

気候変動：死亡率シナリオの作成

気候変動の経路に応じて日本全体の将来死亡率を予測してみると…



保険研究部 主席研究員 篠原 拓也
tshino@nli-research.co.jp

※ 本稿は 2024 年 12 月 24 日発行「基礎研レポート」を
加筆・修正したものである。

〈概要〉

これまでに、気象データをもとに、日本全国の気候指数を作成した。また、回帰分析を通じて、気候指数と人の死亡率の関係を定式化した。そして、得られた関係式をもとに、対象地域とデータ取得に用いる気候モデルを限定した上で、将来死亡率を試算した。試算は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が第 6 次評価報告書で示している共通社会経済経路(SSP)をもとに行った。これにより、「気候変動が激しくなると死亡数に一定の影響を及ぼしうる」との結果を得ることができた。

今回、予測の対象地域を日本全国に拡大した。併せて、データ取得に用いるモデルを、5 つの気候モデルに拡張した。その上で、SSP をもとに、日本全体の将来死亡率を予測計算した。

その結果、“気候政策を導入しない SSP5-8.5 の経路では、気候政策により今世紀末までの昇温を 2℃未満に抑える SSP1-2.6 の経路に比べて、2081-2100 年の死亡数が +2.0%増加し、気候モデル間の差異が拡大する”との帰結に至った。このことから、「気候変動が激しくなると、死亡数の増加が膨らみ、予測の不確実性が高まる可能性がある」との推論を得ることができた。

ただし、この推論は、気候変動と死亡率の相関関係をもとに導出したもので、メカニズムを明らかにしたものとは言えない。今後、因果関係の検証など、推論の精度向上に努めることとしたい。

[目次]

1—将来の気候変動の経路	15
1 IPCC が設定している SSP をもとに気候シナリオが作られている	15
2 さまざまな全球気候モデル(GCM)により、SSP に応じた気候シナリオが作成されている.....	17
2—気候指数の予測結果	18
1 気候モデルは、過去の観測実績を概ね再現している	18
2 高温指数では、SSP5-8.5 は他の経路に比べて大きく上昇している.....	21
3—死亡率の予測結果	26
4—死亡数の予測結果	27
1 気候変動問題が死亡数に影響を及ぼすのは、2060 年代以降	27
2 気候変動が激しくなると、死亡数の増加が膨らむ可能性がある.....	28
3 気候変動が激しくなると、死亡数増加の不確実性が高まる可能性がある.....	29
4 死因別：異常無(老衰等)の増加が大きく、これが全死因での死亡数増加につながっている	30
5 年齢群団別：SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減では、85 歳以上の年齢群団で死亡数が増加... ..	31
6 月別：春先や秋から冬にかけて、死亡数が大きく増加する	32
7 地域区分別：関東甲信は、気候変動の影響が他の地域に比べて小さい	33
5—考察	34
1 本稿のポイントは？ — 気候変動が激しくなると、死亡数の予測の不確実性が高まることもポイント. ..	34
2 膨大な量のデータや算式による計算を行った意義は？ — 異常値の影響を緩和した効果	35
6—おわりに	36
参考文献・資料	36

1——将来の気候変動の経路

まず、将来の気候変動の経路について見ていく。

1 | IPCC が設定している SSP をもとに気候シナリオが作られている

(1) IPCC（気候変動に関する政府間パネル）

世界中で、気候変動問題に対する注目が高まる中、さまざまな研究機関や学術機関が気候シナリオを作成している。その中核的なものは、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が第6次評価報告書において設定している共通社会経済経路(SSP)となっている。

IPCC は、世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)によって1988年に設立された政府間組織だ。2024年9月現在、195の国と地域が参加している。IPCCの目的は、各国政府の気候変動に関する政策に科学的な基礎を与えることとされている。世界中の科学者の協力を得て、出版された文献や科学誌に掲載された論文等に基づいて定期的に報告書を作成し、気候変動に関する最新の科学的知見の評価を提供している。2007年には、気候変動問題に関する活動を受賞理由として、ノーベル平和賞を受賞している¹。

IPCCには、3つの作業部会と1つのインベントリータスクフォースが置かれている。第1作業部会(WG1)は、気候システムと気候変動の自然科学的根拠についての評価。第2作業部会(WG2)は、気候変動に対する社会経済と自然システムの脆弱性、気候変動がもたらす好影響・悪影響、気候変動への適応のオプションについての評価。第3作業部会(WG3)は、温室効果ガスの排出削減など気候変動の緩和のオプションについての評価を、それぞれ行う。また、インベントリータスクフォース(TFI)は、温室効果ガスの国別排出目録(インベントリー)作成手法の策定や普及などの役割を担っている。

(2) 評価報告書、統合報告書

IPCCは、これまで5～7年ごとに評価報告書、統合報告書を公表してきた。第1次評価報告書は1990年に公表され、1992年に内容の増補が行われている。第2次評価報告書では、1997年の京都議定書採択に先駆けて、その裏付けとなる資料を提供した。第5次評価報告書では、パリ協定採択に向けて科学的情報を提供した。そして、第6次評価報告書では、産業革命前に比べて世界平均気温の上昇を1.5℃に抑えるために必要となる温室効果ガスの排出量削減を明示した。

また、これらとは別に、タイムリーに特別報告書の公表も行ってきた。第6次評価サイクルでは、2018年に「1.5℃特別報告書」、2019年に「土地関係特別報告書」、「海洋・雪氷圏特別報告書」、「温室効果ガスインベントリに関する『2019年方法論報告書』」が公表されている。

現在は、第7次評価サイクルの検討に入っている²。

¹ 地球温暖化への警鐘を鳴らしたことなどの功績により、元アメリカ副大統領のアル・ゴア氏とともに受賞。

² 2023年7月に、新たな議長等の選出が行われ、正式にスタートした。

図表 1. IPCC の評価報告書、統合報告書

報告書	公表時期	概要
第 1 次評価 (FAR)	1990 年	気候変動が地球規模の影響をもたらし、国際協力を必要とする課題として重要であることを強調。地球温暖化を減らし、気候変動の結果に対処するための主要な国際条約である「国連気候変動枠組条約 (UNFCCC)」の創設において決定的な役割を果たした。
(増補)	1992 年	FAR のシナリオ等を増補した。
第 2 次評価 (SAR)	1995 年	1997 年の京都議定書の採択に向けて政府の決定を引き出す重要な資料を提供した。
第 3 次評価 (TAR)	2001 年	気候変動の影響と適応の必要性に焦点を当てた。
第 4 次評価 (AR4)	2007 年	温暖化を 2℃に制限することに焦点を当てるポスト京都議定書の基礎を築いた。
第 5 次評価 (AR5)	2013-14 年	パリ協定への科学的インプットを提供した。
第 6 次評価 (AR6)	2021-23 年	パリ協定の下で要請された「1.5℃特別報告書」、「土地関係特別報告書」、「海洋・雪氷圏特別報告書」の公表を経て、1.5 度を達成するために必要な温室効果ガスの排出量削減を明示した。(温室効果ガス排出量を 2035 年までに 60%削減(2019 年比))

※ “About History of the IPCC” (IPCC HP, <https://www.ipcc.ch/about/history/>)等をもとに、筆者作成

(3) 共通社会経済経路 (SSP)

第 6 次評価 (AR6) では、将来の社会・経済の発展について仮定した共通社会経済経路 (Shared Social-economic Pathways, SSP) (以下、単に「経路」と呼称することがある) が、放射強制力と組み合わせ、5 つ設定されている。このうち、SSP1-2.6 は、産業革命前に対する世界平均の気温上昇を 2℃未満に抑える政策を導入して、21 世紀後半に二酸化炭素の排出を正味ゼロとする見込みとされている。一方、SSP5-8.5 は、化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しないケースとされている。³

図表 2. AR6 の共通社会経済経路 (主な項目)

共通社会 経済経路	概要	産業革命前からの気温上昇 (20 年平均) (°C)		
		2021-2040 年	2041-2060 年	2081-2100 年
SSP1-1.9	持続可能な発展の下で、産業革命前を基準とする 21 世紀末までの昇温 (中央値) を概ね (わずかに超えることはあるものの) 約 1.5℃以下に抑える気候政策を導入。21 世紀半ばに CO ₂ 排出正味ゼロの見込み。	1.5	1.6	1.4
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で、産業革命前を基準とする昇温 (中央値) を 2℃未満に抑える気候政策を導入。21 世紀後半に CO ₂ 排出正味ゼロの見込み。	1.5	1.7	1.8
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入。2030 年までの各国の「自国決定貢献 (NDC) ⁴ 」を集計した排出量の上限にほぼ位置する。工業化前を基準とする 21 世紀末までの昇温は約 2.7℃ (最良推定値)。	1.5	2.0	2.7
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しない中～高位参照シナリオ。エーロゾルなど CO ₂ 以外の排出が多い。	1.5	2.1	3.6
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない高位参照シナリオ。	1.6	2.4	4.4

* 「概要」は、「IPCC の概要や報告書で使用される表現等について」(気象庁、令和 3 年 8 月 9 日付報道発表資料別添 3) の【AR6 で使用されている主なシナリオ】からの引用。「産業革命前からの気温上昇 (20 年平均)」は 1850-1900 年 (参照期間) に対する気温上昇。

※ “Technical Summary” (IPCC WG1)、「IPCC の概要や報告書で使用される表現等について」(気象庁、令和 3 年 8 月 9 日付報道発表資料別添 3) などをもとに、筆者作成

³ 経路に沿って、大学や研究機関等で 3131 個のシナリオが研究された。当初の選別と品質管理で 2266 個に絞られ、実績の反映可否で 1686 個に絞られた。さらに、2100 年までの予測可能性などを踏まえて、1202 個が審査に合格している。これらは、気候エミュレータ (FAIR、CICERO-SCM、MAGICC) を用いて C1～C8 に分類されている。

⁴ パリ協定 (2015 年 12 月採択、2016 年 11 月発効) では、温室効果ガスの排出削減目標を「自国決定貢献 (Nationally Determined Contribution, NDC)」として 5 年ごとに提出・更新する義務が、すべての国にある。

2 | さまざまな全球気候モデル(GCM)により、SSP に応じた気候シナリオが作成されている

(1) 全球気候モデル(GCM)

現在、世界中の大学や研究機関が気候シナリオの作成を進めている。その際、全球気候モデル(Global Climate Model, GCM)と呼ばれる数理モデルを用いた予測が行われることがある。

そもそも世界初の気候モデルは、1960 年に真鍋淑郎氏とカーク・ブライアン氏が米国海洋大気庁・地球流体力学研究所で開発したモデルと言われる⁵。それ以後、数理モデルで気候を再現する手法の研究が進んだ。コンピュータの計算性能の進歩や、気象学の研究の進展もあって、GCM のモデル予測性能が向上していったとされる。

GCM は、地球全体に対する数値モデルである。緯度、経度、高度、時間の項目で格子に区切る。そして、各格子点について、静力学平衡方程式、運動方程式、熱力学方程式等を用いて、気温、気圧、比湿(湿潤空気中に含まれる水蒸気の質量と湿潤空気全体の質量の比)などの予測数値を算出していく。

(2) 第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)

世界中の大学や研究機関が気候モデルを作成して気候予測を行っている。そのモデルの比較を行うプロジェクトとして、「第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)」と呼ばれるモデル群がある。CMIP6 は、IPCC の AR6 に対応した 50 以上のモデルからなる。

(3) 日本域 CMIP6 データ (NIES2020)

文部科学省と気象庁は、「気候予測データセット 2020」を公表している。その中で、国立環境研究所は「日本域 CMIP6 データ (NIES2020)」として CMIP6 の 5 つの GCM を選択し、これを日本域(東経 122-146 度、北緯 24-46 度の陸上)の細かい格子で設定し、さらに実績との乖離を補正したデータを公表している⁶。その内容は、日本域の地上 1km 格子点での「日最高気温(℃)」、「日最低気温(℃)」、「降水量(mm/day)」、「風速(m/s)」、「相対湿度(%)」のデータを含んでいる。各データは、SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 の 4 つの経路に対して 21 世紀中の数値(2100 年 12 月 31 日までの毎日の値)として示されている。これらのデータに必要な調整を行ったうえで、回帰式に代入する将来の気候指数の作成データとして活用することとした。なお、データには海面水位の数値はない。

日本域 CMIP6 データ (NIES2020)の GCM は、次の 5 つ。このうち、MIROC6 と MRI-ESM2-0 は、日本の研究機関が作成したモデルである。

- ・ MIROC6 (東京大学, 海洋研究開発機構(JAMSTEC), 国立環境研究所(NIES))
- ・ MRI-ESM2-0 (気象庁気象研究所(MRI))
- ・ ACCESS-CM2 (オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO))
- ・ IPSL-CM6A-LR (ピエール・シモン・ラプラス研究所(フランス))
- ・ MPI-ESM1-2-HR (マックス・プランク研究所(ドイツ))

⁵ プリンストン大学の真鍋淑郎氏は、マックス・プランク研究所のクラウス・ハッセルマン氏、ローマ・ラ・サピエンツァ大学のジョルジオ・パリージ氏とともに、2021 年にノーベル物理学賞を受賞した。受賞理由は「地球温暖化の予測のための気候変動モデルの開発」。

