

海から季節の不順を予測する ～季節予測の最前線～

土井 威志

(海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ)

1. 概要

季節予測とは、冷夏・暖冬・少雨・大雨などの「季節の不順」を、数ヶ月前から事前予測することである。本講演では、日々の天気予報と季節予測の違い、熱帯の海の重要性、季節予測の社会応用可能性などを、最新の研究成果と合わせて解説する。

2. 季節予測とは

季節予測とは、猛暑・暖冬・干ばつ・大雨などの「季節の不順」を数ヶ月前から予測することである。

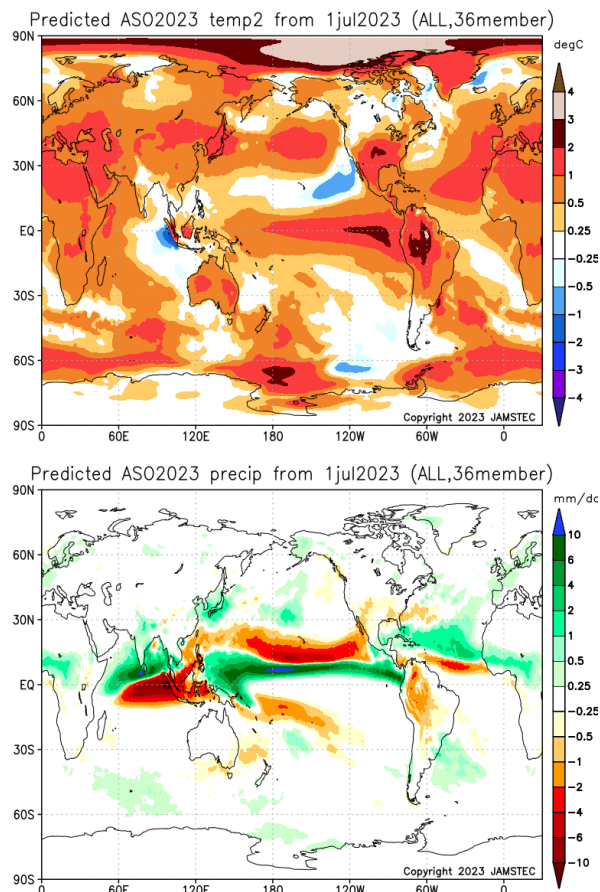


図1： SINTEX-F 季節予測システムで 2023 年 7 月 1 日時点で予測した 2023 年 8 月から 10 月の 3 ヶ月で平均した地上気温（上段、°C）と降水量（下段、mm/day）について、平年値（1991-2020 年平均）からの差。予測の不確実性を評価するために、わずかに条件を変えて 36 回予測実験を繰り返した結果の平均値。

例えば、講演者の所属する JAMSTEC アプリケーションラボのウェブページ (<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.html>) では、2023 年 7 月 1 日時点で予測した 2023 年 8 月から 10 月の 3 ヶ月で平均した地上気温と降水量について、平年値からの差を提供している（図 1）。

大気にはカオティックな性質（僅かな違いが、計算を進めるうちに急速に成長し、結果に大きな違いが現れる性質）があり、例えば「明日は雨が降る」などの日々の天気予報については、せいぜい 1 週間程度先の情報が有用である。季節予測でも、「何月何日は雨が降る」と言った天気そのものを数ヶ月前から予測することはできない。しかし、「今年の冬は普段より暖かい（確率が高い）」といった程度なら予測可能な事例がある。なぜ予測が可能なのだろうか？秘密は海の水温にある。大気と比べて、大きな熱容量を持つ“海の水温”は、温まりにくく冷めにくい。つまり、非常にゆっくり変動するために、海の水温が起源である「季節の不順」であれば、数ヶ月前からでも予測が可能である。特に、熱帯海洋は世界で最も暖かく、地球気候のエンジンの役割を担っており、0.5 度程度の水温の変動でも、周辺海域の雨の降り方を大きく変えたり、1000km 以上離れた遠い地域にも大気を介して遠隔的に影響したりすることが知られている。一方で、中緯度域の水温の変動は、大気によって強制されることが多く（例えば、水温が高いから低気圧になるのではなく、高気圧に覆われたから水温が高いといった関係）、季節の不順の起源になることが少ない。季節予測とは、大雑把に言ってしまうと、熱帯の海の水温を予測し、その世界各地への影響を予測することであると言っても良いかもしれない（注：海水、土壌水分、成層圏などが重要な働きをする事例もあるが、時間の関係上、本講演では言及しない）。

