

お天気よもやま話（10・2・20）

山 元 龍三郎（昭23・理）

一 はじめに

三高同期の松浦菊男さんから昨年十一月に、大阪での三高舎密クラブ例会でやさしい話をしてほしいとの要請があり、お引き受けすることにしました。これには次のような経緯がありました。昨年六月に開催された戦後在籍三高会の席上で、松浦さんが私たちと同期の小谷壽君に講演依頼をされる際に偶々私は傍に居合わせました。もし小谷君が駄目な場合には、私が引き受けてもよいと松浦さんに耳打ちしましたが、小谷君が引き受けたのでその場では私は引き受けなくてすみしました。それから約三月後に、約束の講演を果たさずに小谷壽君が逝去されました。私がこの席で皆様にお話することは小谷君の代役であり、彼ほど魅力あるお話ができないのではないかと懸念しております。

松浦さんのご希望にそって、わかりやすく、かつ、出席の多くの方が興味を持たれるような話題を選ぶことは容易なことではありません。まして、二十年近く前に大学を定年退官して研究の第一線から退いた私にとって、難問です。しかし、京都大学で気象学や気候変動の研究・教育に携わってきた経験を基に、お天気に関連したお話をさせて頂くことにしましたので、何卒よろしくお願い申し上げます。

二 季節変化を引き起こす地球回転

春夏秋冬の季節の移ろいは、私たちの日々の暮らしや文化に大きい影響を与えています。季節変化をもたらしている基本的要因は地球の回転特性であります。米国の報道陣がハーバード大学の卒業式場に入って、新卒業生に季節変化の基本的要因を質問しましたところ、正解した新卒業者数は二十%にも達しませんでした。

地球は、一回転二十四時間かけて地軸の周りを自転しながら、一年の間に太陽の周りの軌道に沿って公転しております。地球の赤道面は、公転面に平行ではなく約二十三・四度の角度で傾斜しています。この傾斜角が地球の季節変化の基本的要因であります。この傾斜角のために、公転軌道の位置すなわち月日によって、特定の地点での正午の太陽光線の

地表面に降り注ぐ角度が変わります。季節によつて、真上近くから降り注ぐかそれとも水平線近くから斜めに差し込むか、地表面に降り注ぐ角度が変わります。太陽光線が真上近くから降り注ぐ場合は、斜めから降り注ぐ場合と比較すると、地面に多量の太陽熱が降り注ぎます。その結果、北半球では太陽光線が真上近くから差す夏至の頃には、斜めから差す冬至の頃に比べて明らかに多くの太陽熱が降り注ぐことになり、夏の高温と冬の低温という季節の移ろいが発現することとなります。

一年の間の月日の進行に従つて、正午の太陽が真上にくる緯度がずれます。南中時の太陽の位置は、春分には赤道上空ですが、それ以後北方へ変位し、夏至の日には北回帰線と呼ばれる最北の緯度に達します。この緯度は上述の傾斜角と同じ値ですから、北回帰線では夏至の日の正午に太陽は真上に位置し、それと対照的に、南回帰線では冬至の正午に太陽が真上に位置します。

明治四十一年（一九〇八年）に北回帰線上に建設された塔が台湾中部にあり、北緯三十三度二十七分四・五一秒という緯度が刻まれています。その塔の建設後約九十年が経過した時点では、北回帰線が約1km（緯度の角度で表すと、約三十二・五秒）だけ赤道方向に変位していました。これは、地球の赤道面と公転軌道面との間の傾斜角度が毎年平均して約0・三六秒の割合で小さくなってきたことに相当します。もしもこの傾向が約二十三万

年も続くと仮定しますと、問題の傾斜角がゼロになると計算されます。この場合には、太陽は一年中常に赤道上空にあり、地球上の各地点では南中時の太陽熱は一年中同じ入射角で降り注ぎ、ほぼ同じ強さの太陽熱を受けることになります。そのために季節変化が起らないことになります。

地球の回転特性が年代によってどのように変化するかについては、ミランコビッチというセルビアの天文学者が、地球に対する太陽系の他の惑星からの引力の影響を考慮して計算しました。その結果の概略は次の通りであります。「公転面に対する赤道面の傾斜角度は、約四十一万年の周期で約二十二・五度と約二十四・五度の間で変化する」。これによりますと、傾斜角がゼロになることはなく、したがって季節変化が絶えることはありません。ミランコビッチは、傾斜角の変化の他に、公転軌道の離心率や歳差運動の変化についても計算しておりますが、季節変化に対するこれらの寄与は傾斜角の変化に比べて非常に小さいという結果です。

