解決の鍵は緑にあり！
―光合成をあらゆるところで促進することが温暖化や気象災害に対する唯一の有効手段である―
THE ANSWER IS GREEN!
-Promoting photosynthesis everywhere is the only viable solution to global warming and climate disaster-

ブライアン・ウィリアムズ
Brian Williams

【Abstract】

The paper begins by briefly describing the danger of a global warming disaster on the scale of the Permian mass extinction (1). Next, it examines the misconception that fossil fuel use is the sole or even main cause of anthropogenic global warming (2). It proceeds to a review of basic soil and environmental science, and an examination of sources of Greenhouse Gas emissions, followed by a sampling of NGO and stakeholder-led efforts to restore Soil Organic Carbon (SOC), (3), in order to demonstrate the viability and effectiveness of the strategies outlined below (4). It concludes (5) by summarizing the main

points, and by pointing out that the ongoing changes in average temperature and rainfall patterns caused by global warming mean that there is only a limited window of time to implement the photosynthetic CO_2 drawdown strategies that are our only hope of salvation from climate disaster on a Permian scale.

まえがき

本論考は、独自の研究を発表するものではない。むしろ基礎科学の点と点を結びつけ、極めて明白なはずなのに一般に認知されていない真実を明らかにする目的で書かれたものだ。本論考はまた限られた読者向けの科学研究論文として提示するものでもなく、確固とした科学的根拠に基づきつつ、教養のある人なら誰でも読むことができるような一般向けの論考とすることで、できるだけ多くの読者に情報を届けることをめざしている。

本論考では、光合成活動を増加させる包括的な戦略のみが、地球規模の気象災害を防ぐための限られた時間的猶予のなかで大気中の過剰炭素を削減することができる唯一の実現可能なアプローチであることを、基礎科学に基づいて論証するように試みている。また、光合成活動が大規模なレベルで起こっている生態系のすべてにおいて、その包括的な戦略が有効である根拠を示すとともに、そうした戦略の実施から期待できる重要な副次的利点も挙げることとした。本論考は包括的な青写真となることを目指すものではまったくない。むしろ、切実に求められている「全体像」を提示

することを目指している。これは現在の地球温暖化に対する一般的な理解およびその解決へのアプローチにおける誤解や絶望という霧を切り開いて進もうという試みである。

序章

地球温暖化（Global Warming: GW）に関連する気候変動は、より適切に「気象災害」と呼称すべきである。上昇を続ける気温に起因した迫り来る災害についてはその規模および範囲が着実に明白になってきており、恐ろしいほどに実存的脅威となりつつある。

化石燃料による排出は地球温暖化の唯一の要因ではなく、おそらくは主要因ですらない。有史以来、特に過去２世紀（おおよそ産業革命の時代から）、そのなかでも特に過去２～30年間における陸地と海洋の誤った管理法により、地球全体の光合成活動が大幅に減少してしまったことに加え、その結果として有機物の酸化が急激に進み、その有機物に蓄積された膨大な量の炭素がCO_2という形となって大気中に放出されてきた[1]。さらに、温暖化への総合的な寄与度が最大なのは水蒸気であり、農地、放牧地、森林からの有機物の喪失による砂漠化や荒廃は、これらの土地の水吸収および保水に関する能力を著しく低下させた。これこそが大気中の水蒸気量増加の重大な要因となっている可能性が高いのである。

温室効果ガスの増加は主に化石燃料由来の排出問題として見られており、解決策もそうした排出量削減を中心とした、技術的なものとなっている。すでに大気中に人為起源炭素が存在していることによって、フィードバックループがすでに発生している（世界中での火災の増加、永久凍土の溶解、海底からのメタンハイドレートの放出、海氷の減少に関連した太陽光反射の低下など）。こうした事態を考えると、化石燃料の使用を削減し、さらに（可能性は低いが）廃止までしても、結果的には気候系破壊のスピードがわずかにスローダウンするだけにすぎないだろう。すでに大気中に存在する CO_2 の削減の可能性に関する議論にしても、技術的な性質のものが多い（CCS：炭素回収・貯留技術）。しかし当分のところ、CCS 技術では CO_2 やその他の温室効果ガスを経済的に大気から排除することはできないし、いずれにせよ CCS 技術では災害を回避するのに必要な時間枠の中で十分に炭素を回収するのは不可能なのだ。さらに、そうした戦略は、世界中の土壌や海洋に有機炭素を回復させることによる膨大な利点を完全に無視している。そのため、排出量削減や再生可能エネルギーへの転換は長期的には必要不可欠であるものの、気象災害を回避するのに残された時間枠では、地球温暖化を解決できる現実的な化石燃料削減計画や技術的解決策は存在しない。

これに対して、実行可能な解決策が 1 つ存在する。この解決策は、光合成活動が大規模に行われているすべての生態系において、自然過程を模倣した土地と海洋の管理法により、光合成活動を系統的に増強させることによって構成される[2]。光合成は炭素循環

の原動力であり、大気中の炭素を地球上の土壌や水域に含まれる有機的な形態、すなわち生命に有益な形に変換する。光合成による炭素の「移動」は、現在ですら人間活動をはるかに上回る規模で生じており、望ましい方向に導く。陸生植物だけでも、年間約130億ギガトンの炭素を有機的な形で隔離するに十分なCO_2を削減する。この量は、化石燃料の消費と土地の管理ミスによって排出するCO_2のおよそ9倍である。この中には海洋植物プランクトンによるCO_2削減効果はカウントされていない。

すなわち、光合成作用を促進し増強させる土地、都市、海洋の管理戦略は、それが適時に実行されれば、地球規模の最悪の気象災害を防ぐのに必要な時間内で大気から十分な炭素を削減させるだけではなく、その副次的利点だけを見ても極めて望ましい管理手段となるだろう。こうした副次的利点には、砂漠化の逆転、農村部や都市部および海洋の食料生産増加、生物多様性の促進、保水性強化と水不足の緩和、農村経済の活性化、都市のヒートアイランド現象の抑制および都市生活環境の向上、そして地球が持つ自然の美の全般的な回復が含まれる。

第1章　迫り来る気象災害

2015年の国連気候変動会議（パリ協定）を前にして、これまで国連の気候変動会議を主導してきた3人の外交官は、次の気候条約が仮に承認されたとしても、それによって温暖化を止めることは不可能であると主張した。2009年、国連気候変動枠組条約

のイボ・デ・ボーア事務局長がコペンハーゲンでのサミットで合意に達する試みが破綻に終わったときに口にした言葉は、「2015には2℃にかなうようなどんな合意も得られない。2015年合意で2℃の目標を達成する唯一の方法は、世界経済全体を閉鎖することだ」というものだった[3]。

上昇し続ける地球温暖化の脅威に対する我々の反応を特徴づけるものが1つあるとすれば、それはそのスピードや規模を一貫して過小評価してきたということだ。気候変動の規模に対する我々の評価の歴史は、基本的には以下のようにそうした評価の上方修正を繰り返す歴史だった。

- 2007年後半：気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が、地球の温度は2100年までに気候変動によって1℃上昇する見込みであると発表。
- 2008年後半：気候研究機関のハドレー・センターが2100年までに2℃の上昇を予測。
- 2009年半ば：国連環境計画が2100年までに3.5℃の上昇を予測。ここまでのレベルで上昇すれば、地球上に人間が住める場所はなくなってしまう。海洋プランクトンはほとんど全滅し、それに関連した気温変動によって多くの陸上植物が絶滅してしまうからだ。人類は、気温が基準値の3.5℃を超えた環境で生存できた経験はない。
- 2009年10月：気候研究機関のハドレー・センターが最新の予測を発表、2060年までに気温が4℃上昇する可能性を示唆。

2009 年 11 月：地球の炭素循環を監視するグローバル・カーボン・プロジェクトと気候科学の報告書「コペンハーゲン・ダイアグノーシス」が、それぞれ 2100 年までに 6℃と 7℃の上昇を予測。

- 2010 年 12 月：国連環境計画が、2050 年までに最大 5℃の上昇を予測。
- 2012 年：内輪に見積もりがちであった国際エネルギー機関（IEA）発行の「世界エネルギー展望 (World. Energy Outlook:WEO)」が、この年の報告書で 2017 年までに 2℃の上昇を表明。
- 2013年11 月：国際エネルギー機関が、2035 年までに 3.5℃の上昇を予測 [4]。

2009 年にコペンハーゲンで開催され、失敗に終わった国連気候変動枠組条約締約国会議に提出されたブリーフィングがこう報告している。「現在の CO_2 濃度に相当する長期的な海面水位は、現在の水位を約 23 メートル上回り、気温は 6℃以上高くなる。この予測はモデルに基づくものではなく、実際の長期的な気候データに基づいて作成された。」12 月 3 日、NASA のゴダード宇宙科学研究所の前所長ジェームズ・ハンセン氏を含む著名な科学者 18 名が論文を発表し、世界平均気温の上昇を摂氏２度に制限するという国際的に合意された長期目標は正しいものではなく、壊滅的な気候変動の影響を回避できるか否かの限界値である１℃に比べて高すぎると指摘した。現在の傾向を考えると、より

現実的だと思われる新たな 1℃上限はいうまでもなく、2℃上限とすることすら、ほぼ実現しそうにない[5]。

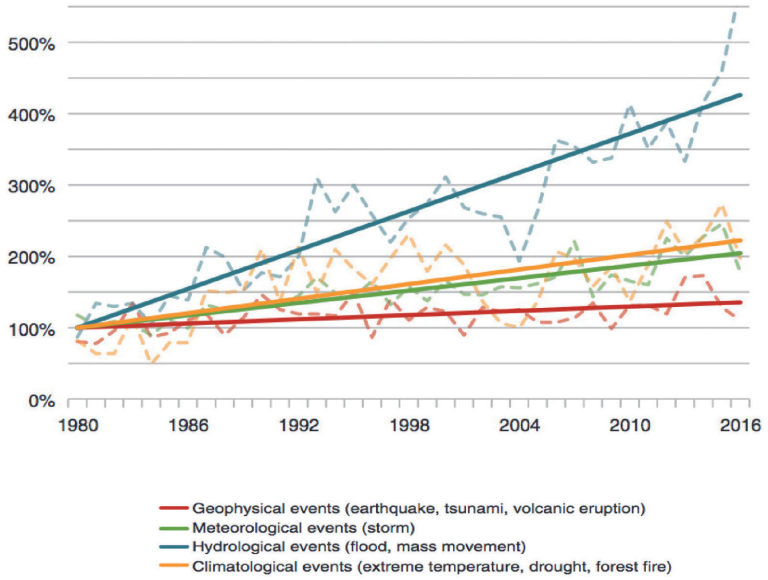


Figure 1. Trends in different types of natural catastrophy worldwide 1980–2016 (1980 levels set at 100%). M NatCatSERVICE.

Fig.1　1980-2016 年の世界の自然災害の種別傾向[6]

絶滅

　こうした絶望的な事実は深刻な悲観論を導き出す可能性があるし、実際にそれは起こっている。万事終わりなのか、もしそうなら、この破滅的な気候変動の影響はどのようなものになるのだろうか？地質記録を見ると深刻に考えさせられてしまう。つまり、

地球上で動物が誕生して５億年の間に５回の大量絶滅があった。これらの絶滅の原因は小惑星が衝突したからと考える人が多いが、５回のうちの４回は、温室効果ガスが急増してそれが温暖化をもたらしたために起こったという多くの証拠が示されている。小惑星衝突の危険に対しては世界中が非常に敏感になっている。確かに大変ドラマチックだし、多くの映画の題材にもなっている。ところが、地質記録を見れば、心配すべきなのは地球温暖化の方なのである。

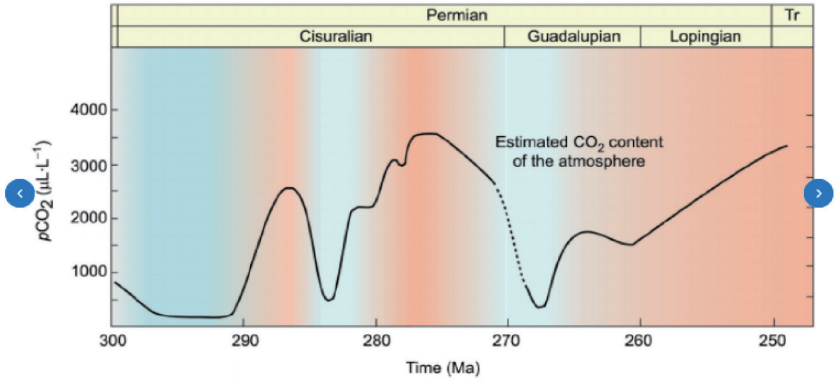
その中でも最大なのがペルム紀末に起きた「ペルム紀－三畳紀大量絶滅」としても知られる大量絶滅だが、これは地球温暖化という破局的な現象が８万年にわたって続いた結果であると考えられている。このときには、海洋生物の 96%、陸上の脊椎動物が 70% 以上絶滅したようである。化石記録に残る限り、昆虫やその他の陸生無脊椎動物が絶滅した最大かつ唯一の大量絶滅だと言う研究者もいる。一般的には「Great Dying（大絶滅）」と呼ばれている。詳細については議論の余地があり、大量絶滅の規模やその時期、作用メカニズムについてはさまざまな意見がある。だが大方の意見では、ペルム紀末の絶滅は、温室効果ガスである CO_2 とメタンの量が比較的速い速度で非常に大きく上昇したことが直接的な原因だったという点で一致している。そしておそらくシベリア・トラップも巨大な火山活動によって引き起こされたものではないかと考えられている。この火山活動が大量の CO_2 を大気中に放出しただけでなく、巨大な炭層に火をつけ、数ギガトンの炭素をさらに大気中に放出した可能性が高い。最近の研究による

と、噴火の玄武岩流で覆われたエリアの約半分は当時浅い海だった。この溶岩流の流入によって、海底のメタンハイドレートに閉じ込められたメタンが大量に放出されることになった。すでに大気中に放出されていた CO_2 にこれが加わって、結果として温室効果が急上昇した。気温上昇は赤道で最低 6℃、北極圏では最大10℃あるいはそれ以上に及んだ。その結果起こった海洋の酸性化、温度誘導による海洋低酸素現象、火災、洪水、暴風雨といった激しい気候の破局事象が、大絶滅につながったのである。

ここでの議論のポイントは、主に人間活動の影響により、現在の世界の状況はペルム紀末の絶滅の初期と相似しているという点だ。現在の絶滅速度は通常考えられる絶滅速度の100～200倍で、ペルム紀末の絶滅と同程度か、これを上回っている。そして、温室効果ガスの濃度は当時よりもはるかに速いスピードで上昇しているのが現実である。したがって、大絶滅規模の大量絶滅が再び起こる可能性は大変高い。しかもはるかに急速な時間尺度で。我々がまだ生きているうちに起こる可能性すらあるのだ。我々はこれを恐るべきことと受け止め、ペルム紀末に絶滅した生物と同じ運命をたどらないために効果的な行動を取らなければならない。

すでに、暴風雨はより猛烈になっているし、洪水はより大規模になり、より頻繁に起こっている。また、火災もより強烈になり、より頻繁に起こっている。干ばつも頻繁になり、北極や南極や世界の山岳地帯では氷河が融解しているし、海面は上昇、伝染病は拡大、絶滅率は急増している。さらに、その他の地球温暖化のもたらすさまざまな警戒すべき事象が多く現れるようになってきた。

そしてこうした災害は、まだ皮切りにすぎないのだ。次の段落は、主に 2019 年に出版されたデイビッド・ウォレス・ウェルズ著「The Uninhabitable Earth, Life after Warming（住むことのできない地球、温暖化後の生命）」に表現されている。この本は、これまで表現されたことがないほどの最大級に厳しい現実をわれわれに突きつけてくる。この本にはまた、救いがたい懐疑的な論者あるいは気候変動の否定論者のため、詳しい注記が加えられて、本文の陳述が立証されている。



Estimated atmospheric carbon dioxide levels during the Permian, shown as parts per million by volume (μ L · L − 1) and relative to pre-industrial levels (PIL: 280 μ L · L − 1), against a background of low (blue) and warm (red) global temperatures. Adapted from Montañez et al. [36] for the Cisuralian, and from Royer [41] for the later Permian. Note that there are considerable uncertainties in these estimates, which are based on modelling and proxy data, but they indicate a general warming, caused by increasing atmospheric CO 2 levels, throughout much of the Permian.

Fig.2　ペルム紀の炭酸ガス濃度[7]

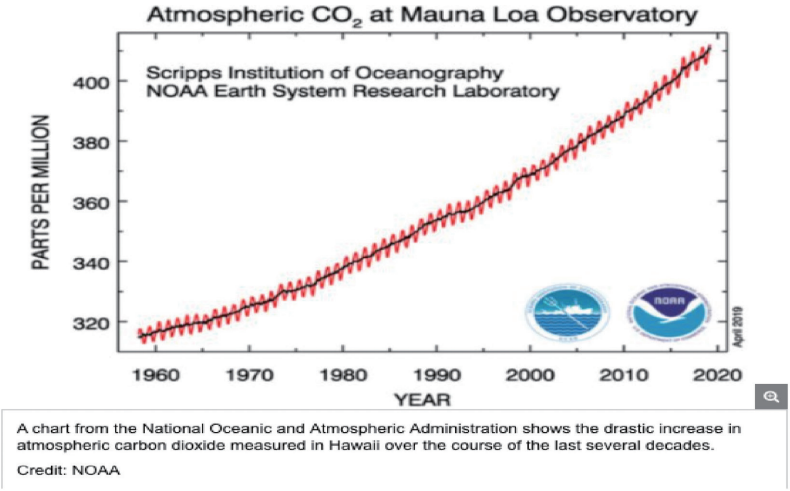


Fig.3　マウナロア観測所における大気中炭酸ガス濃度[8]

山火事

山火事はすでに恐ろしいほど多発しており、気温の上昇に伴い飛躍的に悪化するものと予想される。オーストラリアは今では毎年のように大火災に見舞われている。カリフォルニア州も同じだ。さらにグリーンランドやスウェーデン北部の北極圏といった、過去には例のなかった場所でも山火事が起きている。シベリアで山火事が発生すると、その煙はアメリカ大陸にも到達する。1997年には、インドネシアの泥炭火災だけでも20億トンのCO_2を放出したと推定されている。これは世界の年間排出の３分の１を上回る量である。そしてその排出量すら上回ったのが、2015年のインドネシアの火災だ。2019年にはインドネシアで３万５千

件以上、アマゾンで 10 万件以上の火災が発生しており、これらの火災から排出される CO_2 の量も莫大だ。山火事は、ますます破壊的になるだけでなく、大気中にこれまで以上の CO_2 を放出し、地球温暖化を加速させ、それによってまたさらに多くの山火事を発生させるという恐怖のフィードバックループなのである。

洪水

大気が温まると、より多くの水分を保持できるようになる。かつては 100 年に 1 度しか起こらなかった集中豪雨が、今では 10 年に数回は発生するようになった。ハリケーン・ハービーのような規模のものは、500 年に 1 度と言われる。1995 ～ 2015 年の 20 年間に起きた内陸部の洪水で、20 億人以上が影響を受け、15 万人以上が死亡した。この数も気温の上昇とともに増大する一方だと考えられる。2010 年 7 月、パキスタンのインダス川で起きた洪水では、国土の 5 分の 1 および 2 千万人が影響を受けた。テキサス州ヒューストンの通常の雨量は年間 1.264mm だが、2017 年のハリケーン・ハービーは、48 時間で 1 年分の雨を市内に降らせ、米国全体で約 125 兆リットルの雨を降らせた。ハリケーン・ハービーは米国史上最多の雨量を記録したハリケーンだったが、この記録が破られることは間違いない。日本語に新しい言葉が加わりつつある。もはや集中豪雨ではなく、ゲリラ豪雨という言葉が使われるようになったのである。これを書いている間にも、長野県や関東地方はハギビス（台風 19 号）がもたらした洪水から立ち直ろうとしているところだ。

