

# 日本周辺で 1982 年以降に生じた 極端海洋昇温に対する地球温暖化の影響の統計的調査

林 未知也\*, 塩竈秀夫, 小倉知夫(国立環境研究所)

## 1. 背景

工業化以降の地球温暖化に伴う熱の 90%以上が海洋に蓄積され, 世界中で「海洋熱波」のような異常高温が観測されている。日本近海においても観測史上最高に達するような海面水温(SST)が気象庁から度々報告され, 海洋生態系や漁業への影響が懸念されるが, これまで東アジアでの事例はあまり注目されてこなかった。

2020 年 8 月に日本南方沖を含む北西太平洋の記録的な高 SST が生じた。Hayashi et al. (2021)は, 観測された異常高温を超える頻度が 1000 年に一度以下から人為的地球温暖化により約 15 年に一度にまで高まったと指摘した。その後も 2021 年の 7 月と 10 月に日本海など, 2022 年の 6~8 月に日本近海で異常高温が生じた。しかし, 長期的な気候変動がどの程度影響しているかはほとんどの事例について不明なままであるため, 極端な昇温に対する地球温暖化の寄与を適切に報告できていないのが現状である。

本研究は, Hayashi et al. (2021)の解析手法を応用することにより, 第 6 期結合モデル相互

比較計画(CMIP6)の気候モデルによる実験出力と観測データから, 1982 年 1 月から 2022 年 12 月までに日本近海で発生した極端海洋昇温(Extreme Ocean Warming, EOW)イベントに対する工業化以降の地球温暖化の寄与を暦月ごと・海域ごとに包括的に定量化した。気象庁が日本周辺の SST 予報に用いる 10 の監視海域に着目して調査した(図 1)。手法や議論の詳細については Hayashi et al. (2022)を参照されたい。

## 2. データ

全球客観解析 SST データ COBE-SST2 と CMIP6 の気候モデル出力を統計的に解析した。観測的な SST の比較のために ERSST version 5, HadISST version 1.1, OISST version 2.1 も用いられる。CMIP6 アンサンブルは, 平衡気候感度(ECS)が 2~5°C の 24 モデルからなり, 1850~2100 年までの人間活動による二酸化炭素を含む温室効果ガスやエアロゾルなどの大気汚染物質の排出, 火山・太陽活動などの自然起源の気候変動要因を与える一連の過去再現実験(historical)と将来予測シナリオ実験(SSP2-4.5)と, 工業化前(piControl, 1850 年)条件の 200 年分の参照実験を解析する。各モデルの SST は 1x1 度格子に変換され, また 1951~2000 年の平均 SST バイアスは COBE-SST2 と比較することで除外された。

## 3. 結果と考察

日本周辺で観測された 1982~2021 年の SSTトレンドは日本北側で高く, CMIP6 アンサンブルは全体としてよく再現する。ただし, 北海道南東方(JP02)では気候モデルのほとんどが SST 上昇を観測より過大に表現するため(図 1 c), JP02 を除く 9 の監視海域を解析対象とする。

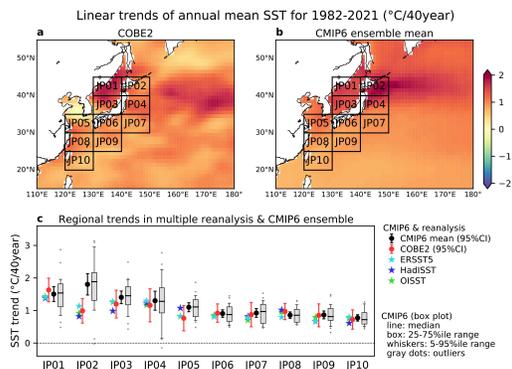


図 1: 気象庁が用いる 10 監視海域と 1982~2021 年の SSTトレンド。(a) COBE-SST2, (b) CMIP6 アンサンブル平均, (c) 海域ごとの値(赤: COBE-SST2, 星: 異なる観測的データ, 黒: CMIP6 アンサンブル平均, 箱ヒゲ図: CMIP6 アンサンブル)。詳細は凡例参照。Hayashi et al. (2022)の図 1 を引用。

