

熱中症の適応政策のデザインと評価 について

環境研究総合推進費戦略的課題S-18

「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」
(研究代表者・三村信男) の成果の一部より

統計的な手法によるデータ・ドリブンな気候変動影響予測手法の開発と適応効果の解析

京都大学

KYOTO UNIVERSITY

西浦博



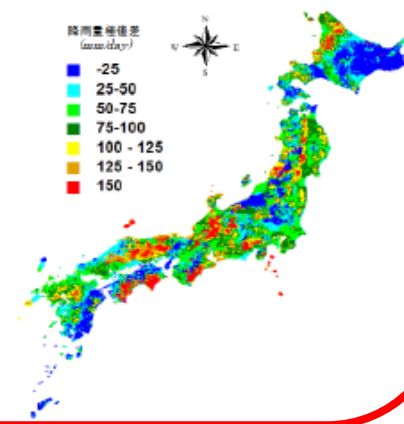
研究目標

【全体目標】

我が国の気候変動適応を支援する影響予測・適応評価に関する最新の科学的情報を創出する（2025年影響評価報告書への貢献など）

影響予測・適応評価

- ① 統一的な全国レベルの影響予測
- ② 自治体の適応計画検討に資する高解像度の影響予測
- ③ 適応策の効果の評価
- ④ 分野ごとに脆弱な地域の抽出、地域毎の影響特性の把握
(拡充) COVID-19と気候変動、緩和策と適応策の関係



連携・交流・発信

- ⑤ IPCC、パリ協定などへの国際的貢献
- ⑥ 他のプロジェクトとの研究交流。気候変動影響の全体像の提示
- ⑦ 民間企業、NGO、マスコミなどとの情報交換

社会への提言

- ⑧ 気候変動に対してresilient(強靱)な社会の在り方に向けた提言

影響予測・評価に用いる条件

① 温暖化レベル
高中低の3段階
RCP 8.5, 4.5, 2.6

② 気候シナリオ
GCM 1～5種類

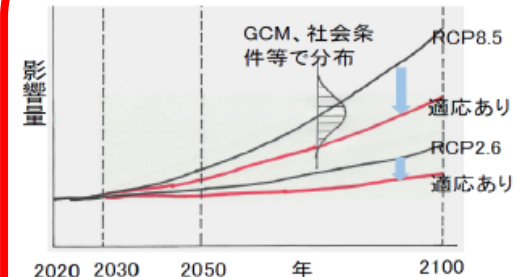
③ 社会経済シナリオ
現状固定
日本版SSP1, 5

④ 適応条件
適応なし／あり

影響予測・適応評価の出力

- ① 影響の統一的全国評価
 - ・空間: 3次メッシュ (1km × 1km)
または 市町村/都道府県
 - ・期間: 2020～2100年の年変化
- ② 影響の地域特性／特に脆弱な地域
- ③ 適応策の効果の評価
- ④ 影響及び適応策の経済評価
- ⑤ 気候変動対応策に関する提言

成果のイメージ

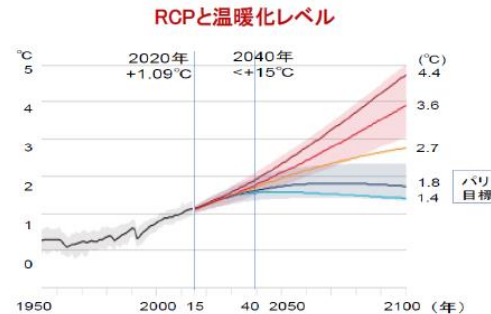


タイムスライス：2030、2050、2090年

共通シナリオの設定

評価の目標

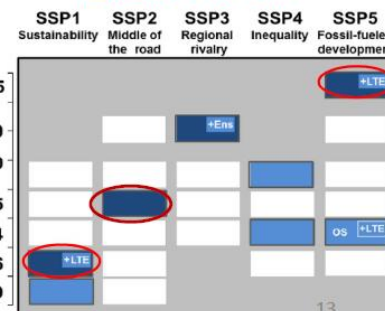
- ① 温暖化レベルに対応した評価
- ② 気候変動と社会変化（人口、世帯数、土地利用）の相乗的影響を考慮した評価
- ③ 人口減少・高齢化との相乗影響



評価の基本6ケース

- ① RCP8.5、4.5、2.6
× 社会条件を現状固定
- ② RCP8.5-SSP5（高排出・高成長社会）
RCP4.5-SSP2（中庸的社会）
RCP2.6-SSP1（持続可能社会）
- ③ 高い人口減少・高齢化の影響を見る追加的ケース（SSP3）

