

基礎研 レポート

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
(03)3512-1823 tshino@nli-research.co.jp

〈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°C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。

はじめに

近年、世界的に気候変動問題への注目度が高まっている。地球温暖化の進行により、台風、豪雨、熱波、干ばつ、大規模山林火災、海面水位上昇など、さまざまな影響が地球環境にもたらされている。

2022年度には、その極端さを数量的に把握する試みを手掛けた。その成果として、2023年4月6日のレポート¹および2024年4月5日のレポート²では、日本全国版の気候指数を作成した。気候指数は、気候変動の物理的リスクのうち、長期間に渡って徐々に環境を破壊していく「慢性リスク」を定量的に表示するものとして、さまざまな活用法が考えられる。

次に2023年度には、気候指数の活用法の一例として、気候指数と死亡率の関係を、回帰分析の統計手法を用いて定量的に把握することを試みた。その成果である2023年8月31日のレポート³および2024年1月18日のレポート⁴では、このようにして得られた回帰計算結果は、近年の死亡数実績を概ね再現するものであったことを示している。

そして2024年度には、気候指数と死亡率の関係式をもとに、気候変動に応じた将来死亡率の予測に取り組んだ。2024年8月15日のレポート⁵(以下、「前回のレポート」)では、関東甲信地域を対象とし、1つの気候モデル(MIROC6)に限定して、将来死亡率の試算を行った。この試算により、「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するとともに、気候モデルを5つに拡張して死亡率の予測計算を行った。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°C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。

以下、順次その内容を見ていくが、まず本稿の流れを示しておきたい。第1章では気候指数の作成、第2章では気候指数と死亡率の関係の定式化に関する、これまでの取組みの振り返りを行う。そして、第3章では将来の気候変動の指数化、第4章では死亡率シナリオの作成と将来の死亡数の予測について、手法の考え方や技術的な検討点などを紹介する。第5章から第7章では、計算結果を示す。第5章では気候指数の予測結果、第6章では死亡率の予測結果、第7章では死亡数の予測結果を概観していく。そして第8章では、考察を行う。第9章は、簡単なまとめである。

本稿が、気候変動問題について、読者の関心を高める一助となれば幸いである。

¹ 「気候指数 [全国版] の作成ー日本の気候の極端さは1971年以降の最高水準」 篠原拓也著(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2023年4月6日)

² 「気候指数 2023年データへの更新ー日本の気候の極端さは、1971年以降の最高水準を更新」 篠原拓也著(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2024年4月5日)

³ 「気候変動と死亡数の増減ー死亡率を気候指数で回帰分析してみると…」 篠原拓也著(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2023年8月31日)

⁴ 「気候変動と死亡数の関係ー2022年データで回帰式を更新し、併せて改良を図ってみると…」 篠原拓也著(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2024年1月18日)

⁵ 「気候変動:死亡率シナリオの試作ー気候変動の経路に応じて将来の死亡率を予測してみると…」 篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2024年8月15日)

[目次]

はじめに.....	2
1—気候指数の作成.....	5
1 気候指数には慢性リスク要因の影響の定量化が求められる.....	5
2 地域区分ごとに複数の観測地点を設定.....	5
3 気象データの観測地点は気象台等とする.....	6
4 観測地点は、全部で 174 地点 (気象データ 154 地点、潮位データ 57 地点).....	7
5 気候指数は地域区分ごとに作成し、その平均から日本全体の指数を作る.....	8
6 月ごとと季節ごとの指数を作成する.....	8
7 指数は参照期間の平均と標準偏差をもとに乖離度の大きさとして表される.....	8
8 各項目について、閾値等を用いて指数を作成する.....	9
9 合成指数は、高温、降水、湿度、海面水位の 4 つの指数の平均とする.....	10
10 日本全体では合成指数が 1971 年以降の最高水準で推移している.....	10
2—気候指数と死亡率の関係の定式化.....	12
1 気候指数の活用—気候変動が人の生命や健康に与える影響を定量的に把握.....	12
2 7 つの気候指数すべてを回帰計算に使用.....	12
3 大震災やコロナ禍の年のデータは回帰計算に使用しない.....	12
4 直近 10 年分のデータを学習データとして、回帰式を作成.....	13
5 回帰式は、性別、年齢群団、死因、暑熱期とそれ以外の時期別に 504 本作成.....	13
6 回帰式にはロジット変換や対数変換を組み入れる.....	13
7 ダミー変数は、地域区分と月について組み込む.....	14
8 高温と低温の指数については、2 乗の項も用いる.....	14
9 死亡率の改善トレンドを、時間項として織り込む.....	14
10 2010 年代以降、実績と回帰は概ね近接している.....	16
3—将来の気候変動の指数化.....	21
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.....	21
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.....	23
3 回帰式の再計算にあたり、データのない父島と南鳥島と、海面水位の指数は除く.....	24
4 モデルのデータの利用に関して、技術的な調整を 3 つ行う.....	24
4—死亡率シナリオの作成と将来の死亡数の予測.....	26
1 回帰式の海面水位の項は除去する.....	26
2 将来の人口の推移には「日本の将来人口推計」を用いる.....	27
3 死亡率に人口を掛け算したものを月単位の死亡数に調整する.....	27
4 死亡率の改善トレンドの織り込みは、当初 10 年間に限定する.....	28
5 死亡数計算結果の人口への反映は行わない.....	28
5—気候指数の予測結果.....	29
1 気候モデルは、過去の観測実績を概ね再現している.....	29
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.....	32

6—死亡率の予測結果	37
1 気候指数が死亡率に与える影響割合は2%弱.....	37
2 2060年代以降、SSP5-8.5はSSP1-2.6を上回り、徐々にその差が拡大.....	37
3 死亡率は、2060年代以降、SSP5-8.5の経路がSSP1-1.9の経路を上回ることが多くなる.....	40
4 死因別：異常無(老衰等)の影響が大きい.....	41
5 年齢群団別：高齢層は温暖化の影響を受けやすい.....	45
6 季節別：温暖化は男性には夏季の死亡率上昇、女性には夏季以外の死亡率上昇をもたらす.....	48
7 地域区分別：温暖化が死亡率に与える影響の出現時期は、地域によって異なる.....	50
7—死亡数の予測結果	51
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.....	51
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.....	52
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.....	53
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.....	54
5 年齢群団別：SSP1-2.6からSSP5-8.5への増減では、85歳以上のどの年齢群団も死亡数が増加... ..	55
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.....	56
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.....	57
8—考察	58
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.....	58
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.....	59
3 得られた結果をどのように解すべきか？ — 因果関係の検証を行うべきだが容易ではない.....	60
4 気候変動に対する適応はどう反映すべきか？ — 諸研究の成果を踏まえて計算に取り入れていく....	61
9—おわりに	62
参考文献・資料	63
筆者の過去の関連レポート	64
上記の各レポートの関係と、今回のレポートの位置づけ	65
付録図表	エラー! ブックマークが定義されていません。

1—気候指数の作成

将来の気候変動経路に応じた死亡率の予測に入る前に、本章と次章では、これまでの取組みについて簡単に見ておくこととする。本章では、2022年度に手掛けた気候指数の作成について振り返る。⁶

1 | 気候指数には慢性リスク要因の影響の定量化が求められる

近年、世界的に、社会経済のさまざまな場面で気候変動問題に対する注目度が高まっている。台風や豪雨などの自然災害の頻発化・激甚化をはじめ、干ばつや海面水位上昇などに伴う食糧供給や生活環境の悪化が懸念されている。その対策として、カーボンリサイクル、ネットゼロ、CCS(二酸化炭素回収・貯留)⁷、再生可能エネルギー⁸の導入促進といった温室効果ガス排出削減の取組みや、それをファイナンスの面から支える、グリーンボンド(環境債)・サステナビリティボンドの発行等の動きが、各国で進められている。

そこで問題となるのが、そもそも気候の極端さは、いまどの程度高まっているのか、そして将来どれくらいにまで高まっていくのか、という点だ。気候変動リスクには、豪雨による河川の氾濫や土砂災害のように、短時間のうちに急激に環境が損なわれる「急性リスク」だけではなく、海面水位上昇による沿岸居住地域の喪失のように、長期間に渡って徐々に環境を破壊していく「慢性リスク」もある。気候指数には、こうした慢性リスク要因の影響を定量的に示していくことが求められる。

2 | 地域区分ごとに複数の観測地点を設定

このような慢性リスクを定量化すべく、これまでに、気象庁の気候区分をもとに、日本全体を12の地域区分に分けて、気候指数を作成してきた。この区分は、一般的な地方区分を踏まえつつ、都道府県の行政単位ごとに設定することが、主な狙いとなっている。

図表 1. 地域区分



地方分類

- (北日本)
 - ・北海道
 - ・東北
- (東日本)
 - ・関東甲信
 - ・北陸
 - ・東海
- (西日本)
 - ・近畿
 - ・中国
 - ・四国
 - ・九州北部
 - ・九州南部
- (沖縄・奄美)
 - ・奄美
 - ・沖縄

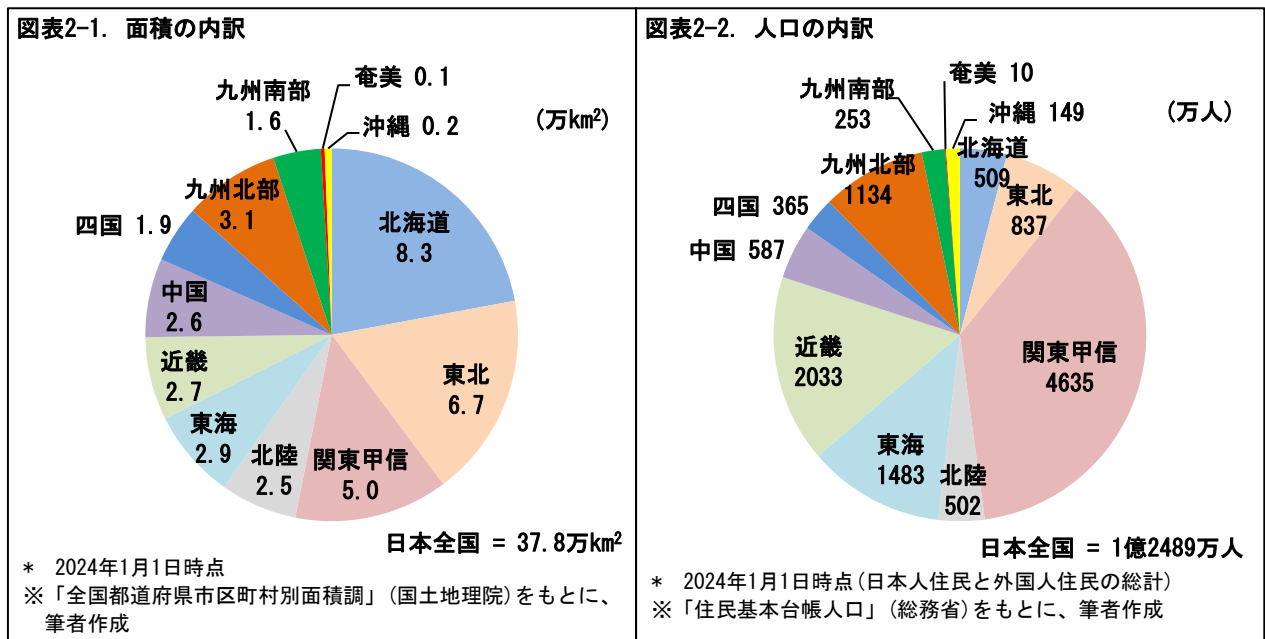
※ 「日本の気候」(気象庁HP)(https://www.ima.go.jp/ima/kishou/known/kisetsu_rivou/tenkou/Average Climate Japan.html)より

⁶ 第1章の内容は、2ページの注記1、2に示したレポートの概要となっている。

⁷ CCSは、Carbon dioxide Capture and Storageの略。日本では、北海道の苫小牧沿岸域にて、二酸化炭素の分離・回収、圧入、貯留等に関する大規模実証試験が実施される等、早期の社会実装に向けた取組みが進められている。

⁸ 太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス等自然界にあるエネルギー。遍在し枯渇せず利用時に二酸化炭素を排出しない。

なお、奄美については面積や人口が他の地域と比べて小さい。また、他の地域が都道府県単位であるのに対して、奄美は鹿児島県の一部であり市町村単位での設定となっている。そこで、気候指数の作成においては、九州南部と合わせた「九州南部・奄美」の地域区分を設定することとしている。この結果、日本全国を11の地域区分に分けることとなる。



3 | 気象データの観測地点は気象台等とする

各地域区分に複数の観測地点を設定して、そのデータをもとに気候指数を作成する。そして、各地点の気候指数を平均化したものを、その地域区分の気候指数とする⁹。

各地域区分で設定する気象データの観測地点は、原則として気象台等¹⁰とする。気象台等では、過去からの日々の観測要素(気温、降水量、風、湿度、天気など)が取得できるためである¹¹。無人観測施設であるアメダス¹²による観測地点でも、降水量、風、気温などのデータが取得できるが、湿度や一部の項目が取得できないなどの制約があることから、気候指数作成用の気象データとしては用いない。また、すでに観測を停止している地点のデータも用いないこととする。

なお、海面水位指数の作成には潮位データを用いるが、後述の通り、今回の死亡率シナリオの作成では、同指数は使用しない。そこで、潮位データの観測地点の選定については注記欄に記す。¹³

気象データは、日単位のものとし、各観測地点の「日最高気温(°C)」、「日最低気温(°C)」、「降水量の日合計(mm)」、「日平均風速(m/s)」、「日平均相対湿度(%)」のデータとする。乾燥指数のため

⁹ 各地点の気候指数は、気象や潮位のデータの参照期間(1971~2000年)平均からの乖離度(平均と標準偏差を用いて算定)として計算される。そのため、各地点の平均をとることができる。

¹⁰ 気象台の他に、有人の気象観測施設も含まれる。

¹¹ 一部の項目のデータが取得できない気象台等もある。その場合、その観測地点のデータは気候指数作成には用いない。

¹² 国内約1300か所の気象観測所で構成される気象庁の無人観測施設。アメダス(AMeDAS)は、Automated Meteorological Data Acquisition System(地域気象観測システム)の通称。

¹³ 潮位データについては、1997年3月以前の潮位の観測値が「歴史的潮位資料」、1997年4月以降の潮位の観測値が「近年の潮位資料」として、気象庁より公表されている。ただし、歴史的潮位資料は、すべての潮汐観測地点で公表されているわけではなく、長期に渡って観測を続けている地点に限られる。一方で、過去のデータはあるものの、すでに観測を停止しているために、直近のデータがない地点も多く見られる。そこで、各地域区分で設定する潮位データの観測地点は、歴史的潮位資料と近年の潮位資料が公表されていて、かつ現在も観測継続中の地点としている。

に、降水に関しては、降水現象の有無に関する「現象なし情報」も用いる。潮位データは、月単位のものとし、各観測地点の「月平均潮位 (cm)」を用いる。

4 | 観測地点は、全部で 174 地点 (気象データ 154 地点、潮位データ 57 地点)

以上の検討の結果、観測地点は下表のとおりとなった。気象データとして 154 地点、潮位データとして 57 地点のデータを気象庁のホームページより取得し、これらをもとに気候指数を作成している。

このうち、気象データと潮位データを両方とも観測しているものが 37 地点¹⁴。気象データのみを観測しているものが 117 地点。潮位データのみを観測しているものが 20 地点となっている。全部で、174 の観測地点のデータをもとに、気候指数を作成する。¹⁵

図表 3. 気候指数作成にデータを用いる観測地点の一覧 (174 地点)

	地域区分	気象データ (154 地点)	潮位データ (57 地点)
北日本	北海道	札幌 函館 江差 寿都 小樽 倶知安 岩見沢 旭川 羽幌 留萌 稚内 北見枝幸 雄武 紋別 網走 室蘭 苫小牧 浦河 帯広 広尾 釧路 根室	函館 小樽 稚内 網走 釧路 花咲
	東北	青森 深浦 むつ 八戸 盛岡 宮古 大船渡 仙台 石巻 秋田 酒田 新庄 山形 福島 若松 白河 小名浜	深浦、下北 宮古
東日本	関東甲信	水戸 つくば 宇都宮 日光 前橋 熊谷 秩父 千葉 銚子 勝浦 館山 東京 大島 三宅島 八丈島 父島 南鳥島 横浜 甲府 河口湖 長野 軽井沢 松本 諏訪 飯田	布良 東京 岡田 父島 南鳥島
	北陸	新潟 高田 相川 富山 伏木 金沢 輪島 福井 敦賀	佐渡 富山 能登
	東海	岐阜 高山 網代 三島 石廊崎 静岡 御前崎 浜松 名古屋 伊良湖 四日市 津 上野 尾鷲	石廊崎 御前崎 内浦 清水港 舞阪 名古屋 尾鷲 鳥羽
西日本	近畿	彦根 京都 舞鶴 大阪 神戸 豊岡 姫路 洲本 奈良 和歌山 潮岬	舞鶴 大阪 淡輪 神戸 洲本 和歌山 白浜 串本 浦神
	中国	鳥取 米子 境 松江 浜田 西郷 岡山 津山 福山 広島 呉	境 浜田 西郷 宇野
	四国	徳島 高松 多度津 松山 宇和島 室戸岬 高知 宿毛 清水	小松島 高松 松山 宇和島 室戸岬 高知 土佐清水
	九州北部	萩 山口 下関 福岡 飯塚 佐賀 雲仙岳 佐世保 平戸 長崎 福江 巖原 熊本 人吉 牛深 大分 日田	長崎 福江 大浦 口之津
	九州南部	延岡 宮崎 都城 油津 鹿児島 阿久根 枕崎 種子島 屋久島	油津 鹿児島 枕崎 種子島
	沖縄・奄美	奄美	名瀬 沖永良部
沖縄		那覇 名護 久米島 南大東島 宮古島 石垣島 西表島 与那国島	那覇 石垣 与那国

* 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る。その場合、その地点のデータは用いない。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た。

¹⁴ 気象データの観測地点である石垣島と、潮位データの観測地点である石垣は、同一としてカウントした。与那国島と与那国も同様。

¹⁵ 観測地点ごとの「気象データが空欄となっていた日数と観測方法変更年」と「潮位データが空欄となっていた月数と観測開始年月」については、付録図表をご覧ください。

5 | 気候指数は地域区分ごとに作成し、その平均から日本全体の指数を作る

各地域区分の指数は、それぞれに含まれる観測地点の指数の単純平均とする。

そのうえで、日本全体の気候指数を、各地域区分の単純平均として作る。平均の計算にあたり、九州南部と奄美については、「九州南部・奄美」を用いている。

6 | 月ごとと季節ごとの指数を作成する

指数は、月ごとおよび四半期の季節単位(12~2月、3~5月、6~8月、9~11月)に作成する。そして、月や季節の指数と併せて、月の5年移動平均、季節の5年移動平均の指数も作成する。これは、気候変動を、短期間の変動としてではなく、より長いスパンで捉えようとする試みである。¹⁶

7 | 指数は参照期間の平均と標準偏差をもとに乖離度の大きさとして表される

気候指数は、7つの項目の乖離度をもとに計算する。7つの項目とは、高温、低温、降水、乾燥、風、湿度、海面水位を指す。計算にあたり、1971~2000年の30年間を、参照期間とする。そして、あらかじめ、各項目の計数値について、参照期間中の同じ月(季節)の平均と標準偏差を求めておく。(以下、本章では季節については、月に関する文の「月」を「季節」と読み替えていただきたい。)

まず、ある1つの項目に、注目する。この項目について、ある月の乖離度を求めることにしよう。そのためには、その月の計数値から、参照期間中の平均を引き算する。その引き算の結果を、参照期間中の標準偏差で割り算する。このようにすることで、その月の計数値が、標準偏差の何倍くらい、平均から乖離しているかという、乖離度が計算できる。

$$\text{気候指数} = \text{ある月の乖離度} = (\text{その月の計数値} - \text{平均}) \div \text{標準偏差}$$

このようにして気候指数を作成することにはさまざまなメリットがある。まず、地域や時期による違いの要素を取り除いて純粹に気象の極端さを測ることができる。例えば、11月のある日の最高気温が30℃だったとしても、その場所が北海道か沖縄かでは、極端さの意味合いが異なる。また、東京の日最高気温が30℃だったとしても、それが7月か、11月かでは極端さが違ってくるだろう。気候指数を乖離度をもとに設定することで、こうした地域や時期による違いの要素を除去できる。

次に、気候指数は気温の“℃”や、降水の“mm(ミリメートル)”などの単位を持たない「無名数」となっている。このため、高温と降水といった異種の気候指数同士の比較が可能となる。また、無名数であるため、複数の気候指数の平均をとることができる。各地域区分や日本全体の気候指数、(後に述べる)合成指数の作成は、平均をとることができるというメリットを生かしたものとなっている。

気候指数の水準の解釈については、乖離度が標準正規分布に従うものと想定すると、-1から1の間に入る確率は、約68.3%となる。逆に、乖離度が1を超える確率は、約15.9%となる。乖離度が2を超えるのは珍しいことで、その確率は、約2.3%。乖離度が3を超えるのは大変珍しいことで、約0.1%

¹⁶ なお、やや細かい点ではあるが、参照期間の当初5年間(1971~1975年)については、実績が5年分に満たないため、移動平均をとっても変動が大きくなる。そこで、この期間は、5年移動平均の不足分を1971~1975年の平均で補うこととしている。

の確率となる。この乖離度を、次節の通り、7つの項目それぞれについて計算していく。

8 | 各項目について、閾値等を用いて指数を作成する

以下の(1)～(7)では、項目別に作成方法を概観していく。いずれも、参照期間を基準として、それと比較した“極端さ”の度合いを示すものとして乖離度を用いる、という方針が貫かれている。

(1) 高温：上側 10%に入る日の割合から算出

高温は、参照期間中の気温分布に照らした場合に、上側 10%の中に入る日が、月の日数のうち何日を占めるかという割合をとる。例えば、ある年の 12 月 24 日については、1971 年から 2000 年までの 12 月 24 日とその前後 5 日間(12 月 19～23 日および 25～29 日)の、合計 330 日分のデータのうち、33 番目に高いデータを閾値(しきいち)とする。そして、閾値以上の日が、月の日数(12 月の場合は 31 日)のうち何日あったかという割合をとる。

気温は、1 日のうちにも変動するため、日最高気温と日最低気温のそれぞれについて、その割合をとる。この割合から、参照期間の平均を差し引き、その結果を参照期間の標準偏差で割り算して、それぞれの乖離度が計算される。そして、その和半をとって、高温の指数とする。¹⁷

(2) 低温：下側 10%に入る日の割合から算出

低温は、高温と同様に、参照期間中の気温分布に照らした場合に、月の日数のうち、下側 10%の中に入る日が、何日を占めるかという割合をみる。日最高気温と日最低気温のそれぞれについて、その割合をとる。この割合から、参照期間の平均を差し引き、その結果を参照期間の標準偏差で割り算して、それぞれの乖離度が計算される。そして、その和半をとって、低温の指数とする。

(3) 降水：連続する 5 日間の降水量の最大値から算出

降水は、月のうち、連続する 5 日間の降水量をみる。高温と同様に、参照期間中の降水量の上側 10%の中に入る日が、その月にどれだけあるかという割合でみていく。この割合から、参照期間の平均を差し引き、その結果を参照期間の標準偏差で割り算して、降水の指数とする。

(4) 乾燥：乾燥日が連続する日数から算出

乾燥の指数は、連続乾燥日から算出する。すなわち、乾燥日は何日続くかという、最大連続日数についてデータをとる。その際、乾燥日をどのように判定するかが検討ポイントとなる。降水量が 0 ミリメートルでも、わずかながら降水が見られる場合と、まったく降水が見られない場合があるためだ。

これについては、気象データにおいて観測単位(降水量 0.5 ミリメートル)未満で、降水の現象の有無の観測をした結果として表示されている「現象なし情報」を用いて判定する¹⁸。

参照期間中の同月の乾燥日の最大連続日数をもとに、その月の参照期間からの乖離度が計算される。これを、乾燥の指数とする。

(5) 風：上側 10%に入る日の割合から算出

風は、参照期間中の日平均風速の分布に照らした場合に、月の日数のうち、上側 10%の中に入る日

¹⁷ 合計 330 日分のデータのうち 33 番目に高いデータを閾値として、閾値以上の日数の割合をとる方法は、低温、降水、風、湿度の指数の算出においても同様に行っている。

¹⁸ 現象なし情報は、降水の現象があった日は 0、なかった日は 1 の値で表示されている。

が、何日を占めるかという割合をとる。この割合から、参照期間の平均を差し引き、その結果を参照期間の標準偏差で割り算して、乖離度が計算される。これを、風の指数とする。

(6) 湿度：上側 10%に入る日の割合から算出

湿度は、参照期間中の日平均相対湿度の分布に照らした場合に、月の日数のうち、上側 10%の中に入る日が、何日を占めるかという割合をとる。この割合から、参照期間の平均を差し引き、その結果を参照期間の標準偏差で割り算して、乖離度が計算される。これを、湿度の指数とする。

(7) 海面水位：参照期間中の同じ月のデータと比較して算出

海面水位は、月平均潮位から算出する。ただし、季節によって海面水位の高さは変わる。そこで、参照期間中の同月の 30 個のデータをもとに、参照期間の平均と標準偏差を計算する。それらをもとに、その月の平均潮位の参照期間からの乖離度が計算される。これを、海面水位の指数とする。

9 | 合成指数は、高温、降水、湿度、海面水位の 4 つの指数の平均とする

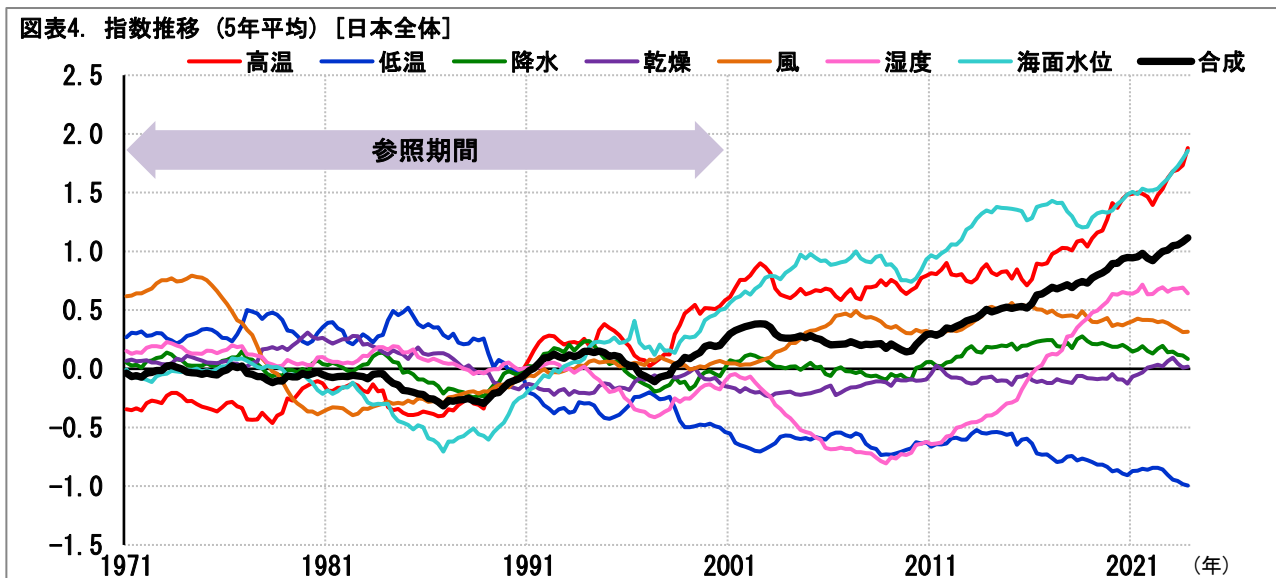
最後に、以上の 7 項目の指数をもとに、気候変動の状況を端的に表すために、合成指数を算出する。

7 項目の指数のうち、高温と低温はともに気温についての項目であり、相互に関連があるものと考えられる。また、降水と乾燥は、反対の事象を表す項目と言えるため、負の相関があるものとみられる。さらに、風については、観測方法がよく変更されており、データが空欄となっていた日数も多いなど、データの一貫性に難があるという課題が残っている。¹⁹

このため、合成指数は、高温、降水、湿度、海面水位の 4 項目の平均として算出している。²⁰

10 | 日本全体では合成指数が 1971 年以降の最高水準で推移している

以上の設定のもとで気候指数を作成して、グラフに示したものが次の図である。ここでは、日本全体の気候指数の推移(5年平均)を示している。²¹



¹⁹ 気象データのうち日平均風速は、1971～2023年の間に、すべての観測地点で少なくとも1回、多い地点では4回、観測方法が変更されている。また、空欄の日数は、他の気象データに比べて多い。(詳細は、付録図表をご参照いただきたい。)

²⁰ なお、観測地点ごとに合成指数を算出する場合には、海に面していない観測地点(気象データのみを観測している地点)では、高温、降水、湿度の3項目の平均として、合成指数を計算する。

²¹ 後述の通り、死亡率予測においては、父島と南鳥島の気候指数は用いないが、ここではそれらを含めている。なお、注記2に示す2024年4月5日のレポートの内容から、一部計算方法の見直しを行っている。

合成指数は、参照期間である 1971～2000 年にはゼロ前後で推移している。2000 年代には、0～0.5 の範囲内で変動していたが、2010 年代に入ると上昇傾向が顕著となった。2013 年に 0.5 を超え、2022 年には 1 に達し、2023 年には 1.1 を上回る水準に上昇した。合成指数は、1971 年以降の最高水準で推移している。

