

虚構の環境技術3：消えゆく地球温暖化問題と 登場した気候変動問題

川村 邦男*

(受付 2022年6月15日)

1. はじめに

虚構の環境技術の一編として、今回は自然科学者および技術研究者の立場から地球温暖化問題を評価する。これまで国際機関や内外の政府は地球温暖化を問題とし、市民は費用と労力をはらって温暖化対策に協力した。しかし温暖化問題が登場してから巨額の税金などを投じて対策してきたにもかかわらず、世界全体の化石燃料消費量は増加する一方であった。もし地球温暖化の原因が人為的に排出される二酸化炭素であるならば、新たな技術を使うよりも化石燃料消費を削減することが簡単で効果的である。しかしそれを実行しようとはせずに、効果ははっきりとしない代替エネルギーなどの新しい技術を提示し、その普及に突き進んできた。このように地球温暖化問題には大きな矛盾がある。一方で自然科学の視点で見ると、地球温暖化や気候変動が起こっているかどうかを自然科学的に判定することは簡単ではない。そして「地球温暖化や気候変動が起こっており、それらの原因が産業革命以降に人間が排出した二酸化炭素である。」という主張は、仮説にすぎない。そうであるにも関わらず、これらの仮説に基づいて、地球温暖化対策が延々と実施され、最近では気候変動問題へと置き換えられてきたのである。

なぜこのような矛盾に市民は気づくことなく、温暖化対策を支持してきたのだろうか。その主な原因は、自然科学者以外の市民は自然科学の実際をほぼ知らないことにあると考えられる。自然科学的あるいは技術の観点からみると、地球温暖化問題や気候変動問題に関する説明は一般市民には理解しにくく、虚構や短絡的で大げさな主張を含んでいる。そこで本編では、地球温暖化・気候変動問題やその対策を、自然科学あるいは技術の視点からみて、どこが問題であるか指摘することを試みる。これによって、地球温暖化がなぜ様々な政策をすすめる指導原理になったのか、市民がその背景を考えるきっかけになることを目指す。

* 広島修道大学

2. 自然科学的真理と社会問題との関係

2.1 自然科学的真理はどのように形成されるか

現代社会は様々な場面で自然科学的根拠が求められる時代である。社会において自然科学を正しく使うためには、自然科学的知識を理解することは大切だが、自然科学的真理がどのように形成され、それらがどのような位置づけにあるかを理解することはさらに大事である。自然科学は、経験的感觉からは簡単に到達し得ない自然科学的真理を明らかにしてきた。自然科学を学習しなければ、経験的理解を自然の真理ととらえるだろう。例えば多くの人、太陽や星とともに空がまわるように見えることを、地球の自転で説明できることを知っている。しかし学習の機会がなければ、これを正しく理解することはほぼ不可能である。

では、自然科学的真理はどのようにして確立されるのか。自然科学者が日々取り組んでいる目の前にある現象を説明する考え方は、自然科学的なモデルや仮説と呼ばれる。これを検証するために観測や実験を行う。そのモデルや仮説によって他の観察事実も説明できれば、モデルや仮説の確からしさは高まる。それらを説明できない場合には、モデルや仮説は修正される。この過程を繰り返し、仮説は長い時間の検証によって正しいことが確認される。そして、自然現象の背景にある基本的な自然法則として定着する。この過程を単純化して図式

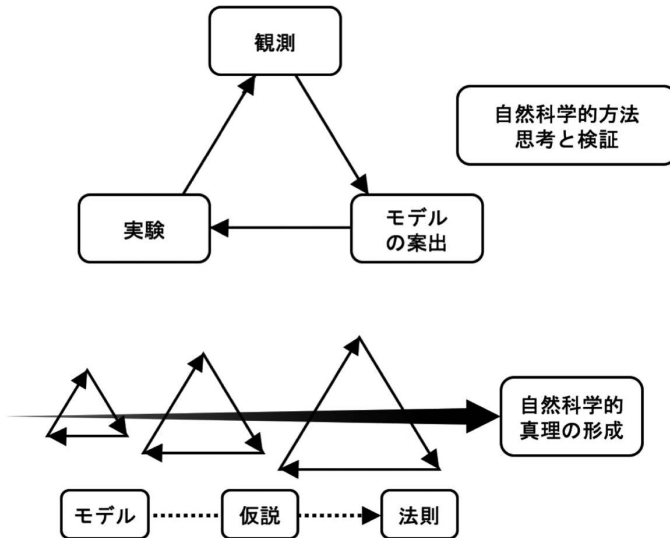


図1. 自然科学の思考・検証プロセスと真理の形成過程を説明する模式図
上の三角形は観測によってモデルを提案し、それを実験によって検証するというプロセスを表す。下はその三角形によって次第に自然を統一的に理解するモデルが確立され、仮説や法則へを発展する過程を表す。

化すると、例えば図1のように表される。真理と呼べるような法則やその学問体系が定着するためには、おおむね数10年から100年以上という時間スケールを必要とする。

世界中の多くの自然科学者が観察や実験などを付け加えることで、真理を検証し修正する作業を延々と続けているのが、自然科学という学問の実際である。ニュートン力学や相対性理論、電磁気学の体系、熱力学の体系などは、構築されてから100年以上も検証され続けて反証が見つからないばかりか、理論体系の整合性からみても反論の余地は見出されそうにない。ただし、現時点で自然科学的真理であると言えることが、ずっと先まで真理であるという確証はない。例えば、約100年前にニュートン力学の一部が特殊相対性理論・一般相対性理論・量子力学に置き換えられた事実は、この例にあたる。

これらの自然科学的真理は、自然科学者のコミュニティによって形成される。自然科学者達は、自然科学的成果を自然科学的合理性に基づいて相互評価する。この自然科学を行うための媒体は国際的な学術誌および発表の場であり、そこで自然科学的知識は蓄積されていく。これらの外にある者は自然科学者としては認められず、外での議論は自然科学としては認められない。

