

基礎研 レポート

気候変動指数化の海外事例

日本版の気候指数を試しに作成してみると…

保険研究部 主席研究員 篠原 拓也
(03)3512-1823 tshino@nli-research.co.jp

はじめに

気候変動問題が議論されるようになって久しい。温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化は、豪雨やスーパー台風等の極端な気象の頻発、南極やグリーンランドの氷床やアフリカ山岳地域等の氷河の融解、ヨーロッパなどでの熱波や干ばつの発生、各地での大規模森林火災の多発など、地球環境にさまざまな影響をもたらしている。

ただ、ニュース報道等で極端な気象や災害など1つ1つの事象をみることはできても、「国や地域全体でどれくらい極端さが高まっているのか」— 気候変動の状況、を把握することは簡単ではない。そこで、こうした気候変動の状況を指数化して、その動きを把握しようとする取り組みが、北米やオーストラリアのアクチュアリーの間で始まっている。ヨーロッパでも、検討が進められている。

本稿では、これらの先行事例を参考にしながら、もし日本で気候指数を作成するとしたら、どのように行うべきか。実際に、気候指数の試作を行いながら考えてみることにしたい。

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。

[目次]

はじめに.....	1
1—気候指数の目的.....	3
1 気候指数には慢性リスク要因の定量化が求められる.....	3
2 海外ではアクチュアリーが気候指数を開発しているケースもある.....	3
2—北米の気候指数.....	4
1 北米を12の地域に分けて、地域ごとに指数を開発.....	4
2 月ごとと季節ごとの指数がある.....	4
3 指数はゼロを基準に、プラスとマイナスの乖離度の大きさを表される.....	4
4 6つの項目と合成指数で、気候変動の推移をとらえる.....	5
5 ACIの合成指数は上昇傾向.....	6
3—北米の気候リスク指数.....	7
1 ACRIバージョン1.0の対象地域はアメリカのみ.....	7
2 ACRIバージョン1.0は財産の損害のみ.....	7
3 損害額を対数換算して、4つの変数の回帰式で表すモデルを構築.....	7
4 地域レベルの推定の安定度は低い.....	8
5 ACRIは、損失額から参照期間中の平均損失額を差し引いて計算する.....	8
6 ACRIは、近年、変動が激しくなっている.....	9
4—オーストラリアの気候指数.....	9
1 オーストラリアを12の地域に分けて、地域ごとに指数を設定.....	9
2 季節単位で、単年と5年移動平均の指数が設けられている.....	10
3 指数は、参照期間からの乖離度の大きさを表される.....	10
4 AACI合成指数の計算には、高温、降水、海面水位の指数しか用いない.....	10
5 AACIの合成指数は上昇傾向.....	12
5—日本版の試作 — 試作にあたっての主な検討ポイント.....	12
1 参照期間をどの期間に設定するか？ — 1971～2000年に設定.....	13
2 季節だけではなく月の指数も作るか？ — 月の指数も作る.....	13
3 どのように地域区分を設定するか？ — 今回は区分を設けない.....	13
4 閾値をどのように設定するか？ — 90%とする.....	14
5 高温と低温の指数はどのように算出するか？ — 閾値をもとに算出する.....	14
6 降水の指数はどのように算出するか？ — 閾値を超過した日数から算出する.....	14
7 強風の指数には平均風速と最大風速のどちらを用いるか？ — 平均風速を用いる.....	14
8 乾燥の指数はどのように算出するか？ — 連続乾燥日から算出する.....	15
9 海面水位の指数には平均水位と最大水位のどちらを用いるか？ — 平均水位を用いる.....	15
10 合成指数はどのように算出するか？ — 高温、降水、海面水位の3項目の平均とする.....	15
6—今回試作した気候指数の推移.....	16
7—おわりに（私見）.....	18

1—気候指数の目的

そもそも、いま、なぜ気候指数が求められるのだろうか？ まず、その点から考えてみよう。

1 | 気候指数には慢性リスク要因の定量化が求められる

近年、気候変動問題が環境問題の枠を超えて、幅広く議論されるようになってきている。ただ、ひとくちに気候変動問題と言っても、気候を構成する要素にはいくつかの種類がある。たとえば、豪雨、強風、乾燥など極端な気象の発生により、大規模な風水災や森林火災の多発が問題となっている。これは、短時間のうちに急激に環境が損なわれるという意味で、「急性リスク」と位置づけられる。

一方、温暖化により南極やグリーンランドの氷床が融解することで、海面水位が上昇して沿岸地域の居住が失われたり、永久凍土の中にあったメタンや二酸化炭素といった温室効果ガスが放出されて、温暖化を加速させたりするといった問題も出ている。こうした問題は、長期間に渡って徐々に環境を破壊していくもので、「慢性リスク」とされる。食糧・水・エネルギーの確保、生活インフラの維持をはじめ、さまざまな社会・経済基盤に深刻な影響をもたらしかねない。

気候指数が求められる背景には、自然災害として目立つ急性リスクの発現だけではなく、徐々に進行する環境破壊の慢性リスクの要因を定量的に示していく、という考え方がある。

2 | 海外ではアクチュアリーが気候指数を開発しているケースもある

一般に、気候という言葉は、長期に渡る気象の状態を指すものとされる¹。近年発生している気温上昇や降水量の増大などを、短期間の変動ではなく、長期的な変化という視点でとらえる必要がある。

そこで、気候変動の状況を映す指標があると有用である。この指標は、気候変動を全体的に示す客観的な尺度であることが求められる。

特に、保険会社では、自然災害による損害を補償する損保、気候変動から生じる生命や健康のリスクを保障する生保など、さまざまな形で、気候変動リスクを引き受けている。こうした保険引受リスクの管理にあたり、気候指数の開発・活用が役に立つものとみられる。

先行事例として、北米(アメリカ、カナダ)では、2016年に「アクチュアリー気候指数」(Actuaries Climate Index, ACI)が開発され、定期的に指数値の公表が行われている²。また、オーストラリアでは、2018年に「オーストラリアアクチュアリー気候指数」(Australian Actuaries Climate Index, AACI)が開発され、定期的な指数値の公表が行われている^{3,4}。

本稿では、それらの内容を踏まえつつ、同様の指数の日本での試作に取り組むこととしたい。

¹ 辞書では、気候とは、「各地における長期にわたる気象(気温・降雨など)の平均状態。ふつう30年間の平均値を気候値とする。」気象とは、「③〔気〕(weather)大気の状態および雨・風・雷など、大気中の諸現象。」(①と②は省略) (『広辞苑第七版』(岩波書店))とされている。

² ACIについては、“Actuaries Climate Index – Development and Design” (The American Academy of Actuaries (AAA), The Canadian Institute of Actuaries (CIA), The Casualty Actuarial Society (CAS), Society of Actuaries (SOA), 2016)が参考になる。

³ AACIについては、“Australian Actuaries Climate Index – Design Documentation” (Actuaries Institute, 2018)が参考になる。

⁴ ヨーロッパのアクチュアリーの間でも、気候指数の検討が進められている。具体的には、“Extension of the Actuaries Climate Index to the UK and Europe—A Feasibility Study” Charles L. Curry (Institute and Faculty of Actuaries, Dec 2015)といったペーパーが公表されている。しかし、まだ指数の開発、公表には至っていない模様。

