

加熱される地球

(2) 年平均値の意味の統計的考察

nino

2025年11月11日

1. はじめに

天気予報で用いられる「年平均値」とは何であろうか？ 気温の年平均値として過去30年間の平均値が採用されているが¹⁾、なぜだろうか？ 年平均値の意味について、移動平均とフーリエ変換を用いて統計的に考察する。

2. 使用データ

解析には、以下の15地点の年平均気温データを用いた²⁾。

網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬（奄美大島）、石垣島。これらの位置については前報³⁾を参照されたい。

解析対象期間は1900年から2024年までの125年間とし、時間変数を $t=0 \sim 124$ とする。

3. 年平均値の定義と課題

年平均値は、過去30年間の年平均気温の平均値であり、西暦の末尾が「1」の年に更新されると定義されている¹⁾。例えば、2021年から2030年までの10年間に用いられる年平均値は、1991～2020年の30年間の平均値である。これは、1935年および1956年に国際気象機関（当時）が勧告し、現在に至っている⁴⁾。また、年平均値は、その時点の気象や天候を評価する際の基準として利用されている。

年平均値については、これまでに多くの議論があり、30年間平均が妥当とされる一方で、いくつかの課題が指摘されている。気候には長期的な変化（永年変化）が存在し、年平均値を「一定値」として扱うと、この変化を無視することになり、実態との乖離が生じるおそれがある⁵⁾。また、「30年」という期間が選ばれた根拠や規則性については必ずしも明確ではなく、年平均値を利用する際には、「目的」「対象期間」「含まれる変動要因」などを明確にすることが重要である⁶⁾。

年平均値の意味を再検討するために、まず、移動平均およびフーリエ変換を用い、年平均値が元の年平均気温時系列と比べて周期変動にどのような影響を与えていたかを考察する。

4. 年平均値の意味

4.1 年平均値の移動平均

年平均値の変動特性を把握するためには、10年ごとの更新値ではなく、毎年の年平均値の変化、すなわち30年間移動平均を調べる必要がある。

ただし、移動平均では年平均気温の時系列と時点を対応させるために、平均期間の中心年を基準とした調整を行った。例えば、最初の30年間（1900～1929年）の年平均値の中心は1914.5年（=1900+（1929-1900）/2）となり、年平均気温の時点とは0.5年のずれが生じるが、小数点以下を切り上げて1915年とした。以降、同様に1年ずつ年平均値を更新

した。年平均気温の時点とは0.5年のずれが生じるが、125年間の解析において影響は小さいと判断される。

比較のため、10年間（10MA）、20年間（20MA）、40年間（40MA）の移動平均も併せて算出した。図1に年平均気温と各移動平均の時系列を示す。縦軸の単位は°Cであり、以降も同様である。

