

天気科学 (10) 長期予報への挑戦

山崎 孝治

(北海道大学 名誉教授 Koji Yamazaki)

1. 大気はカオス

天気予報の決定論的予測可能性の限界は2週間程度であることを前回、述べた。天気予報は移動性低気圧や台風などの擾乱の発生、移動、発達、衰弱の予報が鍵となる。これらの擾乱の寿命は数日であり、寿命の数倍先の予測は不可能ということである。竜巻のような10分程度の寿命の現象は数時間前からの（どこでいつ起こるといった）予測は不可能である。つまり、大気はカオスなので、初期値問題としての予測には現象に対応した有限な予測可能時間があるということである。

2. 温暖化予測は境界値問題

では大気中の二酸化炭素濃度が増加すると将来、地球の平均気温は3°C上がるといった地球温暖化予測は信用できるのだろうか。地球温暖化予測には大気だけでなく海洋も予測する気候モデル（大気海洋結合モデルとも呼ばれる）が用いられる。IPCCにおける地球温暖化予測では、温室効果ガスやエアロゾルなど人為起源の気候駆動要因の将来の排出量または大気濃度が必要である。これらはいくつかのシナリオとして想定している。IPCC第5次報告書では代表的濃度経路（RCP）と表記する4つのシナリオを定義している。例えば、RCP4.5シナリオでは、2100年における1750年に対する放射強制力の増加が 4.5W/m^2 と想定されている。メタン等も含めた二酸化炭酸換算濃度にするると2100年に630ppmに対応する。他に、RCP2.6（475ppm）、RCP6.0（800ppm）、RCP8.5（1313ppm）シナリオがある。このようなシナリオに沿って温室効果ガスの濃度を与えて気候を予測する。すなわち、大気からの赤外線放射が $2.6\sim 8.5\text{W/m}^2$ 増加するという境界条件のもとで気候モデルを積分するのであるから、気候モデル間で数値にバラツキがあるにしても、当然、地球は温暖化する（図1）。1週間先の天気予報は初期値問題であるが、温暖化予測は境界値問題である。気候モデルが適切であれば二酸化炭素濃度増大に伴う将来予測は量的にも地域的にも信用できるといってよい。

3. 気候モデルの検証

では気候モデルの信頼性はどのように担保されるのか。19世紀後半以降現在までの気候変動は観測によって知られている。また大気中の二酸化炭素濃度などの人為的な放

射強制力と火山噴火によるエアロゾルや太陽活動による自然要因による放射強制力も知られている。そこで、これらの強制力を与えて気候モデルを積分させて得られた計算結果と観測された気候変動が整合的であるかでモデルの性能を確認できる。大気はカオスであるので、モデルが観測と、特定の年・場所でピンポイントに合致することはないが、大きな変化傾向が合うかどうか判断する。図2は世界平均気温の時系列で自然強制だけでは20世紀後半以降の温暖化は再現できないが、自然強制と人為強制の両方を与えると、観測された気温変動と概ね一致する結果を示している。

