用データ等から社会経済状態に応じた堤防単価費用モデルを構築
 - ◆ 都市域を防護対象とし、都市の河川長から費用を推計
 - ◆ 堤防以外の対策の費用便益も検討(予警報: 約 \$180 / km²)
- ◆ 気候変動下において、現在と同程度の被害まで引き下げるために必要な防護シナリオを想定
 - ◆ 費用にかかわらず防護するシナリオと、費用便益<1の場合の2つの適応オプションを想定



都市面積割合に応じて
都市域のみに堤防を設置

単価費用

×

堤防長さ

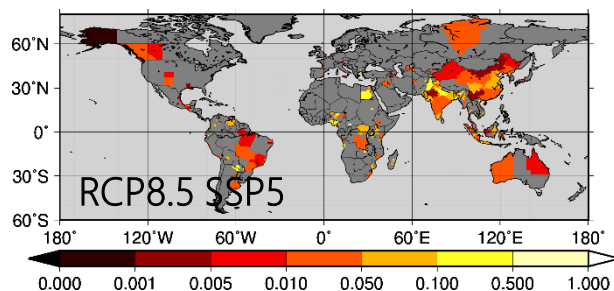
=

費用

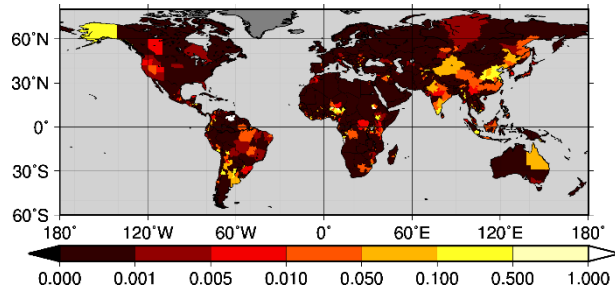


適応費用、残余被害、総費用の全球分布

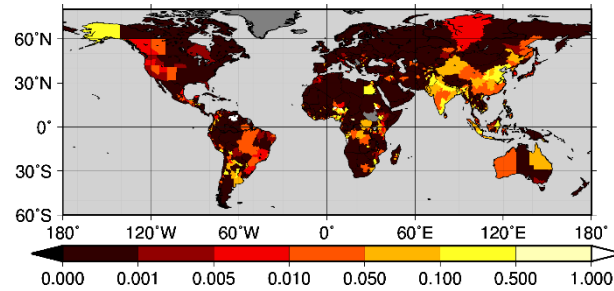
適応費用 [% of GDP]



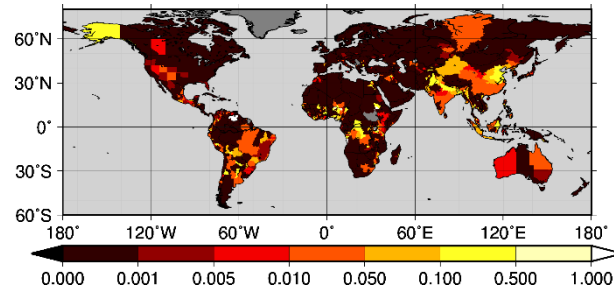
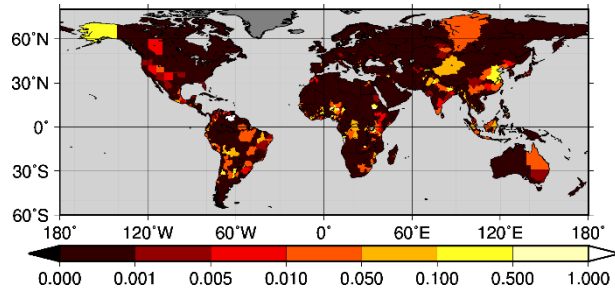
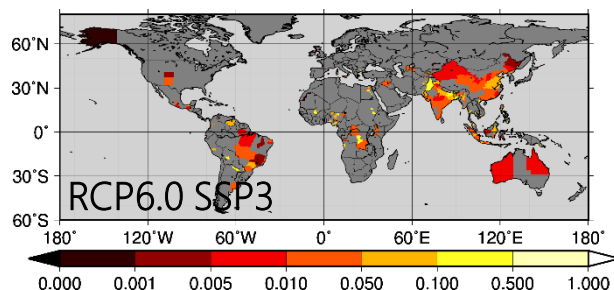
残余被害 [% of GDP]



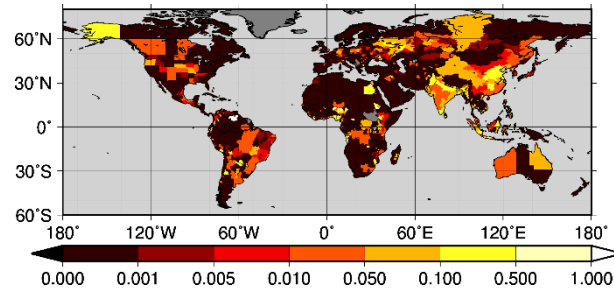
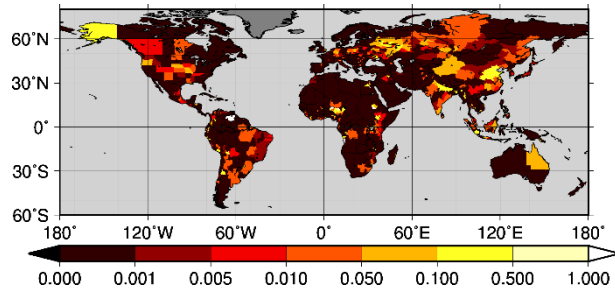
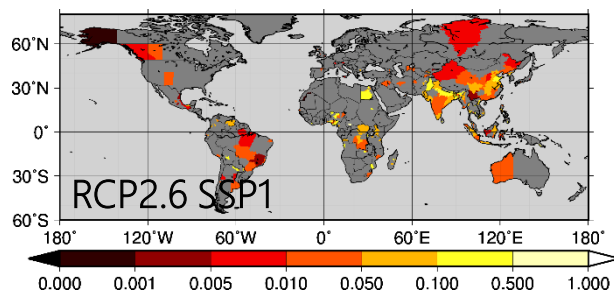
総費用 [% of GDP]



RCP6.0 SSP3



RCP2.6 SSP1



- 全球で、年87～153億ドルの投資は、年463～1463億ドルの洪水被害を減らす
- 現在の防護レベルが低く、経済発展が予想される中国、インド、中央アフリカ、ラテンアメリカでは、適応により被害を大きく減らせる可能性がある。
- ただし、インフラ建設中の被害が大きいいため、適応策が実施される場合でも、ある程度の洪水被害の増加(残余被害)は避けられない

(1) 5年間の研究目標

- ① 穀物生産被害量・額についての気候変動影響の検出
 - 全球農業被害データベース構築
 - サブテーマ3- (3) 健康分野やテーマ5の経済モデルに収量データ提供
- ② 社会経済シナリオを考慮した穀物生産量の気候変動リスク評価
 - 社会経済シナリオと全球作物モデルを結ぶパラメタリゼーション開発
- ③ 穀物生産システムにおける適応策の有効性と限界、費用・便益の評価
 - 食料分野における特定の適応策の費用と便益の推計
 - 食料の観点から見た緩和策と適応策のトレードオフなどの評価

(2) 5年間の成果

- ① 干ばつによる穀物生産の被害推定
 - 全球災害データベース(EM-DAT)と国連食糧農業機関(FAO)データの統合
 - 干ばつによる4穀物の生産被害額推定
- ② 全球穀物生産に関する気候変動被害関数の開発
 - 全球収量変動データセットの作成
 - 農業技術変化に対応した収量予測が可能なモデルを新たに構築し収量予測
→他テーマでの低栄養人口の推定に利用
 - 過去30年間の気候変動被害額推定
- ③ 穀物生産における適応コストと残余被害
 - 適応コスト算定と被害額との比較
 - 食料生産(土壌への炭素貯留)の観点からの適応と緩和のコベネフィット

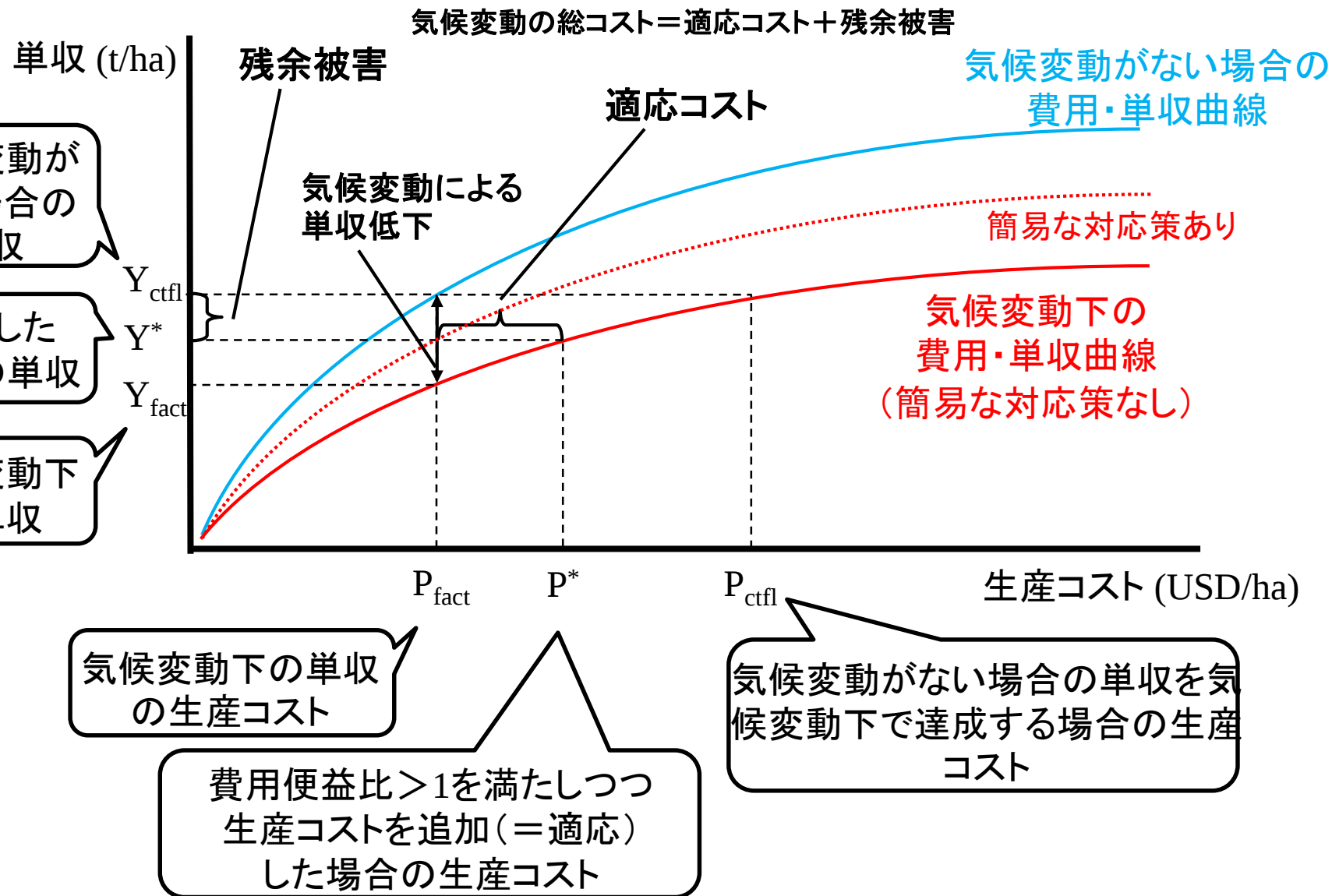
S14-3(2) の主たる知見(穀物生産)

- 世界では主要穀物(トウモロコシ、コムギ、ダイズ、コメ)について、過去30年間の気候変動(産業革命以前と比べて約 $+1^{\circ}\text{C}$)で既に年間約424億ドルの生産被害が生じている。
- 気候変動による4穀物の被害額は、複数のシナリオの平均では、 $+1.5^{\circ}\text{C}$ で630億ドル、 $+2^{\circ}\text{C}$ で800億ドル、 $+3^{\circ}\text{C}$ で1280億ドルに増加すると見込まれる。
- 将来の気候変動の被害額のうち、生産費の増額(=適応コスト)で相殺できる割合は $+1.5^{\circ}\text{C}$ では84%(530億ドル)、 $+2^{\circ}\text{C}$ では76%(610億ドル)、 $+3^{\circ}\text{C}$ では61%(780億ドル)と推計された。

参考

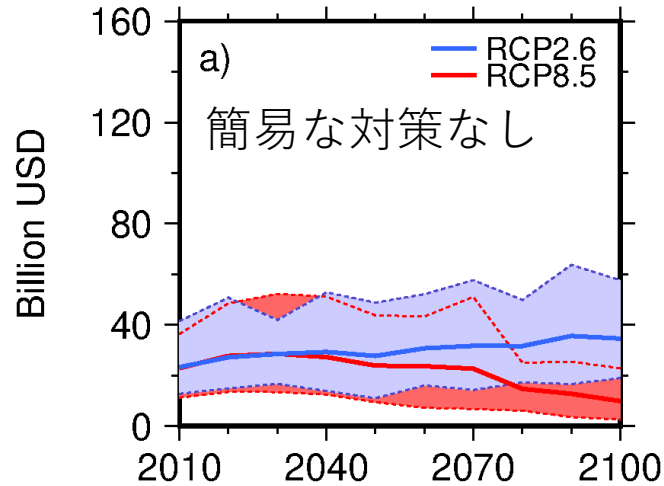
最大の農業気象災害である干ばつによる4穀物の生産被害は、干ばつを10年に1回と仮定すると、世界で620億ドル。 $+2^{\circ}\text{C}$ や $+3^{\circ}\text{C}$ では適応後の年間の被害額(残余被害500億ドル)は干ばつ年の被害額に匹敵する。

