

5 地球温暖化問題：政治論争化を超えて （前編）

— 温室効果の仕組みから自然要因説まで、科学的論
点を整理する —

永田 雅啓 Masahiro Nagata

（一財）国際貿易投資研究所 客員研究員

埼玉大学名誉教授

麗澤大学経済学部客員教授

要約

地球温暖化は現代の重要な課題だが、近年の論争は科学的議論というより、「CO₂排出抑制に賛成か反対か」という政治的な論争になりやすい。情報発信がキャンペーン化しやすい点は、かつてタバコの健康被害をめぐる議論の構図とも共通する。背景には、パリ協定以降の国際交渉と資金移転（先進国から発展途上国への気候資金）、ESG投資などの非財務情報の重視、排出権取引やカーボンクレジットなどの金融市場化により、巨額の資金が動く現実がある。米国では政権交代で政策が大きく振れ、州ごとの規制の差もあり、企業は長期投資の予見可能性に困難を感じ、さらに環境派・反対派双方からの訴訟リスクも抱える。また、CO₂の最大の排出国である中国が、太陽光パネル・蓄電池・EV（電気自動車）等の最大の供給者である皮肉は、米中対立も絡み、産業覇権・安全保障を含む複合問題となっている。

しかし、政策論争と科学的理解とは別次元である。本稿は地球温暖化問題の焦点を「人為100% vs自然100%」の二項対立ではなく、「現在の温暖化の原因はどこまでが人為か」に絞って設定する。観測上、産業革命以降にCO₂が急増し、同時に平均気温も上昇しているが、並行しているだけでは因果関係の証明にはならない。そこで①温室効果ガス増大の主要因は人間活動か、②CO₂増加は定量的にどれほど地球の平均気温を上昇させるか、③観測された昇温と②とを比較して他要因（自然由来を含む）の寄与をどのように見積もるか、さらに④主要な自然要因説（太陽活動、軌道、メタン放

出など)との整合性を点検する、という枠組みで、専門用語を避けつつ、科学的に明確な点と不確実性とを区別して検討する。

以上是本稿(前編)の概要であるが、後編では、残りの自然的要因(宇宙気候理論(コズモクライメトロロジー)、内部気候変動)の説明と地球史的に代表的な温暖化現象にも触れた後、GCM(全球気候モデル)の信頼性についても検討する。

はじめに

地球温暖化の問題は、現代の我々が直面する最大級の課題の一つである。しかし近年の議論の潮流を見ると、科学的論争というよりも、政治的イデオロギーと結びつき、「CO₂排出の抑制に賛成か反対か」という対立軸、場合によっては「積極的に化石燃料を利用すべし(Drill, baby, drill!)」という強い主張に吸い寄せられ、政治的・感情的な論争になってしまっている側面があるのは残念である。問題が社会の価値観や利害と密接に関わるほど、議論は容易に二極化し、科学的な問いの立て方そのものが見え難くなる。

この点は、経済学の分野にも似た構図がある。例えば「産業空洞化」をめぐる議論では、そもそも産業空洞化が何を指すのかという定義の問題から始まり、「空洞化は心配だ」とする見方がある一方、「空洞化は問題ではなく、むしろ経済発展の一側面だ」とする見方もある。そして、いずれの立場であっても、その立場に整合するデータやエビデンスだけを集めて論証することが可能である。

地球温暖化をめぐる論争も、政治的・経済的利害が巨大であるだけに、同様の構図になりやすい。巨大な利害が絡むと、賛成・反対が政治問題化し、情報発信がキャンペーン化する。気候変動対策を巡っても、「本当に問題は深刻なのか」「対策は過剰ではないか」という懐疑論や、論点ずらしを伴う言説が現れやすくなる。ここで想起されるのが、かつてタバコの健康被害をめぐって展開されたタバコ企業によるキャンペーンである。科学的合意が形成されつつある局面でも、疑念を増幅させ「結論はまだ出ていない」と見せ

ることで行動を遅らせる戦略が取られたという指摘は、温暖化をめぐる社会的対立とも共通点を持つ。

特に巨大石油企業にとって、脱炭素化の進展は事業環境に大きな影響を与え得るため、多額の資金を投じたキャンペーンや広告に加え、政治献金などを通じて政策形成に影響力を行使しようとする動きが指摘されている。さらに、化石燃料企業による著名大学への研究資金提供についても、研究の独立性や利益相反、研究課題の選好（どのテーマが重視されるか）といった点で、社会的な懸念が提起されてきた。例えば、ハーバード大学やスタンフォード大学、プリンストン大学などでは、化石燃料企業からの資金の受け入れをめぐって、基準や方針のあり方が学内で論争となっている。

こうした政治問題化を促す背景には、気候変動問題対策には巨大な資金が伴うという事情がある。パリ協定以降、各国は削減目標を掲げ、一定期間ごとに見直しながら全体として温暖化を抑制する方式を採用してきた。2025年11月のCOP30（ブラジル・ベレン）も、この流れの中で、「約束を実行に移す」圧力を強めようとする会議であった一方、負担配分や化石燃料の扱いを巡る対立がなお色濃いことも示した。国際的には、先進国から発展途上国へ気候資金を供与し、適応や脱炭素投資を支えるという構図が中心に据えられており、制度設計の側面だけ見れば一種の援助形態に近い。しかし実際には、気候資金は技術移転、産業育成、供給網の再編、市場獲得と不可分であり、誰が負担し、誰が利益を得るのかという政治経済の問題が、交渉議題の内部に組み込まれている。