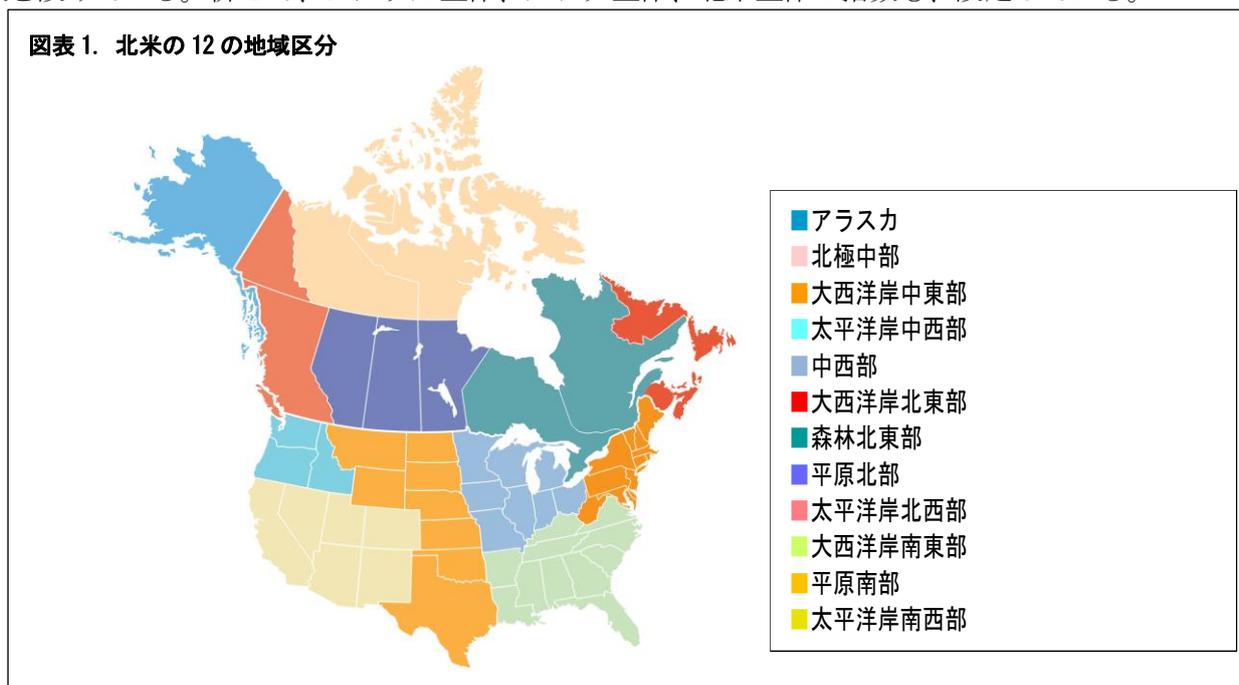
2—北米の気候指数

まず、北米で開発・運用されている気候指数(ACI)について、簡単に見ておこう。

1 | 北米を12の地域に分けて、地域ごとに指数を開発

北米地域は、北部の北極地域から、南部のメキシコ湾岸まで、広大な地域に及ぶ。気候区分で言えば、フロリダ半島の一部が属する熱帯気候、ラスベガス近辺の乾燥帯気候、太平洋岸・大西洋岸の温帯気候、カナダの広範囲を占める亜寒帯気候、北極付近の寒帯気候と、多様な気候を有している⁵。そこで、気候が類似する地域として、アメリカとカナダを、それぞれ7つ、5つの地域に分けて、指数を設けている。併せて、アメリカ全体、カナダ全体、北米全体の指数も、設定している。

図表1. 北米の12の地域区分



※ Actuaries Climate Index Development and DesignのFigure7. Regions used in the ACI より、筆者作成

2 | 月ごとと季節ごとの指数がある

指数は、月ごとおよび四半期の季節単位(12月～2月、3月～5月、6月～8月、9月～11月)に設けられている。そして、単月(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設定されている。これは、気候変動を、日単位や週単位ではなく、より長いスパンで捉えようとするものと考えられる。

3 | 指数はゼロを基準に、プラスとマイナスの乖離度の大きさを表される

ACI は、6つの項目の乖離度をもとに計算される。6つの項目とは、高温、低温、降水、乾燥、強風、海面水位を指す。計算にあたり、1961年～1990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、参照期間中の平均と標準偏差を求めておく。

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

⁵ ドイツの気候学者ケッペンが考案した、ケッペンの気候区分法が有名。この区分法では、世界各地の植生の相違を、気温と降水量に置き換えることで、区分の明確化を可能としている。

ら乖離しているかという、乖離度が計算できる。

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%の確率となる。このようにして、気候に関する極端さの度合いが、定量化される。この乖離度を、6 つの項目それぞれで計算して、その平均を ACI とする。

4 | 6 つの項目と合成指数で、気候変動の推移をとらえる

以下では、ポイントを絞って、項目別に、作成方法を概観していく。いずれも、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) 高温は、上側 10%に入る日の割合から算出

高温は、Global Historical Climatology Network(GHCN) のデータを用いる⁶。参照期間中の気温分布に照らした場合に、月(もしくは季節)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。気温は、1 日のうちにも変動するため、最高気温と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、高温の乖離度とする。

(2) 低温は、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(もしくは季節)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とる。1 日の最高気温と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、低温の乖離度とする。なお、低温の乖離度は、負値で表示される。そこで、他の項目の乖離度と比較する際には、マイナス記号を付けて正の値に変換される。

(3) 降水は、5 日間の降水量の最大値から算出

降水は、月(もしくは季節)のうち、連続する 5 日間の降水量(降雪も含む)の最大値を、ミリメートル単位でとる。高温や低温と同様に、参照期間中の降水分布に照らして、月(もしくは季節)の、参照期間からの乖離度が計算される。

(4) 乾燥は、乾燥日が連続する日数から算出

乾燥は、降水量が 1 ミリメートル未満の、乾燥日が連続する日数について、データをとる。気温や降水と異なり、乾燥については、GHCN のデータからは年間でのデータしか取得できない。このため、年間データを線形補間して、月(もしくは季節)のデータとする。気温や降水と同様に、参照期間中の乾燥日数に照らして、月(もしくは季節)の、参照期間からの乖離度が計算される。

(5) 強風は、上側 10%に入る日の割合から算出

⁶ GHCN-Daily と呼ばれる。世界の 180 を超える国と地域の地表に設置されている 90,000 ヶ所を超えるステーションの気候データを統合したデータベース。アメリカ海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)が所管している。地表を経度、緯度とも 2.5 度ごとの区域に分けて、各区域の気候データを収集している。

強風は、参照期間中の日中平均風力分布に照らした場合に、月(もしくは季節)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。そのために、まず、風速のデータが、風力に変換される。風力は、単位面積が単位時間に受けるエネルギーを指す。具体的には、風速の3乗に、大気密度⁷を乗じて、2で割り算をして得られる。風速のデータは、National Centers for Environmental Prediction(NCEP)のデータ⁸を用いる。