ハギビスは日本にこれまでに上陸した台風のなかで最大級の台風だったが、700 億円以上にのぼる経済的損失をもたらした別の台風ファクサイ（15 号）上陸から 1 か月足らずで、日本の同じような地域に上陸した台風でもあった。これまでに計算されたハギビスの経済的損失はすでに 1,000 億円を超えており、しかもこれは最終的な合計額のほんの一部に過ぎない。2018 年 3 月 21 日のガーディアン紙の記事では、欧州の科学論文を引用して「洪水と豪雨はこの 10 年の間に 50% 増加した・・・こうした極端な気象現象は、今では 1980 年の 4 倍は発生している」と伝えている。

世界中で氷が融解して海面が上昇したことによる沿岸洪水もすでに著しくなってきており、今後さらなる悪化が予想される。西南極氷床の消失速度はこの 5 年で 2 倍以上になり、すでに崩壊への臨界点を超えている可能性がある。グリーンランドの状況も似たようなもので、氷床から 1 日に約 10 億トンの氷が融解している。以前地球の気温が 4℃高かったときには、南北両極には氷がなく、海面は 80 メートル高かった。このような状況では、想像もつかないほど居住可能な土地が失われることになる。気温の上昇を約 2℃に制限できたとしても、海面は最終的に最大で 2 メートルは上昇する。広大な土地が定期的に浸水するか、洪水によって完全に水面下に沈んでしまうことになる。バングラデシュの国土の 3 分の 2、マイアミビーチと南フロリダの大半、モルディブ、ヴェネツィアなどだ。かつて我々が泳いだことのあるビーチはすべて消滅し、地質学的プロセスを通じて新たな砂が作り出さ

れるには何千年もかかると予想される。世界の都市の大半が海岸沿いにあり、例えばジャカルタ、上海、ムンバイ、東京、香港、ロンドン、ニューヨーク、その他の数多くの都市が直接影響を受けることになる。欧州科学アカデミー諮問委員会によると、洪水は1980年以降４倍に増え、発生率はさらに加速しているという。計り知れない損失が予想される。

Fig.4　２０１０年のインダス川のほぼ流域全体の大洪水

干ばつ

同じく壊滅的なのが、残った土地の大部分で発生する可能性のある、大規模な干ばつだ。オーストラリアやアメリカ西部ではすでに長期的な干ばつに苦しめられているが、さらに悪化することが予想される。アフリカの人口密度の高い地域、南ヨーロッパ、中東やインドの大部分、南米や中国の広い地域で、深刻かつ長期的な干ばつが起こると予測されている。食料生産は急激に減少し、

飢饉が起こり、その結果戦争が蔓延することになると考えられる。すでにシリアでは、不運なこの国で展開される悲惨な戦争の主要因は干ばつだったとみられている。戦争はすでに大量の難民を生み出した。戦争以前のシリアの人口は約 2,200 万人だったが、現在ではその半数が難民と化した。600 万人以上が国内避難民となり、500 万人以上が国境を越え、難民を同化させたり世話したりする能力のない国に流れ込んだ。今後の自然災害、戦争、飢饉で難民になる人の数は数億人にものぼり、難民を世話したり再定住させたりする能力をはるかに超えてしまう。人類史上に類を見ないほど恐ろしい人道的危機に直面することになるのだ。

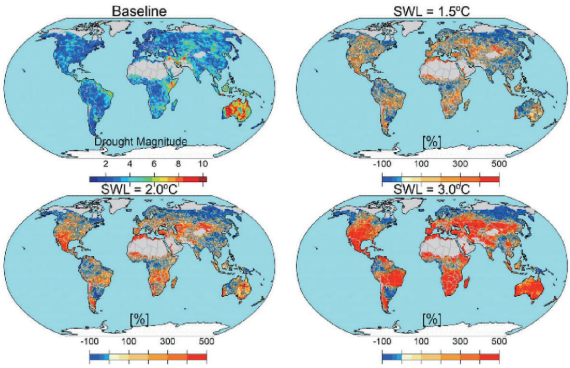


Figure 1. (top left) Drought magnitude and relative changes (%) in drought magnitude with respect to the baseline for the three specific warming levels (1.5, 2.0, and 3.0°C). Changes that are not statistically significant at the 10% level are shaded out in black. Territories excluded from the analysis are masked in grey.

Fig.5　地球温暖化の３つのケース[9]

海洋の死

地球の表面積のほぼ 70%を覆う海洋は、地球環境を主要に支配している。海洋は我々を養い、我々が摂取するすべての動物性タンパク質のほぼ 5 分の 1 を提供してくれる。季節や地域の気候は海洋によって維持されている。たとえば、メキシコ湾流がなければ、ロンドンの気候はアイスランドのような気候となり、ヨーロッパははるかに寒い場所となってしまうのだ。海洋に生息する植物プランクトンは、大気中の酸素の 50 ～ 85%を生成する。さらに大規模な熱吸収により、海洋は地球の平均温度を調整する。海洋は広大であるため人間の影響を受けないように見えるが、現実はそうではない。上に挙げた海洋の生態系サービス機能のすべてが、気候変動によって危険にさらされているのだ。これを次の 4 つの段落で説明する。

魚の個体群は暖かくなった水を避け、赤道からすでに北や南に数百キロメートル移動している。ペルム紀末の絶滅の最中に最も苦しんだのが冷水性の魚だった。冷水の欠乏により、逃げるところがなくなったからだ。冷水魚は最も大切な食料源でもある。直感では理解し難いが、冷たい水に逃げ込んで何らかの生存のチャンスがあったのは、我々の時代には商業的にも栄養的にも価値が低いと考えられている熱帯性の魚だった。CO_2 吸収の増加による海洋水の酸性化の進行（ソーダ水を想像してほしい）は、貝殻を形成する種が深刻なリスクにさらされていることも意味する。すでに太平洋岸北西部のカキ農家はカキの繁殖に苦労しており、この地方名産のハマグリの個体数も減少している。海洋の酸性化は

軟体動物（おそらく節足動物も）、そして動物プランクトン全般に打撃を与える。すべての海洋種の幼虫期が深刻なリスクにさらされていることにもなる。こうした現象のすべてを予兆とすれば、今後の世界の魚介類供給は一体どうなるのだろうか？

世界の海流システムも温暖化の影響を受けやすい。メキシコ湾流がアイスランドに近づくと、その水は蒸発により冷やされ、塩分濃度が上がって密度が高くなる。こうして冷却され密度が高くなることでより重くなった水は、北大西洋の深層まで４キロメートル以上沈み込む。大西洋子午線循環（AMOC）と呼ばれるこの現象は、全世界の海流システムの駆動機構あるいはコンベアベルトと呼ばれており、現在の世界の気候システムを作り出し、安定させる主要因となっている。危険なのは、北大西洋に到達する水の温度が上がり、グリーンランドの氷河から融解した淡水が着実に増加し、塩分濃度が低下して密度が低くなることである。すでに AMOC が減速している兆候がみられる。過去には、数百立方キロメートルという想像を絶するほど大量の融氷水が突然放出されるという現象が起きていることから、グリーンランドからの氷河湖決壊が起こる危険性が明確に予測される。実際これにより、AMOC が完全に止まってしまう可能性もある。そうなれば巨大な規模の気候変動が起こる可能性が高い。北ヨーロッパは氷河期状態になり、太平洋におけるエルニーニョ現象はこれまでに経験したことのないほど大規模となることで干ばつと壊滅的な洪水の両方が引き起こされ、さらに海洋は無酸素化する。そうした現象が地球規模で気候に与える影響を予測するのは不可能だが、次の

2 つのことだけは言える。1 つは、影響は莫大なものとなるだろうということ、もう1つは、そうした事態に遭遇しなくてすめば、その方がずっと幸せだし安泰であろうということである。

世界の海洋が人為的排出の大部分を着実に吸収していなかったら、大気における二酸化炭素の増加ははるかに大きかったことだろう。この海洋吸収は地球温暖化の開始を遅らせたが、一方では海洋がより酸性化していることをも意味する。一定のしきい値を過ぎてしまうと、サンゴ礁、貝殻を形成する動物、海洋プランクトンに対する影響は破壊的なものとなる。これにより、我々の食料の供給やサンゴ礁という防壁の喪失による海岸侵食の加速だけではなく、大気の酸素含有量にさえ影響が及ぶことになる。海洋の酸性化と海洋の無酸素 / 低酸素状態の組み合わせが、ペルム紀末の海洋大量絶滅の主要因であると考えられている。 そして今、我々は再びその危機に瀕しているのである。

観測された海洋温暖化の原因として最も可能性の高いのは、海底地熱活動の増加であると主張する人もいる。しかし、その海洋温暖化と化石燃料の燃焼や破壊的な土地管理計画による大気中の炭素の増加との直接的な相関関係を考えると、その主張が正しい可能性は限りなく低い。海洋温暖化の原因としてはるかに可能性の高いのは、人間活動の結果として炭素を含有する温室効果ガスが大気中に大量に移動することによって引き起こされる地球温暖化である。こうして海洋が温暖化しているということは、海洋の気候変動調整能力が低下しているということなのだ。また、海洋生物はより暖かい水に住むことになるため、結果としてより多く

の酸素が必要になる。これが地球温暖化によって引き起こされる無酸素や低酸素状態が増加しているのとちょうど同じタイミングで発生することになるのだ。スタンフォード大学の最近の研究では、酸素レベルの低下と酸素需要の増加がぶつかり合ってしまったことが、ペルム紀末の海洋絶滅の主要因の１つだったのではないかという学説を提案している。

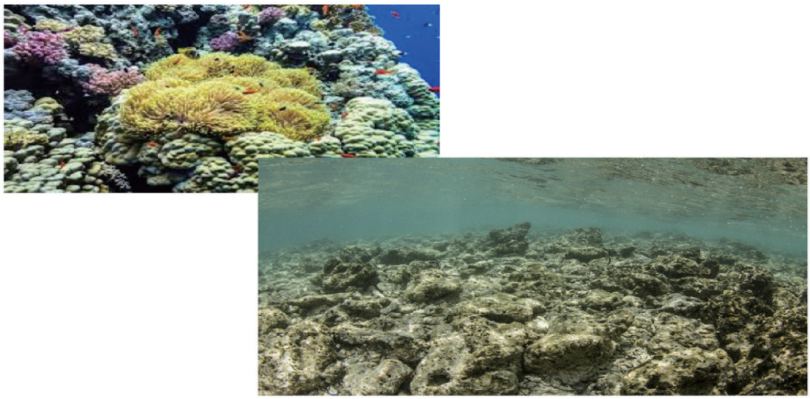


Fig.6　これが海洋の未来でしょうか？[10]

大気汚染

　これだけの災害だけでも危機的なのに、これに加えて、我々はすさまじいほどの大気汚染の増大にも直面しているのだ。干ばつから引き起こされる砂塵の嵐から山火事の煙まで、地球温暖化が進むにつれ悪化する汚染である。大気質指標では、さまざまな汚染物質を追跡し、その程度に基づきリスクを段階的に分類している。51 ～ 100 の数字が検出されると最初の警告が出される。201 ～ 300 では、「母集団における呼吸器への影響が大幅に増

大」などの警告が出される。上限は 301 ～ 500 の範囲で、この範囲では「すべての人があらゆる屋外活動を避ける必要がある」という勧告に加え、「心肺疾患の深刻な悪化および心肺疾患を持つ人や高齢者の早死の可能性」という警告が出される。北京では 2013 年に、大気質指数がこの上限範囲の倍となる 993 のピーク値に達した。999 の指数は 2017 年にニューデリーでも観測された。また 2017 年には、カリフォルニアの山火事により、サンフランシスコ周辺の指数は 400 を超え、カリフォルニア州のナパ郡では 500 近くにも達した。2018 年には、山火事の煙により、シアトル周辺では健康な人でも屋外での呼吸が危険になるほどの指数に達した。ある研究によると、「1997 年後半にインドネシアで起きた山火事の煙への曝露は、15,600 人以上の小児、幼児、胎児の死亡をもたらした」。これらの記録的な火災の記録は 2015 年にさらに破られ、この年には 250 万ヘクタールが燃え、経済損失は 2004 年の津波による経済的損失をすら大幅に上回る、160 億米ドルに達した。2019 年は 35,000 件を超える火災と「危険」レベルの大気汚染により、2015 年に匹敵するかこれを更に上回ろうとしている。

大気汚染はすでに毎年何百万人もの死者を出している。世界中の 6 人に 1 人の死因が大気汚染に起因する。また死亡に至らなくても、認知機能の低下、子供の認知発達への影響、喘息、各種の癌、脳卒中、心臓病など、あらゆる種類の健康被害をもたらしている。最近の研究では、大気汚染は、記憶力や注意力の低下、自閉症スペクトラム障害の増加にも関連付けられている。この問

題や関連した大気汚染問題は、地球温暖化が進むにつれ悪化していく一方である。

疫病・伝染病

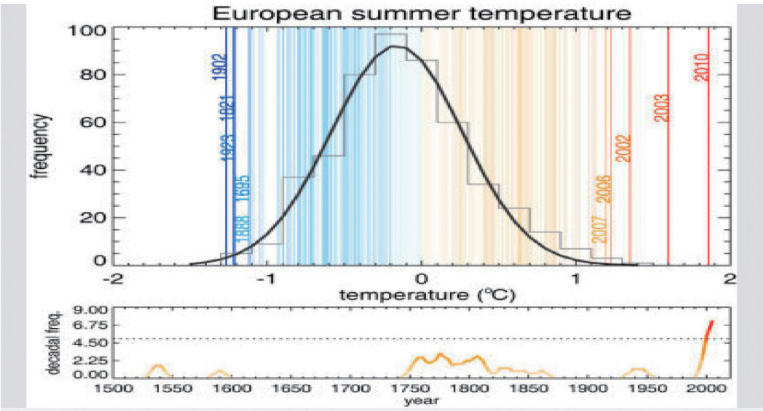
さらに、疫病や伝染病が世界中で復活することになると予想される。そのスケールは中世の黒死病にも匹敵するものとなるだろう。あるいはアステカ帝国やインカ帝国を滅ぼすことになった疫病や伝染病だ。これらの疫病や伝染病は征服者（免疫を持っていた）が新世界征服の際にそうとは知らずにもたらし、結局はこれが征服にあたってどんな武器よりも効果的な武器となったという。こうした疫病・伝染病は２方向から発生することになると考えて間違いない。第一に目前に差し迫った課題として、蚊やダニをはじめとする病気を媒介する各種の虫類が、温暖化による気温上昇に伴って赤道より、北へも南へも広がる。すなわち、マラリア、黄熱病、デング熱といった古代から我々を悩ましてきた疾病に加え、ジカといった新種のウイルスによる疾病が、ニューヨークやベルリンといった、これまでそうした疾病など聞いたこともなかった地域に発生するようになるだろう。第二の方向は、きわめて意外なことかもしれないが、既知および未知の病原体が両極の氷の融解によって放出される可能性がある。これらの氷には、スペインかぜ、腺ペスト、天然痘、炭疽症といった既知の致命的な病原体が含まれている。これらが日光や空気、そして潜在的な犠牲者に再びさらされることによって、そうした病原体の生命が復活しやすくなると考えられる。すでに、氷が溶けて露出したトナカ

イの死骸から生じた炭疽症の集団発生のケースも出ている。だが、より古代の氷も溶け出しており、これには人間が地球に存在する前の時代までさかのぼる微生物が含まれている可能性もある。これらのいずれかが生きた病原性のものであるとわかっても、地球上でそれに対する免疫を持つ人間や動物がいる可能性は全くない。事実上、熱帯と北極・南極の両方から拡大する伝染病に我々が挟まれてしまう可能性も出てくる。世界は現在グローバル化され相互につながっていることから、病気が発生するとほんの数日で世界中に広がる可能性が高い。

熱死

IPCC は、排出が今後も現在の道を辿るとしたら、2100 年までの平均気温上昇は中央値予測で4℃になると予測した。その時点になると、地球の赤道地帯は文字通りすべて居住不可能となってしまう。インドや中東の都市は暑くなりすぎて、夏に外に出ると命さえ落としてしまう可能性がある。2℃の温暖化ですら、同様のシナリオが頻繁に発生するようになるだろう。そこで重要な要素となるのが、「湿球温度」と呼ばれるものである。これは湿度と温度を組み合わせた測定値で、温度計の球部を湿ったガーゼで包み、空気中で円状に振って測定する。基本的に、蒸発冷却の可能量を示すものである。人間は汗をかき、犬や鳥は息を荒くすることによって生じる気化冷却を利用する。だがこれも、湿球温度が 35℃に達すると不可能となる。その時点で、汗の蒸発は熱エネルギーを除去せず、したがって皮膚を冷却せず、人間は日陰

にいてもほんの数時間で湿球熱によって生きていられなくなる。現在は、湿球温度は大半の地域において最大値が 26℃または 27℃だから、8℃程度の余裕がある。しかし、空気が暖まると水蒸気量をより多く保持できるようになることから、極端に大きい水蒸気量と高い気温の組み合わせは、いかにも起こりそうな脅威である。すでにペルシャ湾では 32℃近くという湿球温度が記録されている。そしてそのような壊滅的なレベルに達する前にも、労働が困難または不可能となり、来たる熱波で多くの人の命が奪われることになるだろう。2003 年のヨーロッパの猛暑により 35,000 人以上が死亡し、2010 年にはロシアで 55,000 人が死亡した。酷暑だけでも、今日我々が持つ観念をはるかに超えるほどの壊滅的な影響を与えるのは明らかだ。



The 2010 heatwave (see at the right side of this picture) shattered all the records in terms of the deviation from the average temperatures.