⁶ 細かい格子での設定は、統計的ダウンスケーリングの手法で行われている。また、実績との乖離の補正はバイアス補正として行われている。

2——気候指数の予測結果

つぎに、将来の気候指数の予測結果を見ていくこととしたい。

1 | 気候モデルは、過去の観測実績を概ね再現している

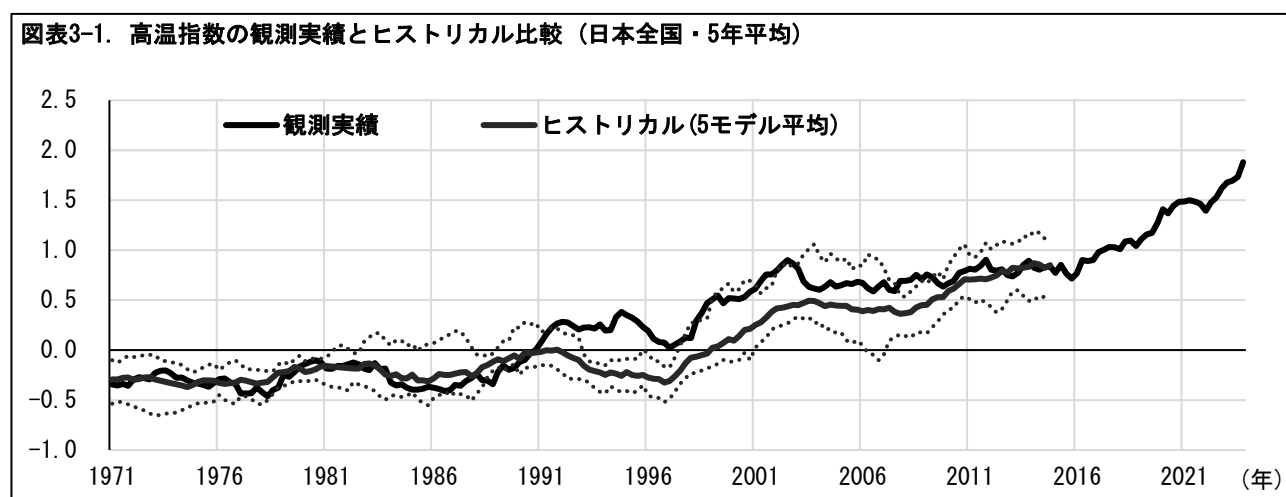
本稿では、152 の観測地点をもとに日本全国を 11 の地域に分けて、各地域区分ごとの気候指数を計算した。そして、それらの平均をとることにより、日本全国の気候指数を作成した。以下では、5 年平均の各気候指数の推移をグラフ化している。

最初に気候指数ごとに、過去(1971-2023 年)の期間について観測実績とヒストリカルデータによる指数を比較して表示する。ヒストリカルは 2014 年までのデータをもとに気候指数を作成したため、その年次までの表示となっている。両者の比較を通じて、各モデルの結果をもとに作成した気候指数が、どの程度、実績と類似または乖離しているかを確認していく。

なお、グラフ表示においては、5 つのモデルでの平均値を実線で示す。併せて、モデルの最大値と最小値の推移を、細い点線で実線の上下に示していく。(以下、本稿において同様)

(1) 高温指数

高温指数は、上昇傾向にある。1971-2014 年の状況を見ると、観測実績とヒストリカルは類似した動きをしていると言える。

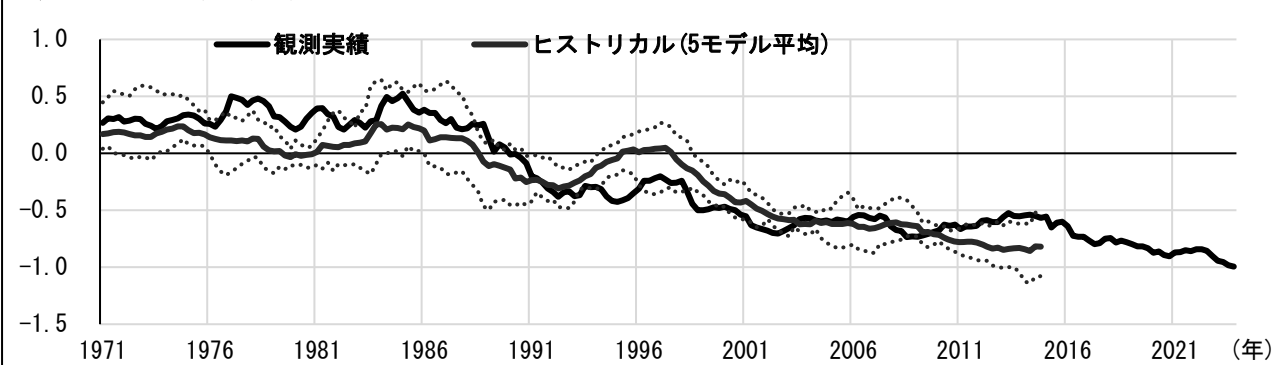


(2) 低温指数

一方、低温指数は、低下傾向にある。1971-2014 年の状況を見ると、観測実績とヒストリカルは概ね近接していると言える。

(以下、本ページ余白)

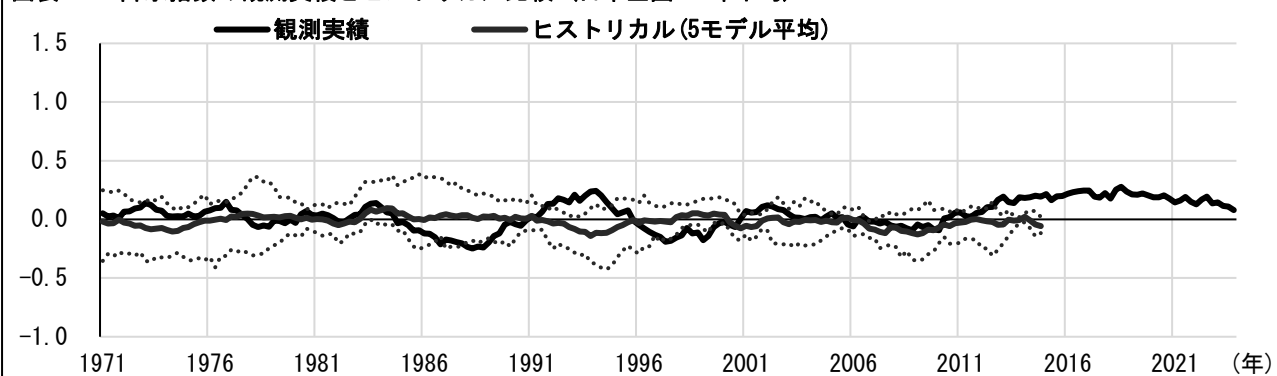
図表3-2. 低温指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



(3) 降水指数

降水指数は、ゼロ近辺で推移している。1971－2014 年の状況を見ると、観測実績とヒストリカルは概ね近接していると言える。

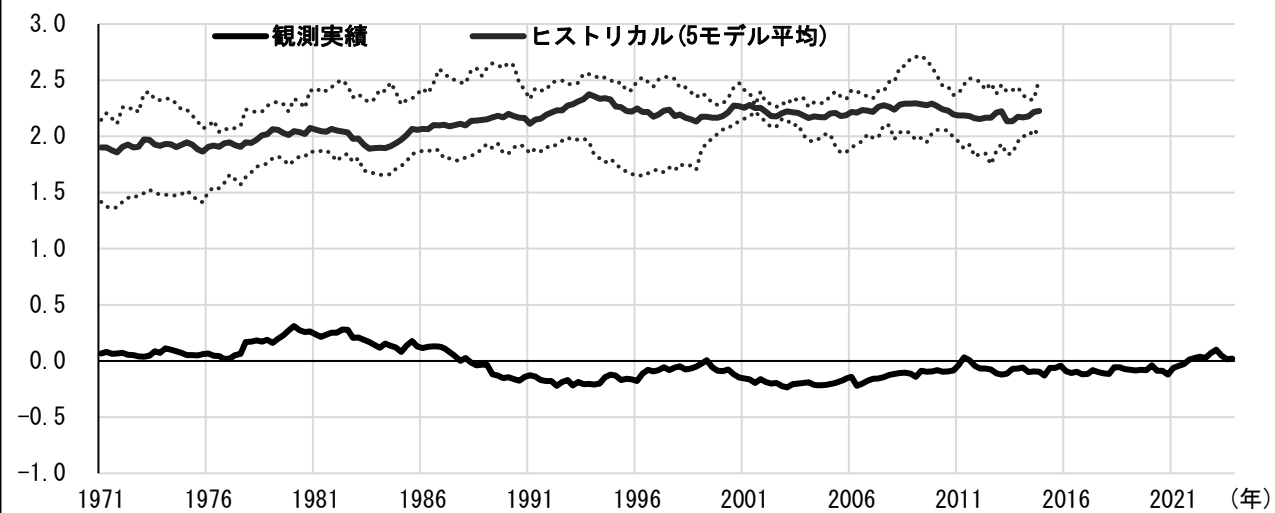
図表3-3. 降水指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



(4) 乾燥指数

乾燥指数は、観測実績がゼロ近辺、ヒストリカルが2 前後で、一定の乖離幅を保ちつつどちらも横ばいで推移している。両者の差は、ヒストリカルにおいて、降水現象の有無に関する「現象なし情報」についてのみなし(観測地点を取り囲む 4 つの 1km 格子点の降水量がすべてゼロであった場合に、降水の「現象なし」とみなす)が、実態よりも乾燥の判定につながりやすいことによるものと見られる。

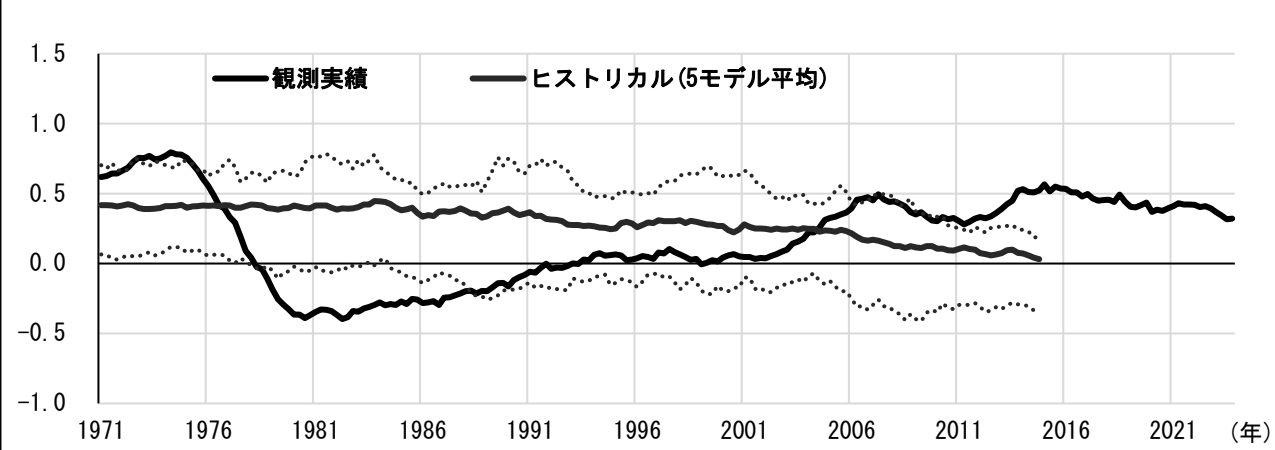
図表3-4. 乾燥指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



(5) 風指数

風指数は、近年プラスの値で推移している。観測実績は 1970 年代後半に低下し、その後緩やかな上昇傾向にあるのに対し、ヒストリカルは緩やかに低下している。ただし、2000 年以降、いずれも概ね 0～0.5 の範囲内で推移している点は類似している。

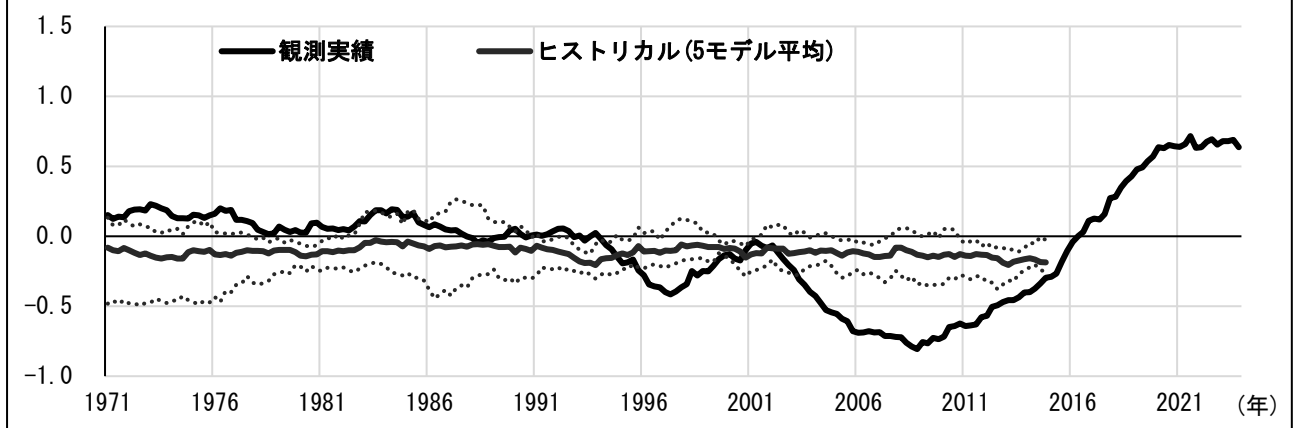
図表3-5. 風指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