熱帯は、赤道を中心にして南北両回帰線で囲まれた緯度帯を指します。傾斜角が約二十三・四度の現在では、熱帯の緯度幅は約四十七度であり、その長さは約五千二百kmです。ミランコビッチの計算によりますと、約一万年後には熱帯は南北両半球でそれぞれ約百km縮小することとなります。

三 長期天気予報の壁―バタフライ効果

天気に関連した話題の中で、予報の精度や信頼度には高い関心が向けられています。天気や気候など大気現象の予測問題は、二種類に分けられます。数学的に初期値問題に属する天気予報と境界値問題に属する気候予測の二種類です。天気予報では、今日の状況を出発点、すなわち、初期値として明日・明後日や一週間後または一カ月後の天気の時間的変化をたどって行きます。それに対して、境界値問題の気候予測では、大気を取り巻く環境の変化と平衡する平均的な気候を予測します。ここでは、前者の初期値問題の天気予報に集中してお話をすすめます。

注意報や警報が災害発生の懸念される場合に発表されることがありますが、ふつう気象庁から発表される天気予報として、次の三つがあります…

①天気予報…今日、明日、明後日の天気の子報、

②週間予報…翌日から七日先までの天気の子報、

③季節予報…一カ月先および三カ月先までのおおよその天候の特徴予測

気象庁は天気予報の精度について次のような結果を報告しています。それは、夕方発表の明日の降水（有無）予報と明朝の最低気温の予報について、東京地方での過去約六〇年

間の成績です。降水の有無に関する的中率は、一九五〇年代の高々七十五%だったのに比べて最近は一八十五%を超えています。最低気温の予報誤差も、一九五〇年代では平均約二・二℃でしたが、一九九〇年代には約一・四℃に縮小しました。このような予報成績を向上させた主な原因は、いわゆる数値天気予報の導入とその技術の高度化であり、その他にコンピュータの性能向上や観測（レーダーや人工衛星など）データの充実なども寄与しています。

さて、話題を数値天気予報に向けます。天気変化を支配しているのは、もちろん風神・雷神ではなく物理法則であります。今日の天気は、昨日の大気状態から物理法則に従って変化したものであり、今日の大気状態から物理法則に則って変化した結果が明日の天気として実現します。今日の大気状態を出発点として、物理法則を表す方程式をコンピュータで数値的に解き、二十四時間後や四十八時間後の答えとして明日や明後日の天気が予測されます。予報官の経験に基づく昔の類似法に取って代わった数値天気予報技術が予報精度の向上をもたらしました。

私がここでお話したいのは、明日や明後日の天気の予報ではなく、一週間以上先を予報するいわゆる延長天気予報の問題です。日々の天気予報がテレビで報じられる時、示される予報期間はせいぜい七日先までです。予報期間を七日先までに制約している主な理由は、

大気現象がカオス（混沌）として振舞っていることであり、それが七日程度以上の長期予報の壁を作っているのです。

信頼できる延長天気予報技術が実現して、五十日や百日先の日々の天気を明日の天気予報に近い信頼性をもって予報できれば、我々の日々の生活のみならず、人間社会の多くの側面が飛躍的に改善されることは明らかです。しかし、天気変化をもたらす大気の物理過程はカオスとして振舞っており、それによるバタフライ効果と呼ばれる阻害要因が延長予報の精度向上を妨げています。その結果、予報可能性に限界が生じて、十日程度以上先の数値天気予報が極めて困難なのです。

バタフライ効果は、米国のマサチューセッツ工科大学のエドワード・ロレンツ教授が一九六〇年代発見したものです。彼は、これに関連した研究により、京セラの稲盛財団による京都賞を一九九一年の基礎科学部門で受賞しております。

ある大気状態を初期値としてコンピュータで計算した時間経過と、ごく僅かの差異のある初期値から出発して計算した場合の変化経過を、ロレンツ教授は比較しました。両者の差異は、一週間程度の予報期間ではごく僅かなものでしたが、一週間程度以上経過した後では、両者の間の差異は突如として大きくかつ不規則になりました。彼は、アマゾンの森林の中の一匹のバタフライが葉っぱに止まっているかそれとも葉っぱから飛び立って羽

をばたばたさせているかという僅かな初期値の差異によって、テキサス州に竜巻が発生するかどうかというような著しく異なる計算結果が生じるので、バタフライ効果と命名しました。ロレンツ教授のこの命名から、初期値にごく僅かの差異が存在するために、両者の時間経過が一週間程度以内ではほとんど一致しているのに、その期間を過ぎると両者の計算結果の差異が突如大きく不規則になる状況が、バタフライ効果と呼ばれているのです。