参照期間中の強風の分布に照らして、月(もしくは季節)の、参照期間からの乖離度が計算される。

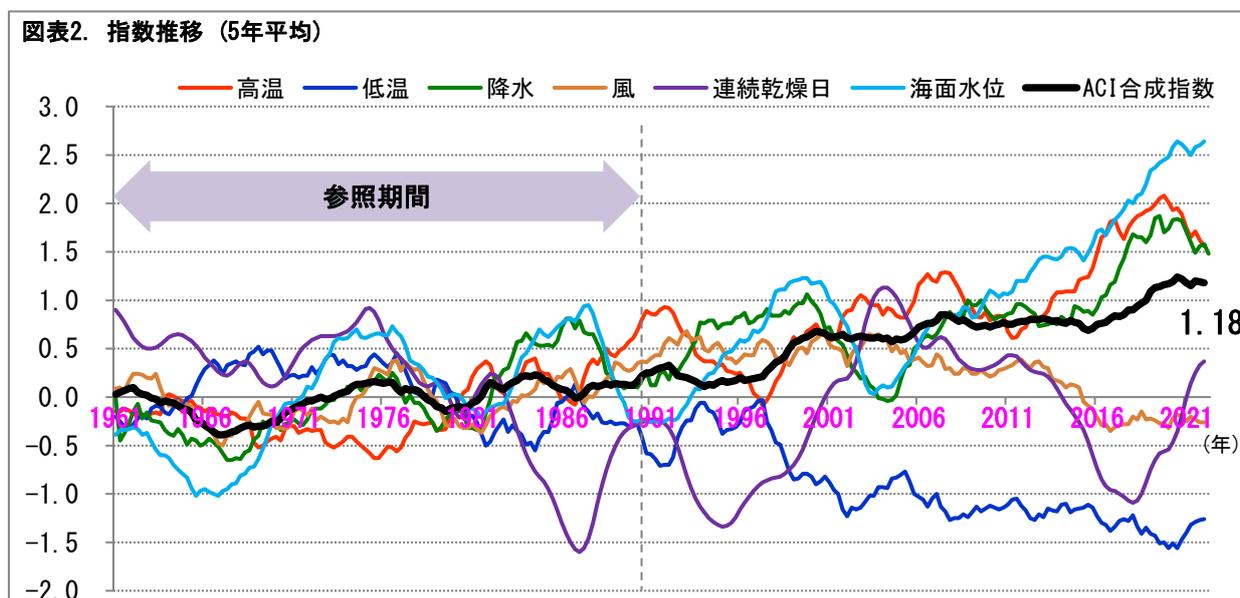
(6) 海面水位は、参照期間中の同じ月のデータから算出

海面水位は、時系列の海面水位データから算出される⁹。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30年間の毎月(もしくは季節)のデータのうち、1月のデータ、2月のデータ、…(冬季のデータ、春季のデータ、…)など、同じ月(季節)の30個のデータをもとに、参照期間の平均や標準偏差を計算する。これらをもとに、参照期間からの乖離度が計算される。

これらの6項目の指数の単純平均として、ACI合成指数が計算される。ただし、海に面していない観測地点では、海面水位を除いて合成指数が計算される。

5 | ACIの合成指数は上昇傾向

ここで、これまでの推移を見ておこう。指数には、毎月の指数と季節ごとの指数がある。また、それぞれに単月(季節)の指数と、5年平均の指数がある。アメリカとカナダのアクチュアリー会が、主として公表しているのは、季節ごとの5年平均の指数の推移となっている。これを、ACI合成指数(以下、ACI)と、各項目ごとに示すと、次の図表の通りとなる。



※ “Actuaries Climate Index® Values Calculated Using Version 1.1” (2022.5.4)より、筆者作成

⁷ 大気密度は、1.293kg/m³という固定値とされている。

⁸ National Center for Atmospheric Research(NCAR)と合同で行われた調査のデータ。経度、緯度とも2.5度ごとの区域に分けた上で、取得される地表の風速データが用いられる。

⁹ Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)の76カ所のステーションのデータが用いられる。これは、経度、緯度とも2.5度ごとの海域ごとに設けられた計潮器がベースとなる。得られたデータは、地上に対する相対的な海面水位であるため、陸地の上下動の影響を除いた、絶対的な海面水位のデータに調整する必要がある。そのために、ICE-5Gと呼ばれる調整モデルが利用される。

1961年から1990年は参照期間であり、この期間に渡るACI等の平均は0となる。ACI等の推移を見ると、実際に、横軸の付近で推移している。1991年以降、ACIの数値は、徐々に高くなっている。2022年冬季(12~2月)には、5年平均のACIは、1.18となっている。近年、北米の気候の極端さが高まっていることが、定量的に示されている。

項目ごとに見ると、高温、低温の負値¹⁰、降水、海面水位の4つは、長期的に上昇傾向にあることがうかがえる。これらは、ACIと同様、それぞれの極端さが高まっているものと見ることができる。

一方、乾燥と強風の2項目については、ACIとはあまり関係なく、独自の変動を見せている。特に、乾燥は、他の項目に比べて、上下の振幅の幅が大きい。これらについては、年ごとの違いの観測を、慎重に進めていく必要があるものと考えられる。

3——北米の気候リスク指数

極端な気象が、社会経済に与える影響を定量的に表すために、アクチュアリー気候リスク指数(ACRI)の開発が進められた。2020年に、そのバージョン1.0が公表された¹¹。その内容をみていこう。

1 | ACRIバージョン1.0の対象地域はアメリカのみ

ACRIは、ACIと同様、アメリカとカナダを対象とすることを目指している。しかし、バージョン1.0は、アメリカの7つの地域のみが対象とされた。これは、アメリカとカナダで取り扱う災害データの内容が異なり、カナダのデータ数が少なかったことによる¹²。

2 | ACRIバージョン1.0は財産の損害のみ

ACRIは、人命の損失・負傷など、さまざまな損害を対象とすることを目指している。しかし、バージョン1.0は、財産の損害に限られた。これは、ベースとしている災害データうち、信頼度の高いデータとして、財産の損害のみを取り扱ったためとされる。

ACRIは、全米海洋大気庁(NOAA¹³)のStorm Events Databaseというデータベースをもとに作られた、SHELDUS¹⁴と呼ばれるデータが使用されている。Storm Events Databaseには、アメリカで発生した50種類以上の自然災害について、物的損害、作物の損害、人命の損失・負傷が含まれている。

3 | 損害額を対数換算して、4つの変数の回帰式で表すモデルを構築

ACRIを計算するためには、さまざまな災害による被害を金額換算して、損害額(Loss)を計算することが必要となる。金額換算では、インフレを加味した2016年基準ドル換算が用いられている。Lossは、地域・月ごとに、モデルに含まれる要因以外を考慮して損失を測るための切片(I)、地域・月の資産価値(推定値)を表すエクスポージャー、4つの環境条件(降水、低温、高温、強風)の変数によっ

¹⁰ 6つの項目のうち、低温だけは、乖離が負の方向に進んでいく。このため、低温は負値をとってみたいいく必要がある。ACIの計算式では、低温は負値をとって、他の項目との平均を計算する。

¹¹ 実は、この前に、Solterra Solutionsが作成したバージョン0.1がある。このバージョン0.1は、アクチュアリー会では未承認だが、考え方の基礎をなしていると考えられる。

¹² カナダのデータでは、分析対象の3,360地域・月(=5地域×56年(1961~2016年)×12月)のうち、約8%の275地域・月にしか損害のデータがなかった。

¹³ NOAAは、National Oceanic and Atmospheric Administrationの略。

¹⁴ SHELDUSは、Spatial Hazard Events and Losses Database for the United Statesの略。

て表される関数として、つぎのように表現されると仮定している¹⁵。

$$\text{Loss} = I \times (\text{エクスポージャー})^e \times (\text{降水})^p \times (\text{低温})^l \times (\text{高温})^h \times (\text{強風})^w \quad [\text{ドル}]$$

算式中の e、p、l、h、w は、それぞれの変数に対する指数。変数の変化に応じて損失が増減する感度を表すパラメータである。過去のデータをもとに、これらのパラメータを推定していくこととなる。

ただし、Loss を実額のまま取り扱っていると、損害の発生した地域・月と、発生しなかった地域・月の間の差が大きく、分布が大きく歪んだ形になってしまう。そこで、Loss を対数換算することで、その歪みを小さくして、回帰計算等の作業処理がしやすい形としている。

具体的には、つぎの算式で、ln(Loss) のモデル化を行っている。(ln(☆)) は、☆ の自然対数を表す)

$$\ln(\text{Loss}) = \ln(I) + e \times \ln(\text{エクスポージャー}) + p \times \ln(\text{降水}) + l \times \ln(\text{低温}) + h \times \ln(\text{高温}) + w \times \ln(\text{強風})$$

この算式で、84 の地域・月 (=7 地域×12 月) ごとに、それぞれパラメータを推定する。ただし、各地域・月のデータは 1961～2016 年の 56 個しかない¹⁶ ため、パラメータの推定値には相当なブレが含まれている点に注意が必要となる。

図表 3. 信頼水準 90% で有意なパラメータ推定

	統計的に有意な地域・月の割合 (全 84 地域・月のうち)	統計的に有意な値について の平均値	統計的に有意ではない地 域・月も含む全体の平均値
エクスポージャー	70%	1.84	1.29
降水	54%	4.13	2.21
低温	12%	1.12	0.13
高温	19%	1.11	0.21
強風	15%	2.80	0.43

※ “Actuaries Climate Risk Index—Preliminary Findings” (American Academy of Actuaries, Jan. 2020) の “Table 2: Summary of Parameter Estimates Significant at the 90% Confidence Level” をもとに筆者作成