(6) 湿度指数

湿度指数は、2000 年頃までゼロ近辺で推移していた。2000 年代に低下し、2010 年代には上昇している。2000 年代初めまでは、観測実績とヒストリカルは近接した動きをしている。それ以降 2010 年代半ばまでは、やや乖離が見られる。2010 年代半ば以降については、比較ができないため何とも言えない。

図表3-6. 湿度指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



まとめると、高温、低温、降水、および 2000 年代初めまでの湿度の指数について、観測実績とヒストリカル気候指数は類似していると言える。また、乾燥については一定の乖離幅を保ちつつどちらも横ばいで推移している点、風の指数についてはどちらも概ね同じ範囲内で推移している点が類似していると言える。

以上より、気候モデルは、過去の観測実績を概ね再現しているものと判断できる。

2 | 高温指数では、SSP5-8.5 は他の経路に比べて大きく上昇している

次に、将来(2024-2100 年)の期間における、経路ごとの気候指数の推移を見ていく。ここでは、経路ごとの将来データの違いが、どのように気候指数の形で反映されているかを確認していくことが主な目的となる。

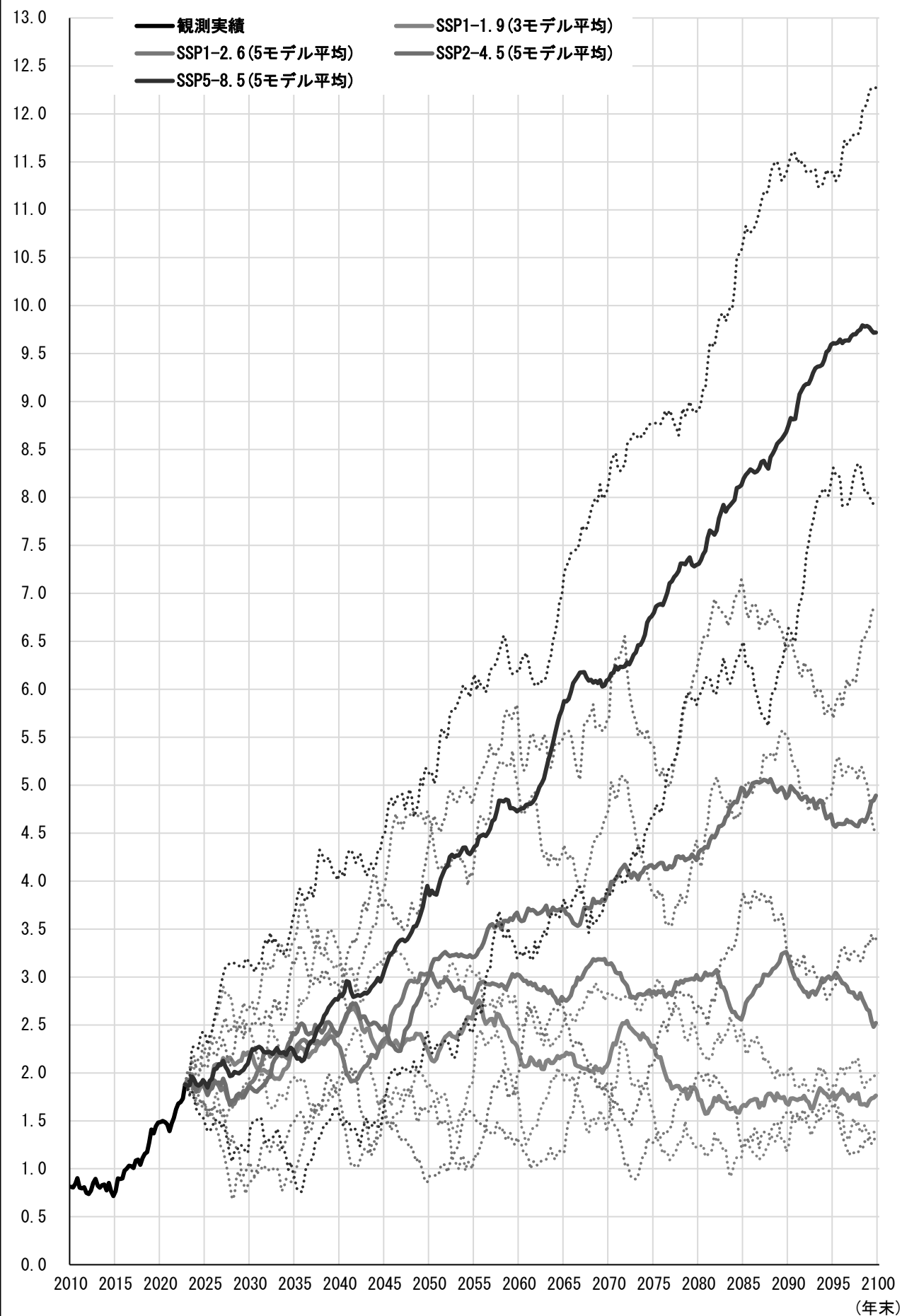
なお、過去の観測実績との接続(2024 年)の前後で、気候指数の上昇や低下などの傾向がどのように変化しているかを見るために、2011-2023 年の観測実績もあわせて表示する。

(1) 高温指数

高温指数は、過去の観測実績が上昇傾向を示している。SSP1-1.9 の経路では、高温指数は上下の振動を繰り返しながら、概ね横這いで推移している。SSP1-2.6 の経路も当面は横這いで推移するが、2080 年代半ばより上昇し、2090 年頃には 3 に達することもある。ただし、その後は低下している。SSP2-4.5 の経路では、高温指数は 2060 年代後半以降、10 年程度での長さで上下動を繰り返し、2080 年代に 5 を超えている。SSP5-8.5 の経路では、高温指数は一貫して上昇し、2090 年代に 9 を超えている。

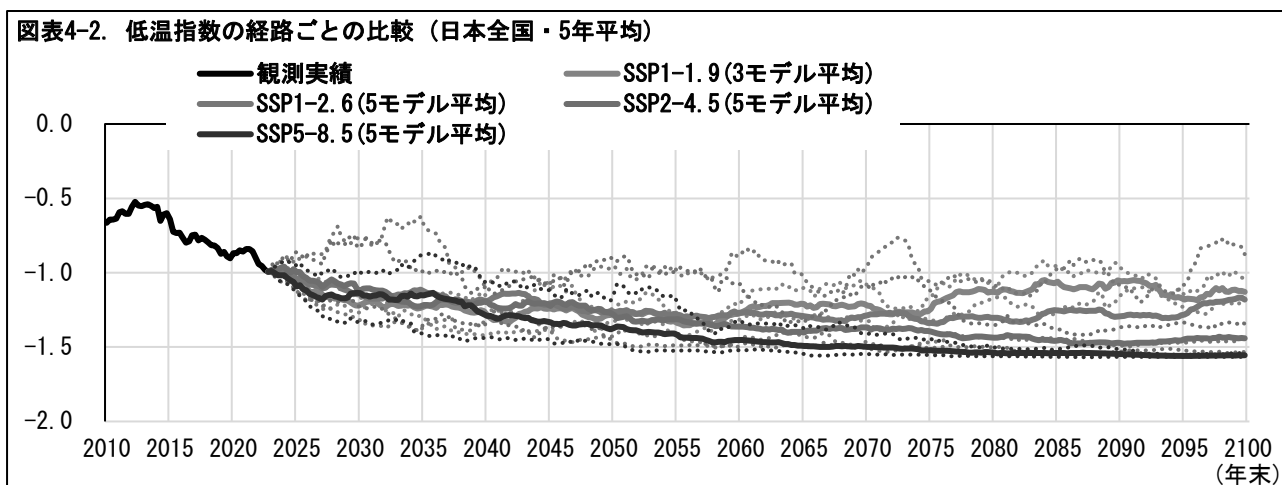
このように、高温指数は、経路ごとの違いが顕著と言える。なお、過去の観測実績との接続には、特に問題はないものとみられる。

図表4-1. 高温指数の経路ごとの比較（日本全国・5年平均）



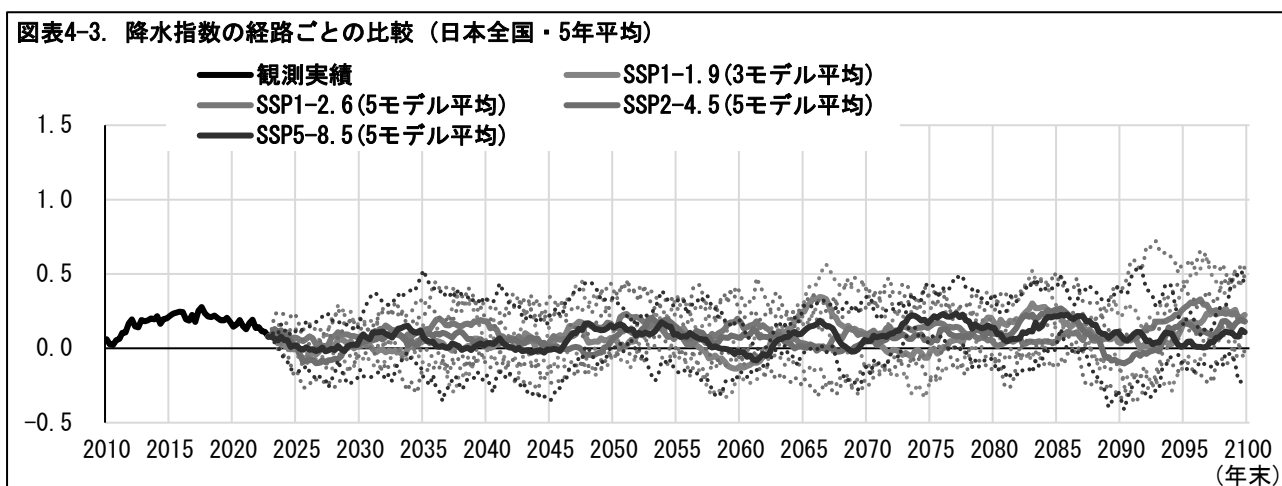
(2) 低温指数

低温指数は、過去の観測実績が低下傾向を表している。SSP1-1.9 と SSP1-2.6 の経路では、この低下傾向が消失し、低温指数は概ね横這いで推移するものとなっている。SSP2-4.5 の経路では、低下傾向は残るものの、なだらかな低下で推移するものとなっている。一方、SSP5-8.5 の経路では、低下傾向が続き、低温指数は-1.5 近辺にまで下がる。なお、過去の観測実績との接続には、特に問題はないものとみられる。



(3) 降水指数

降水指数は、過去の観測実績ではゼロ近辺で推移してきた。SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 の4経路とも、一貫した上昇や低下の傾向は見られず、いずれも、数年ごとに上昇と低下を繰り返して推移する形となっている。なお、過去の観測実績との接続については、各経路で変動の幅がやや大きくなる形となっている。



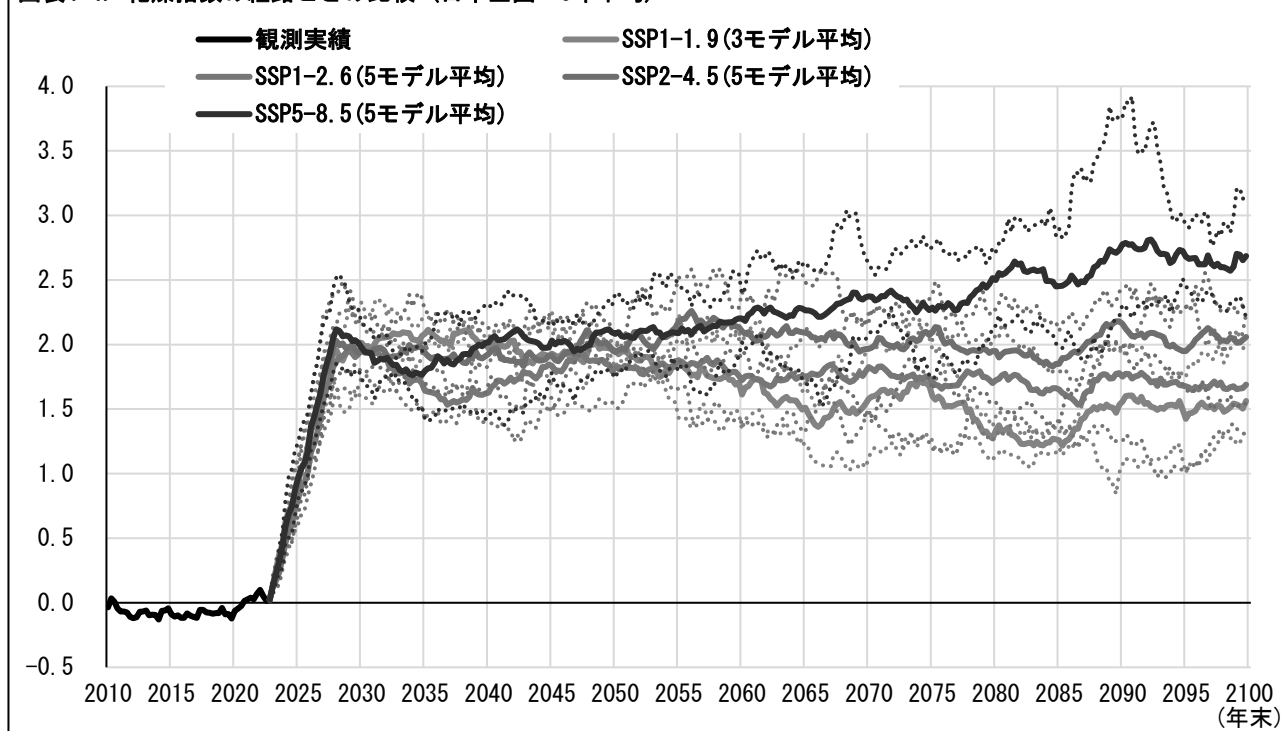
(4) 乾燥指数

乾燥指数は、過去の観測実績ではゼロ近辺で推移してきた。SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 の4経路とも上昇して、2030年代には1~2程度の水準で推移するものとなっている。その後、2050年代後半から、各経路間の違いが表れ始める。SSP1-2.6の経路では乾燥指数は概ね2を下回る水準で推移する。一方、SSP5-8.5の経路では、乾燥指数は、2.5を超える水準にまで上昇