高温指数と海面水位指数の 2 つは、長らく合成指数を上回る水準で推移し続けている。高温指数は、上昇基調にあり、2010 年代半ば以降は上昇の勢いが増している。海面水位指数も、2020 年代に上昇傾向を強めている。

湿度指数は、1990 年代後半以降マイナスで推移していたが、2010 年代に急上昇し、プラスに転じている。2020 年代は、0.5 を上回る水準で落ち着いている。

低温指数は、低下を続けている。気温の指数として高温指数とあわせてみると、極端な高温の日が増加する一方、極端な低温の日は減少している、と言える。

降水指数と乾燥指数は、いずれもゼロ近辺で推移している。風指数は、概ね 0～0.5 の範囲内での変動となっている。この 3 つの指数については、近年、大きな上昇や低下の動きは見られていない。

2023 年についてまとめると、高温指数と海面水位指数は大きく上昇した。一方、降水指数と湿度指数は大きな変化はなかった。その結果、合成指数の上昇が引き起こされ、1971 年以降の最高水準の更新につながったものといえる。

なお、地域区分別等の気候指数推移については、付録図表にグラフを所収しているので、ご参照いただきたい。

このようにして、各地域区分と日本全体の気候指数を作成した。気候指数は、気候の極端さの観点から、気候変動の状況を数値化したものであり、さまざまな活用方法が考えられる。その 1 つとして、気候指数と死亡率の関係を定式化して、将来の死亡率シナリオの作成を行うことが挙げられる。

次章以降で、その内容を見ていく。

(以下、本ページ余白)

2—気候指数と死亡率の関係の定式化

本章では、2023 年度に手掛けた気候指数と死亡率の関係の定式化について、概要を振り返る。²²

1 | 気候指数の活用—気候変動が人の生命や健康に与える影響を定量的に把握

気候指数の用途として、さまざまなものが考えられる。例えば、中長期的な地球温暖化の進展や、気候変動に伴う生物多様性への影響を見極める際に、気候指数を活用することが考えられる。

気候指数を通じて、気候変動が人の生命や健康に与える影響を定量的に予測することも考えられる。気温上昇により、高温指数が上昇した時に、死亡率はどれだけ高くなるのか、健康はどれだけ損なわれるのか、といった点の解明である。

そこで、これまでに気候変動と死亡率の関係を回帰分析の統計手法を用いて把握することを試みた。

関係式は、まず死亡数と人口のデータをもとに死亡率(目的変数)を求め、気候指数(説明変数)を用いて、それを回帰計算する手法で導出した。具体的には、性別、年齢群団、死因別に回帰式を立式して、各説明変数の係数を算出した。その際、ロジットを用いた分析²³、気温関連の気候指数(高温、低温)の 2 乗項の設定、時間項の導入、ダミー変数を通じた月や地域区分ごとの差の反映など、いくつかの技術的な工夫を行った。

2 | 7つの気候指数すべてを回帰計算に使用

回帰式の設定において、どの気候指数を説明変数に用いるかという点について、検討を行った。回帰式に採用する気候指数を限定することも検討したが、その場合、いくつかの影響がこぼれ落ちてしまうことが懸念された。例えば、低温指数を排除すると、低温が循環器系疾患による死亡に与える影響は表現できなくなる。また、降水指数を不採用とすると、降水が自殺を含めた精神疾患に及ぼす影響も加味されなくなる、等である²⁴。そこで、関係の解明の有無によらず、7 つの気候指数すべてを回帰計算に使用することとした。

気候指数は、グラフでの表示に用いる 5 年移動平均のものではなく、月ごとの指数をそのまま用いている。なお、極端な気象現象が死亡率に影響を及ぼすまでの“タイムラグ”は生じないものと想定した。

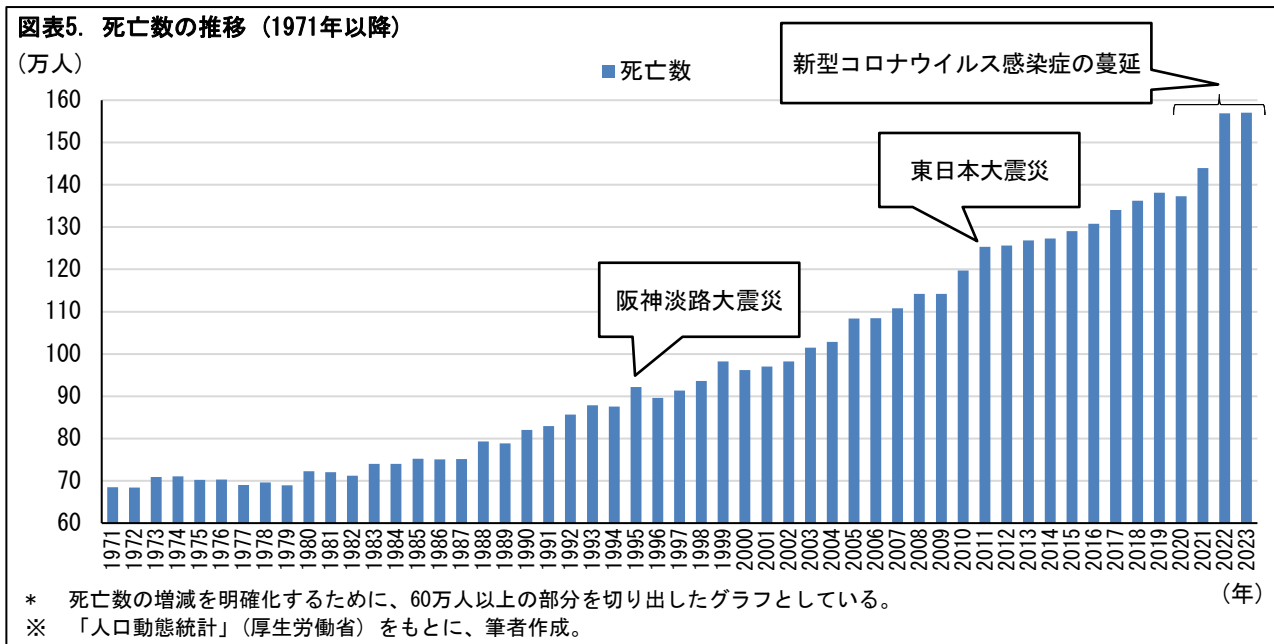
3 | 大震災やコロナ禍の年のデータは回帰計算に使用しない

死亡数のデータは「人口動態統計」(厚生労働省)、人口のデータは「国勢調査」と「人口推計」(いずれも総務省)を用いている。死亡数と人口は、毎年、データが公表されている。直近では、2023 年の死亡数(確定値)の実績が公表されている。2022 年、2023 年の死亡数は約 156.9 万人、157.1 万人となっており、コロナ禍の影響により高い水準が続いている。このようにコロナ禍や大震災等の気候変動以外の影響が明らかな 1995、2011、2020-23 年のデータは、回帰計算の学習データには使用しないこととした。

²² 第 2 章の内容は、2 ページの注記 3、4 に示したレポートの概要となっている。

²³ 今回の回帰計算は、リンク関数としてロジットを指定した、一般化線形モデル(GLM)の一種とも考えられる。

²⁴ さらに、死亡率との関係が十分に解明されていない気候指数について不採用となる可能性もある。現在、疫学や生気象学の諸研究において、そうした関係の解明に向けた努力が進められているなかにあつて、既に解明された関係だけに着目して気候指数の採否を決定することは、主観的で妥当性を欠く取扱いとなる恐れがある。



4 | 直近 10 年分のデータを学習データとして、回帰式を作成

学習データとして何年分のデータを用いるべきか、試算を通じて検討を行った結果、学習データを 10 年分とするケースの説明力が高いことが判明した。²⁵

この結果から、直近 10 年分の有効なデータ(大震災やコロナ禍の影響を含まないデータ)を用いることとした。

5 | 回帰式は、性別、年齢群団、死因、暑熱期とそれ以外の時期別に 504 本作成

死亡率の分子の死亡数のデータは、性別、年齢群団、死因、地域区分、月別のデータとなるよう、適宜、按分処理等のデータ補整を行う。なお、傷病ごとの死因分類の詳細については、付録図表の「死因の分類について」をご参照いただきたい。

死亡率と高温指数の関係を考えた場合、夏季と冬季とでは、同じ指数 1 の変化でも死亡率に与える影響は異なることが考えられる。そこで、この違いを考慮して、暑熱期(5-9 月)と、それ以外の時期(10-4 月)とで、回帰式を分けることとした。

この結果、回帰式は、性別(2 つ)、年齢群団(21 個)、死因(6 つ)、暑熱期とそれ以外の時期(2 つ)ごとに設定し、全部で 504 本作成する形となった。

6 | 回帰式にはロジット変換や対数変換を組み入れる

死亡率はロジット変換、気候指数は対数変換を施したうえで、回帰計算を行う。

ロジット変換は、0~1 の範囲で値をとる確率を、実数全体に引き延ばす。一方、逆変換は、実数全体を値域として得られた回帰計算の結果を、0~1 の範囲で値をとる確率に変換する。一般に、ロジット変換では、確率が 0.5 近辺の場合、精度が下がるとされる。今回は、死亡率を回帰するもので、その値は、通常、0.5 よりもはるかに小さいことから、変換による精度の低下は限定的と考えられる。

気候指数は負値の場合もありうる。その場合は、そのまま自然対数をとることはできない。そこで、

²⁵ 検討の内容については、2 ページの注記 4 のレポートをご参照いただきたい。

ある定数 C をすべての気候指数に足し算して負値を解消したうえで、自然対数をとることとする。²⁶ 具体的には、過去の気候指数の推移を踏まえて、安全な水準として、 $C=10$ と置くこととした。

7 | ダミー変数は、地域区分と月について組み込む

ダミー変数については、地域区分と月の2種類のものを用いることとする。

地域区分については、11の区分であるため、10個のダミー変数を用いることとなる。一方、月については、暑熱期は4個。それ以外の時期は6個のダミー変数を用いる形となる。

8 | 高温と低温の指数については、2乗の項も用いる

高温と低温の指数については、線形回帰²⁷をやめて、2乗の項も導入する。この取り扱いは、温暖化の健康影響に関する先行研究を踏まえたものである。2014年に公表された環境省の研究費用を用いた研究の報告書²⁸に掲載されている「温暖化の健康影響－評価法の精緻化と対応策の構築－」という報告では、「至適気温」と、それを踏まえた回帰式の立式について、次の説明がなされている。

「厚労省から死亡小票データ、気象庁から気象データを入手して、日別の最高気温と死亡数の関連を観察すると(中略)V字型になる。暑くても寒くても死亡数は増加するので、中間付近に死亡数が最も少ない気温(=至適気温)があり、この気温を超えた、ある気温での死亡数から至適気温での死亡数を引いた部分を超過死亡と定義した。(以下略)」

9 | 死亡率の改善トレンドを、時間項として織り込む

回帰式には、時間項を設定する。一般に、死亡率は時間に応じた改善トレンドを有している。これには、死亡率に影響を与える医療技術や医薬品・医療機器等の進歩をはじめ、社会全体の健康増進意識の高まりや、健康診断等の予防医療の普及。住居や職場等の衛生環境の改善。禁煙・節酒を含む、食生活バランスの見直し。適度な運動等により体を動かすことや、適切な休息・睡眠をとることが重要性であることの認識の浸透など、さまざまな時間的要因が寄与しているものと考えられる。

回帰式に時間項を設定することで、気候変動の要因とは別に、死亡率に改善のトレンドを与える要素を反映して、説明力を高めることが可能となる。

以上の検討の結果、回帰式は、次の通りとなった。

²⁶ 1971年1月～2022年12月の月ごとの気候指数を見ていったところ、最小値は、1977年5月に北陸で記録された海面水位指数 -3.142 。最大値は、2012年9月に北海道で記録された高温指数 5.709 であった。負値の解消ということであれば、 C を 3.142 を上回る定数として設定すればよいこととなる。ただし、今後の変動が過去の変動範囲におさまる保証はない。

²⁷ 説明変数と被説明変数の関係を1次関数で当てはめること。

²⁸ 「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対応策－」(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)

(回帰式)

【暑熱期 (5月~9月)】

$$\begin{aligned} \text{LOGIT} = & h2 \times \{\ln(\text{HT}+C)\}^2 + h1 \times \ln(\text{HT}+C) + l2 \times \{\ln(\text{LT}+C)\}^2 + l1 \times \ln(\text{LT}+C) \\ & + r \times \ln(\text{RF}+C) + d \times \ln(\text{DD}+C) + w \times \ln(\text{WP}+C) + m \times \ln(\text{HM}+C) + s \times \ln(\text{SL}+C) \\ & + t \times \text{TIME} \\ & + I + da1 \times Da1 + \dots + da10 \times Da10 + dm5 \times Dm5 + \dots + dm8 \times Dm8 \end{aligned}$$

【それ以外の時期 (10月~4月)】

$$\begin{aligned} \text{LOGIT} = & h2 \times \{\ln(\text{HT}+C)\}^2 + h1 \times \ln(\text{HT}+C) + l2 \times \{\ln(\text{LT}+C)\}^2 + l1 \times \ln(\text{LT}+C) \\ & + r \times \ln(\text{RF}+C) + d \times \ln(\text{DD}+C) + w \times \ln(\text{WP}+C) + m \times \ln(\text{HM}+C) + s \times \ln(\text{SL}+C) \\ & + t \times \text{TIME} \\ & + I + da1 \times Da1 + \dots + da10 \times Da10 + dm1 \times Dm1 + \dots + dm11 \times Dm11 \end{aligned}$$

(dm* × Dm* の項は、*=5~9 は無し)

* ln(○)は自然対数 Cは負値の気候指数の対数エラーを避けるための定数 (固定値 = 10) を表す。

(ロジット変換・逆変換)

ロジット変換 LOGIT = ln(死亡率 / (1 - 死亡率))

逆変換 死亡率 = exp(LOGIT) / { 1 + exp(LOGIT) }

* ln(○)は自然対数、exp(○)は指数関数を表す。

ここで、回帰式中の各記号について、まとめておく。²⁹

回帰式の記号のまとめ

変数	係数	内容
HTの2乗項	h2	高温指数 (High Temperature) の2乗項
HT	h1	高温指数
LTの2乗項	l2	低温指数 (Low Temperature) の2乗項
LT	l1	低温指数
RF	r	降水指数 (Rain Fall)
DD	d	乾燥指数 (Dry Days)
WP	w	風指数 (Wind Power)
HM	m	湿度指数 (Humidity)
SL	s	海面水位指数 (Sea Level)
TIME	t	時間項
—	I	定数 (Invariable)
Da1~Da10	da1~da10	地域区分ダミー (Dummy Area)
Dm1~Dm11	dm1~dm11	月ダミー (Dummy Month)

※ ただし、Dm*とdm*は、*=1~8、10~11の10個で、*=9のものは無し

左辺の「死亡率」と、右辺の「変数」には、2009-10、12-19年(10年分)の1月~12月の実績データを入力する。そして、重回帰分析を通じて、「係数」の値を求めていく。

²⁹ 回帰計算にあたり、統計ソフトとして、IBM SPSS Statistics バージョン 29.0.1.0 を使用した。

ダミー変数については、地域区分(Da1~Da10)と月(Dm1~Dm11)の2種類のものを用いる。

このうち、Da1~Da10については、北海道はDa1のみ1。東北はDa2のみ1。関東甲信はDa3のみ1。北陸はDa4のみ1。東海はDa5のみ1。近畿はDa6のみ1。中国はDa7のみ1。四国はDa8のみ1。九州北部はDa9のみ1。九州南部・奄美はDa10のみ1。それ以外はすべて0とする。

また、Dm1~Dm11については、1月はDm1のみ1。2月はDm2のみ1。3月はDm3のみ1。4月はDm4のみ1。5月はDm5のみ1。6月はDm6のみ1。7月はDm7のみ1。8月はDm8のみ1。10月はDm10のみ1。11月はDm11のみ1。それ以外はすべて0とする。(Dm9およびdm9は無し。)

2つの回帰式において、定数と、地域区分ダミー、月ダミーにより、気候指数以外の、地域区分や月の違いにともなう死亡率の違いを表すこととなる。

回帰式には、地域区分として11の区分がある。このため、暑熱期の回帰式には $10 \times 11 \times 5$ の550個の実績データ、それ以外の時期の回帰式には $10 \times 11 \times 7$ の770個の実績データがあることとなる。³⁰

10 | 2010年代以降、実績と回帰は概ね近接している

以上の設定のもとで回帰式を作成して、男性と女性の80-84歳と90-94歳の死亡率について死因別にグラフに示したものが次ページ以降の図である。ここでは、日本全国の死亡率の推移を示している。

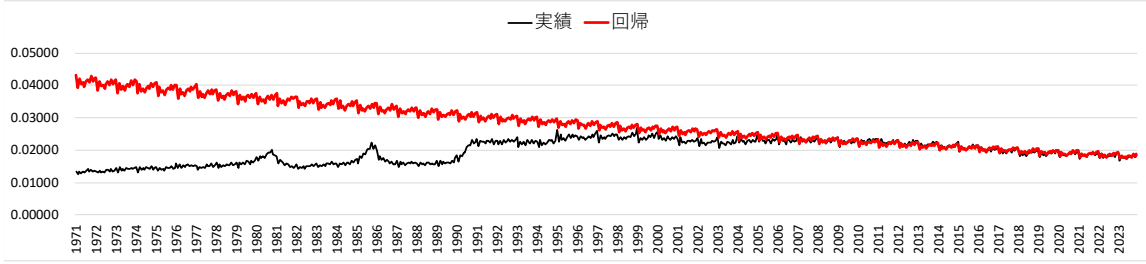
いずれのグラフにおいても、2010年代以降、実績と回帰は概ね近接していると言える。したがって、死亡率の将来予測に、作成した回帰式を用いることは特段問題ないものと考えられる。

(以下、本ページ余白)

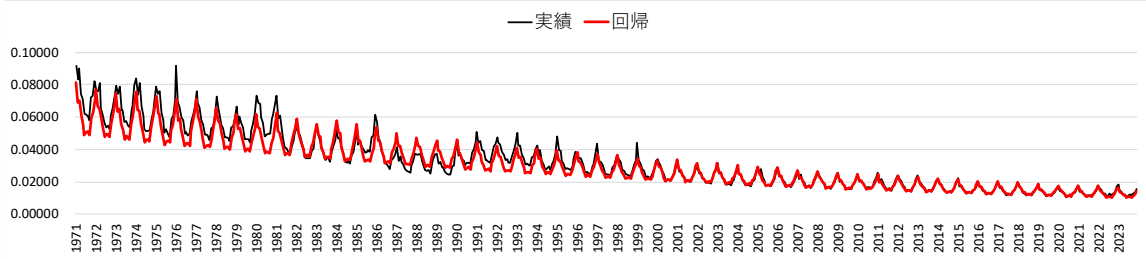
³⁰ ただし、一部の月では、実績データが欠落している場合がありうる。さらに、若齢では、異常無(老衰等)の死因で、死亡率がゼロとなり、ロジット変換できない場合もありうる。こうしたデータがないものや、ロジット変換できないものが出現した場合は、それを除外して回帰分析の作業を進めている。

図表6-1. 死亡率 実績・回帰比較 (男性 80-84歳、日本全国)

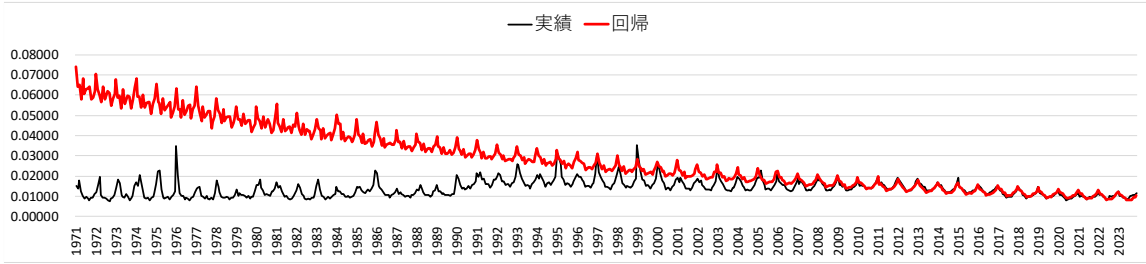
新生物



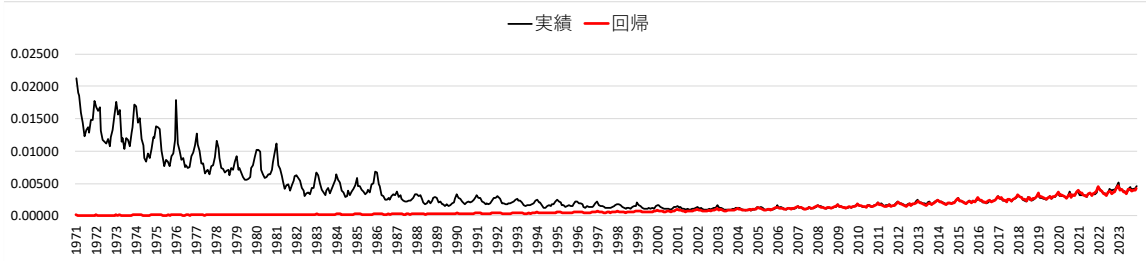
循環器系疾患



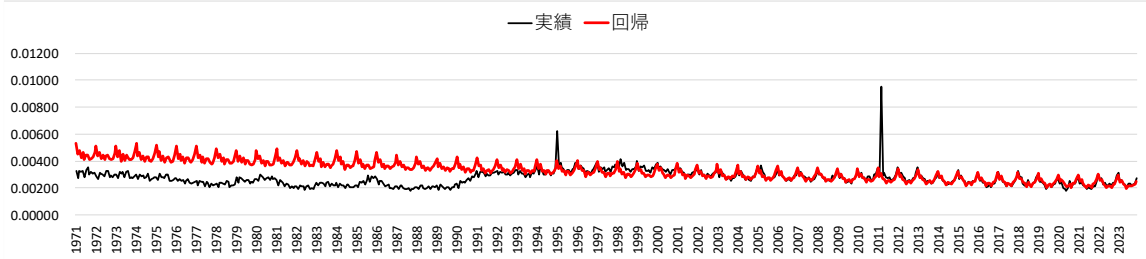
呼吸器系疾患



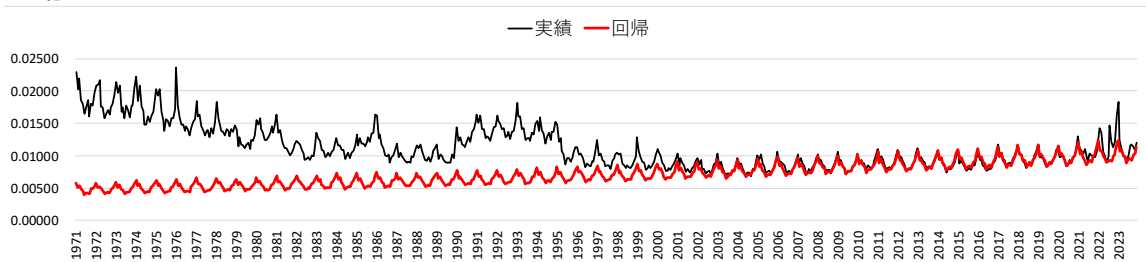
異常無(老衰等)



外因(熱中症含)

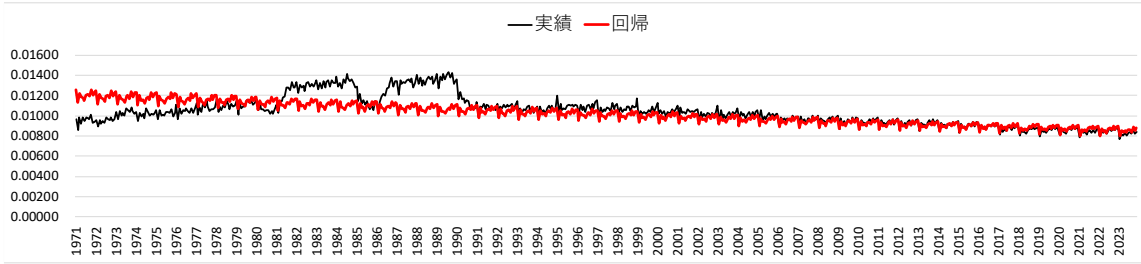


その他

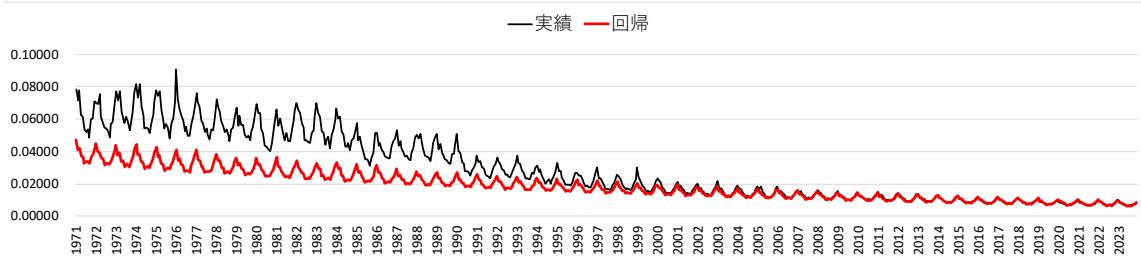


図表6-2. 死亡率 実績・回帰比較 (女性 80-84歳、日本全国)

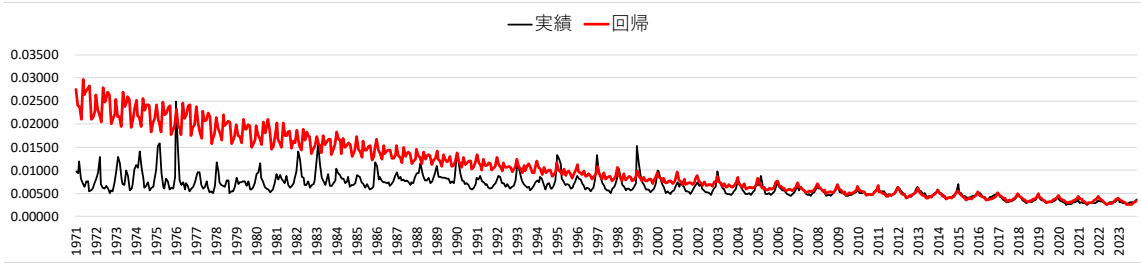
新生物



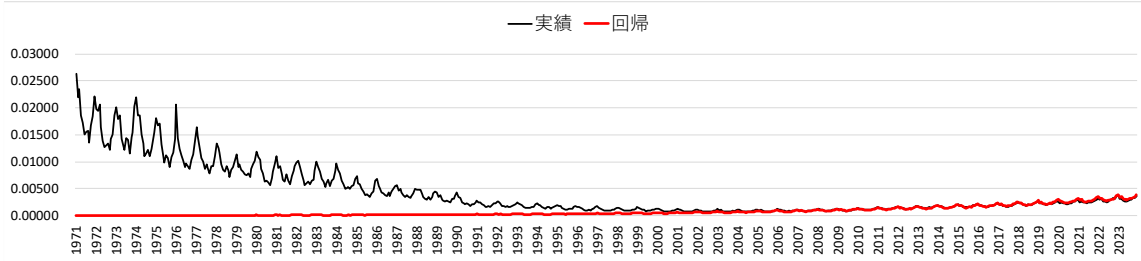
循環器系疾患



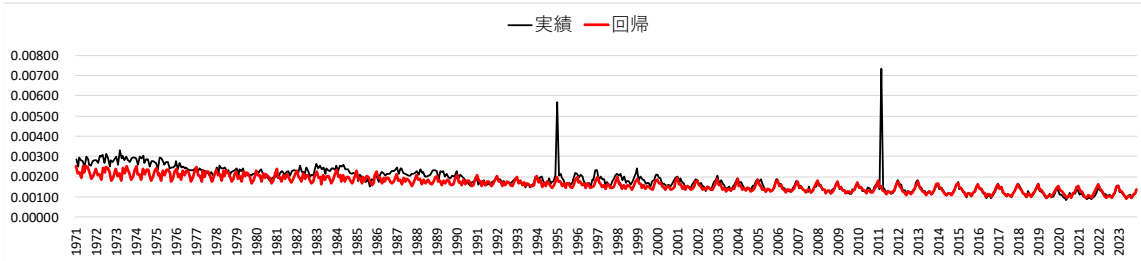
呼吸器系疾患



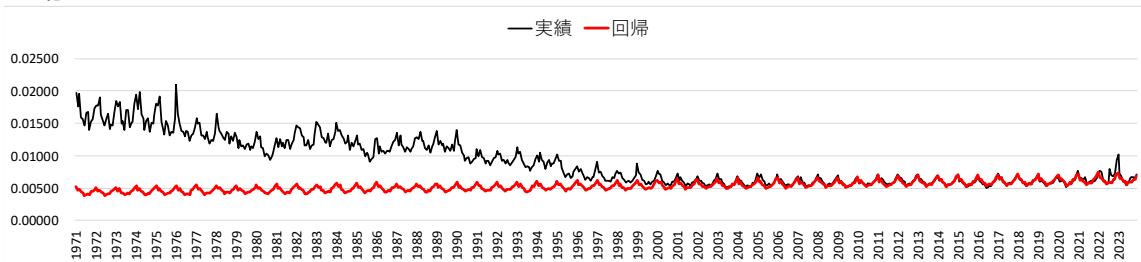
異常無(老衰等)