日本付近の天気の時経過を予測するための初期値として、太平洋のど真ん中や南極や北極地方を含めて、地球全体での大気状態のデータの分布などが必要です。しかし、太平洋などでは気象観測所のない海域も広く、ハワイなどの島での観測データから洋上の値を推測して、初期値の分布を設定します。初期値の推測過程で、人工衛星のデータを取り入れても、設定データの多少の曖昧さは免れません。

この設定誤差程度の差異をもつ二組の初期値について予測計算を進めると、次のようにバタフライ効果が現れます。一週間以内の予報については、二組の計算結果の差異は識別できないほど全く軽微ですので、予報値は問題なく決定できます。他方、一週間以上先の計算では両者の間の差異は大きく不規則にばらついていきますので、いずれの値を予報値として採用したらよいかの判断基準がなく、このままでは予報不可能となります。

このバタフライ効果をもたらす原因は、大気の運動や状態変化を支配する方程式の非線

形性であることが知られています。大気の変化は明らかに非線形的です。例えば、風の時間的变化を規定する方程式では風速そのものと風速分布とを掛け算したものが含まれていますので、明らかに大気運動は非線形的現象です。気圧や温度などの天気の要素を決定する方程式も非線形性ですので、その結果、一週間程度以上先の数値天気予報では、バタフライ効果は免れることができません。延長天気予報の前に立ちはだかるこのようなバタフライ効果の克服が、国際的にも最重要問題の一つであります。

バタフライ効果に関連して、私の記憶に甦る約六十年前の光景があります。それは、大学を卒業して間もない私が、一九五〇年代前半の日本気象学会の会合に初めて参加した時のことです。気象庁の新進気鋭の予報官が「初期条件が同じであっても、必ずしも同じ結果にはならない」と発言したことが発端でした。数値天気予報以前の予報は主として類似法に基づいており、その経験を集約した予報官の発言でありました。それを聞いた血氣盛んな東大教授が「その発言は力学の基本から逸脱しており、絶対に認められないので、取り消すべきだ」と詰め寄りましたが、予報官は自分の経験事実だとして譲りませんでした。両者は妥協することなく、横で聞いていた私には感情的な激論のようにも受け取れた光景でした。

これはロレンツ教授の発見の約十年前のことでありました。後年、一九九一年にロレン

ツ教授の京都賞受賞選考に關係した私にとって、上記の激論がもう少し冷静な雰囲気に進められたら、バタフライ効果が日本で誕生したかも知れないとの思いが浮かびました。非線形システムの奇妙な振る舞いは、すでに十九世紀末にフランスの数学者ポアンカレにより注目されていました。もしも、予報官の発言が「初期条件が類似している場合でも、必ずしも類似した結果にならない」であり、そして、東大教授が予報官の経験内容に耳を傾ける寛容さを持ち合わせておれば、バタフライ効果発見が日本で展開されたかもしれないと思います。この光景で見られた東大教授の權威主義は、京大に比べて東大のノーベル賞の物理学・化学・生理医学の受賞者数が少ないことにも關係しているのかもしれませんが。

延長天気予報の実施の壁となっているバタフライ効果を克服する一つの方策として、予報の現場で取り上げられているのがアンサンブル予報と呼ばれる手法です。初期値分布のごく僅かだけ異なった場合の数十例について予報計算をします。同じ予報日の数十例の計算値をアンサンブル平均したのを予報値として採用しようとの魂胆です。計算結果が不規則にばらつく状況では、実現確率の高い場合としてこのようなアンサンブル平均値を採用しようとするのは、自然の流れであります。アンサンブル予報結果と実現した天気変化を対比しますと、第一週までは予報と実況との一致は充分ですが、多くの例では第二週以降の不一致が見られます。合理的だとして大きい期待の寄せられたアンサンブル予報は、

まだまだ改善の余地があり、世界の関係者は努力しているのが現状です。

四 台風活動のトレンド

五千人以上の犠牲者を出した伊勢湾台風襲来から、昨年で五十年が経過しました。集中豪雨などと共に台風による災害の防止・軽減対策は、社会の重要課題の一つです。日本付近の台風と同種の熱帯性低気圧は、北太平洋東部と大西洋のものはハリケーン、インド洋や南太平洋のものはサイクロンと呼ばれています。これらの熱帯性低気圧の活動の推移は国際的にも重大関心事です。