する。

なお、過去の観測実績との接続については、各経路での 2020 年代の上昇(上昇幅 +2 程度)が目立つものとなっている。これは、将来予測において、降水現象の有無に関する「現象なし情報」についてのみなし(観測地点を取り囲む 4 つの 1km 格子点の降水量がすべてゼロであった場合に、降水の「現象なし」とみなす)が、実態よりも乾燥の判定につながりやすいことによるものと見られる。

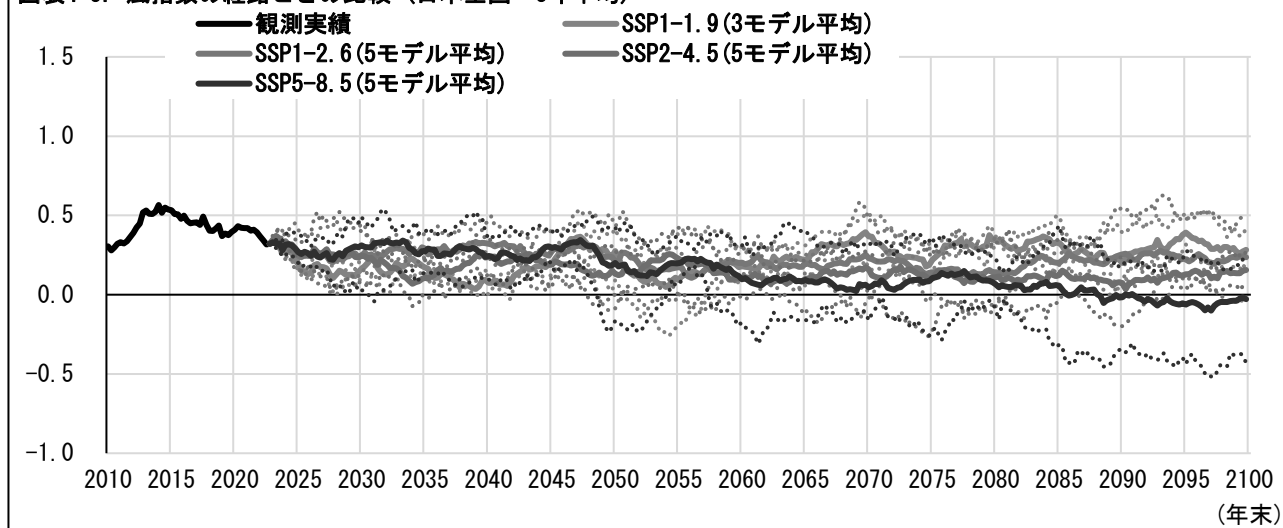
図表4-4. 乾燥指数の経路ごとの比較 (日本全国・5年平均)



(5) 風指数

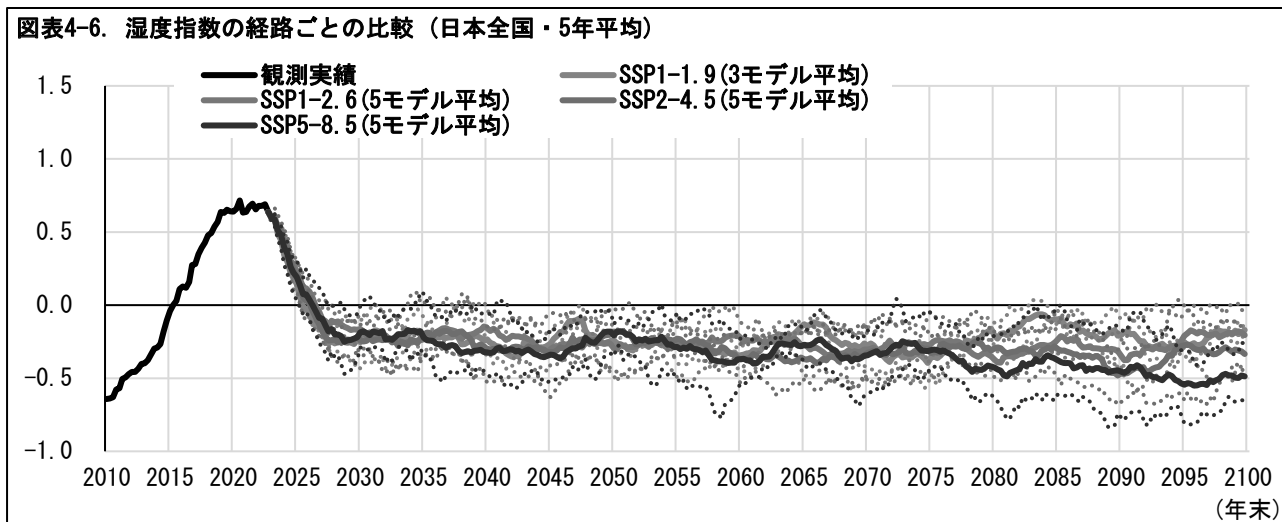
風指数は、観測実績では近年プラスの値で推移してきた。SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5 の経路では、この水準が概ね横這いのまま、0～0.5 程度で推移するものとなっている。SSP5-8.5 の経路でも、指数は横這いが続くものの、2050 年代以降緩やかに低下し、2080 年代以降はゼロ近辺で推移するものとなっている。なお、過去の観測実績との接続には、特に問題はないものとみられる。

図表4-5. 風指数の経路ごとの比較 (日本全国・5年平均)



(6) 湿度指数

湿度指数は、過去の観測実績では、2010 年頃までゼロ近辺で推移していた。2010 年代半ばからは、一転して上昇している。SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 の4 経路とも、湿度指数は低下して、ゼロ近辺のマイナスの値で推移するものとなっている。その後も、一貫した上昇や低下の傾向は見られない。いずれも、数年ごとに上昇と低下を繰り返して推移する形となっている。なお、過去の観測実績との接続については、各経路での 2020 年代の低下(低下幅 -1~-0.5 程度)がやや目立っている。



以上をまとめると、高温、低温、乾燥の指数について、経路間の違いが鮮明となっている。特に、高温指数については、SSP1-1.9 や SSP1-2.6 の経路では概ね横這いで推移する一方、SSP2-4.5 の経路では5、SSP5-8.5 の経路では9 を超えて 10 近くにまで上昇するなど、違いが顕著となっている。一方で、降水、風、湿度の指数については、経路間の違いはあまり見られない形となっている。

なお、過去の観測実績との接続については、乾燥については各経路での 2020 年代の上昇が目立ち、湿度については 2020 年代の低下がやや目立つものとなっている。高温、低温、降水、風は、特に問題はないものとみられる。

なお、実際の死亡率予測は、地域区分別に行う。

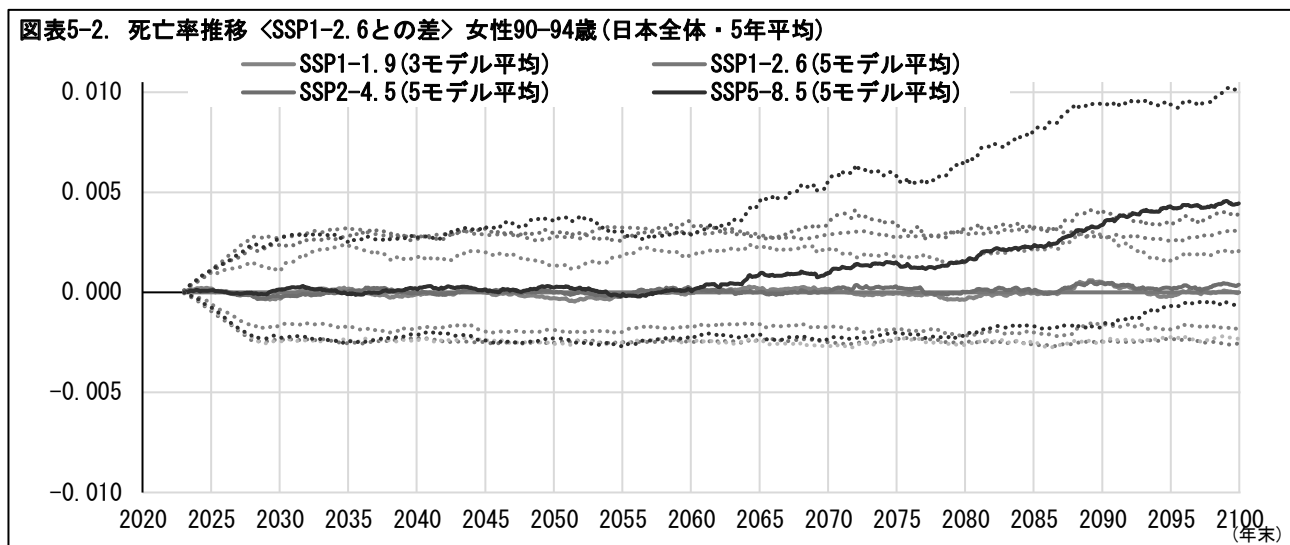
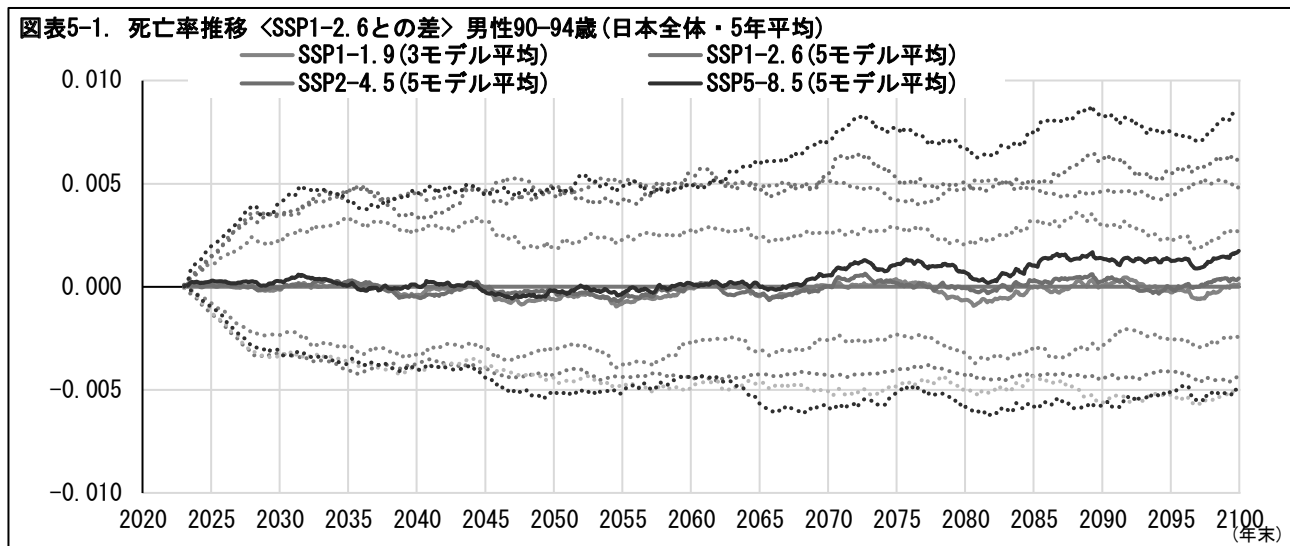
(以下、本ページ余白)

3—死亡率の予測結果

つづいて、気候指数の予測をもとに回帰式を用いて得られた、死亡率の予測結果を見ていく。

回帰式は、東日本大震災と、コロナ禍の影響を除いた直近の10年(2009-2019年(2011年を除く))の死亡率と気候指数から算定する。得られた回帰式に各経路に応じた気候指数を代入して、日本全体の男性と女性の90-94歳の死亡率の推移(5年平均)をグラフに表示した。経路ごとの違いを明らかにするために、SSP1-2.6の経路を基準として、それとの差を表示している。モデル平均値を表す実線とともに、点線でモデル最大値やモデル最小値も示している。