Fig.7　2010 年の熱波は平均値から大きく乖離[11]

フィードバックループ

より暖かい大気はより多くの水蒸気を保持する。しかも水蒸気は温室効果ガスだから、これがさらなる温暖化につながっていく。北極が温暖化すれば、より多くの氷が融解することになる。これは海面が暗い色の方向に変化する結果を招いて熱の宇宙への反射率が低下することにつながり（アルベド効果による低下）、北極の気温はさらに上昇する。

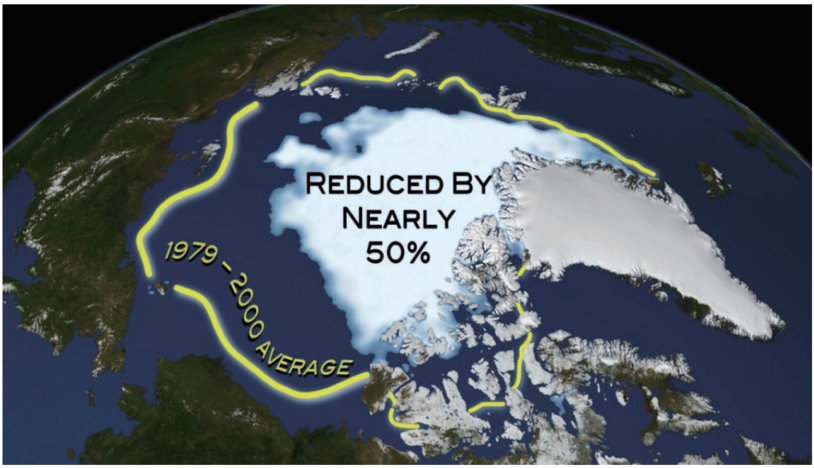


Fig.8　アルベド効果の減少[1 2]

気温が上昇すると山火事が増え、樹木の数が減るとともに植生で被われた部分が縮小するため、光合成による炭素の吸収量および貯留量を減少させる。その結果、大気中の CO_2 濃度が上昇し、

気温がさらに上昇する。山火事や干ばつがなかったとしても、気温が上昇すると、植物の成長への悪影響、熱帯および温帯の森林の広大な地域におけるいわゆる「立ち枯れ」、その結果として、炭素吸収の低下による大気中の CO_2 の増加などさまざまな影響が生じる。シリアや中米でも見られるように、干ばつは飢饉をもたらし、戦争を通じて、難民の大量発生につながる。プエルトリコのハリケーン・マリアの余波に見られるように、気候災害は単独で襲った場合でも我々の対応能力を圧倒してしまう恐れがある。今ではいくつもの気候関連の大災害が同時に、あるいは期間をおかずに次々と襲い、そしてその後 1 ～ 2 年以内に再び襲う可能性も出てきている。ちょうど今年、日本では 1 か月の間に 2 つの台風が東京とその周辺地域を襲い、記録的な洪水をもたらした。被害は初期推定だけでも 1,000 億円を超える。カリフォルニア州では干ばつに続いてモンスーン規模の異常な大雨が降り、数ヶ月の間に凄まじい火災が壊滅的な泥流をもたらすという事態が起こった。その結果、まず植生が豊かに成長した後、その植生が翌年の干ばつで枯渇して大量の燃料となって残り、これが新たな大規模山火事を招いてしまったのである。

すべてのフィードバックループの母体は北極圏の土壌に数百万年にわたって蓄積された有機炭素の膨大な貯留量の放出と考えられ、その量は推定で 1,400 ～ 1,850 ペタグラム（1 ペタグラムは 10 億トンまたは 1 ギガトン）に相当するといわれる。この炭素のほとんどが地表から 10 フィート以内の、溶けやすい表土に貯留されている。比較のために書いておくと、1850 年からこれ

までに化石燃料の燃焼やその他の人間活動によって排出された炭素の量は、推定で 350 ペタグラムである。NASA ジェット推進研究所の研究員であり北極圏貯留層脆弱性実験（Arctic Reservoirs Vulnerability Experiment: CARVE）の炭素調査部門長も勤めるチャールズ・ミラー氏によると、「永久凍土の温度は北極の気温よりもさらに急速に上昇しており、過去 30 年間で 1.5 ～ 2.5℃も上昇している」[13]。永久凍土層が溶けると、これらの有機炭素堆積物が二酸化炭素やメタンとして大気中に放出されることになる。気候変動によって北極の気候条件が乾燥すればするほどより多くの炭素が二酸化炭素として放出され、気候条件が湿潤になればなるほど、メタンとして放出される。そうなれば地球温暖化に大きな影響を及ぼすことになる。メタンは二酸化炭素よりもはるかに強力な温室効果ガスだからだ。その温室効果は 100 年の期間では二酸化炭素の 22 倍、20 年の期間では最大で 105 倍にもなる。このまま湿潤状態での温暖化が進むと、貯留された有機炭素の大部分がメタンとして放出され、その影響はすさまじいものとなることが予想される。メタンはまた、メタンハイドレートの形態（一種のメタンのシャーベットのようなもの）で、海底（主に北極圏）に 1,000 から 10,000 ギガトンという驚異的な量が貯留されている。

2013 年 7 月に『ネイチャー』誌[14]で発表された研究によると、東シベリア海底の北極圏永久凍土の融解により、メタンが 50 ギガトン分の「げっぷ」をいつでもしかねない状態であること、温室効果ガスの影響が、20 年期間で換算した場合、少なくとも

1,000 ギガトン分の二酸化炭素に相当することが示されている。北極では、幅最大 150 キロメートルの活発かつ成長中のメタン湧出域が発見されている。ある科学者は、そうした海洋をセルツァー水（炭酸水）の広大なプールに見立てた。2010 年夏から 2011 年夏にかけて、幅がわずか 30 センチメートルから 1 キロメートル以上に成長するメタン湧出域が科学者チームによって発見された。この成長速度は強い非線形性をもち、指数関数で表すと 3,333% の増加になる。実際のところ、本論考ですでに説明したペルム紀末の絶滅では、絶滅に至るとどめを刺したのはこうしたメタン放出現象だったのである。人類やその他の地球上のほとんどの生命が絶滅してしまうほどの規模で気候災害が起こる可能性は、考えられているよりもはるかに現実的で、はるかに近くまで来ているのだ。これは我々人類という集団の破滅を決定づけるものであり、地球規模のホロコーストであり、以前の 5 つの絶滅に匹敵する規模の「最終的解決（人類抹殺）」なのだ。ペルム紀末の 8 万年に対して、産業革命以の数百年間でそれに匹敵するような増加があるとすれば、もしかすると数十年以内にも、これまでのすべての絶滅のなかで最大規模の、最も多くの種を巻き込む大量絶滅を引き起こす可能性があるのだ。効果的な対策の時間枠は急速に短くなるばかりだ。効果的な緩和戦略を見つけ、今すぐに行動を起こす必要がある。

Fig.9　上：溶け行く永久凍土のメタン爆発のクレータと
下：メタンメタンハイドレートの大量のベント[15]

第２章　温室効果ガス排出源の特定

本論考を執筆している 2019 年後半にも、2020 年の米大統領選挙運動はすでに過熱してきている。総選挙で大統領に選ばれる日を目指して、さまざまな民主党員が民主党候補者の地位を競い合っている。その一人がバーニー・サンダース氏である。氏は大体において聡明なアイデアに満ちた政策を持つ進歩的なポピュリストであり、近年積み重なってきた驚異的な所得格差の是正に主眼を置いている。地球温暖化対策に向けた提案もしている候補者でもあり、氏の提案は同種の提案のなかでも最も進歩的なものといえる。他のどの候補者より地球温暖化対策に予算を多く（合計 16.3 兆米ドル）使うことを推奨しており、しかもそのすべて

を連邦政府の予算とするという。サンダース氏の主張によれば、その予算のほとんどが短期間で回収され、長期的な経済的および社会的利益は支出をはるかに上回るものとなる。その主張には信憑性があり、多くの意味で注目に値する提案だといえる。それは、化石燃料の排出や関連の汚染の削減に大いに貢献するだけでない。安定した化石燃料供給の確保を目的として、歪んでいる上に大変破壊的だともいえる米国の外交政策や極端な軍事支出の修正にも役立つ提案である。ここまでは、大変素晴らしいといえる。だが、落胆すべき明瞭な問題点は、現時点において最も進歩的といえるサンダース氏の計画でさえ、化石燃料燃焼を大気中の温室効果ガスのほぼ唯一の要因とみなしていることだ。そのため、その解決策も、化石燃料依存度の低減や最終的な排除だけに基づいたものとなっている。

これはサンダース氏に限ったことではない。地球温暖化に関する文書や解決策の提案をざっと見直すと、化石燃料の排出に焦点を当てたものが圧倒的に多い。当然のことながら一般大衆も、仮に破滅に近づいていることを心配していた場合であっても、解決策発見の取り組みのすべてを化石燃料使用の削減と排除に集中させる必要があるのは明らかだと考えてしまっている。残念ながら、それは正しくはないのだ。化石燃料の排出が問題の非常に大きな部分を占めていることは否定できない。また、化石燃料使用を削減し排除するために戦う活動家の目標は立派なもので、副次的な利点も数多くある。だが、化石燃料は問題の一部にすぎないということについて一般的には認識されていない。化石燃料による排

出は、決して温室効果ガスの唯一の要因ではないし、おそらくは主要因ですらない。特に産業革命以来の長年にわたる破壊的な土地管理政策が世界中の土壌および海洋から有機炭素の損失をもたらし、その炭素は他の場所へと移動していったのだ。それらは大気中に入り込み、結果的に化石燃料に十分匹敵する規模の二酸化炭素排出となってしまった。悲劇的なことに、この事実は一般には認識されていない。それゆえ、地球温暖化に対する解決策に対しては、土地管理および海洋管理の実践を見直すこと、すなわち、放牧および作物農業、林業、都市開発、さらには海洋の野生生物管理を抜本的に見直すことが必要なのに、こうした現実的課題は認識されていないのだ。はっきり言って、地球温暖化の傾向を逆転させるのに必要な時間枠と規模でCO_2削減プロセスをすぐに開始できるのは、これらの解決策だけなのである。その詳細は次の第３章で説明することにする。

要点をまとめると、現在、大気中の温室効果ガスの蓄積は主に化石燃料の排出問題だと考えられており、その解決策も主にこれらの排出削減に焦点を合わせた、技術的なものとなっている。すでに大気中にある人為的炭素の量と、すでに始まっているフィードバックループ（地球全体における山火事の増加、永久凍土の融解、海底からのメタンハイドレートの放出、海氷消失に伴う日光の反射減少など）を考えると、化石燃料の使用量を減らしたり、（可能性は少ないが）使用しないことにしたりしても、気候システムの破壊のスピードがわずかにスローダウンするだけにすぎない。大気中にはすでに２℃あるいはそれ以上の温暖化をさらに進

めるのに十分な炭素が存在している。上記で説明したように、このレベルの温暖化だけでも、これまで人類がなんとか持ちこたえてきた規模を超えた災害をもたらすことになる。そしてそのレベルまで温暖化すると、メタン放出フィードバックループを引き起こす危険性が非常に大きくなる。つまり、地球上のほとんどの生命にとってゲームオーバー（生存終了）ということだ。化石燃料の使用量を減らしたり徐々に廃止したりするだけでは、問題解決には手遅れなのだ。さらに、大気中の炭素を積極的に引き戻し始める必要もある。さてそこで問題となるのは、どうすればよいかということだ。

大気中にすでに存在している CO_2 を引き戻すことを可能にしようとする議論の大半は、本質的に技術的なもの（CCS、すなわち炭素の回収・貯蔵技術）であり、その多くはお金も相当かかりそうだ。だが、正直に言わせてもらおう！ これでは我々を救うことはできない。現在あるいは将来開発される CCS 技術も、大気から CO_2 やその他の温室効果ガスを経済的に取り除くことは不可能である。万が一、将来予想に反して、より効率的で経済的な CCS 技術が開発されたとしても、災害を防ぐために必要な時間枠のなかで、必要な規模の炭素を回収する目的で CCS 技術を導入することも、また不可能なのである。したがって、排出量の削減と再生可能エネルギーへの移行は長期的には不可欠ではあるものの、気象災害を防ぐために残された時間枠の中で、温暖化を解決できる現実的な化石燃料削減戦略も CCS の技術的解決策も存在しない。

以上で述べた状況は、我々がもうすぐ文字通り恐竜の二の舞となって消える運命にあることを意味するのだろうか？ 自己中心的で技術的原理主義的な考え方に縛られていれば、おそらくそうなるだろう。この考え方はほとんど宗教ともいえるもので、我々は何でも自分たちだけで行うことができて、技術的な解決だけがこの世界における唯一の答えであり、技術は我々を救うことができるし、救ってくれるだろうというものなのだ。我々はそんなに賢いのだ、と。こうした考え方が、原子力発電から排出される高レベルの放射性廃棄物の問題は解決可能という過信を、50 年以上もの間支えてきたのだ。こうした解決策は、今後 50 年後もまだそのまま残っているだろうが、現代技術の能力に対する信頼を高めてくれるなどとということにはならない。この解決策では、地球温暖化に関して指数関数的に山積みになってゆく問題を解決することはできないからだ。我々は、狂気ともいえるほど自己中心的で過剰な自信から自分自身を解放し、たかが数世紀という限られた歴史しか持たない現代の人間の技術のみにこだわるのではなく、もっと視野を広げる必要がある。数十億年にわたって進化を続ける「自然の技術」に注目する必要がある。我々が解決策を見つけられるとしたらここしかなく、しかも地球上の他の生命との協力を伴う解決策だ。そして、この生命は、緑色をしているのである。

第３章　化石燃料以外の温室効果ガス排出

2019 年 10 月 25 日付のニューヨーク・タイムズ紙に興味深い記事が掲載された。「気候変動は私たちが考えている以上にコストがかかる」と題されたこの記事の主意は、経済学者が気候変動のコストを過小評価しているということだ。記事の筆者はこれを科学者による気候変動自体の影響や速度の過小評価と比べ、「同じくらい悪いか、さらに悪い」としている。そのあと筆者はその理由を分析しているが、その結論を読んでいて私が気づいたのは、こうした科学者と経済学者の両方に見られる過小評価の背後には、非常に類似したメカニズムがあるのではないかということだった。まず経済学を見てみることにしよう。

まず第 1 に言えることは、経済学におけるリスク推定が通常の場合、経験に基づいていることだ。統計学者いうところの「定常性」である。だが、状況の変化が大きすぎる場合、その過去の経験はもはや信頼できる目安ではなくなり、定常性の適用はもはや不可能になって、推定はますます不確実なものになってしまう。気候変動は全般にわたって間違いなくこの状況に当てはまる。悲しいかな、経済学者は概して、気候災害に対しては一時的な「基準からの」逸脱というアプローチで接してきた。これまでに前例のない、長期的で悪化し始めたばかりの問題は扱ってはこなかった。我々が直面している根本的な破壊についてはほとんど何も考慮に入れていないのだ。この問題が人間の経験の領域の外にありすぎる、というだけの理由でそのようになってしまうのである。

こうした危険な過小評価につながる第２の問題は、リスクによっては適切に定量化できない（あるいはそう考えられている）ものがあるため、計算の中にそのようなリスクを含めていないことに起因する。経済学者は「でっち上げだ」と批判されたくないものだから、それらのリスクや要因を除外してしまうのだ。ある何かが簡単にまたは完全に定量化できないからといって、それが実在しないとか重要でないことにはならない。こうした２つの要因に起因した経済的損害の過小評価によるダメージは大きい。政府の政策にしても、その政策に大きな影響を与えうる国民の懸念にしても、それらは損失の経済的評価に大きく基づいているからだ。しかも今、そうした評価は信頼できるにはほど遠いことが判明してきている。大多数の人にとって、経済的な数字よりも科学的な説明を把握する方がはるかに難しいことから、おおむね経済的な数字に頼ることになる。かくして憂慮すべき現実が視界から隠れてしまう。我々が取り返しのつかない、壊滅的な過ちを犯している理由はそこにもあるのだ。

科学者もある程度は定常性に惑わされているかもしれないが、経済学者ほどひどくはない。ただ科学者は、炭素の大気への大規模な移行について重要な要素を見落としており、有益な有機化合物としての形で地球の土壌や海洋に存在する炭素が、有害な温室効果ガスとしての形で大気中に存在する炭素へと移行する規模を認識できないでいる。さらに科学者は、「原因は化石燃料の排出にある」という先入観を持ち、この点にひたすらこだわろうとする。そのため、土壌有機炭素や海洋由来の有機炭素の損失が非常

に多様であり、定量化するのが難しいことを理由に、ほとんど道を踏み外している。上記の段落の繰り返しとなるが、科学者は「でっち上げだ」と批判されたくないものだから、問題をすべて排除してしまうのだ。こうして結果をひどくゆがめることによって、惨事を生み出すことになる。我々は、地球温暖化の原因の大半を理解し損なうだけでなく、より大事なこととして、効果的な解決策や緩和戦略を思いつくことができなくなるのである。したがって、大気中の人為的炭素の大部分がどこから発生したかが理解できれば、効果的な解決策を生む道も開けてくる。化石燃料の消費を削減する必要があるのは確かだが、それよりも最も迅速に効果が上げられる解決策がある。それは、再生農業や海洋管理実践を伴う方法なのである。

ラタン・ラル博士と世界規模の土壌有機炭素消失

土壌有機炭素の消失と温室効果ガスの急増を関連付け、その定量化を真剣に試みた最も著名な科学者の一人が、ラタン・ラル博士だ。オハイオ州立大学の土壌科学の特別栄誉教授であり、同大学炭素管理・隔離センターの局長でもあるラル博士は、2007年にノーベル平和賞を受賞したIPCCパネルのメンバーであり、2019年の日本国際賞を含む数多くの賞を受賞している。博士は学者としての人生を土壌有機炭素（SOC）枯渇の研究に費やし、その消失を予測するためのベースラインを与える方法論を確立した。博士の方法は、劣化した土壌とその近くの非攪乱の森林土壌を比較するというものだ。博士の研究により、農地土壌から50

から 80%という甚大な量の土壌有機炭素が世界規模において失われていることが実証された。ラル博士に言わせると、世界の土壌は銀行口座のようなもので、通貨となるのが炭素である。そして、現在我々は破産寸前であるという。博士の洞察で重要なのは、土壌へ炭素を再貯留させること（SOCIAL 再隔離）によって劣化した土壌が回復できるということ、そして、これが最も重要なのだが、地球温暖化を緩和できるということだ。この説は 2010 年に発行された論文で包括的に説明されている[16]。

同論文では、大気中 CO_2 濃度の 1750 年の 280ppm から 1999 年の 367ppm（2019 年の現在では 410ppm を大きく上回っている）への増加は、推定値で 270+30PgC の化石燃料燃焼排出、そして 136+55PgC の土地利用変化に起因するとしている。要するにラル博士は、大気中の CO_2 増加の約 3 分の 1 は自身が数量化に成功した土地利用変化に起因すると宣言したのである。博士は、累積吸収能力の最大 60PgC の場合には、0.6 ～ 1.2PgC/ 年の速さで土壌有機炭素を隔離し、すでに劣化し砂漠化した土壌を回復することが地球規模で可能であると推定した。博士は、土壌有機炭素隔離は、21 世紀の初期数十年間における、気候変動緩和にとっての費用対効果の高い戦略となると述べた。博士は、陸上生物圏における C 隔離の潜在能力は、大気中の CO_2 が 1 世紀にわたって 55ppm 減少するのに相当すると推定している。これにより 400ppm 未満に戻すことができるので、非常に我々を励ますような推定であるのだが、現実的にはこれでは我々を救うのに十分とはいえない。というのも、もうすでに 2010 年代の終わりに近づ

いた今でも、我々は非化石エネルギーに基づく経済へと移行させる努力をほとんど何も行っていないからだ。ラル博士は優れた科学者かもしれないが、注意を促すという点では思い誤っていると思う。土地管理ミスから生じた排出の量の評価においても誤りがある。さらに、光合成による炭素隔離に関して、大気中の CO_2 を削減する方法を農業のみならず、地球の表面で大規模な光合成活動を行っているあらゆる生態系に適用した場合に気候変動の逆転が始まる可能性があることの評価も誤っている。アリゾナは 1 世紀前にはその大部分が草原だった。それはオーストラリアの大部分も同じだ。どちらの土地も今では不毛な土地になっている。だが土壌有機炭素の基準値を決めるのに必要な手つかずの森林が隣接していないため、これらの土地は計算式には参入されてはいない。海洋からの植物性プランクトンの減少に関しても同様である。2010 年 7 月 29 日付で公開された『サイエンティフィック・アメリカン』誌には、「植物プランクトンの個体数が 1950 年以来 40%減少」と題する記事があり、副題として「海洋の食物連鎖網と世界の炭素循環への影響」と記載されている。土壌有機炭素減少の推定においてはこれらの影響は考慮されていない。起こっている場所が海の中だからだ。だが、海洋からの減少が地球の表面の有機形態から大気 CO_2 へと移動した炭素量の大部分に相当するのは確かだ。そしてその量は、光合成活動の大幅な低下と直接関係している。重要なポイントはここでも、地球温暖化の要因としての光合成活動の低下が一貫して大きく過小評価されていることだ。大気中に移動して失われる非化石燃料の有機炭素についてはラル博士も推定値を出している