ビジネスの側面でも、気候変動問題は中心課題になった。ESG投資を含む非財務情報の重視が広がり、資金調達コスト、規制対応、評判リスク、供給網の安定といった観点から、企業は脱炭素化や排出管理に向かわざるを得なくなっている。金融面では、排出権取引やカーボンクレジット等の市場が形成され、こうした新たな金融商品の誕生は金融界にとってビジネスチャンスにもなる。ただし、この流れは同時に反動も生む。

特に米国では政権交代により温暖化対策の政策の方向性が大きくぶれやすく、州による規制の差も大きい。実際、ジョー・バイデン政権からドナル

ド・トランプ政権になると、その環境政策は逆転し、環境保護局（EPA）の長官に環境保護関連法案の多くに反対票を投じてきたリー・ゼルディン元下院議員（共和党）を指名した。さらに、2025年9月23日の国連総会演説で気候変動問題に対して「私の考えでは、これは、世界に対して仕掛けられた史上最大のペテンだ（It's the greatest con job ever perpetrated on the world, in my opinion.）」とトランプ大統領自身が発言している。その結果、企業は長期投資の前提となる規制の予見可能性を確保しにくく、さらに情報開示や広告表現をめぐり、環境保護派、反対派の双方からの訴訟リスクに晒されることになる。こうした政治・経済の振れ幅が、科学的議論を「陣営論」に変えてしまう土壌にもなっている。

国際政治の絡みもこの問題を複雑にする。最大のCO₂排出国である中国が、太陽光、蓄電池、風力、EVといった再生可能エネルギーへの転換を支える産業で最大の供給者になっているという事実は、しばしば皮肉として語られる。ここに米中対立や通商政策が絡むことで、脱炭素は「温暖化対策の政策」であると同時に「産業覇権と安全保障」の問題として争点化しやすくなる。すなわち、気候変動問題は、環境・科学だけでなく、資金、産業、安全保障が交差する複合問題に変質してきているのである。

ただし、ここで注意すべきは、政策をめぐる政治的な賛否と、温暖化の科学的理解とは、同じ次元の議論ではないという点である。専門家による科学的議論は、観測、物理法則、数値モデル、過去気候の復元などを通じて一定程度まで明確になっている点がある一方で、不確実性や未解明な点も残る。しかし、その議論は専門用語を多く含み、専門外の人にとって分かりにくいことも事実である。結果として、科学の論点に到達する前に、政治的立場だけが先に固定されてしまうことが起こりやすい。

そこで本稿では、こうした状況を踏まえつつ、焦点をいったん「科学として何がどこまで分かっているのか、あるいは分かっていないのか」に戻し、「現在の地球温暖化の原因は人間の活動によるものなのか」という問いに絞って検討してみたい。地球温暖化の理由について、人為以外の自然的現象とする強い意見があることも、地球史の中で過去に大きな気温変化があったこ

とも承知している。しかし「人為100% vs 自然現象100%」という問いを立てること自体が、しばしば政治論争を呼び込みやすい。科学的な態度としては、「現在の温暖化のどこまでが人為によるもので、どこまでが自然要因によるものか」という問いを立て、観測と理論の両面から検討することが望ましい。本稿は、その方向で論を進める。

観測事実として、あるいは信頼できる推測としてはっきりしているのは、「産業革命以降（概ね1750年以降）、CO₂が急増していること」、そして「同期間に地球全体の平均気温が上昇していること」である。ただし、これらの事実が並行していることから、直ちに両者の間に直接的な因果関係があると断定することはできない。そこで本稿では、次の四つの問いを柱として論を組み立てる。

- ① 最近のCO₂を含む温室効果ガス増大の主要な原因は、人間の活動によるものと言って良いのか。
- ② CO₂を含む温室効果ガスの増大によって、定量的に地球の平均気温をどの程度上昇させるのか。
- ③ 観測される地球の平均気温の上昇と②の検討結果とを比較し、温室効果ガス以外の要因（自然由来を含む）による気温変化がどの程度か。

さらに、④主要な自然要因による地球温暖化の影響がどの程度か、を個別に検討し、③の結論との整合性をチェックする。

以上の構成に基づき、本稿は、専門用語をできるだけ避け、平易な言葉で、専門家でない人にも理解しやすいように、すでに明確になっている点と、未解明・不確実な点とを区別しながら解説・検討していきたい。政治やビジネスが複雑に絡み合い、議論が分極化しやすい時代であるからこそ、まずは「問いの立て方」を科学の側に引き戻し、論点を整理することに、本稿の意義があると考ええる。

1. 最近の温室効果ガスの増大の主因は人間の活動か

「人間の活動によって大気中のCO₂が増える」という現象は、箱の中に

CO₂を吹き込んで、箱の中のCO₂がどれだけ増えるか、といった単純なものではない。実は、人間が化石燃料を燃やして発生させるより、はるかに大量のCO₂が自然状態で発生し、同時に大量のCO₂が地球に吸収されており、その均衡として現在のCO₂の濃度（420 ppm=0.042%）が保たれている。

自然の発生源としては、動植物の呼吸、微生物による有機物の分解、温暖な海域での海面から大気への放出、森林火災・焼き畑、火山活動などがある。一方、吸収源としては、地上植物の光合成、海洋の吸収（炭酸イオン、植物プランクトンによる光合成、炭酸カルシウムとしての固定）、有機炭素として土壤中に固定などがある。

ここへ化石燃料の燃焼などの人間活動によるCO₂が加わると、新たな均衡に向かって動くわけだが、排出量の約55%は何らかの形で地球に吸収され、残り45%が大気中に残ると推計されている。このようにして、過去のCO₂の増加分140ppm（1750年の280 ppm→近年の420 ppm前後）のうち、多くの部分は人間の活動に直接伴うものだが、実際はもう少し細かく見る必要がある。例えば、