4 | 地域レベルの推定の安定度は低い

ln(Loss) の算式によるモデル化においては、アメリカ全体では推定の安定度が高かった。一方、地域レベルでの推定や、地域・月レベルでの推定では、安定度が低かった。たとえば、推定の安定度を決定係数で見ると、アメリカ全体は 0.62 なのに対し、各地域は 0.22～0.50 の範囲にとどまっている。

5 | ACRI は、損失額から参照期間中の平均損失額を差し引いて計算する

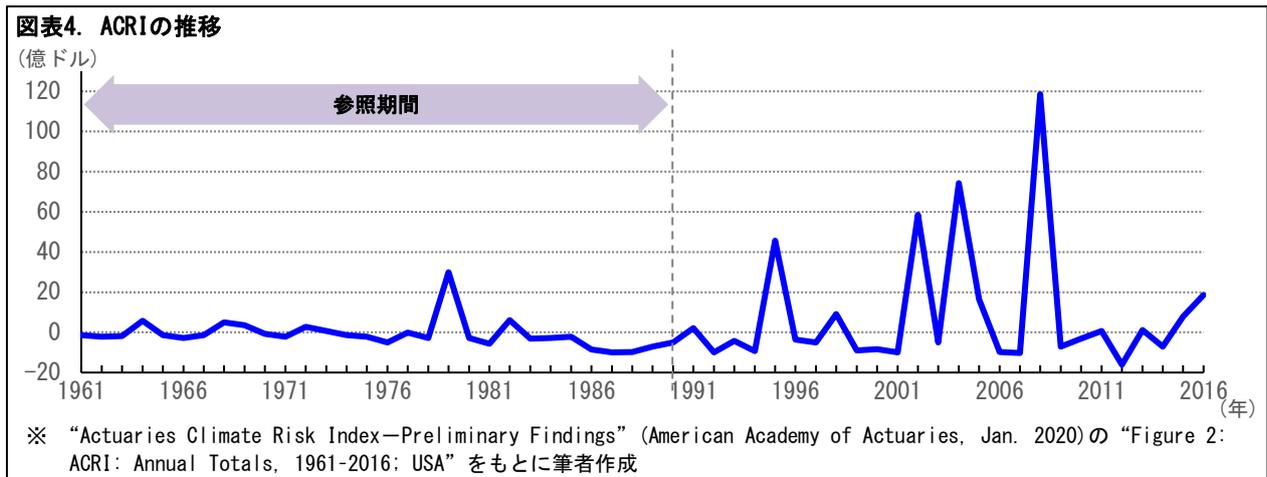
以上のように、パラメータを推定して、モデルを作ることができる。このモデルに、エクスポージャーや 4 つの変数(降水、低温、高温、強風)を代入することで、モデル化された損失額が計算できる。そして、モデルにより計算された各年の損失額から、参照期間中の損失額の平均を差し引くことで、ACRI が計算される。ただし、ACRI の計算において、パラメータが統計的に有意でない場合には、モデルによる計算は行われない。この場合は、ACRI はゼロとなる。

¹⁵ ACI の項目のうち、海面水位と、乾燥は ACRI には用いられていない。海面水位は、内陸にある「中西部」で観測できないためとしており、予備分析では、海面水位を除外しても説明力があまり失われないことを確認したとしている。また、乾燥は、年データを補間して月データを算出しており、直接獲得できるわけではないためとしている。

¹⁶ たとえば、「平原南部」の「3 月」のデータは、同地域の 1961～2016 年の 3 月のデータ、すなわち 56 個しかない。

6 | ACRI は、近年、変動が激しくなっている

こうして構築された ACRI の実際の推移をみておこう。つぎの図表のとおりとなる。



「モデルにより計算された各年の損失額から、参照期間中の損失額の平均を差し引く」という ACRI の計算方法により、参照期間中の ACRI の平均は、ゼロとなる。1979 年に 31 億ドルとなり、この間の最高値となっている。30 年の参照期間のうち、22 年は ACRI がマイナスとなっており、多くの年は平穏であった、とみることができる。

一方、参照期間後の 1991 年以降、2016 年までに、ACRI が 40 億ドル超となった年は 4 つあった。特に、2008 年には 120 億ドル近くまで上昇した。これは、同年 6 月に中西部で発生した、大洪水の損害によるものとみられる。このように、年次によっては自然災害で巨額の損失が発生することを示している。なお、ACRI は 1991 年以降も 14 年でマイナスとなっている。近年、年次ごとの ACRI の変動が激しくなっている様子がうかがえる。

4—オーストラリアの気候指数

つづいて、オーストラリアで開発・運用されている気候指数(AACI)についても、簡単に見ておこう。

1 | オーストラリアを 12 の地域に分けて、地域ごとに指数を設定

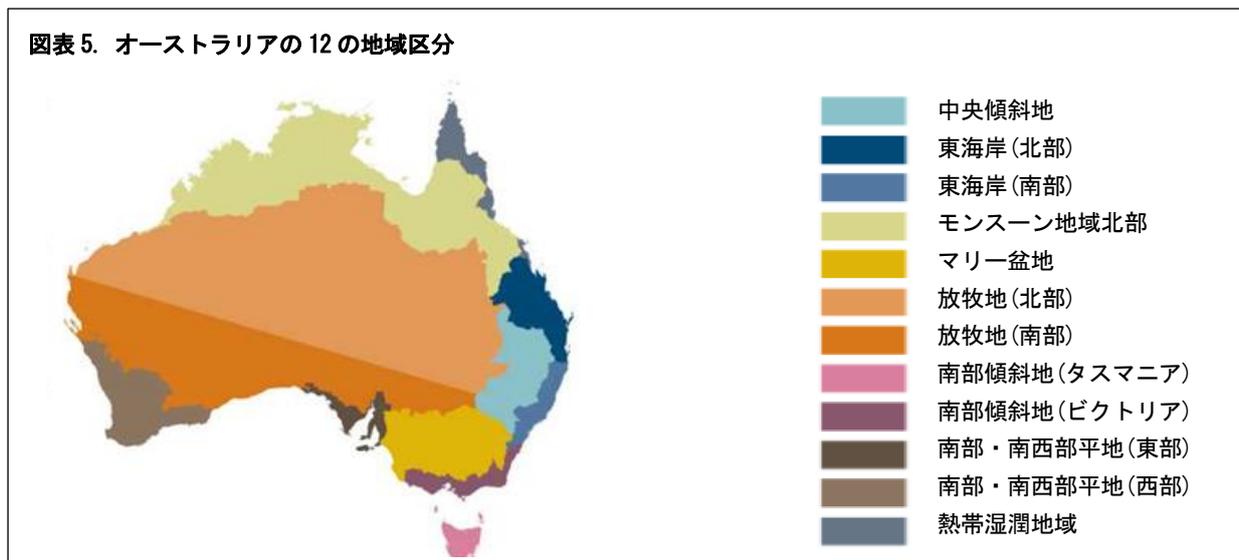
オーストラリアは、日本の 20 倍にあたる約 769.2 万平方キロメートルの国土を有している。国土は、南北約 3,700 キロ、東西約 4,000 キロに広がっており、北部の熱帯気候、中央部の乾燥帯気候、南部の温帯気候¹⁷など、地域ごとに気候が大きく異なっている。

そこで、AACI では、オーストラリアを 12 の地域に分けて、地域ごとに指数を設けている。そして、12 の地域の指数を平均することで、オーストラリア全体の指数(AACI 合成指数)を設定している。

AACI は、アクチュアリーをはじめ、公共政策の立案者、企業、一般市民に、オーストラリアの気候の極端さについて情報を提供することを目的としている。たとえば、洪水、サイクロン、干ばつ、熱波などの気候関連の極端な現象の発生を念頭に置いて作成されている。気候変動の結果、特定のリスクがどのように変化するかについて理解を深める意図が込められている。