が、大まかに推測しても、この２倍の量は失われていると考えられる。これは、この消失量（排出量と呼んでもよい）が化石燃料使用による炭素排出量にまさることを意味している。

アラン・セイボリー氏による世界草原のホリスティック・マネジメントを用いた地球温暖化の逆転

ラル博士とまったく同じ主張（気候変動を逆転させ始めるのに十分なレベルまで、大気中の炭素量を低下させるに必要な光合成による炭素隔離の可能性について）を草原に関して行う、驚くべき人物が存在する。生態学者のアラン・セイボリー氏である。ジンバブエで野生生物を長年管理してきた経験に基づいて、セイボリー氏は放牧地管理に対するシステム思考アプローチを開発した。このアプローチでは、捕食者を避けて新たな牧草地を探す草食動物の大群の動きを模倣している。氏はこれを「ホリスティック・マネジメント」と呼び、この方法が適用されたすべての場所、すなわち、すべての大陸で驚くべき成果を上げた。セイボリー氏の考え方は、2013 年の TED トーク「砂漠を緑化して気候変動を逆転させる方法」で最もわかりやすく説明されている。セイボリー氏は、そのトークや著書の中で、ホリスティック・マネジメントを世界中の草原の半分にも満たない領域に適用しただけでも、家畜生産は 4 倍になり、砂漠化を逆転させることができること、そして最も重要なこととして、地球温暖化を逆転させるのに十分な炭素を必要な時間枠内（10 年ほど）で隔離できることを主張している。これは並外れた主張であり、批判も受けているが、氏

が各国で行っているパイロットプロジェクトは否定しがたいほどの驚くべき成果を生み出してきた。セイボリー氏のホリスティック・マネジメントと革新的な作物農業アプローチの両方を組み合わせて実施し、氏の土壌形成の急速な成功に倣う人たちが他にも出てきた。重要なことは、セイボリー氏は新たな放牧地農業のシステムを開発し、そのシステムは、ラル博士のような見識ある科学者でさえ、その計算や仮定の基盤としてきた従来型の農作業方法とは、根本的に異なるということだ。世界中の何千という牧場経営者がセイボリーの方法を経験的に適用し、利益を上げると同時に、土壌を再生し、目を見張るような速度で土地を回復しているのだ。この章には、ホリスティック・マネジメントの実践の結果を示すいくつかの画像を掲載しておく。

Images Republished Courtesy of the Savory Institute

Photo of Exact Location - Zimbabwe After 2 Growing Seasons
Left: Late 2006 - Low numbers of mismanaged livestock
Right: Early 2009 - Properly managed using Holistic Management
(400% increase in livestock numbers)

Fig.10　ジンバブエ：2 シーズン後の同一場所の写真[17]
左；2006 年、右；2009

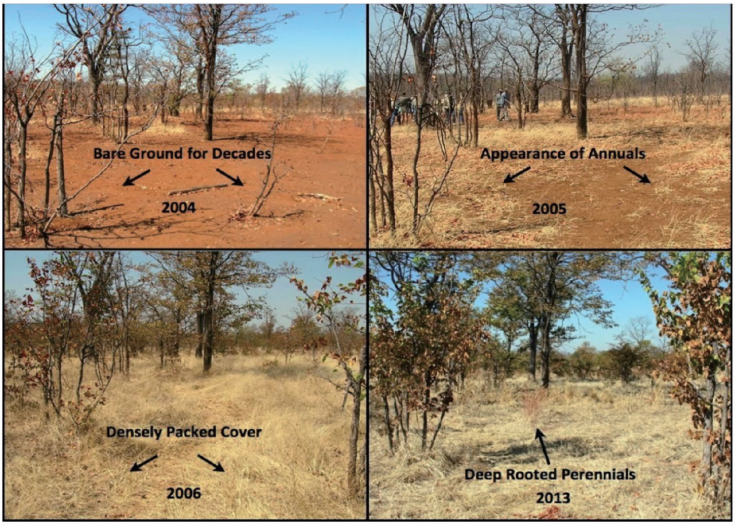


Fig.11　ジンバブエ：同一場所の経年変化[18]

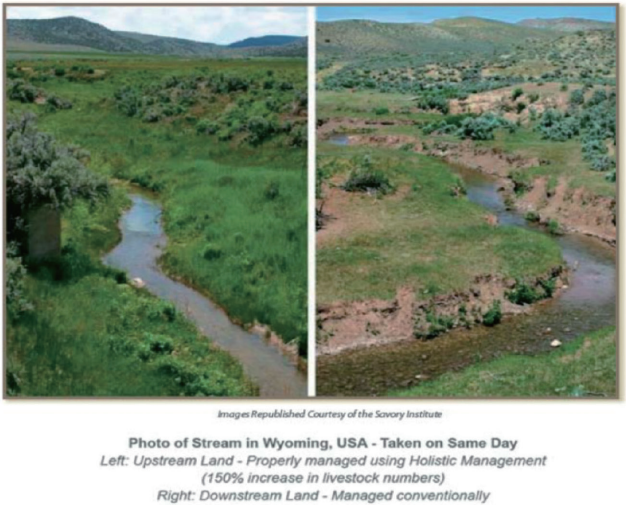


Fig.12　ワイオミングでの同じ日の上流と下流の植生[19]

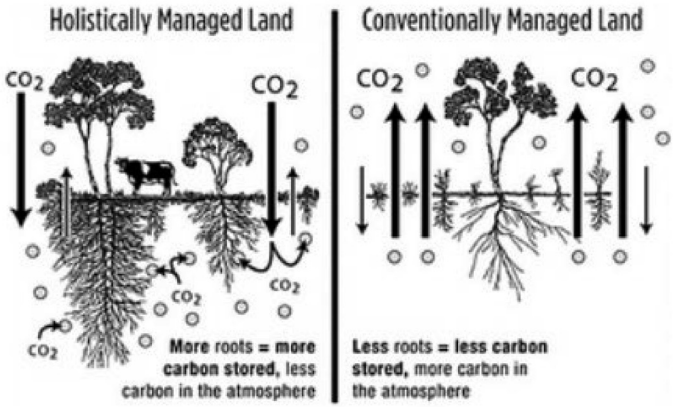


Fig.13 ホリスティック・マネジメントと標準農法の比較[20]

アラン・セイボリーの方法は、要するに「根が多ければ多いほど土壌に炭素が多くなり、大気中の炭素がより少なくなる」ということだ。なぜそうなるのか？土壌で成長する植物について一般的に持たれている短絡的で嘆かわしい概念として、植物の根が不活性な土壌から水と溶存ミネラルを吸収し、それらを光合成によって結合させて植物の成長に必要な栄養素として役立つ複合糖類を作り出すというものがある。植物のエネルギーは、直接的および間接的に他の生物の食物となる。やがて植物は死に、生物分解されて有機物として土壌に戻る。植物と土壌との関係は、基本的に植物というただ１つの生物学的プレーヤーによって開始される、そうした化学反応として理解されている。つまり、植物は土壌から摂取する唯一の生命体と見なされていて、土壌の健康はその「栄養状態」によって評価されるわけである。実際のところ、生

きている土壌についてのこうした機械的な思い込みが、やせた土壌の栄養分の回復や生産の改善に頼りになる手段として化学肥料が使用される根拠となっているのだ。この高校レベルの科学向け仮説は極端なほど単純化されていたもので、それに基づいた農作業方法も、腐植（土壌有機炭素）にとって非常に破壊的となるということが、時間がたつにつれて理解されるようになってきた。現実には、植物は土壌微生物叢と協力して活動しており、土壌有機炭素を作り出して土壌の栄養分を高めている。こうしたことが、はるかに早いスピードで、かつはるかに大きなスケールで行われていることは、まだ認知されていない。植物と生きている土壌との関係は、相互に協力し合う関係なのである。

クリスティーン・ジョーンズ博士と炭素取引に関する巧妙な対策

著名なオーストラリアの土壌生態学者であるクリスティーン・ジョーンズ博士は、植物と土壌微生物叢間の重要な関係の解明に誰よりも貢献した学者である。博士はその経歴の早い段階から、植物と土壌の関係のダイナミックスは、温室効果ガスの大気中における危険な蓄積という切実な問題に対して、ひいては世界の人口を養うという課題に対しても、解決策になるということに気づいていた。博士は「炭素ポンプ」という概念を作り出し、顕花植物の大半がその栄養生産の最大 40%を自らの根から吸い込んで菌根に栄養を与え、その菌根が土壌微生物叢と協力して今度は逆に土壌の栄養素を分解して輸送し植物に戻す、というプロセスを説明した。博士はこの相互作用を「液体炭素経路」と呼んだ。ジョー

ンズ博士はこの理解を広めるためにたゆまぬ努力を続け、結果として多くの牧場主や農民が利益を上げるようになった。同時に、アラン・セイボリー氏の方法を適用したときと同じように、土壌の肥沃度や保水性を驚くべきスピードで回復している。

植物と土壌の関係に関するこうした非常に複雑な事情を理解するには、さらに詳しく見ていく必要がある。まず、健康な土壌は不活性なものではなく、生命に満ちている。1グラムの健康な土壌には、バクテリア、菌類、藻類、原生動物、ウイルスなど、数億または数十億もの微生物が存在する。土壌にはさらに、多種多様な線虫、ミミズ、昆虫も住んでいる。それらのすべてが、その健全な土壌という活気のあるコミュニティで果たすべき役割を持っているのだ。こうした役割のなかでおそらく最も重要なのは、液体炭素経路の支点ともいえる菌根菌や菌根が果たす役割である。顕花植物の80%以上が菌根（この名前は根と一体となった菌類ということを意味する）と共生関係にある。植物の根は、単に栄養素や水を吸収するだけでなく、根に付着した菌根菌に光合成によって生成された複合糖質を送り込むことで、菌根菌を実際に養っている。植物は、自らが作り出す栄養素の最大40%を土壌に送り返す。この事実は、腐植土、つまり土壌有機炭素をボトムアップで作り上げる「炭素ポンプ」としての植物の役割を理解するためのキーポイントなのである。

「液体炭素」という別名も持つこの複合糖類の流入に完全に依存して生存している菌根は、複合糖類が流入されると今度はその一部が自身の成長のために、また別の一部が周囲の土壌の微生物

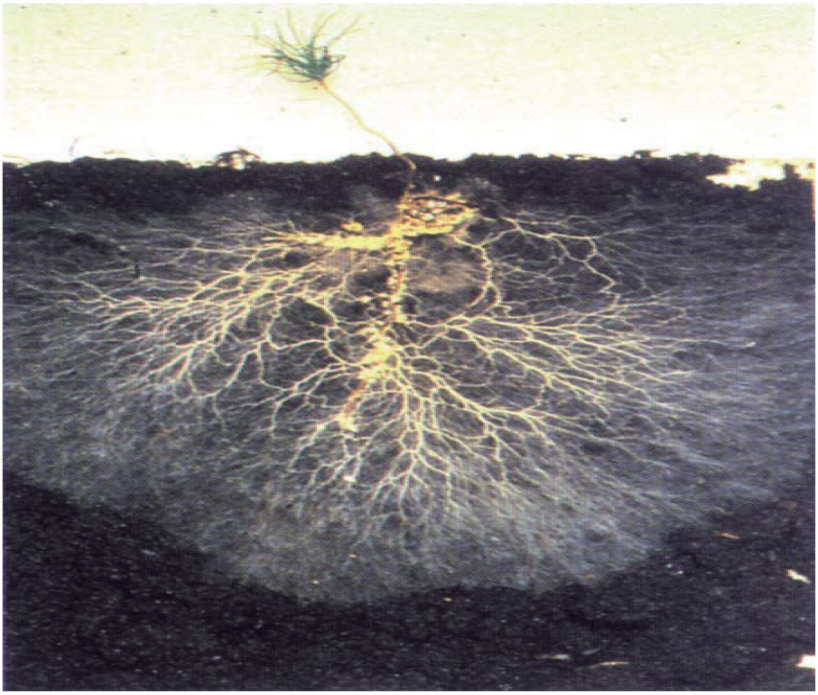


Fig.14 植物の根と菌根菌の共存＝「炭素ポンプ」[21]

に栄養を与えるために使用される。次はそれらの微生物が土壌中のミネラルを分解し、菌根を通して植物に送り返す。このプロセスはまだ完全には理解されていないが、植物が健全に成長するにはこれが不可欠となる。事実、地下には大変複雑で相互関連性のある「炭素取引」スキームがあり、これに比べると、ウォール街のデリバティブ取引など、まるで子供の遊びのように見えるくらいだ。菌根は株式仲買人の役割を果たしていると言える。そして

その最終結果として、土壌の深部に大量の炭素が有機形態で隔離される。つまりこのプロセスには、腐植土、言い換えれば栄養が豊富で水分を保持する能力があり、健全で有機炭素が豊富な土壌を作り上げるのである。

以上のプロセスの多くは最近明らかにされたばかりだが、もう少し詳しく見てみたい。菌根は、菌糸と呼ばれる長い繊維状のものを土壌中に莫大な量で成長させる。小さじ１杯の土壌の菌糸の長さを合わせると約１キロメートルを覆うほどになる。これらの菌糸は、プロキシ（代理）によって植物の「リーチ（届く範囲）」を実質的に延長しており、1996 年になって初めて発見されたグロマリンと呼ばれる粘着性の分泌物でコーティングされている[22]。有機炭素で形成されているグロマリンは「土壌の瞬間接着剤」とも呼ばれ、いくつかの意味で重要な役割を持っている。まず、土壌の深部に炭素を数十年間も貯留する。これは土壌中の炭素の約３０％に相当する。また、土壌粒子を結合して団粒構造を作る。これは構造相互の間と構造の内部に空間を有する土壌の集合体で、こうした構造のお蔭で空気の浸透がより大きく、吸水率も大幅に高く、従来型の耕作に伴う土壌圧縮の問題を逆転させる可能性を持つ。この点は重要なので、後段でもう一度触れることにする。画像は、植物の根系とそれと関連した菌根菌のネットワークである。植物から見た炭素ポンプというわけだ。

要約のために、ジュディス・D・シュワルツ著の『Cows Save the Planet（牛が地球を救う）』から引用することにする。「地球温暖化を逆転させ、砂漠化を逆転させ、食料生産の量と質

を改善する鍵となる液体炭素経路を理解するためには、我々が持つ植物の概念を見直す必要がある。主に緑色をしたあるもの、あるいは、単に土壌から水や栄養素を吸い上げるあるもの、といった概念を離れるべきで、ジョーンズ博士なら植物について双方向ポンプを想起させてくれるだろう。上向きの流れは、水やミネラルや植物が必要とするその他の物質であるが、下向きの流れは可溶性炭素（溶存有機炭素）であって、植物の根を通じた浸入・浸出により、土壌中の他の生物に栄養を与える。この下方への炭素の流れは、腐植の生成を促進する。腐植は土壌の有機成分で、炭素の貯蔵庫であるとともに肥沃度の基盤ともなる。土壌中の炭素の量が多ければ多いほどより多くの腐植が生まれるのだ。」

我々は、腐植が植物の腐朽過程によってのみ作られると長い間思い込んでいた。ジョーンズ博士が主張し実証したのは、腐植は生きている植物によっても生み出されること、腐植は土壌の肥沃度や保水性の重要な要素であり、またこの論考の文脈からいえば、大気中の過剰な炭素を減少させ壊滅的な地球温暖化の逆転プロセスを開始する規模での炭素隔離にとっても重要な要素である、ということだ。ここでも『Cows Save the Planet』から引用すると、ジョーンズ博士は「適切な条件下では、緑の葉に固定された炭素の 30 ～ 40 パーセントが土壌に移動し、急速に腐植化し、その結果、土壌炭素の隔離率が年間 1 ヘクタールあたりおよそ 5 ～ 20 トンの CO_2 となる」。これはすべて菌根との関係次第なのであって、これがうまくいけば、栄養分の供給、腐植の生成、そし

て保水性を高めるローム質の柔らかい土壌構造の構築によって、植物に利点がもたらされることになる。

残念ながら、こうした適切な条件には化学肥料の使用は含まれていない。どうやら化学肥料の原料として入手しやすい窒素やリン酸塩は、植物に「共生菌根菌にポンプで送り込む溶存有機炭素の量を減らせ」という信号を送り、本質的に菌根菌を飢餓状態にしてしまうようだ。菌根菌はまた、化学肥料や除草剤や殺虫剤によって直接的に成長阻害される可能性があり、殺菌剤によって確実に悪影響を受ける。このように、農業用化学物質を人工的に組み合わせるやり方は、菌根の健康にとっては大変有害なのである。土壌炭素や腐植を生み出す生物学的プロセスが、化学添加物によって破壊されてしまうのだ。いわゆる「休耕地」と呼ばれる、耕した後に裸地になっている土地も、同様に破壊的だ。大まかに説明すると、菌根菌はその生存を液体炭素化合物にのみ依存しているが、それを「ポンプ」で送り込んでくれる植物がないため、餓死してしまうのだ。これに長時間にわたって裸地への日射によって起こる有機物の継続的な酸化が組み合わされることを考えてみれば、この非常に一般的な農作業方法が、なぜ大型エンジンを何ヶ月もアイドリングにすることによって二酸化炭素を排出し続けるようなものなのかが理解できるだろう。これは地球温暖化が起こっている状況では絶対にやっていけないことなのだ！

ここで水蒸気に関する注釈を入れる必要があるだろう。これは二酸化炭素と同様の温室効果ガスで、大気中の温室効果ガスのうち質量で約 80%、体積で約 90%を占める。水蒸気と雲は温室

効果の 66 ～ 85%を占める。CO_2 の 9 ～ 26%という範囲と比較してみるといい。砂漠化や土壌有機炭素の全般的な減少が生じると、土壌の吸収能力が広域にわたって低下することになる。その砂漠化を逆転させ土壌有機炭素を回復すれば、炭素隔離が大幅に増加するだけでなく、大気中の水蒸気量もある程度減少することになって、これにより温室効果の低減にも貢献できると考えられる。健康で生き生きとした土壌再生の利点はここにもあるということだ。

表土の再生と土壌有機炭素の回復に関するこれらの真実をより一般的に受け入れられるようにするにあたっては、問題が 1 つ立ちはだかっている。それは、非常にわずかな例外を除いて、政府や産業資金による研究が従来型の方法で管理された農地で行われていることである。すでに述べたように、農業用化学物質の適用と休閑期間をともなう農法で、炭素隔離と肥沃な土壌づくりに必要な菌根を通じたみちすじが破壊されてしまうのだ。そのような研究の結果は、必然的にゆがめられたものになり、必然的に農業用化学物質の継続的利用が最も効果があるということになってしまう。もう 1 つの問題は、土壌づくりがこれほど迅速にできるなどと誰も信じていないことだ。型にはまり、不幸なことにこれまで疑われたことのない通念により、何世紀もかかると信じられているのである。だが肥沃土は非常に速く再生することができるし、世界中で数多くの先駆的プロジェクトがそれを実証している。時間と空間の制約により数件以上のリストを挙げることはできないが、ネットで簡単に見つけることができる。一例として、ニュー