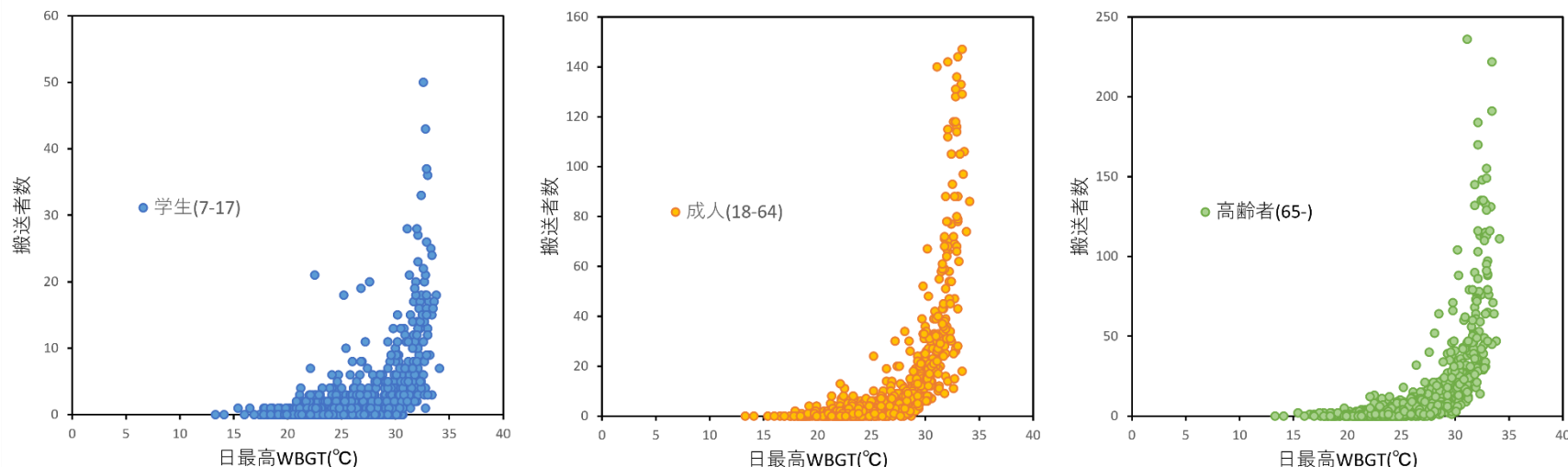
社会経済シナリオ(SSP)



熱中症に関するS-18の研究

i. 予測モデルの検討

東京都における熱中症発症者と日最高WBGTとの関係(2015－19年)



日本域通常観測気象要素を用いたWBGT推定式

$$T_{WBGT} = 0.735 \times T_a + 0.0374 \times RH + 0.00292 \times T_a \times RH + 7.619 \times SR - 4.557 \times SR^2 - 0.0572 \times WS - 4.064$$

Ono et al.(2014)

日本域バイアス補正気候シナリオデータ

日最低・**最高**・平均気温、降水量、全天日射量、下向き長波放射
風速、相対湿度

We consistently used the following formula to calculate the WBGT from readily available climatological data (Ono & Tonouchi, 2014):

$$T_{WBGT} = 0.735 \times T_{asmax} + 0.0374 \times RH + 0.00292 \times T_{asmax} \times RH + 7.619 \times SR - 4.557 \times SR^2 - 0.0572 \times WS - 4.064 \quad (4)$$

