

比較SPIを用いた将来のアジアの気象学的渇水の変化

長谷川 聡・岩見洋一

1. はじめに

Standardized Precipitation Index (SPI) は、長期的に観測された降水量データを用いて月単位から年単位の時間スケールの渇水のモニタリングや予測に世界の気象・水文機関で広く用いられている気象学的渇水の指標である¹⁾。SPIは0で中央値を示し、標準偏差におおむね相当する±1の間で通常の範囲となるよう標準化された指標で、一般に+1以上で湿潤、-1以下で乾燥が強まって気象学的渇水が生じるとされる。SPIを用いると、気象学的渇水の深刻さや発生確率を同時に把握でき、地域間の比較も可能となる。

世界各国で渇水のモニタリングや予測の現業で運用されているSPIを用いて地球温暖化の進んだ将来の気象学的渇水の深刻さや発生確率を示すことができれば、地球温暖化の緩和や適応の道筋を策定する各国の政策決定者にとって非常に有用と考えられる。しかしSPIのような標準化指標を地球温暖化問題にそのまま適用することは簡単ではなく、著者らは比較SPI (comparative SPI ; cSPI) をその解決策として提案した。本稿では、これまでの研究^{2),3)}を元にアジアの将来予測を例に従来のSPI及び比較SPIについて解説する。

2. データ

気象庁の気象研究所で開発された超高解像度(水平解像度約20km)の全球大気気候モデルMRI-AGCM3.2Sで出力された現在(1979~2003年)及び将来(2075~2099年)気候実験で出力された降水量データを用いた。将来気候実験は、IPCC第五次報告書向けの将来シナリオの中でも温暖化が最も進むRCP8.5温室効果ガス排出シナリオを元に、四種類の温暖化が進んだ海面水温分布を想定したアンサンブル実験として行われた。

3. 従来のSPIから比較SPIへの拡張

3.1 SPIの計算手順

ここでは、1月から始まる25年分の月降水量を用いて12ヶ月スケールのSPIを求める方法を説明する。1月から12月までの積算降水量データ25個を標本とするデータセットを作成する。同様に、2月から1月まで、…12月から11月までの積算降水量データ24個を標本数とする11のデータセットを作成する。SPIの解析ではこのように作成された12データセットを対象に行われる。

一ヶ月以上の積算降水量はガンマ分布に従うことが知られている。先に準備した各データセットに対して、以下の作業を行う：

- (1) ガンマ分布のパラメータを推定する。
- (2) 推定されたパラメータを用いて各標本のガンマ分布の累積分布関数(CDF)の累積確率を推定する。
- (3) 推定された累積確率に応じた標準正規分布の確率変数(Z値)を求める。

このZ値がSPIの値となる。12データセットのSPIを合わせて元の時間順に並べると、12グループ別に標準化されたSPIの時系列データとなる。

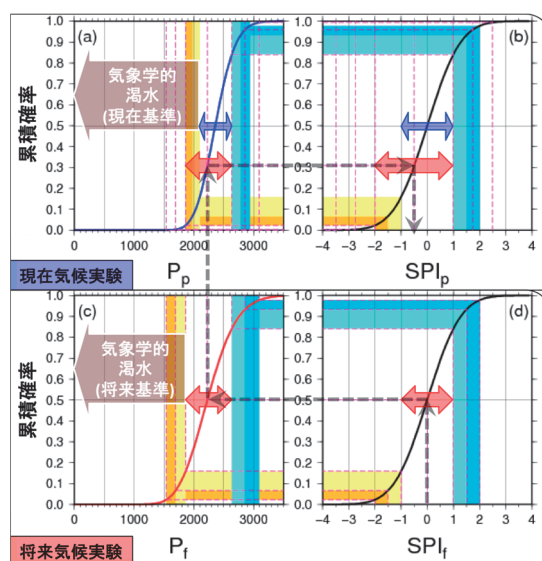


図-1 12ヶ月スケールの現在気候実験の(a)積算降水量 P_p と SPI_p のCDFと将来気候実験の(c)積算降水量 P_f と SPI_f のCDFの関係を示す例。

3.2 現在気候実験における従来のSPI

図-1a及び図-1bは、現在気候実験の1月から12月積算降水量及び対応する標準正規分布のCDFの例である²⁾。現在気候実験の積算降水量及びSPIはそれぞれ P_p 及び SPI_p と表す。中央値となる $SPI_p=0$ に対応する P_p は約2,350mm/年であり、気象学的渇水となる $SPI_p=-1$ に対応する P_p は約2,100mm/年となる。これより P_p が減少すると気象学的渇水の深刻度が増大することになる。