SSP1-1.9とSSP2-4.5は、SSP1-2.6の近辺で推移している。一方、SSP5-8.5は、2060年代以降、SSP1-2.6を上回り、徐々にその差が拡大している。特に、女性はその差の拡大が顕著となっている。



ここで、モデルの最大値と最小値を示す点線に注目してみよう。平均値を示す実線をはさんで、上下に大きく広がっている。今回の計算結果では、経路間の違いだけではなく、モデル間の違いが大きくあらわれていることになる。特に、SSP5-8.5でのモデル間の差異は、SSP1-2.6での差異よりも大きく広がっている。気候変動が進むと、死亡率の水準が上昇するだけではなく、モデル間の上昇の差異が広がっていく、との予測結果が得られたと言える。

4——死亡数の予測結果

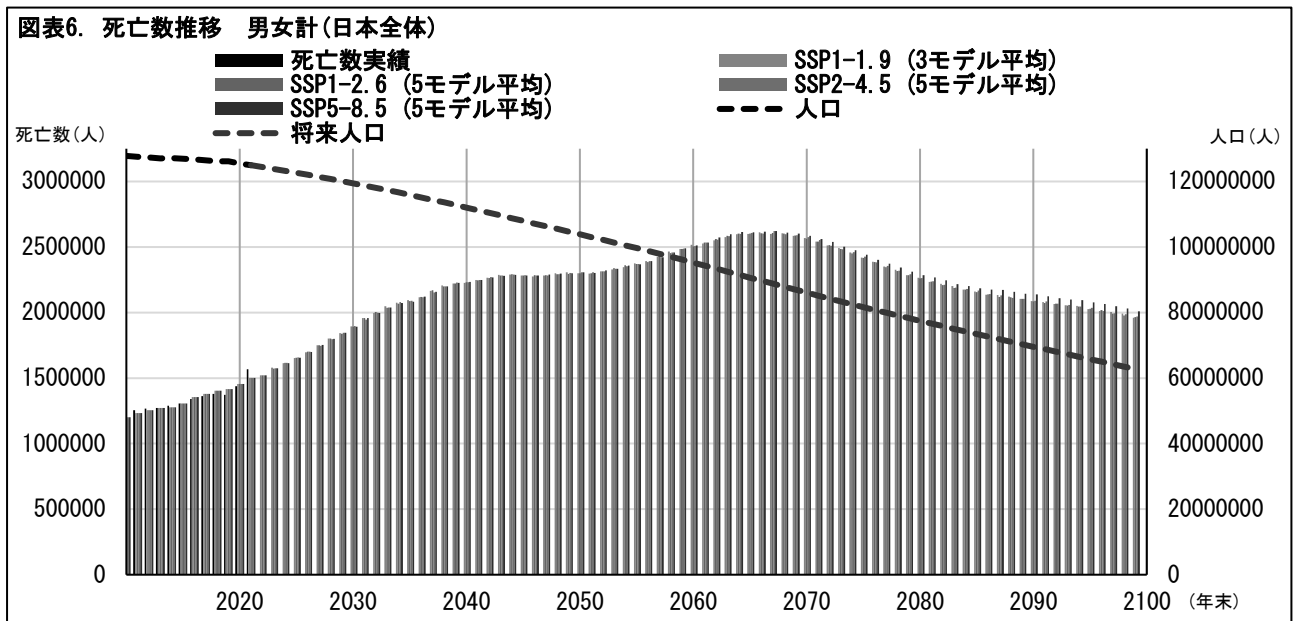
将来の死亡率をもとに、死亡数の予測結果を見ていく。

1 | 気候変動問題が死亡数に影響を及ぼすのは、2060 年代以降

死亡数は、人口の増減の影響を受ける。死亡率が上昇しても人口が減れば、死亡数は減少することがある。

将来人口推計の出生中位、死亡率中位の仮定では、2100 年に日本の総人口は 6278 万人(男性 3039 万人、女性 3238 万人)と推計されている。これは、2023 年の総人口(1 億 2441 万人(男性 6046 万人、女性 6395 万人))の約半分の水準となっている。

計算結果を見ると、各経路とも死亡数は 2060 年代半ばまで増加後、減少に転じる形となった。⁷



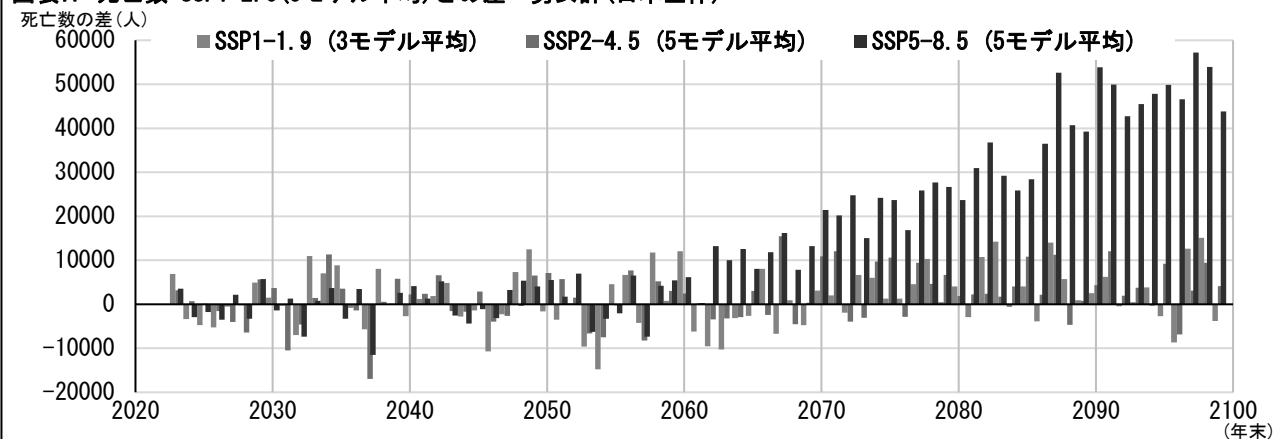
各経路での死亡数について、SSP1-2.6 を基準として、それとの差を表示すると次の通りとなる。

SSP1-1.9 と SSP2-4.5 は、2060 年代まで、SSP1-2.6 との差がプラスやマイナスを行き来している。2070 年代以降は、主として、若干のプラスで推移している。一方、SSP5-8.5 は、2050 年代まで、SSP1-2.6 との差がプラスやマイナスとなっている。2060 年代以降は、基本的にプラスとなり、その差は経過とともに拡大している。

2050 年代までは、どの経路でも死亡数に大きな違いはない。しかし 2060 年代以降は、気候政策により産業革命前を基準とする昇温を 2℃未満に抑える SSP1-2.6 と、化石燃料依存型の発展の下で何も気候政策をとらない SSP5-8.5 との間で死亡数の差が生じる。そして、その差は、経過とともに拡大していく可能性がある。気候変動問題が死亡数に影響を及ぼすのは、2060 年代以降との結果である。

⁷ 「日本の将来人口推計(令和 5 年推計)」(国立社会保障・人口問題研究所)の(出生中位・死亡中位)の推計では、2040 年の 167 万人をピークに死亡数が減少するとされている。本稿の計算では、ピークは 2060 年代、ピーク時の年間の死亡数は 260 万人を上回る形となっている。これは、本稿の計算では、時間項の経過を 10 年分しか進めていないため、死亡率改善のトレンドが十分に反映されていないためと考えられる。

図表7. 死亡数 SSP1-2.6 (5モデル平均) との差 男女計 (日本全体)



2 | 気候変動が激しくなると、死亡数の増加が膨らむ可能性がある

この様子を、20年ごとの期間でみていく。SSP1-2.6の経路での気候変動の影響を見るために、気候変動がなかった場合(現在の気候がそのまま継続する場合)の死亡数を基準に置くこととした⁸。

図表8. 死亡数の予測 (日本全体)

(万人)

		気候変動なし	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2021 - 2040	男女計	3709.0	3729.8 [+0.6%] (+0.1%)	3727.7 [+0.5%]	3726.8 [+0.5%] (-0.0%)	3726.5 [+0.5%] (-0.0%)
	男性	1743.7	1755.3 [+0.7%] (+0.0%)	1754.5 [+0.6%]	1754.0 [+0.6%] (-0.0%)	1754.1 [+0.6%] (-0.0%)
	女性	1965.3	1974.5 [+0.5%] (+0.1%)	1973.3 [+0.4%]	1972.8 [+0.4%] (-0.0%)	1972.4 [+0.4%] (-0.0%)
2041 - 2060	男女計	4625.7	4649.2 [+0.5%] (-0.0%)	4649.4 [+0.5%]	4651.3 [+0.6%] (+0.0%)	4651.8 [+0.6%] (+0.1%)
	男性	2068.2	2081.7 [+0.7%] (-0.0%)	2082.4 [+0.7%]	2083.1 [+0.7%] (+0.0%)	2083.5 [+0.7%] (+0.0%)
	女性	2557.5	2567.6 [+0.4%] (+0.0%)	2567.0 [+0.4%]	2568.2 [+0.4%] (+0.0%)	2568.3 [+0.4%] (+0.1%)
2061 - 2080	男女計	4988.9	5010.8 [+0.4%] (+0.0%)	5009.7 [+0.4%]	5015.6 [+0.5%] (+0.1%)	5042.2 [+1.1%] (+0.7%)
	男性	2165.1	2178.2 [+0.6%] (-0.0%)	2178.4 [+0.6%]	2181.1 [+0.7%] (+0.1%)	2192.3 [+1.3%] (+0.6%)
	女性	2823.8	2832.7 [+0.3%] (+0.0%)	2831.3 [+0.3%]	2834.5 [+0.4%] (+0.1%)	2850.0 [+0.9%] (+0.7%)
2081 - 2100	男女計	4182.6	4208.2 [+0.6%] (+0.2%)	4201.0 [+0.4%]	4208.3 [+0.6%] (+0.2%)	4284.5 [+2.4%] (+2.0%)
	男性	1850.1	1864.6 [+0.8%] (+0.2%)	1861.7 [+0.6%]	1865.4 [+0.8%] (+0.2%)	1893.9 [+2.4%] (+1.7%)
	女性	2332.6	2343.5 [+0.5%] (+0.2%)	2339.3 [+0.3%]	2343.0 [+0.4%] (+0.2%)	2390.6 [+2.5%] (+2.2%)

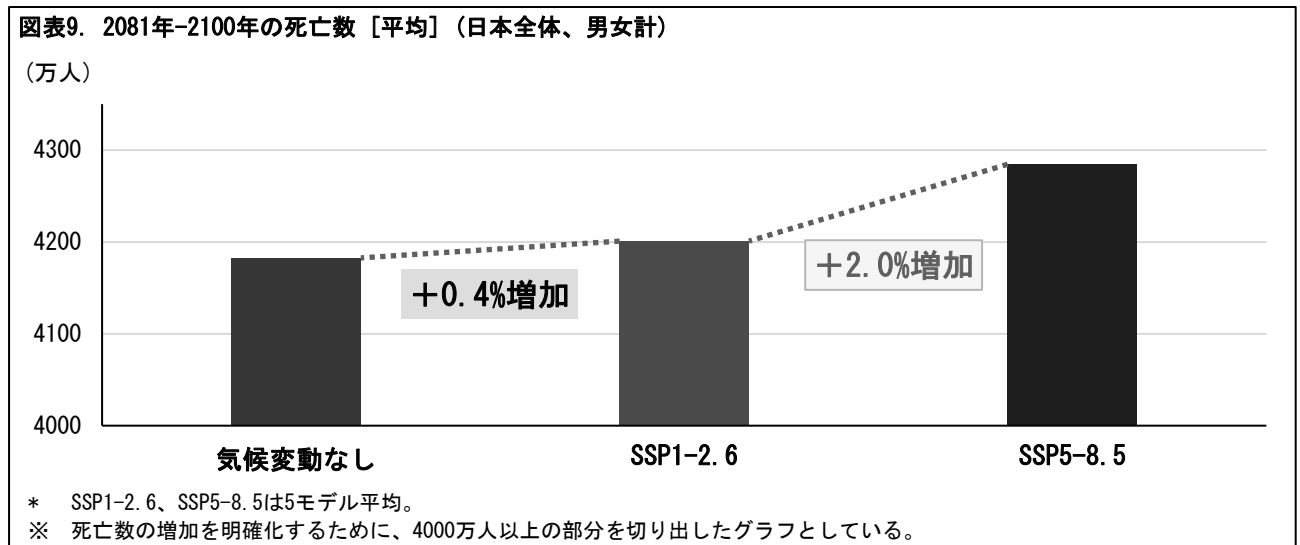
* SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5は5モデル平均。SSP1-1.9は3モデル平均。

※[]は気候変動なしからの増減率、()はSSP1-2.6からの増減率。2022年までは実績(端数処理のため計算が完全には合わない場合がある)

⁸ 気候変動がなかった場合の死亡数は、現在(正確には、回帰式作成に用いた学習データの時期(2009~2019年(2011年を除く)))の気候の状態が2100年まで続くとした場合の死亡数を指す。具体的には、気候指数の項をすべてなくして、時間項、定数項、地域区分ダミー項、月ダミー項だけからなる回帰式を作成して、その回帰式に、時間項の変数、地域区分ダミー項と月ダミー項のダミー変数を代入して死亡率を計算し、これに人口を掛け算して計算した。