サウスウェールズ州のグルゴン近くにあるウィノナ農場を挙げよう。コリン・セイス氏という先見の明のある農場主によって運営されている農場は、「pasture cropping（牧草地作付け）」として知られており、迅速な土壌づくりに理想的なアプローチに関するオーストラリアでの実証ケースのNo. 1となっている。要は土壌を裸地とする代わりに、穀物を野草の牧草地に蒔き、作物を播種するために非常に狭い筋だけを耕す。これは、既存の「Broadacre farming（混合農業）」、すなわち、土地被覆を完全に除去し、植生をすべて除去した農地に作物を蒔く農作業とは対照的な方法である。混合農業は、土壌構造を破壊し、菌根と微生物の結合を妨げ、蓄積された炭素を放出する。対照的に、牧草地作付け法では、これらのプラスの性質をすべてそのまま残すようにする。成熟期には、穀物の穂が茶色の土からではなく、緑の牧草地から現れてくるのが見られる。2年経つか経たないかで、プラスの違いが現れるのをセイス氏は目にした。より優れた干ばつ抵抗性、より大きな生物多様性、そして本論考の議論にとって重要な、より高い土壌炭素レベルが獲得されるのだ。10年で表土の200%の増加が達成できたのである。

　要するにセイス氏と協力者のダリル・クラフ氏は、「バイオミミクリー」と呼ばれる生物を模倣する方法を利用して、一年生植物と多年生植物が共存し、お互いに利益をもたらし合うという、元来の肥沃な群落を再現したのである。これは驚くべきことであり、非常に啓発的なことだといえる。アラン・セイボリー氏も同様に、野生の草原と絶えず動いている草食動物の群れのようすを

模倣することにより、放牧地の復元と表土づくりに同じように成功した。我々人間が行うのはせいぜい１万年だが、大自然では何十億年もの間これを行ってきたのだ。少しは謙虚さと敬意をお願いしたい！さもなければ農薬会社によってひそかに扇動された人間の技術原理主義者的傲慢によって、我々は死に絶えてしまう！

地球温暖化についての議論は二酸化炭素に言及したものが大半で、悲しいことに土壌についての言及はほとんど存在しない。だが、科学は基礎的かつ明白でなくてはならない。これまで見てきたように、表土は、光合成によって大気中の炭素を十分な速度と量で急速に隔離し、地球温暖化の逆転プロセスを開始させ、最終的に温暖化を止めるのに最も大きな可能性をもつ、そうした炭素吸収源なのだ。悲劇的なことに、毎年約 750 億トンもの土壌が失われている。これはオーストラリアよりも広い地域を覆うのに匹敵する量だ。コーネル大学の土壌科学者デイビッド・ピメンテル氏によると、現在ある耕作地の 90%は、風と水の侵食によって土壌を失っており、そのスピードは新しい土壌が形成されるよりも 13 倍速いという。ジョーンズ博士によると、「土壌から 1 トンの炭素が失われるごとに、大気中に 3.67 トンの二酸化炭素が追加される」。これに失われた土壌 750 億トンを掛け合わせてみよう！「逆を言うと、土壌有機炭素が 1 トン増加するごとに、大気から 3.67 トンの二酸化炭素が隔離される」。回収による削減しかない、単純明快なことだ。

世間一般の通念では、表土づくりには何世紀もかかるといわれているが、農場主や牧場主がバイオミミクリーを利用し、液体炭

素経路や菌根菌の重要な機能を理解し、表土をつくり、驚くほどのスピードで炭素を隔離した例がたくさんある。上記のセイス氏とクラフ氏の例はほんの一例にすぎない。もう１つの例は、ノースダコタ州の牧場主ジーン・ゴーベン氏だ。硬い粘土質の土層から始め、１シーズンで１５㎝以上の表土をつくった。氏が父親と共に開発した「Keyline plow system（キーライン耕作システム）」（上記で述べた牧草地作付け法と驚くほど似た方法）を使用し、これに計画的な高密度放牧（要するにホリスティック・マネージメント）と組み合わせた。アラン・イヨーマンスは、裸の砂地から始めて３年で 10 ㎝の腐植質の土壌をつくったと伝えられている。農夫で活動家でもあるエイブ・コリンズ氏によると、バーモント州北部でキーライン耕作の使用をホリスティック計画放牧と組み合わせた結果、灰色の粘土質土の上側の 20cm の表土が 40cm の表土となったという。残念なことに、こうした事例証拠は、学会や政府機関では容易には受け入れられない。その理由の一つは知的面における怠惰によるものだし、もう一つの理由は、農薬会社の利権がこうした賢明なアプローチを（当然のことながら）販売活動における死活問題として捉えていることにある。これに対して、「Soil Carbon Challenge（土壌炭素の挑戦）」と呼ばれる組織が結成された。「信頼できるデータ」を収集し、事例証拠を裏付ける組織である。ようやくこうした動きが出てきた。世界はこういった洞察に基づいて迅速に動く必要があるのだ！農薬会社の死活問題は利益率低下の脅威であるが、地球温暖化という死活問題は、人類を当然にして含む地球上の生命が生き残れるかどうかの脅威なのである。

第４章　地球温暖化の光合成による解決策

地球規模でみると、光合成は化石燃料の燃焼を含む人間のすべての活動の約９倍以上の炭素分子を移動させている[23]。しかも正常な方向に移動させるのだ。つまり、大気から有機炭素に変換して地球をおおう土壌および海洋へ移動させ、そこで隔離されるようにする。隔離期間はさまざまであるが、中には永久に隔離されるものもある。この事実だけをとっても、大気から過剰な炭素を削減するプロセスを始めるにあたって優先すべきは、明らかに、地球上で光合成が行われているすべての生態系でその活動を最大化することなのである。上記の現実に基づくと、地球全体の光合成活動を約 10%増加させることで、地球温暖化を逆転させるのに十分であろう。さらに、さまざまな生態系に対するこれらの戦略の検討を始めてすぐに明らかになるのは、地球温暖化逆転へ貢献できるかどうかに関わらず、これらの生態系における光合成活動の最大化から生まれる副次的な利点だけをとっても、これらをできるだけ速やかに実践する理由となる、ということだ。

このような救済を邪魔しているのは、知的怠慢（変革に乗り気でない）、固く守られた商業的利益や権力構造、そして知識を突きつけられた際に起こる反動的な疑念である。これらのすべてに対処するための戦略が必要になるだろう。経済的利益が即時に得られるという実証（洪水に見舞われた場合の土壌保全、高価な肥料やその散布に必要な労働力の削減、家畜や作物生産の増加、高い価格で売れる有機農産物など）を示せば、長期的に見た気候変

動抑制面での利点よりも多数の人を納得させることができるかもしれない。ただし、こういった戦略の検討は、本論考における議論が意図するところではないため、ここでは、単にこうした戦略が必要になるだろうと指摘するのにとどめる。

こうした光合成による地球温暖化への解決策の実施には、以下に説明するような、土地分類に関する、および海洋に関する管理戦略の抜本的な変革が求められる。

a)草原と乾燥地

草原を含む乾燥地は世界の陸地面積の 40% 以上を占めている。その内、耕作地が 44% にもなる。しかし、毎年 1,200 万ヘクタール以上の肥沃な土地が砂漠化している[24]。10 年間で南アフリカ全土に匹敵する土地が失われ、砂漠化するだろう。ジュディス・D・シュワルツ氏は『Cows Save the Planet』（牛が地球を救う）の本の中で、砂漠化とは「土地が表面にもその中にも生命をともなわない土になること」と表現した。本論考では、砂漠の土壌に地上生命が欠如しているということより、むしろ地中生命が欠如していることを重要だと考えている。何故ならば、この土壌微生物のほとんどと植物との共生関係が、炭素の生物学的隔離には不可欠だからである。現在、世界で 15 億人以上の人々が乾燥地に依存して暮らしており、この現在進行中の膨大な共生関係の消失は、前例のない規模で雪だるま式に増大する人道的な災害の原因になりうる。現代の砂漠化は、一般的に自然によるものではなく、人為的なプロセスの結果であることを理解することが

重要である。すなわち、長年にわたる土地の誤った管理政策によって、乾燥地に適した動植物の生態系のライフサイクルが破壊されてきたのである。例えば、あまりにも耕起しすぎるような過剰な耕作、十分に家畜を移動させないことで過剰な放牧に陥るような不適切な畜産管理、森林の破壊、適切でない灌漑などを行なってきた。土地の劣化は乾燥地のみで起こるわけではないが、乾燥地は破壊を受けた場合の回復力が最も弱く、砂漠化するに至る転換点に限りなく近い。

乾燥地の砂漠化への人為的悪循環を簡単に説明すれば、すなわち『牛が地球を救う』に書かれている内容を言い換えることになるのだが、上述の誤った管理が土壌の劣化を招き、元々あった植物被覆を失うということになる。こうした土壌は、結果として有機炭素を貯留する能力をさらに失うため、植物被覆のさらなる損失につながる。地面が裸地化すればするほど、日射が直接地面に届くようになり、さらに植物被覆によってもたらされる蒸発散冷却の「エアコン」効果が失われるようになるため、地面は熱をさらに吸収することになる。地域における損失は、熱吸収を増加させて微気候に影響を与える。さらに、オーストラリア、北アフリカ、北米西部など、規模が広大になると、地球全体の気候に影響を与えるようになる。受ける熱が多いほど多くの水が失われるため、植物が送り込む有機炭素を受け取って生存し、その代わりに植物に養分を提供する、そうした役割を持つ土壌中の微生物にとって、土壌はさらに生きにくい場所となる。その結果、ますます多くの植物被覆が失われてしまう。こうした条件下で生き残るこ

とのできる植物の範囲はきわめて限定されるから、花の受粉や種の拡散を行う昆虫や鳥など生物多様性の消失が避けられず、さらに植物被覆が減少していくことになる。草木が少なくなると、風あるいは時々起こる激しい雨に対する防御が弱くなる。これがさらなる侵食につながり、植物被覆をますます減少させる。このすべてのプロセスを通して、土壌に残った有機炭素はますます太陽からの熱にさらされ、酸化が進んで二酸化炭素を大気中に放出するため、地球温暖化の原因である温室効果をさらに悪化させる。誤った土地管理が続けば続くほど、自動的に悪化がどんどん進み、とんでもない悪循環に陥ってしまうのである。

上記のパラグラフで述べた通り、進行中の砂漠化、生物多様性の消失、気候変動という３つの厄災は、お互いに絡み合っており、同じマクロな問題の異なる側面に過ぎない。生命の生物学的サイクルは大きく破壊されており、こうした破壊に対する救済措置なしに地球温暖化を解決することはできない。悲しいことに、世界はいまだに化石燃料の問題という考えに固執しているだけでなく、地球温暖化の側面として生じている、砂漠化と生物多様性の消失、およびその結果起こってきた飢饉や戦争の社会的破壊が、基本的に相互関連したものであることを認識していない。原因が完全にわかっていないため、効果的な解決策も設定することができないという悲劇的な結果につながってしまうのだ。砂漠化はすなわち、有機炭素の損失を意味し、その大部分が酸化して大気に放出される。これは地球温暖化の主要な原因であるが、このことは一般的に理解されてはいない。さらに理解されていないことは、残され

た短期間のうちに効果的な行動を起こすために、地球温暖化を逆行させる戦略としての草原復元の重要性に関することである。

誰よりも砂漠化のプロセスを解明し、砂漠化を逆行させるための新しい重要な管理戦略を開発したのは、先に紹介した野生生物生態学者のアラン・セイボリー氏である。彼は、光合成による気候変動解決を強調する３人の中心人物の１人である。セイボリー氏は、評価が二分する人物である。彼の主張が実現可能とは思われにくいのは、注釈だらけの難解で過剰に慎重な学術的文章ではなく、平易な言葉で表現されていることが、その原因の一つであるかもしれない。セイボリー氏の主張によると、総合的管理が地球温暖化を逆転させると同時に、砂漠化をも逆転させ、かつ家畜の生産を最大 400%増加させることができる。また、この主張は、適切な農作業方法や砂漠化の原因に対する多くの凝り固まった先入観に真っ向から反対するものであるし、また農業用化学物質を製造する企業のビジネスモデルにも深刻な脅威となるものでもある。予想通り、セイボリー氏の主張によって、その結論に異議を申し立て、間違いを証明すると主張する、注釈だらけの記事を多く生み出すことになった。しかし、彼をけなす人々は、全般的に砂漠化や気候変動一般に対する戦いにおいて実際的な経験や成功事例をほとんど持たないか、まったく持たない人たちである。しかし、セイボリー氏は若い頃に野生生物の管理者や追跡戦闘部隊の司令官をしており、素晴らしい追跡能力や優れた観察力、そして戦略的思考力を磨いてきた。彼は生涯を費やして野生的、科学的な厳格さ、戦略的な軍事思考能力に関する独自のスキルを

利用して長期的な砂漠化の観察を行ってきた。また、そのことを説明する書物を取りつかれたように探し求めた。そして砂漠化を逆転させ、愛する土地と生活様式を回復させるための実験的アプローチに自分の人生と資金を捧げてきた。その結果は驚異的なものであり、かつ我々を勇気づけるものであって、希望が非常に少ない時代にそれを与えてくれるものだ。現在、1 万人以上もの土地の管理者が、1,600 万ヘクタール以上の乾燥地で、セイボリー氏の総合的な計画放牧を実践しており、その土地は、一貫して隣接する土地をしのぎ、ほんの数年の間に目の覚めるような速度で生まれ変わってきた。

歴史上の革命的な思想家が皆そうであるように、セイボリー氏に対する評価も徐々に高まっている。2003 年にも、彼は「地球規模で環境に最も貢献した人、または組織に与えられる」オーストラリアのバンクシア国際賞を受賞している。2010 年には、彼のジンバブエの非営利団体（アフリカ総合的管理センター：（ACHM）が「人類の最も切迫した問題を解決する高い可能性のある」プロジェクトに与えられるバックミンスター・フラー・チャレンジ賞を受賞しただけでなく、その仕事をアフリカで広めるためにアメリカ合衆国国際開発庁（USAID）より 480 万ドルの助成金を受け取った。セイボリー氏は、大気中の過剰な二酸化炭素を削減するのに最も有効な技術に与えられる、起業家リチャード・ブランソン氏が提供する 2,500 万ドルの賞金の最終選考過程における受賞候補者のひとりにもなっている。著名な農家 / 作家でグラスフェッドビーフ（牧草飼育牛）の提唱者ジョエル・サラ

ティン氏は、アラン・セイボリー氏は史上最高の生態学者として歴史に名を残すだろうと述べている。セイボリー氏の主張は、旧来の先入観に縛られている人や植物微生物の共生について限られた理解しかできない人にとっては、ありえないことと受け止められるかもしれない。しかし、アフリカ、アメリカ、オーストラリアなどにおいて、彼の成果は、まさに驚異的な実績を上げていて、迫りくる気象危機に打ち勝つための最善の希望を人類に与えてくれるものだとみてよいだろう。

セイボリー氏の画期的な見解は２つある。まず第１に挙げることができるのは、彼が「脆弱性」と呼ぶ基準によって土地を分類している点である。基本的に、乾燥していればいるほど脆弱性が高く、砂漠化しやすい。乾季と雨季を交互に繰り返す土地も、土は乾季に乾燥してしまうため、たとえ雨季の雨量が多くても脆弱性が高い。土壌が乾燥すればするほど、土壌微生物活性は大きく減少する。その活性は、植物と共生関係にあるため、健全な植物被覆とそれによって行われる炭素の生物的隔離にとって非常に重要である。樹木が地面をおおうには年間降雨量が最低 600 ㎜必要であり、それより少ないか乾季が長い土地は、サバンナまたは樹木のない草地になる。定義上、こうした草原は脆弱性が高い部類に位置づけられる。セイボリー氏の見解として第２に挙げられる、同様に重要な洞察は、次のようなものである。すなわち、草原、草食動物、捕食者の群れは同時に協調して進化してきたもので、そうした自然の相互作用が草原の健全な状態にとって重要であるという認識である。土壌微生物活性が乾季になると減少す

る代わりに、こうした相互作用が草原を繁茂させてくれる。捕食肉食動物の群れは、草食動物の群れを常に移動させ、防御のために集団を形成させる。常に移動するおかげで、草食動物は一ヵ所で草を食べ過ぎることがなく、その尿や糞が広く分散する。そして特に防御態勢で一団となるときに、逃走の準備をしている状態で排尿したり排便したりする傾向があるため、逃げ出す時に地面を踏みつけて十分に耕し、種子と自分の糞をたたき込み、さらに蹄で地面を踏みへこまし、種子を埋め、水の保持と吸収を助けるへこみを作るのだ。とは言っても、彼らは長く一ヵ所に留まることはないため、土が圧縮するまで踏みつけることもない。一年草であれ、多年草であれ、牧草は、草食動物が捕食者からの圧力を受けて移動することのおかげで、ほんのわずかしか食べられることはなく、完全には枯死せず、その過剰な根を除去して土壌に埋め戻すことによって、有機物が土壌に加わる。移動する群れによって肥沃になり、耕作され、以前よりも強く育つことになる。その必然的な結果として言えることは、草食動物の施肥機能を理解する上で重要なことなのである。乾季には微生物による有機物分解機能が低下するにもかかわらず、反芻動物の腸で消化されることにより、その有機物分解機能低下が補償されるということなのだ。比較的湿潤な気候の土地では、農地を休閑させることで恩恵が得られるのだが、脆弱性の高い乾燥した土地では、野生の草食動物がいない場合は、不自然な移動を強制させられる場合と同様、速やかに劣化してしまう。乾燥地であっても、野生草食動物が自然状態で移動する場合や家畜を自然状態の野生動物の移動と同様に移動させるような場合に限っては、草原が繁茂するだろう。比

較的湿潤な土地で開発された農法に基づいて畜産農業を学んできた土地経営者や役人たちは、この点を把握できていない。草食動物がほとんどいないか全くいないという場合、あるいは、草食動物が移動しないか捕食肉食動物に追い回されない場合には、どちらも明らかに枯死が起こる。長期にわたって進化してきた自然のパターンを模倣すれば、草原は繁茂する。これもバイオミミクリーの永続的な価値の現れである。

セイボリー氏は、このプロセスを素早く実行できると主張する。一年草と多年草はどちらも樹木よりはるかに速く成長するためだ。したがって草原は、炭素を貯蔵し地球温暖化を逆転させる可能性が最も高い。世界の陸地の 40%以上はこうした脆弱性の高い乾燥地で、セイボリー氏の試験的プロジェクトに基づく計算によると、このプロセスがおよそ半分の草原域で実行されれば、ほんの数年で大気中の二酸化炭素を産業革命前のレベルにまで戻すのに十分な量の炭素を貯蔵することが可能である。そして砂漠化を逆転させ、同時に食糧生産を大幅に増やすことにもなる。世界中で行われている試験的プロジェクトが、もうすでに、それが可能であることを示している。そのプロジェクトの中で最も成功した例は、セイボリー氏が所有するジンバブエの 2,600 ヘクタールあるチンバンゴンベー牧場であり、他にオーストラリアのウィノナ牧場や北米のノースダコタ州のジーン・ゴーベン牧場などもある。それらは、従来方式で管理された隣接する土地と比べて質・量ともに生産が上回り、はるかに高い吸水力（炭素が豊富で通気性の高い性質をもった土壌）を示