外因(熱中症含)

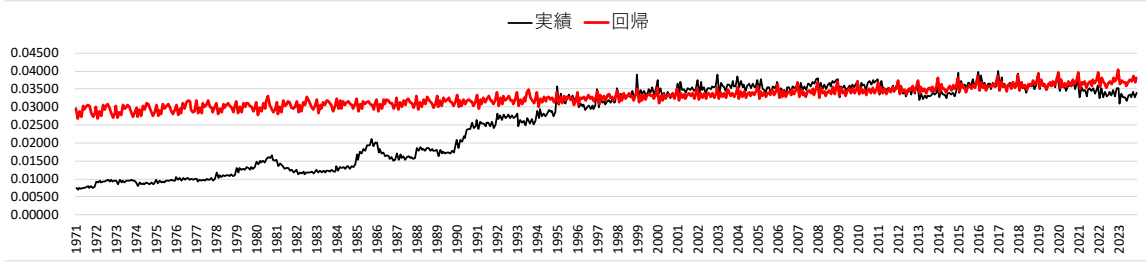


その他

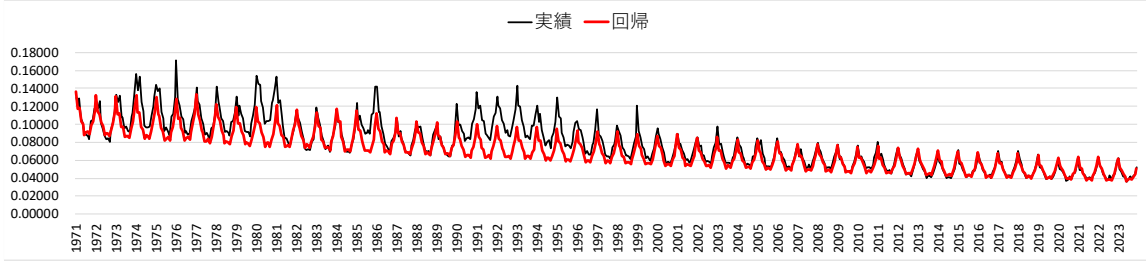


図表6-3. 死亡率 実績・回帰比較 (男性 90-94歳、日本全国)

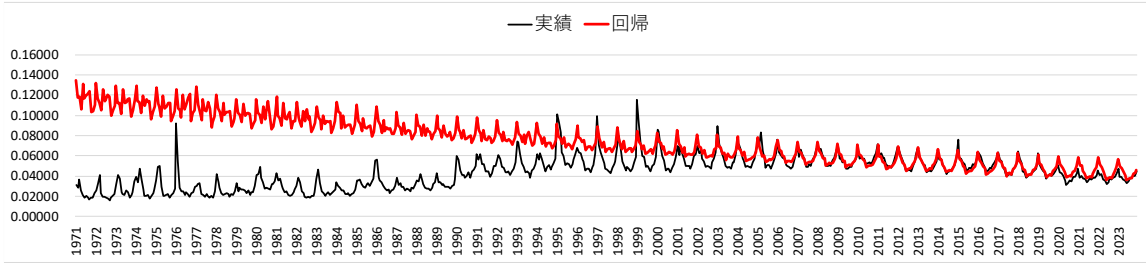
新生物



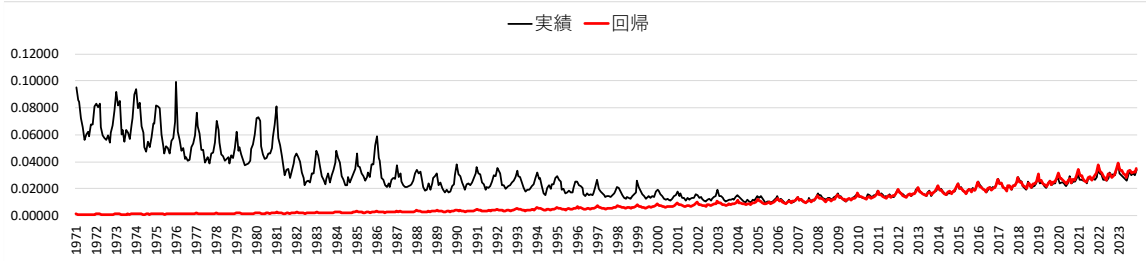
循環器系疾患



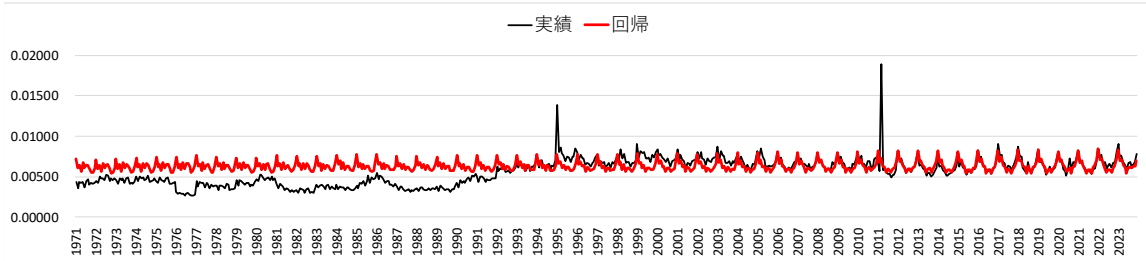
呼吸器系疾患



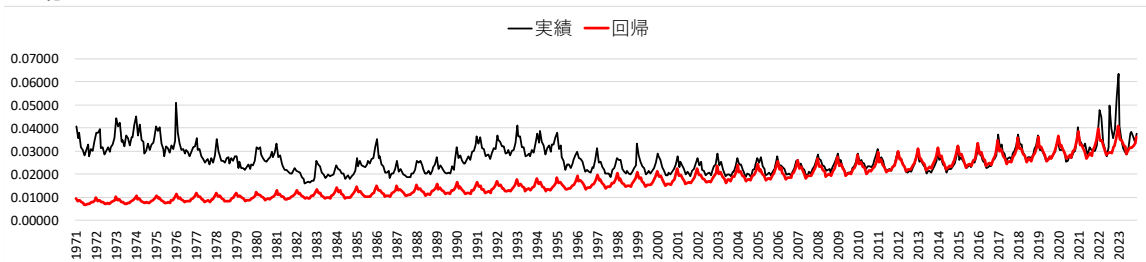
異常無(老衰等)



外因(熱中症含)

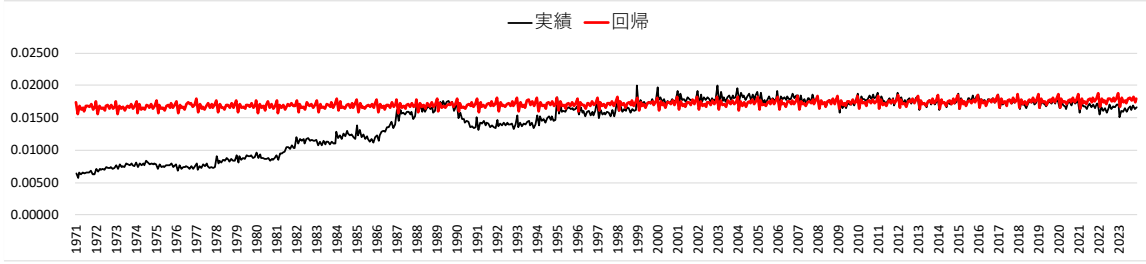


その他

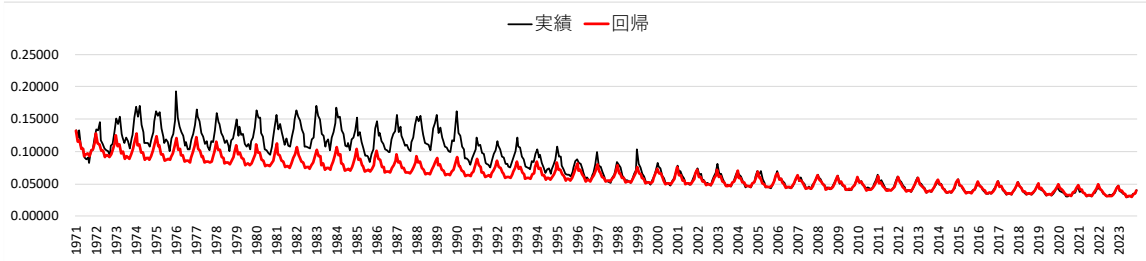


図表6-4. 死亡率 実績・回帰比較 (女性 90-94歳、日本全国)

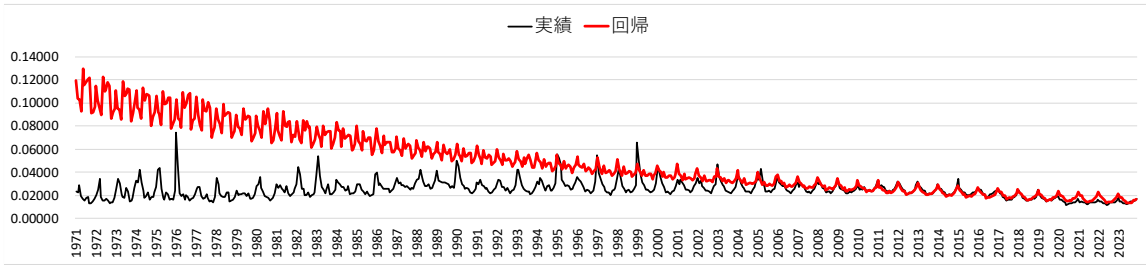
新生物



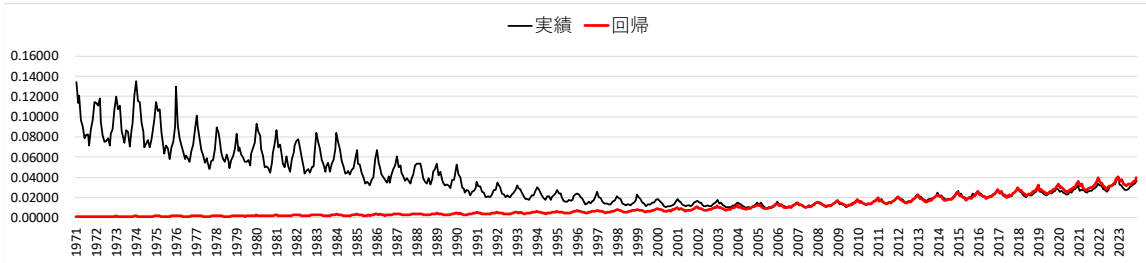
循環器系疾患



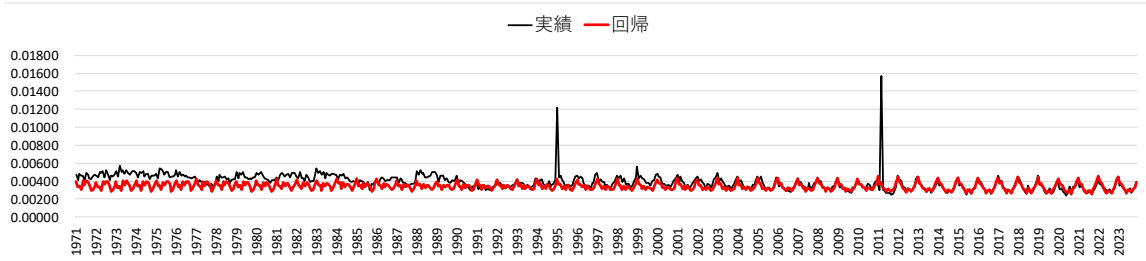
呼吸器系疾患



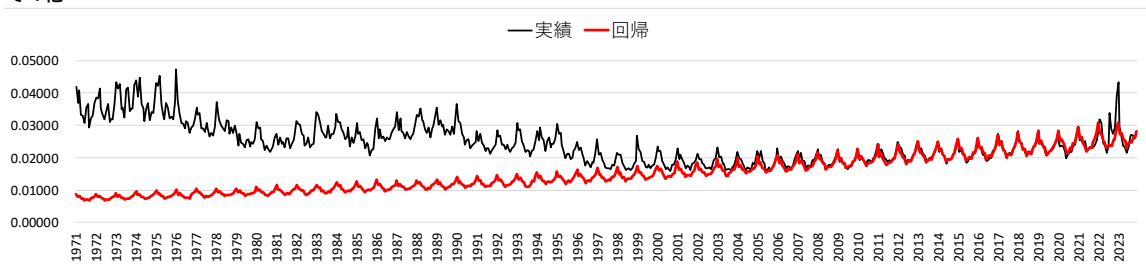
異常無(老衰等)



外因(熱中症含)



その他



3—将来の気候変動の指数化

本章では、前章までに得た気候指数と死亡率の関係式(回帰式)に代入するための、将来の気候変動の指数化について見ていく。

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³¹。

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°C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°C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ーに関する『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³²。

³¹ 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。

³² 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 7. 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°C 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°C 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。第 5 次評価 (AR5) と同様に、対応や比較を行うための具体的な社会・経済シナリオは別途用意することとし、行き先の姿を示す目的主導型の経路設定とすることができる。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°C 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。³³

図表 8. 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°C 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°C 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) ³⁴ 」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°C (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

³³ 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。

³⁴ 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年代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³⁵。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³⁶。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、これらの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))

³⁵ 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」。

³⁶ 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。

3 | 回帰式の再計算にあたり、データのない父島と南鳥島と、海面水位の指数は除く

5つのモデルからのデータをもとに、150あまりの観測地点それぞれについて気候指数を計算し、それを回帰式に入力することで、将来の死亡率シナリオを作成する — これが、本稿が取り組む回帰計算とそれに基づく死亡率予測の具体的な内容となる。

ただし、前回のレポートで触れたとおり、関東甲信の父島と南鳥島については、NIES2020にはデータがない。そこで、関東甲信についてはこの2地点を除く23地点を対象に気候指数を計算し直した。

また、先述の通り、NIES2020の5つのGCMの気象データには、これに対応する海面水位のデータはない。このため、回帰式の再計算にあたり、右辺の気候指数は、海面水位を除く、高温、低温、降水、乾燥、風、湿度の6つの指数とした。

4 | モデルのデータの利用に関して、技術的な調整を3つ行う

モデルのデータからは、地上1km格子点における「日最高気温(°C)」、「日最低気温(°C)」、「降水量(mm/day)」、「風速(m/s)」、「相対湿度(%)」のヒストリカルデータと将来予測データを取得することができる。ヒストリカルデータは1900年1月1日～2014年12月31日、将来予測データは2015年1月1日～2100年12月31日の日ごとのデータとなっている。

ここで、ヒストリカルデータは、気象の実績データではなく、モデルから算出された過去の時点での気象データである、という点に注意が必要だ。ヒストリカルデータと気象の実績データをもとに、それぞれ気候指数を作成して、その類似性を比較することにより、モデルが過去実績をどの程度再現しているかを確認することができる。(第5章の計算結果において、実際に確認していく。)

MIROC6の将来予測データは、SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5の4種類の経路のものが取得可能となっている³⁷。モデルのデータの利用に関して、技術的な調整を3つ行うこととした。

(1) 観測地点数値の按分処理による算出

モデルからは、地上の1km格子点での値が取得できる。ただし、一般に、観測地点と格子点が完全に一致しているわけではない。そこで、観測地点を取り囲む4つの1km格子点の値を取得し、それらを緯度と経度で按分処理することにより観測地点の値を求めて、それをもとに気候指数を算出することとした。³⁸

(2) 降水現象の有無についての「現象なし情報」に関するみなし

乾燥指数のために、降水に関しては、降水現象の有無についての「現象なし情報」を用いている。これは、気象台などで降水量に加えて、「雨や雪などの降水現象があったかどうか」という、現象の有無の観測を行うものである。降水量の観測単位は0.5mmのため、これに達しないわずかな降水は降水量の観測値として残らない。だが、「現象なし情報」を使えば、わずかでも降水が見られた場合と、全く降水が見られなかった場合とを区別することができる。この情報は気象台などにおける降水量や

³⁷ 他にもMRI-ESM2-0とIPSL-CM6A-LRについては、SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5の4種類の経路のものが取得可能。ACCESS-CM2とMPI-ESM1-2-HRについては、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5の3種類の経路のものが取得可能。

³⁸ ただし、北見枝幸の北東、浦河の南西、三宅島の北東・北西、石廊崎の南東・南西、油津の南東、名護の南西、西表島の北西・南西の格子点については、モデルのデータがなかった。そのため、残りの格子点のデータをもとに、按分処理を行った。

積雪など、現象の有無を観測している項目だけに付加されている。

モデルからは、この現象なし情報はデータとして取得できない。そこで、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」とみなすこととした。

(3) 過去分と将来分の年数の設定

モデルからは、ヒストリカルデータとして2014年までを過去分、将来予測データとして2015年以降を将来分として、データを取得できる。ただし、先述の通り、2014年までの過去分は、過去の観測値ではなく、モデルから算出された過去の時点でのデータとなっている。ここで、年数について整理をしておく必要がある。

まず、気候指数については、過去分として1971～2014年の実績データとモデル(ヒストリカルデータ)の比較を行う。2015～2023年については実績値を利用する。そして、2024～2100年についてはモデルの4つの経路の値(将来予測データ)を利用する。

これに併せて、2023年までの気候指数をもとに、死亡率と気候指数の回帰式を、父島と南鳥島を除く152地点ベースとして再計算した。

2009-10、12-19年の10年分の実績値を学習データと用いて算定した回帰式に、説明変数として上記の気候指数を入力することで、2024～2100年の死亡率を計算して、その予測を行うこととなる。

(以下、本ページ余白)

4—死亡率シナリオの作成と将来の死亡数の予測

前章で設定した将来の気候指数をもとに、死亡率シナリオを作成する。

1 | 回帰式の海面水位の項は除去する

本稿では、5つのモデルのデータをもとに、死亡率シナリオを試作する。予測に用いる回帰式は次の通りとなる。第2章の回帰式右辺の2行目の最後にあった海面水位の項は除去することとなる。

(回帰式)

【暑熱期 (5月～9月)】

$$\begin{aligned} \text{LOGIT} = & h2 \times \{\ln(\text{HT}+C)\}^2 + h1 \times \ln(\text{HT}+C) + l2 \times \{\ln(\text{LT}+C)\}^2 + l1 \times \ln(\text{LT}+C) \\ & + r \times \ln(\text{RF}+C) + d \times \ln(\text{DD}+C) + w \times \ln(\text{WP}+C) + m \times \ln(\text{HM}+C) \\ & + t \times \text{TIME} \\ & + I + da1 \times Da1 + \dots + da10 \times Da10 + dm5 \times Dm5 + \dots + dm8 \times Dm8 \end{aligned}$$

【それ以外の時期 (10月～4月)】

$$\begin{aligned} \text{LOGIT} = & h2 \times \{\ln(\text{HT}+C)\}^2 + h1 \times \ln(\text{HT}+C) + l2 \times \{\ln(\text{LT}+C)\}^2 + l1 \times \ln(\text{LT}+C) \\ & + r \times \ln(\text{RF}+C) + d \times \ln(\text{DD}+C) + w \times \ln(\text{WP}+C) + m \times \ln(\text{HM}+C) \\ & + t \times \text{TIME} \\ & + I + da1 \times Da1 + \dots + da10 \times Da10 + dm1 \times Dm1 + \dots + dm11 \times Dm11 \\ & \quad \quad \quad (dm* \times Dm* \text{の項は、}* = 5 \sim 9 \text{は無し}) \end{aligned}$$

* $\ln(\circ)$ は自然対数 C は負値の気候指数の対数エラーを避けるための定数 (固定値 = 10) を表す。

(ロジット変換・逆変換)

ロジット変換 $\text{LOGIT} = \ln(\text{死亡率} / (1 - \text{死亡率}))$

逆変換 $\text{死亡率} = \exp(\text{LOGIT}) / \{1 + \exp(\text{LOGIT})\}$

* $\ln(\circ)$ は自然対数、 $\exp(\circ)$ は指数関数を表す。

回帰式の記号のまとめ

数	係数	内容
HTの2乗項	h2	高温指数 (High Temperature) の2乗項
HT	h1	高温指数
LTの2乗項	l2	低温指数 (Low Temperature) の2乗項
LT	l1	低温指数
RF	r	降水指数 (Rain Fall)
DD	d	乾燥指数 (Dry Days)
WP	w	風指数 (Wind Power)
HM	m	湿度指数 (Humidity)
TIME	t	時間項
—	I	定数 (Invariable)
Da1～Da10	da1～da10	地域区分ダミー (Dummy Area)
Dm1～Dm11	dm1～dm11	月ダミー (Dummy Month)

※ ただし、Dm*とdm*は、*=1～8、10～11の10個で、*=9のものは無し

2 | 将来の人口の推移には「日本の将来人口推計」を用いる

死亡率シナリオをもとに、将来の死亡数の予測を行うためには、将来の人口の推移が必要となる。ここでは、国立社会保障・人口問題研究所が公表している「日本の将来人口推計(令和5年推計)」を用いることとする。将来の不確実性が大きい出生率と死亡率について、それぞれ高位、中位、低位の3つのケースの推計が行われており、全部で9つの推計結果が公表されている。そのうち、本稿では、出生率と死亡率がいずれも中位の「出生中位(死亡中位)推計」の結果を用いる。

この推計には、全国推計の表として2020~2070年の推計結果があり、さらに参考表として2071~2120年までの推計結果が公表されている。ただし、これらは、全国推計であり、都道府県別とはなっていない。都道府県別には、「日本の地域別将来推計人口(令和5年推計)」として2020~2050年の推計結果が5年ごとに公表されている。つまり、次の3つの統計表が公表されている。

- ①日本の将来人口推計 表 1-9 男女年齢各歳別人口(総人口):出生中位(死亡中位)推計
- ②日本の将来人口推計 参考表 1-9 男女年齢各歳別人口(総人口):出生中位(死亡中位)推計
- ③日本の地域別将来推計人口 都道府県・市区町村の男女・年齢(5歳)階級別将来推計人口

そこで、①と②をもとにして、③から定まる比率を用いて地域区分別に按分して将来人口を計算する。③から定まる比率は、当該年から見た直近の年の比率を用いることとする。

このようにして、男女別、5歳群団(21群団)別、地域区分(11区分)別に、2023~2100年の人口の推移を設定する。なお、各年の人口は10月1日時点のものであるため、月ごとの人口を設定する際には、前後の10月1日の人口を月単位で按分する。

3 | 死亡率に人口を掛け算したものを月単位の死亡数に調整する

ここで、死亡率と死亡数の関係について整理しておく。一般に、死亡率は、人口に対する一定期間の死亡数の割合として表される。保険会社などで保険料や責任準備金などの計算に用いられる場合、一定期間は1年間とされることが多い。このため、一定期間を1年間として1ヵ月間の死亡動向が1年間継続することを仮定した場合の死亡率を予測している。

そこで、この年換算の死亡率を用いて、ある月の死亡数を計算する際には、次の関係式の通り、死亡率を調整したうえで人口を掛け算する必要がある。

【死亡率と死亡数の関係式】

$$\begin{aligned} \text{1ヵ月間の死亡数} &= \text{人口} \times \{ 1 - (1 - \text{年換算の死亡率})^{1/12} \} \\ (\text{年換算の死亡率} &= 1 - (1 - \text{1ヵ月間の死亡数/人口})^{12}) \end{aligned}$$

これは、上記の括弧内の式の通り、1ヵ月間の生存率を12乗することで、その生存率が1年間続くものとして、年換算の生存率を計算し、これを1から差し引いて、年換算の死亡率を計算する考え方をもとにしている。実際には、季節によって死亡動向は異なり、ある月の動向がそのまま1年間続くわけではない。このため、年換算の死亡率は、架空の死亡率となる点に注意が必要と言える。

4 | 死亡率の改善トレンドの織り込みは、当初 10 年間に限定する

第 2 章で述べた通り、回帰式には、時間項を設定する。これは、時間に応じた死亡率の改善トレンドを将来の死亡率の予測に織り込むためのものである。

今回、2100 年までの長期間の死亡率を予測するにあたり、単純に時間項を導入すると、死亡率の改善トレンドが 70 年以上もの長期間に渡って継続するものと見込むこととなる。ただし、このようにトレンドが長期間継続する保証はない。

例えば、第 2 章末に付した異常無(老衰等)の死亡率実績の推移(図表 6-1~6-4 の黒線)を見ると、2000 年頃までは低下していたが、2000 年代にはほぼ横這いとなり、2010 年頃より緩やかな上昇に転じている。現在の上昇トレンドは最近 10 年程度に見られるものだが、このトレンドが将来どのように継続または変化するかについては、何とも言えない。

このように、現在の死亡率のトレンドが、必ずしも将来の長期間にわたって継続するとは限らないことを踏まえると、単純に時間項を長期間導入し続ける取り扱いは適切とは言いがたいであろう。

そこで今回、回帰式の作成にあたり、前回のレポートと同様に 2009~2019 年(2011 年を除く)の約 10 年分のデータを学習データとして用いていることを踏まえて、時間項による死亡率のトレンドの織り込みについても、前回のレポートと同じく 2023 年から当初 10 年間とし、その後は時間の経過を見ない(回帰式中の TIME 変数を増加させない)こととする。

このように、時間項による死亡率改善の期間を限定することにより、気候変動以外の要素による死亡率の上昇・低下トレンドは長期的には消失する形となる。

5 | 死亡数計算結果の人口への反映は行わない

一般に、気候変動により死亡率が変化すれば、それに応じて死亡数も変わり、その後の人口減少に影響が及ぶものと考えられる。このような気候変動と人口の間のフィードバック効果を織り込めば、死亡率や死亡数の予測は高度化するであろう。ただし、それにより、モデルが著しく複雑なものとなることは不可避となる。

今回は、死亡率と気候指数の関係式をもとに将来の死亡率を予測して、気候変動が人の死亡にどの程度影響を及ぼしうるのか、を計算することが主な目的である。その目的を踏まえて、計算をシンプルにして結果をわかりやすく解釈するために、死亡数計算結果の人口への反映は行わないこととする。

(以下、本ページ余白)

5—気候指数の予測結果

前章までの各種設定にもとづいて予測計算を行った。本章では、気候指数予測の計算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

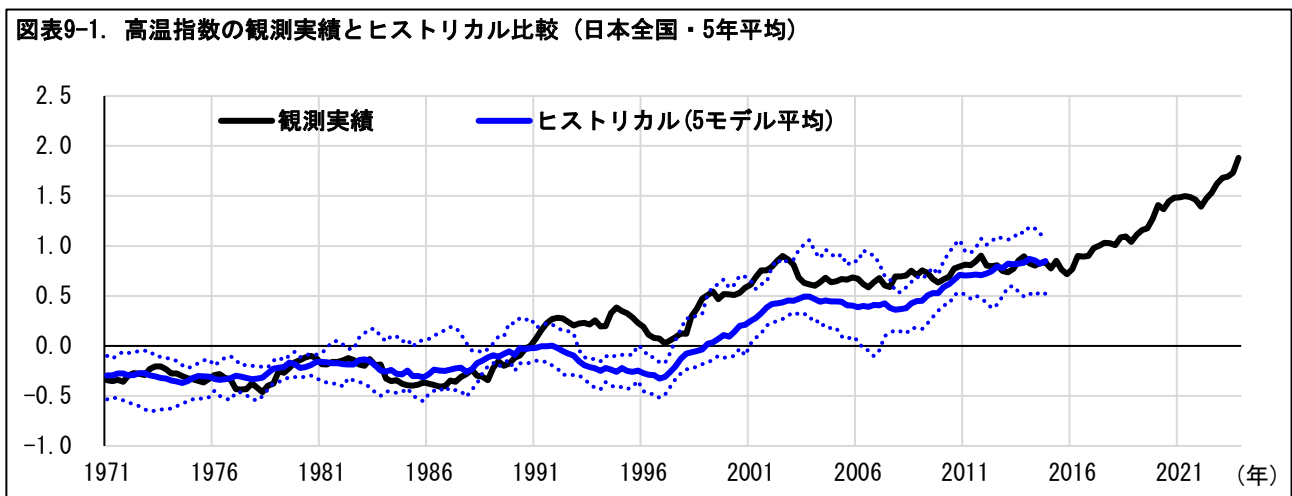
まず、気候指数の推移から見ていく。本稿では、日本全国(父島と南鳥島を除いた 152 地点ベース)の気候指数を計算した。以下では、5年平均の各気候指数の推移をグラフ化している。

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。

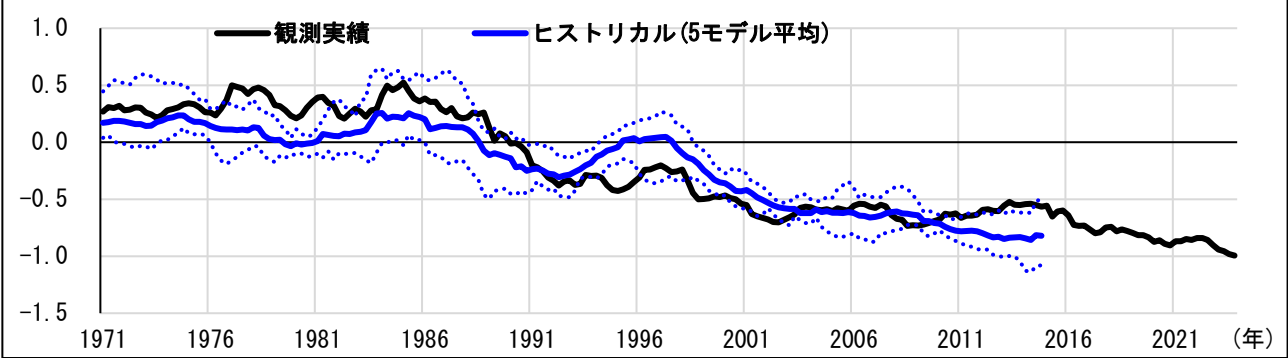


(2) 低温指数

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)