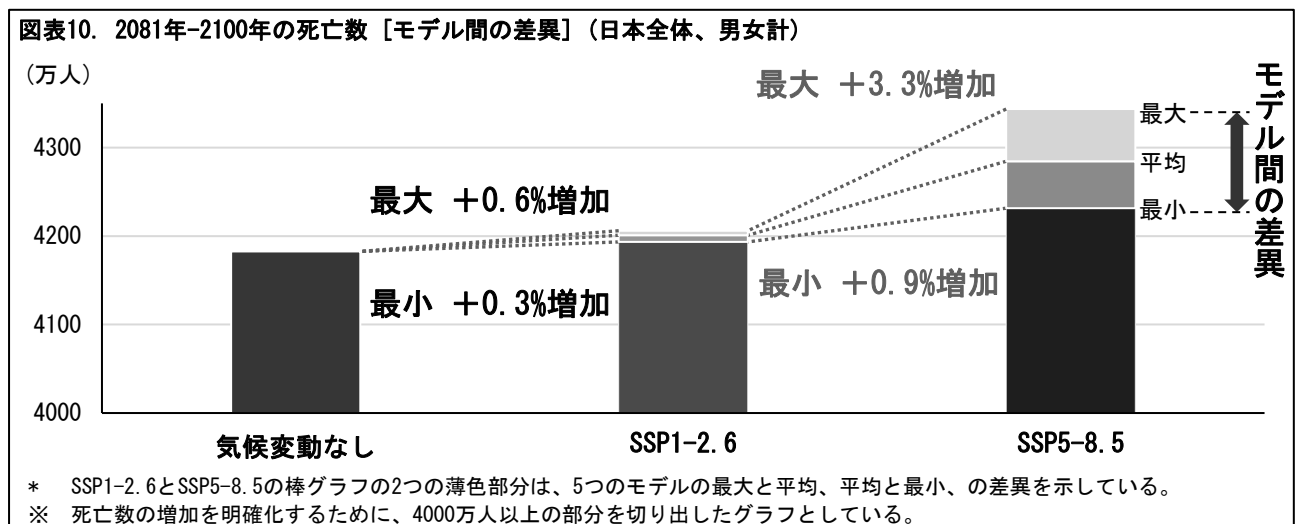
気候変動がない場合に比べて、SSP1-2.6の経路で気候変動が起きた場合、2081-2100年の死亡数は+0.4%増加する。そして、SSP5-8.5の経路で気候変動が起きた場合、同死亡数はSSP1-2.6の経路からさらに+2.0%増加する、との予測結果となった。

これは、SSP1-2.6とSSP5-8.5との間で、2081-2100年の死亡数の増加が膨らむことを意味している。このように、気候変動が激しくなると、死亡数の増加が膨らむ可能性がある、と言える。⁹



3 | 気候変動が激しくなると、死亡数増加の不確実性が高まる可能性がある

死亡数の予測については、モデルごとの違いも見ておきたい。前章で見たとおり、死亡率に関しては、SSP5-8.5での上昇はSSP1-2.6での上昇よりも、モデル間の差異が大きく広がっていた。棒グラフに5つのモデル間の最大と最小の差異を示す薄色部分を描き加えたところ、次の図の通りとなった。SSP1-2.6では、死亡数増加の差異はそれほど大きくないが、SSP5-8.5では差異が大きくなっている。SSP5-8.5の経路では、SSP1-2.6の経路に比べて、死亡数の気候モデル間の差異が拡大している様子がうかがえる。気候変動が激しくなると、死亡数予測の不確実性が高まる可能性がある、と言える。



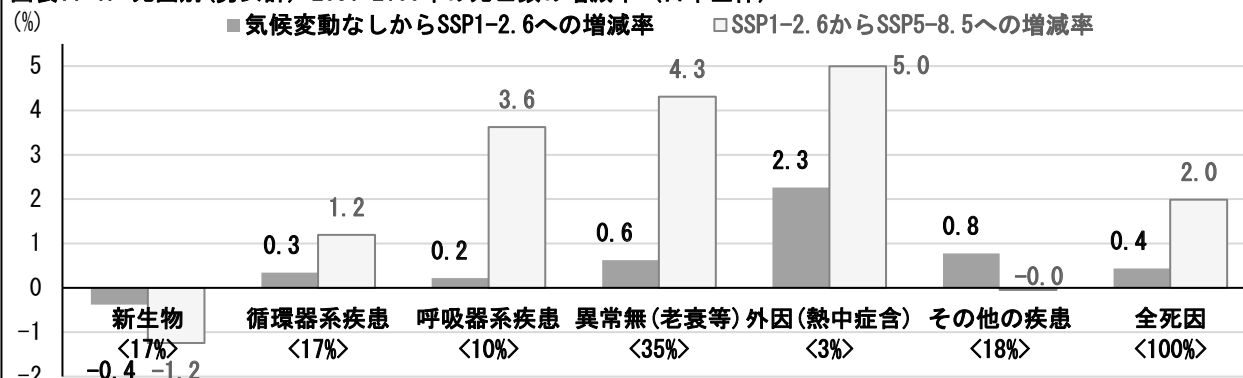
⁹ 本稿で得られた核心的な推論部分に下線を付している。

4 | 死因別：異常無(老衰等)の増加が大きく、これが全死因での死亡数増加につながっている

第2節では、2081-2100年の死亡数について、気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率が+0.4%、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率が+2.0%との結果であることを示した。本節以降では、これらの増減率について、死因、年齢群団、月、地域区分のそれぞれについて、要素に分けて見ていく。

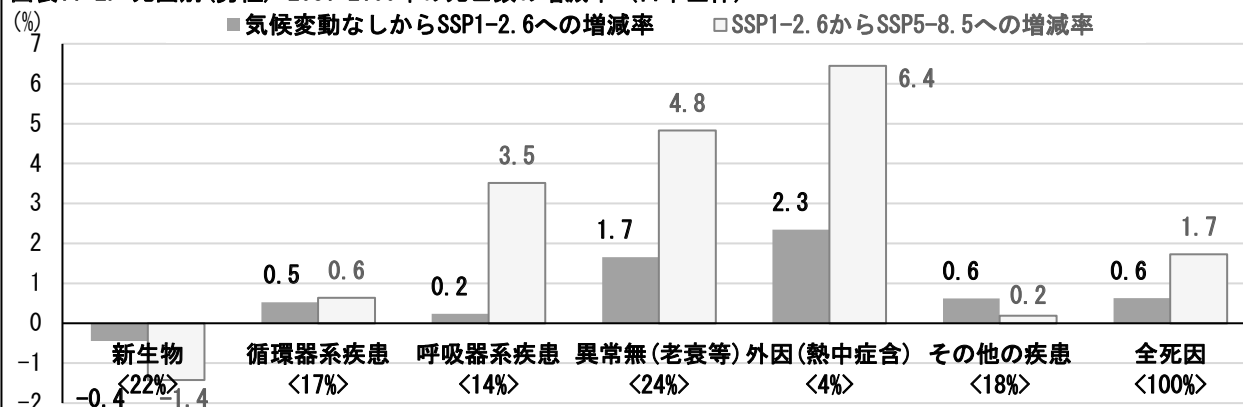
まず、死因ごとに見てみよう。気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率は、外因(熱中症含)で大きい。SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率は、呼吸器系疾患、異常無(老衰等)、外因(熱中症含)で大きい。新生物では、2つの増減率はいずれもマイナスとなっている。新生物の減少よりも異常無(老衰等)の増加が大きく、これが全死因での増加につながっているものとみられる。男女別にみると、男性でこの傾向が顕著となっている。

図表11-1. 死因別(男女計) 2081-2100年の死亡数の増減率(日本全体)

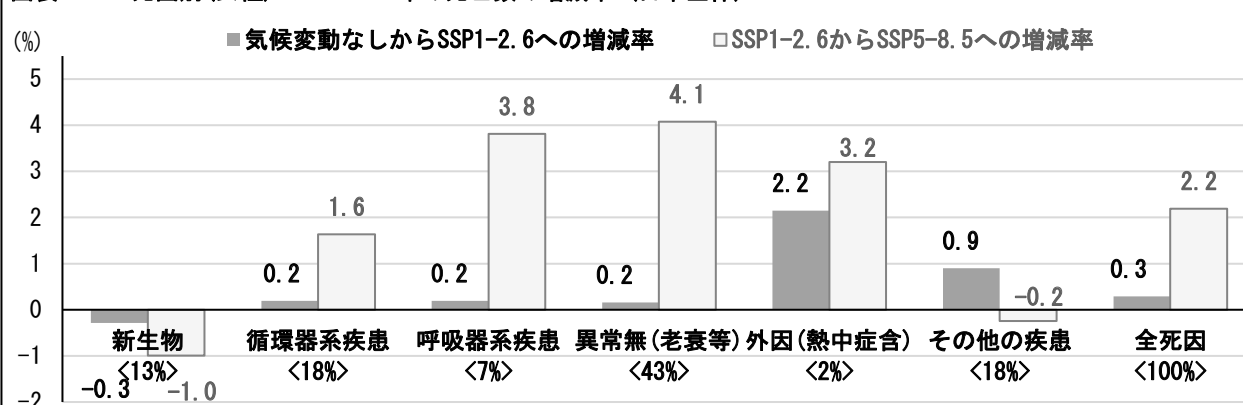


* < > は、その死因の死亡数(気候変動なしの場合)が全死因の死亡数に占める割合(以下、同様)

図表11-2. 死因別(男性) 2081-2100年の死亡数の増減率(日本全体)



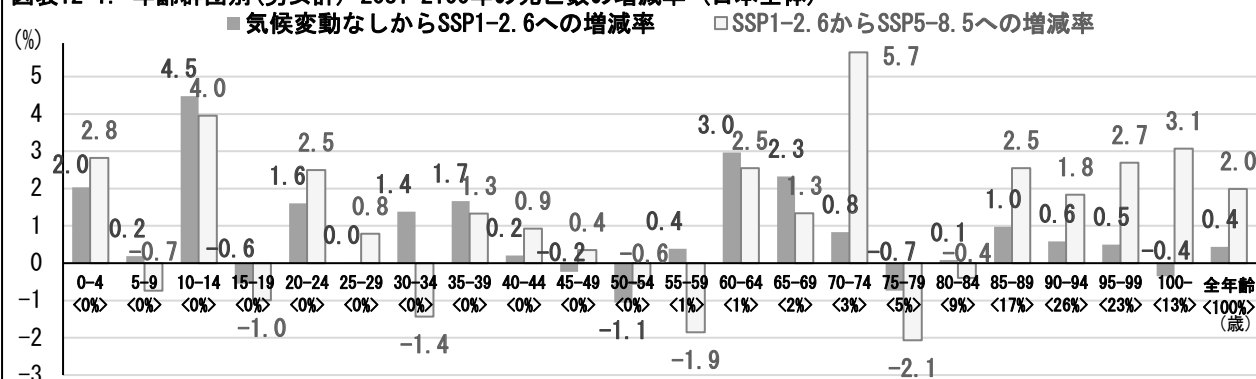
図表11-3. 死因別(女性) 2081-2100年の死亡数の増減率(日本全体)



5 | 年齢群団別：SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減では、85 歳以上の年齢群団で死亡数が増加

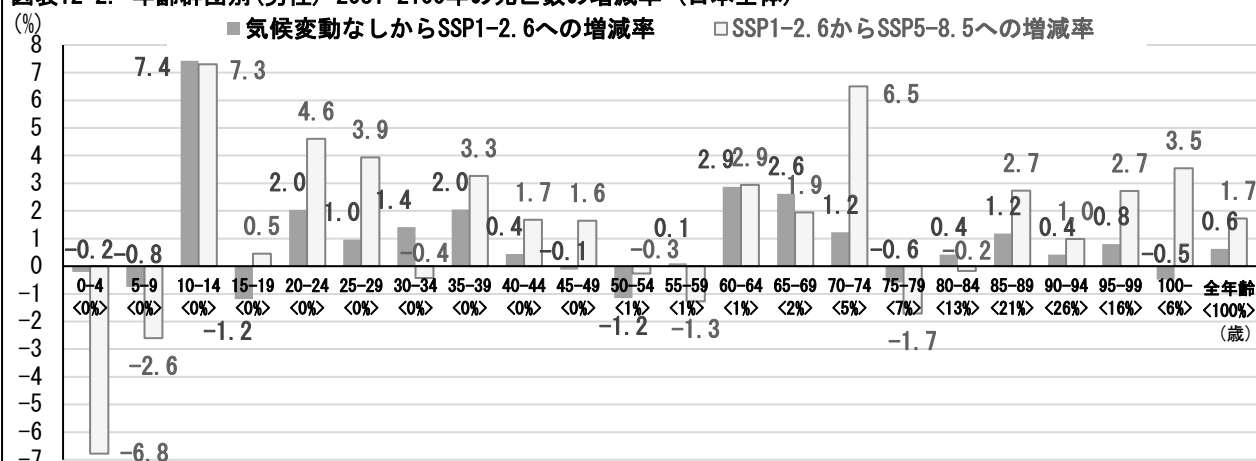
次に、年齢群団別に見ていく。気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率は、10-14 歳、60-64 歳、65-69 歳で大きい。一方、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率は、10-14 歳、70-74 歳、95-99 歳、100 歳-で大きい。特に、全年齢の死亡数に占める割合が大きい 85 歳以上の高齢層ではどの年齢群団も死亡数が増加しており、これが全年齢での増加につながっているものとみられる。男女別に見ると、20 歳代から 50 歳代にかけて、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率が男性はプラス、女性はマイナスとなる年齢群団が多い。