台風などの熱帯性低気圧の発生は、海面水温が 26°C 以上の熱帯海洋上に限られていて、熱帯でも南米西岸沖のように 26°C 以下の低温海域では発生していません。この事実は、台風などの発生に海面水温が大きく関与していることを示唆しています。全世界の海洋の海面水温は、過去百年間に 0.43°C から 0.72°C 上昇してきました。この変化は、主に地球温暖化に伴うものと考えられ、この地球温暖化に伴って熱帯性低気圧の活動に何らかの変化が起きているのではないかと想像されます。

過去半世紀の間の日本付近の台風の動向は、集約すると次の通りです。発生数は、年に

よつて大きく異なり、年間十六個ないし三十九個の範囲で変化していますが、長期的なトレンドは見られません。台風の間接近数（我が国の本土に三百km以内）も二個ないし十二個の範囲で年々変化していますが、系統的なトレンドは認められません。本土上陸数については、二〇〇四年の十個がずば抜けていますが、多くの年の上陸数は六個以下です。一九八〇年代末から一九九〇年代にかけて一時的に上陸数の増加傾向が見られましたが、その後、低い値に落ち着く気配が見られ、これらのデータでは温暖化に伴う明白な長期トレンドとは認められません。

ここで、台風などの発生・維持のメカニズムに関する学説を概観してみましよう。長年、熱帯性低気圧の研究に打ち込んできたコロラド州立大学のグレイ教授らは、その発生・発達に必要な条件として次のことを指摘していました。

- (一) 海面水温が二十六℃以上（熱と水蒸気との大気への十分な補給に必要）
- (二) 赤道から緯度五度以上離れていること（渦巻の補給に必要）
- (三) 鉛直方向に条件付き不安定（対流の促進に必要）
- (四) 風の鉛直方向の変化が小さいこと（渦巻きの軸対象構造の保持に必要）
- (五) 中部対流圏の高湿度（台風眼を取り巻く雲の壁の成長に必要）
- (六) 下層に渦が存在すること（台風などに成長する卵として必要）

このような必要条件をまとめたコロラド学派は、地球温暖化が進行しても、それ以外の様々な条件が満たされる必要があるので、ハリケーン活動が直ちに活発化するとは言えないと主張しました。

他方、マサチューセッツ工科大学のエマニュエル教授は一九八〇年代後半に、熱機関説を提唱しました。その説の骨子は、温度の高い下層大気で加熱され、上層に位置する低温の雲頂で冷却されているので、典型的な熱機関だとの主張です。彼の説の詳細は次の四項目にまとめられます・・

(一) 大気は、高温域（下層大気）で加熱され、低温域（上層大気）で冷却されているので本質的に熱機関

(二) 作動する熱機関として、大気は摩擦に抗して強風を維持

(三) 海面水温の上昇はハリケーンを活発化

(四) 海面水温の 2°C の上昇は最大風速を約 10 m/s 増強し、中心気圧を約 25 hPa 低下
そしてエマニュエル教授は、ハリケーン活動に対する地球温暖化の影響は顕著なものと主張しました。

このようなエマニュエル教授の主張に関して、コロラドグループは世の中を惑わすものだとし、激しく非難しました。この非難の一つの根拠とされたのは、熱帯性低気圧の勢力と海

面水温との相関の程度を確かめるために行われた統計調査です。北太平洋東部や北大西洋のハリケーンに関する結果は、海面水温とハリケーンの勢力との関連が明白でないことを示すものでした。

しかし、海水温度と台風の勢力との関係について慎重な検討の必要性を示す事実があります。その一例が、日本の南方海上に設置されていた海洋気象ブイロボットによる観測データであります。一九九七年七月、台風が遠く離れている間の海面水温は約二十八℃で、水面下五十メートルの水温は二十三℃程度でした。台風接近と共に海水が攪拌されて海面水温が二十四℃に低下して水深五十メートルの温度とほとんど同じになりました。その頃を境に台風の勢力が衰え始めました。この事実は、台風の勢力維持には表面水温だけではなく、ある程度深い水深までの温度までが台風強度に関係することを示しています。

海面下の水温分布について、水温躍層と呼ばれる水深数十メートルないし数百メートルのところでは急に水温が低くなっています。たとえば海面水温が高くても、強風による攪拌範囲に低温層が含まれておれば、攪拌により海面水温は低くなります。その結果、台風に十分な熱エネルギーを供給できなくなるので、台風の勢力は衰退することになります。他方、もしも攪拌範囲の水温が海面と同程度であれば、攪拌されて海面水温は低下しないので、台風への熱エネルギーの供給は十分であり、台風の勢力が強いまま維持されることになり