12ヶ月スケールの SPI_p の時系列の例を図-2aに示す²⁾。初年は1月から12月の12ヶ月積算降水量に対応するSPIの値が12月にプロットされるだけで、それ以前はプロットされず、以後は12ヶ月スケールの幅の窓を1ヶ月刻みで移動するように対応するSPIがプロットされている。時系列とすることで、気象学的渇水の深刻度だけでなく継続期間もみえてくる。標準化のため、中央値はほぼ0、年々変動の振れ幅は乾湿ともに等しくみえる。

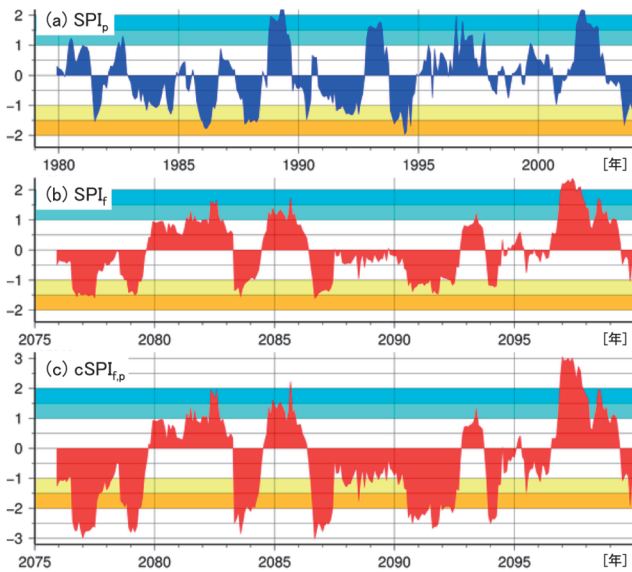


図-2 12ヶ月スケールの (a)現在気候実験のSPI (SPI_p)、(b)将来気候実験のSPI (SPI_f)、(c)現在気候実験を基準とした将来気候実験の比較SPI ($cSPI_{f,p}$)の時系列の例。気候モデルの結果なので、イベントの時期は現在気候でも一致しないことに注意。

3.3 将来気候実験における従来のSPIと問題点

気候変化の影響評価では、気候モデルを用いた現在気候実験と将来気候実験の出力データそれぞれに対して、平均降水量などの指標を計算した後に両者の指標を比較するのが一般的である。

これに倣って将来気候実験の12ヶ月スケールの積算降水量で計算した。図-1c及び図-1dは、将来気候実験の積算降水量及び対応する標準正規分布のCDFの例を示す。将来気候実験の積算降水

量及びSPIはそれぞれ P_f 及び SPI_f と表す。 $SPI_f=0$ に対応する P_f は約2,200mm/年であり、 $SPI_f=-1$ に対応する P_f は約1,850mm/年となる。実際に、将来気候実験で降水量の平均値の減少と年々の標準偏差の増大が予測されており、中央値に対応する降水量の減少(2,350→2,200mm/年)や変動幅の増大(例えば $SPI=0$ と -1 に対応する降水量の差: 250→350mm/年)と対応している。

しかし、 SPI_f の時系列を示す図-2bをみても、中央値はほぼ0で年々変動の大きさも図-2aの SPI_p の時系列と同程度にみえる。現在気候実験と比べて、将来気候実験で平均降水量が減少して年々変動が増加する傾向は全く見出だせない。これが、従来のSPIを地球温暖化問題に適用した際に陥りやすい罠である。実はこのような手法で地球温暖化の影響評価を試みた研究が散見される。

このように、現在気候と将来気候で個別に計算した SPI_p と SPI_f を比較しても、将来気候の気象学的渇水が現在気候からどう変化するかは判定できない。 SPI_f は将来気候の基準で標準化されたものであって、現在気候基準の気象学的渇水が将来どのように変化するかを示す指標ではない。

この問題の原因は、それぞれの気候実験について別々の基準を元に降水量の大小を標準化した後に指標を比較したためである。平均降水量のような指標では問題ないが、SPIなどの標準化指標ではこの手順での比較は困難となる。

3.4 比較SPIへの拡張

地球温暖化の影響評価で求めたいSPIは、現在気候状態を基準として標準化された将来気候の乾湿の状態を示す指標である。つまり3.1の手順(1)のガンマ分布のパラメータの推定までを現在気候実験の積算降水量で行った後に、3.1の手順(2)以降では将来気候実験の積算降水量を代入すればよい。このように参照データ(現在気候実験)を基準として標準化した対象データ(将来気候実験)のSPIを比較SPIと名付けた^{2),3)}。