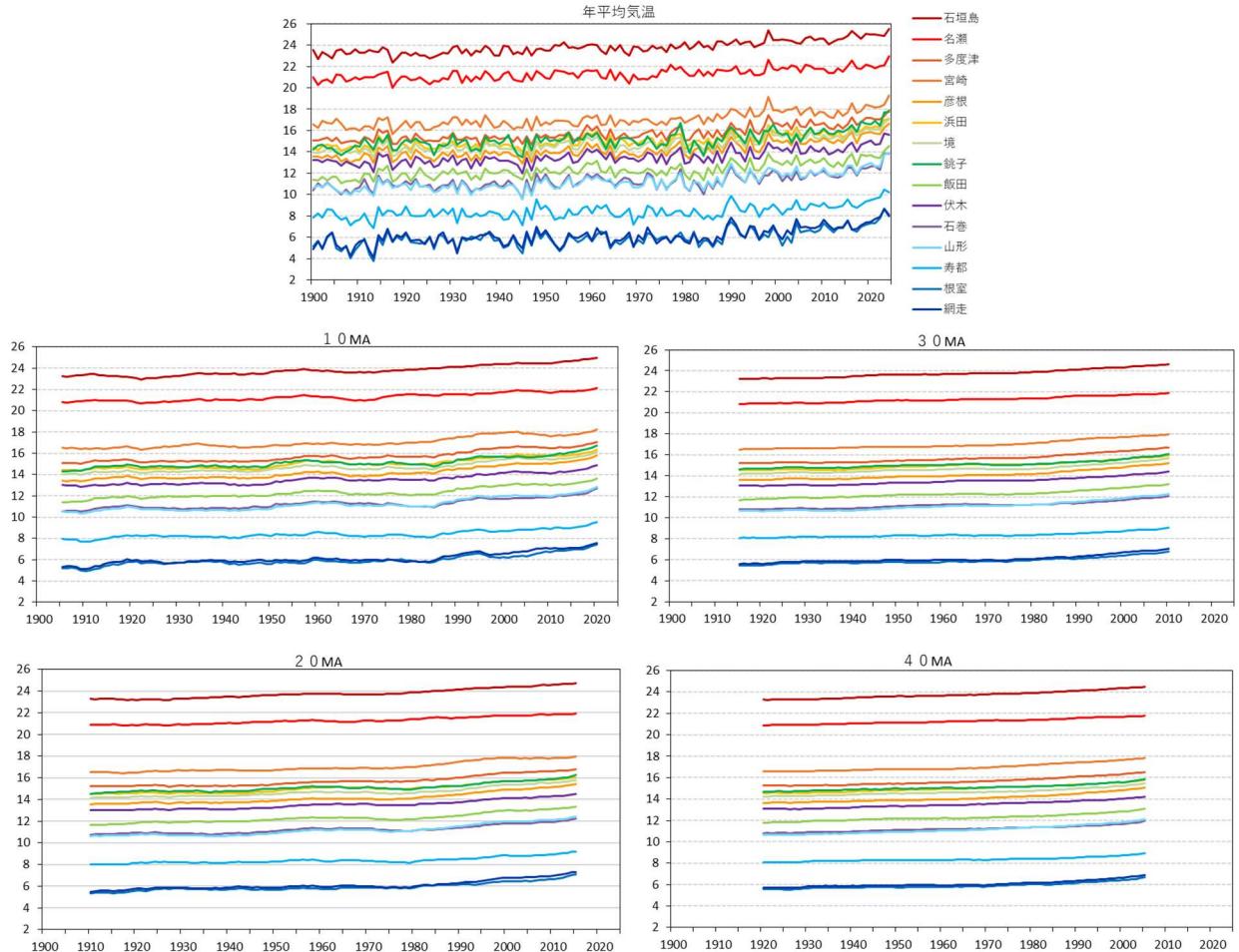


図1 年平均気温と各移動平均（MA）の時系列

年平均気温には短周期の変動が多く見られ、地点によりそのパターンは異なるが、いずれの地点も長期的な上昇傾向を示す。特に高緯度の網走や根室では、1990年以降の上昇が顕著である。

10MAでは短周期成分が除去されて平滑化されるが、十数年～数十年程度の周期変動が残る。20MAはさらに平滑化が進み、30MAおよび40MAはほぼ直線的な傾向を示す。

これらのうち、40MAを除く年平均気温、10MA、20MA、30MAについて、Excelの高速フーリエ変換(FFT)を適用した。

4.2 各時系列の高速フーリエ変換(FFT)の結果

FFTはデータ数が 2^n 個である必要があるため、125年間のデータのうち最も長い64年間($=2^6$)を採用した。なお、移動平均では両端のデータが欠損するため、対象期間は、30MAによる欠損期間15年を考慮し、1947～2010年の64年間とした。