2.2 自然科学を社会問題に適用するむずかしさ

自然科学を社会に役立てる場合にも、妥当なモデルを立て検証するステップが必要である。しかし公害問題のように、これらの自然科学的検証ステップを単純に使うと、うまく働かないことがある。例えば、法律では疑わしきは罰せずということがある。このため、単純に自然科学的手続きを公害事件に当てはめると、時間がかかりすぎて被害者が十分に救済されないことがある。これを避けるためには、自然科学の手続きには時間と手間がかかるという特性を知り、法律もこの特性を配慮して作り直さなければならないことがあるだろう。また自然科学教育においては、自然科学の知識に加えて自然科学の形成過程や特性を教育すべきである。

3. 地球温暖化問題を市民目線で評価する

3.1 地球温暖化対策と研究者の姿勢

私が大学の助手に初めて着いた約30年前に、地球温暖化という言葉がぼつぼつと使われ始めた。私が所属した研究室の教授が、自動車が少ししずつ出す二酸化炭素が蓄積して地球が暖まっていくなんてなんとも……と言われたことを思い出す。しかし、あの当時と比べて何か進歩したのだろうか。化石燃料消費量は増え続けた一方で、新たな課題や目標がこの間に次々と提起された。日本の公害対策では比較的短期間で目に見える効果があったが、地球温暖化

問題では目に見える効果はなかったと言ってよい。このことは、地球温暖化問題を考える上で非常に重要な事実である。

そこで、自然科学者や技術開発研究者の問題を考えよう。私の研究者としての目線からは、自分の周りに環境関連の研究者がずいぶん増えた、あるいは、さまざまな分野で環境を意識する研究が増えたことを、1つの変化としてあげる。これは、研究開発や普及には予算や人材を投入した結果でもある。厳しく言えば、研究者にとっての地球温暖化問題は、研究の流行にのりがちな研究者達に安易な研究テーマを提供しただけかも知れない。彼らは地球温暖化というフレーズに疑問を投げかけることなく、関連する研究を、あるいは、自分の研究を温暖化問題に関連づけてすすめた。流行を追ったりポジションを重視して研究を進めることは、科学者として間違った姿勢である。

3.2 地球温暖化問題の分かりにくさ

専門知識・思考法や技術の壁があるために、一般市民が自然科学を理解することは難しい。さらに自然科学的真理が形成されるためには、長い時間と手続きを必要とする。「現在、環境変化や地球温暖化が起こっており、その主要原因は人為的に排出される二酸化炭素である。」と言う主張は自然科学的仮説である。この仮説が真理であるかのようにして、様々な社会活動が行われていることは大きな問題である。地球温暖化という仮説が真実のように認知されるようになった理由の1つは、地球温暖化に関する自然科学的内容を市民が理解するのが難しいことにあるだろう。実際、地球温暖化の原因物質は何であると言われていたのかと大学授業で学生に質問すると、オゾン層の破壊であるなどという間違った答えは非常に多い。いま、地球温暖化は気候変動という言葉に置き換えられつつあるが、気候変動の中身も同様に理解しにくい。

第2に、地球温暖化問題と過去の公害問題とを重ね合わせて考えやすいことも一因であろう。この数10年間の地球環境の悪化は、自然科学的事実として認められる。例えば、大気・水・土壌に含まれる有害汚染物質の増加、生態系の消失、絶滅種の増加などは、環境悪化を示す分かりやすい事実である。一方で日本では公害の経験があるので、これらの事実と連動して、人間活動によって環境が悪くなるという印象は受け入れやすい。しかしこの印象は、地球温暖化問題を誤解させる原因である。大気汚染を起こした公害は、石油や石炭を燃やしてできる窒素酸化物や硫黄酸化物が原因であった。実際にそれらを取り除く対策をしたことによって公害は改善された。このアナロジーとして、石油や石炭を燃やしてでる二酸化炭素が地球温暖化の原因だと言え、かつての公害と同様に、地球温暖化は人間が引き起こしているものと受け取るだろう。もちろんこれは間違いであり、自然科学あるいは技術的な思考過程は抜け落ちている。

4. 地球温暖化や気候変動を自然科学的にみる

4.1 地球環境を考える前提

以降では、地球温暖化という仮説を自然科学的に評価し、さらにこの対策として開発を進めたいいくつかの技術の評価をしたい。自然科学的な事実として、温暖化に関連するあるいは温暖化を裏付けるのに用い得る前提は以下である。

- ①二酸化炭素は地球の表面温度に基づいて放射される赤外線（黒体放射・黒体輻射）の一部を吸収する（図2）。このような大気による黒体放射の吸収を一般に温室効果とよび、そのガスを温室効果ガスとよぶ。金星の表面温度は465°Cぐらいであり、太陽にずっと近い水星よりも高温である。これは温室効果によって説明される。地球の場合には、温室効果ガスとしては水蒸気の寄与が最も大きく¹⁾、地球に温室効果ガスがないと現在の平均気温よりも30°C以上も低いと推算されている。

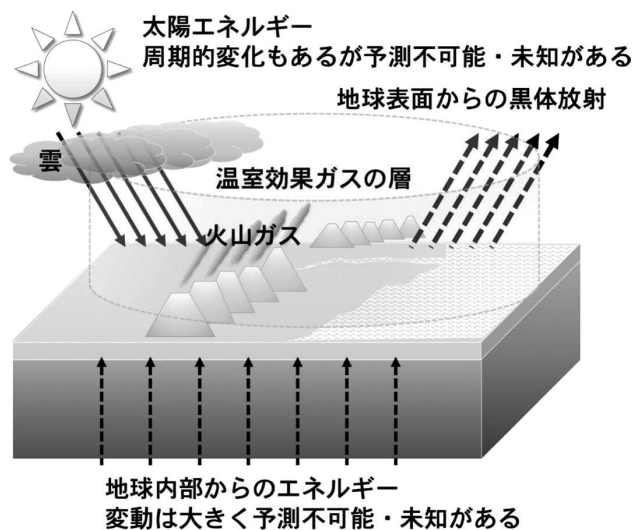


図2. 地球表面の環境に影響を与える主要因とその変動を説明する模式図
地球表面のエネルギー収支は、ほぼ太陽と地球内部から地球表面に入るエネルギーと地球から宇宙に向けて放出されるエネルギーによって決定される。太陽と地球内部から入るエネルギーの変動は大きく、その詳細と未来にどのように変化するかについては研究途上である。