図表12-1. 年齢群団別(男女計) 2081-2100年の死亡数の増減率(日本全体)

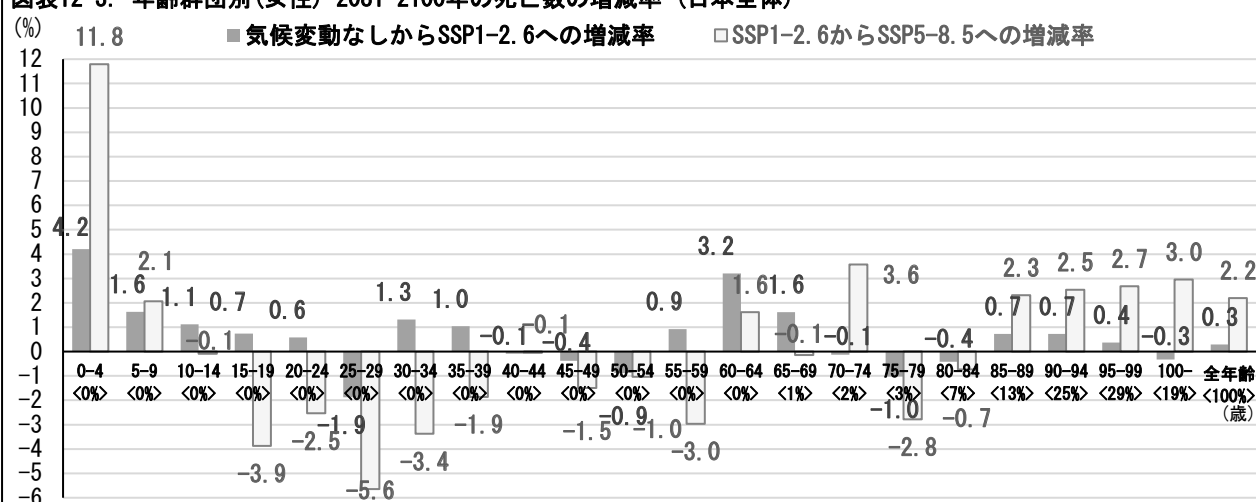


* < > は、その年齢群団の死亡数(気候変動なしの場合)が全年齢の死亡数に占める割合(<0%は0.5%未満を表す)(以下、同様)

図表12-2. 年齢群団別(男性) 2081-2100年の死亡数の増減率(日本全体)

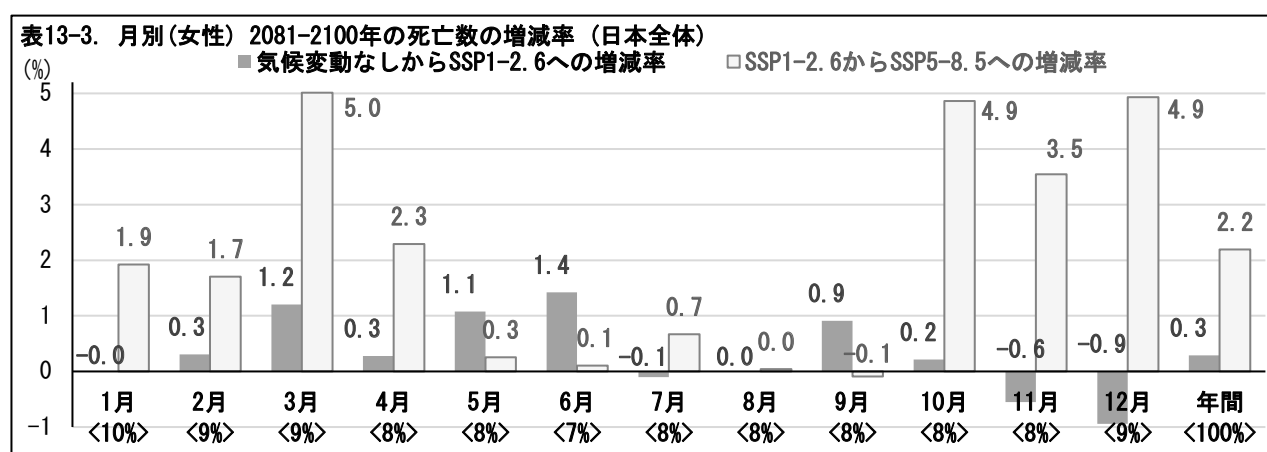
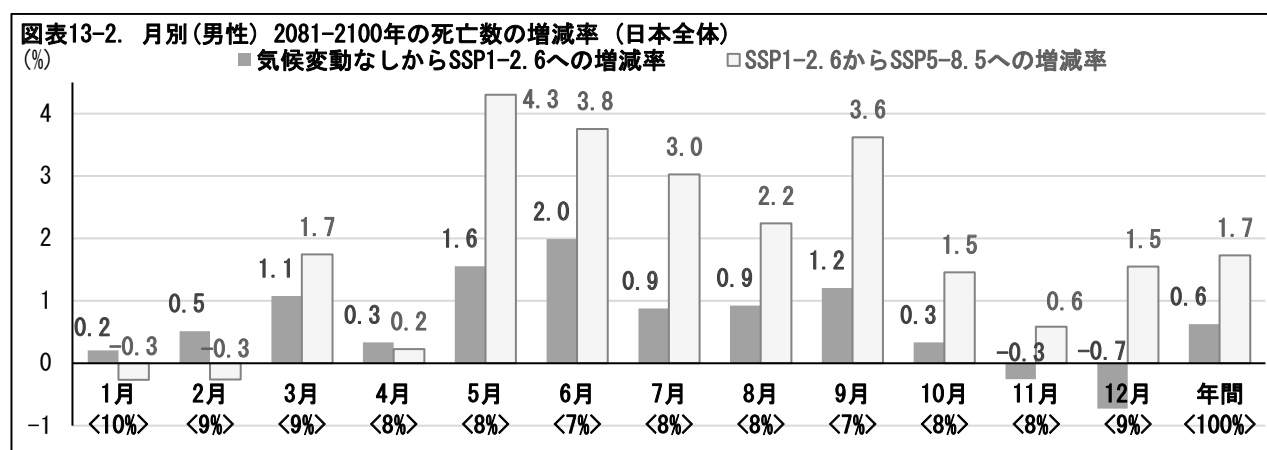
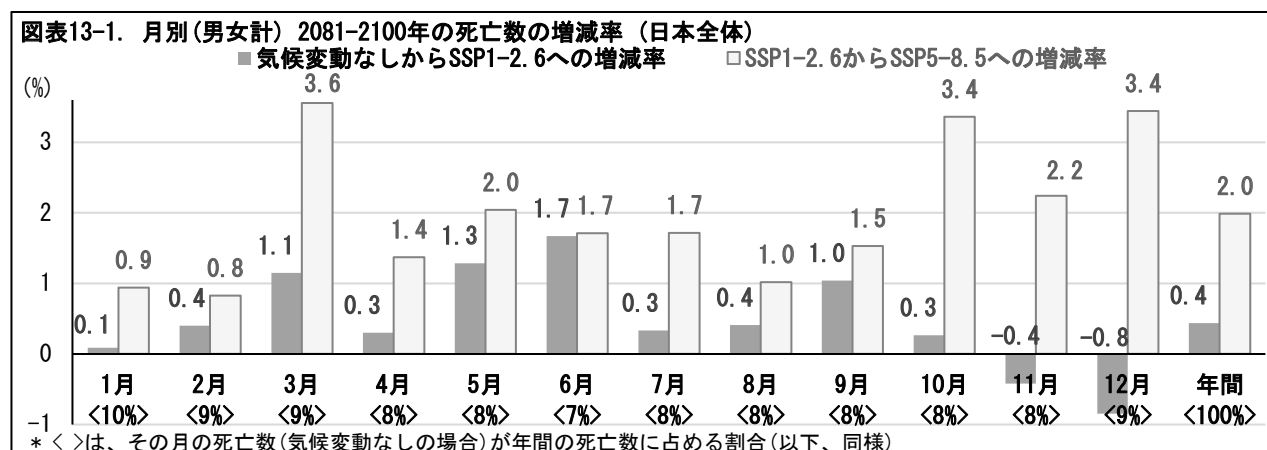


図表12-3. 年齢群団別(女性) 2081-2100年の死亡数の増減率(日本全体)



6 | 月別：春先や秋から冬にかけて、死亡数が大きく増加する

続いて、月別に見てみる。気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率は、3 月、5 月、6 月に大きい。11 月と 12 月は減少となっている。一方、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率は、3 月、10 月、11 月、12 月に大きい。SSP5-8.5 の経路で推移すると、春先や秋から冬にかけて、死亡数が大きく増加する可能性があることを示している。なお、夏季は気候変動の影響を比較的受けないとの結果となった¹⁰。男女別に見ると、男性は夏季、女性は秋季から冬季にかけて気候変動の影響を受ける傾向が見られる。

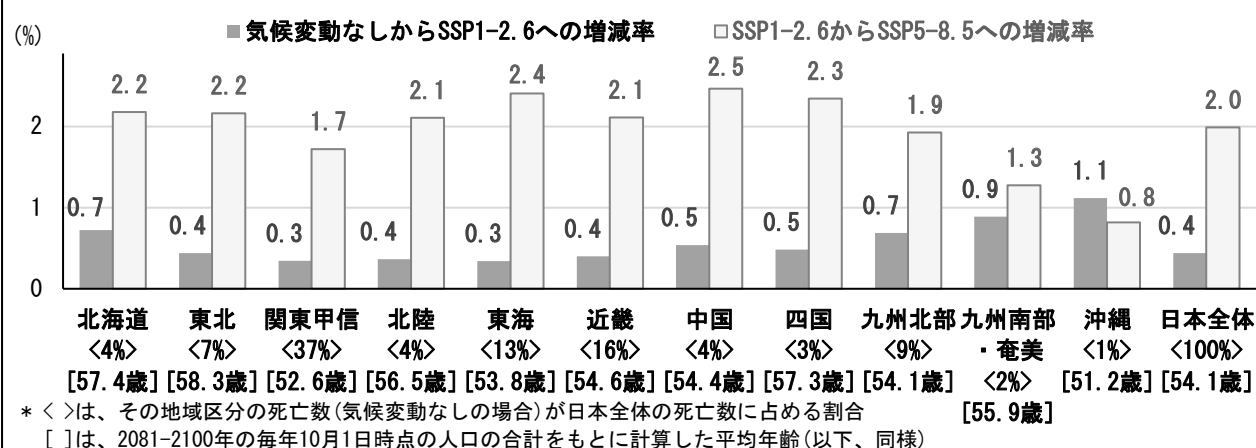


¹⁰ 回帰式の学習データ(実績データ)の特性から、熱中症による死亡はあまり反映されていないことが考えられる。

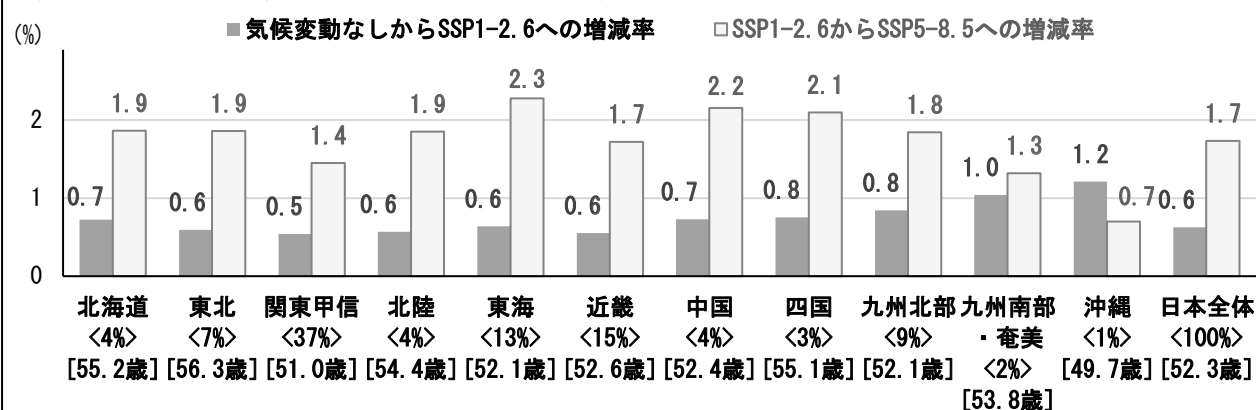
7 | 地域区分別：関東甲信は、気候変動の影響が他の地域に比べて小さい

続いて、地域区分別に見てみよう。気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率は、関東甲信や東海でやや小さく、北海道、九州南部・奄美、沖縄で大きくなっている。一方、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率は、関東甲信、九州南部・奄美、沖縄で小さく、東海、中国、四国で大きいとの結果であった。日本全体の死亡数に占める割合が大きい関東甲信や近畿では、気候変動の影響が他の地域に比べて小さい傾向がうかがえる。大都市に比べて地方では高齢化が進むなど、地域区分ごとに年齢分布が異なってくるのが、その要因の1つとみられる。男女別に見ると、こうした傾向は男性で顕著となっている。