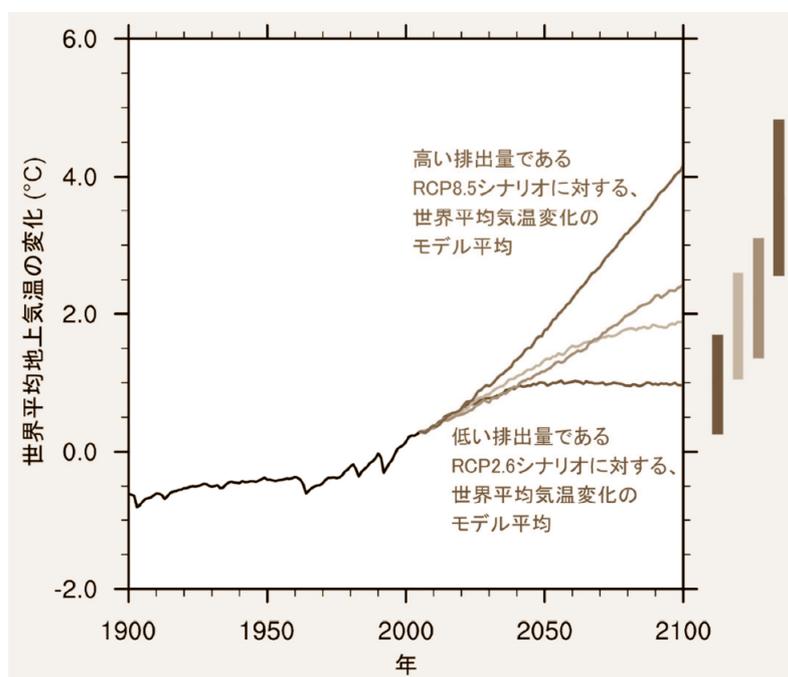


図1 世界平均地上気温変化予測

4つのシナリオ（高いものから RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6）による将来の世界平均地上気温の変化予測（2100年まで）。右端の柱はそれぞれのシナリオによる気温予測の誤差範囲。IPCC 第5次報告書第1作業部会の「よくある質問と回答」（気象庁翻訳：気象庁 HP より）

まとめると、将来、二酸化炭素など温室効果ガスをこのまま排出し続けると、自然要因に大きな変化がなければ、地球は21世紀末に20世紀末と比較して平均で1～4°C温暖化する（図1）。予測の最大の不確実性はシナリオの不確実性、即ち、これから人類がどれだけ温室効果ガスを排出するかによっている。地球温暖化予測は予測可能性が高い問題である。

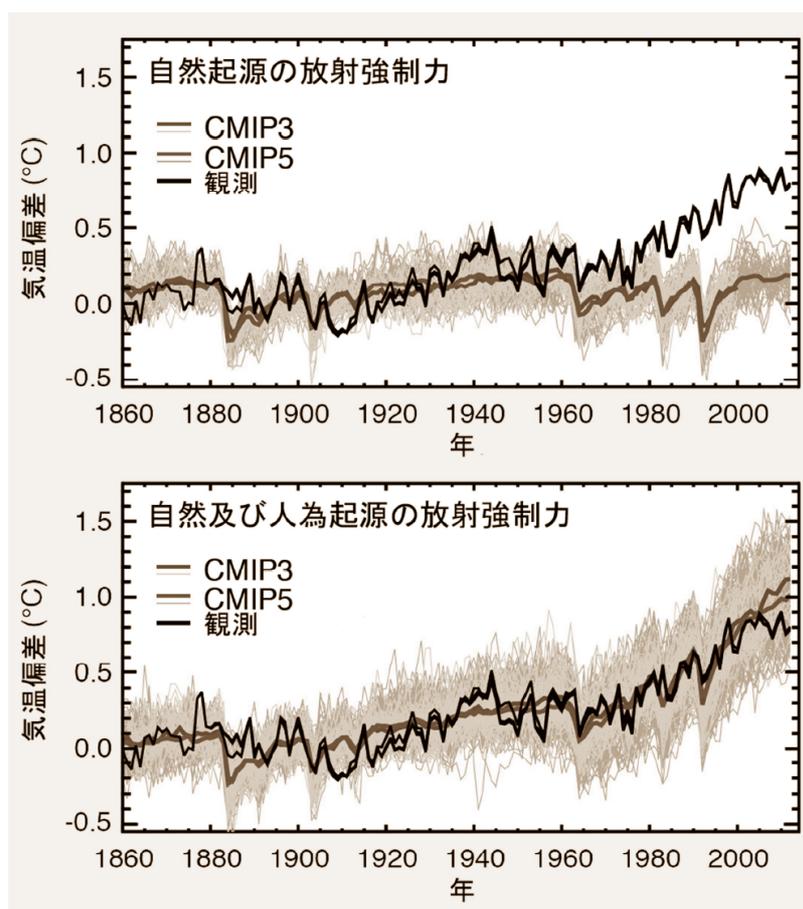


図2 放射強制力を与えた場合の気温経過

(上) 自然起源の放射強制力を与えて再現した過去の地球の平均気温偏差。青と赤で影付きは、CMIP3, CMIP5 の気候モデルによるシミュレーション結果の平均とばらつき。CMIP3, 5 は第 3(5) 次気候モデルの比較プロジェクト。いちばんぎざぎざの黒い線は観測値。(下) 同じだが、自然起源と人為起源の両者の放射強制力を与えたもの。黒い線は観測値で上と同じ。出典は図 1 と同じ IPCC 第 5 次報告書。