数年に一度、熱帯の海で発生して世界中の「季節の不順」を引き起こす現象として、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象がある。エルニーニョ現象は、熱帯太平洋で見られる気候変動現象で、数年に 1 度、春から冬にかけて発生する。エル

ニーニョ現象が発生すると、熱帯太平洋の東部で海面水温が平年より高く、西部で海面水温が低くなる。この水温の変化によって、通常は熱帯太平洋の西部で活発な対流活動が東に移動し、インドネシアや南米の北部では平年より雨が少なく暖かくなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では冷夏、暖冬となる傾向がある。エルニーニョ現象とは符号が逆の現象は、ラニーニャ現象と呼ばれる。熱帯太平洋の西部で海面水温が平年より高く、東部で海面水温が低くなる。この水温の変化によって、熱帯太平洋の西部で対流活動がさらに活発になり、インドネシアでは平年より雨が多くなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では猛暑、寒冬となる傾向がある。

インド洋ダイポール現象は、熱帯インド洋で見られる気候変動現象で、エルニーニョ現象のインド洋バージョンと言っても良いかもしれない。数年に1度、夏から秋にかけて発生する。インド洋ダイポール現象には正と負の符号があり、正のインド洋ダイポール現象が発生すると、熱帯インド洋の南東部で海面水温が平年より冷たく、西部で海面水温が温かくなる。この水温の変化によって、通常は東インド洋で活発な対流活動が西に移動し、東アフリカで雨が多く、インドネシアでは雨が少なくなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では雨が少なく、気温が高くなる傾向がある。一方、負のインド洋ダイポール現象は、熱帯インド洋の南東部で海面水温が平年より温かく、西部で海面水温が冷たくなる。この水温の変化によって、通常は東インド洋で活発な対流活動がさらに活発となり、インドネシアやオーストラリアで雨が多くなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では雨が多く、気温が低くなる傾向がある。

人為起源の長期的な CO₂ 排出増加に起因する地球温暖化が益々進行しており、世界各地で、地上気温や海水温が上昇していることに加えて、乾燥地域は更に少雨に、湿潤地域は更に多雨になってきている。そのような長期的なストレスがかかった状況下で、2-5 年程度の周期で自然に発生するエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の影響が重ね合わさることで、過去前例のない極端な猛暑・暖冬・干ばつが頻発することが懸念される。したがって、地球温暖化自体への対策はもちろんのこと、季節予測の精度を飛躍的に向上させ、その予測情報を使って自然災害に備えることが益々重要になっている。

3. 季節予測の方法

講演者の所属する JAMSTEC アプリケーションラボの季節予測システムは、現在から将来に向けて、海洋観測データとスーパーコンピュータのバトンパスリレーのようなシステムである。

まず、予測開始時点で、季節予測にとって重要な海の水温の状況を知る必要がある。人が住めない海において、時々刻々と変化する海の水温や塩分などはどのように観測しているのだろうか？海の表面は主に衛星のレーダーで観測している。しかし、衛星のレーダーでは海の中の水温までは測定できない。代わりに、海の中は自動で浮き沈みするアルゴフロート(図 2)と呼ばれる測器で観測している。その測器は世界中で 4000 台程度稼働している。また、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象が発生する熱帯の海には、それらの発生を監視するため、係留ブイによる定点観測も行われている。これらの観測網は国際協力のもと維持されている。JAMSTEC では、アルゴフロートや係留ブイによる定点観測(熱帯太平洋やインド洋など)などで観測を行っており、国際的な海洋観測網の展開に大きく貢献してきた。詳しくは、

「アルゴフロートで世界の海を測って 20 年」
http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20210205/

「TRITON ブイ」
<https://www.jamstec.go.jp/50th/column/column01.html>

などを参照して頂きたい。

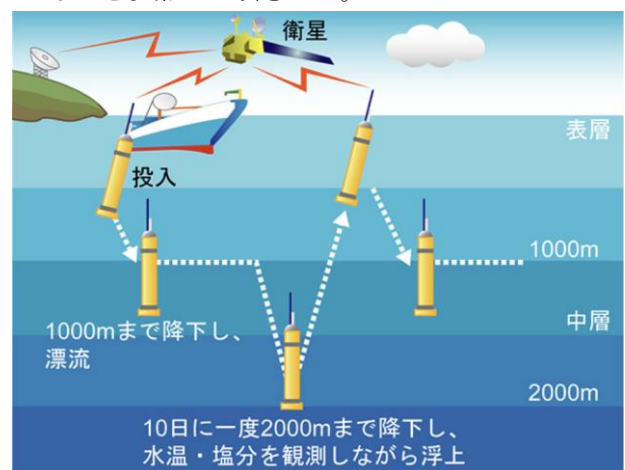


図 2：アルゴフロートの模式図(©JAMSTEC)