¹⁷ ドイツの気候学者ケッペンが考案した「ケッペンの気候区分法」による。

図表 5. オーストラリアの12の地域区分



※ “Design Documentation – Australian Actuaries Climate Index”(Actuaries Institute)より、筆者作成

2 | 季節単位で、単年と5年移動平均の指数が設けられている

指数は、四半期の季節単位(12月～2月、3月～5月、6月～8月、9月～11月)で設けられている。そして、単年の季節の指数と併せて、5年移動平均と、当該季節の5年移動平均の指数も設定されている。これは、気候変動を、より長いスパンで捉えようとするものと考えられる。

3 | 指数は、参照期間からの乖離度の大きさを表される

指数は、高温、低温、降水、風、連続乾燥日、海面水位の6つの項目について、計算される。1981年～2010年の30年間を参照期間として、あらかじめ、各項目について、参照期間中の平均と標準偏差を求めておく。

ある1つの項目に、注目しよう。この項目について、ある四半期の乖離度を求めることにしよう。そのためには、その季節の計数値から、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、その季節の計数値が、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。

4 | AAI 合成指数の計算には、高温、降水、海面水位の指数しか用いない

気候の指数として、6つの項目をとっているが、AAI 合成指数の計算には、高温、降水、海面水位の指数しか用いない。低温、風、連続乾燥日を除外する理由は、つぎのように説明されている。

低温 : すでに高温が合成指数に用いられており、気温が強調され過ぎないようにするため

風 : 1995年頃の風速計の最新化で測定方法が変更されており、データが一貫しないため

連続乾燥日 : 合成指数に用いられている降水と、強い負の相関を持つため

これにより、合成指数は、高温、降水、海面水位の3つの指数の平均として、計算されることとなる。

(1) 高温は、上側1%に入る日の割合から算出

指数の作成方法を簡単にみていこう。気候の元データは、オーストラリア気象局(the Bureau of Meteorology, BoM)のものを用いている。以下では、項目別にみていこう。

気温については、112カ所のBoMの気象観測所のデータが用いられる¹⁸。

高温は、参照期間中の最高気温の99%閾値(しきいち)を超えた日が、その季節にどれだけあったかという割合でみていく。たとえば、ある年の3月6日については、1981年から2010年までの3月6日とその前後5日間の、合計330日分のデータのうち、4番目に高いデータが99%閾値となる。3月6日の最高気温が99%閾値を上回っていれば、「超過」とカウントされる。このような「超過」の日数が、その季節の日数に占める割合をみる。同様のことを、1日の最低気温についても行い、99%閾値を超えた日数の割合をとる。

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、最高気温と最低気温について、乖離度の平均をとって、高温の指数が計算される。

(2) 低温は、下側1%に入る日の割合から算出

低温は、AACI合成指数の計算からは除外されているが、高温と同様に指数の計算は行われる。ただし、その際、閾値には1%閾値が用いられる。330日分のデータのうち、4番目に低いデータが1%閾値となる。1%閾値を下回った日数の割合から計算される。

(3) 降水は、5日間の降水量の最大値から算出

降水については、降雨の観測・報告を行っている約2,000カ所の観測所のデータが用いられる。

降水は、季節のうち、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99%閾値を超えた日が、その季節にどれだけあった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、降水の指数が計算される。

(4) 風は、99%閾値を上回る日数の割合から算出

風は、AACI合成指数の計算からは除外されているが、指数の計算は行われる。信頼できる風速の時系列データを提供するとされる、BoMの38カ所の観測所のデータが用いられる。高温や降水と同様に、参照期間中の風速の99%閾値を超えた日が、その季節にどれだけあった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、風の指数が計算される。なお、風は、他の項目より遅れて、1992年冬季(6~8月)以降の分が公表されている。

(5) 連続乾燥日は、雨が1ミリメートル未満となる乾燥日の最大連続日数から算出

連続乾燥日は、AACI合成指数の計算からは除外されているが、指数の計算は行われる。BoMの降水データをベースに、雨が1ミリメートル未満となる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。気温や降水と同様に、連続乾燥日の指数が計算される。

(6) 海面水位は、季節の最大水位のデータから算出

海面水位は、BoMによって設置された「基線海面水位監視計画」というプロジェクトで観測される、16カ所の潮位計によるデータが用いられる。海洋に面した8つの地域区分で指数が計算される。

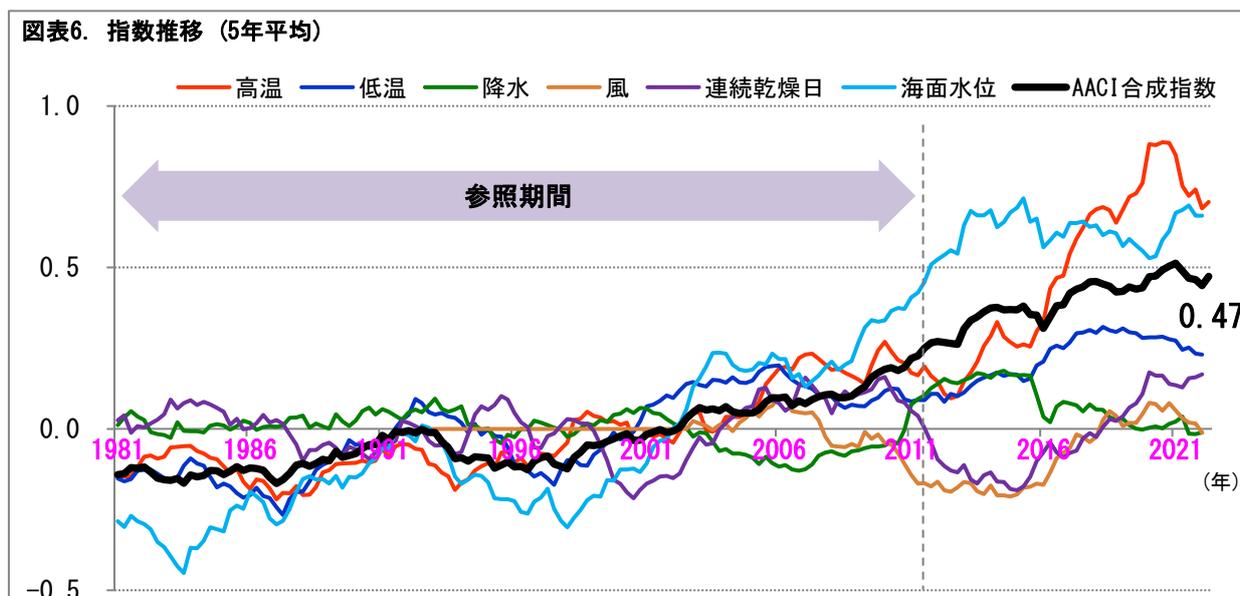
海面水位は、季節の最大水位のデータをとる。このデータから、参照期間の平均を差し引き、その結果を参照期間の標準偏差で割り算して、海面水位の指数が計算される。

¹⁸ 参照するデータは、Australian Climate Observations Reference Network - Surface Air Temperature (ACORN-SAT)のもの。長期間観測を行っている112の観測所のデータを抽出する。データ取得方法の違いなどを補正するために、“homogenisation”(均質化)と呼ばれる処理を行っている。

これらのうち、高温、降水、海面水位の3項目の指数の単純平均として、AACI 合成指数が計算される。ただし、海に面していない観測地点では、海面水位を除いて合成指数が計算される。

5 | AACI の合成指数は上昇傾向

ここで、指数のこれまでの推移を見ておこう。指数には、各季節の指数、5年移動平均、当該季節の5年移動平均、の3種類の指数がある。オーストラリアのアクチュアリー会が、主として公表しているのは、5年移動平均の指数となっている。これを、全体のAACIと、各項目について示すと、次の図の通りとなる。



※ “Australian_actuaries_climate_index_export_2021_3-nl” (Actuaries Institute) より、筆者作成