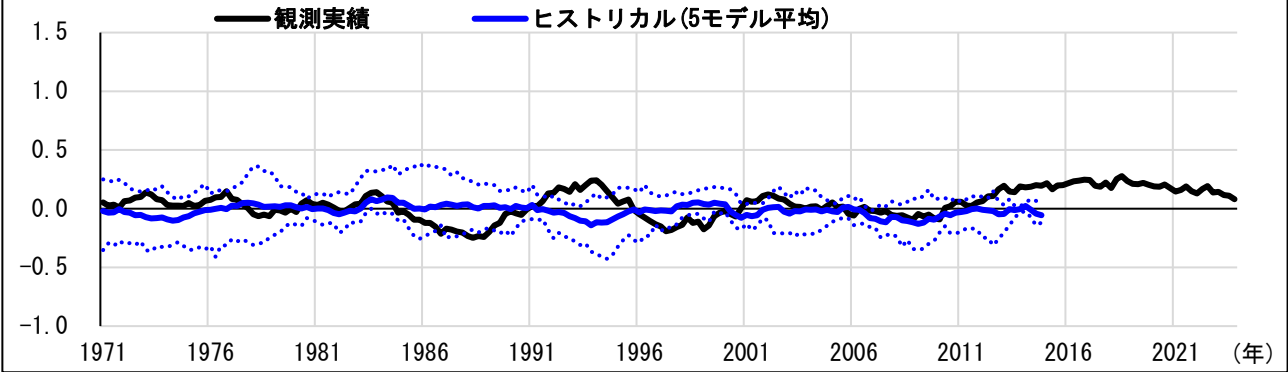
図表9-2. 低温指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



(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。

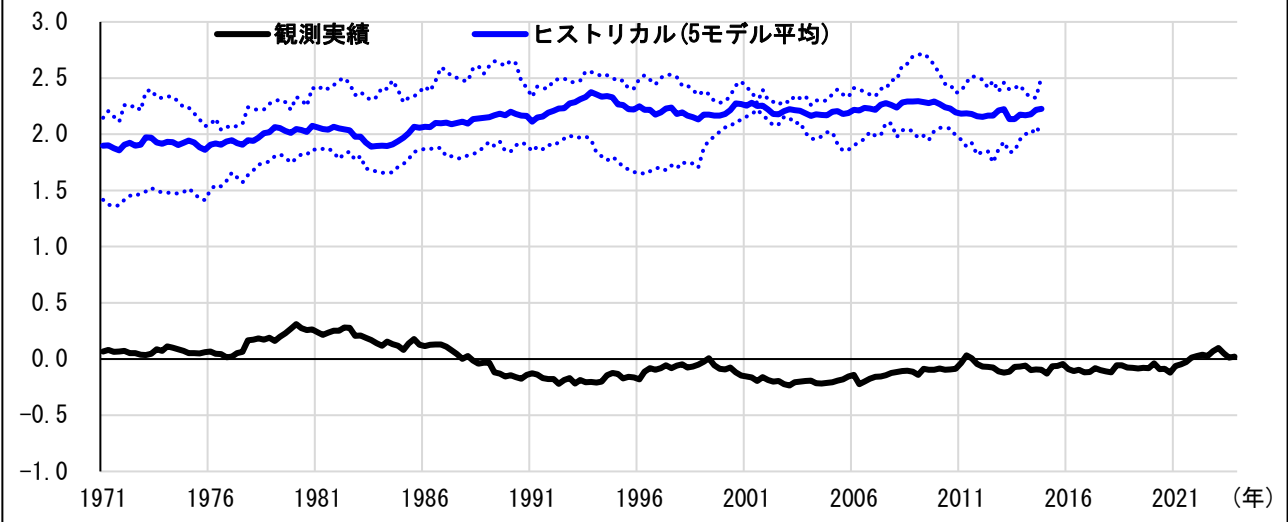
図表9-3. 降水指数の観測実績とヒストリカル比較（日本全国・5年平均）



(4) 乾燥指数

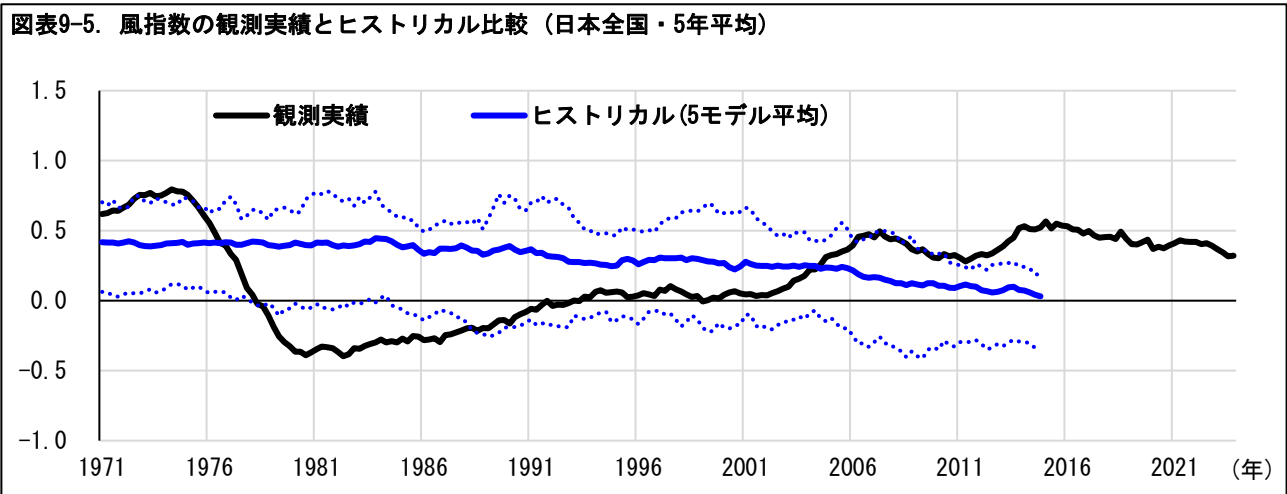
乾燥指数は、観測実績がゼロ近辺、ヒストリカルが2前後で、一定の乖離幅を保ちつつどちらも横ばいで推移している。両者の差は、ヒストリカルにおいて、降水現象の有無に関する「現象なし情報」についてのみなし(観測地点を取り囲む4つの1km格子点の降水量がすべてゼロであった場合に、降水の「現象なし」とみなす)が、実態よりも乾燥の判定につながりやすいことによるものと見られる。

図表9-4. 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）



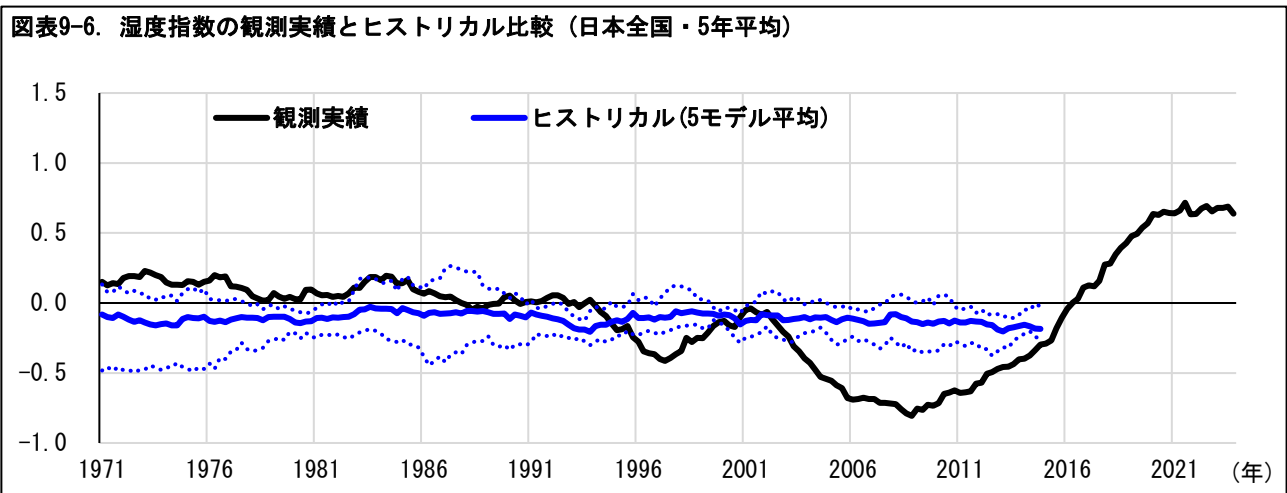
(5) 風指数

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。



(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。



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。

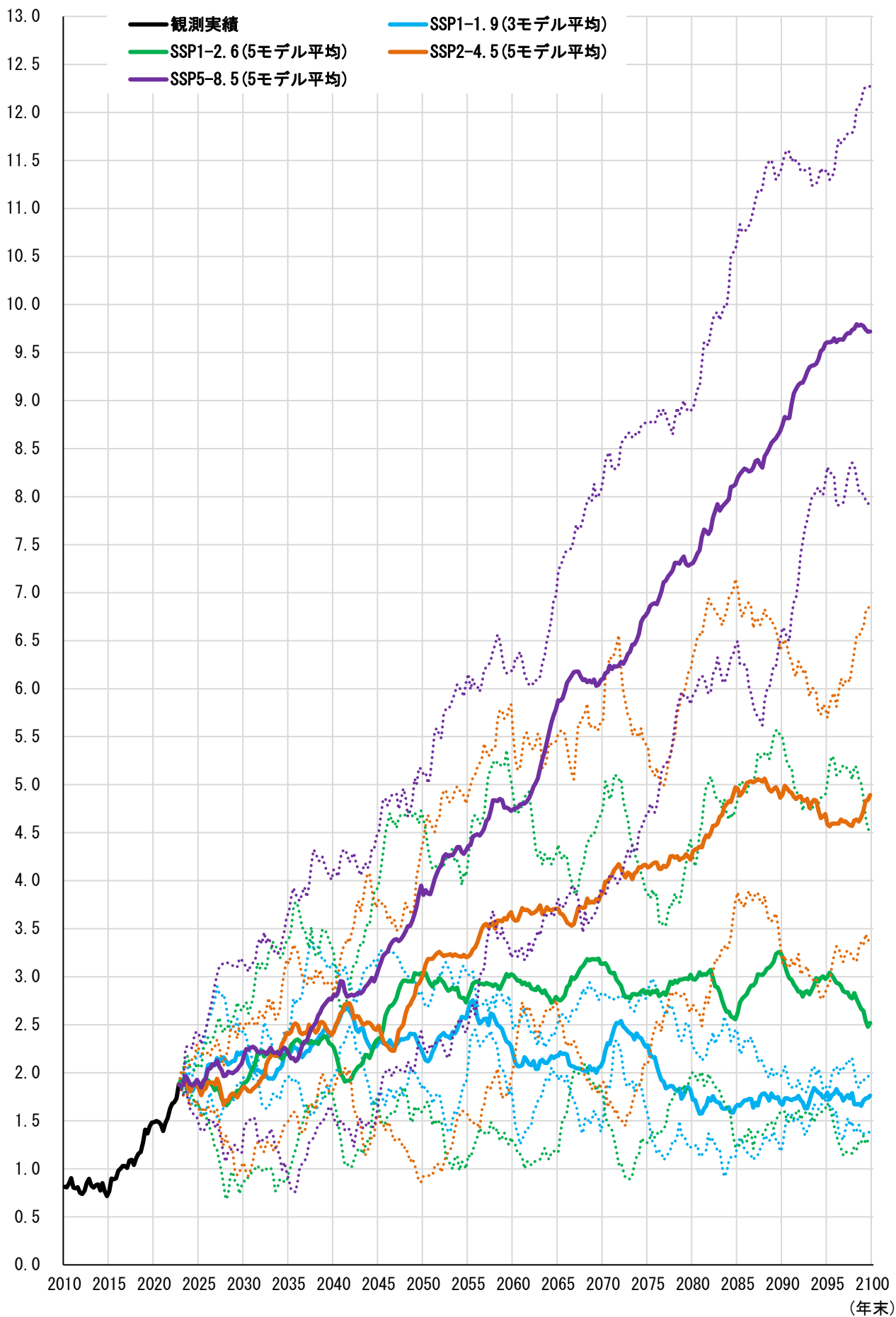
(1) 高温指数

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。

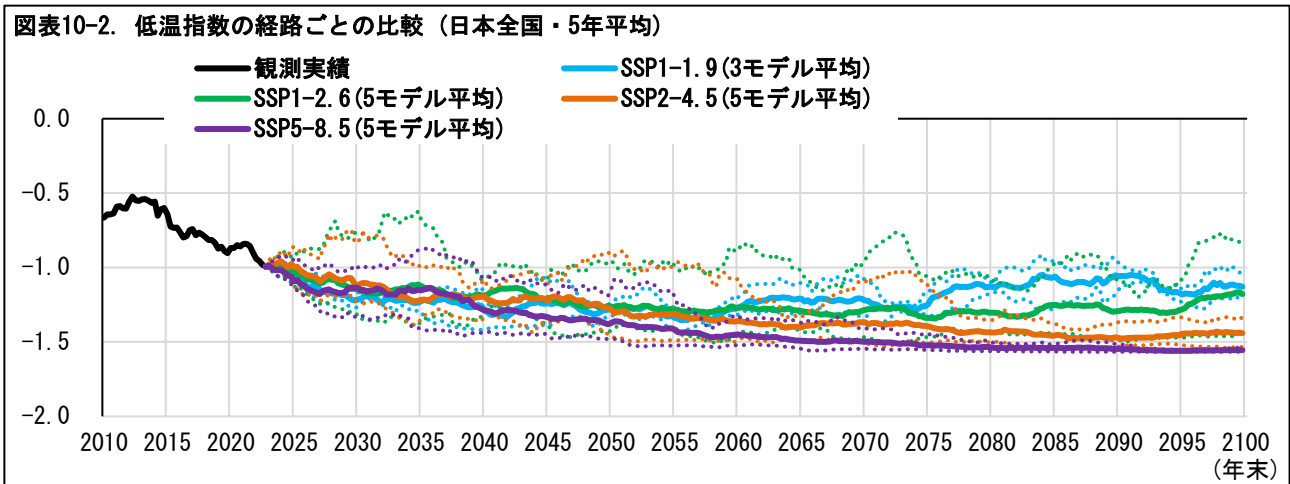
(以下、本ページ余白)

図表10-1. 高温指数の経路ごとの比較（日本全国・5年平均）



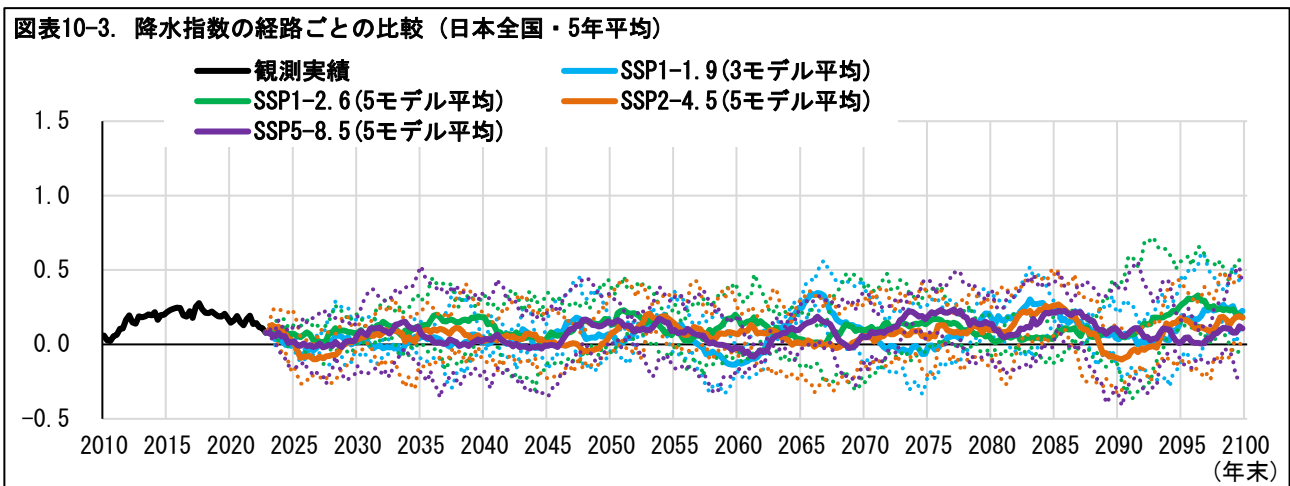
(2) 低温指数

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

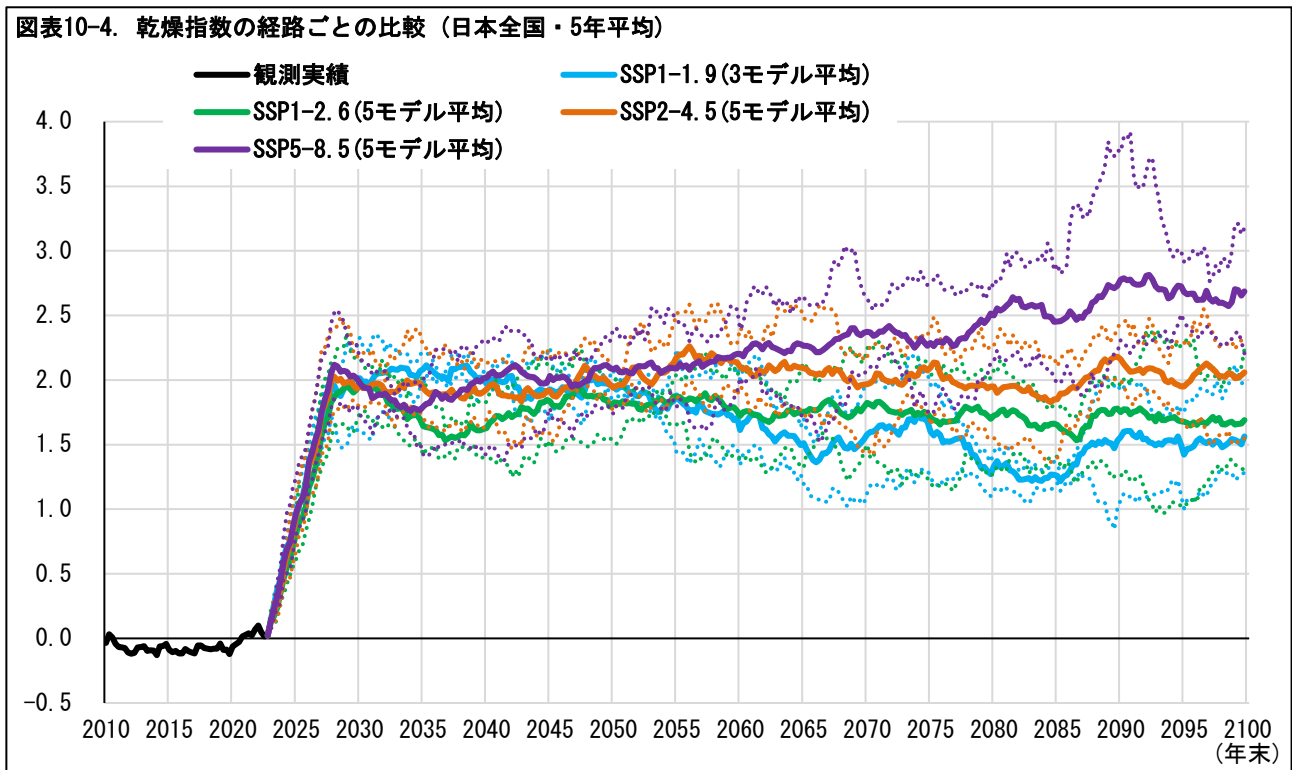
降水指数は、過去の観測実績ではゼロ近辺で推移してきた。SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 の4経路とも、一貫した上昇や低下の傾向は見られず、いずれも、数年ごとに上昇と低下を繰り返して推移する形となっている。なお、過去の観測実績との接続については、各経路で変動の幅がやや大きくなる形となっている。



(4) 乾燥指数

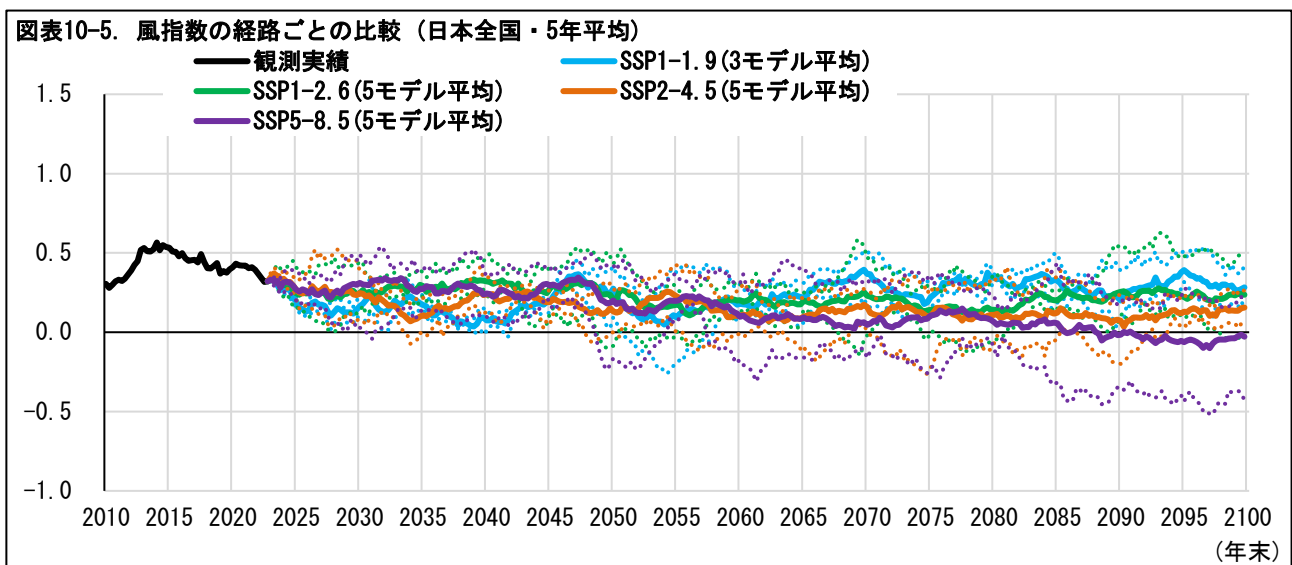
乾燥指数は、過去の観測実績ではゼロ近辺で推移してきた。SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 の4経路とも上昇して、2030年代には1~2程度の水準で推移するものとなっている。その後、2050年代後半から、各経路間の違いが表れ始める。SSP1-2.6の経路では乾燥指数は概ね2を下回る水準で推移する。一方、SSP5-8.5の経路では、乾燥指数は、2.5を超える水準にまで上昇する。

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。



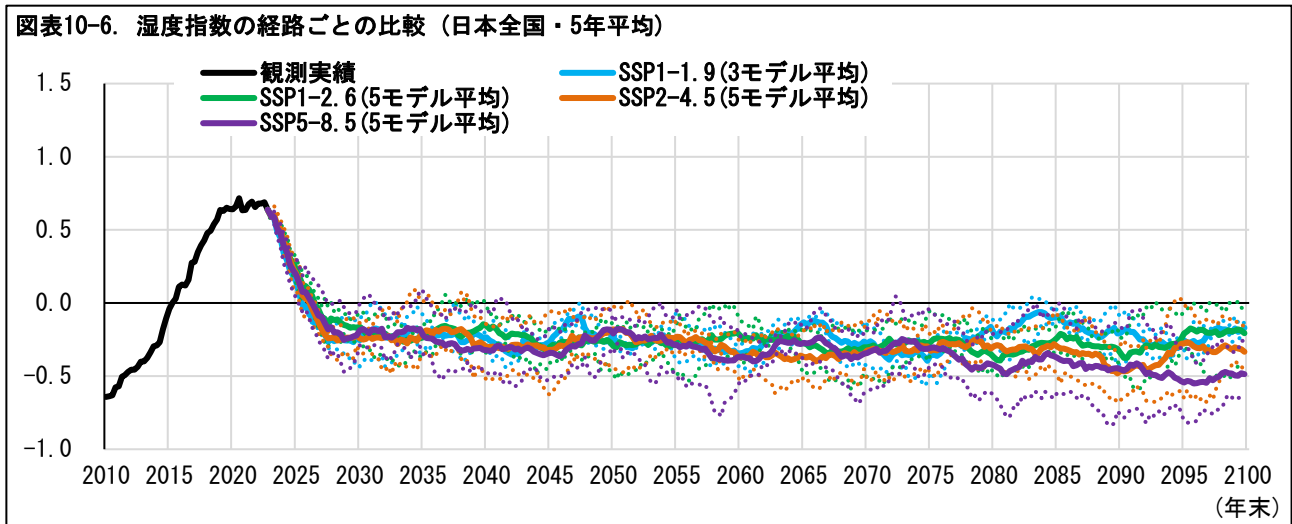
(5) 風指数

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。



(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、地域区別に行う。付録図表に、地域区別の気候指数の推移を示したグラフを所収しているので、ご参照いただきたい。

(以下、本ページ余白)

6—死亡率の予測結果

本章では、前章の気候指数の予測を、気候指数と死亡率の関係式(回帰式)に代入して得られた、死亡率の計算結果を見ていく。なお、本章の第4節以降で示す要素ごとの死亡率は、次章の第4節以降で示す要素ごとの死亡数と、一部重複する内容となっている。前者は人口分布によらない死亡の確率であるのに対し、後者は人口分布の影響を受ける死亡の人数であるという違いがある。

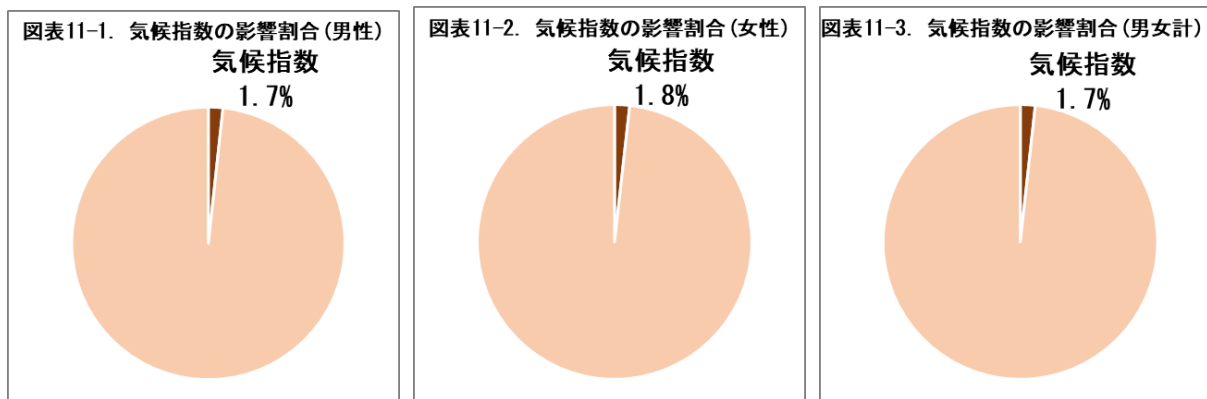
1 | 気候指数が死亡率に与える影響割合は2%弱

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。説明変数の係数は、前回のレポートのものと変わらない。2024年1月18日のレポートのものからは、(1)気候指数の作成にあたり父島・南鳥島の気象データを用いないことと、(2)回帰式の説明変数から海面水位指数を除去したことの、2つの点が異なっている。(各回帰式の係数等については、付録図表をご参照いただきたい。)

ここで、回帰式における気候指数の影響を見ておこう。まず、回帰式ごとに係数を標準化³⁹して相互に比較可能とする。この標準化した後の変数は、「標準偏回帰係数」と呼ばれる。その上で、気候指数の標準偏回帰係数の和の絶対値を分子に、その数値と時間項の標準偏回帰係数の絶対値と各ダミー変数の標準偏回帰係数の絶対値の和を分母にとる。そして、その分数の値を、気候指数が死亡率に与える影響割合とみなすこととした。⁴⁰

回帰式は全部で504本あり、この影響割合の値はその本数の数だけ得られる。そこで、2018~22年の死亡数の実績をもとに、加重平均して、影響割合の平均値を求めることとした。

その結果、気候指数の影響割合は、男性1.7%、女性1.8%、男女計1.7%となった。2%程度としていた2024年1月18日のレポートでの割合を、やや下回る水準となった。^{41 42}



2 | 2060年代以降、SSP5-8.5はSSP1-2.6を上回り、徐々にその差が拡大

気候指数と死亡率の関係式(回帰式)に各経路に応じた気候指数を代入して、死亡率の推移をグラフに表示した。各グラフは、日本全体の男性と女性の90-94歳の死亡率⁴³を表している。