し、生物多様性もはるかに豊かである。こうした結果は、正当性を示す実践例を何ひとつ持たないような、セイボリー氏の主張を否定する注釈だらけの反論を、容易に論破するのに足る証拠というべきである。ホリスティック・マネジメントにおけるバイオミミクリーを用いて草原を復元することは、砂漠化と地球温暖化を逆転させる目的に対して、根本的な変革をもたらす可能性がある。

b)農地（耕作地）

世界の総陸地面積は約 134 億ヘクタールで、そのうち約 11%（15 億ヘクタール）が耕作されているか、果樹園となっている。この農耕地は、非常に薄い表土層（通常はせいぜい 12 ～ 25cm）だけで覆われており、この薄い層は文字通り人類の生存と飢餓の間にかかわる一切を意味している。しかし、世界は毎年その表土の約 1%を侵食により失っており、そのほとんどは農業に原因がある。米国では土壌補充速度の 10 倍、中国とインドでは 30 ～ 40 倍の速さで土壌が失われている[25]。ヨーロッパ、アフリカ、中南米、中東、オーストラリアの一部など至るところで、状況が悲惨であることが想像できる。この 1 世紀ほどの間に、世界はその土壌有機炭素（SOC）の 50 ～ 80%を失った[26]。SOC の喪失と侵食による土壌の喪失の関係についてはあまり考慮されていないが、それはまさに現実なのだ。流失した表土の土壌有機炭素のほとんどが失われることは明白である。そもそもさまざまな土地の不適切な管理による土壌有機炭素の喪失が、浸食

の主な原因の 1 つであることは、それほど明白となってはいない。加えて考慮されていないのは、そのすべての有機炭素がどこに行くのかということ。実際には、それは不適切な農作業方法の結果として、酸化されて二酸化炭素になり直接大気中に送り込まれている。それは、文明が発達していなかった過去の話のように思われるが、現在の田園地帯においても、また地球上におけるどの地域においても、常に見られることである。これを書いている間にも、窓から外を見れば、太陽の下に地表面が露出した畑が見られる。多くの場合、農地は半年以上、年間で最も暑い時期や最も乾燥した時期に、裸地のまま放置される。私たちはこのように放置された土壌を見ることに慣れているので、それに疑問を持つことすらない。しかし、植物被覆で直射日光が遮られることなく、蒸発散による冷却効果も得られない場合、土壌有機炭素（SOC）は、着実に酸化され土壌の外に出ていく。実質的に、耕された土地をむき出しのままにするということは、エンジンを何ヶ月もアイドリング状態のままにして、大気中に炭素を送り込むようなものである。それを良しとする人はほとんどいないが、長期間土壌を放置することに対しては、誰も間違っていると思ってはいないのだ。

土壌の温度は決定的に重要である。20℃前後では、水分の100%が成長に使用されるが、37℃になれば、蒸発と蒸散により 85%の水分が失われ、植物の成長を支えるために残るのはわずか 15%だ。裸地が周囲の空気よりもはるかに高い温度になることは、夏に裸足で歩いたことがある人ならわかるであろう。45℃（夏には珍しくはない）では、土壌細菌の一部は死に始める。

比較のため、裸地の代わりとして、屋上は、シカゴよりもはるかに北にあっても、これよりもはるかに高温になりやすく、60℃をはるかに超える温度に達する。54℃では、水分の 100%が蒸発と蒸散により失われる。60℃では、土壌細菌が死滅する。もちろん、土壌が暑く乾燥すればするほど、土壌有機炭素（ここでは腐植を考える）は酸化して二酸化炭素となる。まるで「地球温暖化さん、どうぞいらっしゃい」というようなものだ。

土壌の温度上昇と乾燥を防ぐものは何か？まず、生きている植物被覆が一番であるが、藁や枯葉など、植物の残留物も有益なのだ。植物は土壌を日陰にし、蒸発散の冷却効果は多くの人々が認識しているよりもはるかに重要である。植生地は一般に周囲の気温よりも低温であるが、裸地は周囲の気温よりも最大 50℃も高くなることがある。次のセクションの都市部の緑の屋根についての説明と図も参照していただきたい。

こういった点を理解するのは難しいことではないが、どこででも考慮されてはいないのだ。現在の農作業方法は非常に破壊的である。本来、これは明白な事実であるが、まだ広く認知されていない。しかし、賢明でやる気のある数少ない人々にとって、明白になってきている。急速に温暖化している世界では、飢餓も深刻化している問題であり、このような時代遅れの破壊的な農作業方法を続けて行く余裕はもう残されていない。

クリスティーン・ジョーンズ博士の業績に関する本論考のセクションでは、土壌有機炭素がどのように形成されるかを考察し、それが失われることが、浸食と生産性の低下と深く関係している

理由を簡単に検討した。ここでの議論おいても、この点を再度参照することが役立つ。**生きている土壌は、植物を保持するための基盤であり、単に水と栄養を一方的に摂取している対象になっているわけではない**。生きている土壌は素晴らしい共生ネットワークであり、その複雑さと生物多様性に驚かされる。地球の土壌には、生命体の 95%以上が存在すると推定されている。この共生ネットワークを理解するためには、顕花植物の約 80%と菌根菌との間の基礎的な共生関係からまず理解する必要がある。菌根菌は土壌炭素経済の株式仲買人のような役割を果たす。植物は、栄養生産の最大 40%（大きな割合！）を単糖類の形で菌根に排出する。ジョーンズ博士は、これを「液体炭素」と呼び、植物を「カーボンポンプ」と表現している。

こうした 2 つの表現は、植物と土壌、および健全な炭素循環の要になる役割についての私たちの理解を変えるのに非常に役立つ。菌根菌は、これらの糖のいくつかを自らの成長と維持のために使用する。その一部は、菌糸と呼ばれる長く細い巻きひげを成長させるのに使われるが、その全長は驚異的な長さになる。菌糸の本質的な特徴は、グロマリンと呼ばれる粘着性の分泌物で覆われていることである（90 年代後半になるまで発見されていなかった）。グロマリンはそれ自体で、ケーキのようなキメの砕けやすい土壌を作るのに役立ち、その粘着性により鉱質の土粒子を「団粒構造」の中に凝集させる。この団粒構造は、グロマリンがなければ非常に圧縮された吸収性をもたない土壌になっていたはずのところに空間を作り、結果として生まれた豊かな砕けやすい土壌

の内部に空気と水を透過させることを可能にする。土壌中の有機炭素量が多いほど、水分保持能力が高くなるが、それはグロマリンによって生じた団粒構造のおかげである。しかし、グロマリンで覆われた菌糸は、実際には別の機能を果たすたように進化した。その１つは、共生ネットワークにおける３番目の主要構成要素である土壌細菌やその他の微生物への栄養供給である。もう１つは、代わりにこれらの微生物が菌根および植物に提供する無機栄養の収集と輸送である。菌根は植物から受け取る炭素のかなりの部分をこれらの共生微生物に渡し、その代わりに共生微生物は土壌の無機成分である鉄、マグネシウム、亜鉛、銅、リン酸塩などのミネラルを溶解するために働く。これらのミネラル栄養素は菌糸を介して届けられ、その過程ですべての生物に栄養を与え、植物に戻るが、植物はそれらなしでは生き残ることはできない。

これは、一言で言えば、土壌共生ネットワークである。そのネットワークは土壌の健康さを表すものであり、私たちの食物、多くの酸素、冷却、そしてこの論考の目的である、健全な地球規模の炭素循環に不可欠な隔離機能を提供しており、植物被覆にとって決定的に重要である。

こうしたことが一般に理解されていないという事実は、全く信じられないことである。現代の工業的農業は、私達とその農業に寄生する巨大企業と共存しており、土壌は生きたメタ生命体ではなく、植物を根付かせるための単なる基盤であるという安易な概念に基づいてしまっている。植物と土壌の関係は、一方向の取引と見なされている。植物は、誰も理解することができない奇跡的

な理由でそこに存在するのであり、土壌から栄養分を取り入れるだけで、その見返りに植物遺骸を除いて何も与えず、土壌を最終的に劣化させるものと考えられている。結果、その損失を補うために、化学肥料の「投入」が必要となる。現代の工業的農業に対して公平を期すために言うならば、このよう誤解はそれ以前からあったものであり、非常に長い間、慣行土地耕作（植物被覆を完全に削り取る耕し方）や焼畑農業などの破壊的な農作業方法の一部であった。変化したのは、化石燃料の力と、空気中の窒素をアンモニアの形で固定するハーバー・ボッシュ法によって可能になった工業化を通じた効率の向上である。どちらも過去２世紀以内という、ごく最近に開発されたものなのだ。化石燃料によって、これまで以上に大きな農業機械が利用可能となり、ハーバー・ボッシュ法によって、空気からより多く窒素を引き出せるようになったことにより、生物学的に利用可能な窒素によって栽培が制限されることがなくなった。すなわち、化学肥料の出現だ。これらの２つの能力を得てから、私達には見境がなくなったのである。そして、いわゆる「グリーンレボリューション」などの短期的な成功に魅了されてしまった。化学肥料に、農薬、殺菌剤、除草剤を追加し、現在、グリホサート（モンサント社のラウンドアップ）や 2,4-D などの除草剤の大量散布に耐えられるように、植物の遺伝子組み換えを行っている。これらの２つは、雑草がグリホサート単独使用に対する耐性を進化させているため、現在は、エンリスト・デュオと呼ばれる混合除草剤が使用されている。この最新の道具を用いることにより、「世界を養う」ことができると、その

提案者たちは飽きずに宣伝しつづける。逆説的に、これらの工業的農作業方法は実際には植物／土壌の関係を一方向のものに変え、植物は土壌から栄養分を奪うだけで、土壌を枯渇させる。その主な原因は、土壌共生ネットワークが破壊されることにある。そのために化学物質の投入が必要となる。このような劣化した土地の実験においては、自己充足的予言（予想どおりの結果が実現されてしまう事態）をもたらす。そのような土地で行われる実験では、本来なら真の修復作用を提供する土壌微生物叢が破壊されてしまっているため、その予言こそが唯一正しいものであるように思われてしまう。残念ながら、これは土壌というよりも死んだ泥であり、栄養が乏しく、干ばつや洪水に対する耐性が低く、土壌有機炭素が大量に失われていて、地球温暖化の直接的原因となる。

この現代の化石燃料と化学物質に依存した農業はどれほど持続可能なのだろうか。それはこの論考の範囲を超えているが、常識を働かせれば、大いに心配すべきであることは明らかである。本論考において重要な点は、土壌有機炭素そのものと、土壌の鉱質部分から必須栄養素を溶出させている土壌共生ネットワークに何が起こるかということだ。簡単に言うと、現代の工業的農業はさまざまな方法でこの土壌共生ネットワークを破壊しているということになる。まず、耕すことは、植物被覆を剥ぎ取ると同時に、より多くの地下の土壌有機炭素を酸化させる太陽熱にさらすことを意味する。土壌有機炭素の喪失は、土壌がより圧縮されることを意味し、水の吸収量を減少させ、流出水を増加させる。進行する土壌の圧縮に対抗するために、土壌をより深く耕起するために

使われる農業機械がどんどん重くなっていくことになり、土壌の圧縮はますます悪化してゆくのである。これにより、さらに多くの土壌有機炭素が地面に引き出され酸化され失われてしまう。その結果、土壌が露出されることで土壌微生物叢が破壊されるのだが、これについてはすでに説明を行ったところである。それはまるで土壌有機炭素を除去するために作られたかのような悪循環である。ここでは、工業的農業の大きな特徴でもある化学物質投入の影響についてはまだ考察を行っていない。化学肥料使用の影響は、まず、大量の液体炭素を排出する必要がなくなったと植物に錯覚させる。それでも植物は成長することができるが、多くの必須栄養素が不足する。化学肥料は、土壌共生ネットワークが提供するのと同じ範囲の溶存性無機態栄養を提供することができないからである。さらに危惧されるのは、化学肥料散布の結果として土壌共生ネットワークが栄養不足となり、菌根を発端として枯れていくことだ。それが起こると、健全な土壌がもっている生物的な炭素隔離機能とともに、自然の土壌の地力が失われてしまうのである。

除草剤については、それだけのためにいくつかの節をもうけないといけない。グリホサートと 2,4-D の両方は、非ホジキンリンパ腫（血液がん）と肉腫（軟部組織がん）に関与している。2,4-D は、ベトナム戦争中に使用された悪名高いエージェントオレンジ枯葉剤の成分であり、ベトナム人と帰国したアメリカ退役軍人の先天異常やその他の健康障害に関連している。過度に単純化された短期の暴露研究では、これらの除草剤は哺乳類の細胞に

無害だと主張されている。しかし、腸内微生物叢は、最近の研究によって私達の健康にとってますます大切であることがわかってきたのだが、これに対する除草剤の影響を調べる研究はいまだに存在していない。また、こうした農薬類が土壌共生ネットワークに及ぼす影響を調べる研究も存在しない。ここにおいても悪化が同時進行していることが気になるところである。すなわち、健全に繁栄している微生物叢は、私達の健康と私達に命を与える土壌全体の健全性の両方にとって必須である。その微生物叢の大部分は菌類と細菌なのだ。除草剤と菌類を対象にした殺菌剤は、それらにどのような影響を与えるだろうか。ほぼ確実に、破壊的に影響する。当然ながら、それがこれらの農薬が作られた目的に他ならない。しかし、この分野の科学的な調査は、突然資金が打ち切られる傾向がある上、何とかうまくいった研究には、その信頼性に対する激しい攻撃がなされている。そのような研究をする研究者は、突然仕事を失ったり、巨大な企業利益を保護するブラックホールにすべてが吸い込まれたりしてしまうのだ。

グリホサートの使用は、ここ数十年間で 600 倍以上に増えており、それは 60,000%の増加に相当する。同じ期間に自閉症の発症率は、診断された症例だけでも、1,000 人にひとりから 30 人にひとりとなり、驚異的な 3,000%の増加となった。クローン病や過敏性腸症候群などの胃腸障害の発生率も大幅に増加している。この異常で悲劇的な増加を説明するメカニズムはまだ特定されていない。しかし、胃腸神経回路網、いわゆる第 2 の脳について考慮すれば、1 つのメカニズムを特定できるかもしれない。私

達の腸の内側に広がるネットワークには５億個以上の脳神経細胞が連なっており、身体が必要とするドーパミンの 50%とセロトニンの 80%以上の分泌に関与している。私たちの腸内微生物叢のバランスの変化が腸の慢性炎症を引き起こし、これらの神経細胞の機能に悪影響を与えることは、ほぼ間違いない。ドーパミンの欠乏はパーキンソン病と関係があり、セロトニンとドーパミンの欠乏は自閉スペクトラム症障害の根本原因である可能性がある。除草剤に慢性的にさらされることは、自閉症関連障害の想像を超える圧倒的な増加、および、腸疾患の流行に対する、直接的な原因となるのではないだろうか。グリホサートは、誰でも食べる多くの食品において検出されており、体内においても検出されている。本論で議論してきたことに立ち返ると、健全な炭素循環にとって非常に重要な土壌微生物叢への影響が問題となるだろうが、それは良い影響であるはずがない。付け加えなければならないこととして、グリホサートは、無機栄養素をキレート化し、おそらく生物学的利用能を大幅に低下させ、それにより、植物の成長にも影響を与え、食品の栄養素含有量を減らす、そうした事実が最終的に疾病として生じるのである。

結論付けると、化学肥料や農薬、除草剤、殺菌剤が、土壌共生ネットワークに壊滅的な影響を与えていることはほぼ確実だということができる。これに相応して、健康な土壌の炭素隔離能力が低下し、土壌の劣化につながる。この脆弱になった土壌が耕されて土壌構造が破壊され、より多くの土壌有機炭素が太陽にさらされるようになり、この土壌が長期間、多くの場合に

は最も暑い時期に裸地状態で放置されると、炭素は土壌から大量に大気中に放出される。

しかしながら、土壌は適切に管理すれば、驚くほど短期間で回復させることができる。ジンバブエのディンバンゴンベ、オーストラリアのウィノナ牧場、ノースダコタのジーン・ゴーベン氏の繁盛している牧場、ニューメキシコのキビラ連合、そして、世界中で 1,600 万ヘクタールを超える土地でアラン・セイボリー氏が提唱する資源の全体論的管理を実践した 1 万人以上の土地管理者は、すべてその土壌回復を証拠付けている。アラン・ヨーマンズ氏は、父親が発明した最小限の破壊力のキーライン・プラウと計画的高密度放牧を組み合わせて、砂質の裸地から始めて 3 年間で 10cm を超える腐植に富む表土を作ったと報告している。オーストラリアのダリル・クラフ氏とコリン・セイス氏は、「牧草地作付け」と呼ばれるシステムを開発した。これには、最小限の耕起と自生する多年草の牧草地への作物の直接播種が含まれる。これは、互恵関係にある 1 年生植物と多年生植物が混在する、固有種の草原の本来の生物学的コミュニティを模倣するものである。数年以内に干ばつに対する抵抗性が改善して生物多様性が増加し、さらに 10 年で表土の厚さは驚異的に変化し、約 10cm から驚くべきことに 45cm と 4 倍以上になって、劣化した土地は完全に修復された。「表土形成」をインターネットで普通に検索すると、それには数世紀かかるという従来の見解が表示されるであろう。だが、これらのすばらしい先駆者たちは、それがたった数年か、せいぜい数十年で

可能であるということを証明し続けているのである。

さらに、次のような副次的な利点だけでも、耕作地管理を価値あるものに変えるものだといえる。すなわち、表土形成の加速、吸水力の増加に伴う干ばつや浸水に対する抵抗性の改善、生物多様性の増加、農業用化学物質の「投入」に要する費用あるいは従来からの機械的耕起作業に用いる設備と燃料に要する費用の削減、食物中の栄養含有量の増加、家畜および作物の生産性の向上、必要な労働力の削減などが挙げられる。加えて、喜びという利点も忘れないでおこう！ノースダコタ州のジーン・ゴーベン牧場など、このような土地を歩き回ることは、生きている豊穣の土地を歩くということだ。そこにはどこにでも蝶がいて、人を生き生きとさせ、希望と喜びを与えてくれる。工業的農業の症状である乾燥して痩せて不毛で気を滅入らせる土塊とは対照的だ。これらは副次的な利点にすぎない。現在直面している致命的な気候危機を考えると、一見革命的だが、実際には生物を模倣した農作業方法が私達を救うものとなるであろう。それが、光合成が行われている他のすべての種類の土地と同様に、ここでも私達を救うのに役立つ理由は、地球温暖化に対する光合成ソリューションが、私たちに残された時間枠で、地球温暖化の原因である大気中の炭素を、十分迅速かつ経済的に減らし、隔離することできる唯一のソリューションだからである。

c）森林

国連食糧農業機関（FAO）の最新データによると、2015年において、森林は地球の陸地面積の30.5%を占めているが、1990年の31.6%からその3%が減少した。実際の数値はおそらくもっと悪い。何千年もの間、森林消失は人類史の特徴となってきた。春先に日本を覆う黄土色の塵は黄砂と呼ばれ、中国の黄土高原で発生する。青銅を精錬する燃料に必要な木炭を得るため森林が伐採された青銅器時代から、黄砂が飛び始めたようだ。北米では、1600年代から1800年代後半にかけて大陸の東部にあった森林の約半分が伐採され、今も森林破壊は進行中である。憂慮する科学者同盟は、スイスと同面積（38,300平方キロメートル）の森林が毎年失われ、砂漠化していると推定している。他の調査が示す推定値はもっと大きい。メリーランド大学の科学者が提出した2017年の報告書によれば、同年に熱帯地方で約158,000平方キロメートルの森林が失われた。これはバングラデシュとほぼ同面積になる。現在の森林消失のほとんどは、実のところ熱帯地方で起きている。森林の消失により私たちは何を失うのか。この損失は地球温暖化にどんな影響を及ぼすのか、そして、温暖化を止めるのに必要な大気中の二酸化炭素削減に対して森林はどのように貢献できるか。言い換えれば、森林が提供してきたどんな生態系サービスが破壊されているのか、そして森林管理の実践によりどのようにそれを回復できるか。こうした問いに対する答えが必要である。