- ②二酸化炭素濃度は20世紀以降に急速に増加し、この原因は化石燃料の燃焼であると考えられる。
- ③数10万年におよぶ古い時代の気温と大気中の二酸化炭素量との間には相関関係がある。例

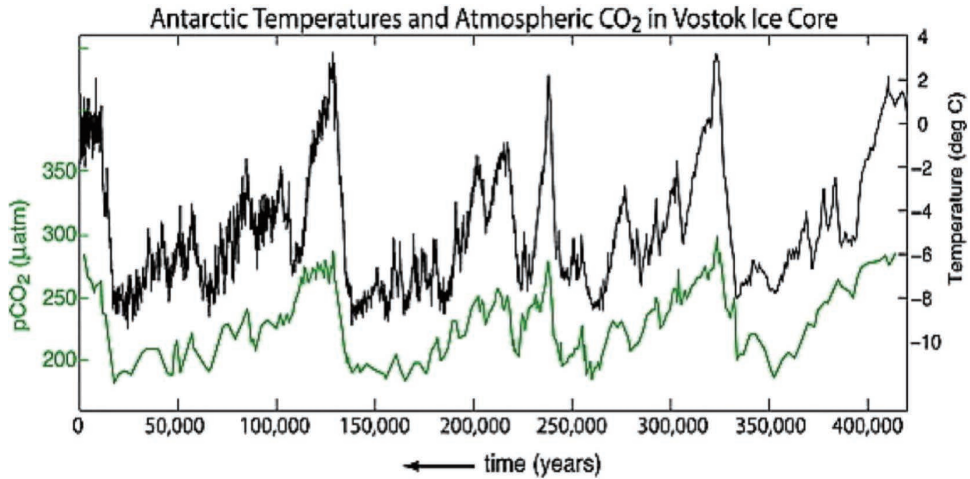


図 3. 地球表面の気温と二酸化炭素分圧に見られる約10万年周期の変動
 横軸：現在からの時間，縦軸左：二酸化炭素分圧（上のグラフ）¹⁾，縦軸右：気温（現在の気温との差で表示，下のグラフ）

J. R. Toggweiler (2008) Origin of the 100,000-year timescale in Antarctic temperatures and atmospheric CO₂, *Paleoceanography and paleoclimatology* 23, PA2211 (Figure 1). から許可を得て引用
 [Copyright John Wiley & Sons, Inc]

¹⁾ 分圧：大気中に含まれる気体の量を圧力で示す表示方法

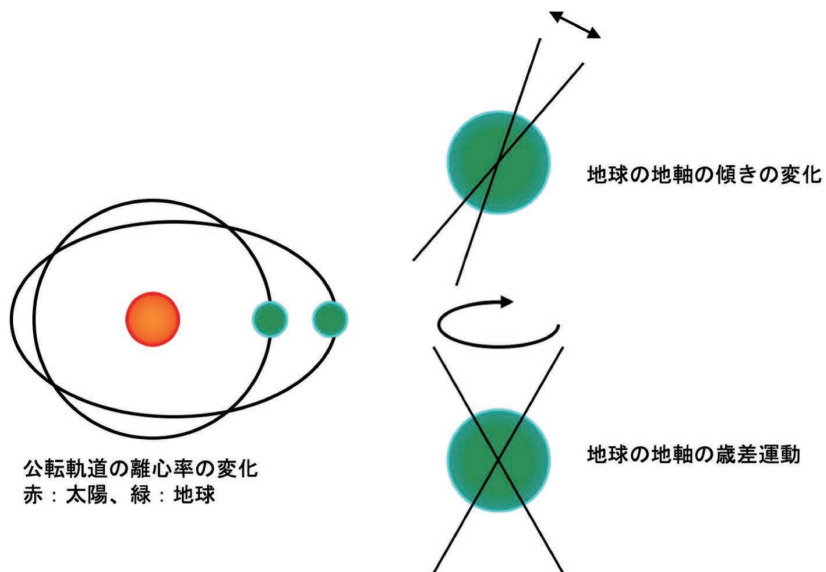


図 4. ミランコビッチサイクルの機構：地球表面気温変化の約10万年周期を説明する3つの要因
 左：地球の公転軌道の離心率変化の周期（約10万年），右上：地球の自転軸の傾き変化の周期（約4.1万年），右下：地軸の歳差運動の周期（1.8-2.3万年）

えば、南極氷床に含まれるガスから気温と二酸化炭素量などが測定され、気温と二酸化炭素分圧は約10万年周期で変動するという良い相関関係が認められる(図3)²⁻⁴⁾。氷期には大気中の二酸化炭素量は小さく、現代のような間氷期には二酸化炭素量は大きい。約10万年を単位とする気温の周期的変化の機構は、ミランコビッチサイクルを基礎あるいはたたき台として説明されている(図4)^{5,6)}。二酸化炭素量の変化はこの物理的機構に由来するものと考えられるが⁵⁾、慎重な議論が続けられている。

- ④最後の氷期が終わってから、地球の気温は急激に高くなった。8000年前頃が最高で、その後は現在よりも高温期もあったが全体的には下がり続けていると推定されている(図5)⁷⁾。またこの2000年間には、約1200年前が高温期で、その後マウンダー極小期に相当する小氷期を含め気候変動は観測されている^{8,9)}。19世紀から20世紀にかけては変動はあるものの、地球の気温はゆるやかに上昇した。最近では、1940年代から60年代にかけては気温は停滞したが、1980年からは気温は上昇した(図6)¹⁰⁾。これらのデータの評価については科学的議論が続けられている。
- ⑤気温の測定について、現在では、衛星探査機によって気温を全球レベルで測定できるが、20世紀の終わり近くになるまでそのような観測はできなかった。従って、過去の観測データにおいては観測地点の偏りによる影響を考慮しなければならない。また、都市における気温上昇はヒートアイランド現象を含んでいるのでその効果を考慮しなければならない¹¹⁻¹⁴⁾。また、それ以前の気温データは、例えば同位体の量をもとにした推定値である。