³⁹ 標準化は、係数に当該説明変数の標準偏差を掛け算し、目的変数の標準偏差で割り算して行う。

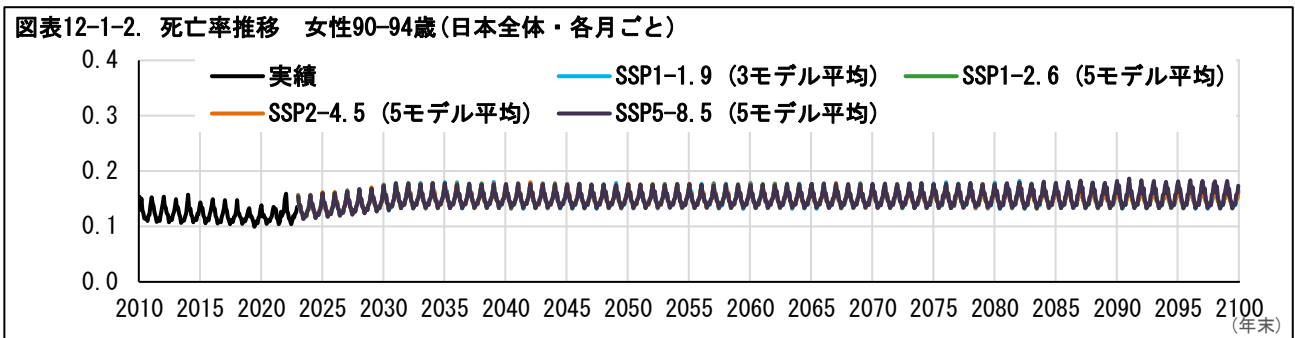
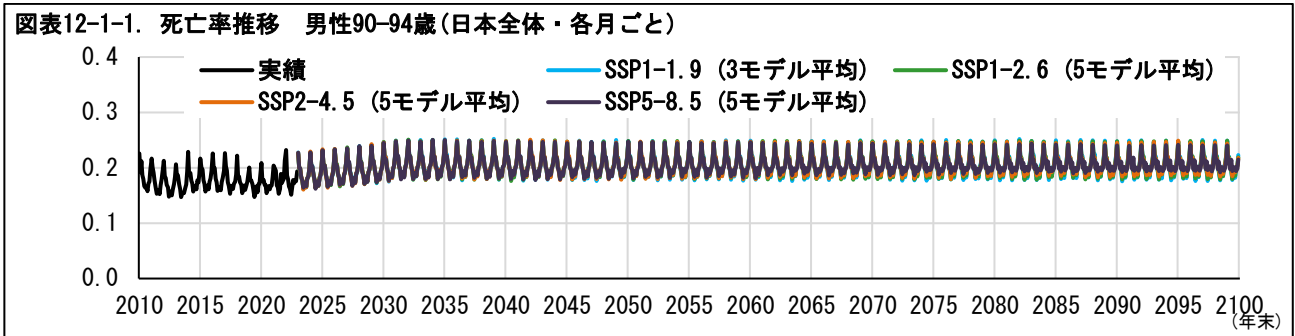
⁴⁰ 説明変数間の相関関係を考慮せずに簡易な計算を行った。

⁴¹ 回帰式において海面水位の項を除去していることが、主な原因と考えられる。

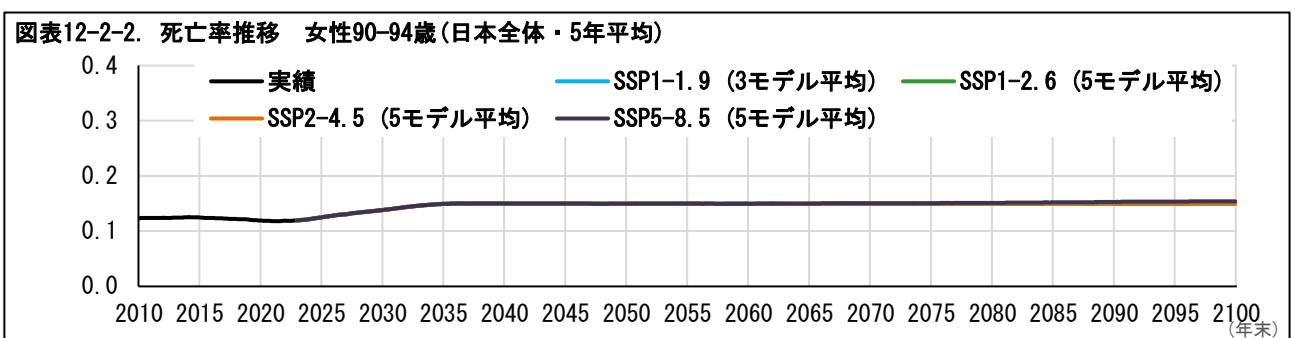
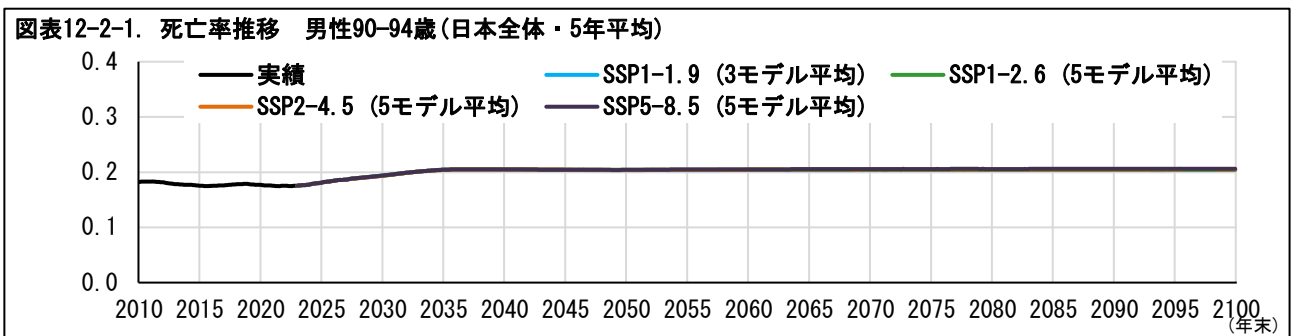
⁴² 気候変動が死亡数に与える影響については、次章を参照いただきたい。

⁴³ 今世紀中に平均寿命が延伸することを見越して、90-94歳の年齢群団を対象に、死亡率をグラフで表示していくこととした。

男女とも、死亡率は、冬季に上昇、夏季に低下して、細かい上下動を繰り返している。⁴⁴



この上下動をならすために、5年平均の死亡率推移を表示すると次の通りとなる。

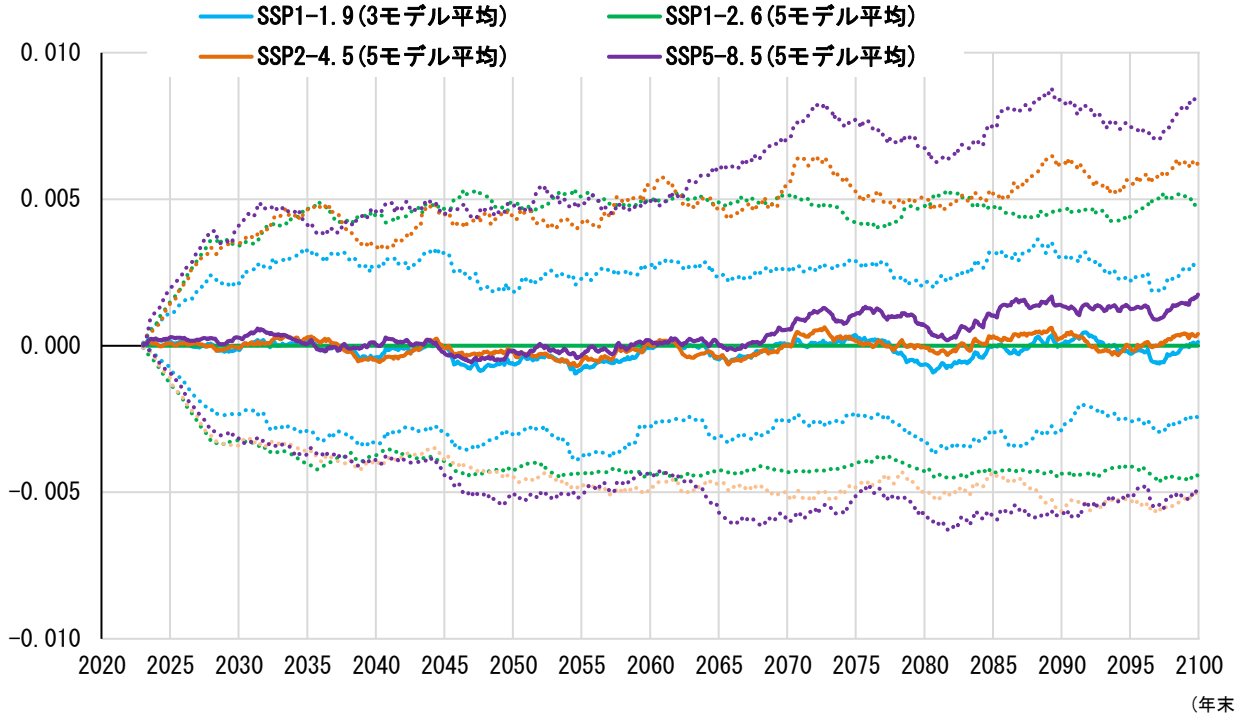


この図では、経路ごとの死亡率の違いがわからない。そこで、経路ごとの違いを明らかにするために、次のグラフでは、SSP1-2.6の経路を基準として、それとの差を表示している。モデル平均値を表す実線とともに、点線でモデル最大値やモデル最小値も示している。

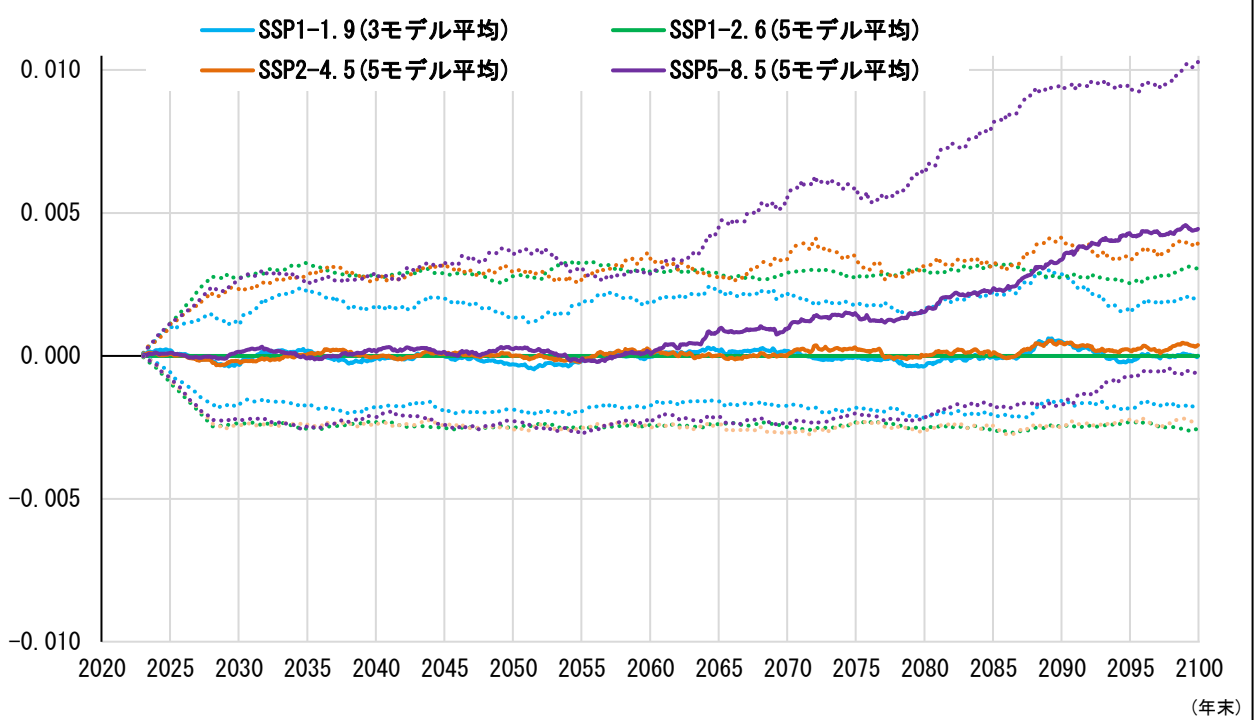
SSP1-1.9 と SSP2-4.5 は、SSP1-2.6 の近辺で推移している。一方、SSP5-8.5 は、2060 年代以降、SSP1-2.6 を上回り、徐々にその差が拡大している。特に、女性はその差の拡大が顕著となっている。

⁴⁴ 次節の死亡数の計算には、この死亡率を用いている。

図表13-1-1. 死亡率推移 <SSP1-2.6との差> 男性90-94歳(日本全体・5年平均)



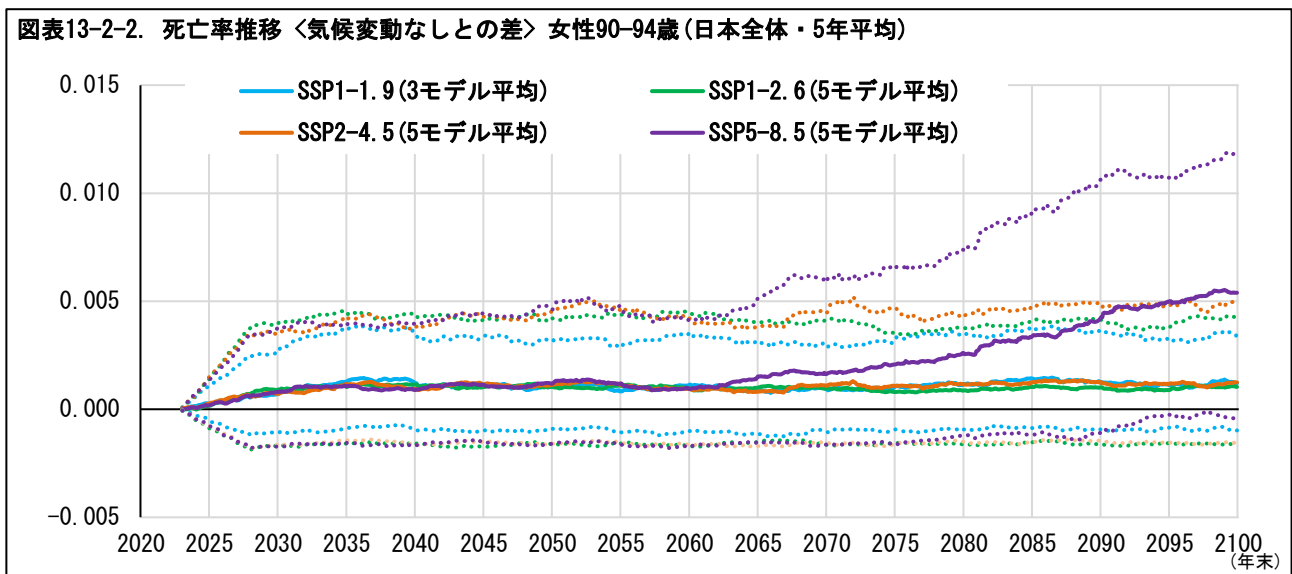
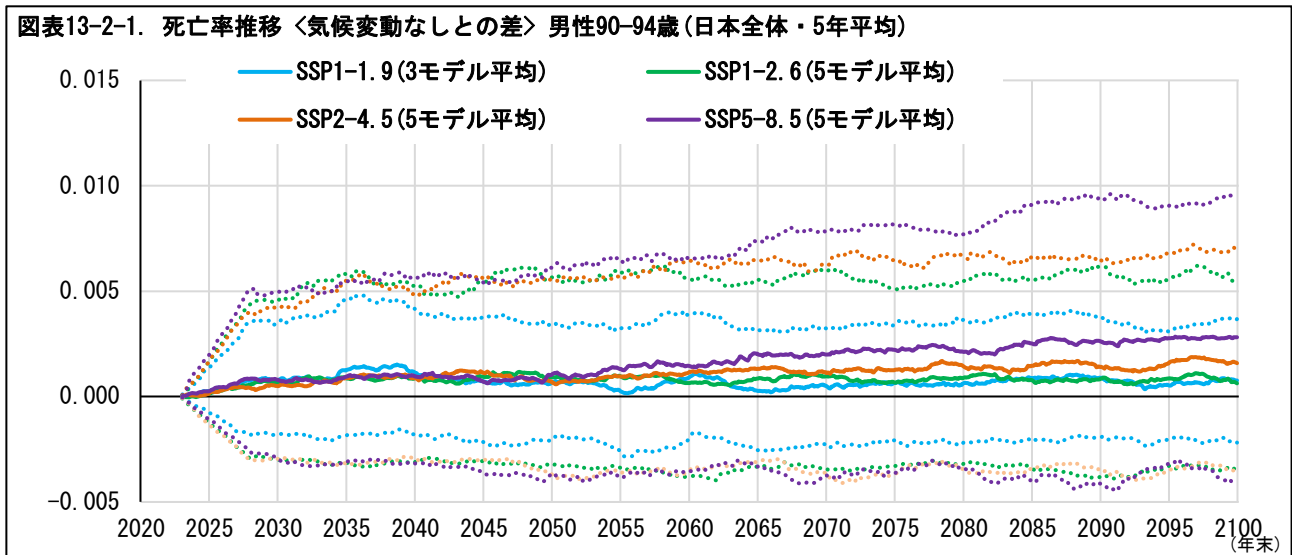
図表13-1-2. 死亡率推移 <SSP1-2.6との差> 女性90-94歳(日本全体・5年平均)



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(紫色の点線の幅)は、SSP1-2.6での差異(緑色の点線の幅)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。

3 | 死亡率は、2060年代以降、SSP5-8.5の経路がSSP1-1.9の経路を上回ることが多くなる

次に、気候変動の影響を見るために、気候変動がなかった場合の死亡率を計算してみた⁴⁵。それとの比較をしたものが、次のグラフである。気候変動なしの場合を基準として、それとの差を表示している。実線のモデル平均値とともに、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、SSP1-2.6、SSP2-4.5は、気候変動なしから緩やかに上側に乖離している。SSP5-8.5も2050年代までは乖離が緩やかだが、2060年代以降は乖離が徐々に拡大している。特に、女性は顕著となっている。



以降の本章の図表では、経路間の死亡率の差異に焦点を当てるため、気候変動なしとの比較は行わない。(次章では、死亡数の比較において、気候変動なしの場合を基準として用いる。) また、モデル平均の実線のみを示し、最大値と最小値の点線は表示しない。なお、付録図表に、モデルの最大値と最小値の点線を示した比較グラフを男女別、年齢群団別に所収しているのでご参照いただきたい。

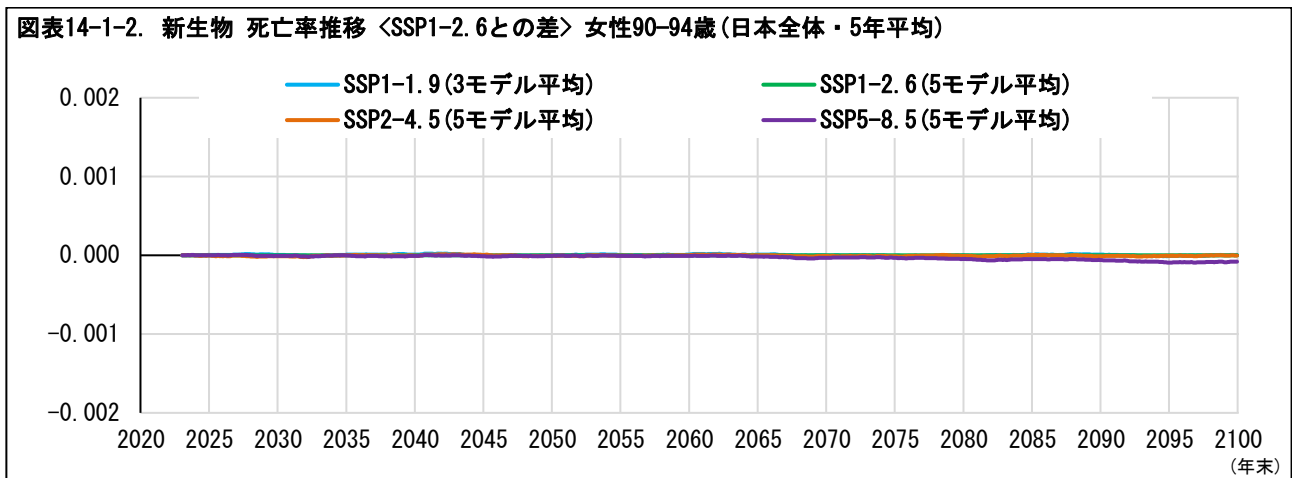
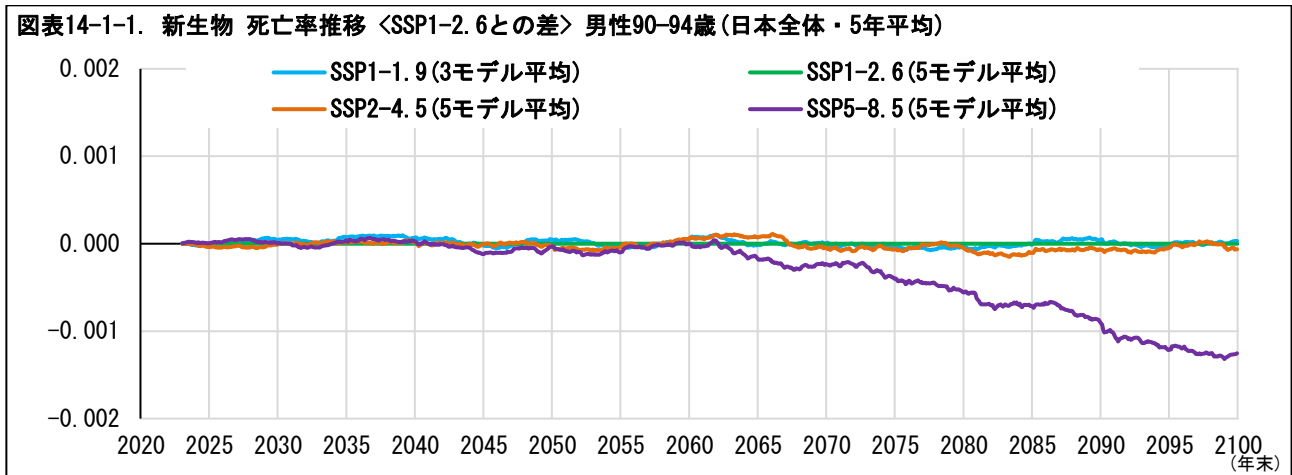
⁴⁵ 気候変動がなかった場合の死亡率は、現在(正確には、回帰式作成に用いた学習データの時期(2009~2019年(2011年を除く))の気候の状態が2100年まで続くとした場合の死亡率を指す。具体的には、気候指数の項をすべてなくして、時間項、定数項、地域区分ダミー項、月ダミー項だけからなる回帰式を作成して、その回帰式に、時間項の変数、地域区分ダミー項と月ダミー項のダミー変数を代入して計算した。

4 | 死因別：異常無(老衰等)の影響が大きい

次に、死因、年齢、季節、地域ごとに、経路ごとの違いがどのようにあらわれるかを確認していく。まず最初に、死因別に、死亡率の SSP1-2.6 との差を見ていく。

(1) 新生物

新生物の死亡率は、男性は 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 を下回り、徐々にその差が拡大している。女性はいずれの経路も SSP1-2.6 近辺で推移している。⁴⁶

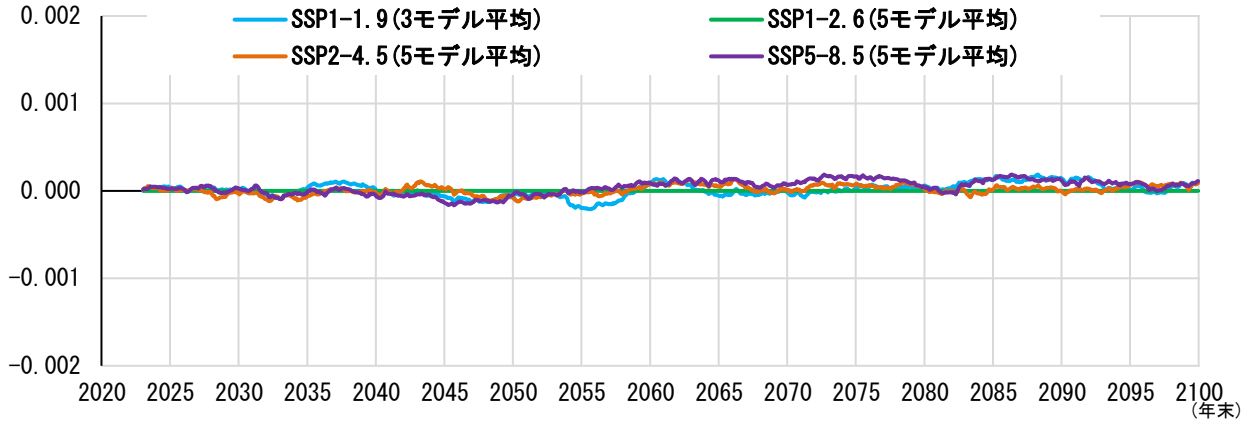


(2) 循環器系疾患

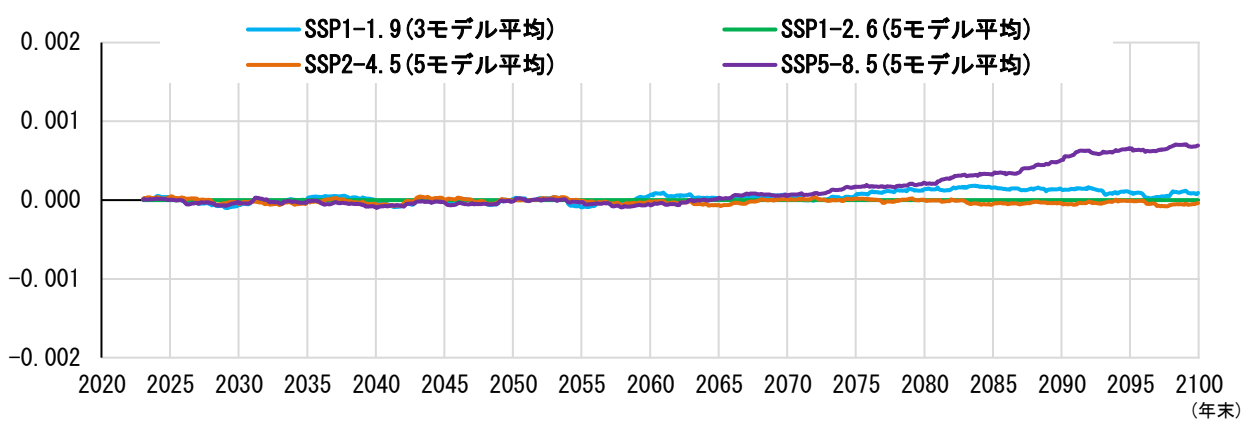
循環器系疾患の死亡率は、男性はいずれの経路も SSP1-2.6 近辺で推移している。女性は、SSP1-1.9 と SSP2-4.5 は、SSP1-2.6 の近辺で推移している。一方、SSP5-8.5 は 2070 年代以降、SSP1-2.6 をやや上回り、徐々にその差が拡大している。

⁴⁶ SSP1-2.6 と SSP5-8.5 の主な差異は、高温指数の項による。男性 90-94 歳は女性 90-94 歳よりも同項の回帰係数の絶対値が桁違いに大きい。このことが、男女間の違いにつながっているものとみられる。

図表14-2-1. 循環器系疾患 死亡率推移<SSP1-2.6との差>男性90-94歳(日本全体・5年平均)



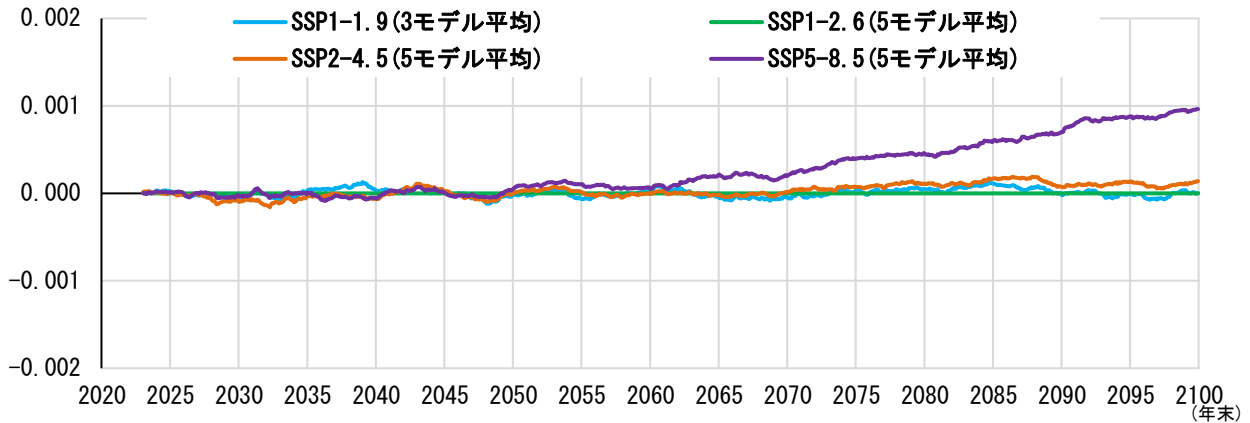
図表14-2-2. 循環器系疾患 死亡率推移<SSP1-2.6との差>女性90-94歳(日本全体・5年平均)