図2には、網走、銚子、石垣島の3地点における年平均気温と各MAのFFT結果を示す。横軸は周波数 f ではなく、周期 T (年) である。

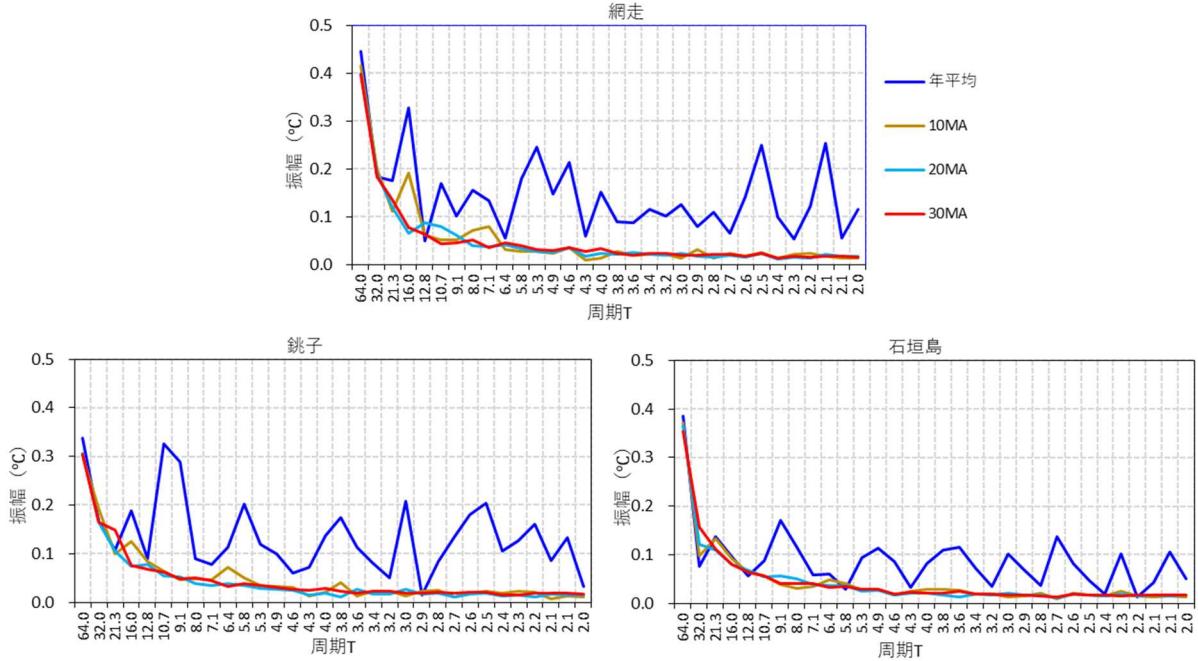


図2 網走、銚子および石垣島における年平均気温と各MAのFFT結果

網走の年平均気温には、短周期から長周期まで多様な周期成分が含まれているが、10MAでは10年前後の周期成分がやや減少し、それよりも短周期側の振幅が大きく低下することが分かる。20MAおよび30MAではこの傾向がさらに顕著である。これは、移動平均による振幅低減効果⁷⁾による。一方、長周期側から短周期側にかけて振幅が徐々に低下するのは、気温のトレンド効果⁸⁾の影響である。

本論に入る前に、まず、移動平均による振幅の低減効果、次に、気温のトレンド効果について理論的に整理する。

4.2.1 移動平均による振幅低減効果

周期時系列データをコサイン関数（振幅=1）で表すと、その移動平均による振幅の変化は次式で与えられる（詳細は、参考文献〔7〕を参照）。元の振幅1に対する移動平均後の振幅の比を理論振幅比とすると、理論振幅比は次式で表わされる。

$$\text{理論振幅比} = \sin(y\pi/T) / (y\sin(\pi/T)) \quad (1)$$

ここで、 y は移動平均期間（年）、 T は周期（年）である。

式(1)は負の値をとる場合がある。負の値は逆位相（180度の位相差）を意味するが、ここでは振幅のみを扱うため、式(1)の絶対値を用いた。

図3に、周期 $T=64\sim2$ 年における10MA、20MA、30MA、40MAの理論振幅比を示す。

各MAとも、振幅は長周期側から短周期側に向かって一定の周期で増減を繰り返しながら、全体として低減する傾向を示した。周期が短くなるにつれて振幅が低減し、移動平均期間が長いほど低減の程度が大きい。30MAと40MAは $T=16$ 以下ではほぼ同一であるため、以降の解析では10MA、20MA、30MAを対象とする。