- ① 海洋温度の上昇に伴いCO₂の吸収力が落ちる効果、
- ② 森林火災の多発によるCO₂の排出増と吸収力の低下、
- ③ 高温化に伴う永久凍土・湿地からの炭素放出増加、
- ④ 火山活動の活発化による排出増、

などがある。比率で見ると、人間活動で直接排出される量が85～90%、①～④を併せて10～15%と推計されている。④については無視しうるレベルだが、①～③は地球温暖化に伴う副次効果である。仮に地球温暖化の原因が100%人間活動以外だと仮定しても、現在のCO₂の増大の大部分（85～90%）は人間由来ということになる。

同様の推計をCO₂以外の主な温室効果ガスについて見てみると、メタンや二酸化窒素は65～70%が人の活動に由来し、フロン類はもちろん100%が人為的な起源である。

2. CO₂を含む温室効果ガスの増大は、地球の平均気温をどの程度上昇させるのか

そもそも、地球温暖化現象の主因がCO₂だとすると、これは物理現象のため、CO₂が大気をどの程度、温暖化するかは科学的・理論的に分かるはずである。また、実験的にも、特定波長の赤外線をCO₂を含む空気に当てて、どの程度のエネルギー吸収があるかは実験室で定量的に計測できる。したがって、あまり論争する余地などないようにも見える。しかし、以下に示すように、温暖化の推計のプロセスは、それほど単純ではない。

(1) CO₂が気温を上昇させるメカニズム

まず、CO₂が地球の温度を上昇させるメカニズムであるが、これは、CO₂が波長に対して“非対称なフィルター”となって、太陽からの光は通過させるが、地表が放射する赤外線の一部を吸収・再放射するために起きる現象である。

もう少し詳しく説明すると、太陽光は主に可視光（0.4～0.7 μm）と近赤外線（0.7～2 μm）に集中している。これらの波長の光に対してCO₂はほとんど反応しないため、大気を通過して地表を温める。地表は吸収したエネルギーを赤外線（波長4～100 μm、特に8～14 μm付近）として宇宙へ放射する。一方、CO₂は波長4.3 μmと15 μm付近の「長波赤外線」をよく吸収する。CO₂分子はこの赤外線を吸収すると励起状態となり、やがて同じ波長の赤外線を全方向に放出する。そのため、宇宙に逃げるはずの赤外線の一部が再び地表に戻され、熱がこもる。これがCO₂が気温を上昇させるメカニズムである。

(2) CO₂のフィルター効果によって、どの程度エネルギーが蓄えられるのか

CO₂によって、どれだけ余分な熱（エネルギー）が地球に滞留するか（放射強制力：1 m²あたりのワット数）は、理論的にも実験的にも高い精度で求

められている。この滞留する熱量の大きさは、CO₂が吸収する赤外線の波長帯だけでなく、CO₂濃度、気温、湿度、雲やエアロゾルなどの大気条件によっても変化する。これらの関係は、実験室レベルの分光測定と、大気放射モデル（赤外線が大気中でどのように吸収・放射されるかを計算する物理モデル）によって高い精度で明らかにされている。

上で得られたデータをもとに、地球全体でどれだけの熱エネルギーが蓄積されるかを計算するのが、LBL法（ライン・バイ・ライン法：Line-by-Line method）である。これは、大気中にあるCO₂や他の温室効果ガスの吸収線（Line：波長）ごとのデータを積み上げて、光が大気を通る際にどれだけのエネルギーが吸収・放射されるかを求める方法である。さらに大気をいくつかの層（layer）に分け、各層ごとの温度・圧力・組成を入力し、層ごとの放射と吸収のバランスを計算する。層間の相互作用も考慮して積み上げることで、大気全体としてどれだけの熱エネルギーが吸収・放出されるかを精密に算出できる。ただし、実際の大気は常に動いており、LBL法では時間変化や循環を直接扱えない。その役割を担うのが、次に述べるGCM（全球気候モデル）である。

ここまでのステップは、物理現象としてかなり精密に求めることができる。

（3）GCMによるCO₂の地球温暖化効果のシミュレーション

さて、こうした放射強制力の計算結果を使って、実際に地球の温度がどの程度上昇するかを推計するのが「全球気候モデル（Global Climate Model, GCM）」である。GCMは、地球という巨大な“流体の惑星”をコンピュータの中に再現し、気温・風・雲・雨・海流などがどのように動くかを計算する。地球を小さな格子に分け、各格子に温度・湿度・放射などのデータを与え、物理法則（運動方程式・熱力学・放射伝達式など）に基づいて時間発展を繰り返す。また、CO₂排出量やエアロゾル量を変えて、気候の変化をシミュレーションする。

現在のGCMでは、大気・海洋・陸地・氷床・炭素循環などをすべて含む

「地球システムモデル」として開発が進められ、日本の代表的なGCMは、気象庁・気象研究所のMRI-ESM（Earth System Model）と理化学研究所のMIROC（Model for Interdisciplinary Research on Climate）で、いずれもIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の公式モデル群に参加している。これらのモデルは、富士通のスーパーコンピューター「富岳」などを用いて高精度なシミュレーションを行っている。

（4）人為的活動によって地球の温度はどの程度上昇するか

GCMでは、LBL法で求めた放射強制力を基礎データとして、人為的な気候影響をシミュレーションする。人為的な要因には、昇温効果（温室効果ガス）と冷却効果（エアロゾルなど）の両方がある。したがって、

人為的純昇温効果 = （温室効果ガスによる昇温）－（エアロゾルなどによる冷却）

となる。これらの影響には幅があり、雲や地表の反射率など地域的条件に左右されるため、推定には一定の不確実性がある。IPCC第6次評価報告書によれば、（基準：1850～1900→評価期間：2010～2019）における推計は以下のとおりである（IPCC（2023））。