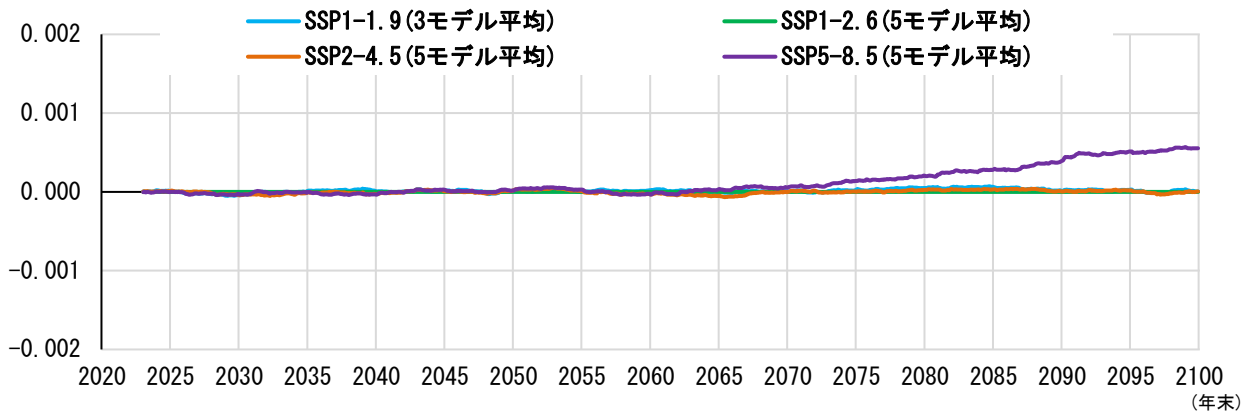
(3) 呼吸器系疾患

呼吸器系疾患の死亡率は、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、男性は2060年代以降、女性は2070年代以降、SSP1-2.6をやや上回り、徐々にその差が拡大している。

図表14-3-1. 呼吸器系疾患 死亡率推移<SSP1-2.6との差>男性90-94歳(日本全体・5年平均)



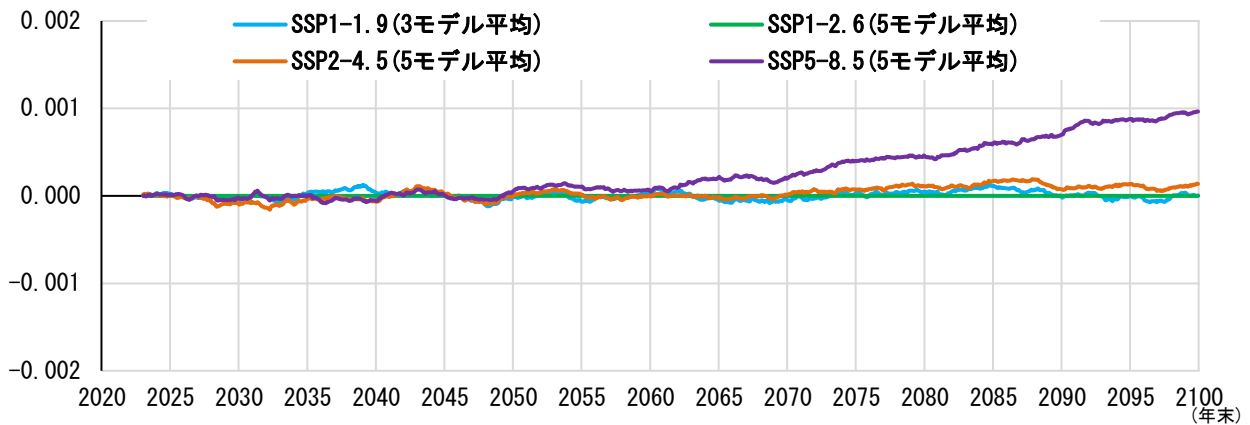
図表14-3-2. 呼吸器系疾患 死亡率推移<SSP1-2.6との差>女性90-94歳(日本全体・5年平均)



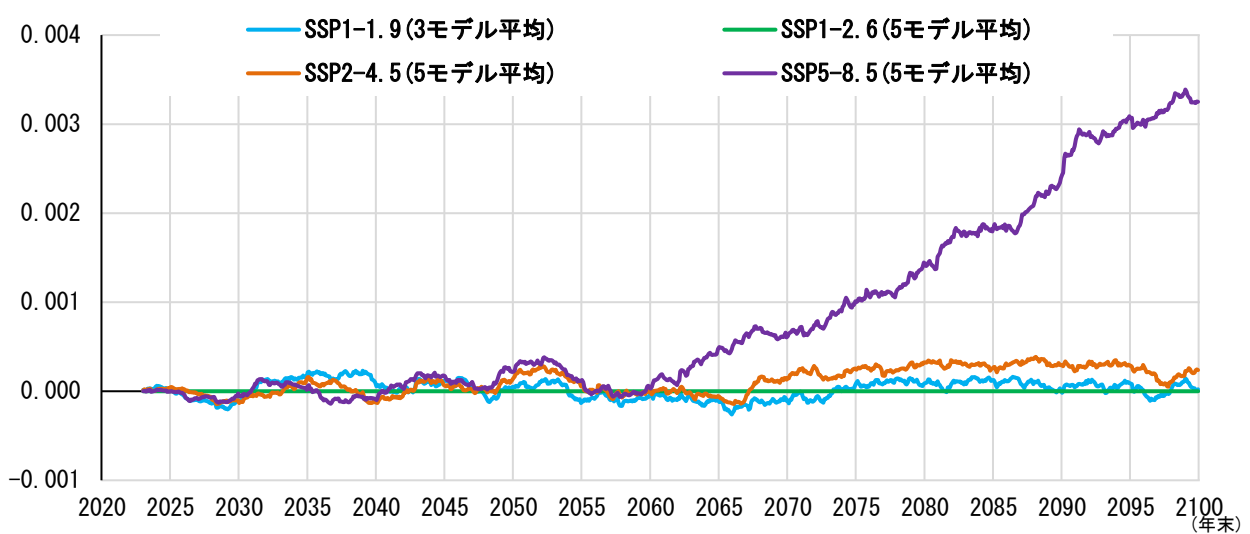
(4) 異常無(老衰等)

異常無(老衰等)の死亡率は、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 をやや上回り、その差が拡大している。特に女性は、その差が顕著に拡大している。この異常無(老衰等)の差が、死因合計における SSP1-2.6 と SSP5-8.5 の差の主な要因となっている。

図表14-4-1. 異常無(老衰等) 死亡率推移<SSP1-2.6との差>男性90-94歳(日本全体・5年平均)

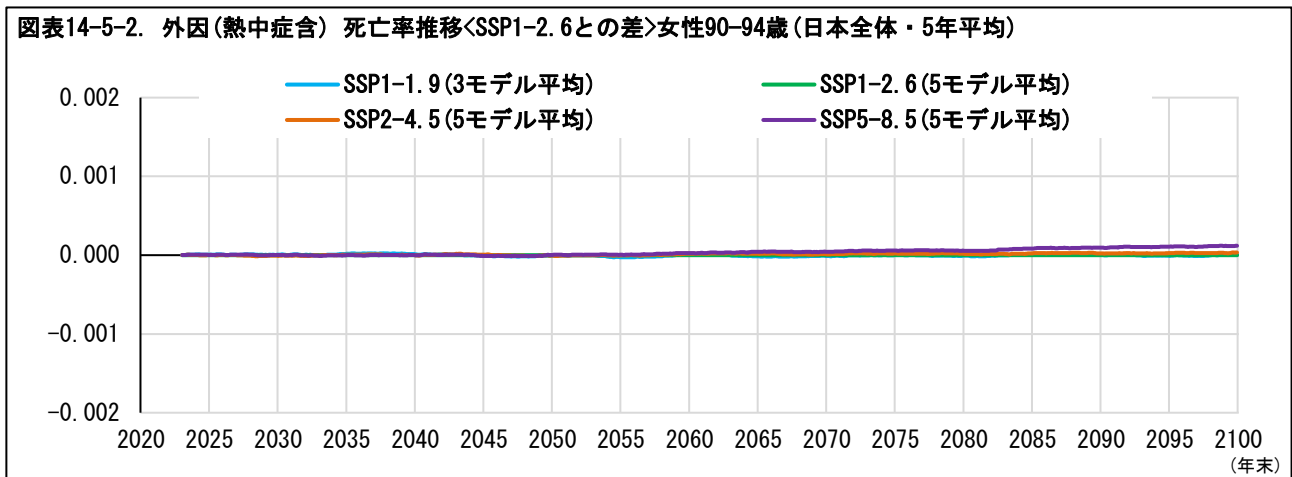
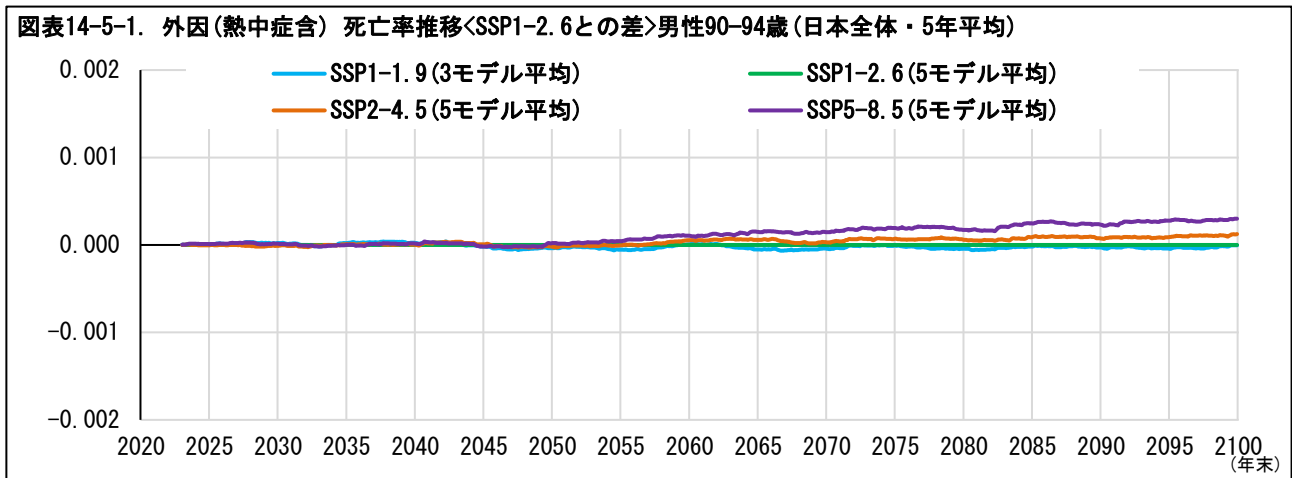


図表14-4-2. 異常無(老衰等) 死亡率推移<SSP1-2.6との差>女性90-94歳(日本全体・5年平均)



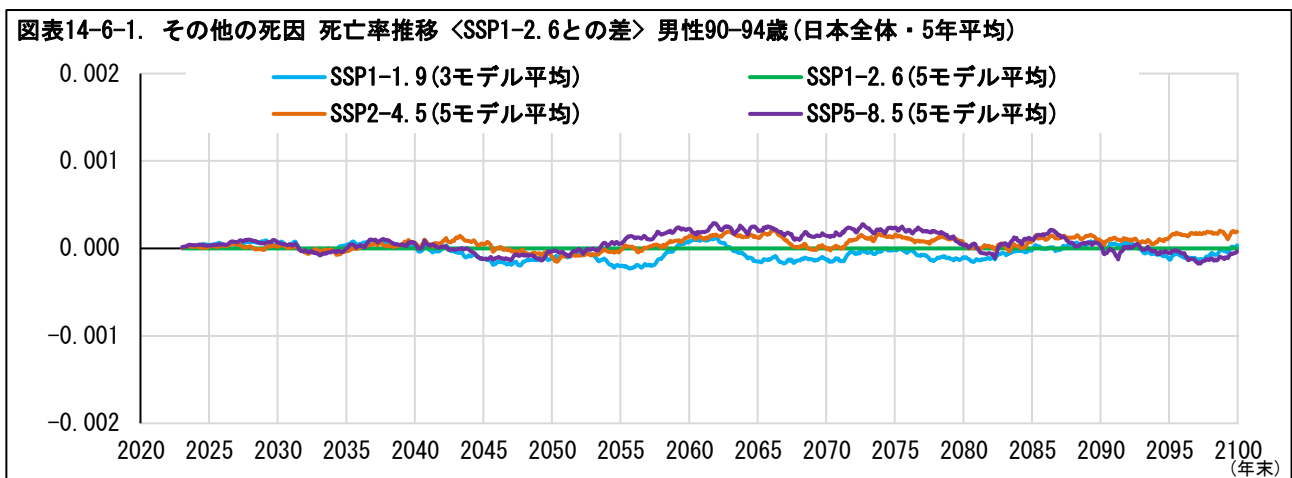
(5) 外因(熱中症含)

外因(熱中症含)の死亡率は、経路による違いはほとんど見られない。男性では、SSP5-8.5は2060年代以降、SSP1-2.6を若干上回っている。

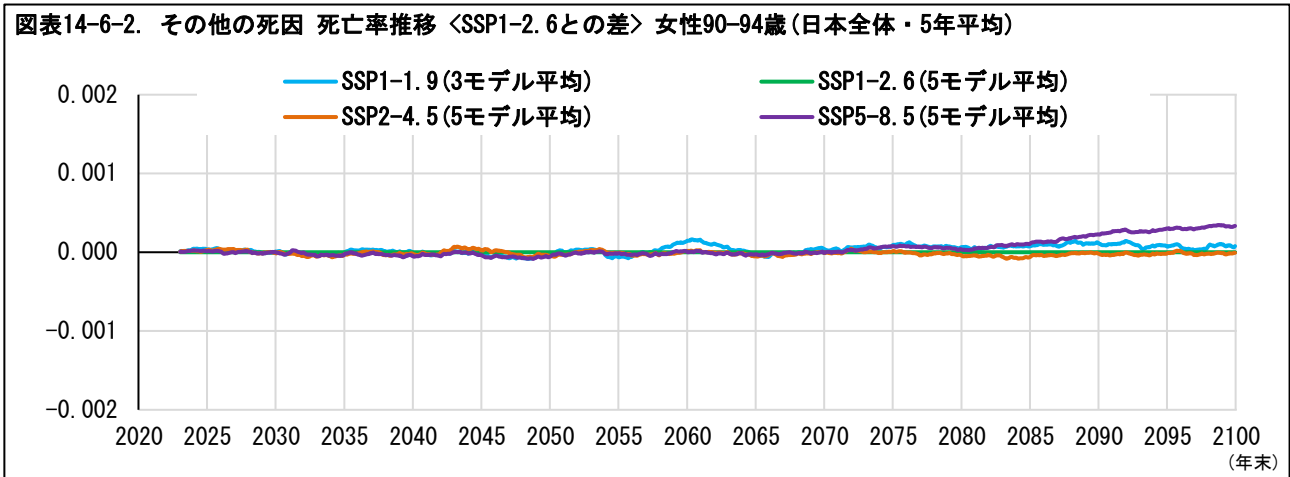


(6) その他の死因

その他の死因の死亡率は、経路による違いはあまり見られない。



図表14-6-2. その他の死因 死亡率推移 <SSP1-2.6との差> 女性90-94歳(日本全体・5年平均)

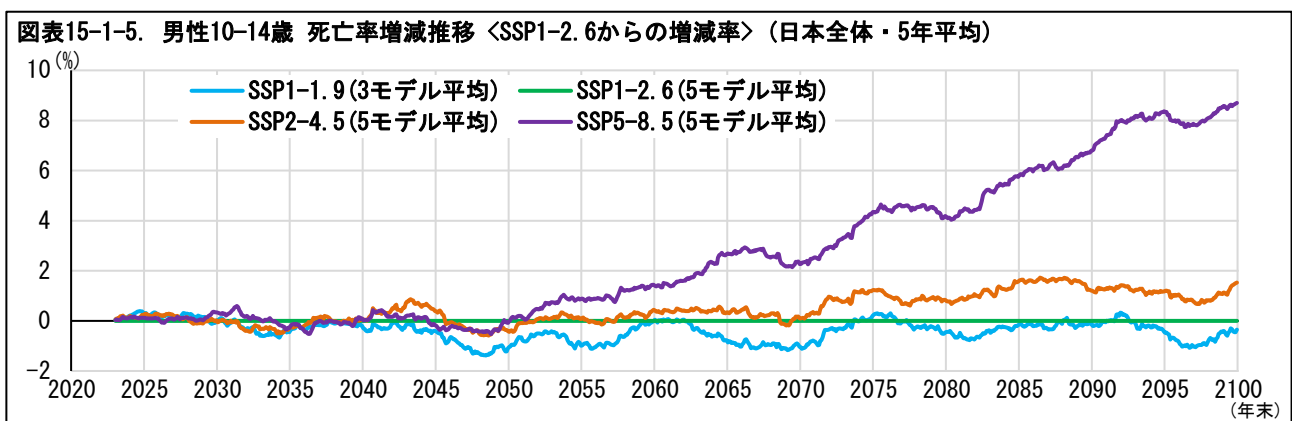
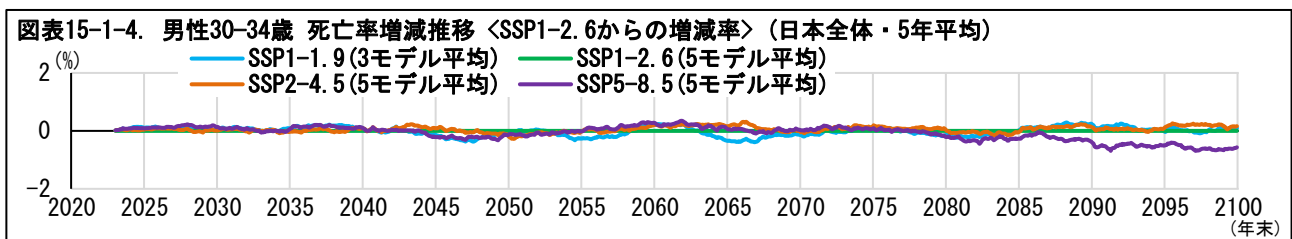
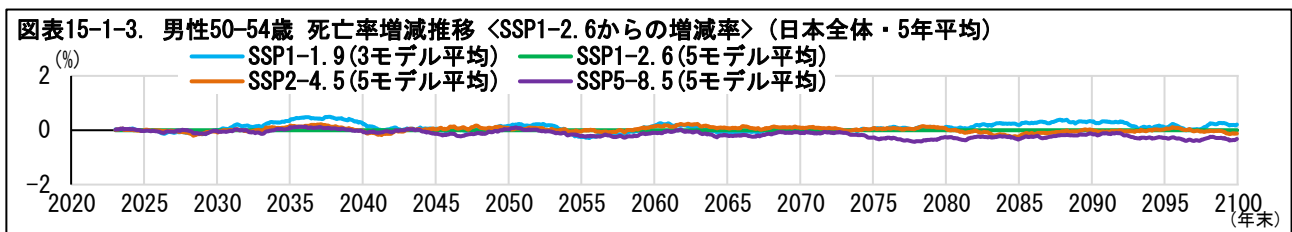
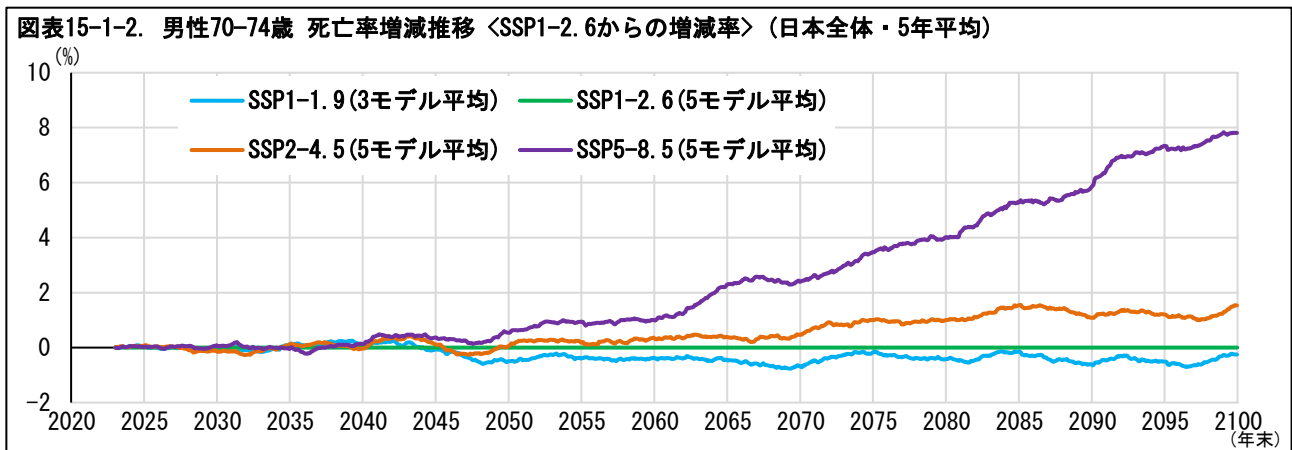
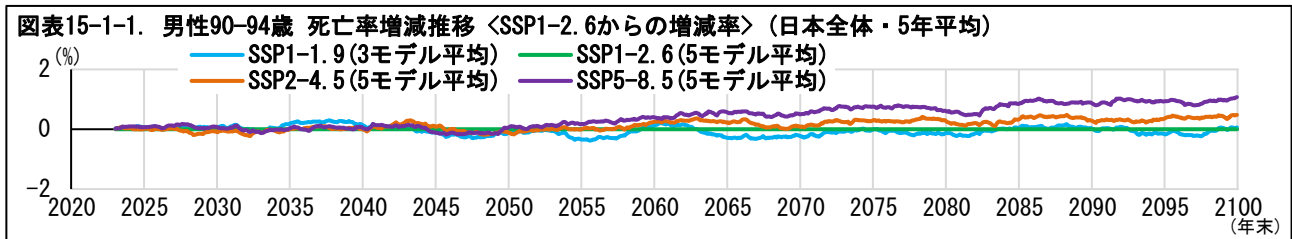


5 | 年齢群団別：高齢層は温暖化の影響を受けやすい

続いて、死亡数の推移を年齢群団別に見てみよう。90～94歳、70～74歳、50～54歳、30～34歳、10～14歳の5つの年齢群団を比較する。年齢ごとの死亡率の水準が異なることを考慮して、各経路のSSP1-2.6との差ではなく、SSP1-2.6からの増減率の推移を表示してみると、次の図のとおりとなった。

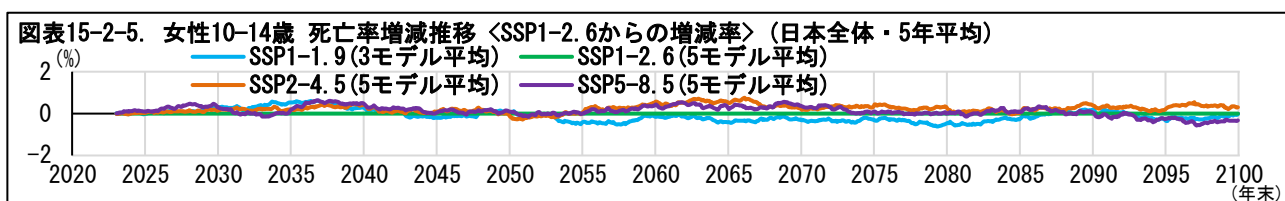
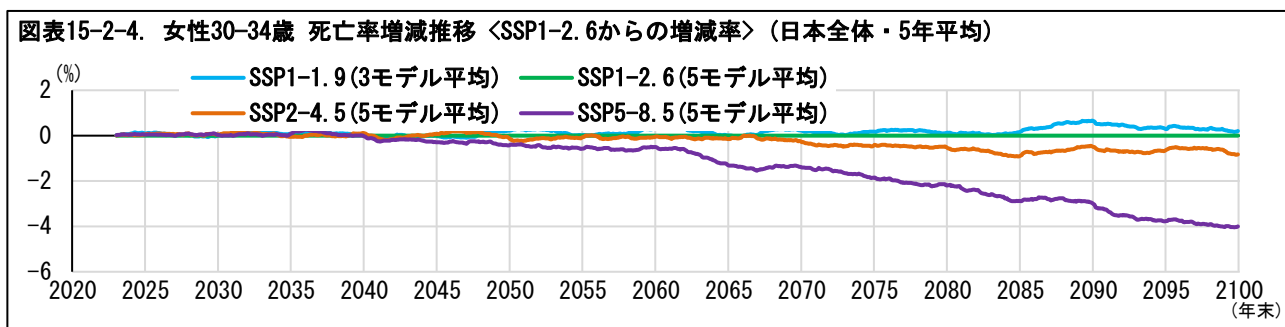
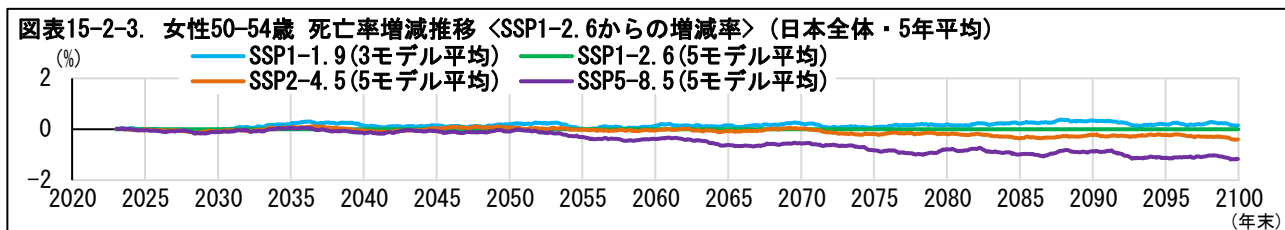
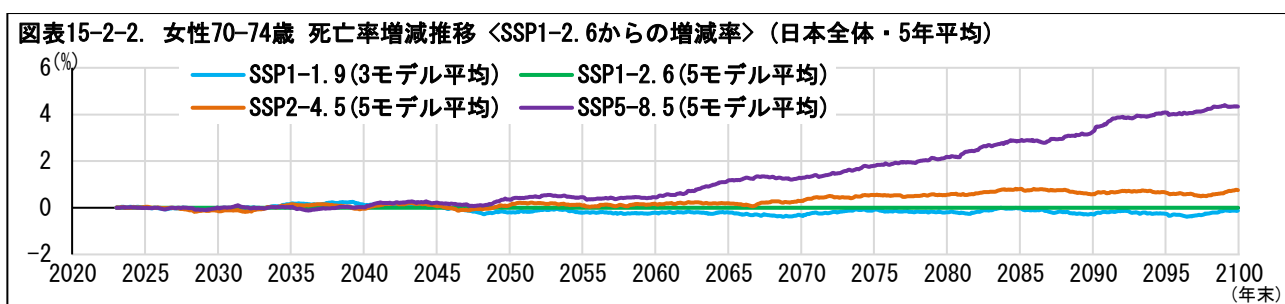
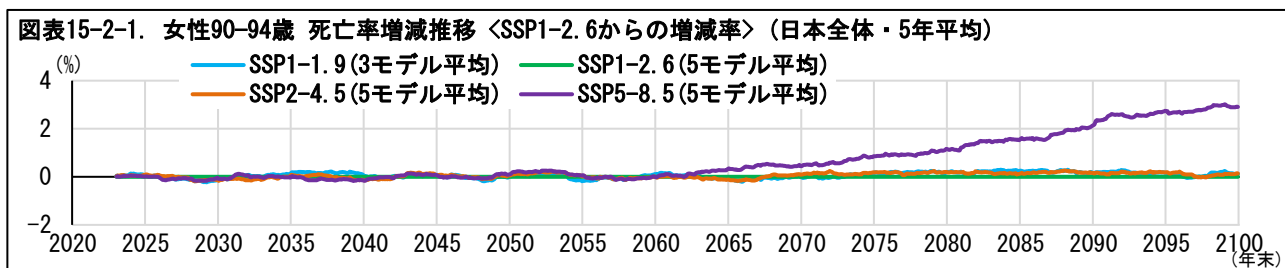
(以下、本ページ余白)

男性については、70-74歳や10-14歳では、SSP5-8.5のSSP1-2.6からの増減率が2050年代より徐々に上昇し、2100年には8%程度となった。一方、50-54歳や30-34歳では、同増減率が2100年にはマイナスとなるなど、年齢群団ごとに傾向の大きな違いが見られた。⁴⁷