穀物生産における適応コストの定義

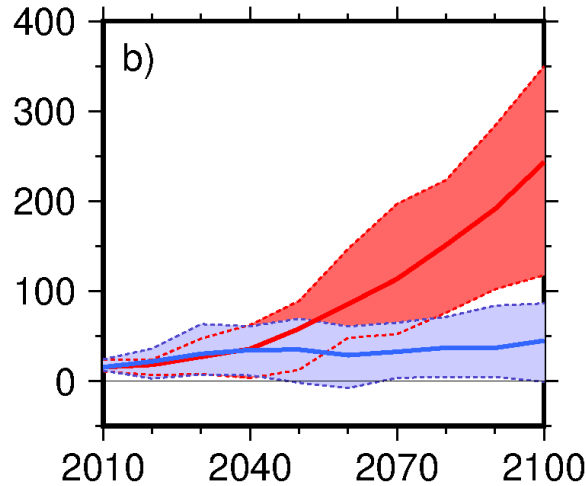


4穀物生産の適応コスト・残余被害

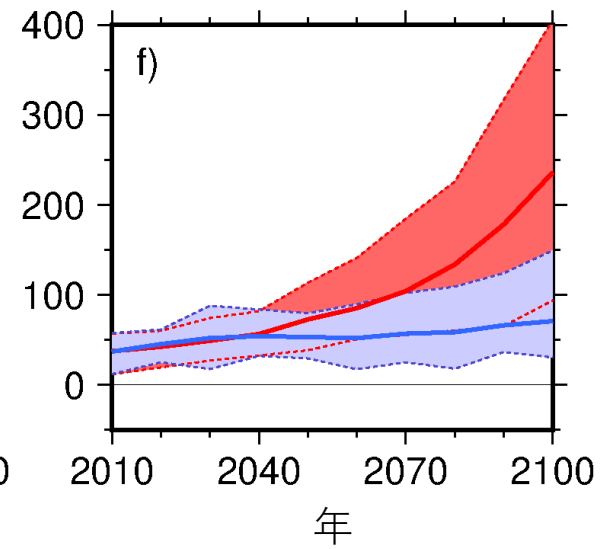
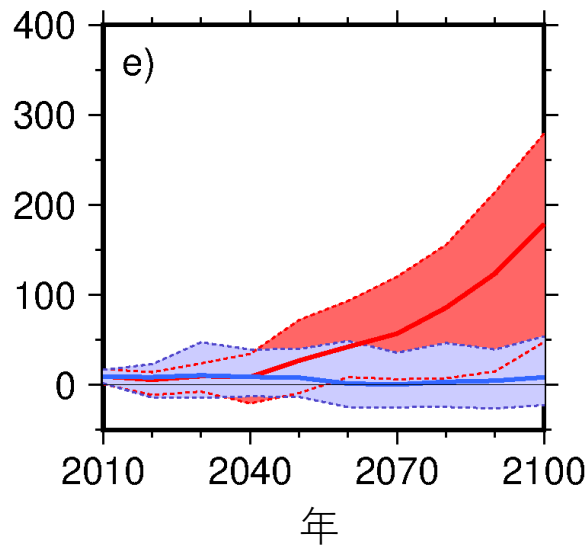
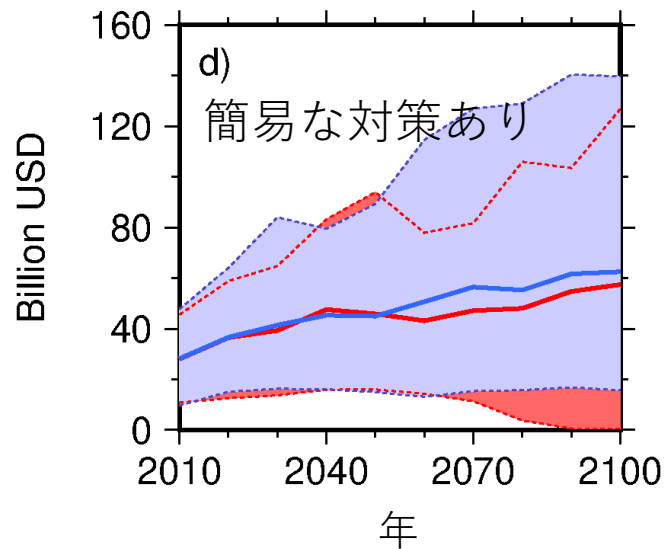
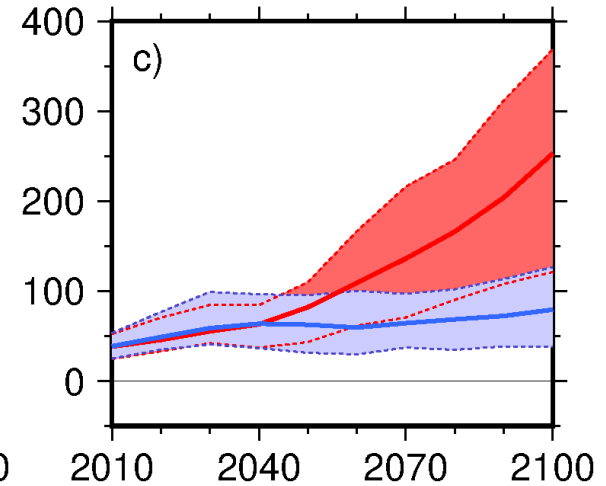
(i) 適応コスト



(ii) 残余被害



気候変動の総コスト (i)+(ii)



陰影は50シナリオ（5 GCMs x 5 SSPs x 2 生産コストモデル）から計算した90%信頼区間₁₁

生産被害額と適応コストの比較

単位：億ドル/年。ラウンドのため、和が一致しない場合がある。

シナリオ	2001-2010	2041-2050			2091-2100		
	気候変動の 総コスト	適応 コスト	残余 被害	気候変動の 総コスト	適応 コスト	残余 被害	気候変動の 総コスト
RCP2.6/SSP1 対応策あり	382-407	676	－ 25	651	935	－ 34	901
RCP2.6/SSP1 対応策なし		447	221	668	515	319	834
RCP8.5/SSP3 対応策なし		207	618	825	64	2254	2318
RCP8.5/SSP3 対応策あり		453	286	739	434	1660	2094

参考

- 過去30年間（1981-2010年）の気候変動による4穀物の生産被害は全世界で年間432億ドル（コメを除くと424億ドル）（Iizumi et al., 2018, IJC）
- 最大の農業気象災害である干ばつによる過去27年間（1983-2009年）の4穀物の生産被害は全世界で年間62億ドル（Kim et al., 2019, JAMC）

穀物生産における緩和と適応のコベネフィット

- 農地土壌への炭素貯留は気候変動の緩和策になる。
- 乾燥地の農業者にとって干ばつ耐性を高めることは、農地土壌への炭素貯留を推進する動機となる。
- 干ばつ耐性を高めることを目的に土壌炭素を増加させたとして、それによる緩和効果は 0.011°C 。
- 既に約 1°C 気温上昇しているので、昇温を 1.5°C 未満に留めようとする場合には、大きくはないが、一定の寄与。
- 緩和以外にも、土壌への炭素貯留は、農地の土壌劣化防止と乾燥地域の食料安全保障への寄与が期待できるため、複数のSDGsの達成に同時に資する方策といえる。
- プレスリリース(2020.02.06)。詳細は以下の論文を参照。

Iizumi T, Wagai R (2019) Leveraging drought risk reduction for sustainable food, soil and climate via soil organic carbon sequestration. Scientific Reports, 9:19744. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55835-y>

(1) 5年間の研究目標

① 新たな社会経済シナリオを考慮した 主要疾病の気候変動リスク評価

- 熱関連死亡
- 動物媒介感染症（マラリア）
- 低栄養
- 下痢
- 洪水

② 上記健康影響の費用効果分析

- 熱関連死亡ではテーマ4とも連携し、都市の影響(ヒートアイランド)も考慮できるよう改善する

(2) 5年間の成果

① 気候変動リスク評価

- 主要健康影響をRCP/SSPで再評価
- ヒートアイランドを含む熱関連死亡、マラリアについて実施、
- 洪水、下痢はWHOチーム、サブテーマ(1)で、低栄養はNIESで評価済み

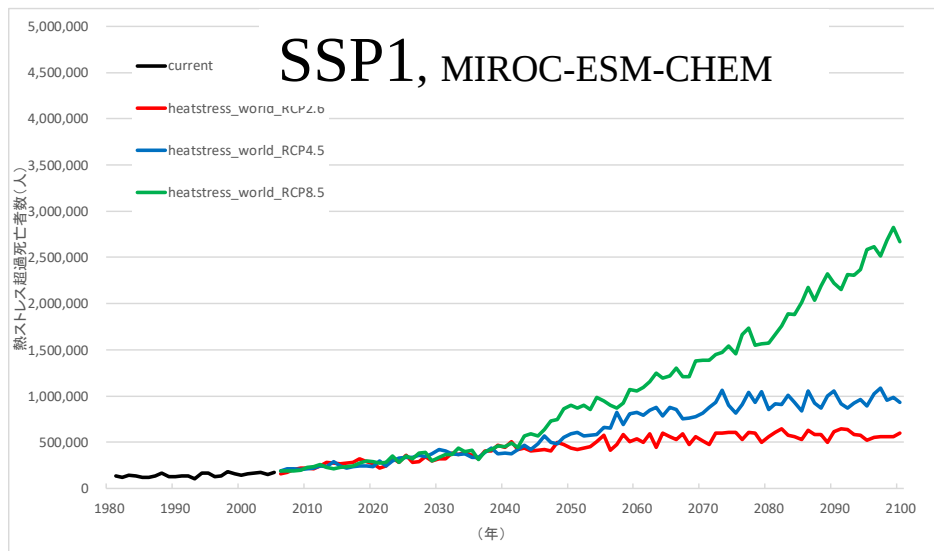
② 費用効果分析

- 過去の文献を収集、テーマ5に協力

③ 適応に関する検討を実施

- 熱中症に関して、夏の初めのリスクが大きいことを評価、複合災害(停電)の影響を評価
- 短寿命気候汚染物質低減による共便益の評価

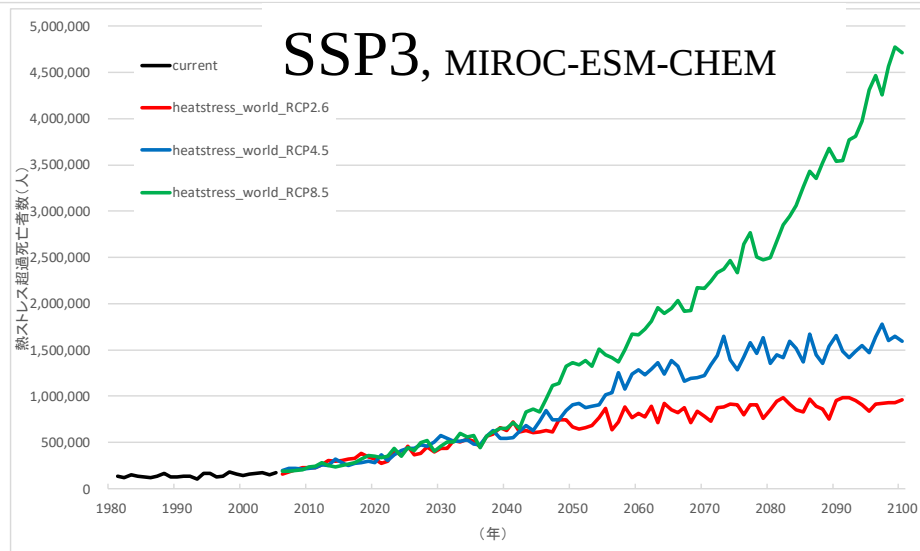
熱関連死亡



RCP8.5

RCP4.5

RCP2.6



RCP8.5

RCP4.5

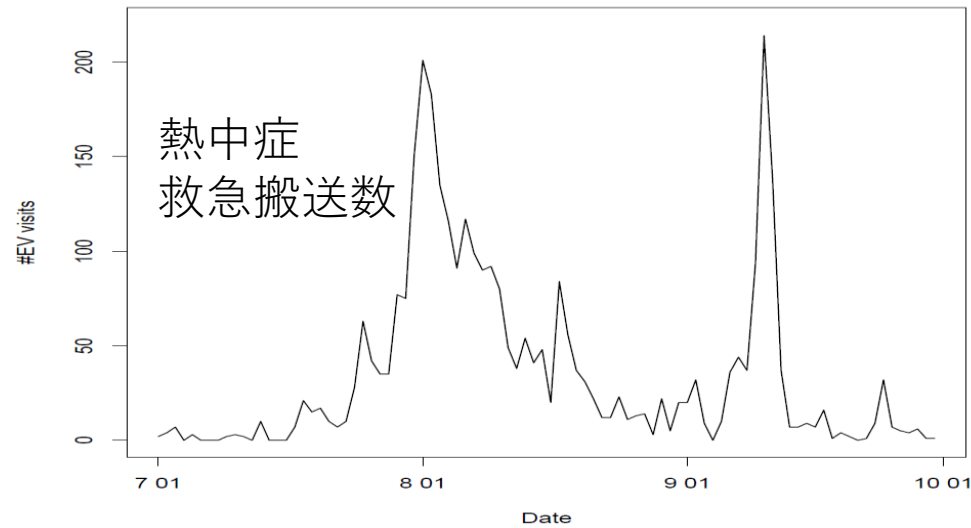
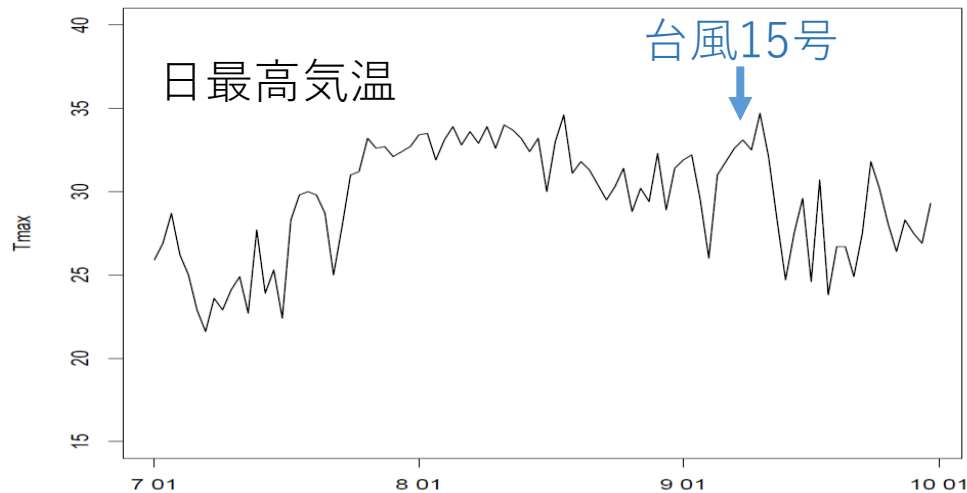
RCP2.6