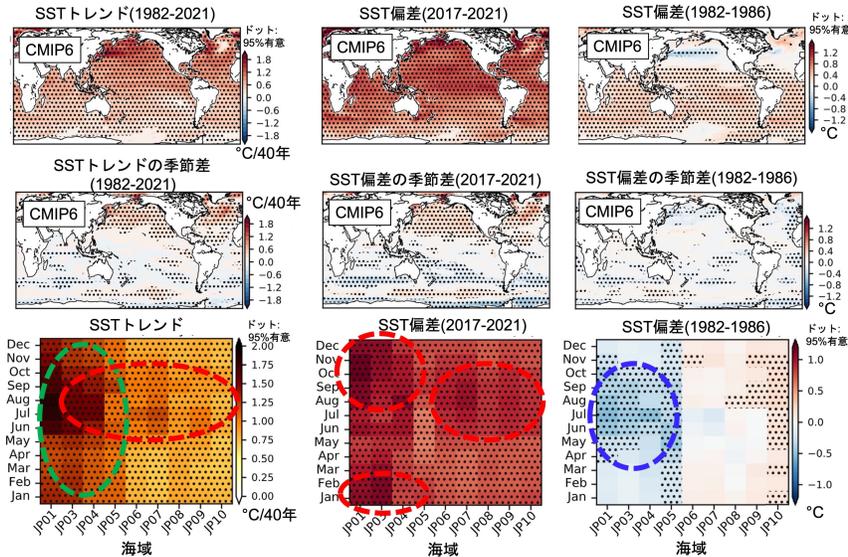


図 2: 1982~2021 年の SSTトレンドと工業化前実験からの SST 偏差(中央: 2017~2021 年, 右: 1982~1986 年). 上段は年平均, 中段は 6 月~11 月平均と 12 月~5 月平均の差. 下段は暦月ごとの海域平均. ドットは 95%有意な値. Hayashi et al. (2022)の図 2, S4, S5 を一部改変して引用.

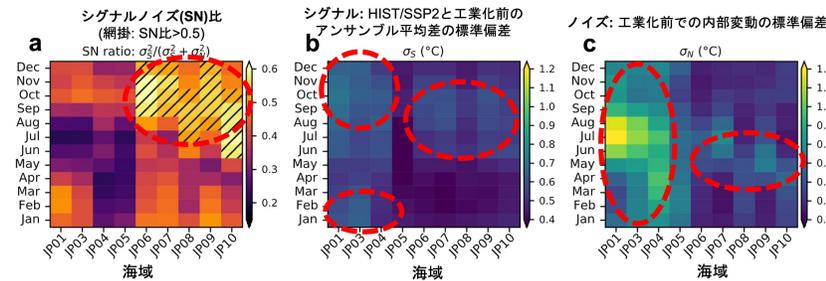


図 3: 1982~2021 年における暦月ごと・海域ごとの地球温暖化シグナル・ノイズ(SN)比. シグナルは CMIP6 の過去再現実験・将来予測シナリオ実験の SST 偏差, ノイズは工業化前実験の SST 偏差の標準偏差. Hayashi et al. (2022)の図 2 を一部改変して引用.

まず, SSTトレンドと工業化前実験からの SST 偏差を図 2 に示す. SSTトレンドで見られる太平洋北部での強い昇温は, 2017~2021 年の SST 偏差では明瞭ではない. 一方, 1982~1986 年の SST 偏差は太平洋北部で有意に負偏差となっている. 先行研究との比較から, この低温偏差はエアロゾル強制に対する応答だと解釈される. 中高緯度へのエアロゾル強制の影響は 1980 年代以降低減傾向にあることで SSTトレンドを日本北側で強めていることがわかる.

CMIP6 での SSTトレンドは季節的に北半球夏~秋に正に北半球全体にわたり大きいことは観測と整合的である. 同様の季節性は 2017~2021 年の SST 偏差でも確認される. このような南北非対称な SST 昇温は, 海陸コントラス

トや南大洋熱吸収などにより温室効果ガスへの応答として 1980 年代以降に現れることが知られている. その季節性は, 温暖化に伴う南北大気エネルギー輸送が晩夏から秋にかけて南向きに大きく, ハドレー循環や ITCZ が北によりシフトしやすいこと関連していると考えられる. ただし, 日本近海に焦点を当てると, 2017~2021 年の SST 偏差は日本北側で夏季に正偏差が抑えられている. これは, エアロゾルによる冷却効果が夏季に卓越するためだと解釈される.

地球温暖化に伴うシグナルと内部変動に伴うノイズの比(SN 比)を 1982~2021 年について図 3 に示す. シグナルは工業化前実験からの偏差の標準偏差であるが, すでに 2017~2021 年の SST 偏差で説明したとおりの地域性・季節性を示す. ノイズは, 工業化前実験で

の内部変動成分の標準偏差であり、夏に大きく、特に日本北側で大きい。日本南側では春から初夏に大きい傾向にある。これらの特徴は基本的には海洋混合層と海面熱フラックスから説明されることが確認されており、観測ともよく整合する。したがって、SN比は日本南側で晩夏～初冬に0.5を超えており、地球温暖化の寄与が顕著となる。