1981年から2010年は参照期間であり、この期間には、横軸の付近で推移している。2011年以降、AACI 合成指数の値は、徐々に高くなっている。2022年秋季(3~5月)には、0.47となっている。近年、オーストラリアの気候の極端さは上昇傾向にある、ということが、定量的に示されている。

項目ごとに見ると、高温や海面水位は、AACI 合成指数を上回って推移している。温暖化により、高温日数の増加や、海面水位の上昇が進んでいる様子がうかがえる。

一方、降水、風、連続乾燥日の3項目については、上下の振幅の幅が大きい。これらについては、今後も振幅の幅が拡大していくかどうかなど、中長期的な動きを、慎重にみていく必要があるものと考えられる。

5—日本版の試作 — 試作にあたっての主な検討ポイント

本章では、北米とオーストラリアで開発されたアクチュアリー気候指数を参考に、日本での指数の試作に向けて検討していこう。指数の試作にあたり、そもそも気象に関するどの項目をみるべきか、という検討ポイントが考えられる。ただ、これについて検討を進めていくと、候補としてさまざまな項目が考えられて、收拾がつかなくなる恐れがある。そこで、今回は、北米やオーストラリアと同様に、高温、低温、降水、乾燥、強風、海面水位の6項目を用いることを前提とする。

今回の指数は、気象庁がホームページで公開している気象データ(「過去の気象データ・ダウンロード」(気象庁 HP))と、潮位データ(「歴史的潮位資料+近年の潮位資料」(気象庁 HP))を用いる。試

作にあたって検討すべき点がいくつかある。以下、それぞれのポイントと設定について述べていく。

1 | 参照期間をどの期間に設定するか？ — 1971～2000年に設定

気候指数では、参照期間を設定してその期間の平均からの乖離度をもとに、気候変動の様子を捉えることが行われる。その際、まず検討点となるのが、参照期間である。

参照期間を考える際は、気象観測における「平年」と整合的であること、有用なデータが取得できることなどが要件となる。

まず、平年について。気象観測でよくいわれる平年値は、西暦年の一の位が1の年から、30年後の一の位が0の年までの30年間の平均値をいう。参照期間を平年と揃えて設定すれば、気象観測と気候指数の関係が保ちやすくなり、さまざまな点で都合がよいと考えられる。

つぎに、有用なデータが取得できること。一般に、古いデータほど、対象地域が限られていたり、データの観測方法が現在と異なっていたりするため、データの有用性は乏しくなる。たとえば、風速や潮位のデータについては、1960年代まではデータが一部欠損していたり、観測方法が異なっていたりするため、有用性に難がある。

これらを踏まえて、今回は参照期間を1971～2000年に設定することとした。

2 | 季節だけではなく月の指数も作るか？ — 月の指数も作る

オーストラリアでは、季節の指数だけを作成している。北米でも、主にグラフなどで公表しているのは季節の指数だ。そこで、月の指数は作るか、という検討点が生じる。

今回試作する結果は、主として季節の指数での表示を行うこととなる。しかし、月ごとに推移をみるニーズが皆無とは言えない。そこで、今回は、季節だけではなく月の指数も作ることにする。

3 | どのように地域区分を設定するか？ — 今回は区分を設けない

地域区分をどのように設定するかは、気候指数を作成する上で、大きな検討点といえる。北米ではアメリカを7つ、カナダを5つの地域に分けている。また、オーストラリアは、12個の地域に区分している。

ただ、日本の場合、多くの地域がケッペンの気候区分でいう温暖湿潤気候(Cf)に属する¹⁹。このため、広い国土を持つ3国と同じように地域区分を設ける必要はない、という考え方がありうる。

一方で、日本は、太平洋側と日本海側、沿岸部と内陸部では、高温、低温、降水などの気象が異なっている。また、日本列島は南北に長いため、たとえば、冬季には北海道で気温が氷点下となるのに対して、沖縄では10℃程度にまでしか下がらない。このような地域ごとの気候の違いをもとに、日本独自の気候区分を設けることも考えられる。

ただ、今回は、初めての気候指数の試作ということもあり、そもそも取得データに限界があるうえに、指数計算システムの稼働能力にも制約がある。そこで、特に、地域区分を設けずに、東京、大阪、名古屋の3地点の指数を試作して、その推移をもとに、指数としての妥当性をみていくこととした。日本での地域区分の設定のあり方については、今後の検討課題とする。

¹⁹ 北海道のほぼ全域と東北地方内陸部、北関東・甲信越・飛騨・北陸地方の高原地帯は、亜寒帯湿潤気候(Df)。沖縄の先島諸島の大部分や大東諸島南部は、熱帯雨林気候(Af)に属する。

4 | 閾値をどのように設定するか？ — 90%とする

北米、オーストラリアの先行の指数では、高温、低温、強風（北米は降水も）の各項目について、参照期間のデータをもとに、閾(しきい)値を設定している。閾値の水準の設定は、どの程度の極端な気象を指数に反映させるか、を決定するものとなる。

具体的な水準として、北米のように 90%とする、オーストラリアのように 99%とする、またはそれ以外の値とするなど、さまざまな設定が考えられる。ただ、今回はデータが少ないため、99%などの高水準に設定すると、極端な気象の指数反映が厳しくなり、指数の変動が大きくなることが予想される。このため、北米と同様に、90%に閾値を設定することとする。

5 | 高温と低温の指数はどのように算出するか？ — 閾値をもとに算出する

高温と低温については、オーストラリアの指数の計算方法が参考になる。ある年の3月6日については、1981年から2010年までの3月6日とその前後5日間の、合計330日分のデータのうち、33番目に高いデータと低いデータが、それぞれ90%閾値、10%閾値となる。これらの閾値をもとに、指数を算出する。なお、前後5日間としている日数を3日間や10日間など、別の日数とすることも考えられる。ただ、少ない日数とすると閾値が変動しやすくなる。多い日数とすると3月6日との関係性が薄れる、といった問題がある。このため、今回の試作では、オーストラリアと同様、5日間とする。

6 | 降水の指数はどのように算出するか？ — 閾値を超過した日数から算出する

降水については、北米のようにデータ実数から直接乖離度を算出する方法と、オーストラリアのようにデータが閾値を超過した日数から乖離度を算出する方法が考えられる。データ実数から直接乖離度を算出する方法は豪雨などの極端な気象を反映しやすい。一方、閾値を超過した日数から算出する方法は、梅雨の季節など一定の時期の全体的な降水の状況を捉えやすい。

日本の場合は、北海道を除いて、毎年6月ごろに梅雨の時期がある。この時期の降水の状況を捉えるために、オーストラリアと同様、閾値超過日数から算出することとする。

7 | 強風の指数には平均風速と最大風速のどちらを用いるか？ — 平均風速を用いる

風速については、1日の平均値を用いるか、最大値を用いるかといった検討点がある。最大値を用いると、台風の襲来の影響などが反映されやすくなる。ただ、これは裏を返すと、台風の襲来の有無によって、指数が大きく変化することを意味する。

気候変動リスクの物理的リスクには、極端な気象による被害の発生である急性リスクと、気象パターンの変化になるゆっくりとした影響である慢性リスクがあるとされる。今回の気候指数は、長期の視点から気候の変化の様子を見ていくものであることを踏まえて、慢性リスクを反映することを目指す。そのため、風については、平均風速を用いることとする。

なお、北米では、風速の3乗に大気密度を乗じて2で割り算をして、風力に変換している²⁰。ただ、この変換により、2つの風速の大小関係が変わるわけではない。そこで、今回の試作では、平均風速のデータを風力に変換せずに、そのまま用いることとする。

²⁰ 風力は、風により単位面積が単位時間に受けるエネルギーを指すとしている。

8 | 乾燥の指数はどのように算出するか？ — 連続乾燥日から算出する

乾燥の指数は、北米やオーストラリアの指数と同様に、連続乾燥日から算出する。なお、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」を用いて判定することとする。