- ・温室効果ガスによる昇温効果：+1.0～+2.0℃
- ・エアロゾルなどによる冷却効果：▲0.8～0.0℃

この数字をベースに、これらの分布確率を合成して人為的純昇温効果を計算すると、+0.8～+1.3℃となる。この期間の地球全体の実際の観測昇温の推計値は、+0.98～+1.20℃である。ここから言えることは、「観測された昇温効果は、人為的純昇温効果でほぼ説明できる。両者の違いは統計的不確実性（誤差）の範囲に収まる」ということである。

しかし、ここで大切なのは、「人為的純昇温効果で合理的に説明できる」

という命題は、必ずしも「人為的以外の要因（自然的要因）による昇温効果はない」という証明にはならないということである。（人為的純昇温効果と観測昇温とは、それぞれ一定の幅を持っているので、組み合わせによっては、ある程度の差が生まれる）。したがって、自然的要因による昇温効果は地球温暖化に一定の影響を持つ可能性がある。つまり、地球温暖化は、人為的要因と自然的要因が重なり合っていると考えられるのである。

しかし、それにも拘わらず、IPCCを含む多くの科学者のコンセンサスは「地球温暖化の主因は人為的要因である。」というものである。つまり、理論的には自然的要因も考えられるが、他の独立した分析からは、自然要因と内部変動（海流などのエネルギー循環による揺らぎ）の影響は小さく、主たる要因とは言えない（IPCCによれば、それぞれおおむね $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 及び $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 程度）というものである。

なぜ、そうしたことが言えるのか。以下では、次の2点から検討してみたいと思う。第1は「自然的要因が主因でないと考える根拠は何か」である。第2は「GCMによる人為的昇温効果の推計値はどの程度、信頼できるのか」で、これは後編で扱う。

3. 自然的要因の諸説

最近の地球温暖化（＝地球規模での気温上昇・気候変動）の原因として、「CO₂以外の自然的要因によって起きている、あるいは、起きている可能性がある」という説は複数存在する。主なものとして、①太陽活動の変動説、②地球軌道変動説、③自然の温室効果ガス排出（メタン大量放出）、④宇宙線・雲変動メカニズム（コズモクライメトロジー）、⑤海洋変動・内部気候システム変化（例えばエルニーニョ／ラニーニャ、海流変化）説、などがある。以下では、この代表的な五つの自然的要因説（非CO₂／自然変動）について、順番に検討してみたいと考える（紙面の都合で、前編では③自然の温室効果ガス排出（メタン大量放出）までを扱う。④以降は後編）。

先に結論を言うと「こうした自然変動が、過去に気候を大きく変えてきた

ことは間違いないが、産業革命以降の気温の上昇、特に20世紀後半以降の気温上昇をこれらの自然的要因だけで説明するのは困難」ということである。別の言い方をすると、「これらの自然的要因が一定の影響を及ぼす可能性は否定できないが、これらが現在の地球温暖化の主因だと仮定すると、観測事実との間に矛盾が生じる」ということである。

（1）太陽活動変動説

この説は、分かりやすいためか、比較的、人気のある説だと思われる。歴史も古く、1801年には、William Herschelが、「太陽黒点数と穀物価格（寒暖）とが関係している」とするアイディアを最初に発表している（Herschel（1801））。統計的根拠は弱いのであるが、発想の起点になった。その後、20世紀の前半頃まで「太陽活動が地球気候を左右する」という説がいくつか出たが、当時は観測技術も理論も未成熟のため、実証の裏付けはなかった。1950～80年代には、太陽黒点の約11年周期と地球の10年程度の周期的変動との相関を分析する研究が盛んであった。その中で、John A. Eddy（1976）による主に歴史的黒点観測記録とオーロラ記録を基に17世紀の太陽活動と小氷期の関連を指摘した研究が注目を集める。少し説明すると、17世紀後半（1645～1715年頃）には黒点がほとんどない時期（マウンダー極小期）が続き、当時、ヨーロッパ等では小氷期を経験したことから、この二つを結び付けたものである。その後、Stuiver（1980）、Damon & Sonett（1991）らが ^{14}C 、 ^{10}Be 解析を用いた研究によって太陽光の活動変化を裏付ける。これは、太陽活動の結果、大気中の ^{14}C 、 ^{10}Be が変動するため、これを利用して太陽活動の過去の変動を推測することができるのである。 ^{14}C は主に年輪から、 ^{10}Be は南極などの雪や水中にエアロゾルとして沈着した粒子から測定することが可能である。

そして、1990年代以降は、太陽活動の影響を定量的に捉える研究が中心になってきた。例えば、マックス・プランク研究所のS. K. Solankiは、 ^{14}C データを使って長期の太陽活動（磁気活動）を再評価し、「過去1万1400年間に於いて、直近数十年間（約70年）における太陽活動水準は極めて高かった。

過去の同等レベルの活動は約8,000年以上前にしか起きていなかった。」と結論している（Solanki et al. (2004)）。しかし、Solankiは同時に「過去30年間に見られた強い温暖化の主要な原因が太陽活動の変動であるとは考えにくい」と明確に述べている（Solanki & Krivova (2003)）。そして、以下に述べるように、これが現在の主流の科学者のコンセンサスでもある。

まず、太陽黒点の約11年周期は明確に存在するのであるが、この短期変動によっては、産業革命以降の長期の上昇を説明できない。また、17世紀のヨーロッパ等の小氷期は、マウンダー極小期だけでなく、火山活動が活発な時期とも重なり、火山から噴出した塵が成層圏に到達して寒冷化した要因も大きかったとされている。太陽活動だけが原因なら、地球全体が寒冷化するはずであるが、小氷期は主として北半球に起きた現象であった。