次に、EOW イベントを解析する。EOW イベントは、地球温暖化なしでは20年に一度も起らない高いSSTがある海域の月平均として発生した事例とする。図4に解析例を2022年7月について示す。まず、海域ごと・暦月ごとにCMIP6の工業化前実験から月平均SSTの確率密度分布を計算し、1982～2022年のある年に観測された月平均SSTを超える状態の発生確率が20年に一度以下( $P_0 \leq 0.05$ )だと推定される場合、その観測事例をEOW イベントとして特定される。同様に、観測と対応する年の気候を考慮した場合の発生確率( $P_1$ )を、CMIP6の過去再現実験と将来予測シナリオ実験の対象年±2年から推定する。これらの発生確率の違いは地球温暖化に伴う変化を示しており、Fraction of Attributable Risks ( $FAR = 1 - P_0/P_1$ )で定量化される。FARが0.5を超えると2倍以上、0.9を超えると10倍以上、高温状態の発生確率が増加したことに対応する。

EOW イベントの事例数と地球温暖化に伴う発生確率の長期変化を図5に示す。いずれの海域でも事例数は長期的に増加しているが、特に日本南側で事例数が多く、地球温暖化に伴う変化が早い時期から顕著な傾向にある。例えば東シナ海南部(JP08)では、日本海南部(JP03)と比べて事例数が多く、それらのほとんどについてFARが2000年頃から0.5を有意に超えており、2015年頃以降には0.9を超える事例もしばしばみられる。また、2022年のEOW イベントの全てでFARが0.5を有意に超えた。日本南側で地球温暖化の効果が現れやすいのは、SN比と整合する(図3)。なお、1998年頃にも多くの海域でEOW イベントが観測されるが地球温暖化の影響は小さいため、ENSOのような年々変動が主因と考えられる。

日本北側でも地球温暖化の寄与は既に顕在化しつつある。例えば、7月の日本海南部(JP03)においても、2022年に初めてFARが0.5を有意に超えるEOW イベントが観測され

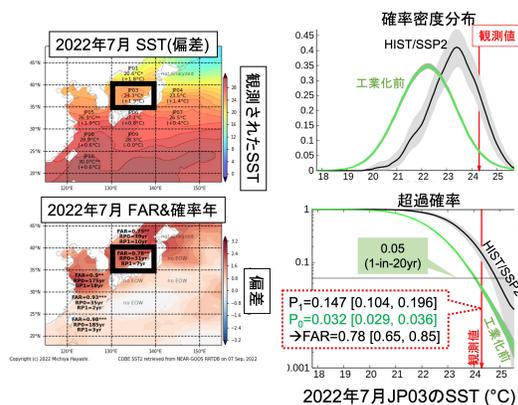


図4: EOW イベントの解析例: 2022年7月。(左) SSTと偏差、数値は海域平均値、EOW イベントのFARと確率年( $1/P_0$ ,  $1/P_1$ )。(右) JP03での確率密度分布と超過確率、観測値の $P_1$ と $P_0$ およびFARとそれらの95%有意幅。Hayashi (2022)をもとに作成して一部改変。

た。したがって、現在の気候では、日本近海のEOW イベントのほとんどで地球温暖化の寄与を否定できないと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の包括的な調査により、2000～2022年までに日本近海で観測されたEOW イベントのほとんどが地球温暖化によって発生しやすくなっていたことが確認された。これまでの海洋生態系や豪雨、台風などの変化に対する地球温暖化の寄与の定量的な理解へ貢献する成果である。今後も、Hayashi (2022)を用いて日本近海の気候変動の現状を継続的に把握(ウェブサイト)で随時公開、<https://sites.google.com/view/michiyahayashi/extremeoceanwarming>, 2023.1.10 閲覧)することで、地球温暖化への適応策や緩和策の適切な計画・実施へ繋がることが期待される。

#### 謝辞

本研究は文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」(JPMXD0722680395)、環境省・(独)環境再生保全機構「環境研究総合推進費」(JPMEERF20222002)、国立環境研究所の気候変動適応研究プログラムの助成により実施した。最新のCOBE-SST2データをNEAR-GOOS地域リアルタイムデータベースから2023年1月10日に取得してHayashi et al. (2022)の成果を更新した。