東京都における熱中症搬送件数とWBGT

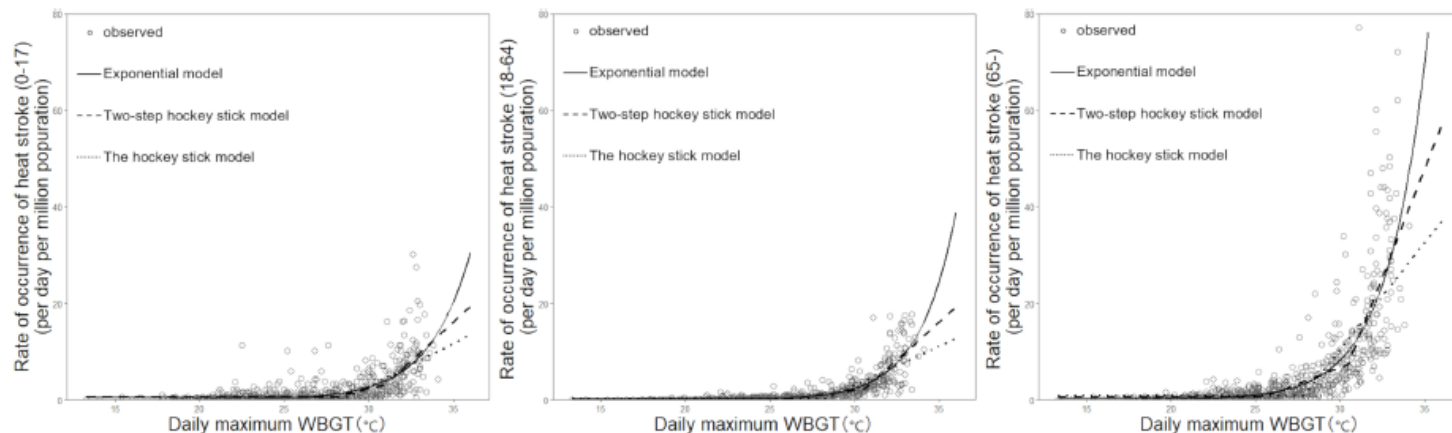

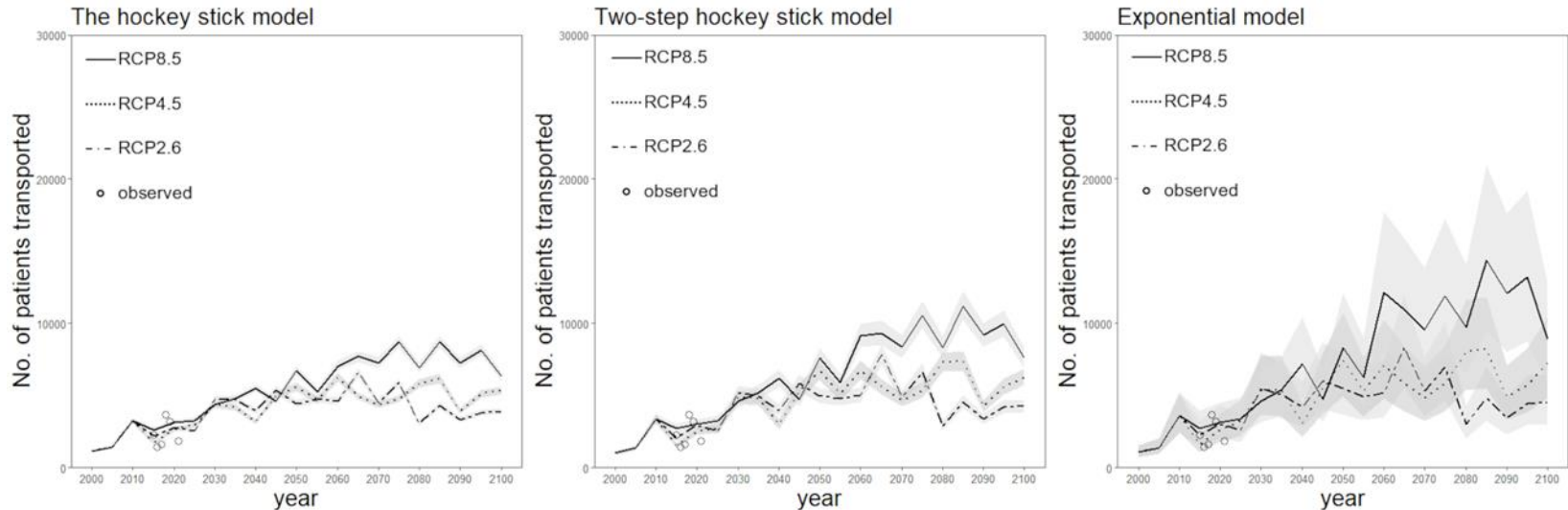


Figure 1 The risk of heat-related ambulance transportations as a function of wet-bulb globe temperature (WBGT): a comparison between observed and predicted data. The vertical axis is the number of cases per million population per day, and the horizontal axis is the daily maximum WBGT. The left, middle, and right panels show the age groups 0–17 years, 18–64 years, and 65 years or older, respectively. White circles represent observed values, solid lines show the exponential model, long dashed lines show the two-step hockey stick model, and dotted lines show the one-step hockey stick model.

Full-size  DOI: [10.7717/peerj.13838/fig-1](https://doi.org/10.7717/peerj.13838/fig-1)

i. 予測モデルを利用したシナリオ

(over 65 y.o.)



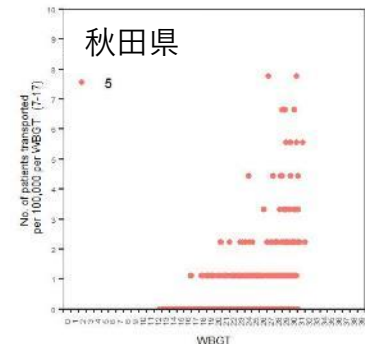
	The hockey stick model				Two-step hockey stick model						Exponential model			
Age	AIC	T_w	β_1	β_2	AIC	T_{w1}	T_{w2}	β_1	β_2	β_3	AIC	T_w	r	β_1
0-17 years	2493.8	28.8	0.6	1.8	2467.3	28.0	30.8	0.6	0.8	3.0	2456.0	25.7	0.4	0.5
95%CI		(28.6-29.0)	(0.55-0.67)	(1.62-1.97)		(27.6-28.4)	(30.4-31.1)	(0.53-0.64)	(0.58-1.04)	(2.40-3.54)		(25.1-26.3)	(0.37-0.45)	(0.38-0.54)
18-64 years	1747.0	28.4	0.3	1.6	1650.8	26.1	30.6	0.2	0.5	3.1	1630.3	23.7	0.5	0.1
95%CI		(28.2-28.5)	(0.26-0.34)	(1.49-1.76)		(25.7-26.5)	(30.3-30.9)	(0.16-0.24)	(0.36-0.56)	(2.63-3.62)		(22.8-24.6)	(0.44-0.48)	(0.09-0.17)
65 years and older	3999.9	27.9	1.0	4.4	3671.2	25.5	30.5	0.6	1.4	9.0	3620.2	22.7	0.4	0.4
95%CI		(27.8-28.0)	(0.88-1.04)	(4.23-4.62)		(25.3-25.7)	(30.3-30.7)	(0.52-0.67)	(1.22-1.50)	(8.16-9.79)		(22.1-23.3)	(0.42-0.44)	(0.28-0.44)