9 | 海面水位の指数には平均水位と最大水位のどちらを用いるか？ — 平均水位を用いる

海面水位については、月(季節)の水位の平均値を用いるか、最大値を用いるかという検討点がある。

そもそも海面水位については、他の5項目と異なり、日単位ではなく月単位のデータを用いる。

これは、地球は1日に1回自転するので、多くの場所では1日に2回の満潮と干潮を迎えること。さらに、月が地球の周りを約1か月の周期で公転するために、毎日約50分程度、満潮と干潮の時刻に遅れが生じること。その結果、満潮時と干潮時の潮位やそれらの差も、周期的に変化していることなどを踏まえたものといえる。最大値を用いるには、こうした周期的な変化が影響を及ぼす点に注意する必要がある。

また、最大値を用いると、台風による高潮の発生²¹のように、台風の襲来の有無によって指数が大きく変化することも考えられる。そこで、強風の場合と同様に、平均値を用いることとする。

10 | 合成指数はどのように算出するか？ — 高温、降水、海面水位の3項目の平均とする

最後に、以上で算出された6項目の指数をもとに、どのように合成指数を算出するのも検討点となる。

6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、風速についてはオーストラリアと同様、測定方法が変更されており、データの一貫性に難があるという課題も残っている。

このため、今回は、低温、乾燥、風速は合成指数の計算には用いず、高温、降水、海面水位の3項目の平均として合成指数を算出することとした。

以上の諸検討点について、北米、オーストラリアの指数と、今回の試作版の主な相違点をまとめておく。今回の試作版は、ACIとAACIの計算で用いられている方法を部分的に採用して、計算することとなる。

²¹ 台風により、気圧が下がり海面が吸い上げられる効果と、強風により海水が海岸に吹き寄せられる効果のために、海面が異常に上昇する現象を指す。

図表 7. 各指数の計算方法の主な相違点

	ACI (北米)	AAGI (オーストラリア)	今回の試作版 (日本)
参照期間	1961年～1990年	1981年～2010年	1971年～2000年
地域区分	アメリカ7区分、カナダ5区分	オーストラリア12区分	今回は区分を設けない
閾(しきい)値	90%閾値を使用	99%閾値を使用	90%閾値を使用
降水のデータ	データ実数から乖離度を算出(閾値を用いない)	閾値超過日数から乖離度を算出(閾値を用いる)	閾値超過日数から乖離度を算出(閾値を用いる)
強風のデータ	1日の平均風速	1日の最大風速	1日の平均風速
海面水位のデータ	季節の平均水位	季節の最大水位	季節の平均水位
合成指数	6項目すべての平均	高温、降水、海面水位の平均	高温、降水、海面水位の平均

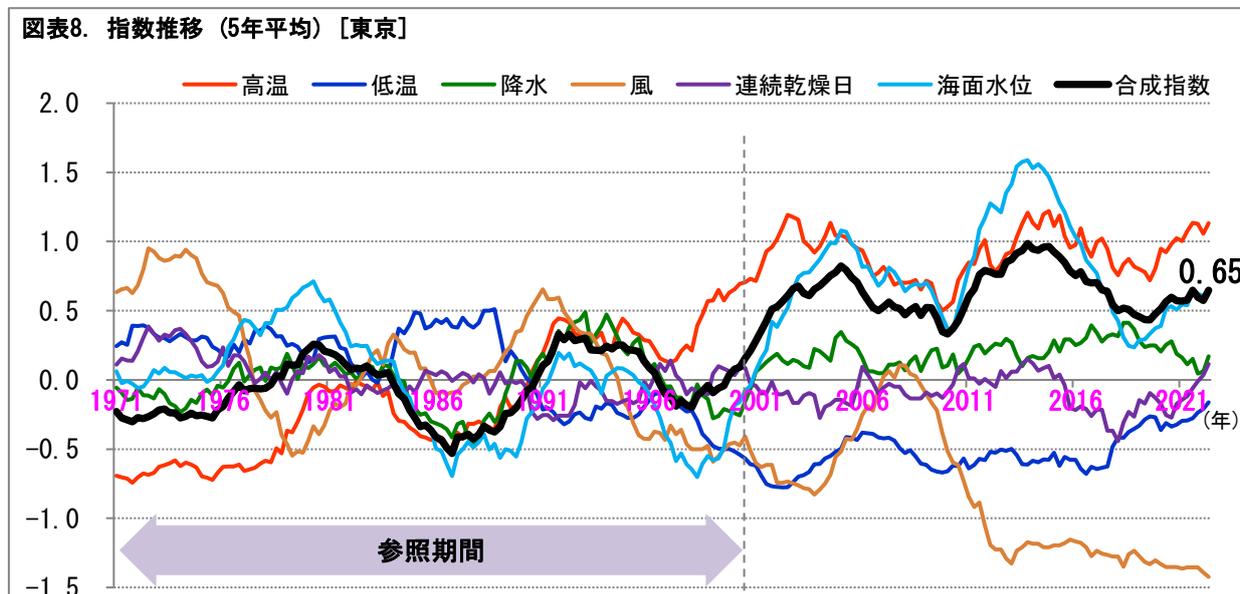
※ “FAQs for the Australian Actuaries Climate Index” (Actuaries Institute) をベースに、筆者作成

6—今回試作した気候指数の推移

前章までの検討内容をもとに、東京、大阪、名古屋の気候指数を試作した。その結果を簡単に見ていこう。

(1) 東京

図表8. 指数推移 (5年平均) [東京]



* 1971年～1975年については、実績が5年分に満たないため、不足分は1971～1975年の平均で補った。(大阪、名古屋も同様。)

** 1994年7月18日の最低気温データは欠測のため、前後の日のデータの平均とみなした。1974年2月6日の降水の「現象なし情報」データは欠測であるが、前後の日のデータが0であるため、乾燥日の連続最大日数の結果には影響を与えない。なお、降水データに欠測があった1974年2月6日および1994年9月17日や、風速データに欠測があった日²²は、閾値超過日数割合の計算上、分子・分母から除外した。

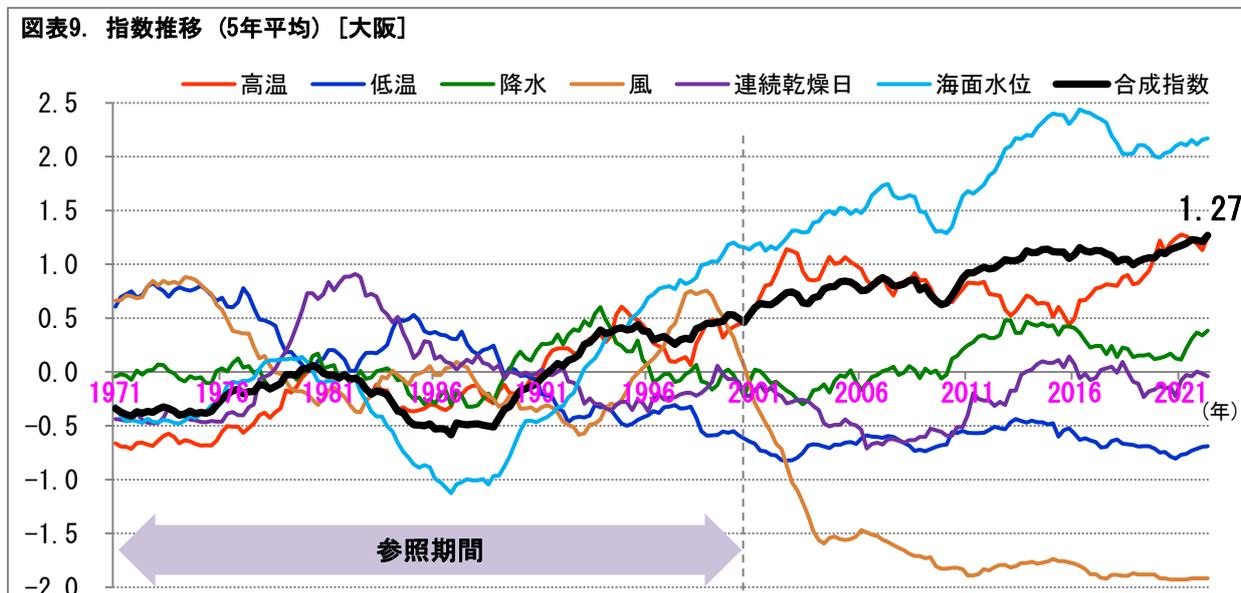
※ 筆者作成

²² 1971年以降、平均風速データに欠測があった日の数は、東京27日、大阪23日、名古屋6日であった。

東京の合成指数は、2000年代以降0.5前後で推移しており、2013年には1に迫る時期もあった。2022年春季(3-5月)には0.65となっている。この20年間で、参照期間からの乖離度が高まっている様子がうかがえる。特に、高温の指数は1前後にまで上昇している。高温の指数が合成指数を上回って推移している状況は、北米やオーストラリアと同じ傾向となっている。