MIROC-ESM-CHEMを含む7GCM, RCP2.6, 4.5, 8.5 * SSP1-3, 1980-2100について計算

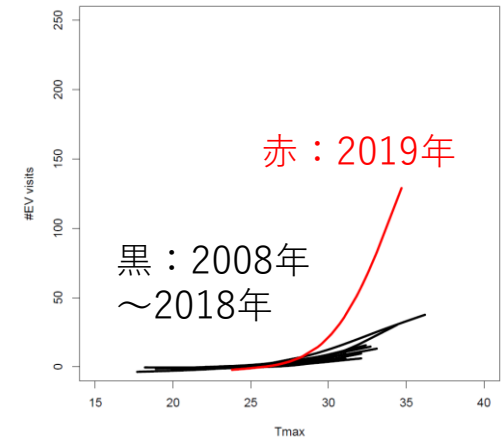
複合災害の影響

- ・ 台風15号による大規模停電直後の高気温

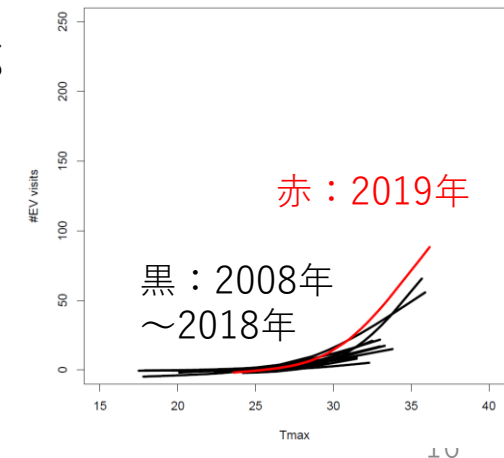
千葉県



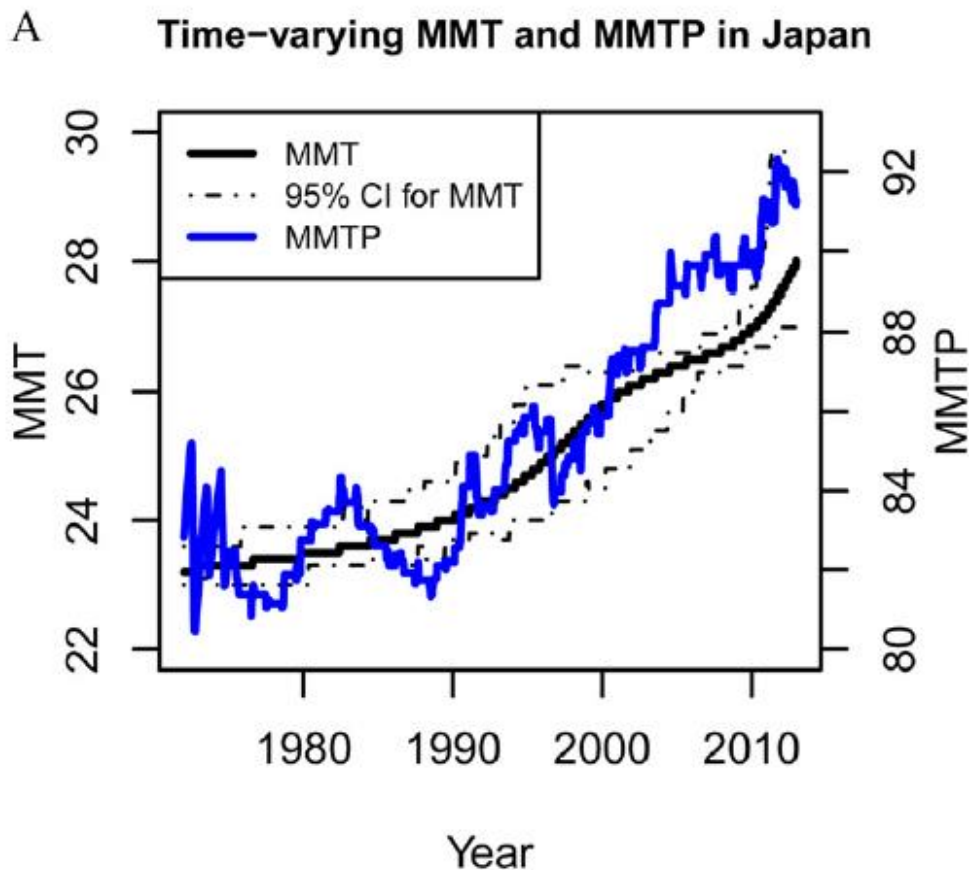
千葉県



東京都



至適気温の年次推移(日本)



MMT:至適気温
MMTP:至適気温の
パーセンタイル値

温暖化に伴って上昇
→ 国際共同研究へ

新たな社会経済シナリオを考慮した 主要疾病の気候変動リスク評価 (生涯調整生存年)

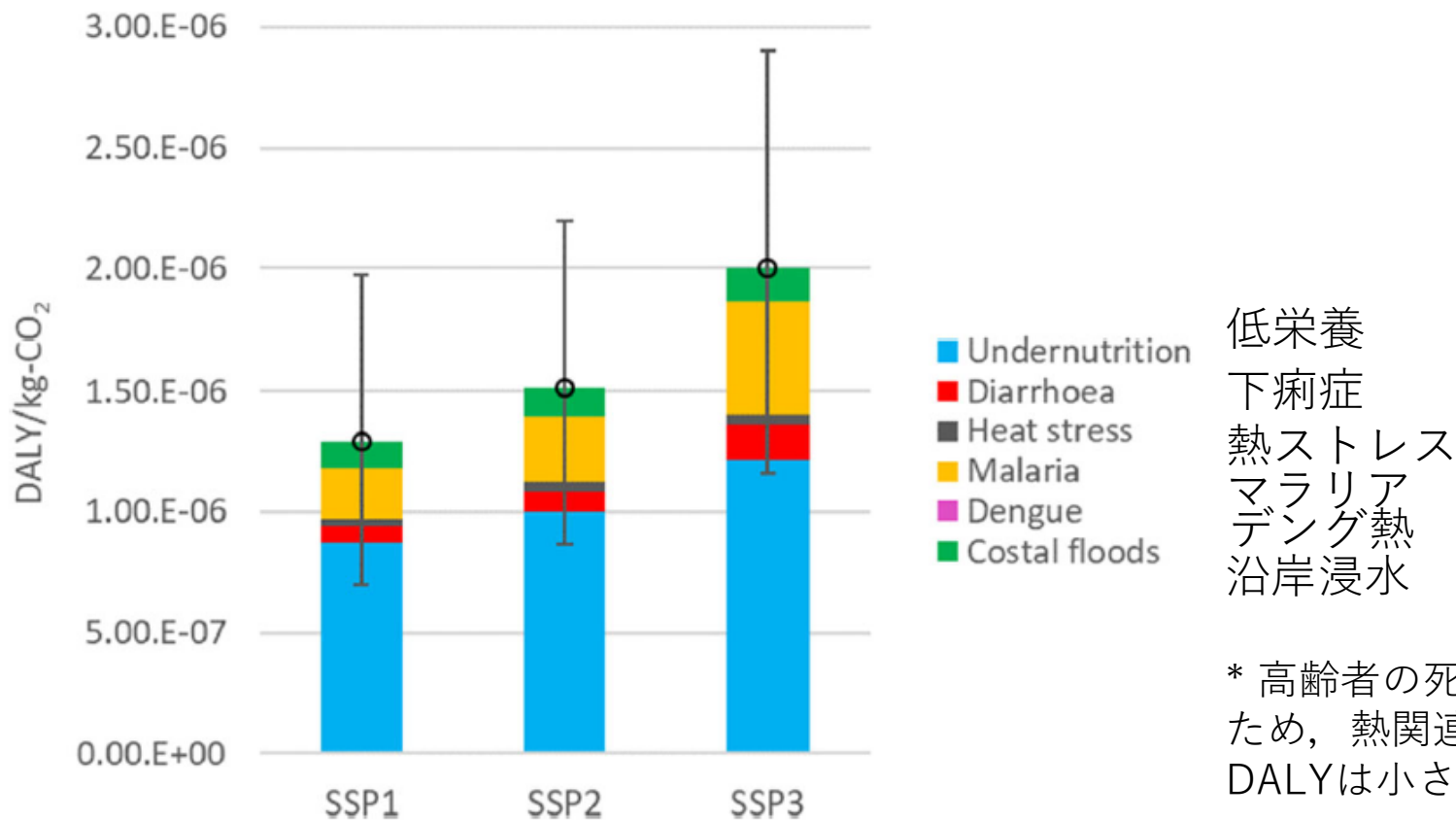
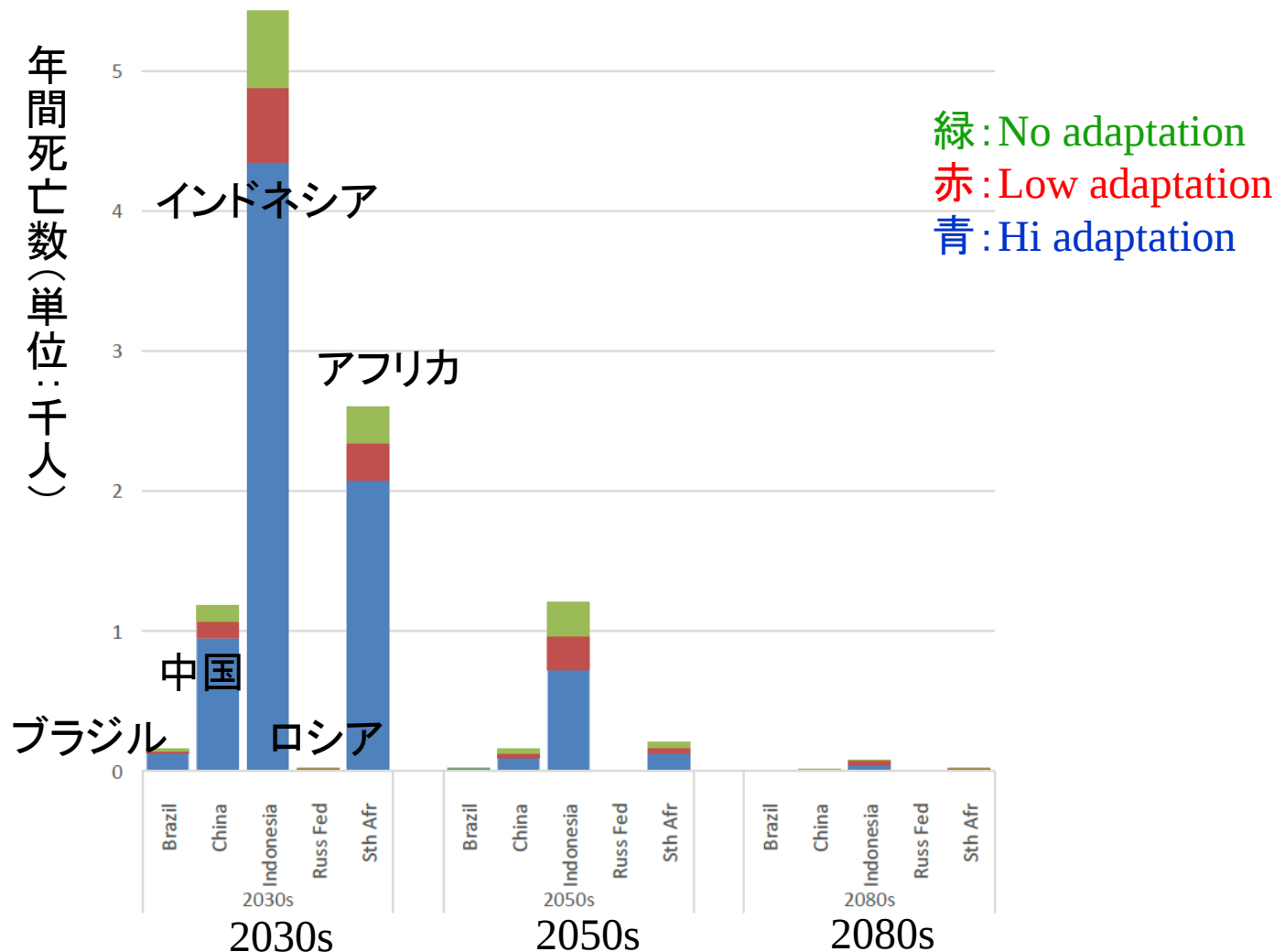