さて、Solankiの主張であるが、彼は次の諸点を挙げている。

- ・タイミングが合わない。「太陽指標と気温の時系列は1985年頃まで一致するが、その後は乖離する」と述べている（Solanki & Krivova (2003)）。実際、1978年以降は人工衛星で太陽活動（全太陽放射）は精密に観測されているが、ほとんど変化していないか、むしろわずかに弱まっている（約11年周期による $\pm 0.1\%$ 程度の変動が見られるだけ）。一方、この期間も地球の温暖化は継続し、最近はむしろ加速気味である。太陽活動主因説は、こうした観測事実と反するのである。

- ・エネルギーレベルの不足。Solanki et al. (2013) では、次のように記されている。「マウンダー極小期と現在との間の全太陽放射の差について、妥当と考えられる推定値は $0.8 \sim 3.0 \text{ W/m}^2$ の範囲にあると思われる。これは、17世紀以来、太陽活動によってもたらされた全球的な気温上昇が $0.08 \sim 0.30^\circ\text{C}$ の範囲に収まることを示唆している。」つまり、太陽活動が極端に低下した17世紀のマウンダー極小期と比較してもこの程度であり、太陽活動の長期的な変化だけでは、現在の気温上昇を説明するには力不足だということである。

なお、太陽活動変動説には、太陽活動の衛星観測が始まる前の1970年代以前の長期変動がもっと大きかったという仮説（太陽放射の長期変動大（high）仮説、太陽活動主因説）、つまり、18世紀や19世紀には活動が現在

よりも低く、現在の地球温暖化には太陽活動の活発化で説明できるという仮説もある（Shapiro et al. (2011)、Scafetta & West (2006)）。ただし、太陽活動が地球温暖化の主因だと主張するためには、単に平均気温が上昇したという事実だけでなく、温暖化の“クセ”、つまり、温暖化は均一に温まるのではなく、「夜の方が温まりやすい、冬や高緯度（特に北極域）の方が温まりやすい」という観測事実も説明する必要がある。こうした温暖化の“クセ”は、温室効果ガス主導の温暖化説では、比較的素直に説明できるが、太陽活動主因説では、（実証されていない）複雑なメカニズムを仮定しないと説明が困難だという問題がある。

さらに、もう一つ、太陽活動主因説では説明が難しい重要な科学的証拠がある。それは、気温変化の垂直的な分布、つまり、成層圏と対流圏の温度変化である。もしも、太陽活動の活発化によって、地球の温度が上昇したのであれば、下層にある対流圏と上層にある成層圏との両方の気温が上昇するはずである。しかし、観測事実は、対流圏の温度が上昇する一方で、（あまりマスコミでは報道されないが）成層圏は過去数十年間にわたり全体として寒冷化してきているのである。

これは、温室効果ガス増加により、対流圏では下向き長波放射が増えて地表付近が温まりやすくなる一方、成層圏では赤外放射で宇宙へエネルギーを放出しやすくなること等により冷えやすい、というメカニズムから予想される現象である。これに対して、太陽活動主因説では、この垂直的な昇温・冷却分布を整合的に説明するのは簡単でない。

議論はなお続いているが、こうした観測事実の蓄積に伴い、IPCCを含む多くの研究者の間では、「太陽活動の変化は近年の地球温暖化の主因ではない」という見方が有力になってきているのである。

（2）地球軌道変動説

これは、地球軌道のゆがみによって太陽からの距離が変化したり、地軸の傾きが微妙に変化したりすることにより、太陽から受ける日射量に変化して長期の気候変動をもたらすという説である。過去の氷河期と間氷期（温暖

期)のサイクルは、この地球軌道変動理論では説明できる。その意味で、この説は理論・実証ともに確立しているので、聞いたことのある方も多いと思われる。

我々は現在、最後の氷河期が終わって間氷期に入り、1万年ほどが経過したところにいる。最後の氷河期の終わり頃は、海水面が現在よりも100mほど低く、日本列島も大陸と地続きであったし、アメリカ大陸もユーラシア大陸と陸地でつながっていた。このため、2万年ほど前には、マンモスなどの大型動物を追って人類が、アジアからアラスカあたりまで進出していたようである。ただし、北米大陸は3,000m級の氷床で覆われ、それ以上は南下することができないでいた。しかし、1万2000年ほど前、氷河期が終わって気温が急激に上昇すると(ボーリング温暖期)、北米の氷床が溶けて一気に回廊ができ、人類は1,000～1,500年ほどで現在のアルゼンチンあたりに到達したと推測されている。同時に海水面が上昇し、ベーリング海峡によって二つの大陸は隔てられて、コロンブスが新大陸を発見するまで、両大陸の人類の接触は断たれることになる。日本も大陸から隔離され、1万年以上続く縄文文化が形成されることになる。こうした地球環境の劇的な変化は、何千万年も前に起きた出来事ではなく、我々ホモサピエンスの祖先が経験した、つい最近の事象である。しかも、ボーリング温暖期には、グリーンランドの氷床コアの解析から、わずか数十年～数百年で平均気温が4～5℃上昇したことが確認されている。これほど大きな気候変動が自然の力だけで生じたのであれば、近年の気温上昇も人為とは関係なく起きたのではないかと直感的には信じたくなる。しかし、以下に説明するように、この地球軌道変動説では、産業革命以降の地球温暖化現象は説明できない。