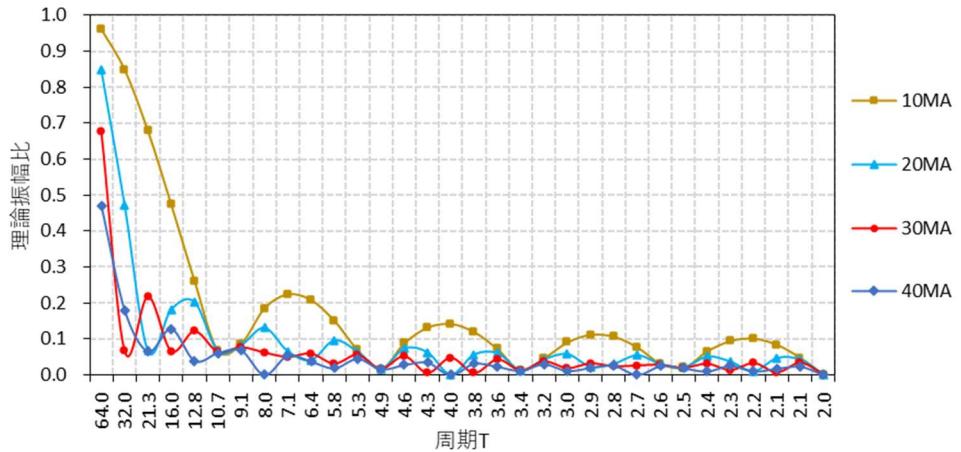


図 3 コサイン関数（振幅 = 1）の各 MA の理論振幅比

4.2.2 気温のトレンド効果の影響

次に、気温のトレンド効果が FFT 結果に及ぼす影響について概説する⁸⁾。気温には長期的な上昇傾向（トレンド）が存在し、FFT 結果の振幅にも影響を与える。すなわち、トレンド成分（直線項）をフーリエ級数で表すと、短周期成分よりも長周期成分の振幅（重み）が大きくなる。このため、長周期側の振幅が相対的に「かさ上げ」された形で現れる。トレンド効果を定量的に把握するため、まず、一次回帰式を求める。

例として、網走の年平均気温と 10MA に対して一次回帰分析を行った結果、有効数字 2 桁で同一の回帰式が得られた。

$$y = 0.017t + 5.7 \quad (2)$$

図 4 に網走の年平均気温とその 10MA の時系列およびそれらの一次回帰直線を示す。

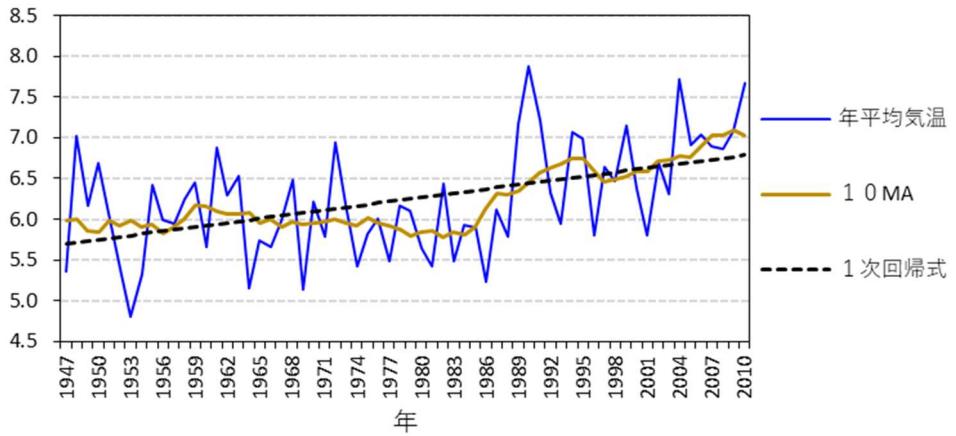


図 4 網走における年平均気温と 10MA の時系列およびその一次回帰直線

年平均気温および 10MA とともに 1990 年前後から上昇傾向が顕著であり、一次回帰式が全期間を完全に表しているわけではない。しかし、トレンド効果の概略を把握する目的には十分と判断し、この回帰式の FFT を算出した。図 5 には一次回帰式の FFT 結果を示す。

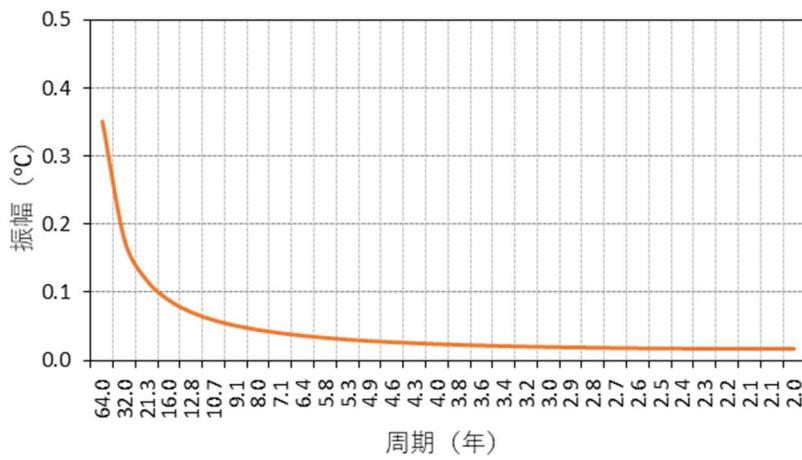


図 5 網走における一次回帰式の FFT 結果

回帰式の FFT 結果（図 5）では、振幅が長周期側から短周期側へ向かって約 0.35°C から 0.02°C へと低下した。この結果から、図 2 と比較すると、FFT の振幅は実際の変動にトレンド成分が加わったものであると考えられる。したがって、真の周期成分を評価するためには、トレンド成分を除去する必要がある。