海洋観測から予測開始時点の状況を知った後は、その情報を、気候モデルに教え込んでから、そのモデルを使ってコンピュータで将来を予測する。気候

モデルとは、空-海-陸-海氷などに対して、物理を使って1回の計算で10分程度の未来を計算できる数式の集まりで構成されたソフトウェア(プログラム群)である。この計算を繰り返すことで何ヶ月も先の予測計算を行っている。このとき、地球全体の海-空-陸-海氷を3次元格子状に分割する。このような気候モデルの源流は2021年にノーベル物理学賞を受賞した真鍋淑郎博士の研究にある。気候モデルの計算では、膨大な方程式をコンピュータで計算できるように変換するプログラミング技術と膨大な計算を実行する計算機であるスーパーコンピュータが必要となる。こういった季節予測への挑戦は、数学と物理を使ったアプローチであるため、数理的な(あるいは力学的な)予測手法とも呼ばれる(注: 近年、人工知能解析を使ったデータ駆動型アプローチの発展も目覚ましいが、時間の関係上、本講演では言及しない)。

JAMSTECでは、海洋観測とスーパーコンピュータの2つのファシリティを用いて季節予測研究を推進している。

4. 季節予測の社会応用

季節予測が高精度に実現できれば、豊かな社会応用可能性がある。ここでは、SINTEX-F 季節予測システムを用いた季節予測の社会応用の実例を2つ紹介する。1つ目は、農業分野への応用についてである。農研機構との共同研究で、コメ、コムギ、ダイズ、トウモロコシなどの主要作物の収量を世界各地で3ヶ月前から予測するシステムを開発した。冬コムギの収量変動は比較的に精度高く予測できることが分かった。日本をはじめとする食料輸入国では、輸出国での不作やそれに伴う国際市場価格の上昇が食料を確保する上で大きなリスクとなってる。事前に、自国や関係諸国で不作になることがわかれば、輸入元の変更や国内の食料備蓄量を積み増すなどの対応を迅速に行うことが可能となり、食の安全を守ることににつながるかもしれない。詳しい解説は、<http://www.jamstec.go.jp/apl/j/column/20200618/>を参照して頂きたい。

2つ目は、健康問題に関するものである。雨や気温の変動予測から、南アフリカのマラリアの流行を警戒するシステムを開発した。事前に流行が懸念されるような場合には、マラリアを媒介する蚊に対して殺虫スプレアの散布の強化などを実施し、被害を減ずることができるかもしれない。詳しい解説は、SATREPS 南ア課題: https://www.jst.go.jp/global/kadai/h2509_sout

[hafrica.html](http://www.jamstec.go.jp/sdgs/j/case/013.html), JAMSTEC SDGs 特集, <http://www.jamstec.go.jp/sdgs/j/case/013.html>
国連ハビタット記事: <https://ashitane.t8s.jp/technology/jamstec/>などを参照して頂きたい。

その他の社会応用可能性としては、海面上昇、水資源管理、山火事、漁業、電力需要などへの利用が考えられ、SDGsの様々な課題にも貢献可能だと考えている。

季節予測に豊かな社会応用可能性があることは示唆されてきたが、実際にその価値を創出し、社会実装していくためには、ステークホルダーと協働で研究・実証実験等を進める必要がある。季節予測の潜在的な可能性を考慮すると、季節予報が天気予報レベルまで高精度化することは考えにくい。季節予測の高精度化研究だけでなく、今のレベルの季節予測情報でも、どのような社会的価値を創造できるのかをしっかりと研究する必要があるように思う。例えば、「60%の確率で猛暑になる」と言った確率的な予測情報が数ヶ月前から提供された場合、どのような行動や価値につながるのだろうか。期待値などを計算し、統計的に利のある戦略を探索できないか。あるいは、今年の秋の予測は、不確実性が少なく、予測の根拠や過去事例を見ても、的中する可能性が高い自信のある予測だが、今年の冬の予測は、不確実性が大きいため、あまり信頼できないと言ったように、予測情報と予測精度だけでなく、事例ごとに踏み込んだ予測の根拠や信頼性などの情報を付与することで、季節予測の利活用性を高められないだろうか。そういったことを現在研究中である。