普段の気温が違うと閾値が異なる

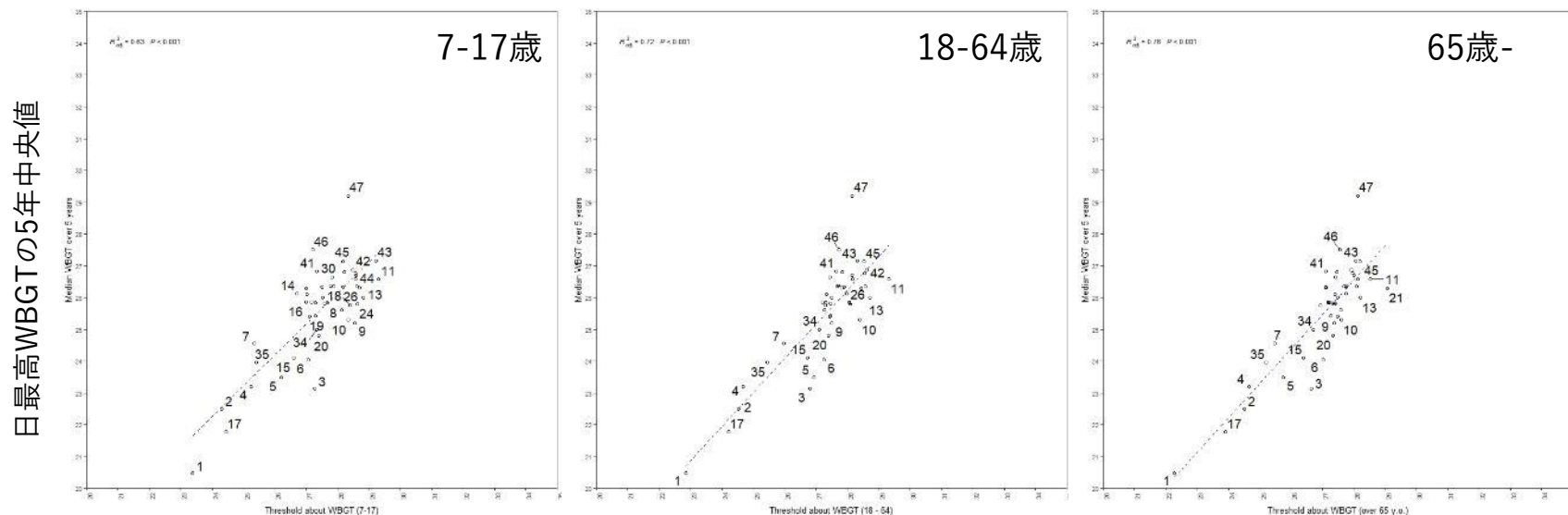
The hockey stick model (Revisited)

$$E(n(T)) = \begin{cases} \beta_1 & , \text{for } T < T_w \\ \beta_1 + \beta_2(T - T_w), & \text{for } T_w \leq T \end{cases}$$

β_1 : 閾値WBGT以下におけるリスク
 β_2 : 閾値WBGT以上におけるリスク勾配
 T_{wx} : 閾値WBGT(°C)
 r : リスクの増加率



47都道府県における閾値WBGT(T_w)と日最高WBGTの5年中央値との関係



閾値WBGT

参考

Oka K, et al. Environ Res. 2023;216(Pt 3):114666

Oka K, et al. Environ Res.;232:116390.

i. 予測モデルを通じた適応策

$$E(n(T)) = \begin{cases} \beta_1 & , \text{for } T < T_w \\ \beta_1 \exp(r(T - T_w)) & , \text{for } T_w \leq T \end{cases}$$



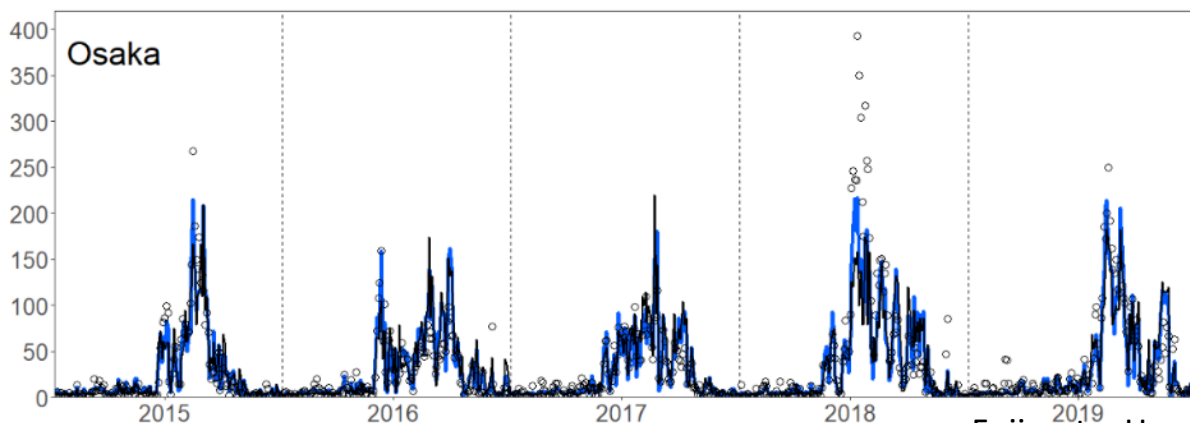
同一年内の暑熱順化

気温以外の暑さに関連する気象要素
(酷暑の連続、全天日射量など)



$$E(n(T_d)) = \begin{cases} \beta_0 & \text{for } T_d < T_{w,0}, \text{ before adaptation} \\ \beta_1 & \text{for } T_d < T_{w,1}, \text{ after adaptation} \\ \beta_0 \exp(r_0(T_d - T_{w,0}) + \gamma_{1,0}S_d + \gamma_{2,0}u_d) & \text{for } T_{w,0} \geq T_d, \text{ before adaptation} \\ \beta_1 \exp(r_1(T_d - T_{w,1}) + \gamma_{1,1}S_d + \gamma_{2,1}u_d) & \text{for } T_{w,1} \geq T_d, \text{ after adaptation} \end{cases}$$