トレンドを除去する方法としては、

- (1) 図 2 の FFT 結果から図 5 のトレンド成分の振幅を周期ごとに差し引く方法、
 - (2) 図 1 の各時系列（1947～2010 年）からそれぞれ一次回帰式を差し引いた後に FFT を行う方法、
- の 2 通りが考えられる。

ここでは、後者の方針を採用した。

4.3 トレンド除去後の FFT 結果

以上の結果を踏まえ、先の 3 地点（網走、銚子、石垣島）において、それぞれの一次回帰式を差し引いた後の各時系列に対して FFT を実施した（図 6）。

図 2 と比較すると、各移動平均（MA）の振幅は、理論振幅比（図 3）と同様に、長周期から短周期へ向かって一定間隔で増減を繰り返しながら全体的に低減する傾向を示した。例えば、網走の 10MA の場合、周期 $T=16.0$ 年で振幅が最も高く、次いで $T=7.1$ 、 4.0 、 2.9 、 2.1 の順に振幅が低下している。

各周期における年平均気温の振幅に対する 10MA の振幅の比（以下、「振幅比」と呼ぶ）を求め、理論振幅比と比較した。

網走の 10MA では、周期 $T=16.0$ 年における振幅比は $0.113/0.248 \approx 0.46$ であり、理論振幅比 0.47 に近い値を示した。また、周期 $T=10.7$ 年では $0.015/0.224 \approx 0.067$ となり、理論振幅比（0.067）とほぼ一致した。他の周期についてもおおむね同様の傾向が見られた。これらの傾向は、銚子および石垣島でも概ね同様であった。

ただし、振幅比と理論振幅比が一致しない場合もあり、その要因としては、スペクトル解析における「リーケージ（leakage）誤差」による振幅の拡散などが考えられる^{8, 9)}。それでもなお、振幅比が理論振幅比とおおむね一致することから、実データの移動平均による振幅変化は、理論式によってほぼ説明可能であるといえる。

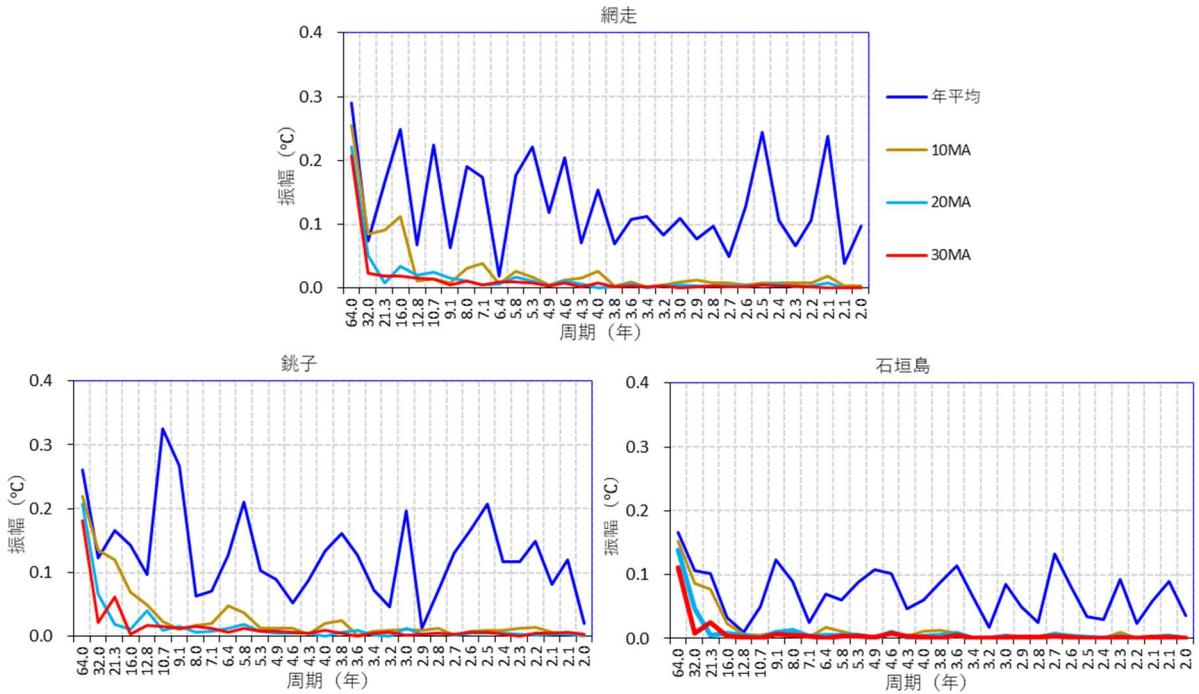


図 6 3 地点における一次回帰式を差し引いた後の FFT 結果

なお、図 6 では銚子と石垣島で周期 $T=21.3$ 年のピークが認められるが、網走では明確なピークが見られなかった。これは、地点ごとの周期特性の違いによるものと考えられる。一方、網走では周期 $T=10.7$ 年に比較的鋭く高いピークが現れている。銚子も同様であり、石垣島もわずかだがピークは認められる。太陽黒点数の周期はおよそ 11 年であり、これに近い値である。太陽黒点数の気温への影響を留意しておく必要がある。