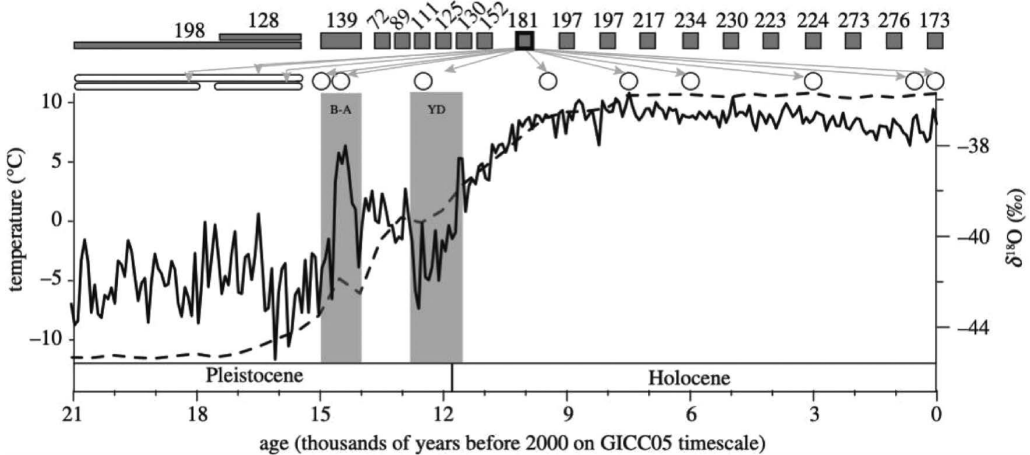


図 5. 最後の氷期から現在にわたる気温の変動
 横軸：現在からの時間、縦軸左（点線）：気温、縦軸右（実線）：酸素同位体 (¹⁸O) の量
 K. C. Maguire, D. Nieto-Lugilde, J. L. Blois, M. C. Fitzpatrick, J. W. Williams, S. Ferrier, D. J. Lorenz (2016) Controlled comparison of species- and community-level models across novel climates and communities, Proc. R. Soc. B 283, 20152817 (Figure 1). から許可を得て引用 [Copyright Royal Society]

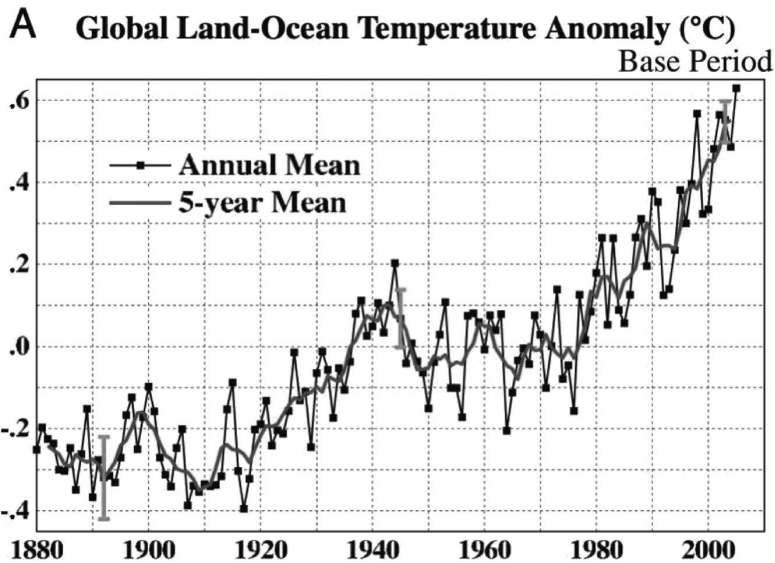


図6. 最近の地球表面気温の推移

横軸：西暦年，縦軸：気温の変化. 点：年間平均，線：5年平均

J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, M. Medina-Elizade (2016)
 Global temperature change, PNAS 103, 14288–14293 (Figure 1). から許可を得て
 引用 [Copyright (2006) National Academy of Sciences, U.S.A.]

4.2 自然科学における事象の相関関係と因果関係

地球の気温と大気中の二酸化炭素分圧の間には相関関係がある（図3）。この相関関係は地球温暖化の原因が人為的に酸化炭素によると主張する1つの根拠である。一方で、産業革命以降の地球表面の気温変化と、人為的二酸化炭素排出との間に相関関係があるかと言えば明確ではない。

自然科学における相関関係から、因果関係や、相関関係の背景にある機構＝「自然科学的真理」を導くためには、上で説明した自然科学的な手続きが必要である。いま、気温変動と二酸化炭素濃度という2つの事象の間に相関関係があるとき、どちらが原因でどちらが結果であるかは、自然科学的に検証しなければ分からない。また、これらの間には因果関係がない場合もあり得るので、少なくとも3つの命題を自然科学的に検証しなければならない。具体的には、①二酸化炭素量が増えることによって気温が上がる、②気温が上昇するために二酸化炭素量が増える、あるいは、③因果関係はない、または他の原因によって相関関係が生じる、の3つの命題を検証することになる。

これらの3つの命題のどれが真理であるかは、科学的な検証を経て、とくに作用機構（メカニズム）を明確にする過程を経て明らかになる。作用機構を明らかにすることは、自然科学の中心的課題であり、その機構は現時点で得られている他の自然科学的理解と整合的でない

なければならない。例えば、実際に②の気温が上昇すると二酸化炭素量が増えるという仮説を立てるための、もっともらしい機構を提案するのは難しくはない。気温が上がると海洋に溶けている二酸化炭素が大気に放出されこのために大気中の二酸化炭素量が増えるのだ、という具合である。①を確定するためには、②と③の可能性について考え得る全てのケースを観察や実証によって否定し、妥当な機構を示さなければならない。②についても同様である。また③は、自然科学的には①と②の両方とも起こりそうにない場合に相当する。また、気温を上げることと二酸化炭素濃度をあげる元々の原因があって、そのために相関関係が生じる場合の可能性も想定しなければならない。

現代の温暖化問題は、①、②、③のどれに該当するのか自然科学的には十分に確定していない。むしろ、ミランコビッチサイクルが当てはまるという事実や、最後の氷期以降には気温の変化よりも二酸化炭素濃度の変化が遅れて起こったという事実^{3, 15)}は、①よりも②を支持する。