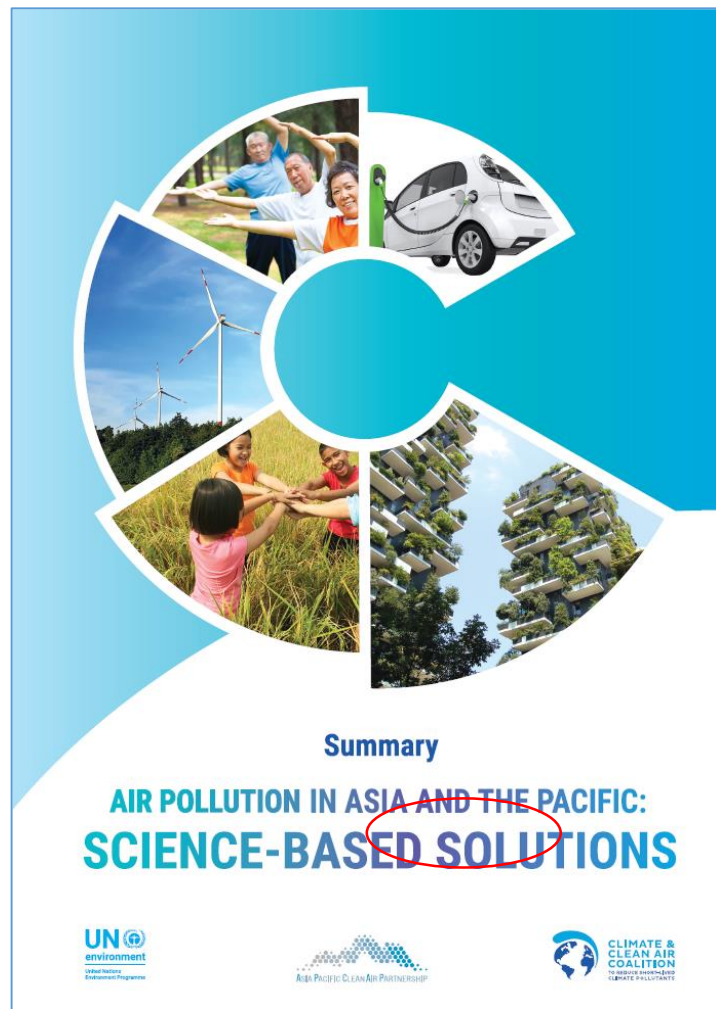
Fig. 3 Damage factors (with 90% confidence intervals) for each SSP scenario

適応に関する研究：下痢性疾患

15歳未満下痢性疾患死亡数(RCP8.5/SSP5)



短寿命気候汚染物質低減の共便益



化石燃料の燃焼

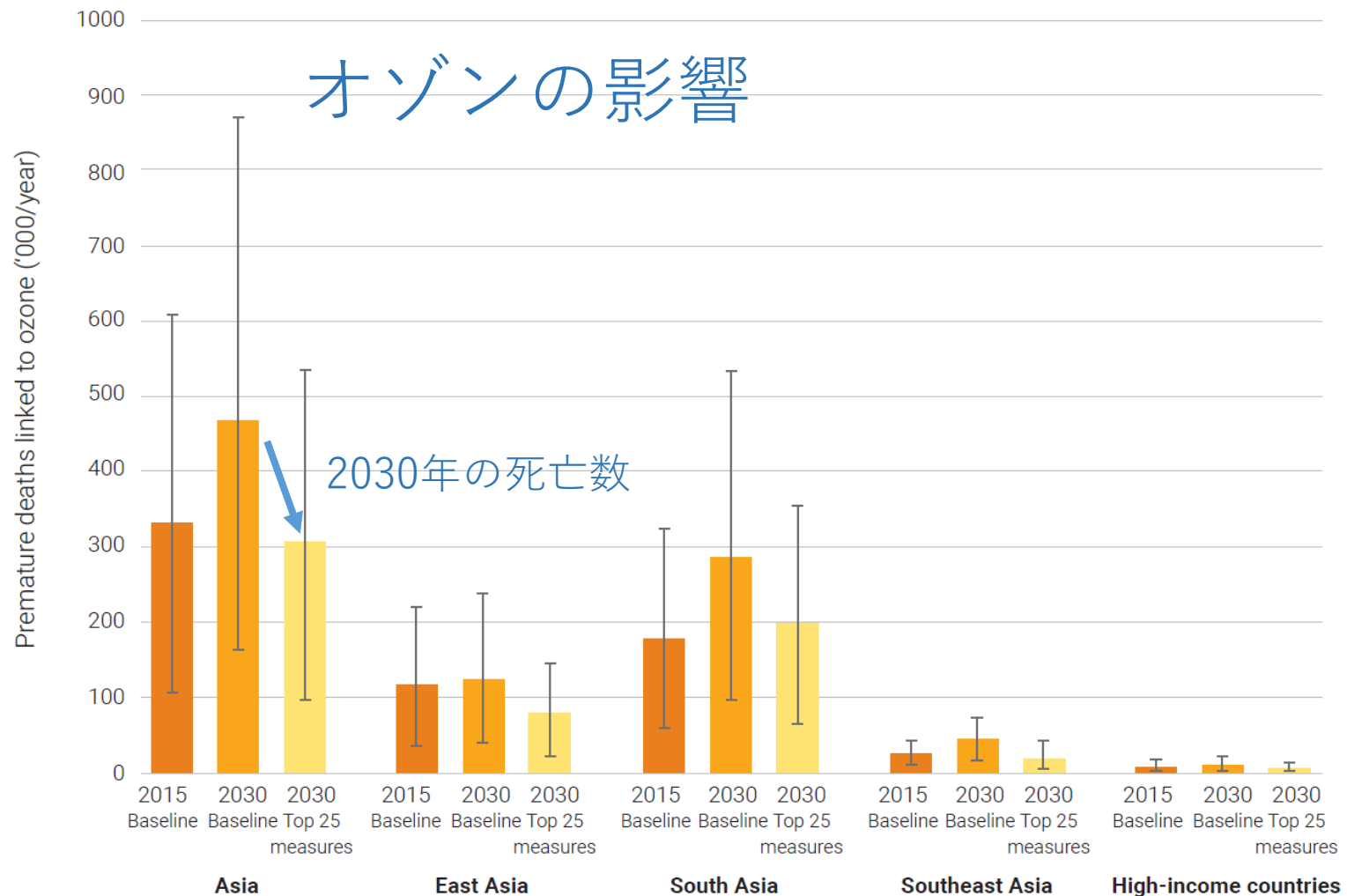


浮遊粒子状物質とオゾンの低減



大気汚染の死亡減少
農業にも好影響

オゾンの影響



┌ Mean and 95 per cent confidence intervals derived using O₃ concentrations from GISS and GEOS-Chem models

FIGURE 2.7: ESTIMATED NUMBER OF PREMATURE DEATHS ASSOCIATED WITH EXPOSURE TO OZONE IN 2015, AND IN 2030 FOR THE BASELINE AND THE TOP 25 CLEAN AIR MEASURES FOR THE MODELLED SUB-REGIONS OF ASIA

(1) 5年間の研究目標

① 影響評価モデル、費用便益分析の パイロットモデルの構築

- 防護に焦点を当てた影響評価モデルの構築
- 防護以外の適応シナリオの調査

② 沿岸域における脆弱性評価と費用 便益分析

③ 適応と緩和のベストミックス戦略の 提示

- 防護以外の複数の適応シナリオを考慮した分析
- テーマ3やS14他グループと連携し、科学的知見に基づく適応と緩和のベストミックス戦略を提示

(2) 5年間の成果

① 防護に焦点を当てた影響評価モデル・ 費用便益分析のパイロットモデルを構 築

- 全球規模の海面上昇に伴う浸水モデルの構築
- 沿岸防護策の費用データベースの構築
- 衛星画像からの堤防抽出手法の開発とデータベース化

② マングローブ、養浜等のグリーンインフ ラの費用効果分析

③ 沿岸域における脆弱性評価と費用 便益分析

- 全球の沿岸防護費用の推計。IPCC (2019) SROCCへの引用
- 他テーマ連携による統合的経済評価

5年間の主要な成果

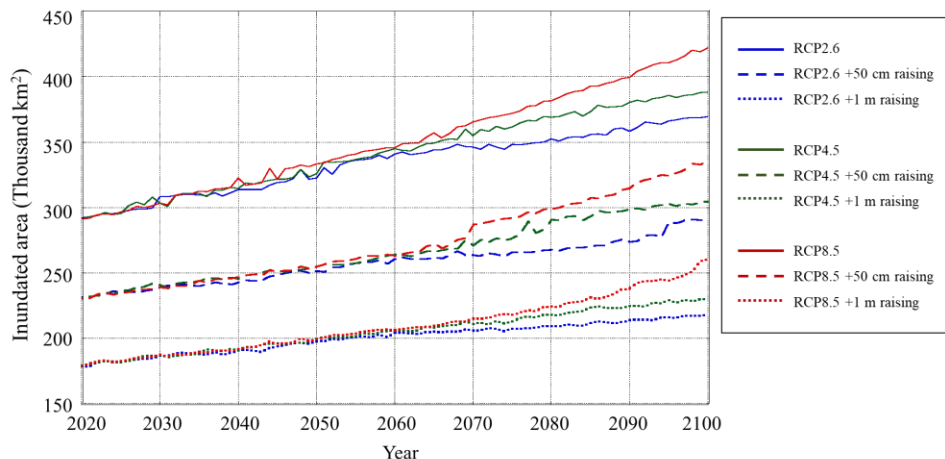
- ◆ **全球規模の海面上昇等の影響評価**
 - ◆ 海面上昇、潮汐の浸水影響推計手法を確立
 - ◆ MIROC-ESM(四栗他, 2017)=>マルチGCM化(土田他, 2018)
 - ◆ 治水経済マニュアル式推計とマクロ計量モデル式推計による被害額比較(箭内他, 2017)
 - ◆ 海岸線データの更新(土田他, 2019)
- ◆ **適応効果評価、適応策の費用便益分析**
 - ◆ 堤防の費用効果分析(all 新設 vs. all 嵩上げ)(Tamura et al., 2019)
 - ◆ **IPCC(2019)SROCC報告書第4章に引用**
 - ◆ マングローブの費用効果分析
 - ◆ S-14-2 NIES/TroCEPデータを利用
 - ◆ フィリピン、ベトナム(熊野他, 2018b; Kumano et al., 2019)、**全球評価**(熊野他, 2019)
- ◆ **全球堤防抽出支援手法を開発**(熊野他, 2018a; 箭内他, 2019)
 - ◆ S-14-2(5)へのデータ提供
- ◆ **堤防費用、被害額の計算結果を他班へ提供**
 - ◆ S-14-5 CGE班(Takakura et al., 2019; 西浦他, 2019; Nishiura et al. 2020)
 - ◆ S-14-1 LCA班

Tamura et al.(2019)