⁴⁷ SSP1-2.6 と SSP5-8.5 の差異を死因別に見ると 70-74 歳は異常無(老衰等)、10-14 歳は外因(熱中症含)などとなっている。

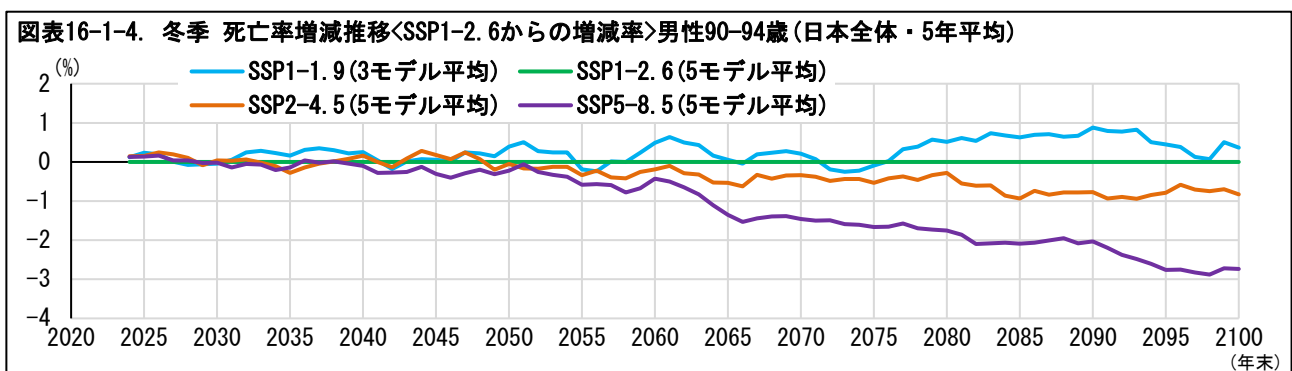
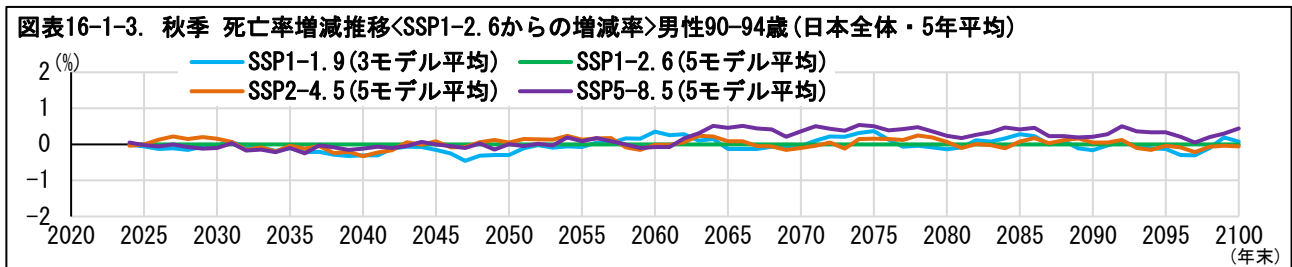
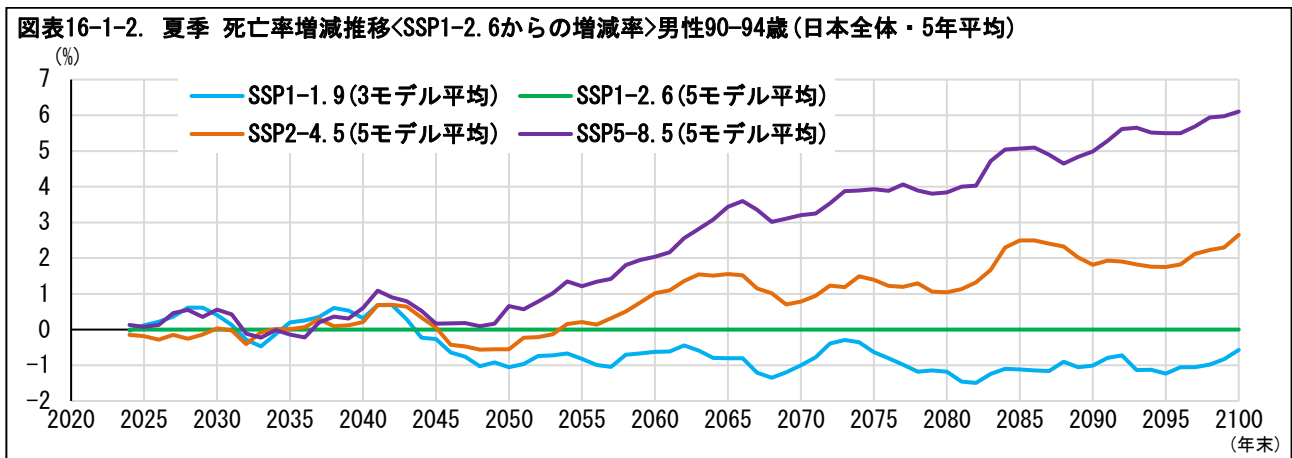
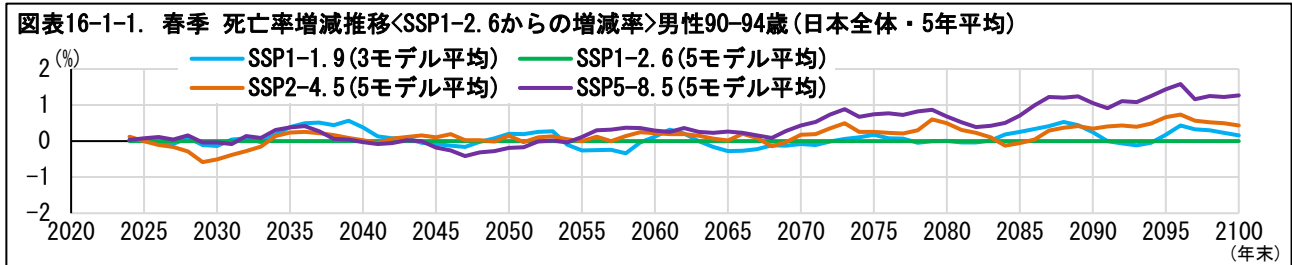
女性については、70-74歳では、SSP5-8.5のSSP1-2.6からの増減率が2050年代より徐々に上昇し、2100年には4%程度となった。一方、10-14歳では、同増減率はゼロパーセント近辺。50-54歳や30-34歳では、同増減率が2100年にはマイナスとなり、特に30-34歳ではマイナス4%程度に低下した。30-34歳の年齢群団で比較すると、男性よりも女性のほうが、同増減率は低い様子が見られる。⁴⁸



⁴⁸ SSP1-2.6とSSP5-8.5の差異を死因別に見ると90-94歳は異常無(老衰等)、70-74歳は新生物や異常無(老衰等)、30-34歳はその他の死因などとなっている。

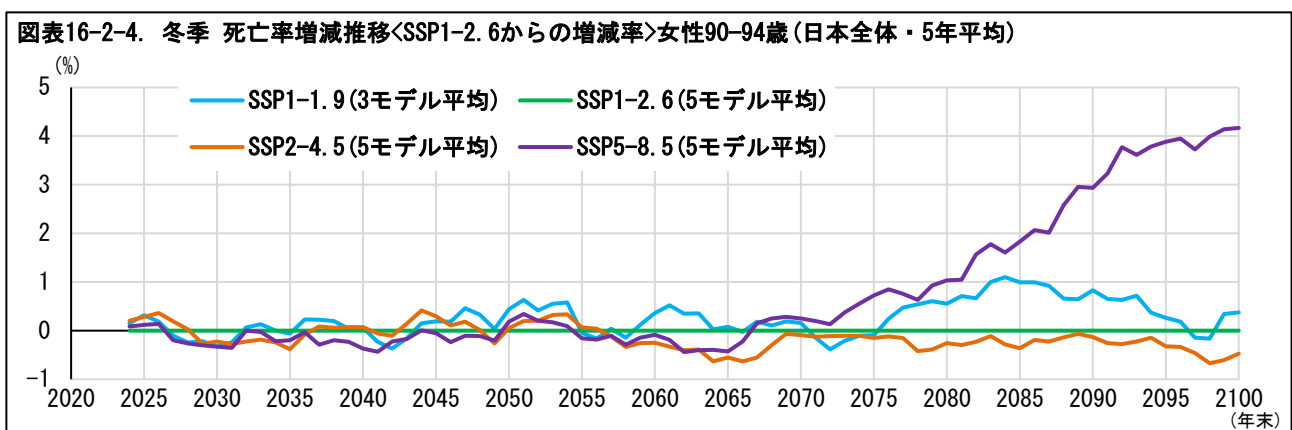
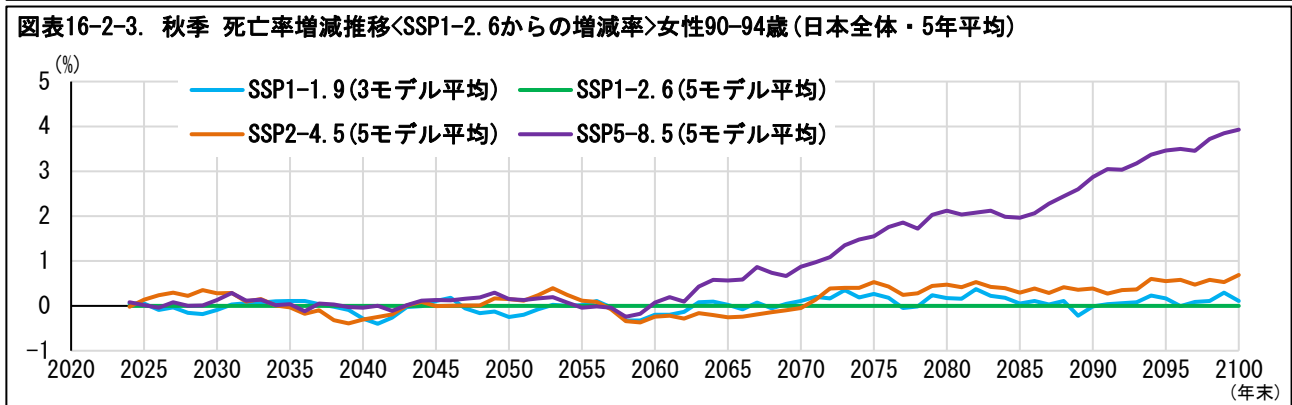
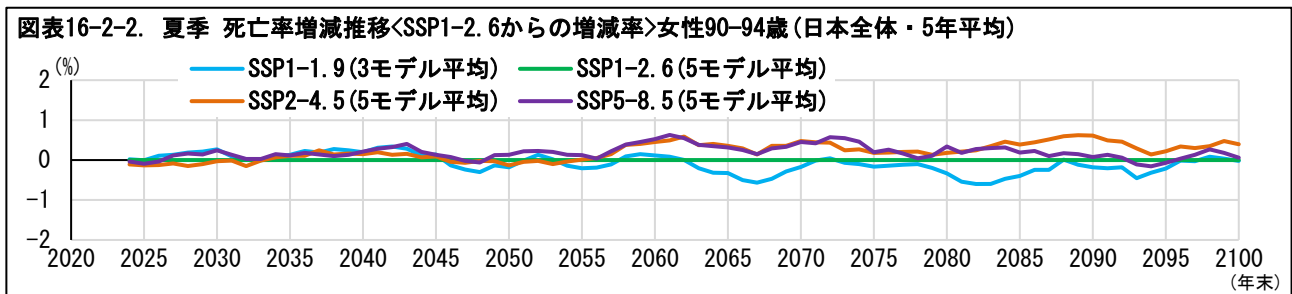
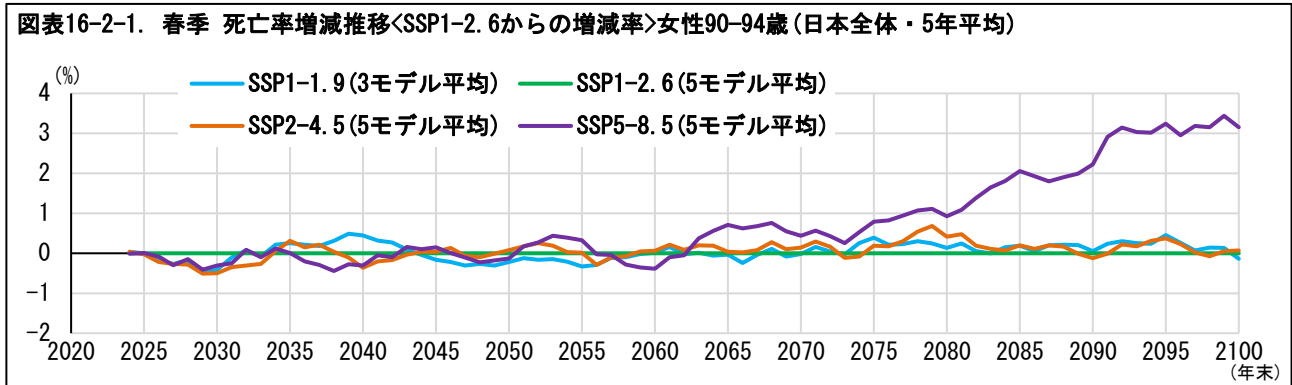
6 | 季節別：温暖化は男性には夏季の死亡率上昇、女性には夏季以外の死亡率上昇をもたらす

続いて、死亡率の推移を季節別に見てみよう。季節ごとの死亡率の水準が異なることを考慮して、各経路の SSP1-2.6 との差ではなく、SSP1-2.6 からの増減率の推移を表示してみると、次の図のとおりとなった。男性 90-94 歳は、SSP5-8.5 の SSP1-2.6 からの増減率は夏季にプラス、冬季にマイナスとなっており、夏季のほうが影響が大きい結果となった。⁴⁹



⁴⁹ 季節と月の関係について、例えば 2024 年の春季は 3~5 月、夏季は 6~8 月、秋季は 9~11 月、冬季は 2023 年 12 月~2024 年 2 月、としている。

女性 90-94 歳は、SSP5-8.5 の SSP1-2.6 からの増減率は春季、秋季、冬季にプラスとなり、夏季にはゼロ近辺で推移している。男性と女性で、温暖化が季節ごとの死亡率に与える影響が異なる結果となった。

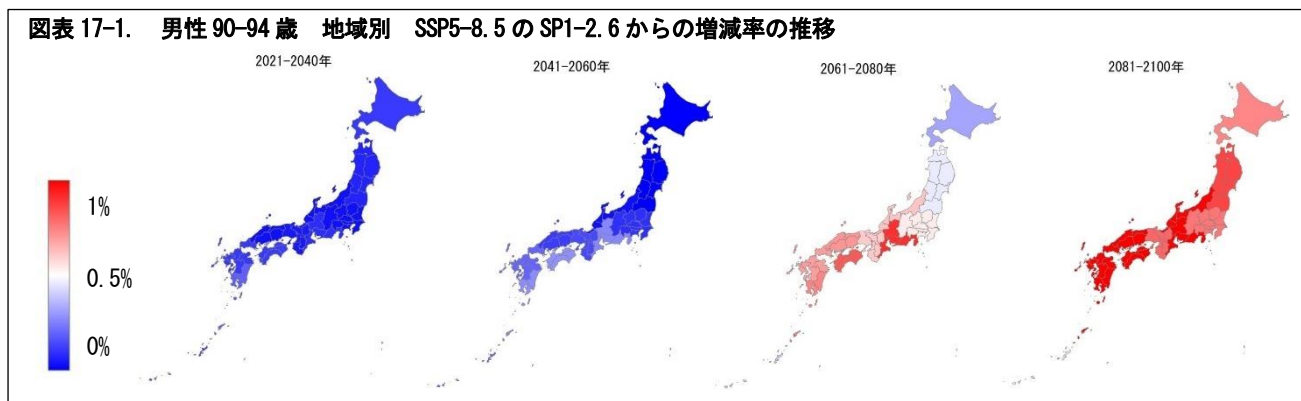


なお、こうした季節別の傾向は、どの年齢群団でも同じというわけではない。年齢群団によって、傾向が異なる可能性がある点に留意する必要がある。

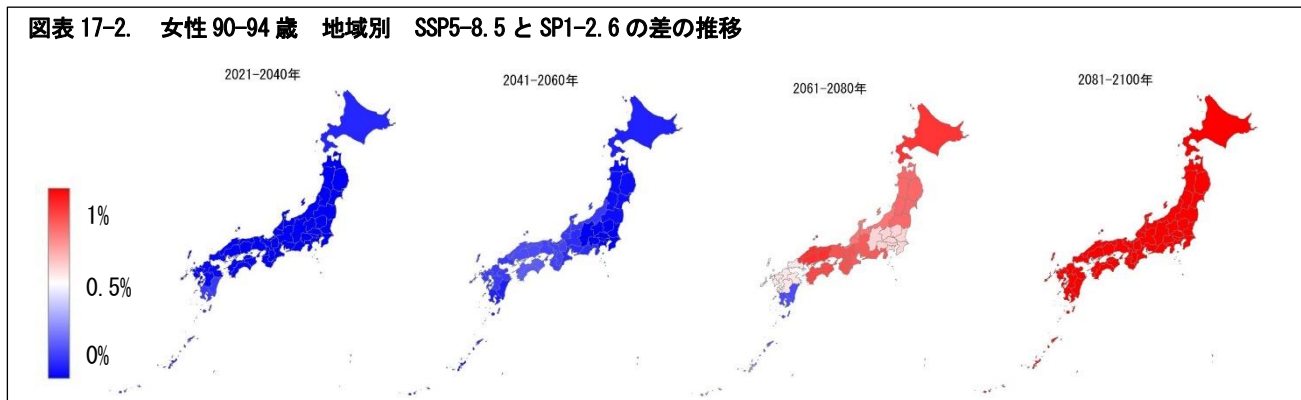
7 | 地域区分別：温暖化が死亡率に与える影響の出現時期は、地域によって異なる

続いて、死亡率の推移を地域別に見てみよう。SSP5-8.5 の経路の SSP1-2.6 からの差の推移を地図上に色の違いとして表示してみると、次のとおりとなった。

男性 90-94 歳は、2061-2080 年に東海地方を中心に差が大きくなる。そして、今世紀末にかけて、北陸、東海や、西日本の各地域(沖縄を除く)で、差の拡大が顕著となっていく。最も人口の多い関東甲信地域は、他の地域にやや遅れる形で、SSP5-8.5 の経路の SSP1-2.6 からの差が拡大していく。



女性 90-94 歳は、2061-80 年に北海道や中国地方などで差が大きくなる。関東甲信地域は、男性と同様に他の地域にやや遅れて差が拡大していく。そして、今世紀末にかけて、全国的に差の拡大が顕著となっていく。⁵⁰



なお、こうした地域別の傾向は、どの年齢群団でも同じというわけではない。年齢群団によって、傾向が異なる可能性がある点に一定の留意が必要となる。

⁵⁰ 90-94 歳では、異常無(老衰等)が主な死因となっている。異常無(老衰等)の死亡率は、高温指数の影響を強く受ける。2080 年の高温指数の SSP1-2.6 と SSP5-8.5 の差は、夏季には東海地方、冬季には中国地方で大きいと予測された。このため、夏季の影響を受けやすい男性では東海地方、冬季の影響を受けやすい女性では中国地方で、SSP1-2.6 と SSP5-8.5 の死亡率の差が大きくなっているものとみられる。

7—死亡数の予測結果

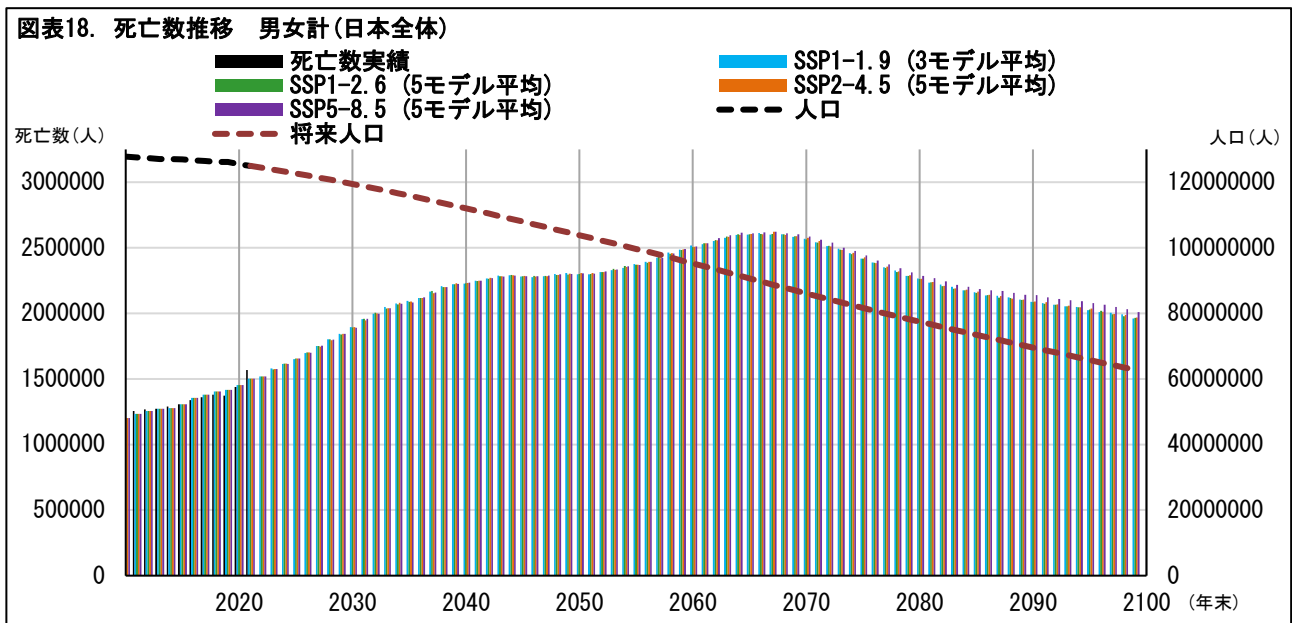
前章に続いて、本章では死亡数の計算結果を見ていく。

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、死亡率と異なり、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。⁵¹

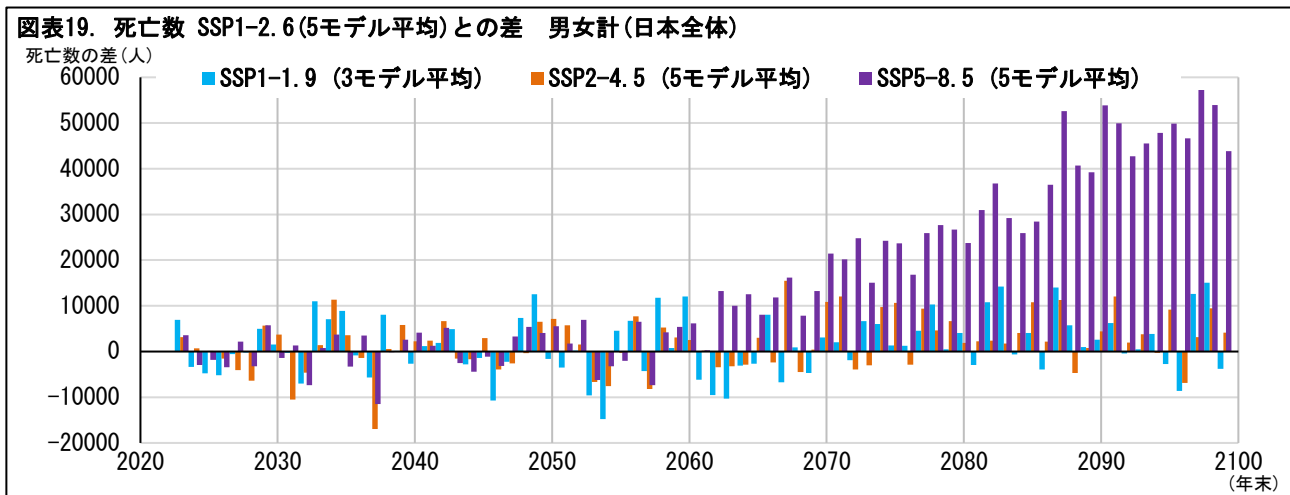


各経路での死亡数について、SSP1-2.6を基準として、それとの差を表示すると次の通りとなる。

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°C未満に抑えるSSP1-2.6と、化石燃料依存型の発展の下でも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。

⁵¹ 「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。



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)の死亡数を比較基準に置くこととした⁵²。

図表20. 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%)

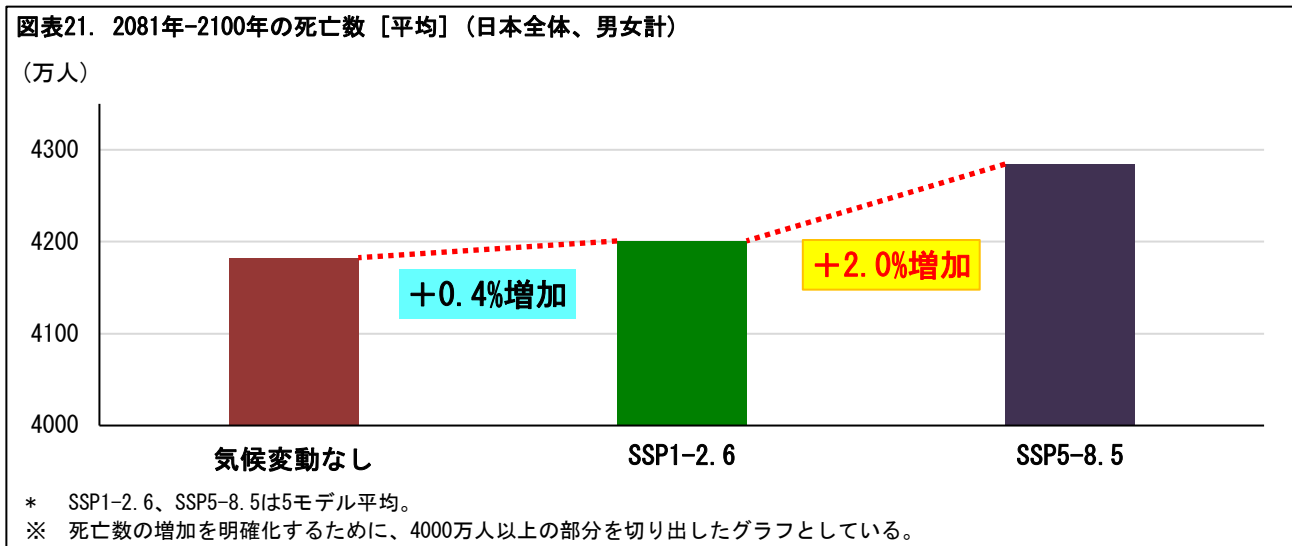
* SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5は5モデル平均。SSP1-1.9は3モデル平均。

※[]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)

⁵² 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。

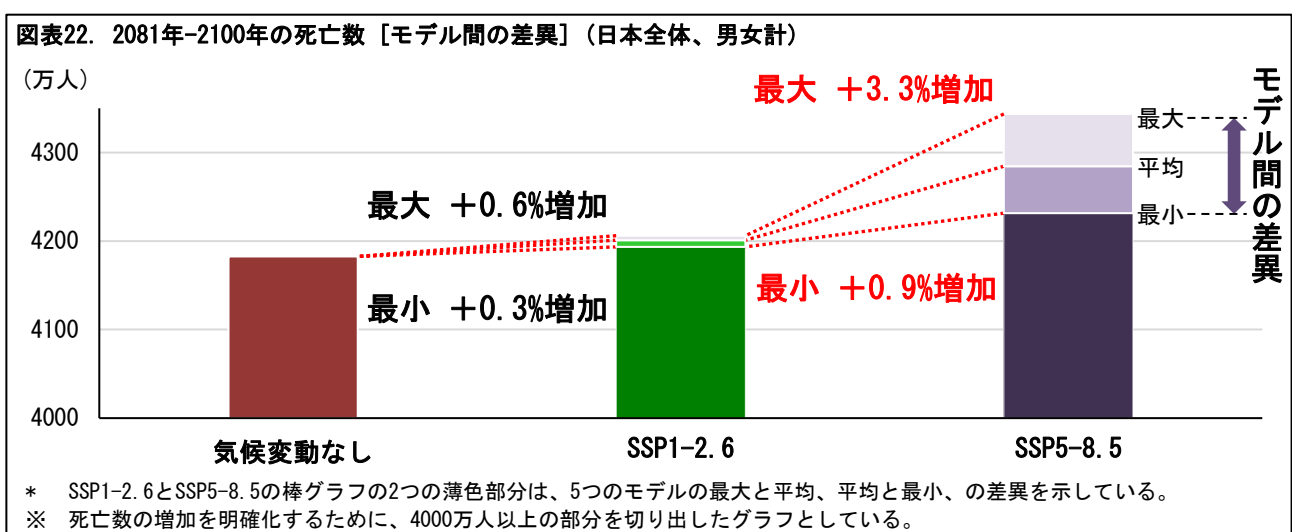
気候変動がない場合に比べて、SSP1-2.6の経路で気候変動が起きた場合、2081-2100年の死亡数は+0.4%増加する。そして、SSP5-8.5の経路で気候変動が起きた場合、同死亡数はSSP1-2.6の経路からさらに+2.0%増加する、との予測結果となった。

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。⁵³



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見える。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。