図-2cで示す現在気候実験を基準とした将来気候実験の比較SPI($cSPI_{f,p}$)を図-2bの SPI_f と比較すると、平均降水量の減少に伴う中央値の低下がみられ、将来気候の通常の状態が乾燥側に移行する予測結果がよくわかる。年々変動の振幅が増加して、±2を超える極端な乾湿状態の発生確率が増加し、気象学的渇水の頻発化も予測できる。

ここで図-1に戻って、SPIと比較SPIの関係を整理する。図中の破線のように将来気候実験の積算降水量を現在気候実験のCDFに代入(図-1c→図-1a)した後に標準正規分布に変換(図-1a→図-1b)すれば、現在気候実験を基準とした将来気候実験のSPI、つまり比較SPIが計算できる。将来気候実験で $SPI_f=0$ に対応する約2,200mm/年の積算降水量は現在気候実験では $SPI_p=-0.5$ に相当(図-1破線矢印)し、 $SPI_f=-1$ に対応する約1,850mm/年は $SPI_p=-2$ の極端な気象学的渇水に相当する。図-1bで示すように、 SPI_p では理論的に中央値は0で年々変動は±1(青矢印)だが、 $cSPI_{f,p}$ では同じ基準で中央値は乾燥側に0.5ほど移行し変動幅は±1.5に増す(赤矢印)ことがわかる。

図-1の縦軸の累積確率は現象の再帰確率に関係する。標準正規分布表などから分かるように、SPIが-1、-2、-3以下となる確率は、それぞれ約15.87%、2.28%、0.135%となる。SPIの絶対値が大きくなるほど稀で極端な乾湿の状態を示す。数十年間のデータでは、SPIの範囲は±3程度までしか意味をなさないと言われている。参照・対象データが同一な通常のSPIではその範囲内にはほぼ収まるが、参照・対象データが異なる比較SPIでは両者の差が大きい場合にその範囲を外れることも多い。この場合、「最も深刻な気象学的渇水が-2から-4に強まり、つまり約50年に1回規模から約3万年に1回規模になる」のように非常に極端な値の大小を比べたり、極端な累積確率を単純に再帰確率に読み替えたりすることは精度の問題から好ましくない。精度の範囲内で「比較SPIが-2以下の極端な気象学的渇水の確率が2%から10%に増加」のような評価の方が望ましい。

4. 将来のアジアの気象学的渇水の予測

四種の海面水温分布を用いた将来気候実験でアンサンブル平均した12ヶ月スケールの $cSPI_{f,p}$ の解析結果を図-3に示す³⁾。アンサンブル間の不確実性はここでは議論しない。図-3aは $cSPI_{f,p}$ の中央値の分布である。参照データである現在気候実験の SPI_p の中央値は理論的に0となるので、 $cSPI_{f,p}$ の中央値は対象データである将来気候実験における通常の状態が乾湿に振れる程度を示す。RCP8.5シナリオで著しく温暖化が進むと、チベット高原、ヒマラヤ山脈の南麓、インド南部や

黄海沿岸などで+2以上の極端に湿潤化を示す一方で、地中海からペルシャ湾岸にかけて-1.5以下の厳しい乾燥化が常になると予測される。

図-3bは $cSPI_{f,p}$ が-1以下となる確率のアンサンブル平均から SPI_p が-1以下となる確率を差し引いた値の分布で、気象学的渇水の発生確率の変化を示す。図-3aの中央値の大きく変化した地域と符合している。一方、図-3cは $cSPI_{f,p}$ が+1以上となる確率のアンサンブル平均と SPI_p が+1以上となる確率の差を示す。著しい温暖化に伴って大気中の水蒸気量が増加することで降水量の増加が見込まれることに対応して、湿潤状態となる確率の増加が広い地域で予測されている。しかし東ヨーロッパから中央シベリア高原や東チベットなど、乾湿の変化が穏やかな地域も見受けられる。