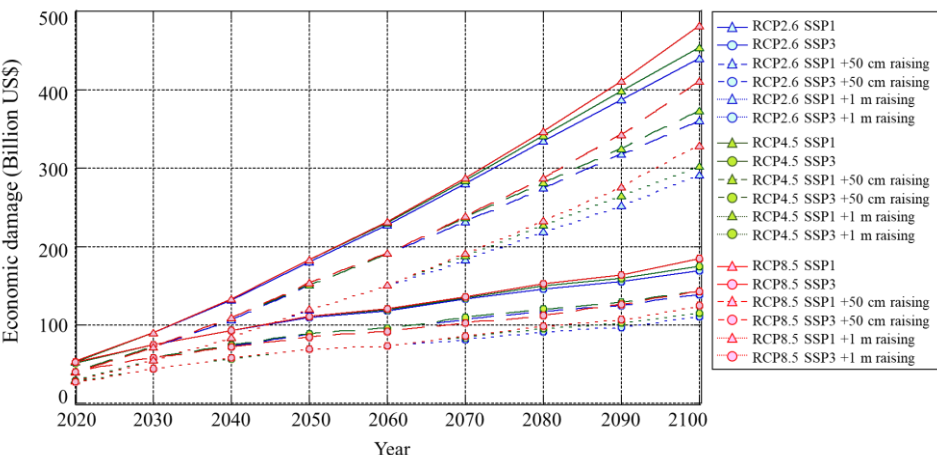
◆ 適応策＝堤防新設 or 嵩上げ のみを仮定

IPCC(2019)SROCC報告書
第4章に引用

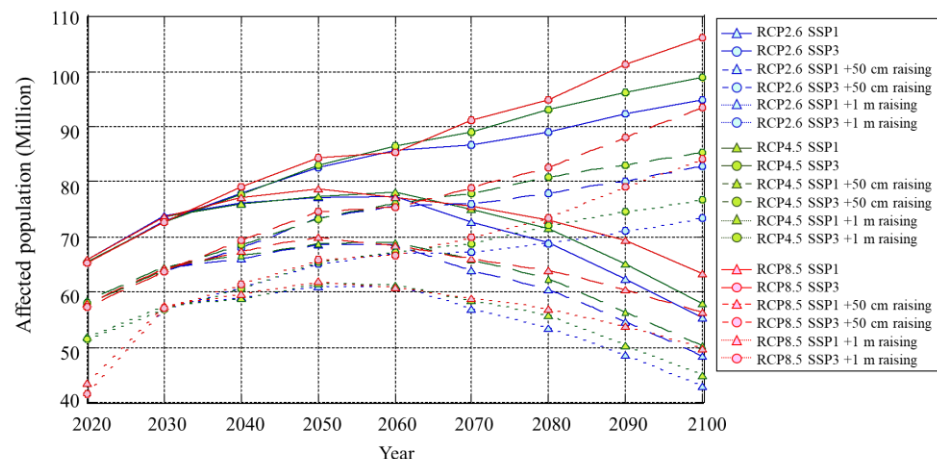
◆ 追加的適応費用＝ 浸水海岸線× 堤防・護岸単価＋管理費用



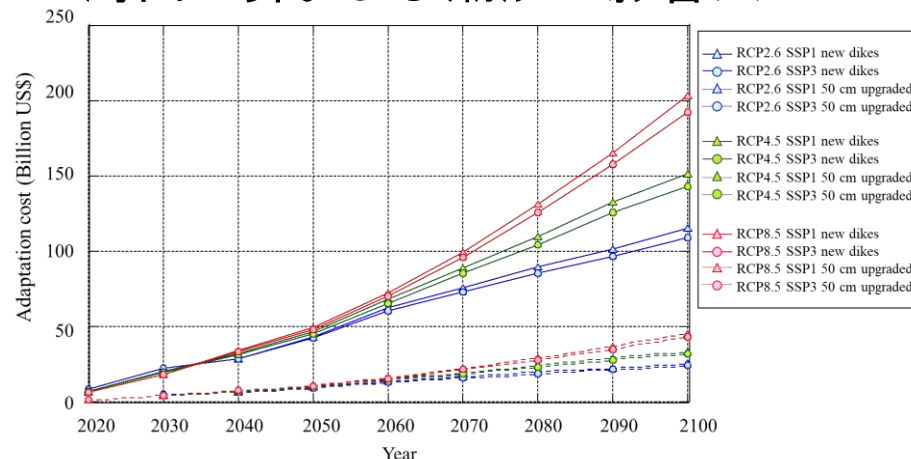
潜在的浸水面積



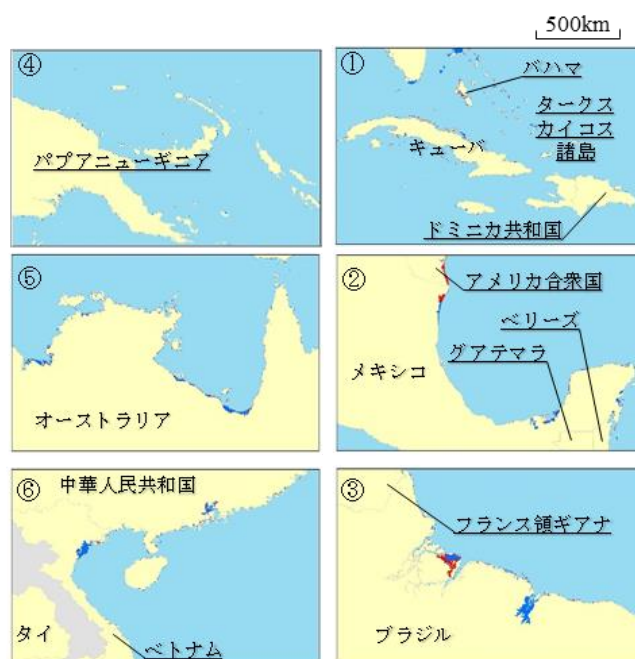
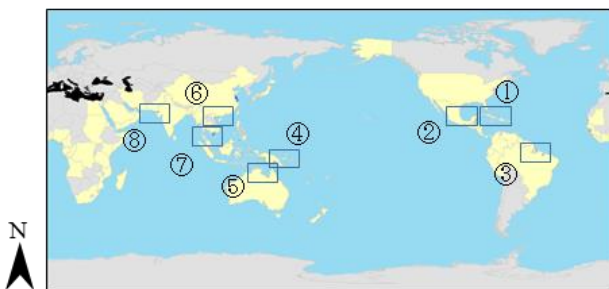
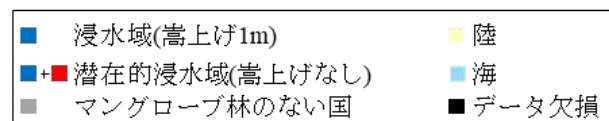
適応策の有無による全球被害額
(経済水準別推計)



海面上昇および潮汐の影響人口



追加的適応費用

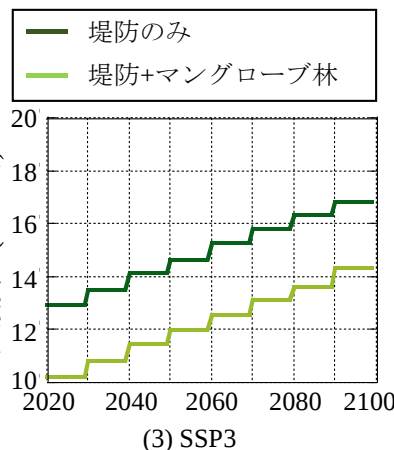
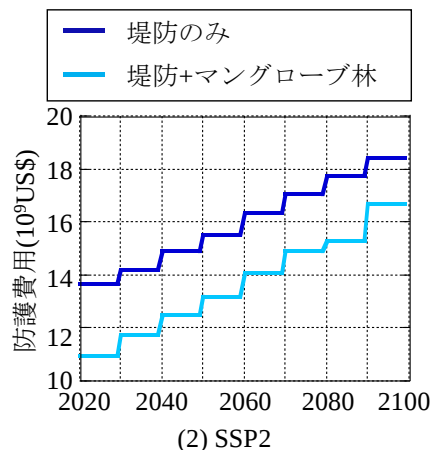
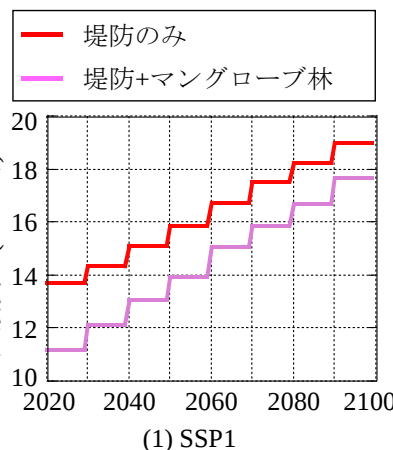


◆ 273の国と地域のうち
112の国と地域を対象
にする。

◆ SSP、UCARに基づき、
沿岸域の都市・地方
を同定し、堤防とマン
グローブ林で防護す
べき海岸線長の変化
量を求めた。

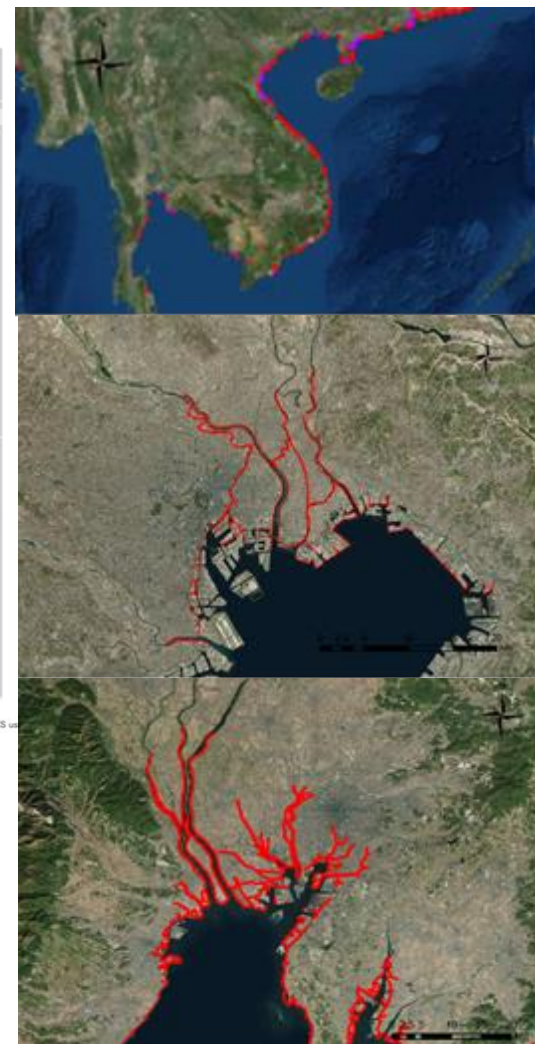
海面上昇による浸水域とマングローブ分布

適応シナリオ



	都市	地方
マングローブのない海岸	堤防	堤防
マングローブのある海岸	堤防	マングローブ

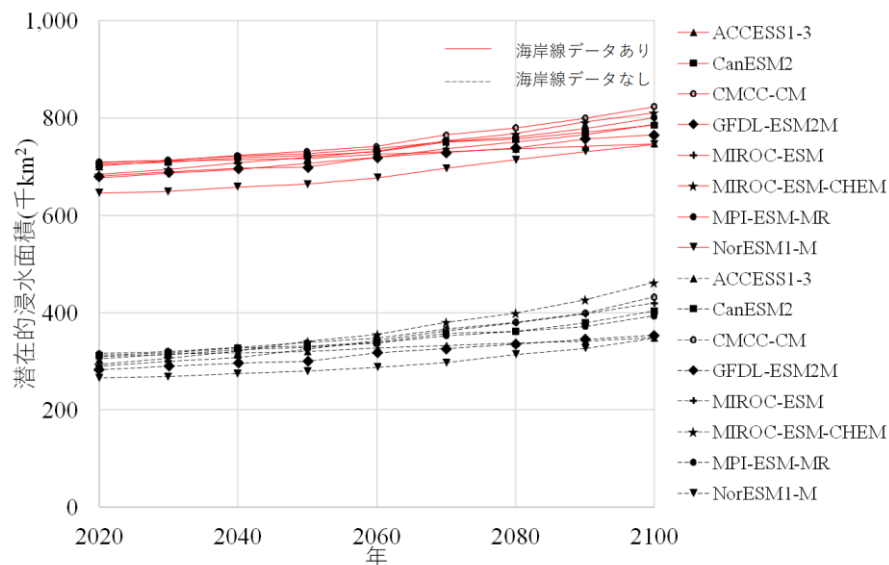
マングローブの分布する112の国・地域において1m嵩上げにかかる費用



◆ 熊野他(2018)で提案した堤防抽出手法を全球規模で適用

- ◆ DSM(AW3D, 30m)から作成した抽出支援情報
- ◆ 衛星画像からの目視判読
- ◆ 世界の海岸線の約8割完了(2019年4月現在)
- ◆ S-14-2(5)へデータ提供

全球データより抽出した堤防事例(ベトナム、日本)