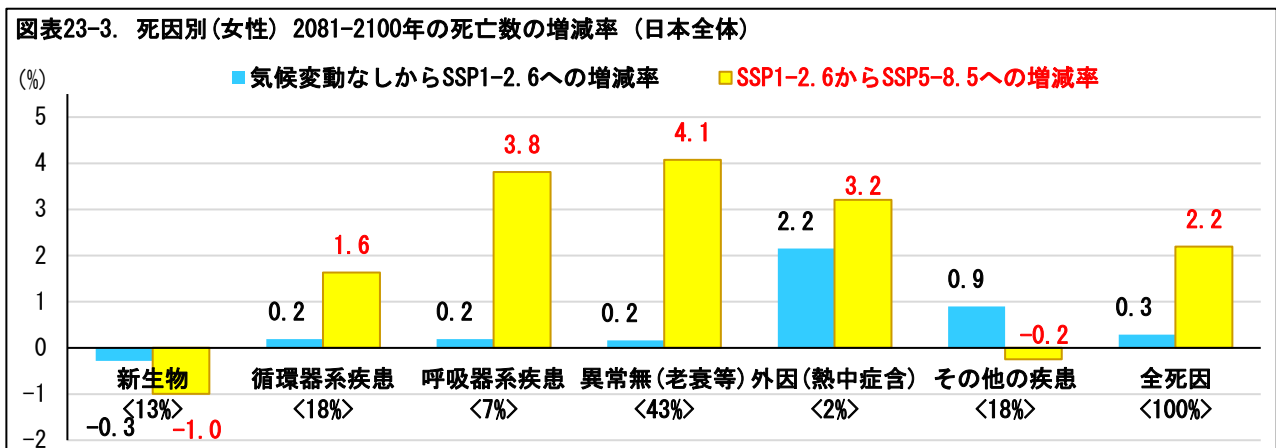
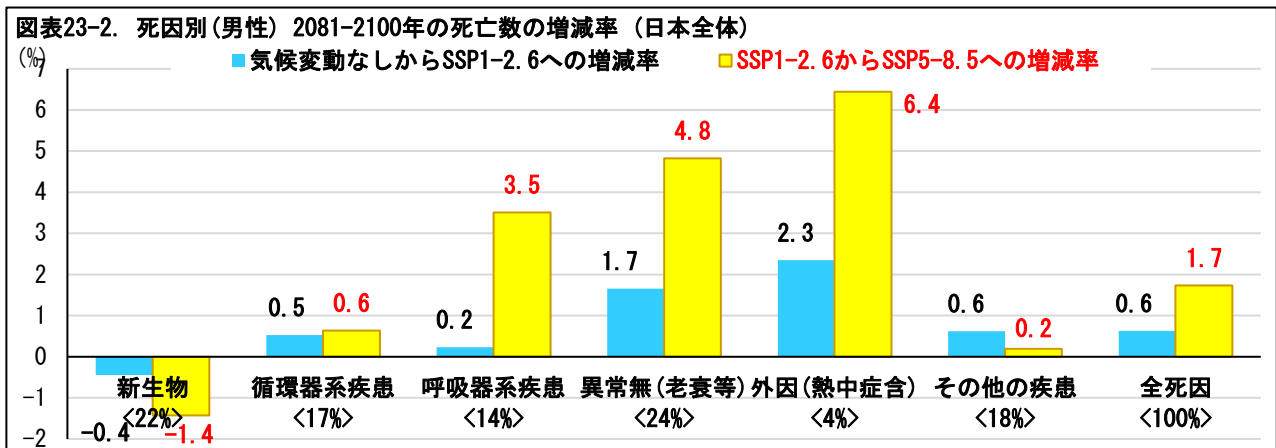
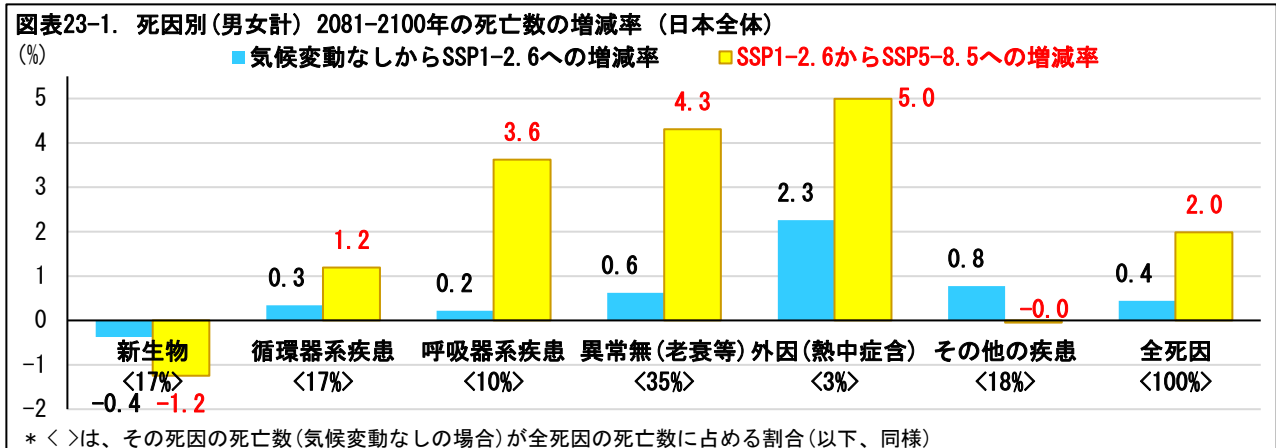


⁵³ 本稿で得られた核心的な推論部分に下線を付している。

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

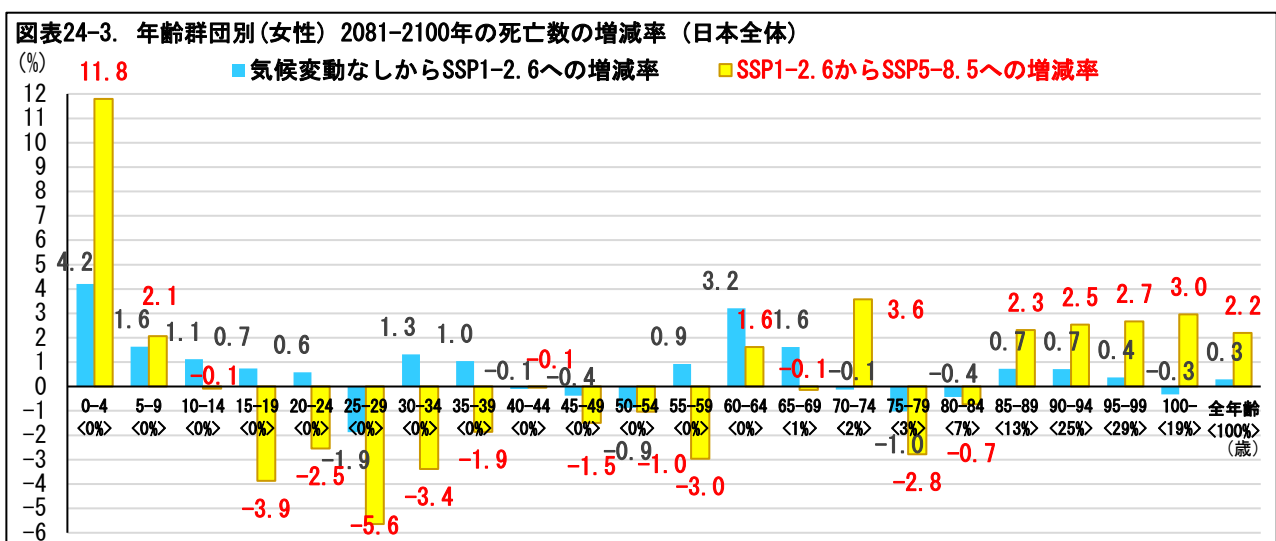
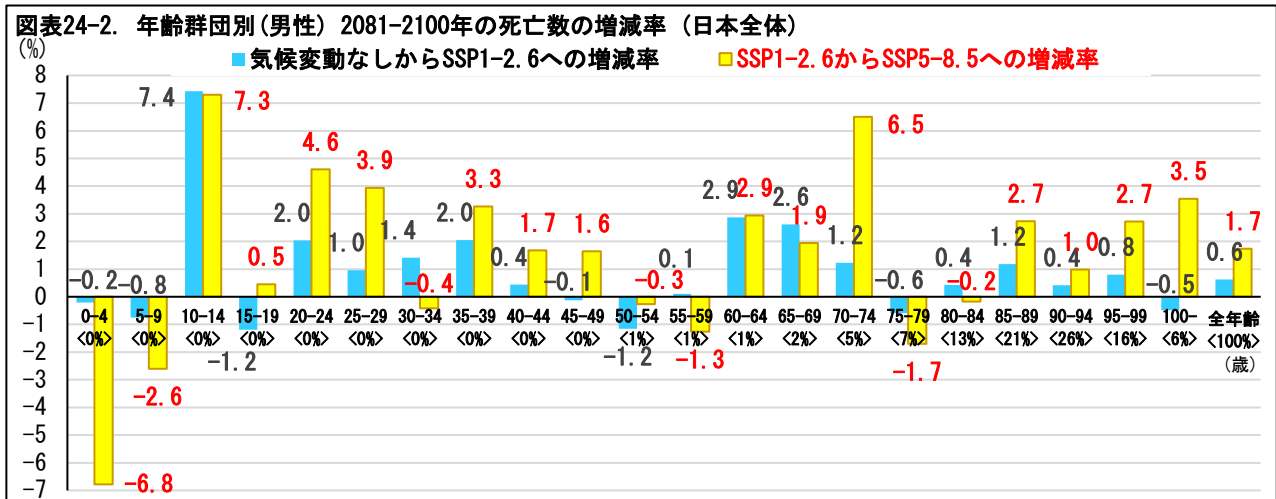
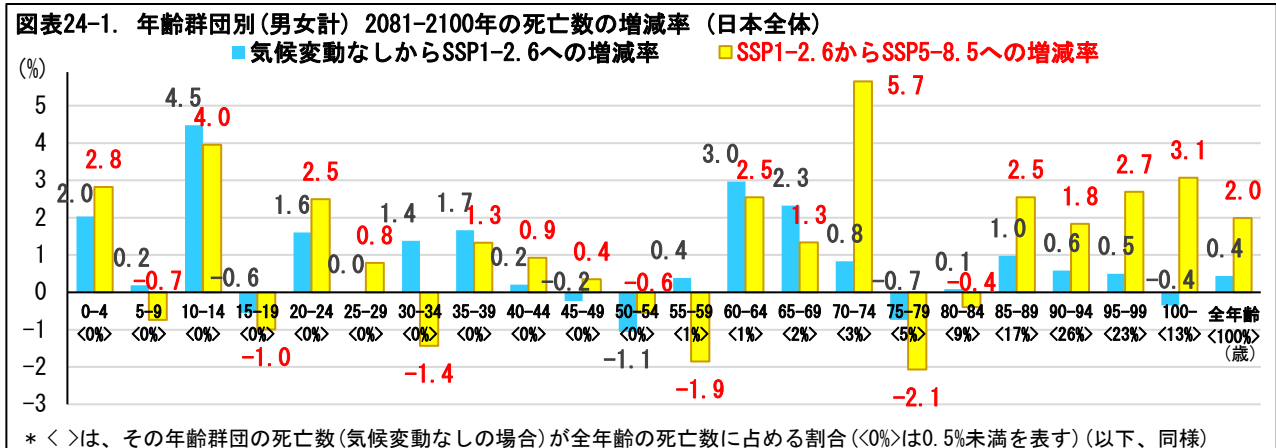
第2節では、2081-2100年の死亡数について、気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率が+0.4%、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率が+2.0%との結果であることを示した。本節以降では、これらの増減率について、死因、年齢群団、月、地域区分のそれぞれについて、要素に分けて見ていく。

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。



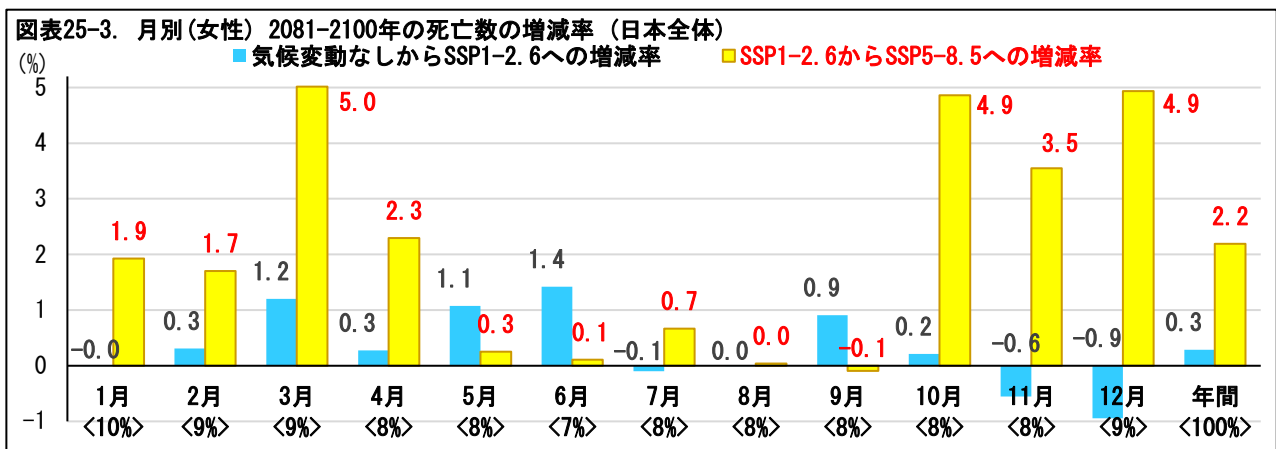
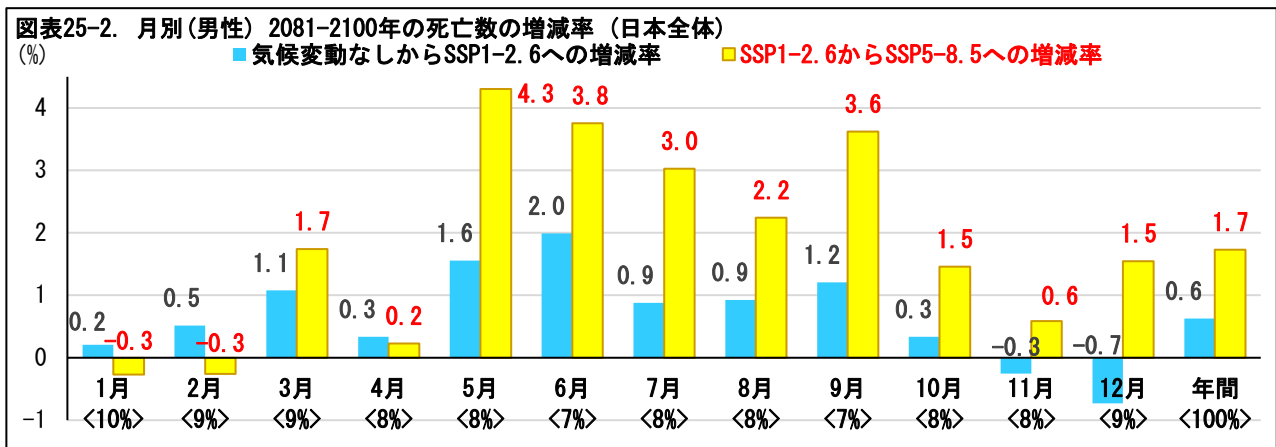
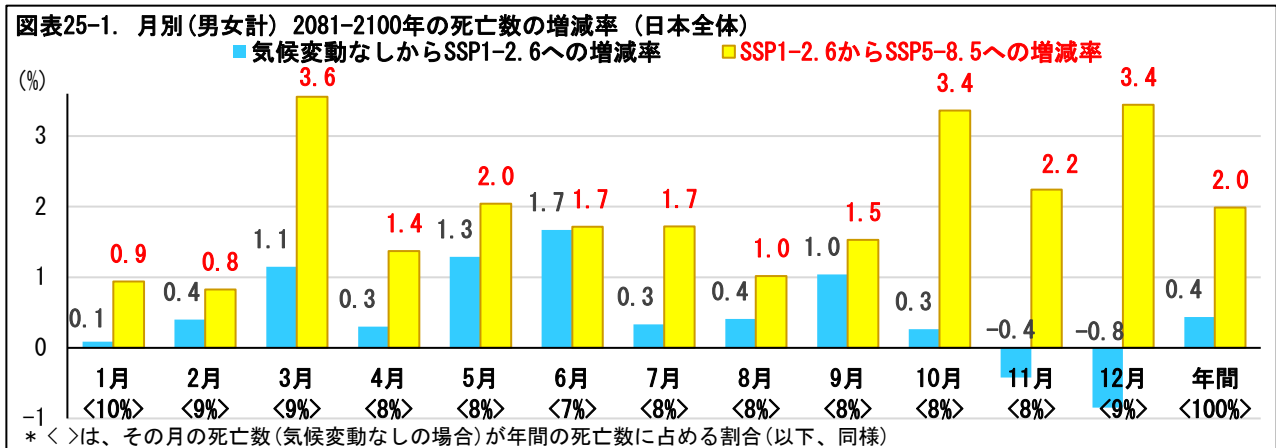
5 | 年齢群団別：SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減では、85 歳以上のどの年齢群団も死亡数が増加

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。



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

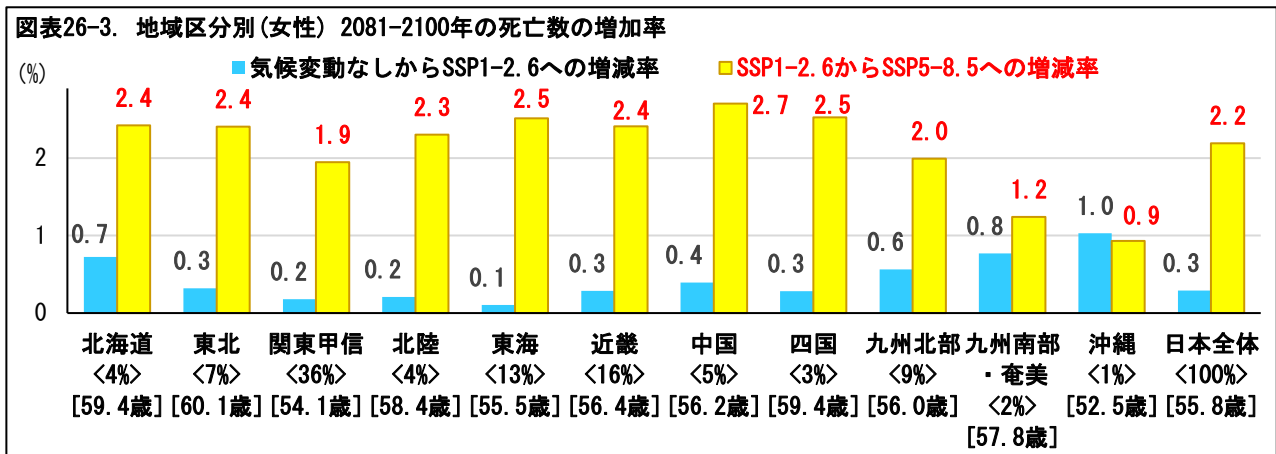
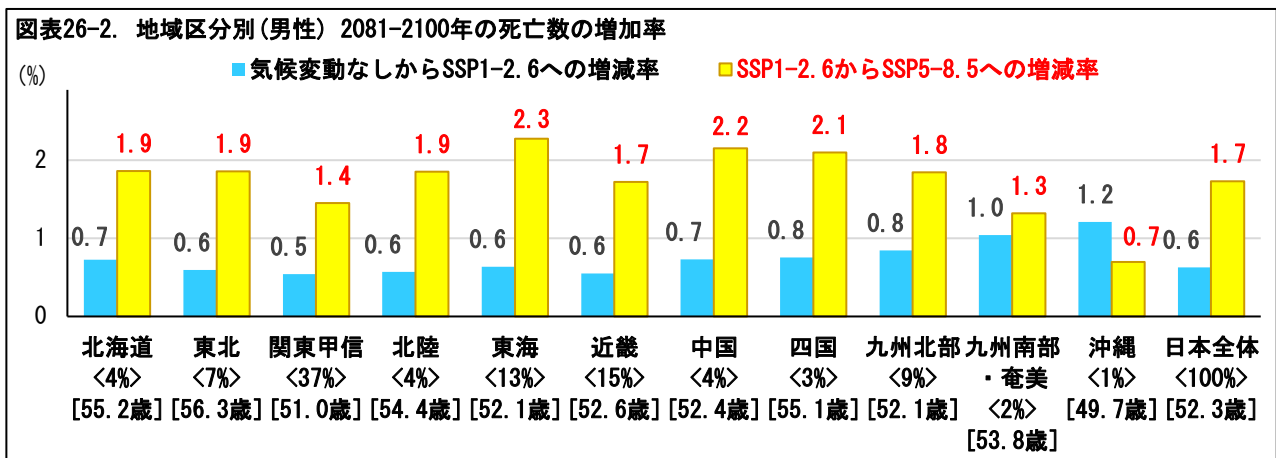
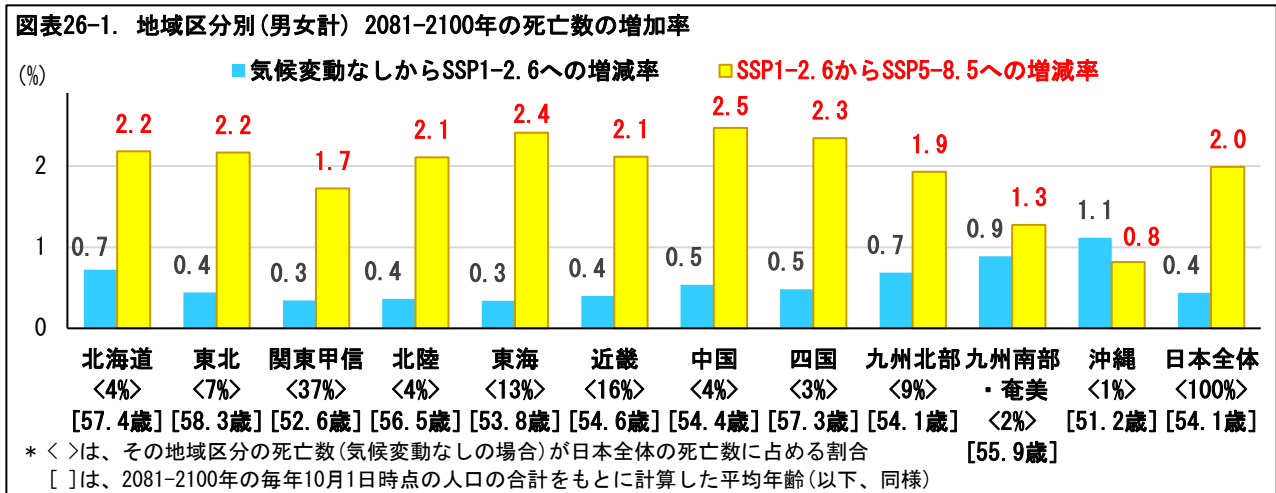
続いて、月別に見てみる。気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率は、3月、5月、6月に大きい。11月と12月は減少となっている。一方、SSP1-2.6から SSP5-8.5 への増減率は、3月、10月、11月、12月に大きい。SSP5-8.5 の経路で推移すると、春先や秋から冬にかけて、死亡数が大きく増加する可能性があることを示している。なお、夏季は気候変動の影響を比較的受けないとの結果となった⁵⁴。男女別に見ると、男性は夏季、女性は秋季から春季にかけて気候変動の影響を受ける傾向が見られる。



⁵⁴ 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。



8—考察

本章では、前章までの検討や結果を踏まえて、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。根拠が薄弱な部分や、論理にやや飛躍が生じる部分もある。また、本稿の回帰式で得られた結果は相関関係に過ぎず、その結果をもとに因果関係を考察すること自体がナンセンスという見方もありうる。読者諸氏は、こうした点を踏まえたうえでご覧いただきたい。

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、今回の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、死亡数が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。⁵⁵

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。

⁵⁵ 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。

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。

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174地点のデータを取得、加工した⁵⁶。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、グラフとして図示するだけで付録図表のとおり、数十ページに渡る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。⁵⁷

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

⁵⁶ 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。

⁵⁷ 気候指数については、図表3の注記にある通り、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。

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。

3 | 得られた結果をどのように解すべきか? — 因果関係の検証を行うべきだが容易ではない

本稿では、第5章から第7章にかけて、計算結果をさまざまなグラフに図示した。そして、将来の気候指数、死亡率、死亡数の解釈をもとに、気候変動と死亡率、死亡数に関する推論を行った。

ただし、結果の解釈は、多くの困難を伴うものであった。以下、具体的にいくつかの点について見ていく。

(1) 新生物を死因とする死亡の推移

死因別の死亡数の増減率(図表 23-1~23-3)を見ると、2081-2100年に新生物を死因とする死亡の数は、気候変動なしから SSP1-2.6 への増減率、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率のいずれも減少となっている。男性 90-94 歳の新生物による死亡率の推移(図表 14-1-1)を見ると、SSP5-8.5 は SSP1-2.6 よりも低下している。つまり、気候変動が激しくなると、新生物の死亡は減る結果となっている。

これについては、気候変動と新生物の間に因果関係があることは考えにくい。むしろ、近年、温暖化と新生物死亡率の低下がそれぞれ進んでいることが、回帰式の作成過程で、相関関係としてとらえられていることが原因と考えられる。⁵⁸

(2) 75-79 歳群団の死亡の推移

年齢群団別の死亡数の増減率(図表 24-1~24-3)を見ると、2081-2100年の死亡数は、85歳以上の年齢群団では、SSP1-2.6 から SSP5-8.5 への増減率は増加となっている。一方、75-79歳、80-84歳の年齢群団は減少となっており、特に75-79歳は大きな減少となっている。

これについては、年齢群団に固有の要因(いわゆる年齢コホートの要因)があることが考えられる。75-79歳の年齢群団に話を絞ってみる。回帰式計算で、学習データとして用いた死亡率の期間は2009-2019年だ。この時期に75-79歳であった人は、1930~1944年(昭和5~19年)生まれであり、幼・少年時代を戦中期に過ごした層である。戦時中の食糧難や感染症の蔓延など、食糧事情や衛生環境に関する過酷な体験が、気候変動に関して、他の年齢層と異なる死亡動向をもたらすとの仮説も立てられる。だが、具体的にどのようなメカニズムが存在しうるのかについては、慎重に検討・検証を行う必要があるものと考えられる。なお、このような年齢コホートの要因の存在が明らかになった場合には、これを予測から外すことが適切と考えられる。

(3) 男性と女性の月・季節ごとの死亡の相違

月別の死亡数の増減率(図表 25-1~25-3)を見ると、2081-2100年の死亡数は、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としている。これを男女別に見ると、男性は夏季、女性は秋季から春季にかけて気候変動の影響を受ける傾向が見られる。

⁵⁸ 図表 14-1-2 の通り、女性 90-94 歳では新生物による死亡率の推移は経路間の差異は微小となっている。男女で傾向が異なる原因について、図表を表示したページの注記で回帰計算に関する検討結果を述べてはいるものの、因果関係については明らかになっていない。更なる分析を要するものと考えられる。

これについては、一般に仕事等の関係で、夏季には男性のほうが女性よりも屋外で過ごす機会が多いことが影響している可能性がある。今後、温暖化が進み、夏季だけではなく、3月や10月にも高温の日が増えると、その影響が女性に顕著に表れる可能性があるものと解される。月や季節ごとの死亡の動向については、さまざまな経路が考えられるため、検討・検証を重ねる必要があるだろう。

(4) 関東甲信や近畿での死亡の推移

地域区分別の死亡数の増減率(図表 26-1~26-3)を見ると、人口の多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。こうした傾向は、男性で顕著となっている。

これについては、東京や大阪などの大都市では青年期や壮年期の人口の割合が地方に比べて高いことが影響しているものと考えられる。また、都市部ではヒートアイランド現象を通じて、気温上昇に対する備えや人々の意識が高くなっていることが要因の1つとして挙げられる可能性もある。

なお、本来、こうした結果の解釈は、因果関係の検証に基づくべきだが容易ではない。検証に疫学や生気象学等のさまざまな知見を要するためである。得られた疑問点や懸念点の1つ1つについて、継続的に取り組む必要があるものと考えられる。

4 | 気候変動に対する適応はどう反映すべきか? — 諸研究の成果を踏まえて計算に取り入れていく

本稿では、死亡率の改善トレンドを、時間項として織り込んだ。これは、死亡率に影響を与える医療技術や医薬品・医療機器等の進歩をはじめ、社会全体の健康増進意識の高まりや、健康診断等の予防医療の普及。住居や職場等の衛生環境の改善。禁煙・節酒を含む、食生活バランスの見直し。適度な運動等により体を動かすことや、適切な休息・睡眠をとることが重要性であることの認識の浸透など、さまざまな時間的要因の寄与を加味したものである。

ただし、気候変動の死亡率への時間的な影響を見る際には、(1)緩和策の推進等の気候政策により気候変動そのものが変化する可能性や、(2)医療体制等の気候変動に対する適応策が進む可能性も考えられる。このうち、(1)の気候変動そのものの変化については、共通社会経済経路(SSP)の経路として一定程度織り込まれているものと解することができる。一方、(2)の気候変動に対する適応については、本稿の気候指数と死亡率の関係式の中には織り込まれていない。

今後、関連する諸研究の成果を踏まえて計算に取り入れていく必要があるだろう。

9—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7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)
https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/sea_lev_var/sea_lev_var_his.php
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、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)
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 ー地球温暖化のメカニズムから政策までー」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 ー気候モデルで探る 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 ー原理からわかる雲・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 ー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)

筆者の過去の関連レポート

「気候変動指数化の海外事例ー日本版の気候指数を試しに作成してみると…」篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2022年9月8日) … ①

<https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=72284?site=nli>

「気候変動指数の地点拡大ー日本版の気候指数を拡張してみると…」篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2022年12月28日) … ②

<https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=73405?site=nli>

「気候指数[全国版]の作成ー日本の気候の極端さは1971年以降の最高水準」篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2023年4月6日) … ③

https://www.nli-research.co.jp/files/topics/74427_ext_18_0.pdf?site=nli

「気候変動と死亡数の増減ー死亡率を気候指数で回帰分析してみると…」篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2023年8月31日) … ④

<https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=75966?site=nli>

「気候変動と死亡数の関係－2022 年データで回帰式を更新し、併せて改良を図ってみると…」 篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2024 年 1 月 18 日) … ⑤ = 「前回のレポート」
https://www.nli-research.co.jp/files/topics/77177_ext_18_0.pdf?site=nli

「気候指数 2023 年データへの更新－日本の気候の極端さは、1971 年以降の最高水準を更新」 篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2024 年 4 月 5 日) … ⑥
https://www.nli-research.co.jp/files/topics/78151_ext_18_0.pdf?site=nli

「気候変動:死亡率シナリオの試作－気候変動の経路に応じて将来の死亡率を予測してみると…」 篠原拓也(基礎研レポート, ニッセイ基礎研究所, 2024 年 8 月 15 日) … ⑦
<https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=79412?site=nli>

上記の各レポートの関係と、今回のレポートの位置づけ
 (括弧内の記号はバージョン)