4.3 10万年から100年レベルの地球表面環境の実際

実際の地球の気候変化を見ると、過去の数10万年では氷期と間氷期を繰り返している。最後の氷期は1万2千年前頃に終了し、急激に地球は温暖化した。そして約8千年前頃が最も暖かく、その後は変動しながら気温は低下する傾向にある（図5）。約12万年前にも現在のようない間氷期があったと考えられているが、このような比較的短期間の氷期と間氷期の繰り返しは、ミランコビッチサイクルで説明される。これは、地球の公転軌道の離心率変化の周期、地球地軸の傾き変化の周期、地球地軸の歳差運動の周期によって説明されている。これらの変化は複雑であり、細かい変化を説明するための研究は継続している。ただし、公転軌道の離心率の周期と最近の約10万年での氷期サイクルは一致しているように見える。また、基本的には物理的な変化が原因であり、大気中の二酸化炭素が誘発する機構ではない。現在は氷期の間の間氷期にあると考えられるが、長時間すると氷期に入ると考えられる。しかし、間氷期が終わって氷期にいつ戻るかは正確には予想できない。

農業が始まり人類の歴史が始まったのは氷期以降である。私は若い頃、現生人類が1万年よりもっと古くに出現したのに、なぜ氷期以降でしか文明の痕跡は見つからないのか不思議であった。その答えは、氷期には物理的に農業をする環境が存在しにくかったことが主な原因であると考えられつつあるようだ。つまり、人類は生物としては氷期以前に十分に進化していたが、文明を築く環境がなかったと理解できる。また、ユーラシア大陸の何カ所かで古代文明が相次いで出現したのは、氷期の終焉と深い関わりを持っている。いわば、現生人類が出現してから最後の10万年間の氷期を過ごし、間氷期が来てから人類の文明が開いたと言えるだろう。

上述したように、1200年ぐらい前はこの2000年の中では最も暖かかった時代であった^{8,9)}。そのような時代には人口も増え人類の活動は活発となり、その後の寒冷化によって、社会は縮小せざるを得なかった。ヨーロッパでの中世の人口縮小などもこの寒冷化と関連すると仮説されている^{16,17)}。さらに19世紀から20世紀前半までは、現在と比べれば化石燃料消費量は格段に少なかったにも関わらず、気温は上昇した(図6)。このように、10万年というスケールではなく数100年あるいは数10年という短期間の場合には、気温と二酸化炭素濃度との間には強い相関関係はないので、人為的二酸化炭素の排出はせいぜい一つの要因に過ぎないものと考えることが妥当である。この種の温暖化に反論するような主張は時々科学者からも発信されてきた。しかし、これらはマスコミなどの報道では取り上げられもせず、温暖化が真理であるように市民は考えているのが実情である。

4.4 気候変動について

最近では温暖化に代わって気候変動という言葉が増えた。これに関する疑問を3つあげよう。

第1に、気候変動の原因は何であると主張しているのか。この原因が人為的二酸化炭素の排出であるのなら、どのような機構で気候変動が起こるのかを説明しなければならない。有史以来、自然的原因による気候変動は起こったと考えられているが、産業革命以前の気候変動は人為的二酸化炭素排出によるものではないだろう。例えば、マウンダー極小期は太陽の黒点が少なく太陽活動の低下と関連している。また、大規模な火山活動が気温低下を招くことも推定されている。これらの自然由来の気候変動の原因は、太陽活動あるいは太陽系外の要因や地球内部の活動変化に基づくと考えられるので、現在の自然科学では予測できない。

第2に、温暖化は気温を測定すれば検証できるかも知れないが、気候変動が起こったとしてもそれが人為的であるかをどのように判定するのだろうか。そもそも過去の気候変動においては、人間活動は小さいため人間が関与していない自然的変動であると考えられる。また、それらの自然的気候変動との比較によって人為的気候変動を判断するとしても、気候変動に関するデータは少なく精度は低い。これらを踏まえた上で、気候変動を主張する者は、人為的気候変動を確実に判断できるのだということを示すべきである。

第3に、どのような気候変動が予想されるのか。氷期以降に時々起こったタイプの気候変動なのか、これまでに全くなかったタイプの気候変動か、氷期に移行するような気候変動か、を明確にすべきである。第2と第3の疑問に答えられなければ、幽霊がいると言う発言と同様に、自然科学的議論の対象にはならない。

4.5 地球環境は予測できるのか

次は地球表面環境の予測について考えよう。法則などから演繹的に自然現象を予測・記述できることは、自然科学の特徴の1つである。しかし実際には、モデル・仮説・法則などから予測できないこともある。これは、モデルが単純すぎるため、あるいは、現状を精度良く把握できないためなどによって起こる。

化石燃料消費の温暖化に対する寄与分を推算するのは難しい。これは、地球表面の環境を支配する自然的要因が大きいからである。例えば、ミランコビッチサイクルは氷期と間氷期の大きな周期をかなり説明できるが、この間の細かな変動を説明するタイプの理論ではない。また、太陽から地球に放射されるエネルギーの規模は、人為的に作るエネルギーよりも、4桁（1万倍）も大きい¹⁸⁾。従って、そもそも気候に与える人為的影響は、太陽や地球の変動というノイズにかき消される可能性を、十分に考慮しなければならない。さらに太陽や地球の変化以外にも、気候に与える因子として考慮しなければならない大きな自然的要素が他にもあるのかは、研究途上であり分からない。例えば、近年では銀河系からの高エネルギー放射線が地球環境に影響を与えているとする仮説が提案され¹⁹⁾、太陽系外の要因までを気候変動の原因として考えなければならないことが分かりつつある。

一方で、既に分かっている因子を定量的に把握することも簡単ではない。例えば、太陽活動の変動が気候に影響を与えることは理解できるが、太陽活動の変化を定量的に予測することはできない。太陽については、数10億年後には膨張して最終的に白色矮星になるという天文学的時間スケールの変化は予測できても、短期間での変化についてはあまり分かっていない。また、地震を予測できないことが示すように、地球内部からのエネルギー放出も細かくは予測できない。従って、気候変動を予測するためには、第一近似としてこれらの変動は加味しないか、せいぜい分かっている周期的な変化が今後も続くものとして予測することになる。気候変動の予測とは、言わば、この種のあらい近似に基づいている。このようなあらい近似に基づく予測の意義を評価することは難しい。