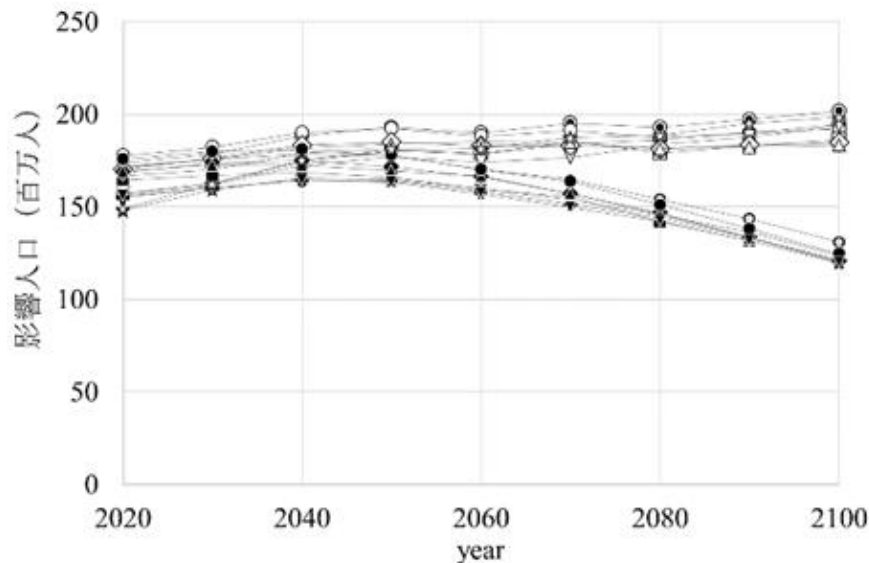


◆ 海岸線位置データの見直し

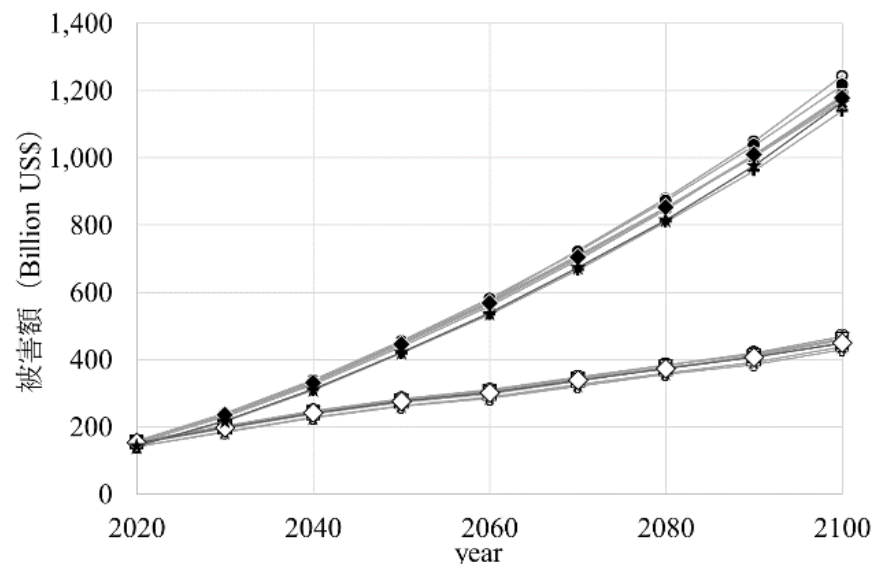
◆ ETOPO1=>標高<0の国境も考慮

◆ 「潜在的」浸水影響の増大

RCP8.5における浸水面積の経年変化

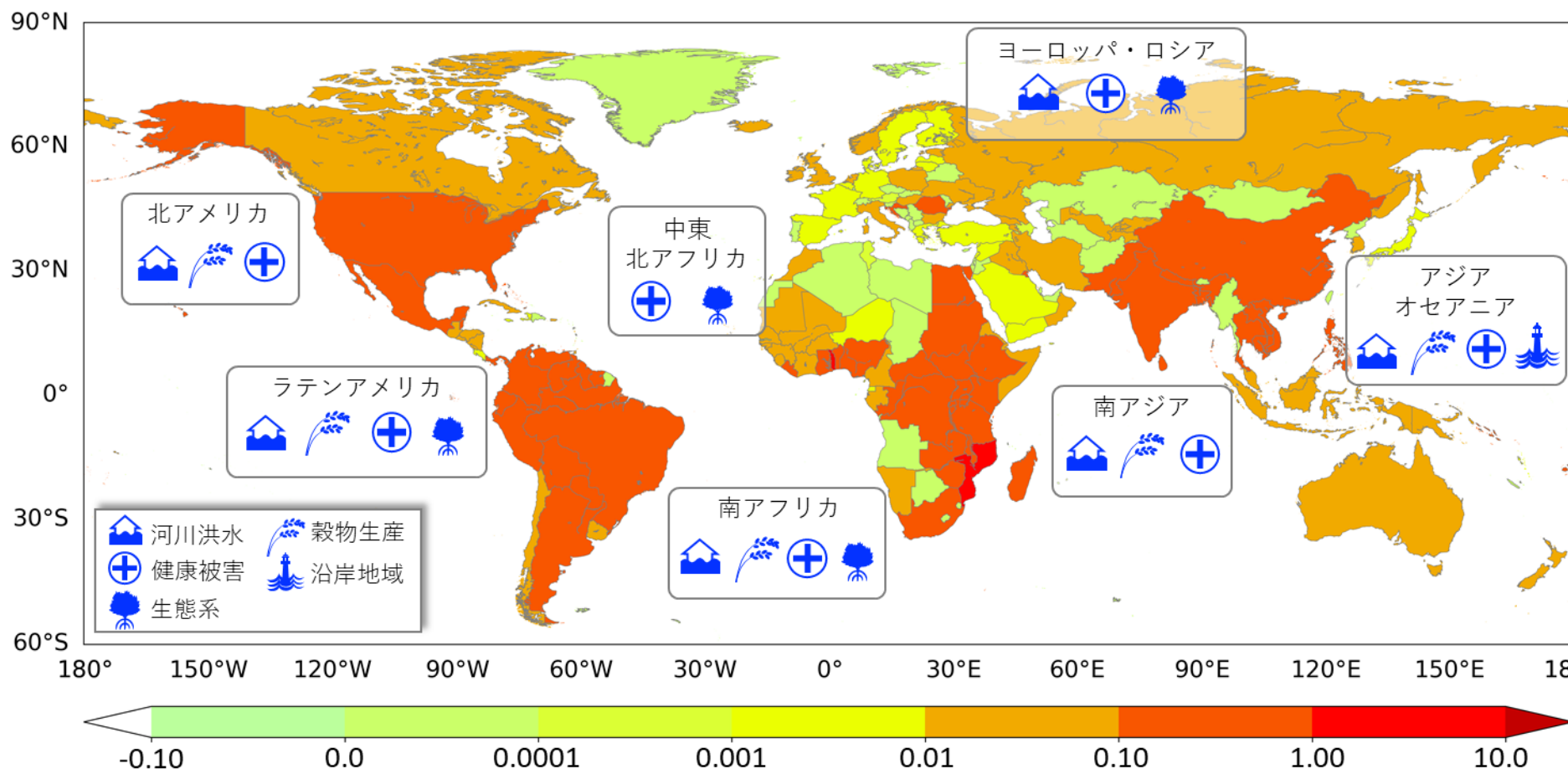


GCM	SSP1	SSP3	GCM	SSP1	SSP3
ACCESS1-3	▲	△	MIROC-ESM	+	+
CanESM2	■	□	MIROC-ESM-CHEM	★	☆
CMCC-CM	○	◎	MPI-ESM-MR	●	○
GFDL-ESM2M	◆	◇	NorESM1-M	▼	▽



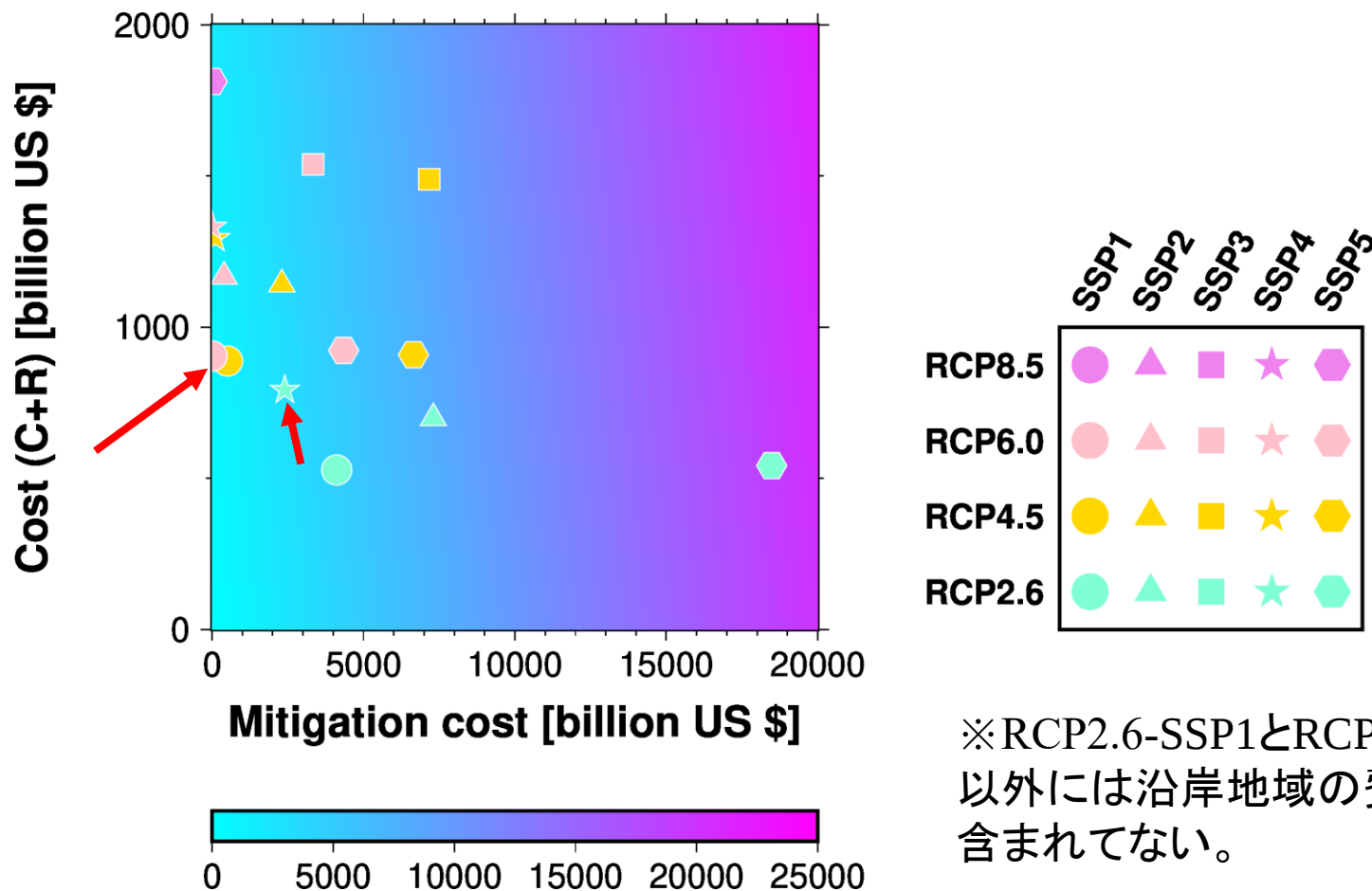
RCP8.5における影響人口、被害額の経年変化

適応を想定した場合における 気候影響のホットスポット



適応後も気候変動による被害が増加するセクター(アイコン)および極端シナリオ(RCP8.5/SSP3)下における河川洪水、穀物生産、沿岸地域分野の適応費用と残余被害の合計(GDP割合[%])

緩和費用と総費用(残余+適応)[割引率0%]



※RCP2.6-SSP1とRCP8.5-SSP3
以外には沿岸地域の費用が
含まれてない。

- SSP1(持続可能な社会)、RCP6.0(高位安定化)が最も経済的
- RCP2.6(低位安定化)を目指す場合はSSP4(分断社会)が経済的

S-14-3の成果のまとめ

- ◆ 気候・社会経済シナリオに対応した、主要セクターのグローバルな気候変動の影響(金銭換算)と適応費用を推計
 - ✓ 気候変動による被害は、現在気候では年平均6606億ドル
 - ✓ 河川洪水による被害(1432億ドル)、穀物生産の損失(424億ドル)、健康被害(4325億ドル)、沿岸浸水による被害(425億ドル)
 - ✓ 温暖化が進行した将来(2020～2100)は年平均で～7兆6399億ドル
 - ◆ 日本の年国家予算の1割(633～1115億ドル)を毎年適応策に投資すれば、将来増加する被害分のうち7680億ドル～1兆2845億ドルの被害を減らすことができる。
 - ◆ 温暖化が進むシナリオでは、適応策が適切に実施された場合でも年平均494～1647億ドルに相当する残余被害が出る(健康以外の合計)。ul> - ✓ 洪水や沿岸浸水が増加するアジア、穀物収量への温暖化の影響が大きい低緯度熱帯地域に加え、ヨーロッパ、アフリカ、アメリカなどで生態系に深刻な影響が予想される
- ◆ グリーンインフラなど他の適応オプションの評価(沿岸地域)、共便益(コベネフィット)の定量化(穀物生産、健康)も実施
- ◆ テーマ3のみの適応費用と緩和費用との簡易的な比較も実施

これまでの研究業績

(2020年5月末まで)

- ◆査読付き論文(78本)
- ◆査読なし論文(14本)
- ◆著書(5冊)
- ◆口頭発表(120件)
- ◆マスコミなどの報道(14本)
- ◆「国民との科学・技術対話の実施」(18件)

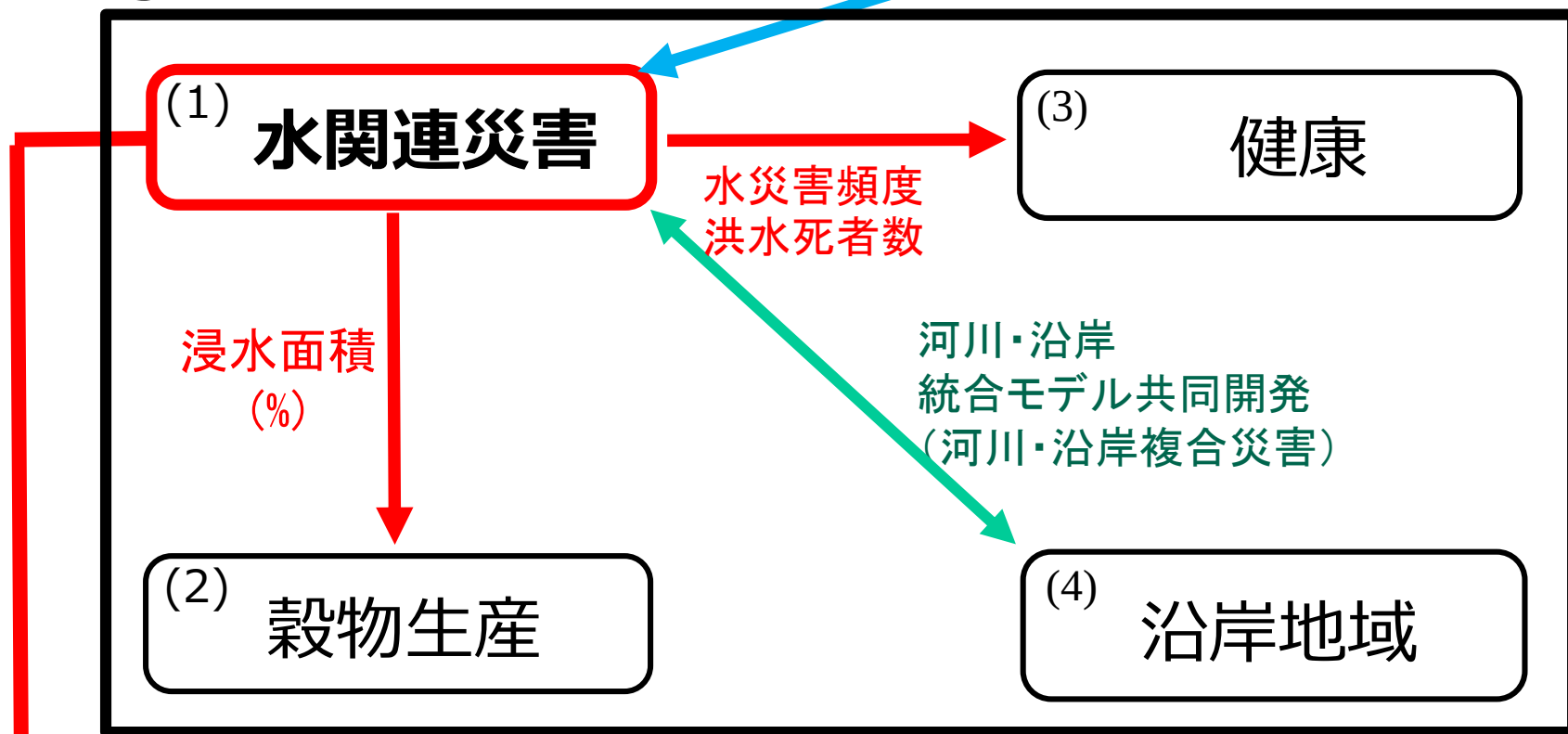
サブテーマ3-(1): 水関連災害

検証・比較用のデータ
(被害額、適応費用)