4. 長期予報はチャレンジング

1 ヶ月～数ヶ月先の予報は、農業だけでなく多くの産業や人々にとって重要な関心事であるにもかかわらず、非常に難しい課題である。中高緯度の対流圏大気は 2 週間程度の記憶しかもたないが、熱帯大気や成層圏はより長い記憶をもった現象があり、それにより予報可能性を延ばす可能性がある。例えば、熱帯では、対流活動が活発な領域がインド洋付近から始まり、ゆっくりと東進して太平洋中部まで進み、さらに弱まりながらも赤道を一周するような季節内変動がある。周期は 30～60 日で、マッデン・ジュリアン振動という。この現象の周期は長いので、台風とかモンスーンなど熱帯の気象現象は

案外と予測可能期間が長いと考えられる。中緯度の気象も熱帯の影響を受けるので、熱帯の予報がさらに改善すれば中緯度の予報精度の改善や予報期間の延長の可能性がある。また、第8回で述べたように成層圏の現象も対流圏に影響を与えているので、数値予報モデルの成層圏の性能を改善することにより予報の改善が見込まれる。

5. 海洋からの長期予報

大気以外にも雪氷など長い記憶を持っているものはあるが、特に長い記憶を持っているものは海洋である。海は数年以上の記憶を持っている。代表的な例が、エルニーニョである。赤道太平洋域で数年に一度起こるエルニーニョは大気と海洋の相互作用で生ずる。そのため、大気海洋結合モデルで大気と海洋の初期値問題として予測可能である。幸い、近年、アルゴ (Argo) 計画により中層フロートブイが全世界の海洋に投入され、準リアルタイムに海洋の状態を把握することができる。また、熱帯太平洋には TAO アレイという定置ブイがあり、エルニーニョの監視を行っている。さらに衛星から海面水位や海面温度の全球的な観測が行われている。このような海洋観測体制の整備によって海洋の初期値がより精密に得られるようになり、大気海洋結合モデルによる大気海洋の予測が可能になってきている。例えば、2015年11月現在、エルニーニョが起こっており、東部赤道太平洋域の海面水温偏差は、最大で3°C以上となっている(図3)。気象庁が11月10日に発表したエルニーニョ監視速報では、「今後、春にかけてエルニーニョ現象が続く可能性が高い」とされ、「エルニーニョ監視海域の海面水温偏差が今後、初冬にかけて極大になり、その後、基準値に近づく」と予測されている(図4)。エルニーニョは初冬にピークとなり、春までは続くという予測である。