【地球軌道変動説とは何か】

この説は非常に興味深いロジックであり、単純に日射量の変化で地球が冷たくなったり暖かくなったりしていたわけではない。

まず、地球の北緯65度付近(おおよそアラスカ、カナダ北部、スカンジナビア、シベリア中部)に注目する。これより北だと、太陽高度が低く、一年

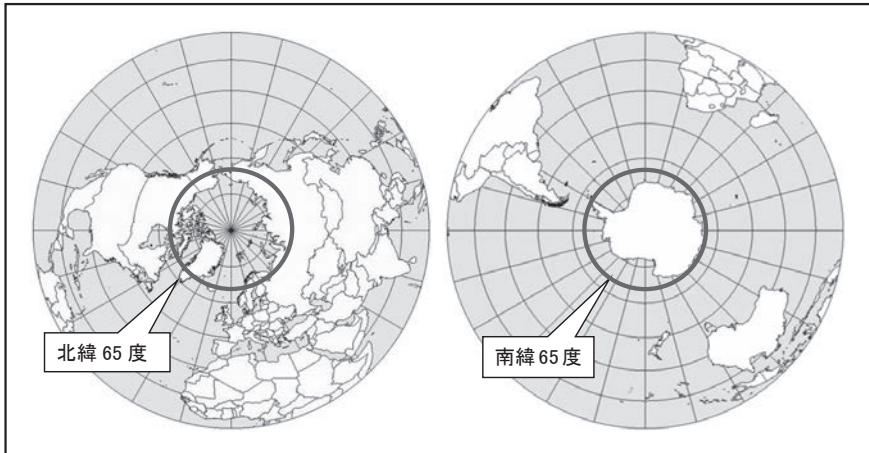
のほとんどが氷の世界である。逆にこれより南だと、そもそも氷が作られにくい世界である。つまり、「氷ができたり融けたりする境界地域」が北緯65度前後にあるのである。

もう一つ重要なのは、こうした高緯度地域は、季節による昼夜時間の変化が非常に大きいということである。夏は白夜に近く、冬は昼の時間は数時間である。地軸が3度ずれただけで、北緯65度の夏至の昼の長さはおよそ2～4時間変わり、太陽高度（入射角）も変化するため、受ける日射エネルギーが顕著に変化する。これらの効果や軌道要因が重なると、この地域の夏至の日射量は最大でおおよそ $\pm 10\sim 15\%$ も変動する。一方、赤道付近ではこうした変化はほとんど見られないし、地球全体の年平均日射量の変動も $\pm 0.1\%$ 程度にとどまる。

つまり、季節によって氷ができたり消えたりする境界地域である北緯65度では、地球の運行の変化による僅かな日射量の変動が、大きく増幅されるのである。ここで重要なのは、（冬の寒さではなく）夏の暑さである。つまり、夏の暑さが十分でないと、溶けずに残った氷に、次の年の冬で氷が重なり、地表を覆う氷の面積が徐々に拡大していく。すると、太陽光の反射が増えて、少し地球の気温が低下する。このフィードバックが何千年、何万年と繰り返されて蓄積されることで氷河期になるのである。逆に、日射量が増えてくると、北緯65度の境界地域では、少しずつ氷が解け始め、ある臨界点を超えると、氷床が失われて急速に温度が上昇するのである。しかも、海水温が上昇すると CO_2 の吸収量が減るので、間氷期には大気中の CO_2 も増えることが知られており、これも温暖化の加速に貢献する。

ここで面白いのは、上記の現象が、地球上の大陸の分布と深く関係しているという点である。もしも、北緯65度に海が多いと、上記のフィードバックは効かない。つまり、寒冷化（温暖化）の効果が蓄積されないのである。このため、海が圧倒的に多い南半球ではこの現象は起きない（北半球の気温変化に追従して2次的にしか変動しない）。たまたま、北半球の北緯65度付近には陸地が広がっていることから、こうした現象が起きてきたのである（図を参照）。270万年前より前には、北半球に大規模な氷期サイクルが見られな

図. 北半球、南半球における緯度65度の位置



出所：下記サイトの地図を基に筆者作成

出典：Wikipedia、「北半球」項目 - “Northern_Hemisphere_LamAz.png”（ファイル）、URL：
https://ja.wikipedia.org/wiki/北半球#/media/ファイル:Northern_Hemisphere_LamAz.png
「南半球」項目 - “Southern_Hemisphere_LamAz.png”（ファイル）、URL：https://ja.wikipedia.org/wiki/南半球#/media/ファイル:Southern_Hemisphere_LamAz.png

かったのは、まさに大陸と海流の配置が現在とは異なっていたためである。

【地球軌道の変動など】

以上では、地球に備わっている“エネルギー増幅装置”について説明してきた。その“タネ”となる地球軌道の周期的な変化に伴う太陽から受け取るエネルギー量の変動についてであるが、三つの要素から成る。すなわち、①離心率、②歳差運動、③地軸傾斜である。離心率とは、地球軌道が円に近いか楕円かを示すもので、真円から離れるほど、太陽との近日点と遠日点との差が大きくなる。これは約10万年の周期で変わる。2番目の歳差運動とは、コマのような首振り運動で、地球が公転面を動くコマだとすると、公転面にほぼ垂直な軸を中心に地球は首振り運動をしている。いまは、地軸が北極星の方向を向いているが、後、1万年もすると、全く違ったベガの方向を向く。公転軌道が真円ならば、歳差運動の影響はないのであるが、楕円だと、