S_d : 全天日射量, U_d : $WBGT_{max} \geq 31^\circ\text{C}$ の連続,
Adaptation= 年最高日平均気温 or 年最大搬送者数

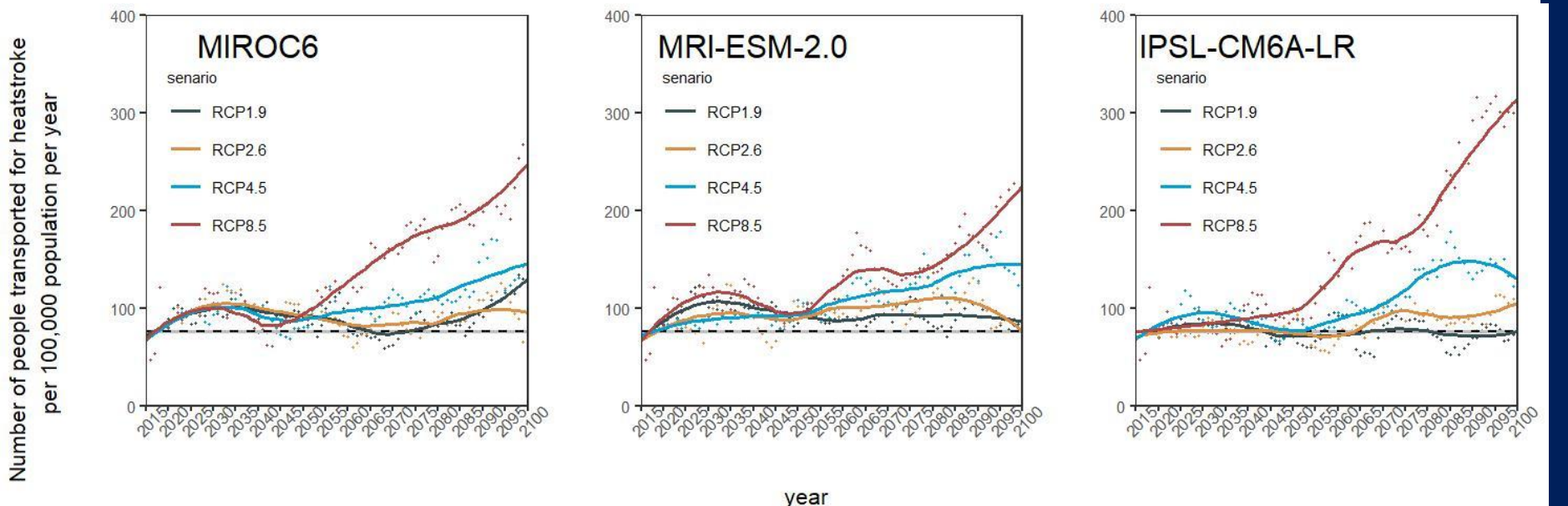


○: 実測値

青線: 改良後モデル予測値

黒線: 改良前モデル予測値

高齢者における熱中症搬送者数の予測 (気候変動シナリオ別)



65歳以上		2030-2049			2050-2069			2070-2100		
熱中症搬送者変化率		MIROC6	MRI-ESM-2.0	IPSL-CM6A-LR	MIROC6	MRI-ESM-2.0	IPSL-CM6A-LR	MIROC6	MRI-ESM-2.0	IPSL-CM6A-LR
2015-19の5年平均との比較										
	RCP 1.9	1.29 (1.23-1.34)	1.32 (1.28-1.36)	1.05 (0.98-1.12)	1.08 (0.98-1.19)	1.18 (1.15-1.21)	0.93 (0.83-1.02)	1.24 (1.15-1.33)	1.22 (1.17-1.27)	1.00 (0.94-1.05)
	RCP 2.6	1.34 (1.25-1.43)	1.23 (1.10-1.35)	1.03 (0.97-1.10)	1.14 (1.06-1.22)	1.35 (1.28-1.41)	0.99 (0.91-1.08)	1.22 (1.15-1.30)	1.35 (1.27-1.43)	1.25 (1.20-1.31)
	RCP 4.5	1.24 (1.14-1.33)	1.20 (1.15-1.24)	1.12 (1.05-1.19)	1.28 (1.21-1.36)	1.43 (1.35-1.52)	1.19 (1.12-1.26)	1.64 (1.54-1.74)	1.76 (1.66-1.87)	1.78 (1.68-1.88)
	RCP 8.5	1.19 (1.09-1.28)	1.41 (1.31-1.51)	1.18 (1.08-1.28)	1.67 (1.53-1.81)	1.66 (1.49-1.83)	1.79 (1.57-2.01)	2.59 (2.45-2.73)	2.18 (2.02-2.34)	3.08 (2.80-3.36)
カーボンニュートラルとの比較										
(RCP 1.9)	RCP 2.6	1.05 (0.96-1.13)	0.94 (0.84-1.03)	1.01 (0.92-1.28)	1.09 (0.95-1.23)	1.14 (1.09-1.20)	1.13 (0.97-1.29)	1.02 (0.93-1.10)	1.12 (1.04-1.20)	1.28 (1.20-1.35)
	RCP 4.5	0.96 (0.90-1.02)	0.91 (0.86-0.96)	1.08 (1.00-1.16)	1.22 (1.09-1.35)	1.22 (1.13-1.31)	1.34 (1.18-1.50)	1.34 (1.26-1.44)	1.46 (1.36-1.56)	1.86 (1.65-2.08)
	RCP 8.5	0.92 (0.85-1.00)	1.07 (1.00-1.13)	1.14 (1.03-1.25)	1.62 (1.36-1.88)	1.42 (1.26-1.58)	2.03 (1.66-2.41)	2.12 (2.03-2.21)	1.82 (1.65-1.99)	3.22 (2.83-3.62)