では、地球表面環境を主に支配する太陽と地球内部の変化という、主要な二つの因子（太陽のことで地球のこと）がもっと分かれば未来を予測できるのだろうか。これもはなはだ怪しいのである。なぜなら、現状の気候がどのようなになっているかを正確に把握すること自体が難しいからである。どのくらい正確に把握すれば正しい答えが得られるのかも分からない。気候を予測するために現在研究されているモデルは非常に多い²⁰⁻²⁴⁾。このことは、気候予測は研究途上であり、正しい答えはまだ分からないことを表している。まとめると、①現状の気候はよく分からない、②解析モデルがどの程度妥当か分からない、③分かっている因子がどのくらい影響するのかよく分からない、さらに、④まだ見つかっていない因子があるかもしれない。一方で、予想されている気温上昇はそれほど大きくないので²⁰⁻²⁴⁾、観測も予測も

高い精度が必要である。言い換えると、あらい精度のデータと不確定なモデルに基づいて精密な予測をするという、実験科学者からみると不思議なことが行われている。

5. 対策技術をもて虚構を発見する

5.1 効果がないこれまでの対策技術たち

自然科学上の仮説としての、地球温暖化と気候変動をみたが、次にこれまでに行われた技術開発について考えよう。そもそも新しいものを開発・生産・消費することに対しては、十分に慎重でなければならない。例えば、ペーパーレスで省エネ・省資源になると言われていたが、実際にコンピューターやネットワークが発展したためにどのぐらいエネルギー・資源消費量と廃棄物が増減したかという検証は十分に行われていない。環境関連技術についても、効果はほとんどないと考えられる地球温暖化対策技術がどしどしと開発され使われてきた。これらの技術の効果の低さと、温暖化対策をしなければならないというかけ声との間には大きな矛盾がある。この矛盾をみることで、地球温暖化問題の前提が正しいかどうか疑うべきだろう。前報で解説した電気自動車・水素エネルギー・再生可能エネルギーなどは技術的效果として、マイナス、ゼロ、あるいは、はっきりとしないという技術である²⁵⁾。実際の効果についてさしたる検証なしに、これらの技術は選ばれてきたのである。

前報では簡単な計算によって、電気自動車と内燃機関自動車は大差なく、どちらが良いのかは明確ではないことを示した。その一方で、内燃機関による動力を、電気自動車で本当に置き換えようとするならば、膨大な発電所建設、工場などの生産工程の整備、充電スタンドなどのインフラ整備などが必要である。そして世界中でそれを実行するための十分な資源があるのかも不明であり、また社会的には、既存産業の大規模な転換による混乱などの負の部分が予見される。しかもそれだけ苦勞して取り入れたとしても、効果自体は精密に計算してもよく分からない。電気自動車のような環境対策として花形技術ですら効果は不明確という、この事実は、それらを推し進めようとする背景について考える機会になるだろう。

5.2 ニュートラル・ゼロ・脱炭素が与える誤ったイメージ

環境的な課題について我々が解決しなければならないのは、有害物質による汚染や生態系の破壊などの、自然科学的事実によって裏付けられた環境問題である。例えば、有害物質による汚染は人間がそれらをばらまいたことが原因である。生態系の破壊の原因は、人間が無秩序かつ過度に自然を使ったことが主な原因である。これらについて、既に起こしてしまったことを元通りに戻すのは困難だが、同じことを繰り返さないためには消費を減らすことは一定の効果が期待される。またこれらは原因が明確であるから、技術によって対応しやすい。

例えば、前者では影響の少ない物質に置き換える、後者であればリサイクルや植林などの技術導入という具体的な戦略が立てられるという具合である。

一方、カーボンニュートラル、ゼロエミッション、あるいは脱炭素社会も人類が目指すべき目標のようにみえる。しかし実際には、これらは化石燃料主体のエネルギー体系を再生可能エネルギーに置き換えられるという、ぼんやりとした想像にすぎない。つまり技術的視点からみると妥当な目標とは言えない代物である。しかしこれらの標語があることで、石油や石炭など使わなくても十分なエネルギーを使って、しかも環境には負荷が少ない社会を構築できるようなイメージを市民に与える。もしこれを目標と言うならば、そのゴールに近づくための方法は、第1は化石燃料を減らしてゼロに近づけることである。第2は、人為的に排出されて自然では吸収されない過剰な二酸化炭素などを、回収することである。しかしこれら2つを実現することは、社会的制約と技術的制約からみて極めて難しいだけでなく、実際には社会はその実現の方向には向かっていない。

このように、カーボンニュートラルや脱炭素社会などは現実的な目標ではなく、市民の関心を向けるために作られた標語とでも言えるだろう。再生可能エネルギーには現状では大きく期待することはできない。そこで以下では、再生可能エネルギーと二酸化炭素回収について、もう少し具体的にみる。

5.3 再生可能エネルギーに大きく期待することはできない

第1に、再生可能エネルギーで化石燃料を置き換えるための具体的な道筋は不明確で、実現性のある内容は示されていない。人間が1年間に使う総エネルギーは、太陽から地球に降り注ぐエネルギーのおよそ1時間分に相当する¹⁸⁾。この事実は、再生可能エネルギーで化石燃料を置き換えられるだろうという主張の一つの根拠である。しかし、人類が化石燃料に頼るエネルギー規模は大きく、EPRの低い再生可能エネルギーでそれをほぼ全て置き換えられるという具体的根拠はない。また、達成するまでにどのぐらいのエネルギーと資源を使って何を準備し、どのぐらいの時間がかかるのか、技術的にどのようなことをすれば良いのか、インフラの維持に必要なエネルギーなども不明である。そして最も重要な、化石燃料の消費量は本当に減るのかなど、大事なことは示されていない。再生可能エネルギーを普及させるために、貴重な化石燃料を余分に使うのでは元も子もない。再生可能エネルギーのEPRの低さは、これが単なる心配事ではないことを示唆している。その一方で、インフラの再構築・産業構造の激変などによる社会的変化について、憂慮すべきことは多い。

第2に、実際にこれまでに導入した技術の効果は現れていない。つまり、再生可能エネルギーの導入が言われてからも、1人あたりのエネルギー消費量と人類が使うエネルギー総量は増え続け、連動して二酸化炭素排出量も増加した²⁶⁾。現時点では対策の効果は見えなかつ