5. 過去 125 年間における平年値の変化

これまでの解析により、平年値の特性について一定の理解が得られた。本節では、過去 125 年間において平年値がどのように変化してきたかについて考察する。

5.1 過去 125 年間における 15 地点の各 MA の平年値の変化

図 8 は、過去 125 年間における 15 地点の各 MA の 10 年毎の平年値の時系列である。なお、10 年間、20 年間、30 年間の各平年値をそれぞれ 10MA、20MA、30MA とした。

図 8 において、30MA の平年値は、定義通りに、1931 年～1940 年までの 10 年間の平年値は、その直前の 30 年間（1901 年～1930 年）の平均値であり、以降同様である。一方、10MA の平年値は、過去 10 年間の平均値を用いた。例えば、1911 年～1920 年までの 10 年間の平年値は 1901 年～1910 年の平均値であり、以降同様である。同様に、20MA の平年値は、過去 20 年間の平均値を用いて平年値を用いた。

図 8 より、10MA は、地点によりややバラツキがあるが、10 年毎に上昇傾向を示した。20MA は 10MA に比べて滑らかな上昇傾向を示し、30MA はさらに滑らかとなっている。しかし、平年値の差が小さすぎてわかりにくい。それが明確になるように、各 MA において、最初の平年値を基準とした 10 年毎の各平年値を調べた。

