

ノーベル物理学賞 真鍋さんが開発した気候モデルとは

温暖化予測だけでなく、地球の過去から将来まで解き明かす

瀬川茂子 朝日新聞記者（科学医療部）

米プリンストン大の気候学者、真鍋淑郎さんが今年のノーベル^{2021年10月14日}物理学賞を受賞することが決まった。コンピューターで地球の気候を再現する「気候モデル」を開発し、気候変動予測の基礎を築いた業績が評価された。どういう研究なのか、真鍋さんと研究分野が近く、学生時代からアドバイスを受けていたという東京大の阿部彩子教授（気候学）に聞いた。真鍋さんが開いた道は温暖化予測だけではなく、地球の理解につながっている。

気候モデルは仮想地球で気候を再現する技術

日本に暮らしていると、暑くなったり、寒くなったり、雨が降ったりやんだり、天気は日々めまぐるしく変わる。それでも、ある地点の気温や降水量の記録を長期間、平均化すれば、典型的な気候がみえてくる。「今年の夏はとくに暑い」「今年は雪が多い」という時には、平年値と比較している。日々の天気は「気象」、長期間の平均や平均からのばらつきなど統計的に扱う時は「気候」とよぶ。気候モデルとは、コンピューターの中に仮想地球を作り、気候を再現する技術だ。

「気候モデル」は、太陽からのエネルギーの量、地球のサイズや回転、陸と海の分布、大気の化学成分といったデータをコンピューターに入れて、大気の状態が物理の法則に従ってどう変化していくかを計算する。地球の回転によって、風が吹く。風が吹くと海流が起こる。海流は熱を運び、各地の海水温を変え、大気にも影響を与える……。熱帯は暑く、高緯度は寒い、雨が降らない砂漠があり、低気圧や高気圧が動いていく。



ノーベル物理学賞の受賞が決まり、プリンストン大で会見する真鍋淑郎さん

地球の気候を再現する気候モデルで、二酸化炭素が増え続けた時の地球がどうなるかといった「数値実験」ができる。おなじみになった21世紀末の温暖化の予測は、こうした気候モデルではじき出されたものだ。最近のニュースでいえば、8月に国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、温暖化対策をしたとしても今後20年で、平均気温が1.5度上がると警鐘を鳴らした。

こんな時代がくるとは、70年前、誰も想像していなかっただろう。



化石燃料が氷河を解かす様子を表した模型 = 2013年IPCCが第5次報告書を公開したストックホルムの会場付近

話は1946年にさかのぼる。コンピューターを使えば、計算による天気予報ができると考えたコンピューターの父と呼ばれるフォン・ノイマンが、あるプロジェクトを提案した。毎日の天気予報に加えて、貿易風など地球規模の大気大循環の計算も目標に掲げた。気候変動予測は当時の社会的な課題ではなかったが、軍事的に重要な意味をもつと考えたからだ。

48年、米気象局は、全地球の大気大循環モデルを開発するプロジェクトを始めた。野心的なプロジェクトを率いたのは気象局大気大循環セクションのジョセフ・スマゴリンスキー氏だ。天気予報のために開発されたモデルを応用し、50年代なかばには、大気大循環モデルの原型ができていた。

大気海洋結合モデルを開発

スマゴリンスキー氏に招かれ、真鍋さんは58年に渡米、気象局で大気大循環モデル作りに参加する。60年代中頃までに、真鍋さんらは、大気を9層に分けた3次元モデルを作った。単純化した地球で、地形はなく、地表は陸と海がまざりあった沼ようになっていた。沼と大気は、水分と熱を瞬時に交換した。それでも、赤道付近で上昇する気流や、亜熱帯で雨が降らない砂漠が再現されていた。

「スマゴリンスキーさんは先を見通した大きなプランをもち、大気だけでなく、海洋を入れた気候モデルを作りたいと考えていた。真鍋さん自身が作るつもりだったが、大気のモデルだけでもたいへんだった。そこで海洋学者のカーク・ブライアンさんをよんだ」と阿部さんは話す。