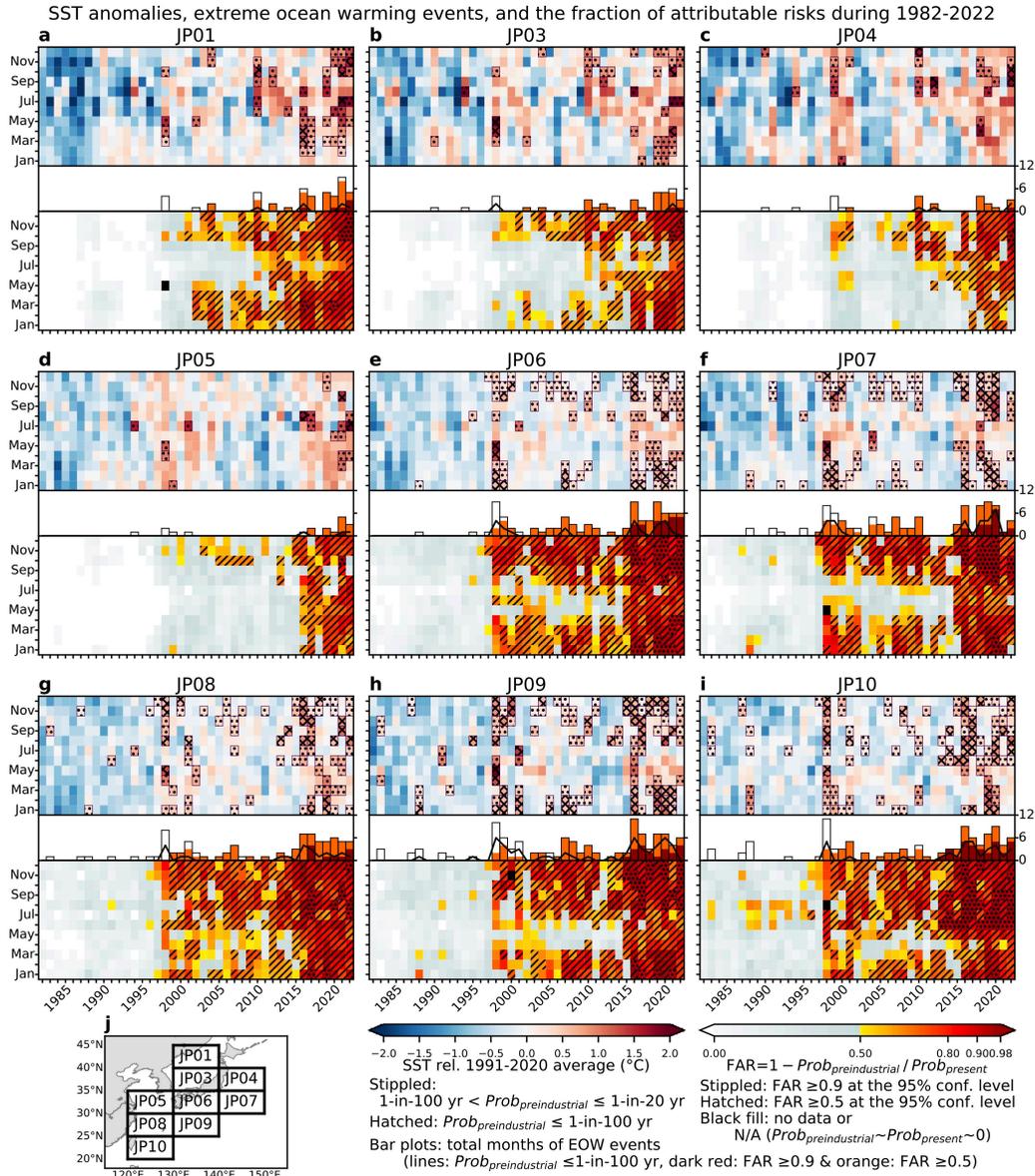


図 5: 海域ごとの SST 偏差および FAR の 1982~2022 年の変化と、特定された EOW イベントと年間イベント数の変化。(上段) 20 年に一度以下のイベントをドット, 100 年に一度以下のイベントを網掛けで示す。(下段) FAR が 95% 有意に 0.5 と 0.9 を超える場合を斜線とドットで示す。(中段) 95% 有意に FAR  $\geq 0.5$  を橙色, FAR  $\geq 0.9$  のイベント数を茶色で塗り, 実線は 100 年に一度以下の EOW の年間イベント数を示す。詳細は凡例参照。Hayashi et al. (2022) の図 3 を更新。

### 参考文献

- Hayashi, M., Shioyama, H., Emori, S., Ogura, T., & Hirota, N. (2021) The northwestern Pacific warming record in August 2020 occurred under anthropogenic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, [e2020GL090956](https://doi.org/10.1029/2020GL090956).
- Hayashi, M., Shioyama, H., & Ogura, T. (2022) The contribution of climate

change to increasing extreme ocean warming around Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, [e2022GL100785](https://doi.org/10.1029/2022GL100785).

- Hayashi, M. (2022) A software to calculate the fraction of attributable risks for SST variability around Japan. *figshare*. **Software**. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20438826.v1>