太陽光の入射角が最大になる時期（夏至）が、太陽との距離の近い位置に来るか遠い位置に来るかが変わってくるのである。この歳差運動の周期は、約1万9000～2万3000年である。3番目の地軸傾斜であるが、これは、地軸の傾きで、周囲の天体の影響などで22.1～24.5度の範囲を4万1000年周期で動く。地軸が大きく傾くときには、北半球の夏至の太陽光の入射角度が大きくなるので、温度は上がりやすくなる。これら三つの周期的変化が複雑に重なり合うことが“タネ”（トリガー）となり、さらに気候システムの内部応答によって約10万年周期の気候変動が引き起こされる。地球の運行は、物理現象であるから、周期や日射量がどのように変化するかは、地球物理学で正確に計算されている。

【地球軌道説を提唱・確立した研究者たち】

この地球軌道変動説を最初に体系化したのは、セルビアの天文学者 Milutin Milanković（ミルティン・ミランコビッチ）である。このため、この説は、ミランコビッチ・サイクルとも呼ばれる。Milankovićは20世紀初頭から1940年代にかけて、「地球の軌道要素の周期変化が氷期・間氷期を引き起こす」という仮説を理論化した（Milanković（1920, 1941））。Milankovićが北緯55°、60°、65°における過去の日射変化を計算していたと言われるので、地球軌道の周期変化だけでなく、境界地域である北緯65度付近が鍵になる事にすでに気付いていたのかもしれない。コンピュータも関数電卓もない時代に、この素晴らしい着想を得たMilankovićが、紙とペンだけで検証の計算を繰り返していた姿が目につく。その後、A. Berger(1978)が、コンピュータと最新の天文学のデータを使って、過去数十万年の緯度別・季節別の日射変化を初めて高精度で数値化する。そして、1998年にD. Paillard（1998）が気候モデルを構築して10万年周期の氷期リズムを再現すると同時に、「軌道要因はトリガーであり、気候システムの内部応答がリズムを決める」という理解を確立する。

以上、地球軌道説を見てきたが、この理論で、産業革命以降の地球温暖化を説明できるであろうか。上記のように、地球軌道の変動と日射量の変化は

精密に計算できるのであるが、それによると、約800年前に日射量はピークに達し、現在は下降局面に入っている。つまり、他の要因がなければ、地球全体は寒冷化に向かっているというのが、地球軌道説の結論である。ただし、その程度は小さく、1780～2020年の日射量（北緯65度、7月中）の低下は、わずか▲0.05%程度である。このように、地球軌道説は魅力的な学説ではあるが、現在の地球温暖化は説明できない。

（3）自然の温室効果ガスの噴出（メタン大量放出）

よく知られているように、メタンの温室効果はCO₂の28倍もある。しかし、これは、100年程度の平均の効果で、20年程度の短期だと80倍にもなる。メタン分子は12年程度でほとんど分解されるため、短期効果の方がずっと大きいのである。さらに、メタンの空気中の濃度は、近年、明らかに加速している。すなわち、過去80万年の氷河期は0.350～0.400 ppm、間氷期（温暖期）は約0.700 ppm、1750年頃は約0.722 ppmであったが、1983年は約1.626ppm、そして2023～24年には約1.940 ppmと急増している。つまり、産業革命前に比較して2.7倍、メタン濃度が薄かった氷河期に比較すると5倍以上になっている。

地球温暖化が進むと永久凍土が溶け、また海水温が上がると海底に閉じ込められていたメタンが解放されて地球温暖化が進み、それがさらにメタンの放出を拡大するという負の連鎖が生み出され、地球温暖化が加速される。このため、ある臨界点を超えると、この負の連鎖が一気に加速して制御不能になる危険性が真剣に議論されている。現在はまだ、こうした暴走的な悪循環は始まっていないという意見が大勢であるが、約5600万年前（新生代のはじめ頃、恐竜絶滅の約1000万年後）には、実際に、こうしたメタンの大量放出が原因の一つになって、地球の温度が数千年で5～8℃上昇したと推定されている。

このため、地球温暖化を抑制するためにはCO₂よりもメタンの抑制を重視する研究者も少なくない（Saunio et.al (2025)、Nisbet et.al (2021)）。中には、コーネル大学のRobert W. Howarth (2021) のように、最近のシェ

ールガス開発を念頭に、「天然ガス（主成分はメタン）の採掘や輸送時のメタン漏洩を正しく評価すれば、天然ガスに石炭から転換しても気候改善にならない。それどころか、むしろ悪化しうる」と主張している研究者もいる。カーボン・ニュートラルを達成しようとする努力が、皮肉にも地球温暖化を促進するかもしれないという指摘である。

さて、地球上のメタンの埋蔵（貯蔵）形態を見てみると、その大半が海底のメタンハイドレートである。プランクトン死骸などの海底堆積物が、酸素のない環境でメタン生成菌によって分解される過程でメタン生まれる。これが一定の条件（10℃以下の低温、水深300m以上の高压）で、水の分子に取り囲まれて固体状になったのがメタンハイドレートである。見た目はシャーベットのようなものであるが、火をつけると燃えるので、「燃える氷」とも呼ばれ、日本近海にもかなりの量が埋蔵されている。メタン自体は海中でほとんど分解されるが、メタンハイドレートは水分子に囲まれて安定しており、何万年も蓄積される。

それでは、現在の温暖化における主因、あるいはトリガーがメタンである可能性はないのであろうか。すなわち、火山活動など初期的なCO₂放出が誘因となって、メタンハイドレートからメタンが解放される悪循環が起き、これが、産業革命以降の温暖化を引き起こした可能性である。上記の5600万年前の気温急上昇に加えて、最後の氷河期末期（ボーリング温暖期）の気温急上昇も、このメタンハイドレート崩壊による可能性が指摘されている。しかし、こうした過去のメタンハイドレート分解が関与した可能性を議論している研究者たちも、現在の地球温暖化がこれによって生じたと主張しているわけではない（Ruppel & Kessler（2017））。理由は次の通りである。