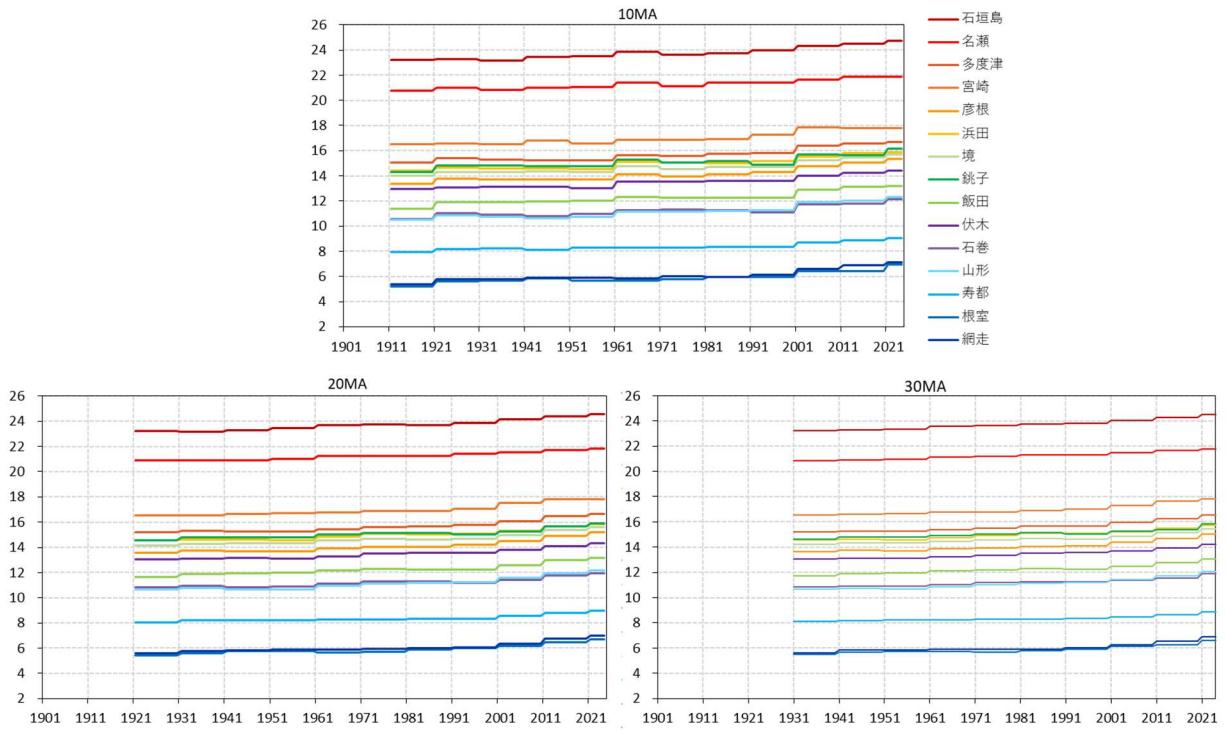


図 8 各 MA の 125 年間における 10 年毎の平年値の変化

5.2 最初の平年値を基準とした場合における各平年値の変化

図 9 に、最初の平年値を基準とした場合の各平年値の変化を示した。図中には、全 15 地点の平年値の平均値（以下、「全平均」とする）もあわせて示した。

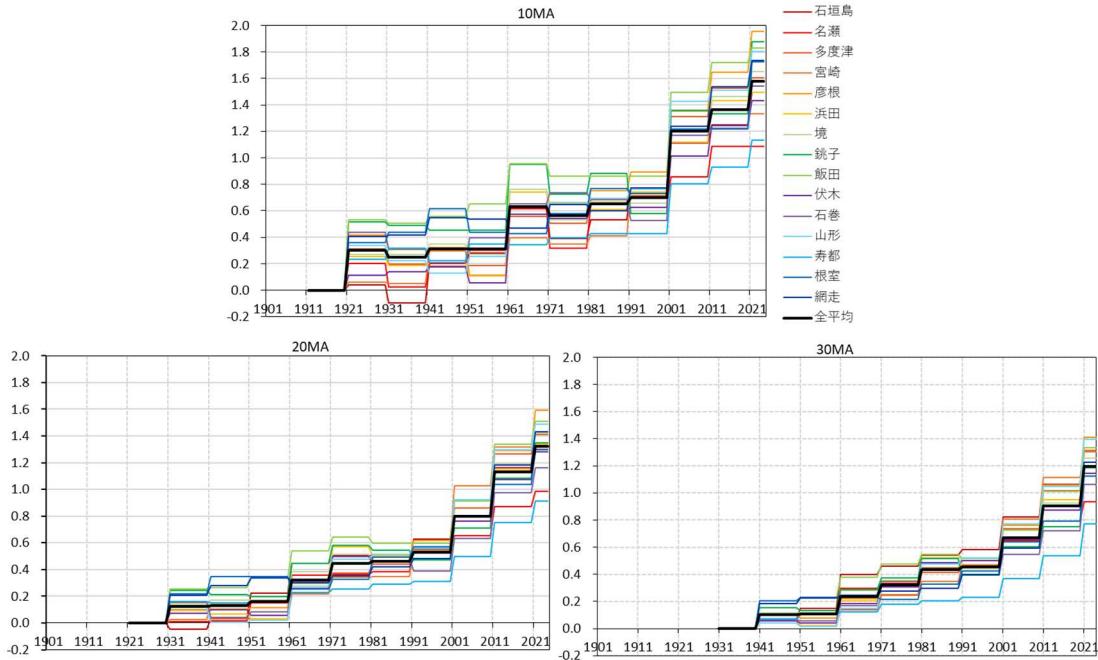


図 9 各 MA において最初の平年値を基準とした場合の各平年値の変化

10MA の平年値は全体として上昇傾向を示すものの、地点ごとのばらつきが大きく、変動も多い。これは前述のとおり、10MA には十数年周期程度の変動成分が残っているためであり、その影響が 10 年毎の平年値にも現れたものと考えられる。

一方、20MA の平年値は 10MA に比べてより滑らかな上昇傾向を示し、地点間のばらつきも小さい。30MA は 20MA と類似した変化傾向を示すが、さらに平滑化されており、より安定した時系列となっている。平年値の安定性を重視する観点からは、30MA あるいは 20MA を採用する方が妥当と考えられる。