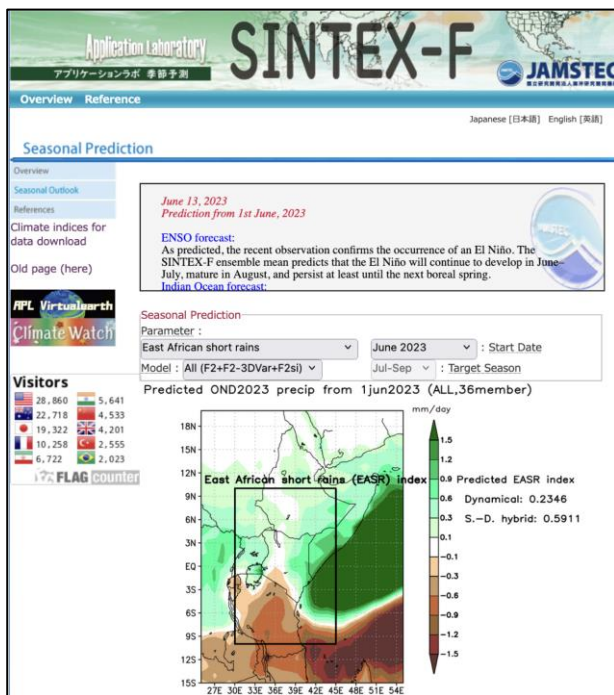
5. 本日のメッセージと今後の課題

本日のメッセージとして以下の2点を強調しておきたい。まず、1点目として季節予測は海洋観測と気候モデルのリレーで実施するという点。2点目は、季節予測を高精度化する研究に加えて、季節予測情報の社会応用可能性を探索する研究が必要である点。特に地球温暖化を背景に猛暑・暖冬・干ばつなどが極端化しつつあるので、数ヶ月前から予測して、「備える」ことが益々重要になると考えている。

6. 最後にやや専門的な話。

最後に最新の研究成果を紹介したい。東アフリカの極端な干ばつが数ヶ月前から予測可能なことを示した研究成果で、Natureにも紹介された(2022年12月1日号[5])。具体的には、100メンバーを超える多アンサンブルシミュレーション(予測の不確実

性を評価するために、わずかに条件を変えて複数回予測実験を繰り返す手法)で東アフリカの干ばつを予測した結果から、負のインド洋ダイポールモード現象が、10-12月(東アフリカの短い雨季の時期)に、干ばつを引き起こしていることを明らかにした。もし、干ばつの発生を数か月前から予測できていれば、最適な水の供給制御や食料流通の強化などの対策をすることで水不足や飢饉の被害を軽減できたのではないかと考えている。また、この研究を契機に新たに東アフリカの「短い雨季」についての予測情報を詳しく発信することを開始した(図3)。地球温暖化の進行によって、世界規模で極端な干ばつの発生頻度と強度が増している昨今、水と食料の安全を守るため季節予測の高精度化を進めると共に、その予測情報を応用し被害を軽減するための社会応用研究を飛躍的に発展させることが喫緊の課題であ



ると考えている。

図3: 2023年の東アフリカの「短い雨季」についての予測情報。やや洪水傾向を予測している

(<https://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/seasonal/outlook.html>).

7. 付録: これからの季節はどうなる?

2020年、2021年に引き続き、2022年もラニーニャ現象が3年越しで続いていたが、今春ようやく終息した。熱帯インド洋でも3年連続で負のインド洋ダイポールモード現象が発生したが、昨年冬には終息した。現在は、観測データからエルニーニョが発達していることが確認できる。2014-2016年のイベント以来7年振りである。現在発生中のエルニーニョ現象を9ヶ月前の2022年11月から予測することに成功していた(JAMSTEC コラム: <https://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/column-20221121/>)。

SINTEX-F 季節予測システムのアンサンブル平均値では、エルニーニョが8月にピークを迎え、少なくとも来年の春まで持続すると予測している。しかし、その振幅の予測には大きな不確実性がある。

インド洋に目を向けると、SINTEX-F 季節予測システムは、この夏に、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると予測し続けている。しかし、観測データでは、まだはっきりとそのシグナルが見えない。予測通り、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すれば2019年のイベント以来4年振りとなる。2023年7月1日時点では、正のインド洋ダイポールモード現象の発生に伴い、2023年10-12月に東アフリカの降水量が0.9mm/日程度平年より増える、すなわち10年に1度レベルの洪水が起こると予測している。

予測通り、正のインド洋ダイポールモード現象が発生し、エルニーニョ現象と同時発生すれば、2015年のイベント以来8年振りになる。2015年の夏から秋にかけて両現象が同時発生した時は、インドネシアは極端な少雨になった。また、2015年の台風は、日本への接近数が平年より多く、記録的な大雨の被害をもたらした。今後の熱帯海洋の動向と世界各地への影響から目が離せない。