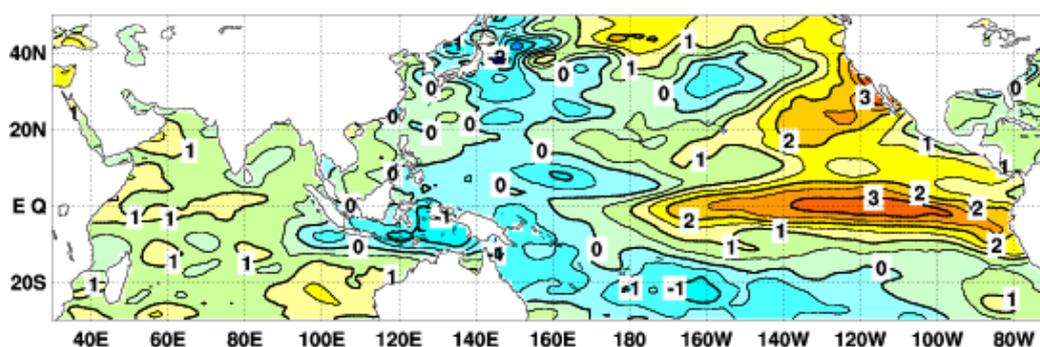


図3 2015年10月の海面水温偏差

等値線は0.5°Cごと。気象庁が2015年11月10日発表した「エルニーニョ監視速報No.278」。

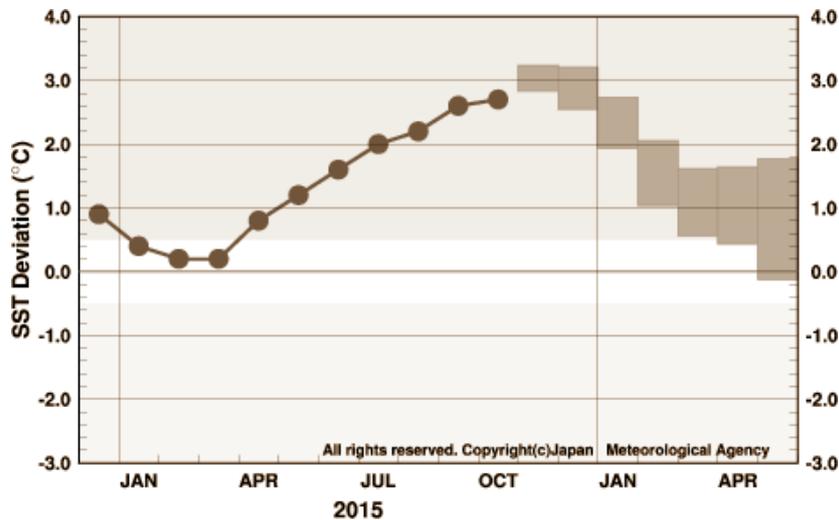


図4 エルニーニョ監視海域の海面水温偏差の予測

気象庁によるエルニーニョ予測（5ヶ月移動平均）。エルニーニョ監視海域は[5N-5S, 150W-90W]の領域。2015年11月10日発表の「エルニーニョ監視速報 No.278」より。

6. 長期予報は確率予報

海洋に関しては決定論的な予測が1年以上前から可能と思われるが、大気は確率的にしか予測できない。そのため、長期予報は確率予報の形で発表される。気温でいえば、「低い」、「平年並み」、「高い」の3つのカテゴリになる確率を示している。各カテゴリの境界の値は、過去30年の観測から高い方から10年ずつ取って決めている。気候学的にエルニーニョの冬は西日本を中心に暖冬になりやすく、気象庁が10月23日に発表した3ヶ月予報でも、11～1月の3ヶ月平均は西日本・東日本で「低20%、並30%、高50%」と平年より高温の確率が高く予報されている。北日本は「30,30,40%」で平年並み～やや高いといった予報である。読者がこの文章を読まれているところは結果が出ているであろう。

確率予報であっても、予報された確率に応じリスクとコストを考慮して作物や品種を選ぶことや農作業を計画したりすることにより長期予報を農業に役立つように利活用できるであろう。1回だけでははずれて損失になるかもしれないが、長期的には利益になると考えられる。除雪計画、エアコン製造計画、電力需要など天候に作用される所では長期予報の精度向上のメリットが大きいと考えられる。

世界の気象機関では長期予報を改善すべく、スパコンコンピュータの限界性能までモデ

ルの空間解像度を細かくすることやモデルの上端を成層圏以上に上げることなどモデルの改善を行っている。また観測の精密化及び観測値をうまくモデルの初期値に与え予測誤差を少なくするためのデータ同化手法の改善も行っている。原理的に長期予報にはカオスの限界があるものの、限界まで予報精度を向上させるべく気象庁をはじめ世界の気象機関で長期予報への挑戦が続いている。

「天気科学」の連載は今回で終わりです。ここまで読んで下さった北農の読者の皆様および編集部の皆様、ありがとうございました。