第1は、量的な問題である。現在のCO₂濃度は、420ppm前後に対して、メタンは2ppmに満たない水準である。メタンの大気中の濃度はCO₂の1%以下であるが、1分子当たりの温室効果は、はるかに大きいので、その影響は小さくない。LBL法によると、この濃度に対応するメタンの放射強制力（地球全体のエネルギー収支の増大分）は1750年比で約+0.54 W/m²と推定されている。同条件でCO₂は約+2.16 W/m²なので、メタンはCO₂の約1/4の寄与に

なる。気温上昇に与える影響もCO₂の1/4程度あるということである。しかも、この比率が上昇傾向にあるということは憂慮すべき事態で、今後、温暖化が加速する可能性を示している。しかし、過去の産業革命期について見ると、メタン濃度は半分以下で、メタンの放出が地球温暖化の主因になったと考えるには、絶対量が少なすぎる。

第2に、それでは1700年代から現在までのどこかの時点で、例えば多くの海底火山の噴火などで海底のメタンハイドレードの崩壊があってメタンの大量放出が起こり、それが地球温暖化のトリガーになった可能性はどうであろうか。各時代のメタンの濃度は、南極の氷床などに閉じ込められている空気から推計できる。しかし、その増加は滑らかで連続的であり、地質的な暴発（ハイドレート崩壊）のような急激なジャンプ（数年～数十年で数倍）は観測されていない。

第3として、メタン源の問題がある。永久凍土に閉じ込められているような生物由来のメタンと化石燃料由来のメタンを比較すると、炭素と水素の同位体の構成が異なる。このため、永久凍土や人為（家畜のゲップなど）由来のメタンは相対的に軽く、化石燃料のメタンは相対的に重いのである。そこで時系列的に大気中のメタンの重さを分析してみると、傾向的に軽くなっていることが分かっている。これは、増大しているメタンが、永久凍土や家畜などの生物由来が主であることを示唆している。海底のメタンハイドレートに関しては、生物由来と化石燃料由来が混ざっているようで、その影響ははっきりしない。しかし、海底のメタンハイドレートからメタンが放出されても海中でその多くが分解されて大気中にまで出るのは少量と言われている。浅い海域でのメタン解放は確かに確認されているが、これも海水温の上昇に伴うものと思われる。つまり、現在の大气中のメタンの増大は、温室効果の2次的影響または人為によるものと考えられ、メタンハイドレートが温暖化の主因と考えるには無理があることを示している。

今回の後編では、残りの自然的要因（宇宙気候理論（コズモクライメトロジー）、内部気候変動）の説明と地球史的な代表的な温暖化現象に触れた

後、GCM（全球気候モデル）の信頼性についても検討する予定である。

【参考文献】

- Berger, A. (1978). "Long-Term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climatic Changes." *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35, pp. 2362-2367.
- Damon, P. E., & Sonett, C. P. (1991). "Solar and terrestrial components of the atmospheric 14C variation spectrum." In Sonett, C. P., Giampapa, M. S., & Matthews, M. S. (Eds.), *The Sun in Time* (pp. 360-388). Tucson, AZ: University of Arizona Press.
- Eddy, J. A. (1976). "The Maunder Minimum." *Science*, 192 (4245), pp. 1189-1202.
- Herschel, W. (1801). "Observations tending to investigate the Nature of the Sun, in order to find the Causes or Symptoms of its variable Emission of Light and Heat ; with Remarks on the Use that may possibly be drawn from Solar Observations." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 265-318.
- Howarth, R. W. (2021). "Chapter 6: Methane and Climate Change." In Stolz, J. F., Griffin, W. M., & Bain, D. J. (Eds.), *Environmental Impacts from the Development of Unconventional Oil and Gas Reserves*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- Milanković, M. (1920). *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire* (English trans.: *Mathematical Theory of Heat Phenomena Produced by Solar Radiation*). Paris: Gauthier-Villars.
- Milanković, M. (1941). *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem* (English trans.: *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem*). Belgrade: Königlich Serbische Akademie (Royal Serbian Academy / Srpska kraljevska akademija).
- Nisbet, E. G., et al. (2021). "Atmospheric methane and nitrous oxide: challenges along the path to net zero." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379 (2210), 20200457.
- Paillard, D. (1998). "The timing of Pleistocene glaciations from a simple multiple-state climate model." *Nature*, 391, pp. 378-381.
- Ruppel, C. D., & Kessler, J. D. (2017). "The interaction of climate change and methane hydrates." *Reviews of Geophysics*, 55 (1), pp. 126-168.
- Saunio, M., et al. (2025). "The Global Methane Budget 2000-2020." *Earth System Science Data*, 17, pp. 1873-1958.
- Scafetta, N., & West, B. J. (2006). "Phenomenological solar contribution to the 1900-2000 global surface warming." *Geophysical Research Letters*, 33 (5), L05708.
- Shapiro, A. I., Schmutz, W., Rozanov, E., et al. (2011). "A new approach to long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical solar forcing." *Astronomy & Astrophysics*, 529, A67.
- Solanki, S. K., & Krivova, N. A. (2003). "Can solar variability explain global warming since 1970?" *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108 (A5), 1200.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009753>
- Solanki, S. K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schüssler, M., & Beer, J. (2004). "Unusual activity of the Sun

-
- during recent decades compared to the previous 11,000 years." *Nature*, 431, pp. 1084-1087.
<https://doi.org/10.1038/nature02995>
- Solanki, S. K., Krivova, N. A., & Haigh, J. D. (2013). "Solar Irradiance Variability and Climate." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51, pp. 311-351.
- Stuiver, M. (1980). "Solar variability and climatic change during the current millennium." *Nature*, 286, pp. 868-871.