高齢者における熱中症適応政策の定量化 (社会調査を通じた事例)

Table 1: Characteristics of data during the summer months for people aged 75 and older in 2018-2019.

Characteristic	Non heatstroke, N = 410 ¹	Heatstroke, N = 166 ¹
Age (years)	86.7 (6.9)	84.4 (7.8)
Gender		
Female	236 (58%)	74 (45%)
Male	174 (42%)	92 (55%)
Medical history		
0	345 (84%)	113 (68%)
1	65 (16%)	53 (32%)
Need nursing care		
0	109 (27%)	32 (19%)
1	301 (73%)	134 (81%)
Ambulation		
0	259 (63%)	111 (67%)
1	151 (37%)	55 (33%)
One-Person Households		
0	373 (91%)	138 (83%)
1	37 (9.0%)	28 (17%)
Unable to drink water on own		
0	342 (83%)	128 (77%)
1	68 (17%)	38 (23%)
Non-ownership of air conditioners		
0	365 (89%)	139 (84%)
1	45 (11%)	27 (16%)

¹Mean (SD); n / N (%)

	Crude OR (95% CI)	Adjusted OR (95% CI)
difficulty drinking water	1.49 (0.95,2.33)	1.49 (0.83,2.67)
No air conditioner	1.58 (0.94,2.64)	1.28 (0.64,2.60)
single-person household	2.05 (1.21,3.47)	2.76 (1.28,5.95)

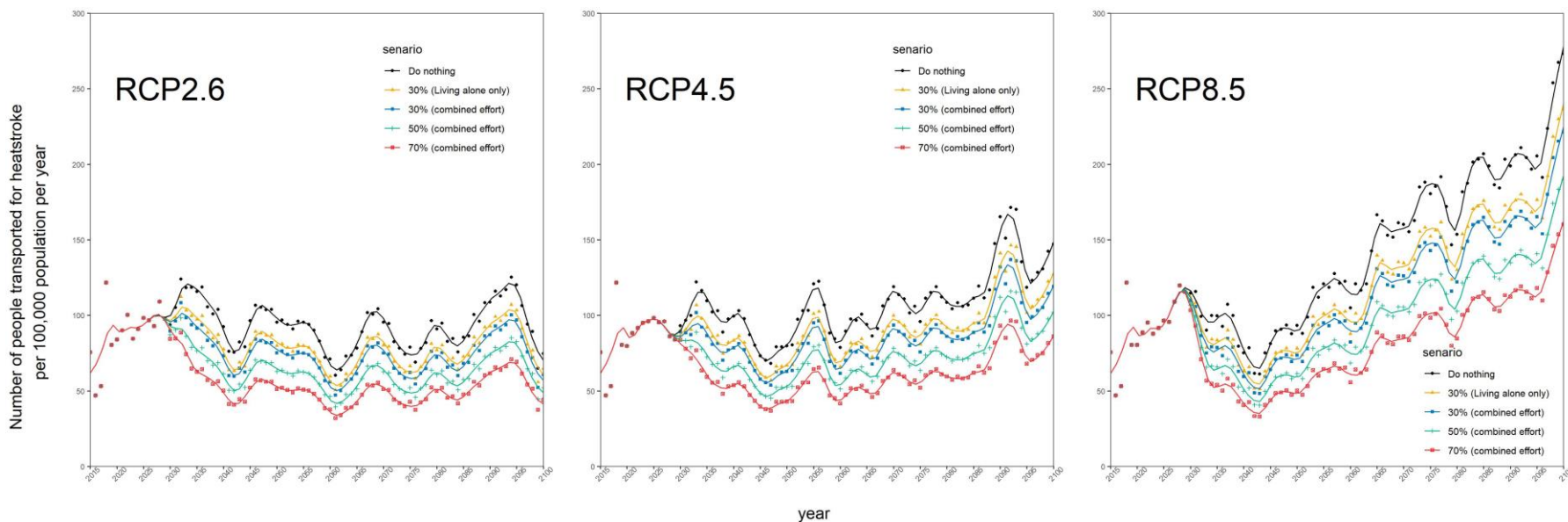
$$E(n(T_d)) = k_s k_w k_a f(T_d)$$
$$k_x = \frac{q_x p_{x,y} (1 - i_{x,y}) + (1 - p_{x,y})}{q_x p_{x,y} + (1 - p_{x,y})}$$