アジア・メガシティ

S-14-4

S-14-3



RCP・SSPごとの
被害額、適応費用、残余被害の
将来推計値

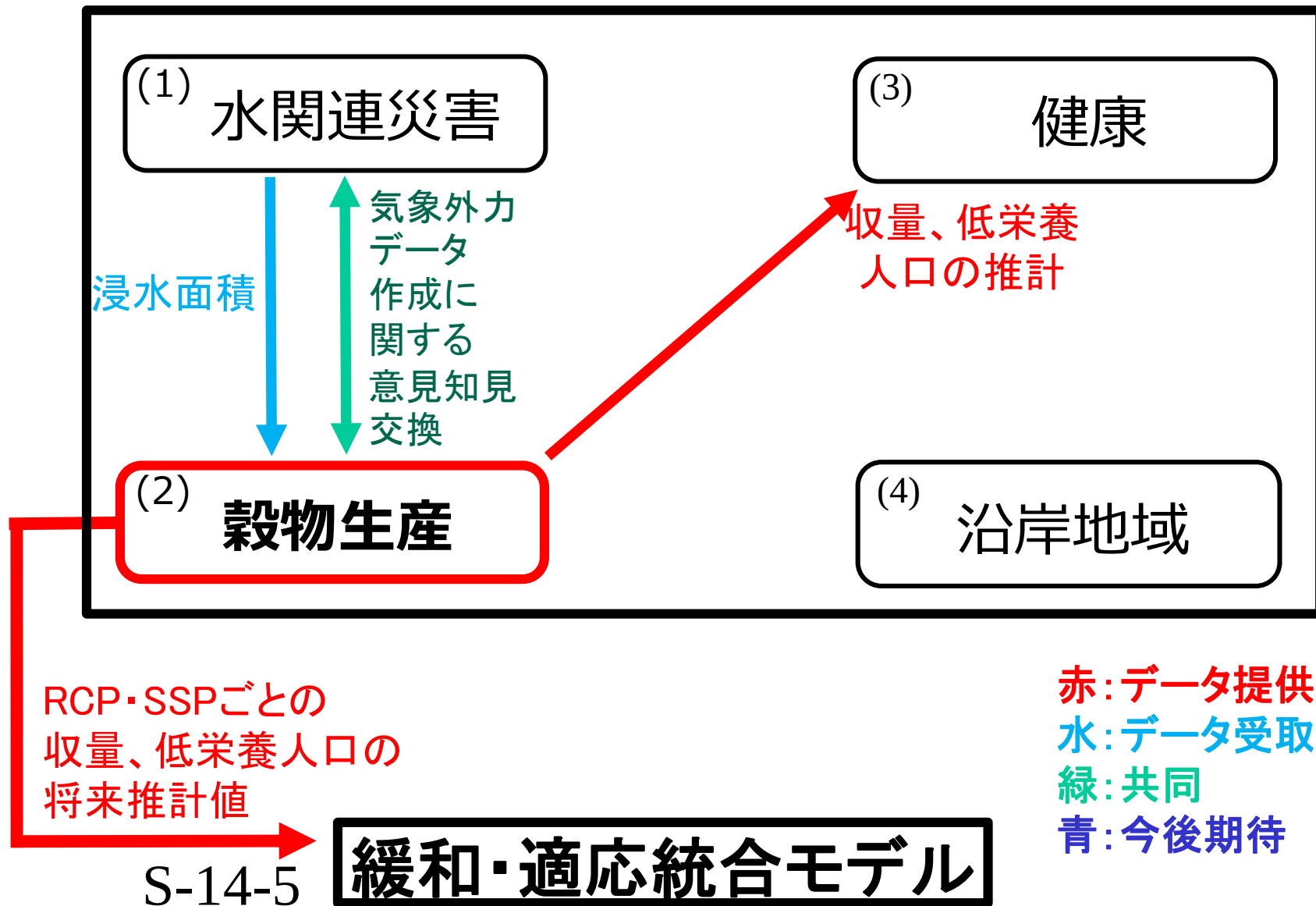
S-14-5

緩和・適応統合モデル

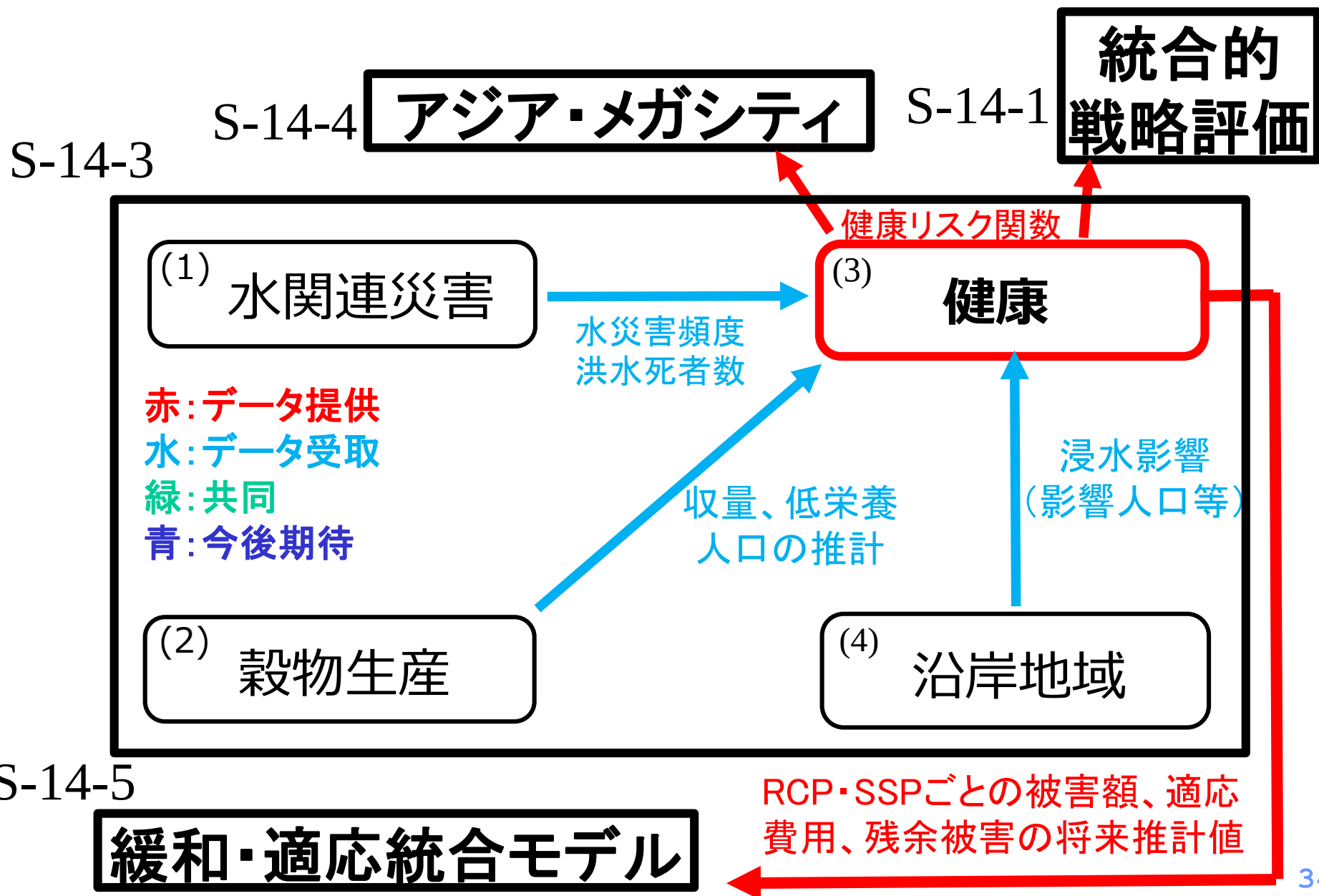
赤: データ提供
水: データ受取
緑: 共同
青: 今後期待

サブテーマ3-(2): 穀物生産

S-14-3

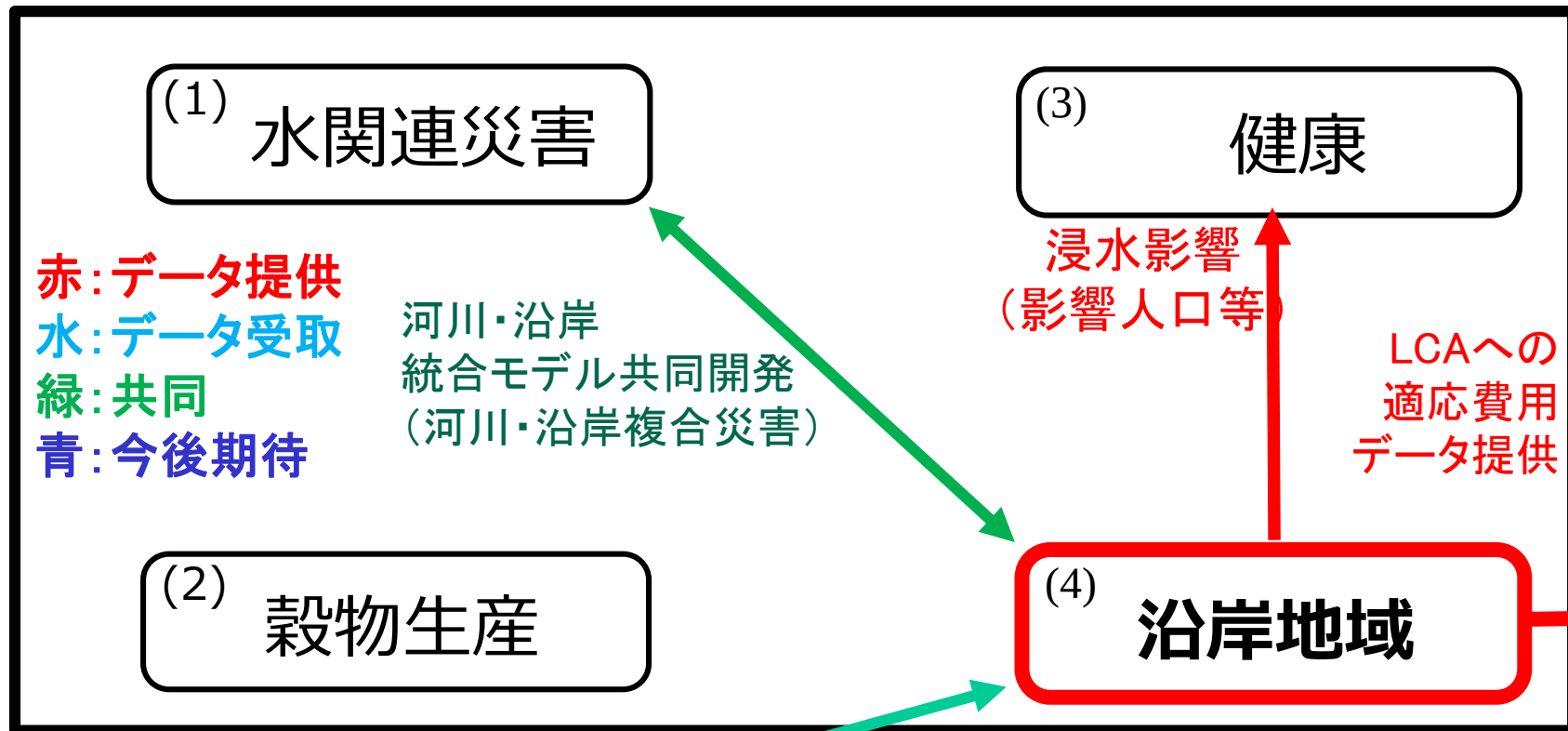


サブテーマ3-(3): 健康



S-14-3

S-14-1



S-14-2

生態系サービス

堤防・護岸、マングローブデータ
の共有
沿岸域適応策の共同提言

RCP・SSPごとの
浸水被害額、適応費用の
将来推計値

S-14-5

緩和・適応統合モデル

各セクターごとの内訳

Sector	割引率	被害	便益	適応費用	残余被害
		[億ドル/年]	[億ドル/年]	[億ドル/年]	[億ドル/年]
水関連災害	0%	28,984	7,370	316	754
穀物生産	0%	1171	300	300	871
健康	0%	46,212	13,864	0	28,025
沿岸地域	0%	31	10	17	21
水関連災害	5%	4,735	551	93	153
穀物生産	5%	185	84	84	101
健康	5%	5,545	1,663	0	612
沿岸地域	5%	7	2	4	5