森林は生物多様性のよりどころであり、陸に生きる様々な生き物の８割が生息している（ただし、この数字は地球の生物多様性全体の最大で95%を占める地中生物の多様性の数を含まない）。森林は多くの資源も提供する。木材、食物、薬、燃料などである。最近では、森林は炭素隔離の主要な資源、地球温暖化に対する防護壁としてみられるようになってきた。森林は明らかに炭素吸収源となる。膨大な炭素が木の中に固定されている。とはいえ、地球温暖化を緩和する上での森林の役割は、大きな論争の的となっている。例えば高緯度の森林は、植生被覆のない雪に覆われた地面や氷面に比べて、アルベドがはるかに小さい。針葉樹林の濃い色の地表面が宇宙へ反射する光とそれに伴う熱はかなり少ないのである。加えて、大気科学者ナディン・アンガー氏によるイェール大学の研究は、熱帯の森林が、イソプレンなど地球温暖化の一因となる揮発性有機化合物を放出することを明らかにした。生態学者のスニサ・パンガラ氏による別の研究では、アマゾンの木々が強力な温室効果ガスであるメタンを放出することがわかった。氏はアマゾンにおけるメタン総排出量の約半分は樹木が占めていると報告している。これは驚異的な量だ。そうであれば、森林が地球温暖化を緩和する上で全般的に有効であるとは言い切れなくなる。

だが、こうした議論はすべて「盲人が象を語る寓話」と同類なのだ。それぞれの人が異なる部分を感じとって、異なる姿の動物を思い描く。非常に限定された範囲でならそれぞれ正解だが、象の姿がわかる人は誰もいない。森林が提供する生態系サービスを実際に理解するには、ある一面に執着するのではなく、全体像に

焦点を当てる必要がある。森林は多種多様である。北方林と熱帯林、落葉樹林と針葉樹林、雨林と乾燥林などがある。しかし、地球温暖化に対する緩和効果においてはいくつか共通点がある。第１に、どの森林の樹木も生物学的な時間スケールで炭素を貯蔵する。第２に、蒸発散の「生物ポンプ」と呼ばれるものを通して、森林はしばしば大陸規模で作用し、地球全体の大規模な水循環において主要な役割を果たす。第３に、土壌の共生ネットワーク上の役割を介し、炭素の滲出液（ジョーンズ博士によれば「液体炭素」）を地下深くに送り込む。この３つのうち第１の要素は明白かつよく知られている。第２の要素に関しては、ロシアの物理学者アナスターシャ・マカリエバ氏とビクトール・ゴルシュコフ氏の努力により、水を遠く内陸部に送る「生物ポンプ」が最近ようやく明らかになった。第３の要素である樹木と地下微生物叢の共生関係の結果として生じる炭素隔離は、ほとんど例外なく見過ごされている。

最初に生物ポンプについて考察したい。2018 年の FAO による報告書によると、地球の淡水の４分の３は森林に覆われた流域から流れて来る。世界人口の半数以上は、飲料水、農業用水および産業用水はこの森林流域に依存している。大規模な水循環において森林が重要な役割を担っているのは明らかだ。森林がなければ、雨のほとんどは水蒸気が発生する海の沿岸付近にのみ降るようになるだろう。森林はベルトコンベヤーのように、雨と蒸発散のサイクルで、雨雲を内陸へと運ぶ。マカリエバ氏とゴルシュコフ氏は、この効果の規模を認識し、本当の意味で理解した最初の研究者といえるだろう。２人によれば、森林の高い蒸発散が上

空の大気に含まれる水蒸気を増やす。この湿った空気が上昇して冷却され、凝結する。水蒸気が大気中で凝結すると部分的に真空が発生し、圧力勾配が生じる。これが重要なポイントとなる。その圧力勾配のためにより多くの湿った空気が海からさらに吸い込まれ、空気の流れが生じる。アマゾンでは水が熱帯雨林に降ると蒸発散して大気に戻り、再び雨となって降り注ぐが、循環を繰り返す度にだんだん内陸へ移動すると考えられている。このサイクルは湿気を含んだ空気がアンデス山脈の東斜面にぶつかるまで、少なくとも７回繰り返される。そこでは、大気中で非常に高密度になった水蒸気の凝結が、地球上で最大の降雨量を生み出すことさえあるのだ。これは水の「ベルトコンベヤー」であり、森林の生物ポンプ機能である。森林の大部分を伐採あるいは焼失すると、生物ポンプが機能しなくなり、海から陸への風が弱まり、雨を降らせるプロセスが失速する。マカリエバ氏とゴルシュコフ氏によると、近年のロシアで起きた前例のない干ばつは、ロシア西部の森林減少の加速と関連している。2019 年には、アマゾン流域で８万件を超える火災が発生した。これは主にジャイール・ボルソナーロ大統領の反動的で浅はかな政策に起因する。専門家はアマゾン熱帯雨林のうち 20%以上が失われた場合、地域全体が必然的にサバンナへと変わり、熱帯雨林の大部分が消失するだろうと予想する。熱帯雨林の「雨」をもたらすアマゾン流域の生物ポンプが消失するからである。

さて、本論考の前半では、土壌微生物叢にとって水分がどれほど重要かを検討した。第１に、水分は、土壌を熱から保護し、大

量の有機炭素を排出することで地表下の微生物を養う、健全な植物被覆を保持する。第２に、土壌が乾燥すると微生物の働きが低下する。過度の乾燥と熱で微生物は死亡する。本論考において最も言いたいことは、植物、菌根、土壌微生物の間にある共生関係、つまり土壌の共生ネットワークが土壌中の炭素隔離において最重要な生物学的メカニズムである、ということである。地球温暖化がもたらす最悪の結果を回避するため、大気中の炭素量を十分に削減しなければならないが、そのために現在私たちにできる唯一の実行可能な戦略は、この共生ネットワークを使って光合成を管理することなのである。よって、この生物学的隔離のプロセスを早急に進める必要がある。そして、このプロセスを損なうものがあれば、これは何としても排除しなければならない。この点だけを見ても、健全な森林は地球温暖化との戦いにおいて重要な役割を担う。森林の炭素貯蔵に関する部分的な理解にとどまらず、大規模な水循環において森林が果たす役割の重要度をより明確に理解し、それに応じて森林管理政策を実施する必要があるのだ。

すべての森林に共通する第３のポイントは、クリスティーン・ジョーンズ博士が「液体炭素の経路」と呼んでいるものへの貢献である。要点を繰り返すと、これは、植物が土壌深くに大量の有機炭素を送り込む結果を産み出すという、植物と土壌微生物叢の共生関係だ。この基本的な機能は、森林だけでなく草原や農作物に関してもほぼ例外なく見過ごされている。森林が秘めている、地球温暖化を緩和する潜在能力を計算するには、この大規模な炭素の生物学的隔離を考慮しなければならない。現時点でこれは例

外なく見過ごされており、その結果、適切な森林管理政策を樹立し実施することができていない。

すべての森林はこの生態系の炭素隔離機能を提供しているが、どこも同量というわけではない。針葉樹は、広範囲に広がる浅い根系を持つ傾向がある。対照的に、落葉樹の根系は、基本的に地上部分の鏡像になり得るほど十分に大きく、深くなる。そこに、菌根の菌糸が、どの程度その根系が増殖するかを想像すると、落葉樹の炭素ポンプのスケールのより正確な画像が得られる。そこに、経験的には、落葉樹林はより多くの有機炭素を土壌中に送り込んで共生生物を養い、その炭素をかなり深くまで排出すると確信をもっていえる。有機炭素が深く届くほどその生物学的隔離はより確実になり、結果として表土はより厚く、より豊かになり、より多くの水を保持できる。他の点でも、落葉樹林は温暖化緩和においてより良い性能を発揮する傾向があるかもしれない。雪面は大きなアルベドの値によって日射を反射させて冷却効果を発揮するのだが、落葉樹林は葉を落とすため、アルベドの値を小さくする針葉樹林ほどには、冷却効果を減少させない。落葉は林床に厚くて柔らかいカーペットを作り出し、針葉樹林よりもはるかに速やかに肥沃な土壌の中へ分解されてゆく。針葉樹林の葉は、落葉の頻度および規則性で劣り、また樹脂の含有量が多いため分解が遅い。自分の畑に松葉を集める農夫はいないが、落葉樹の葉は堆肥として大切にする。健康な落葉樹林は、1 年で 1 センチの表土を容易に形成できるが、針葉樹林では 1 世紀かかるかもしれない。落葉樹林は生物多様性に富み、土壌の保水力も非常に高い。

残念ながら、日本でも他の地域でも、森林管理政策は主に針葉樹の単層林造成に焦点を当てており、結果として生物多様性、炭素貯蔵および保水力が失われている。

世界自然保護基金によると、熱帯林も推定 2,500 億トンという膨大な量の炭素を貯蔵している。細菌により急速に分解が進むため熱帯林では養分循環が速く、一般的に赤い粘土質のジャングルの土壌は厚さがうすくて貧栄養の土壌である傾向がみられる。したがって、土壌微生物叢よりも樹木および他の植物の方がより多くの炭素隔離を行う。アマゾン流域の先住民はこれを経験的に理解していた。先住民たちはしばしば大量のバイオ炭を土に混入し、森林土壌を豊かにしたことが知られている。現在でも、このテラプレタすなわち黒い土はアマゾン流域全体に見られ、以前の想像をはるかに超えた規模で人々が居住し土地を耕作していたという証拠となった。熱帯雨林の急速で豊かな成長はほとんどのジャングル土壌において低レベルの炭素隔離を補うものの、その樹木が枯れたときに進む急速な分解は、炭素隔離の期間がそれほど長くないことを示している。ただし、この一般的法則の 1 つの例外として、熱帯泥炭湿地林がある。熱帯泥炭湿地林は、沼地のような状態で永久的に水没しているおかげで有機物が急速な酸化から保護されている熱帯林である。こうした泥炭林は世界の陸地の約 0.25%を占めているにすぎないが、500 ～ 700 億トンの炭素（世界の土壌有機炭素の約 3%）を含むと推定されている。泥炭湿地林は森林伐採に対し脆弱である。森林被覆が失われると、泥炭は乾燥し急速に酸化する。泥炭は燃えることもあり、近年イン

ドネシアの多くの地域は、泥炭の燃焼によりしばしば大気の質が非常に悪化する。明らかに、隔離されていたすべての炭素が大気中に放出されてしまうのである。もしも泥炭林の有機炭素のほとんどが酸化したとすると、炭素排出量は 50 ギガトンに跳ね上がる。ちなみに、2014 年の世界の人為的な炭素排出量は 10 ギガトン未満だった。

要約すると、落葉樹林は熱帯または寒帯の常緑樹林よりも土壌共生ネットワークを通じてより多くの炭素を隔離する。落葉樹林の土壌はより豊かで、より多くの炭素を保持している。とはいえ、すべての森林は地球温暖化防止に貢献し、木々の中に炭素を生物学的に隔離する。そしておそらく最も重要なこととして、生物ポンプ機能によりすべての森林は世界の大規模な水循環をつなぐ大切な役割を果たしている。安定した水循環システムは、炭素の生物隔離そのものと同様に地球温暖化を停止し反転させるのに欠かせない重要なものだ。なぜならば、十分な水分なしで炭素隔離は行い得ないからだ。国際的な森林管理戦略はこれを考慮に入れなければならない。さらに、あらゆる森林再生プロジェクトにおいて、森林破壊を止め、種の多様性を最大化することが含まれるべきである。

宮脇方式はロールモデルとしてここでの手本となるだろう。ブループラネット賞を受賞した植物学者、宮脇昭氏は土壌、大気、水、気候の改善プロセスとなる再造林または新規造林の方法を開発した。氏は鎮守の森を研究し、独自の方式を作り上げた。日本中にあるこうした森林の断片は、日本本来の潜在植生のタイムカ

プセルである。宮脇氏はその植生が４つの主要なカテゴリーにおのずから階層化されていることに気づいた。主要高木種、亜高木種、低木、そして地表を覆う草類である。同氏の試みはこうした理解に基づいてモデル化された。上記の４つのカテゴリーから50～100種におよぶ地元の植物を選び、自然分布を模倣して無作為に混合し苗を植える。商業的な植林の20～30倍というかなり高密度で植林する。厳しい競争の結果、ほとんどの木々は通常の約10倍の速さで急速に成長する。植林地は、安定するまでの２～３年間は水やり、除草、監視を行い、その後は干渉せず自然の成長に任せる。宮脇はこの方式で、日本を含む15か国に4,000万本以上の木を植えた。しかし、その数字が物語のすべてではない。同氏は植物と動物の生物多様性を兼ね備えた森林生態系に加え、生物学的な炭素隔離能力も回復させた。

森林が地球規模の気候に対して果たす役割、さまざまな種類の森林がもつ独自の性質、生物多様性の価値、および適切な条件下で迅速に自己修復する自然界の力など、森林管理と回復戦略を成功させるには、これらすべてに対する認識が欠かせない。宮脇昭氏が尽力した植林活動は、その輝かしい例となっている。上記のことが大規模に実践されれば、気候変動に対する光合成による解決策において、森林は不可欠な役割を果たすことができるだろう。

d)都市部

全世界に都市部が占める土地面積割合の推定値は、0.2%から3%と大きくばらついている。その値は、森林、草原、耕作地が

占める地域と比較すると、それほど大きくないと思えるかもしれない。しかし都市部は、必要とする資源およびそこに住んでいる膨大な数の人々が生み出す廃棄物により、非常に大きな影響力を持っている。その炭素排出量の規模は大きく、都市部は考えられるすべての緩和戦略の主要なターゲットとなっている。

2012 年 9 月 18 日付の Scientific American の記事によると、2030 年までに世界の予想される人口 90 億人の半分以上が巨大な都市圏内に住むようになるという。世界人口の最大 80%がその年までに都市居住者になるという予測もある。都市は周辺の田園地帯に広がっていき、2030 年までにさらに 120 万 km^2 拡大して、総面積は現在のおよそ 3 倍の 160 万 km^2 を超えるだろう。私は、広々とした田園地帯が街を取り巻いていた、1988 年のネパール・カトマンズの谷を覚えている。だが 2018 年に再びそこを訪れ、有名なスワヤンブナート寺院の丘から谷を見渡した時には、そこはどちらを見ても建物の海と化していた。その新たな都市部の広がりの中を歩いたのだが、美しさを感じさせるものはほとんどなかった。地球上の過半数の都市についても同じことが言える。すなわち、騒々しく混雑していて空気と水は汚染され、一般に周辺地域よりも著しく暑い。この最後の現象には、都市部のヒートアイランド現象という名前さえ与えられている。

ヒートアイランド現象は新しいものではなく、1830 年代にはすでに報告されている。その発生する理由を理解するのは難しいことではない。近代都市の植物被覆は、多くの砂漠よりも

少なくなっている場合がある。 いたるところ舗装と建物だらけで、それらの表面はどこも吸水性がなく、吸収して保存するのは、太陽からの熱だ。屋上の温度は容易に 60℃を超え、冷却のためのエネルギー消費量が急上昇する。熱がしみこみ、水が流れ去るという状況を逆転させなければならない。水を浸み込ませ、熱を蒸発により逃すか反射させなければならない！実現するのは驚くほど簡単で、必要なのは少しの想像力と工夫だけなのだ。屋根や壁を緑化し、そうでない表面は反射させるようにしよう、ということである。緑の屋根または壁は、それらが直接もたらす日陰および土壌層からの断熱に加え、蒸発散作用により顕著な冷却効果をもたらす。アメリカの EPA によれば、緑の屋根は一般に周囲の気温と同じか、それよりも若干低い温度になるのに対して、むき出しの屋根は周囲の気温よりも最大 40℃あるいはそれ以上高温になる（図を参照）。緑の屋根はすでに世界中の都市に設置されている。世界レベルの園芸技術を持つ日本は、この緑の革命の最前線を走るべきなのだ！

グリーンルーフと従来の屋根の温度差

普段、シカゴ市庁舎の緑の屋根の温度は隣りの従来の屋根の温度よりおよそ40°C低いです。
屋上緑化がヒートアイランド現象の低減に役立つ新しいテクノロジーであります
グリーンルーフの植生が屋根に影を指すと、蒸発散により空気から熱を除去する

これら二つのメカニズムは屋根の表面と周囲の空気の温度を下げます。植生屋根の表面は周囲の空気よりも低温になることがありますが、従来の屋上の表面は周囲の空気の温度を最大50°C超えることがあります。

Green roofs are an emerging technology that can help communities mitigate urban heat islands. A green roof is a vegetative layer grown on a rooftop.

As with trees and vegetation elsewhere, vegetation on a green roof shades surfaces and removes heat from the air through evapotranspiration. These two mechanisms reduce temperatures of the roof surface and the surrounding air. The surface of a vegetated rooftop can be cooler than the ambient air, whereas conventional rooftop surfaces can exceed ambient air temperatures by up to 50°C.