$p_{s,y}$: y年における 独居割合
 $p_{w,y}$: y年における 飲水不可割合
(要介護度3以上割合)
 $p_{a,y}$: y年におけるエアコン未設置割合
 i : 介入割合
 q_s : 独居者における熱中症発症オッズ比
 q_w : 自力飲水不可者における熱中症発症オッズ比
 q_a : エアコン未設置居住者における熱中症オッズ比

適応策の波及度合い別

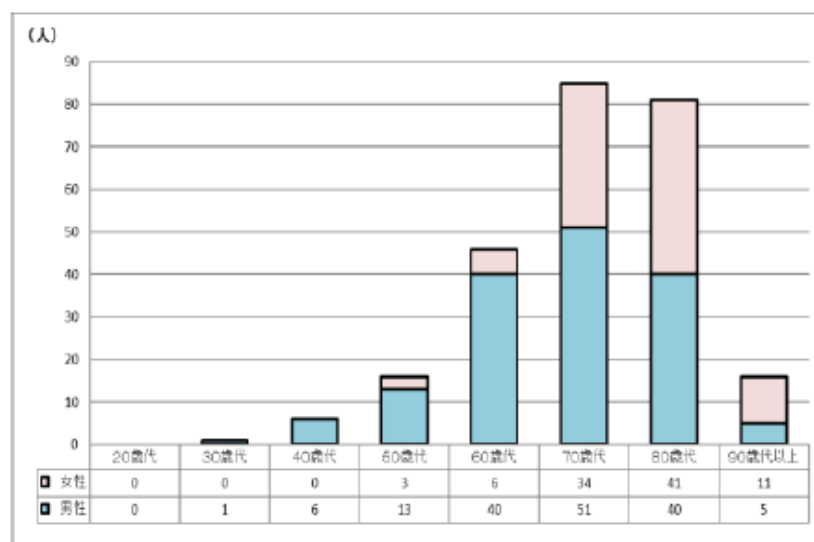
(何もしない vs 独居30%解消

vs 3つの策それぞれ30%、50%、70%)



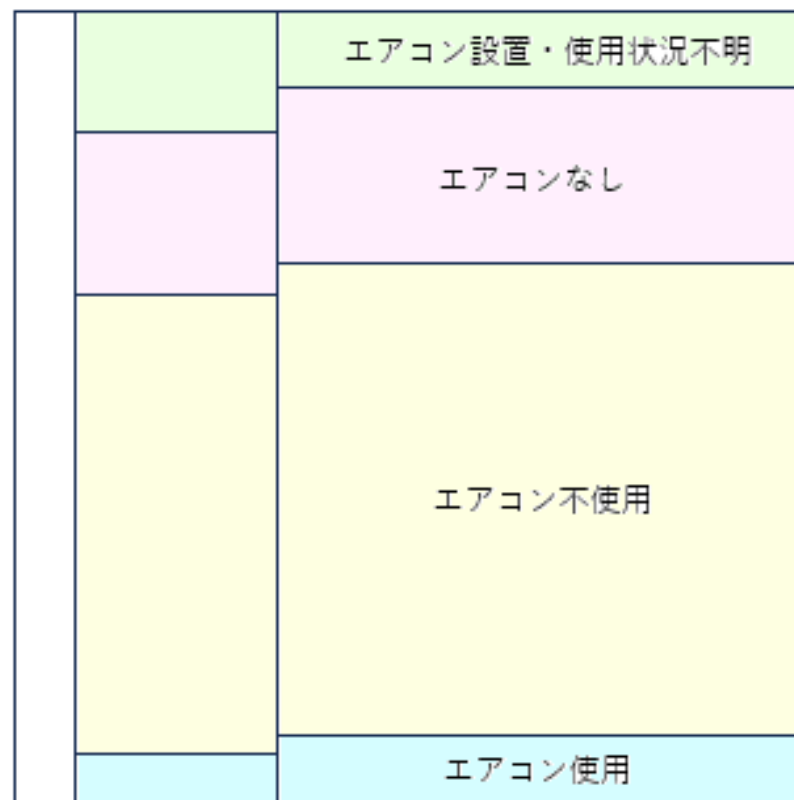
東京都観察医務院の R4年調査

○ 熱中症死亡者（年齢別・男女別）



（備考） 60歳代内訳 60歳～64歳 男性15人 女性2人
65歳～69歳 男性25人 女性4人

熱中症死亡者（251人）の組成図



屋外 屋内 屋内（単身）
（家族と同居）

<https://www.hokeniryo.metro.tokyo.lg.jp/kansatsu/heatstroke/R04-heatstroke-fixed.files/R04-data6-fixed.pdf>