真鍋さんとスマゴリンスキーさん = 米海洋大気局地球流体力学研究所 (GFDL) のウェブサイト (<https://www.gfdl.noaa.gov/>) から

69年、真鍋さんが作っていた大気モデルと、ブライアンさんが作っていた海洋モデルを結合したモデルを発表した。海が熱をゆっくり運び、海水の循環も再現した初の大気海洋結合モデルだ。真鍋さんが作った風が海流を起こし、ブライアンさんが作った海面水温と蒸発量が、大気循環を変える。貿易風、海流、積雪、砂漠などがあらわれ、空気、水、エネルギーがどう動くかをみることができた。しかし、海と陸の分布などは現実の地球とかけ離れており、真鍋さんらは改良を続ける。

大気と海を一緒に計算することが、なぜ、それほどむずかしかったのか。阿部さんによると「上が空気で下が海。気体と液体は、どちらも流体だが、別の性質をもち、暖まりやすさも違う。空気の動きと水の動きを別々に計算して、境目にくっつける。くっつけるところがむずかしい。境目の地球表面がいちばん知りたいところなのに、誤差が大きく、計算が不安定になって、止まってしまうことがしばしばある。真鍋さんはそれを『爆発』と呼んでいた。たとえば、強い対流が急激に起こると、計算が追いつかず爆発する」

大気中の二酸化炭素が2倍になるとどうなるか

話は前後するが、真鍋さんらは、大気循環モデルを現実の地球に近づけるために、さまざまな改良を加え続けていた。その一つが、二酸化炭素などの温室効果ガスの影響をモデルに組み込むことだった。太陽光が地面をあたためると赤外線を出すが、温室効果ガスがそれを吸収して、再び放出するため、地表付近の大気を温める。その効果を入れて、太陽の熱が地面をあたため、対流を起こしながら熱を上空に伝えていく仕組みを3次元モデルに組み込むことは至難の業だった。まず単純化して、地面に空気の円柱があると仮定した1次元モデルを作った。

ここで、真鍋さんは好奇心から二酸化炭素が2倍になるとどうなるか、高さ方向の気温分布を計算してみた。すると、地表付近の気温が約2度上がるという結果が出てきた。もともと与えられた課題ではなく、「道草」のようなものだったと真鍋さんは後に振り返っているが、67年に論文として発表すると評判を呼ぶ。

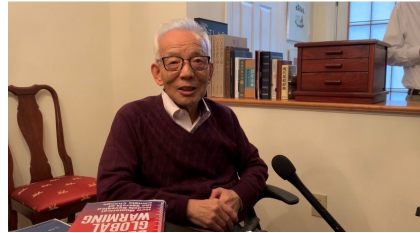
これが、気候を変動させるメカニズムとして、温室効果ガスが重要な役割を果たしていることを定量的に示した最初の論文となった。

その後、真鍋さんは共同研究者とともに、次々と重要な論文を発表していった。

「真鍋さんはジャグリングしているようだと話していた。優秀な共同研究者とともに3つ4つの研究テーマを同時並行で進めていった」（阿部さん）

真鍋さんが基礎を作った研究は、大きく発展していく。

大気中の二酸化炭素濃度を2倍にして時間が十分にたった時に平均気温が何度上がるかという指標を「気候感度」と呼ぶ。真鍋さんが好奇心で始めた気候感度研究は、個人のテーマをはるかに超えて、IPCCの中心的な課題になった。



ノーベル物理学賞の受賞が決まり、自宅でインタビューに答える真鍋淑郎さん

多くのモデルが登場するに従い、モデルによる違いで、気候変動の予測がどう変わるのか、評価することも課題になった。評価のポイントの一つが「フィードバック」だ。フィードバックとは、温暖化で大気の水蒸気が増えると温室効果が強まる、あるいは雪や海氷が溶けると、太陽の反射が減って地面が温められるなど、いずれも温暖化が促進する要因になる。こうしたフィードバックをそれぞれのモデルで評価する方法の原型も真鍋さんらが作った。