ます。

このような状況を間接的に支持する統計結果があります。海面水温の値毎に多くの台風
の勢力の統計分布が示されています。パーセントイルが五十%の線が水温にほとんど関係
しないことが認められます。多くのハリケーンの中の半分程度では、台風襲来以前の海面
水温が高くて、台風襲来時の攪拌のために海面水温が低下して、台風に十分な熱エネ
ルギーが与えられなくなり、台風が発達しないというシナリオが成り立ちます。他方、水深
数十メートルの水温も海面同様に高ければ、攪拌があっても海面温度の低下は少なく、台
風に十分な熱エネルギーが与えられて、その強い勢力が維持ないし発達する可能性があり
ます。このような場合の極端な例がパーセントイル一〇〇%の場合であり、これらの値は
明白に海面水温に関係しています。このような台風勢力のシナリオに従いますと、台風勢
力の予測には、海面温度だけではなく、かなり深い水深までの水温の状況把握が必要にな
ります。

最後に台風の人工制御実験に触れたいと思います。昔の雨乞いではなく、科学的根拠に
基づいた人工降雨実験が、一九四〇年代末に雨滴生成メカニズムが解明されると共に、主
として米国で始められました。この実験手法をハリケーンに適用して、その人工制御のき

っかけを把握しようと米国の科学者たちが試みました。その実験では、飛行機でハリケーンの中へ飛び込んで行って、雲の中にヨウ化銀の微粒子（煙）を注入するのです。

ふつう、高いところまで伸びている雲の中では温度は氷点以下ですが、大部分の雲粒は凍らないで過冷却状態です。過冷却水滴は氷点下四〇℃でも観測されています。このような過冷却雲の中へ氷が、上空から落下するなどして入ってきたとします。すると、氷と水との間の飽和水蒸気圧力の違いにより、氷晶が急成長します。それが大きくなり浮かんでおれなくなつて落下し、地面近くの下層の摂氏〇℃以上の温かい空気層に入ると、融けて水となり雨として地面へ落ちてきます。

雲の中に氷の結晶がない場合には、一般に雨粒が生成されません。過冷却の雲の中にヨウ化銀の煙を吹きこむと過冷却水滴が凍結して氷になります。それが過冷却雲の中で成長・落下して雨が降ることになります。過冷却水滴は介在物に接すると凍結しますが、特にヨウ化銀粒子は結晶構造が氷に似ていることもあって、氷晶化を効率的に起こします。

雲の種まきと呼ばれるこの種の実験では、過冷却水滴が凍結して氷になると水分一グラム当たり約八十カロリーの融解の潜熱が放出されます。ハリケーン内部でこの融解の潜熱が人工的に放出されると、その影響でハリケーンは何らかの反応を見せるだろうというのが、米国の科学者の魂胆でした。彼らは一九六〇年代の初めに、手始めの実験を試みまし

た。米国東岸沖はるか遠くの大西洋を北上中のハリケーンの雲に飛行機からヨウ化銀の微粒子をやみくもにばら撒きました。それまで北の方向に移動していたハリケーンが突如として進路を北西に変えて米国東岸に上陸して大きい被害を与えました。そのほとぼりが冷めるまで米国ではこの種の実験は行われませんでした。

一九六〇年代末になり、ハリケーンに対する実験計画が息を吹き返しました。今回は計画を十分に練り上げて、ハリケーンの強風の弱化を目標としました。ハリケーンの周囲にはらせん状の強雨バンドが取り巻いています。嵐の中では、下層空気が逆時計回りの渦を巻きながら周囲から中心の眼まで吹きこんでいるので、強い風が維持されています。これは、紐の先に石を取り付けてくるくる回しながら、糸の長さを短くすると、角運動量保存則により、回転速度が速くなります。これと同様のメカニズムで台風の強風が維持されています。下層の空気が眼の傍まで水平に流入しないで途中でストップして上昇するようにすれば、風速が十分に強化されなくなりますので、強風は弱まるだろうという魂胆でした。実際の実験において、飛行機でハリケーン域内に侵入し、眼から若干離れた雨雲にヨウ化銀を注入しました。その結果、それまで眼のすぐそばにあった最大強風域が眼から離れたところに移り、最大風速も約三分の一に弱まりました。結果は科学者の描いたシナリオ通りで、実験は成功しましたが、ヨウ化銀の注入終了後数時間経過した時には元の強風が

位置・風速ともに復活してしまいました。気象現象を人間の意図したとおりに制御することの容易ならざる一面を象徴する事件でありました。

五 終わりに

やさしい話をするようにとの世話役からの要望に沿って努力したつもりです。しかし、日頃のメディアでの気象情報で取り上げられないテーマを選んだので、やさしい話になっ
ていなかったのではないかと懸念しています。長時間のご清聴に感謝します。

(京都大学名誉教授)