KYOTO UNIVERSITY

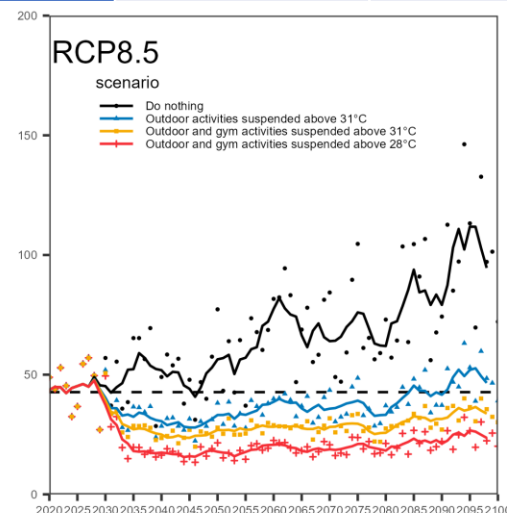
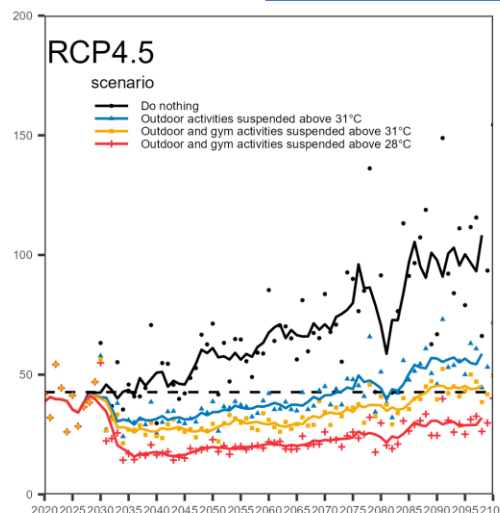
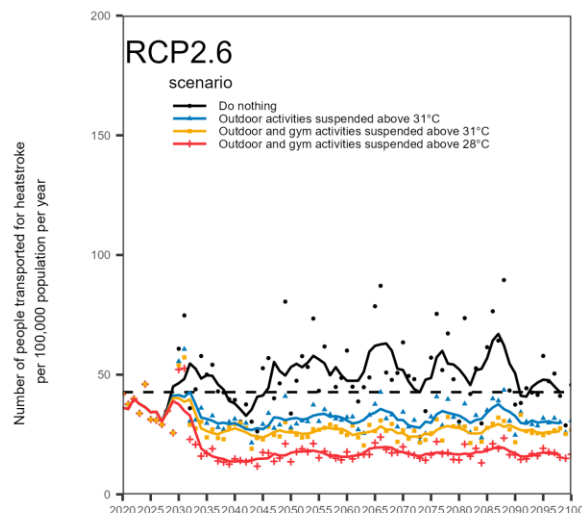
* 2022年夏季の都内23区のデータ。
* 東京都監察医務院『令和4年夏の熱中症死亡者数の状況』より舞田敏彦作成。

@tmaita77

未成年の適応政策:

炎天下の運動回避

Outdoor WBGT (°C)	schoolyards	gymnasiums
19-22	5.8 (3.4, 9.6)	2.8 (1.6, 4.9)
23-25	8.2 (5.5, 12.3)	2.8 (1.8, 4.3)
26-28	10.7 (7.4, 14.7)	5.2 (3.7, 7.3)
29-31	11.2 (8.6, 14.5)	3.7 (2.8, 4.9)



Scenario		2030-34	2050-54	2070-74	2090-94
RCP1.9	over 31°C	14.3 (7.8, 27.5)	19.6 (17.6, 34.0)	20.9 (6.5, 32.7)	19.6 (7.8, 22.9)
	over 28°C	43.8 (40.5, 54.2)	48.4 (45.8, 56.9)	47.7 (28.7, 51.6)	40.5 (33.3, 44.4)
RCP2.4	over 31°C	23.5 (12.4, 28.1)	20.9 (10.5, 36.6)	20.3 (3.9, 24.8)	14.4 (5.9, 16.3)
	over 28°C	51.6 (41.2, 61.4)	45.1 (39.9, 49.0)	40.5 (24.2, 48.4)	40.5 (30.7, 45.8)
RCP4.5	over 31°C	17.7 (2.0, 29.4)	22.2 (17.0, 24.9)	25.4 (19.0, 35.9)	24.2 (16.3, 38.6)
	over 28°C	41.2 (37.9, 56.2)	44.4 (30.7, 50.3)	47.1 (44.4, 64.1)	56.9 (44.4, 62.7)
RCP8.5	over 31°C	15.0 (11.1, 32.7)	24.2 (16.3, 36.6)	27.4 (17.0, 39.9)	35.2 (24.2, 41.9)
	over 28°C	41.2 (41.2, 50.3)	51.0 (44.4, 58.2)	56.9 (46.4, 66.7)	53.4 (42.5, 56.2)

Fujimoto, Hayashi
& Nishiura.
submitted

S-18の熱中症研究成果と問題点

(1) 成果：評価系の確立

WBGTを活用したベンチマーク予測（時間・空間）

(2) 適応政策の大まかな見通しと問題点発掘

高齢者の適応政策評価（エアコン・飲水・独居対策）

未成年の適応政策（屋外運動のキャンセル）

Ongoing: 生産年齢の適応政策（炎天下作業＋運動）

(3) わかってきた問題点

必要対策の現実性：独居エアコン・小児の夏の屋外はほとんどキャンセル・労働関連

具体的なエフォートが要求度大

特定されつつある科学的問題

(1) 未達：解像度の高い時空間予測

リアルタイム予測（ホットスポット＋背景要因＋行動）
よりカスタマイズ：逃げ切った方々の特徴

(2) 未達：政策としての社会適応

実際の適応政策の効果定量

Reactive interventionとLong-term intervention

地域政策に落とし込む：具体的政策、トップダウン実装

(3) 未解決：馴化と適応

同一季節内の比較的短期の生理的な馴化

自然適応のメカニズム：生理的適応、社会的適応

年齢群別、基礎疾患別の適応度