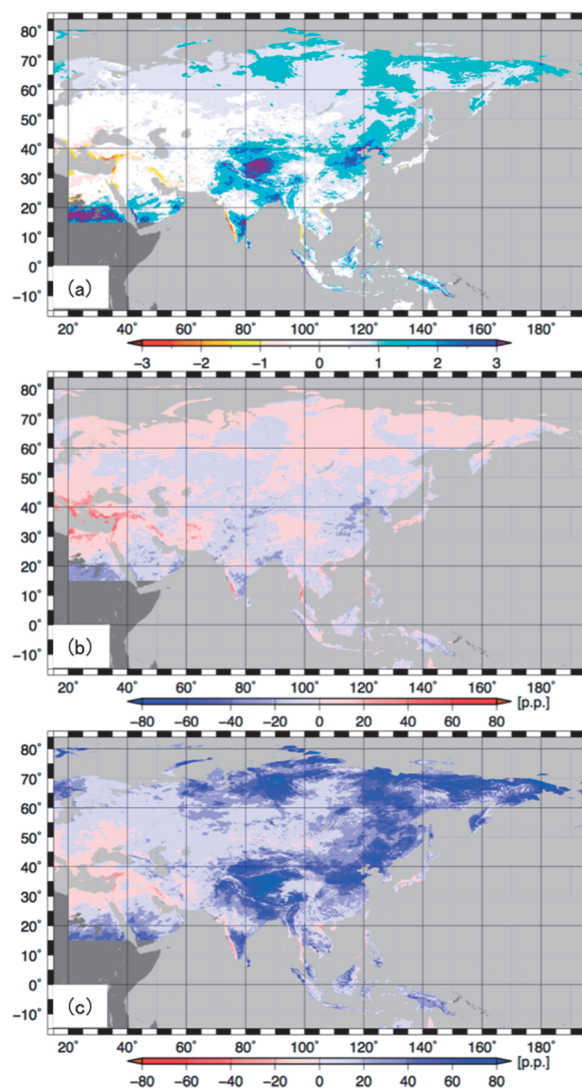


図-3 12ヶ月スケールの(a) $cSPI_{f,p}$ の中央値の空間分布、 $cSPI_{f,p}$ と SPI_p における(b) -1以下の乾燥状態及び(c) +1以上の湿潤状態の発生確率の現在と将来の差の空間分布。暖色系で乾燥化、寒色系で湿潤化を示す。(b)及び(c)の単位はパーセンテージポイント[p.p.]。

5. 将来気候予測の不確実性

賢明な読者には既知の話題ではあるが、本稿で述べた将来予測は確定したものではなく、多くの予測不確実性が含まれている点に留意されたい。

いかに最新の気候モデルを用いた成果であっても、温室効果ガスの排出シナリオは一種類しか考慮しておらず、水平空間解像度20kmでは難しい議論も残り、異なる将来の海面水温分布を考慮したとはいえエルニーニョ・ラニーニャなどといった大気と海洋の相互作用に伴う長周期変動の将来を的確に予測できるわけではなく、気候モデル間の気候感度の違いは未だ大きく、現実との間のバイアスの問題も残り、初期値や境界条件の誤差による不確実性もある。気候モデル開発者は、地球環境に関する科学的知見の集積でもある気候モデルを改良し、様々な設定の気候実験を繰り返し、気候実験のアンサンブル数を増やし、不確実性の大きさを考慮しながら地球環境の将来像をより正確に捉える努力を続けている。

不確実性を内包した様々な気候モデルによる予測データ群から、地球温暖化の緩和策や適応策が必要とされる現象の将来変化の傾向について、ダウンスケーリングやバイアス補正の手法を改良して気候モデルの不足を補い、水文モデルなどの影響評価手法の高精度化を進め、不確実性の大きさも考慮しつつ影響評価を行い、現実の社会経済状況などを配慮しながら必要十分なスピード感を持って社会実装に繋げる。我々もそのような努力を続けていくことが肝要と考える。

6. まとめ

工業化以前の状態から約4℃ほど全球平均気温が上昇するRCP8.5排出シナリオ下の今世紀末のアジアの気象学的渇水がどのように変化するかについて、現在気候を基準に標準化した比較SPIを用いて最新の気候モデル予測データを解析した。温暖化に伴って湿潤化が進む地域が多い中、気象学的渇水が深刻化する地域も一部でみられた。

SPIを比較SPIに拡張したことで、温暖化に伴う気象学的渇水の変化を評価できるだけでなく、さらに有用なツールとなる可能性も示された^{2),3)}。今後も比較SPIの高度化や用途の拡大、同手法の他の標準化指標への適用拡大に努める予定である。

謝 辞

本研究は文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラムのもとで行われた。

参考文献

- 1) World Meteorological Organization (WMO): Standardized Precipitation Index User Guide, WMO-No.1090, 24p, 2012
- 2) Hasegawa, A., Gusyev, M., Ushiyama, T., Magome, J. and Iwami, Y.: Drought assessment in the Pampanga River basin, the Philippines – Part 2: A comparative SPI approach for quantifying climate change hazards, In Weber, T., McPhee, M. J. and Andersen, R. S. (eds), MODSIM2015, 21st International Congress on Modeling and Simulation, Modeliling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp.2388-2394, 2015
- 3) Hasegawa, A., Gusyev, M. and Iwami, Y.: Meteorological drought and flood assessment using the comparative SPI approach in Asia under climate change, Journal of Disaster Research, 2016 (accepted)

長谷川 聡



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ
専門研究員、博(理)
Ph.D.Akira HASEGAWA

岩見洋一



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ
上席研究員
Yoichi IWAMI