たと言うことである。従って、結果を厳しく評価すると、再生可能エネルギーという新しい産業を、貴重な化石燃料を使って導入しただけだったことになる。

第3に、再生可能エネルギーの大きな弱点として、今のところほぼ電気しか作れない・作れないことがある。化石燃料がなくても自動車ぐらいなら電気で動かせるが、鉄も作れないし、船や飛行機は電気では内燃機関のように動かない。そもそも鉄がなければ、自動車も船も作れない。

第4には、実際の技術開発は人間の思い通りにはなかなか進まない。技術は技術ネットワークの中にあり、1つの部品や弱い技術などによって技術全体の普及・発展は制限を受ける²⁷⁾。例えば、ある資源や部品の供給がボトルネックとなって、再生可能エネルギー技術は発展しないということに相当する。それをクリアできないと、個別の技術が優れていても実際には使えないので、絵に描いた餅となる。しかしどの技術・資源・プロセスが、全体を律する部分に相当するのかを把握するのは難しい。また、それが分かっても解決できるかどうかも分からない。この視点から見ても見通しは甘い。

結論として、化石燃料を使わないで再生可能エネルギーのようなものでまかなう社会をめざす＝ゼロエミッションやカーボンニュートラルというのは、非科学的・非現実的・曖昧な、絵空事である。

5.4 二酸化炭素の回収は困難である

化石燃料によって生産するエネルギーの大半をロスすることなく、二酸化炭素を放出しないエネルギー生産を達成する見込みは示されていない。物理や化学や工学の実際を学んだ者なら、検証しなければ進めてはいけない点を直ちに思いつく。例えば、二酸化炭素を回収するのにどれだけの設備、資材とエネルギーを必要とするかを考えるだろう。そしてこれらを加味して、トータルとして化石燃料消費量が減るかどうかを考えねばならない。

その他にも想定される難点を考えなければならない。二酸化炭素をもし化学的に処理するならば、そのための化学薬品が必要である。しかし、他の様々な化学製造業における大規模な製造量と比較しても、二酸化炭素の排出量の規模は大きすぎて、化学反応を使う限り技術的に成り立つ見込みはない。化学反応を用いる処理として、生産量が多い2つの可能性のある方法を見よう。第1は、水酸化カルシウムを用いて二酸化炭素を吸収し、炭酸カルシウムとして二酸化炭素を回収することである。しかし、そもそも水酸化カルシウムは炭酸カルシウムを加熱して製造し、その際には化学両論の二酸化炭素が放出されるので、二酸化炭素を吸収させるために使うことには役立たない。第2は水酸化ナトリウム溶液に吸収する方法である。しかし、水酸化ナトリウムの製造は食塩水の電気分解で行うので、大量のエネルギーを必要とし技術的な意義はない。

次に、二酸化炭素回収方法として、海に二酸化炭素を吸収させる可能性を考えよう²⁸⁾。海洋への二酸化炭素の吸収については様々な試算があるが、例えば、海洋には約100億トン／年（炭素量では29億トン、2020年）の二酸化炭素が吸収されているとする計算値がある²⁹⁾。人間の排出する二酸化炭素の一部も、自然の過程で海洋に吸収される。このとき、海が大気と接触する層は主に表面であり、海が人為的に排出される二酸化炭素をより多く吸収させられる可能性はある。しかし、海に二酸化炭素を吸収させるためにはポンプでガスを送らなければならない。このためには様々なインフラが必要であり、しかも海に効率よく吸収させられるかどうかは分からない。

以上のように、工業化学を学んだ者ならば思いつきそうな化学的技術では、二酸化炭素の回収は困難であることをただちに推察できる。

5.5 地中に二酸化炭素を埋めるという新しい技術にも期待できない

化学プラントなどで二酸化炭素を回収することは難しい。このようなこともあり、地中にドライアイスとして埋めるなどという仮想技術が検討されてきた。これができれば良からうが、この種の技術のデメリットについては何も聞こえてこない。

地中に埋める方法を簡単に解説する。二酸化炭素は常温・大気圧下では気体だが、地下は高圧で臨界点（臨界温度 31.1°C、臨界圧力 7.38 MPa）を超える条件と似ている。そこで二酸化炭素を超臨界流体として貯留するというものであるが、圧力 7.38 MPa は約70気圧でありそう簡単でない。これを実現するためにどのぐらいのエネルギーを使うのか、どのようなインフラが必要なのかを試算すべきである。また、ランニングコストだけでなく、プラントの製造コストや必要なプラントの数などを明らかにして、実現可能性を示すことが研究を進める前に必要である。大きな効果が期待されることが分かったら進めて良いと思う。

一方で、現在のコストは二酸化炭素1 tあたり地下に埋めるために7000円強という試算がある³⁰⁾。仮にこれが実現できるとしても、この量の二酸化炭素を排出することに相当する石油は、石油成分を CH_2 として近似計算すると約 320 kg となる。原油 1 バレル (170 kg) あたりの価格を60ドルとすると、1 tの二酸化炭素排出に相当する石油価格は約110ドルであり、7000円の経費は大きなコスト増である。仮に、1 tの二酸化炭素を埋めるのに1000円までコストダウンできたとしてもコスト増は約10%に及ぶ。他の化石燃料でも同様である。また二酸化炭素回収によってEPRは劇的に減少し、貴重な化石燃料資源をさらに無駄に使うことになる。二酸化炭素が地球温暖化に寄与することの真偽が定まっていないので、この種の研究は細々と行うべきであるが、世界各地ですでに大規模に行われようとしている³¹⁾。この引用文献は水素エネルギーの利点に触れているが、水素エネルギーの誤りについては前報で論じたとおりで、まさに「馬脚を露わす」である。

6. ま と め

本論では地球温暖化という議論や、その対策の問題点を、自然科学と技術という観点から解説した。第1に、地球環境に関わるこの種の問題・課題を説明するために、自然科学における真理の形成過程に基づいて、地球温暖化や気候変動という仮説の位置づけを説明した。第2に、地球温暖化対策技術の特性・特徴とそれらの技術効果を説明した。この結果、地球温暖化問題の深層を分析することによって、自然科学者が自然科学の実際を市民に伝えることや自然科学教育を見直すことの重要性は、より明確になった。