各 MA 間の違いを明確にするため、図 9 における全平均のみを抽出し、その時系列を図 10 に示した。

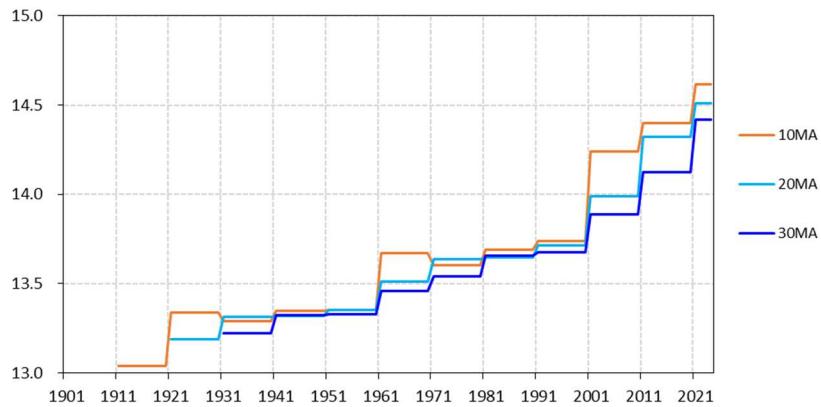


図 10 各 MA の全平均の時系列

各 MA の平年値は概ね $0^{\circ}\text{C} \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ の範囲で推移しているが、約 125 年間の中で 3 度ほど顕著な上昇が見られる。例えば、10MA では 1921 年、1961 年、および 2001 年の平年値が、直前の平年値に比べて約 $0.3^{\circ}\text{C} \sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 高くなっている。これは、直前の 10 年間に比較的高温の年が多かったことによると考えられる。20MA および 30MA でも同様の上昇傾向が認められるが、その上昇幅は 10MA より小さく、約 $0.1^{\circ}\text{C} \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 程度である。このように、平年値は 10 年単位で 0.1°C レベルの変化を示しており、その変動の把握が重要である。また、いずれの MA においても 2001 年以降の上昇傾向が顕著であり、これは 1990 年代以後の気温上昇が強く反映された結果である。特に 30MA では、2021 年の平年値が 1931 年のそれに比べて約 1.2°C 高く、平年値の安定性が大きく変化していることがわかる。すなわち、もはや平年値を「一定」とみなすことは困難な状況になっている。

なお、平年値としてどの観測期間を用いるかは、その利用目的によって異なる。例えば農業分野などでは、直近 10 年間の平均値を平年値として毎年更新して利用する方法が有用であると指摘されている¹⁰⁾。これはまさに 10 年間移動平均（10MA）に相当する。また、近年のように気候変動（暖冬・涼夏など）が顕著になっている時期には、平年値を頻繁に改算することが望ましいとも指摘されている¹⁰⁾。この考え方は 1963 年時点の研究においてすでに示されていたものである。また、1935 年および 1956 年の国際気象機関の勧告から相当な期間が経過している。近年ではさらに気候変動が進行していることを踏まえると、平年値の定義そのものを再検討すべき時期に来ているといえよう。

6. まとめと課題

移動平均による振幅変化および平年値の特性について、過去 125 年間の気温データを用いて解析を行った。その結果、実際の気温時系列における移動平均の振幅変化は、理論

振幅比によっておおむね説明できることが明らかとなった。

また、過去 125 年間の平年値の変化の解析から、平年値は一定ではなく、近年の顕著な気温上昇を反映して大きく変化していることが確認された。したがって、現行の 30 年間平均による平年値の定義を再考する必要がある。

さらに、網走などの気温変動には、太陽黒点数の 11 年周期に近い変動が認められ、太陽活動が気温変動に影響している可能性が示された。

次報では、太陽黒点数と気温との関係を解析する予定である。

参考文献

1) 気象庁 「平年値」の紹介

https://www.jma-net.go.jp/aomori/pub-relations/pdf/saijiki/saijiki2021_02a.pdf

2) 気象庁 過去の気象データ・ダウンロード

<https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>

3) 物理のかぎしっぽ 加熱される地球 (1)日本の 15 地点の特徴

https://hooktail.sub.jp/contributions/heated_the_earth_01.pdf

4) 気象観測統計指針 第1部 第5章 平年値

<https://www.maizuru.marine.kais.kyoto-u.ac.jp/wp-content/uploads/2013/10/46b332e0a114c865b7cdafdec22c11b4.pdf>

5) 日本気象学会 平年値と偏差について

https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1959/1959_03_0079.pdf

6) 日本気象学会 平均値と平年値

https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2012/2012_08_0731.pdf

7) 物理のかぎしっぽ 周期時系列の統計解析 (3)移動平均とフーリエ変換

<https://hooktail.sub.jp/contributions/shuki03.pdf>

8) 物理のかぎしっぽ 周期時系列の統計解析 (4)フーリエ変換

<https://hooktail.sub.jp/contributions/shuki04.pdf>

9) 装置設計者のための騒音の基礎 第24回 リーケージエラー

<https://www.cradle.co.jp/media/column/a276>

10) 日本気象学会 平年値について

https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1963/1963_02_0042.pdf