(2) 大阪

図表9. 指数推移 (5年平均) [大阪]



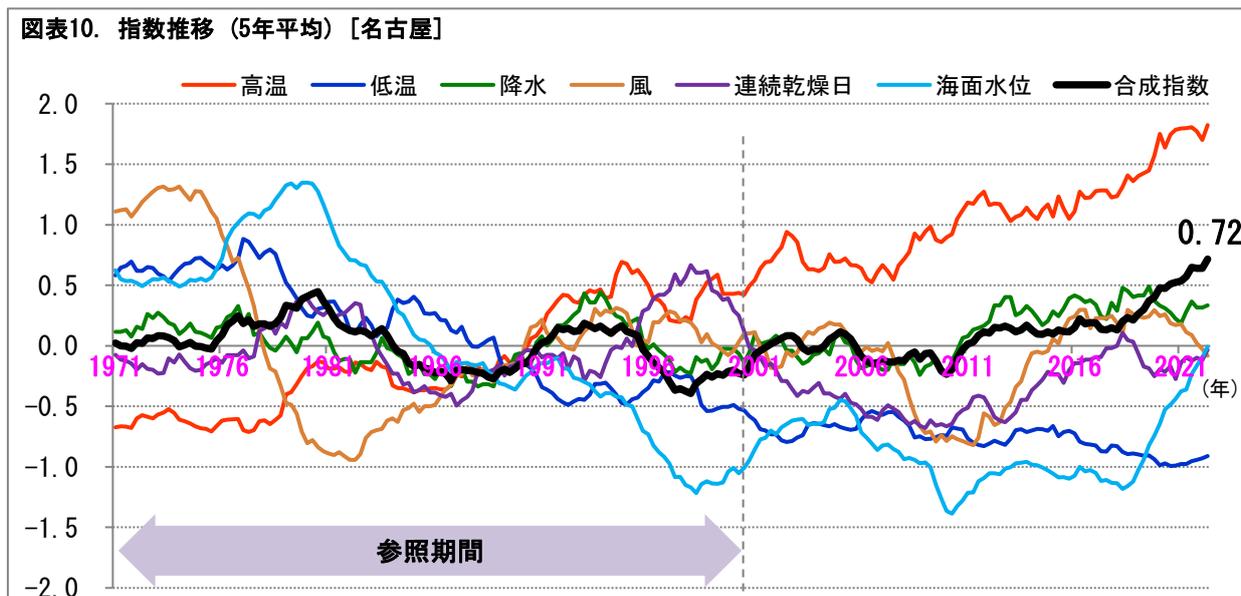
* 2002年6月14日と2011年3月24日の最高気温データは欠測のため、前後の日のデータの平均とみなした。なお、風速データに欠測があった日²²は、閾値超過日数割合の計算上、分子・分母から除外した。

※ 筆者作成

大阪の合成指数は、2000年代に0.5を超え、2012年には1を上回り、2022年春季には1.27に上昇している。高温の指数も同水準となっている。特に、海面水位の指数が上昇しており、2012年には2を超えている。参照期間からの乖離度が高まっていることがうかがえる。海面水位の指数が高い点は、北米と同じ傾向となっている。

(3) 名古屋

図表10. 指数推移 (5年平均) [名古屋]



* 2011年3月24日の最高気温データは欠測のため、前後の日のデータの平均とみなした。なお、風速データに欠測があった日²²は、閾値超過日数割合の計算上、分子・分母から除外した。

※ 筆者作成

名古屋の合成指数は、長らくゼロ近辺で推移してきていたが、2020年に0.5を超え、2022年春季には0.72に上昇した。高温の指数は徐々に上昇して1.5を超えて推移しているが、降水はゼロ近辺、海面水位は参照期間後にマイナス1程度に低下して、合成指数の上昇を抑える形となっていた。その後、2022年に海面水位が0近辺に戻ったことで、合成指数が上昇した。なお、風の指数が東京や大阪のように大きく低下していない点も特徴的といえる。

以上のとおり、東京、大阪、名古屋について気候指数の推移をみていった。3地点を取り上げただけでも、指数の傾向は大きく異なっていることがうかがえる。日本の気候指数をまとめるには、多数の観測地点の指数を作成して、それらの平均値をとるといった、より大規模なデータを用いた作業が欠かせないものとみられる。

7—おわりに（私見）

本稿では、気候指数の試作を行った。指数の推移を通じて、東京、大阪、名古屋の3地点の長期的な気候変動の状況が示されるものとなっている。ただし、今回の気候指数はまだ試作の域を出ておらず、日本全体の気候変動の状況を示すものとは言えない。今後も、観測地点の追加や地域区分の設定など、充実、改善を図る必要性があろう。引き続き、その改良に向けて取り組んでいくこととしたい。

また、北米で開発されている気候リスク指数のような、気候変動が人命や財産に与えるさまざまなリスクの定量化の試みも必要と考えられる。ただし、先行する北米でも、ACRIバージョン1.0は、アメリカの財産の損害のみを対象とする、限定的なものにとどまっている。損害データの収集やモデル化のためには、多くの地道な取り組みが必要となるものと考えられる。

地球温暖化を背景とした気候変動の問題は、これからますます注目度が高まるものと考えられる。急性リスクとして、スーパー台風の襲来や、豪雨、南岸低気圧等による激甚災害の発生懸念が高まっている。一方、慢性リスクとして、南極やグリーンランドの氷床の融解、アフリカ山岳地域等の氷河の消失、ヨーロッパなどでの熱波や干ばつの発生など、人々の生活に深刻な影響が出始めている。

こうしたリスクを定量的に示すためには、気候指数、気候リスク指数といった、気候変動の状況の指数化が重要であると考えられる。今後、同様の取り組みが、日本を含めて、世界各国に広がっていくことが期待される。

引き続き、気候の極端さの指数化、気候変動リスクの定量化の動向について、ウォッチしていくこととしたい。

【参考文献・資料】

1. 「広辞苑 第七版」(岩波書店)
2. “Actuaries Climate Index — Development and Design” (The American Academy of Actuaries (AAA), The Canadian Institute of Actuaries (CIA), The Casualty Actuarial Society (CAS), 2016)
3. “Australian Actuaries Climate Index — Design Documentation” (Actuaries Institute, 2018)
4. “Extension of the Actuaries Climate Index to the UK and Europe—A Feasibility Study” Charles L. Curry (Institute and Faculty of Actuaries, Dec 2015)
5. “Actuaries Climate Index® Values Calculated Using Version 1.1” (2022. 5. 4)
6. “Actuaries Climate Risk Index—Preliminary Findings” (American Academy of Actuaries, Jan. 2020)
7. “Australian_actuaries_climate_index_export_2021_3-nl” (Actuaries Institute)
8. 「金融機関のための気候変動リスク管理」藤井健司著(中央経済社, 2020年)
9. 「気候変動リスクへの実務対応—不確実性をインテグレートする経営改革」後藤茂之編著(中央経済社, 2020年)
10. 「極端豪雨はなぜ毎年のように発生するのか—気象のしくみを理解し、地球温暖化との関係をさぐる」(化学同人, DOJIN 選書 090, 2021年)
11. 「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>
12. 「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