洪水の推計：終了報告書

表4.1.1(割引率5%)

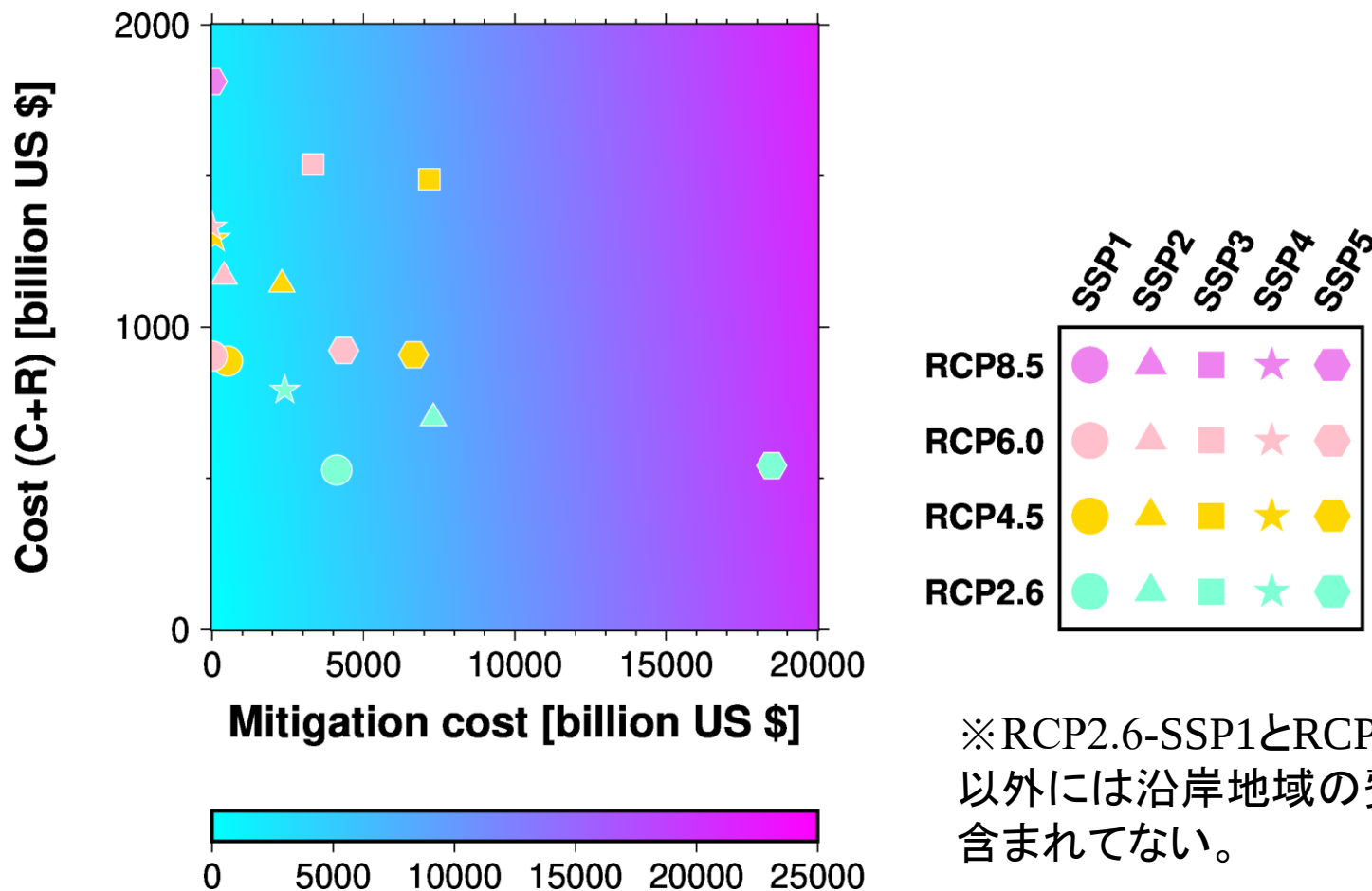
適応目標	RCP	SSP	便益 [億ドル/年]	適応費用 [億ドル/年]	残余被害 [億ドル/年]	B-C [億ドル/年]
適応なし	rcp85	SSP5	0	0	988	0
適応なし	rcp60	SSP3	0	0	353	0
適応なし	rcp45	SSP2	0	0	443	0
適応なし	rcp26	SSP1	0	0	543	0
適応あり	rcp85	SSP5	1,463	153	257	1,310
適応あり	rcp60	SSP3	463	87	131	376
適応あり	rcp45	SSP2	845	122	103	723
適応あり	rcp26	SSP1	941	142	167	799

洪水の推計：終了報告書

表4.1.1（割引率0%にした場合）

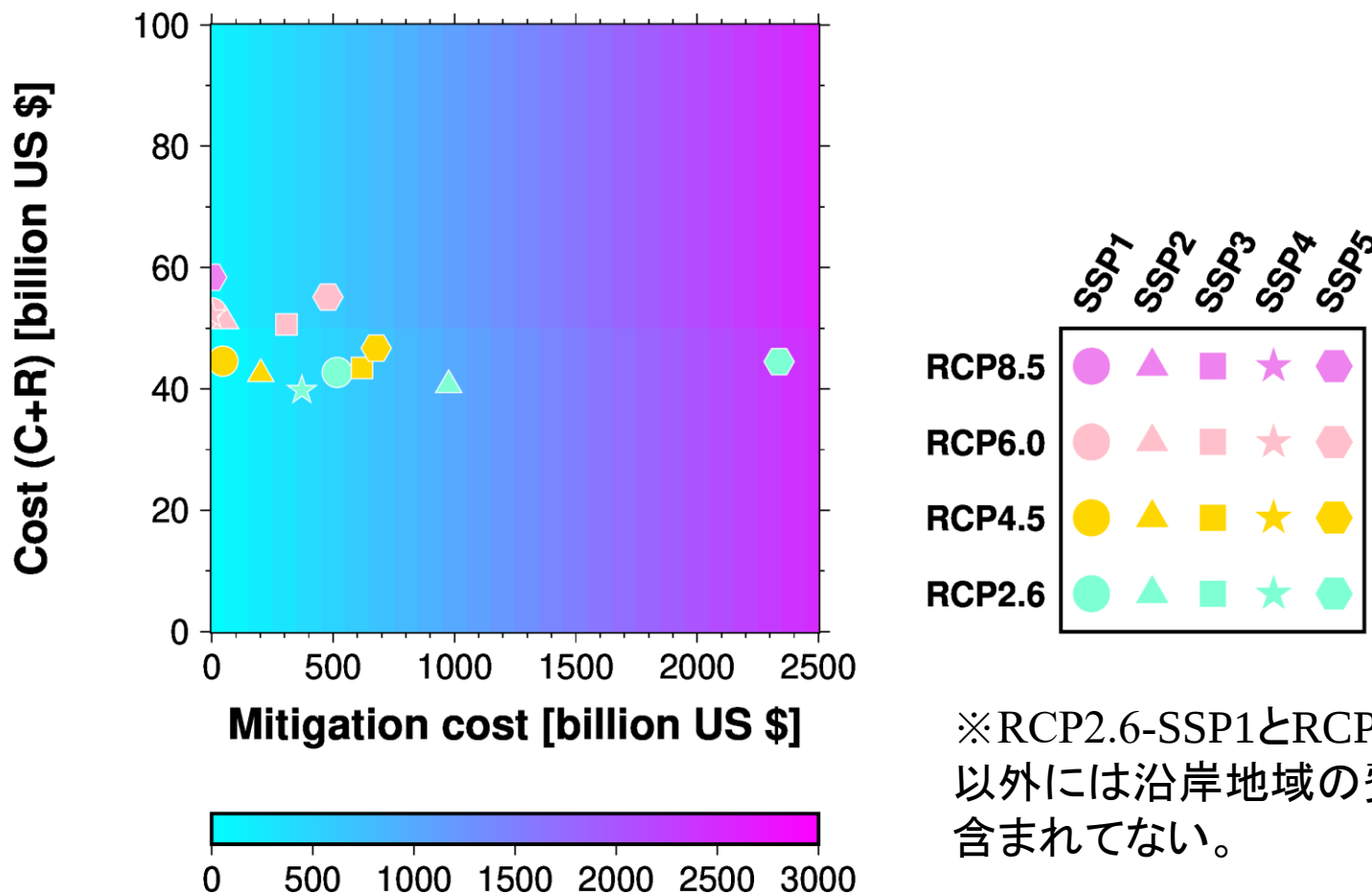
適応目標	RCP	SSP	便益 [億ドル/年]	適応費用 [億ドル/年]	残余被害 [億ドル/年]	B-C [億ドル/年]
適応なし	rcp85	SSP5	0	0	13,436	0
適応なし	rcp60	SSP3	0	0	3,321	0
適応なし	rcp45	SSP2	0	0	5,940	0
適応なし	rcp26	SSP1	0	0	4,771	0
適応あり	rcp85	SSP5	21,141	468	1,828	20,672
適応あり	rcp60	SSP3	6,369	316	350	6,053
適応あり	rcp45	SSP2	11,810	410	528	11,400
適応あり	rcp26	SSP1	12,196	460	382	11,736

緩和費用と総費用(残余+適応)[割引率0%]



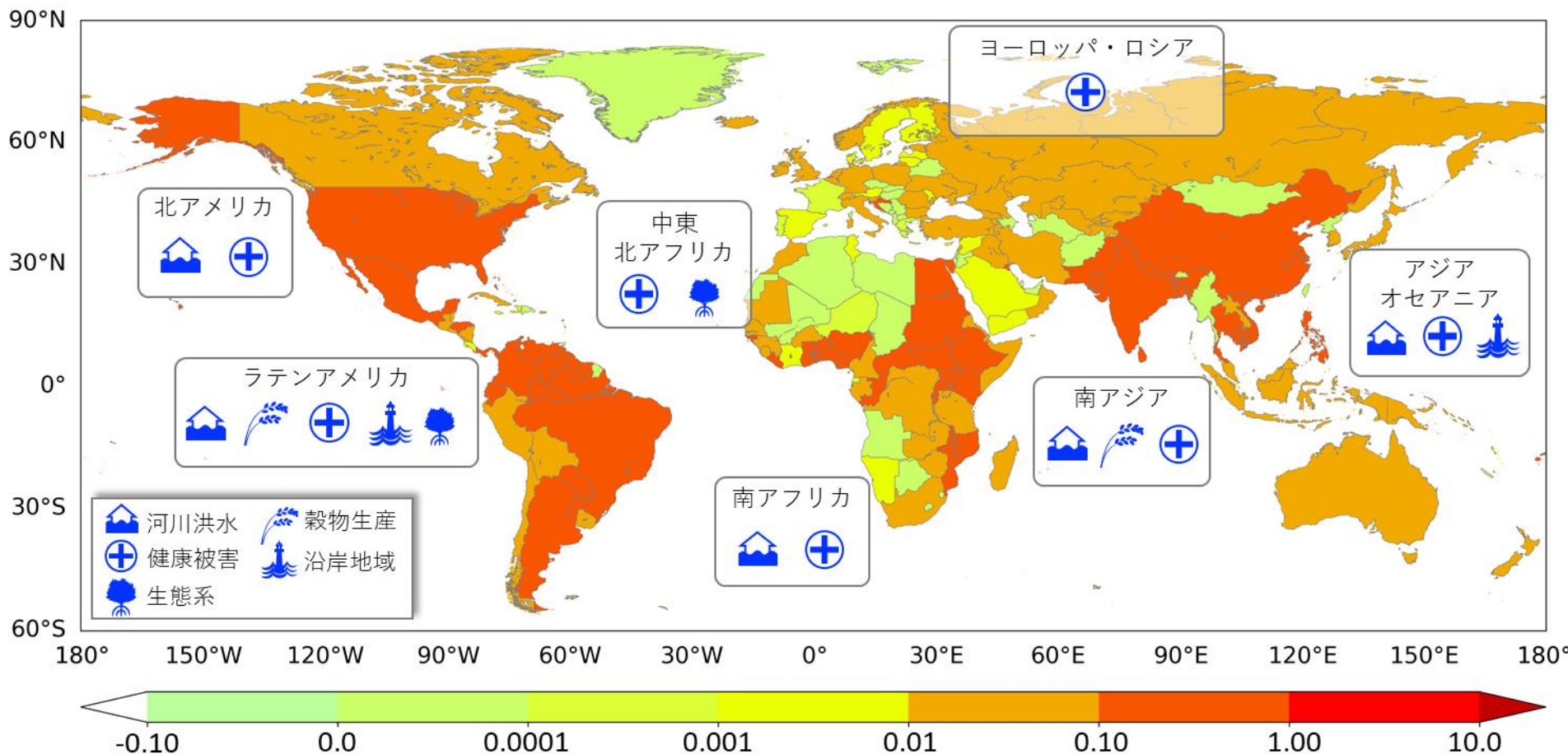
- SSP1(持続可能な社会)、RCP6.0(高位安定化)が最も経済的
- RCP2.6(低位安定化)を目指す場合はSSP4(分断社会)が経済的

緩和費用と総費用(残余+適応)[割引率5%]



- SSP1(持続可能な社会)、RCP4.5&RCP6.0が最も経済的
- RCP2.6(低位安定化)を目指す場合はSSP4(分断社会)が経済的

適応を想定した場合における 気候影響のホットスポット



適応後も気候変動による被害が増加するセクター(アイコン)および極端シナリオ(RCP2.6/SSP1)下における河川洪水、穀物生産、沿岸地域分野の適応費用と残余被害の合計(GDP割合[%])