産業革命以降の人間活動の急拡大によって、地球環境が悪化してきたのは事実である。最も確実な環境対策の1つはエネルギーと資源の消費量を削減することである。先進国に住む我々の身の回りには、無理なく減らせる消費はたくさんある。これに連動して、生態系の破壊を抑え、放出される有害物質・ゴミを減らせる。そして温暖化の原因が二酸化炭素ではないとしても、エネルギー消費削減によって二酸化炭素排出量は削減できる。しかし、エネルギーと資源消費の削減を進めよという政治や企業活動は主流ではない。多くの言い分は、経済活動や社会活動は拡大しながらも環境のよい社会をつくり、そのためには新しい技術導入が必要だということである。言い換えると、技術開発によってそのような社会を実現できると言ってきた。しかしこの主張には、自然科学と技術という観点からみると、誤りや誇張が含まれている。本論のような試みが、地球温暖化や気候変動に対する一般市民の理解を高めることにつながることを期待する。

7. 謝 辞

本研究の一部は、広島修道大学の支援によって行われましたので謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) I. M. Held, B. J. Soden (2000) Water vapor feedback and global warming, *Annu. Rev. Energy Environ.* 25, 441–475.
- 2) J. R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davisk, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature* 399, 429–436.
- 3) J. R. Toggweiler (2008) Origin of the 100,000-year timescale in Antarctic temperatures and atmospheric CO₂, *Paleoceanography and paleoclimatology* 23, PA2211.
- 4) A. Martínez-García, A. Rosell-Melé, W. Geibert, R. Gersonde, P. Masqué, V. Gaspari, C. Barbante (2009)

- Links between iron supply, marine productivity, sea surface temperature, and CO₂ over the last 1.1 Ma, *Paleoceanography* 24, PA1207.
- 5) H. Gildor, E. Tziperman (2001) A sea ice climate switch mechanism for the 100-kyr glacial cycles, *J. Geophys. Res.* 106, 9117–9133.
 - 6) A. Abe-Ouchi, F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi, H. Blatter (2013) Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature* 500, 190–194.
 - 7) K. C. Maguire, D. Nieto-Lugilde, J. L. Blois, M. C. Fitzpatrick, J. W. Williams, S. Ferrier, D. J. Lorenz (2016) Controlled comparison of species- and community-level models across novel climates and communities, *Proc. R. Soc. B* 283, 20152817.
 - 8) C. Loehle (2007) A 2000-year global temperature reconstruction based on non-treering proxies, *Energ. Environ.* 18, 1049–1058.
 - 9) C. Loehle, J. H. McCulloch (2008) Correction to: A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies, *Energ. Environ.* 19, 93–100.
 - 10) J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, M. Medina-Elizade (2016) Global temperature change, *PNAS* 103, 14288–14293.
 - 11) M. P. McCarthy, M. J. Best, R. A. Betts (2010) Climate change in cities due to global warming and urban effects, *Geoph. Res. Lett.* 37, L09705.
 - 12) M. Santamouris, C. Cartalis, A. Synnefa, D. Kolokotsa (2015) On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review, *Ene. Build.* 98, 119–124.
 - 13) A. Feinberg (2020) Urban heat island amplification estimates on global warming using an albedo model, *SN Appl. Sci.* 2, 2178.
 - 14) 三上岳彦 (2006) 都市ヒートアイランド研究の最新動向—東京の事例を中心に—, 1, 79–88.
 - 15) E. Monnin, A. Indermühle, A. Dällenbach, J. Flückiger, B. Stauffer, T. F. Stocker, D. Raynaud, J.-M. Barnola (2001) Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination, *Science* 291, 112–114.
 - 16) 小倉義光 (2016) 一般気象学 (第2版 補訂版), 東京大学出版会.
 - 17) 田上 康 (2019) 気候文明史 世界を変えた 8 万年の攻防 (日経ビジネス人文庫), 日本経済新聞出版.
 - 18) 荒川裕則 (2017) 21世紀の太陽光発電—テラワット・チャレンジ—, コロナ社.
 - 19) H. Svensmark, E. Friis-Christensen (1997) Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—A missing link in solar-climate relationships, *J. Atmosph. Sola-Terr. Phys.* 59, 1225–1232.
 - 20) 江守正多 (2006) 高解像度気候モデルによる気候変化予測とその信頼性, *地球環境* 11, 3–10.
 - 21) R. H. Moss, J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant, T. J. Wilbanks (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature* 463, 747–765.
 - 22) C. Teutschbein, J. Seibert (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, *J. Hydrology* 456–457, 12–29.
 - 23) T. G. Shepherd, E. Boyd, R. A. Calel, S. C. Chapman, S. Dessai, I. M. Dima-West, H. J. Fowler, R. James, D. Maraun, O. Martius, C. A. Senior, A. H. Sobel, D. A. Stainforth, S. F. B. Tett, K. E. Trenberth, B. J. J. M. van den Hurk, N. W. Watkins, R. L. Wilby, D. A. Zenghelis (2018) Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change, *Climatic Change* 151, 555–571.
 - 24) G. Flato, J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S. C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason, M. Rummukainen (2013) Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 - 25) 川村邦男 (2022) 虚構の環境技術 1 : 簡単な化学熱力学を用いて 電気自動車と水素エネルギーを説明す

- る試み, 人間環境学研究, 20, 1-13.
- 26) IEA (2021) Global Energy Review 2021.
 - 27) 四ツ柳隆夫 (1999) 21世紀のキーテクノロジーとしての化学分析と化学計測, 分析化学, 48(12), 1037-1041.
 - 28) R. Revelle, H. E. Suess (1957) Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric co, during the past decades, Tellus 9, 18-27.
 - 29) 気象庁 (2021) 海洋による二酸化炭素吸収量 (全球), https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_2/co2_flux_glob/co2_flux_glob.html
 - 30) 三ツ村崇志 (2021) 「二酸化炭素を地下に埋める」注目の技術“CCS”が抱える期待と課題【脱炭素とはなにか #5】 <https://www.businessinsider.jp/post-234099>
 - 31) Global CCS Institute (2021) 世界の CCS の動向 2020年版. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-2020-Japanese.pdf>