自然の気候変動と人為影響を分けることも重要だと真鍋さんは考えていた。今年、真鍋さんとノーベル物理学賞を共同受賞するドイツのマックスプランク気象研究所のクラウス・ハッセルマン教授は、自然の変動と、人為影響で一方向的に温暖化する仕組みが重なっている時に分離する方法を開発した。

真鍋さん自身は解決できなかった問題にも、後に続く研究者が挑んでいった。

一つは、大気と海洋の結合部分の補正をなくすことだ。計算が不安定になることを防ぎ観測データと合うように調節していたため、気候モデルには、「コンピューターの中で起こっていることが本当に地球で起こっていることなのか」という批判がつきまとっていた。IPCCの報告書が信頼を得るためには、調節しなくてもよいモデルを作ることが大きな課題となり、世界中の研究者が2001年前後から取り組んだ。日本がスパコン「地球シミュレータ」を開発した目的の一つにもなった。地球シミュレータ開発準備に加わった真鍋さんもいろいろアドバイスしていたという。07年の第4次IPCC報告書までには、日米英独などがそれぞれ調節なしのモデルを完成させ、報告書に反映させた。

過去の気候を変動させた要因は？ 好奇心が原動力

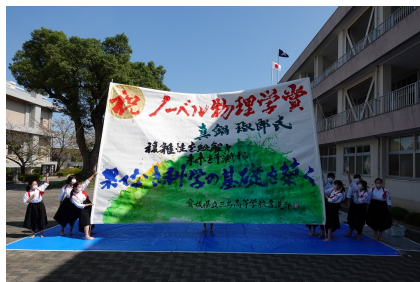
真鍋さんの業績は温暖化予測に集約されるものではない。研究の推進力は好奇心だと話していた。頭の中には、つねに地球の気候システムを維持しているもの、変動させているものは何かという問いがあった。

1980年代には、過去に氷期と間氷期を繰り返した原因を突き止めようとしていた。その頃、氷床の掘削などで、気温が低い時代に二酸化炭素濃度が低いことがわかっていった。太陽と地球の軌道による日射量の変化（天文要素）が重要だという説もあり、何が原因か謎だった。真鍋さんは、気候モデルに氷床を組み込んでシミュレーションを行い、天文要素や二酸化炭素濃度よりも、大きな氷床ができることが気温を低下させる影響が大きいと突き止めた。しかし、そもそも氷床ができたのはなぜかという謎が残った。当時のコンピューターの計算速度では、それ以上はむずかしく、真鍋さんはしきりに「不思議だ」と言っていた。

阿部さんは、学生時代に米国で真鍋さんにインタビューして、その話を聞き、「残されている問題があるなら解きたい」と思ったという。それから20年以上か

かったが、阿部さんのチームは氷床と気候のシミュレーションを完成させ、天文要素を要因として、気候、氷床、二酸化炭素濃度が相互に影響しあっている可能性を示した。「(真鍋さんに)基本的なことを教えてもらっていたから、独自の工夫を思いつくことができた」

学生だった阿部さんは、真鍋さんから聞いた「これからは、過去の地球と惑星のシミュレーションが面白くなる」という言葉も胸に刻んだ。機会があれば研究仲間や後輩を訪ね、熱心に研究の内容を聞き、笑顔で励ます真鍋さんの姿も見てきた。阿部さんは言う。「過去の様々な時代の地球も地球に似た惑星もそして地球の未来についても、日本の気候モデルによる研究を発展させ、期待にこたえたい」



真鍋さんのノーベル物理学賞受賞決定を祝って母校の三島高校書道部の部員たちがしたための書 = 2021年10月9日、愛媛県四国中央市

ノーベル賞が決まった後の会見で真鍋さんは、「私が最も興味を持っているのは、古代の気候がどう変化してきたかです。研究の一線から退いた後、気候の変化にともなって生物がどう進化したのかそしてその生物が気候にどのように作用するのか調べ始めたところです」と答えている。

真鍋さんは、今も好奇心に支えられ、大きな謎を見据えている。【論】