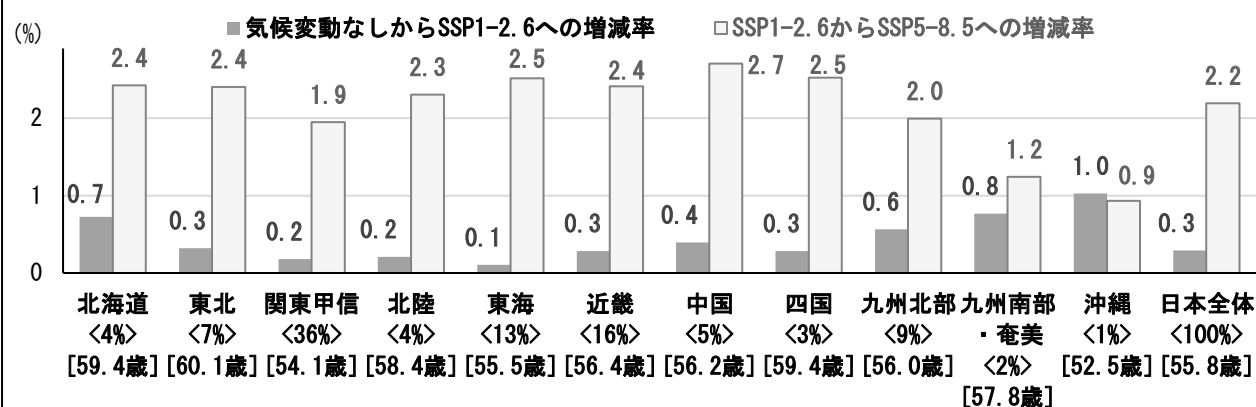
図表14-1. 地域区分別(男女計) 2081-2100年の死亡数の増加率



図表14-2. 地域区分別(男性) 2081-2100年の死亡数の増加率



図表14-3. 地域区分別(女性) 2081-2100年の死亡数の増加率



5——考察

気候変動が死亡率や死亡数に与える影響について、考察を行っていく。なお、本章の内容は、全面的に筆者の私見であることを最初に申し上げておく。

1 | 本稿のポイントは？ — 気候変動が激しくなると、死亡数の予測の不確実性が高まることもポイント

本稿では、ここまで数十ページに渡り、気候指数の作成、死亡率と気候指数の関係の定式化、関係式を用いた気候変動の経路ごとの将来死亡率予測を行ってきた。それでは、本稿のポイントは何だろうか？

実は「気候変動が激しくなると、死亡数の増加が膨らむ」ということは、計算を行う前からある程度予想されたことだ。疫学や生気象の学術研究では、気温が上昇して猛暑日が増えると、熱中症をはじめ、循環器系疾患や呼吸器系疾患の患者が増加する、といった研究結果が公表されている。患者数が増えれば、死に至る重篤な患者も出現する。その結果、死亡率は上昇すると考えられる。

本稿では、気候変動の経路に応じて、死亡率がどれくらい上昇するか、死亡数は何パーセント増加するかを定量化した。これは、本稿のポイントの1つと考えられる。しかし、筆者が考える本稿のポイントは、これだけではない。

気候政策により昇温を抑える経路に比べて、気候政策をとらずに昇温が進む経路では、死亡率上昇や死亡数増加のモデル間の差異が大きくなる。つまり、「気候変動が激しくなると、死亡数の予測の不確実性が高まる」— このことも本稿のポイントの1つではないか、と筆者は考えている。

気候変動が及ぼす死亡率の上昇を、リスク管理の視点から考えてみよう。一般に、死亡率が平均的にどれくらい上昇するか、死亡数が平均的に何パーセント増加するかといった、“平均的”な結果は、リスク管理においては1つの要素である。こうした予測は「ベスト・エスティメイト(最良推定)」(Best Estimate, BE)と呼ばれる。死亡率や死亡数の分布が正規分布や二項分布のようにBEを中心に左右対称となる場合、実際の数値がBEを超えてしまう可能性は50%となる。BEの水準に対する備えでは、こうした死亡率や死亡数のブレには対応できない。BEにブレの分を加算した水準の備えが必要となる。そのブレを示すものとして、モデル間の差異(Inter-Model Differences, IMD)を用いることが考えられる。例えば、BEにIMDの一定割合を加算した水準の備えを行うことで、ブレの分を含めて対応する。¹¹

本稿では、SSP5-8.5では、SSP1-2.6に比べて、死亡率や死亡数のモデル間の差異が大きくなることを示した。これは、SSP5-8.5の経路で気候変動が進むと想定した場合、平均の上昇分だけではなく、予測のブレの増大分も踏まえて、予定死亡率を設定する必要があることを示唆している。

なお、今回は5つのモデルでの計算にとどまるものであった。本来は、数十個など、もっと多くのモデルを用いてモデル間の差異を求めることが望ましい。そうすれば、ブレについて、より多くの定量的な情報が得られる。より多くのモデルを用いたIMDの精緻化が、計算の改良に向けた課題の1つと考えられる。

¹¹ 生命保険の死亡保障で言えば、死亡率に安全割増といわれる割増しを行うことで、死亡率の一定の上ブレに備えている。死亡保障保険では、安全割増を行った予定死亡率が、保険料の設定や責任準備金の積立に用いられている。

2 | 膨大な量のデータや算式による計算を行った意義は？ — 異常値の影響を緩和した効果

本稿では、気候指数の計算において、全国を 11 の地域区分に分けて、各地点に複数の観測地点を設定した。気象データ 154 地点、潮位データ 57 地点で、重複を省いて全国 175 地点のデータを取得、加工した¹²。気象データは 1971～2023 年の毎日、潮位データは同期間の毎月のデータであり、データ量は膨大なものとなった。

次に、死亡率と気候指数の関係の定式化において、同期間の死亡数と人口のデータを取得したうえで、性別、年齢群団、死因、時期(暑熱期とそれ以外の時期)の 504 本の回帰式を作成した。各式はダミー変数として月ダミーや地域区分ダミーを含んでいる。さらに、ロジット変換の実施、時間項の導入、気温に関する 2 乗項の設定など、技術的な要素を盛り込んでおり、回帰式は複雑なものとなった。

そして、気候変動の経路に応じた将来死亡率の予測では、地域区分ごとに、5 つのモデルで、2024～2100 年の毎日の気象データをもとに気候指数を作成して、それを関係式に代入していった。得られた結果は、大量のものとなった。

そこで、疑問として出てくるのが、「このような膨大なデータや数式による計算を行う意義は何か?」という点だ。

これについて、筆者は、膨大な計算には異常値の影響を緩和した効果があった、と考えている。一般に、予測計算においては、データに含まれる異常値の影響を取り除くことが困難なことが多い。異常であることの検知や判断が容易ではないことに加えて、異常の発生原因が不明であることが多いためだ。本稿では、原則として、異常値と見られるデータや計算結果が検知されたとしても、それを取り除くのではなく、膨大なデータに混入させることで、結果的に異常値の影響を緩和することに至った。¹³

例えば、気候指数の計算において、一部の観測地点では指数が急上昇するケースが見られている。これを他の地点の指数と平均化することで、地域区分ごとの気候指数への影響を緩和している。

また、一部の年齢群団では、SSP5-8.5 の経路の死亡率が SSP1-2.6 の経路の死亡率に比べてマイナスとなっている。これは、異常と判断すべきかどうかはわからない。

こうした結果を、死亡数の計算では他の年齢群団と合計することで、死亡数全体への影響を緩和している。結果として、膨大なデータや計算を取り扱うことにより、気候変動と死亡率の関係を全体的に把握することはできているものと考えられる。

なお、本来、異常値については、その発生原因の解明に努め、必要に応じて除去等の対応を図ることが基本的な取扱いと考えられる。計算の改良に向けた課題の 1 つとして取り組む必要がある。

¹² ただし、モデルに気象データがない父島と南鳥島の 2 地点や潮位データについては、加味せずに気候指数を作成し、それを回帰式の計算に用いた。

¹³ 気候指数については、山に設置された測候所の地点(例. 富士山)では、一部のデータが取得できない場合があり、その場合はその地点のデータは用いていない。また、2011 年の東日本大震災や 2000 年の三宅島噴火など、自然災害による観測中断期間がある場合は、その内容を見て採否を判断している。

6—おわりに

本稿では、これまで行ってきた気候指数の作成、死亡率と気候指数の関係の定量化(回帰式の立式)をもとに、気候変動が死亡率や死亡数に及ぼす影響を計算して、日本全国で複数のモデルを用いて、その予測を試みた。

その結果、「気候変動が激しくなると、死亡数の増加が膨らみ、予測の不確実性が高まる可能性がある」との推論を得ることができた。(第4章第2節および第3節)

ただし、この推論は、気候変動と死亡率の相関関係をもとに導出したもので、メカニズムを明らかにしたものとは言えない。前章に記したとおり、結果の解釈にはさまざまな課題が残っている。これらの課題に対応して、予測の精度を高め、その解釈をわかりやすいものとするのが求められる。

今後は、引き続き、気候変動が人の生命や健康に及ぼす影響に関して、国内外の各種調査・研究の動向のウォッチを続けるとともに、因果関係の検証など、推論の精度向上に努めることとしたい。

参考文献・資料

1. 「一般気象学〔第2版補訂版〕」小倉義光著(東京大学出版会, 2016年)
2. 「絵でわかる地球温暖化」渡部雅浩著(講談社, 2018年)
3. 「日本の気候」(気象庁HP)
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kisetsu_riyou/tenkou/Average_Climate_Japan.html
4. 「地球温暖化『日本への影響』—新たなシナリオに基づく総合的影響予測と適応策—」(環境省環境研究総合推進費 戦略研究開発領域 S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究 2014 報告書, S-8 温暖化影響・適応研究プロジェクトチーム)
5. “The Effect of Weather on Respiratory and Cardiovascular Deaths in 12 U.S. Cities” (Alfésio L. F. Braga, Antonella Zanobetti, and Joel Schwartz, 2002)
6. “Models for the Relationship Between Ambient Temperature and Daily Mortality” (Ben Armstrong, 2006)
7. 「全国都道府県市区町村別面積調」(国土地理院)
8. 「住民基本台帳人口」(総務省)
9. 「過去の気象データ・ダウンロード」(気象庁HP)
<https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>
10. 「歴史的潮位資料+近年の潮位資料」(気象庁HP)

11. 「過去の気象データ検索」(気象庁 HP)

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index>

※ なお、データのダウンロードは、自動化ツール等は用いずに、観測地点ごとに人の手を介して行っている。

12. 「人口動態統計」(厚生労働省)

13. 「死因分類表」(厚生労働省)

14. 「国勢調査」(総務省)

15. 「人口推計」(総務省)

16. 「SPSS による回帰分析」内田治著(オーム社, 2013 年)

17. 「環境省における CCUS に係る取組み ―政策と事業の概要―」(環境省, 2023 年 10 月 27 日)

18. 「経済産業省における CCUS の取組み」(経済産業省, 2023 年 10 月 27 日)

19. 「気候予測データセット 2022 解説書」(文部科学省 気象庁, 令和 4 年 12 月(令和 6 年 3 月改訂))

20. “About History of the IPCC” (IPCC HP)

<https://www.ipcc.ch/about/history/>

21. 「IPCC の概要や報告書で使用する表現等について」(気象庁, 令和 3 年 8 月 9 日付報道発表資料 別添 3)

22. “Technical Summary” (IPCC WG1)

23. “Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, 1 and climate sensitivity in MIROC6” (Geoscientific Model Development Discussions, Discussion started: 16 July 2018)

<https://doi.org/10.5194/gmd-2018-155>

24. “Description of MIROC6 AGCM” (MIROC6 AGCM document writing team, April 13, 2021)

25. 「日本の将来人口推計(令和 5 年推計)」(国立社会保障・人口問題研究所)

26. 「日本の地域別将来推計人口(令和 5 年推計)」(国立社会保障・人口問題研究所)

27. 「現代気候変動入門 ―地球温暖化のメカニズムから政策まで―」アンドリュー・E・デスラー著 神沢博監訳 石本美智訳(名古屋大学出版会, 2023 年)

28. 「地球温暖化はなぜ起こるのか ―気候モデルで探る 過去・現在・未来の地球」真鍋淑郎、アンソニー・J・ブロッコリー著 増田耕一・阿部彩子監訳 宮本寿代訳(講談社, ブルーバックス B-2202, 2022 年)

29. 「図解・気象学入門 改訂版 ―原理からわかる雲・雨・気温・風・天気図」古川武彦、大木勇人著(講談社, ブルーバックス B-2235, 2023 年)

30. 「地球規模の気象学 ―大気の大循環から理解する新しい気象学」保坂直紀著(講談社, ブルーバックス B-2245, 2023 年)