Fig.15　グリーンルーフと従来の屋根の温度差[27]

冷却に必要な夏期のエネルギー需要の削減割合は、20%から最大75%と推定される。確かなのは、緑の屋根によるエネルギーの節約が決定的に重要であることだ。都市全体に設置された緑の屋根は、都市のヒートアイランド現象を軽減し、また解消しさえする。緑の屋根には他にも多くの利点がある。屋上植生と土壌

はスポンジのように働き、水を吸収してろ過するが、その水は、もし緑の屋根がなければ、樋から流れ落ちて汚染された道路を流れて行き、廃水処理施設に過度な負担をかけてしまうものなのだ。また、都市を美化して生物多様性を高め、都市居住者がくつろぐことができるし、さらには食物を育てる場所をも提供する。加えて、緑の屋根は、土や植物による覆いが屋根素材を悪天候や紫外線から保護するため、従来の屋根の２倍の寿命を持つ。都市部の土地表面の 25%を緑化できると仮定した場合、概算では、2030 年には 40 万 km^2 の新規の植物被覆が得られることになる。空調費の削減、および水需要と廃水処理コストの減少により、どれだけ多くのエネルギーが節約できることだろう。また、冷却効果と廃水処理に関連したすべての排出削減に加え、緑の屋根は、大気中の炭素の低減および生物性炭素隔離による吸収にも役割を果たし、40 万 km^2 を超える面積でのその貢献量も有意義なものになるだろう。

なお、舗装と歩道は吸水性のあるコンクリートとアスファルトで作られるべきである。このことは、地下水の補給、都市内の庭園への給水、洪水危険性の低減、廃水処理プラントへの負担の軽減に大きく貢献する。現状では、都市部の廃水処理施設は、集中豪雨による大量の水を処理できないことも多く、大量の未処理の下水を排出せざるを得ない場合すらある。透過性のコンクリートまたはアスファルトを通って流れ出る水からは、道路や屋上に蓄積する無数の汚染物質が除去されている。それらの汚染物質は、除去されなければ近くの貯留水に流れ込み、汚染負荷を増大させ

るものなのだ。すでに多くの吸水性を持つ製品が販売されている。

Topmix Permeable と呼ばれる新しいセメント製品は、1 平方メートルあたり毎分最大 1,000 リットルの水を吸収することができる。多孔質アスファルトシステムは、1970 年代から流通している。良いアイデアが不足しているわけではない。不足しているのは、人が惰性に打ち勝ち、そのアイデアを実行していく意志なのだ。

e) 海洋

海洋の植物プランクトンは、光合成を通じて発生する大気中の酸素の少なくとも半分を担っている。光合成の過程で約 370 億トンの二酸化炭素を捕捉する。これは生み出されるすべての二酸化炭素の約 40%に当たる量である。以下に引用する国際通貨基金の記事では、木であれば 1.7 兆本に相当する二酸化炭素の量を補足すると推定している[28]。アマゾンの森林 4 つ分にあたる量だ。こうして捕捉された二酸化炭素の大部分は、いくつかのメカニズムを介して海底に沈み、結果的に隔離されることになる。すなわち、まず死んだ植物プランクトンの大半が徐々に海底に沈んでいく。これは珪藻土という大量の堆積物が世界中に見られることからもわかる。第二に、夜間に海の表層近くの植物プランクトンを食べる動物プランクトンは、昼間は捕食動物を避けようと下方に移動する。下方で排泄されたこれら動物プランクトンの糞粒やその捕食動物の糞粒は、植物プランクトンによって固定された表層近くの炭素を深層へと送り込む。第三に、動物プランクトンを捕食する大型動物（数種類のサメ

やエイ、ペンギン、そして特にクジラ）が死ぬと、その遺骸は海底に沈む。これらは「生物ポンプ」と呼ばれ、その影響の規模が大変大きいことから、これがなければ大気中に残留する二酸化炭素の量がほぼ２倍に増えてしまうと考えられている。地球温暖化に対する光合成ソリューションの重要な一部としてこの生物ポンプに人間が及ぼす影響のプラスマイナスを考慮しなければならないのは明らかだ。植物プランクトンが炭素循環に与える影響の規模は以上の記述で簡潔に説明されているが、動物プランクトンの影響の規模、および大型動物、特にクジラの影響の規模については、さらに詳しい説明を行わなければならない。

動物プランクトンの垂直移動は、日周鉛直移動（diel vertical migration: DVM）と呼ばれる。これは、地球上におけるバイオマスが毎日自然に行う移動として、おそらく最大のものである。動物プランクトンは海水中を上下に移動する際に多様な捕食動物に食われ、その結果生じる捕食と糞粒の連鎖が、炭素や他の元素を速いスピードで水中より深くへと移動させる。こうした意味から、DVM はいわゆる「生物ポンプ」（生物学的介在により二酸化炭素を深海に隔離させること）の主要な要因といえる[29]。この論考を進めるため、ここではオキアミに焦点を合わせることにする。厳密に言えば、オキアミが動物プランクトンに分類されるのは卵と幼生段階、つまり遊泳能力のない段階のみである。このタイプの動物プランクトンは、一時プランクトン（meroplankton）と呼ばれる。オキアミは、地球上でおそらく最も大量に生息する動物である。オキアミのピークにお

ける個体数は、南極海だけで最大 60 億トンに達すると推定されている。オキアミの群れは宇宙からも見ることができる。オキアミが炭素を深海へ運んで隔離する規模は巨大なのだ。オキアミはまた、大型のヒゲクジラの主要な餌でもある。

クジラはいくつかの方法で炭素を隔離する働きをする。何よりもまず、クジラは植物プランクトンの豊かな成長にとって重要である。この点はいくら強調してもし過ぎることはない。クジラが潜水する際の動きは栄養素をかき混ぜ、それらを表面に移動させる役割をもつ。クジラはまた、「fecal plumes（綿毛状の糞の水柱）」と呼ばれる糞を排泄する。そしてその排泄を海面近くで行うのだ。これらの綿毛状の糞には、プランクトンの成長に不可欠な窒素や鉄が豊富に含まれている。クジラの生息が確認されるどの水域にも、植物プランクトンとそれを捕食する動物プランクトンの数が集中する。言い換えるなら、クジラは栄養素を循環させるのだ。クジラの個体群が健全でなければ、プランクトンのレベルは深刻な影響を被ることになる。クジラのおかげでプランクトンが豊富に生息すれば、二酸化炭素の生物学的隔離が大規模で行われることになる。さらに副次的な利点として、漁場に魚介類が豊富に生息するようになる。魚介類の生息はプランクトンの総バイオマスに直接または間接的に依存しているからだ。クジラはまた、その長い一生の間にも、死亡時にも、炭素吸収源として機能する。クジラの遺骸は通常、海底に沈むからだ。

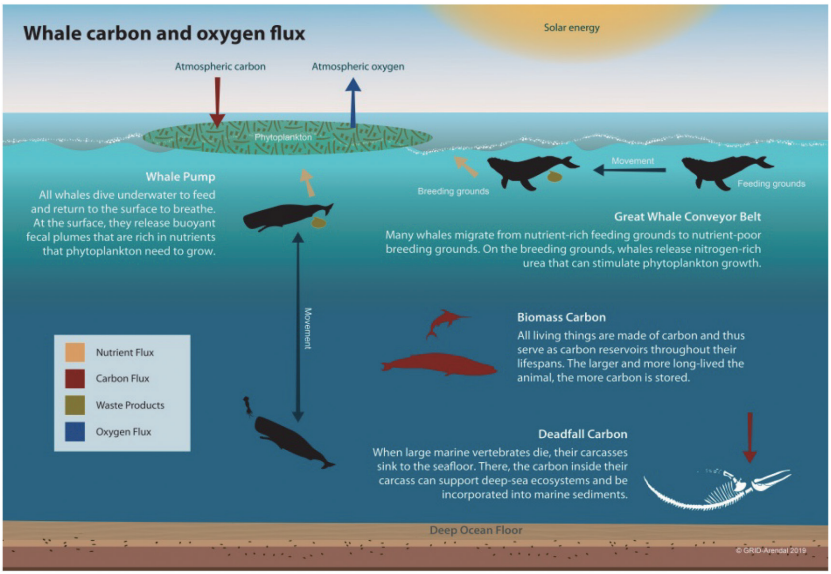


Fig.16 鯨の炭素サイクリングの図 [30]

世界の大型クジラの個体数は、現在では 19 世紀から 20 世紀初頭の大量の商業捕鯨以前の約 25%にすぎない。地球に生息した動物のなかで史上最大の動物であるシロナガスクジラの現在の個体数は、過去のレベルの 3%程度にすぎない。メイン大学およびメイン湾海洋研究所との共同研究を行う研究員、アンドリュー・パーシング氏は、この生物学的炭素隔離能力の消失についてわかりやすく説明している。すなわち、「1 世紀にわたる捕鯨は、2,800 万ヘクタール以上の森林を燃やしたか、28,000 台の SUV 車を 100 年間運転したかに相当する」と。生物学的炭素隔

離の非常に大きな部分が、海洋植物プランクトンの光合成活動から始まることは明らかだ。それが動物プランクトンによる炭素の移動に引き継がれ、さらにその移動が、大型クジラの大量の生息と繁殖によって支えられているのだ。クジラは、海洋プランクトンという大量かつ繁殖を続けるバイオマスの不可欠な要素なのだ。これが生物の炭素ポンプに他ならないのである。

このクジラの個体数という健全性に不可欠な要素に対する脅威には、どんなものがあるだろうか？ 一般的な禁止にもかかわらず捕鯨に固執する国々の活動についていろいろ言われることが多い。その中のトップが日本だ。日本やアイスランドなどの捕鯨国が実際に捕獲したクジラの数は、過去の漁獲量に比べるとそれほど多くはない。だがこうした捕鯨活動は、その間接的な影響の方がはるかに大きくなりそうなのだ。クジラは聴覚に依存している。人間が視覚に依存するのと同じだ。そのため、クジラは並外れた聴覚を持っている。驚異的な距離から音、特に低周波音を聞くことができる。捕獲されたクジラの遭難の叫びは、おそらく数百キロ離れた他のクジラによって聞きとられ、これらの非常に知的な生き物にストレス、ひいては恐怖まで与えるに違いない。ここからは、世界中の大型クジラにとって、おそらく捕鯨よりもはるかに大きな脅威となる問題に話が移ることになるが、その脅威とは、音響汚染のことだ。世界中の海で急激に増加している汚染である。船のモーターだけではない。音響汚染のなかでも最も有害な形態の汚染は、範囲が数百デシベルに及ぶソニックブームだ。こうしたソニックブームは、海

底石油探査にも、潜在的な敵の潜水艦の探索を目的として米国海軍やその他の海軍においても広く使用されている。これらが聴覚障害を起こさせるため、聴覚障害のクジラは、機能的に盲目ともなり、死亡に近い状態になるのだ。聴覚が完全に破壊されないほど遠くにいるクジラでも、威圧的な音に恐怖感を覚え、パニックに陥って逃げなければならない。このパニックにより、クジラは深い潜水から上昇する本能的なタイミングを覆されてしまい、結果として人間がそうなるように潜水病を患ってしまうということまで証明されている。クジラはさらに、ダイオキシン、PCB、有機水銀といった残留性有機汚染物質の生物濃縮という、より潜行性の高い汚染にも対処する必要がある。食物連鎖の頂点にいることから、これらの潜在的な内分泌攪乱物質および発がん物質の濃度は、クジラの体内で危険レベルにまで達してしまったようである。補足として付け加えると、商業捕鯨に賛成であれ反対であれ、こうした事態を考えるならば、安易に鯨肉を食さないようにする必要があるのではないか。この化学汚染が世界のクジラ個体群の健康に及ぼす長期的な影響はまだはっきりわかっていないが、プラスの影響ではないことは間違いない。

上の段落から明らかなことは、クジラの個体群の健全さや個体数の多さが、地球規模の炭素循環にとっていかに重要かということである。また、クジラをほぼ絶滅させかけた大規模な商業捕鯨が終わって久しい今でも、クジラが人間活動によってどれほど悪影響を被り続けるかも明白だ。海洋を管理して光合成を守ることにより地球温暖化を緩和させる議論が、つまるとこ

ろ、大型クジラをいかに保護しその個体群回復を促進させるかという議論であるのは、ほぼ当然のことなのである。

第５章 結論

永久凍土やメタンハイドレートに閉じ込められたメタンが放出することによって生じるフィードバックループが大規模に引き起こされた場合、地球の気候は、劇的に変化する可能性が極めて高い。地質史における過去５回の大量絶滅のうち４回の原因のすべてあるいは大部分が、温室効果の急上昇によって引き起こされた地球温暖化に起因することは、ほぼ間違いない。５回のうち最も壊滅的だったのがペルム紀末の大量絶滅であり、このときには種全体の90%以上が絶滅した。我々はすでに現在の地球温暖化傾向の著しい影響を目にしている。長引く干ばつ、壊滅的な山火事、より破壊的な暴風雨、より激しい降雨にともなうより頻繁で破壊的な洪水、両極および山岳地帯の氷の融解、海面上昇、昆虫の異常発生、動植物種の南北への著しい移動といった現象だ。急上昇する絶滅率もこれに含めたい。これらすべてがペルム紀末の大量絶滅時よりもはるかに速いスピードで発生している。つまりこれは、人類に対し実存的な脅威が迫っているということである。

温室効果の急上昇に関連した過去の大量絶滅とは異なり、現在の危機は主に温室効果ガスの人為的排出の結果である。原因は我々人間なのだ。必要な緊急措置は２つある。１つは、これらの人為的排出源を削減すること、もうひとつは世界規模の

組織的運動を立ち上げ、可能な限りあらゆる方法で大気中の過剰な炭素を削減することである。だが国際社会は、ごくわずかな例外を除いて化石燃料の燃焼に起因する炭素排出量の削減のみに焦点を当てている。これはいくつかの理由から問題だといえる。まず第１に、そうした対策さえ行われていないことであって、化石燃料排出は削減どころか、ここ数十年で大幅に増加している。第２に、たとえ化石燃料排出を一晩で奇跡的になくせたとしても、「レガシーカーボン」とも呼ばれる大気中に既に存在する炭素がある以上、事実上少なくとも２℃の上昇が保証されているのだ。第３に、広範囲にわたる気候災害を回避し、かつ、永久凍土と海洋性メタンハイドレートに貯蔵された膨大なメタンの破滅的放出可能性を回避すると言う目的のために、十分速やかに（かつ言うまでもないが、十分経済的に）導入できるような炭素削減技術などどこにも存在しない。第４に、そして最も重要なこととして、人為的排出は化石燃料を燃焼しただけでは起こらない、ということである。これは一般的に無視されていることだが、他にも地球温暖化の原因として同じかもっと重要な人為的排出源が存在するのである。

本論考は、この第４の問題、すなわち、非化石燃料排出の規模や重要性に対する認識の欠如に焦点を当てている。続々と報告される一連の実証例からわかるように、陸地および海洋の悲惨な管理から生じる排出量は、化石燃料の排出量に匹敵するか、場合によってはそれを超えるかもしれない。これまで述べてきたように、さまざまな形の管理の誤りが、過去の時代には有機物として生物学的に隔離された炭素を大量に放出させ、同時に、

炭素を有益な有機形態として生物学的に隔離し続ける生物圏の能力を大きく低下させた。この事実を認識しないまま、温室効果ガス排出を削減したり、CO_2 として存在する過剰な炭素を大気から削減したりする効果的な戦略を発見し、それを実施することは、明らかに不可能なのである。事実、残された猶予期間内で地球温暖化をスローダウンさせ最終的に逆転させられる唯一の現実的な戦略は、光合成の潜在能力を生物学的炭素隔離に活用することである。

世界中で行われている光合成活動は、日々人間活動のおよそ９倍の炭素原子を移動させており、しかも、それは正しい方向、すなわち、炭素が生命にとって有益となるような有機物形態に移動させているのだ。もしも、10 倍の炭素原子を移動させるようになるまで光合成活動を強化できれば、地球温暖化は解決できると考えられる。言い換えれば、地球を救うには光合成生産をたった 10%程度増加させればよいという話なのだ。これは明らかに実行可能である。

こうした点を理解するのに誰よりも貢献した人物が３人いる。１人目は、オハイオ州立大学のラタン・ラル博士で、土壌有機炭素損失の測定方法の確立を先駆的に行った。博士やその他の研究者による研究により、世界の土壌が過去２世紀に土壌有機炭素の 50 ～ 80%を失ったことが証明された。 これは驚異的な量だ。重要な点として、ラル博士は、土壌有機炭素の回復が気候変動を抑制するための実行可能な戦略であることを明確に述べている。だが、博士の主張ではまだ十分とは言えないかもしれない。博士の土壌炭素損失の推定方法は用途が限られてお

り、しかも野生動物保護区や都市部、森林、海洋からの消失を考慮していないため、大気へ放出された有機炭素の総量はおそらくはるかに高いものとなる。その結果、光合成による隔離によって有機炭素を回復させる戦略は、もっと大きなインパクトを持つ可能性がある。

２人目は、野生生物および草地の復元生態学者であるアラン・セイボリー氏だ。セイボリー氏は「ホリスティック・マネジメント」と自ら名付けた家畜・放牧地管理方法を先駆的に開発した。牧草地を復元し、放牧地の特定の地域で持続的に放牧できる家畜数を数倍に増やしながら、さらに、砂漠化を逆転することを可能にする方法である。セイボリー氏は、この方法が世界の草原の半分で実施されれば、大気中の炭素レベルを数十年で産業革命以前のレベルまで下げることができると主張している。氏のパイロットプロジェクトやその方法を競い合うように見習ったいくつものプロジェクトにより、劣化した土地を短時間で驚くほど回復させることは確かに可能であることが実証されている。

３人目は、著名なオーストラリアの土壌生態学者であるクリスティーン・ジョーンズ博士である。博士は、植物と土壌微生物叢間の重要な関係の解明およびさらなる理解に努めてきた。この関係が作用して膨大な量の炭素が急速に生物学的に隔離される仕組みは、まだ一般的には認識されていない。この関係を要約する表現として、博士は「炭素ポンプ」「液体炭素経路」という新語を作った。これらの新しい概念により、炭素の生物学的隔離の仕組みについて理解がより深まるものと期待される。

博士はこうした精力的な努力により、植物は不活性土壌から栄養を摂取するだけではないこと、相当量を土壌に還元もすることを広く認識してもらうことに取り組んできた。植物、菌根菌、微生物間のこの双方向の相互作用が土壌共生ネットワークを形成し、この作用により驚異的な量と速度で炭素が生物学的に隔離され、その過程で土壌が豊かになり、保水力が向上する。このメカニズムにより、草原が気候変動を逆転させうるというセイボリー氏の主張の裏付けもより確かなものとなる。

これまで、多くの人々がセイボリー氏の主張をほとんどありえないことと冷たくあしらい、実際に反証を提供することなしに、具体的な成果を認めようとしてこなかった。だが同様の説を主張するのはセイボリー氏だけではない。森林に関しては、生態学者のトーマス・クラウザーとスイス連邦大学の同僚が2019年に発表した研究において、世界中で農地に影響を与えずにさらに1.2兆本の植樹が可能であり、数百ギガトンの炭素、すなわち現在の進度で計算した場合少なくとも人為的排出の10年分を閉じ込めることができると主張している。農地に関しては、ニューメキシコ州立大学の持続可能農業研究所で行われたデビッドCジョンソン氏とその同僚の研究は、同チームが開発した土壌管理方法で土壌中の健全な菌類やバクテリアを最大化すれば、より多くの作物をより速く、より良く、より少ない水で育てることができること、さらなる利点として、炭素が隔離されることを示した。同チームは、「開発したシステムを用いて現在観察を行っているバイオマス生産の速度は、世界の農地の11%未満におけるすべての人為的CO_2排出を相殺するのに十

分な CO_2（ヘクタールあたり 120 トン以上）を捕捉することを可能にするものである」と述べている。この 2 つの研究の論点は、適切に管理された土地における強化された光合成活動それ自体によって、人為的排出を取り除くことができるというところにあり、セイボリー氏の議論と同じものである。これらのすべての戦略を可能な範囲で実施する必要がある。彼らおよびその他多くの先駆者が先駆けている方法や戦略には、例外なしに次のような望ましい副次的な利点がある。砂漠化の逆転、農業生産の改善、洪水と干ばつ防止の強化、都市の冷却、社会的結束の再構築、海洋漁業の回復、生物多様性の回復などである。地球温暖化の緩和、さらには逆転という大きな利点を考慮に入れず、ただこうした副次的な利点だけを見ても、これらの戦略を単独で実施する価値があるといえよう。さらに言えるのは、これらの難問は全部相互につながっており、かつ、気候変動に関係していることなのである。

これらすべての主張について、重要なポイントをここで述べておく必要がある。科学的確実性を賛美する現代であっても、意思決定の圧倒的多数は経験的知識に基づいている。言い換えるなら、「これは効果がある、じゃあやってみよう。理由は後で見つければいい」というやり方に基づいているのだ。地球温暖化への対応もこうでなければならない。地球温暖化の人為的原因やその対処に向けた戦略の有効性について絶対的な証拠を要求し、そのことが何もしないことの理由に都合よく使われる、この構造があまりにも長い間続いてきた。しかし、地球温暖化の明確でかつ既に現前している危険性が我々にのしかかる

スピードはあまりに速いわけで、戦略の科学的妥当性を一点の疑義もなく完全に実証してから戦略を実施する余裕などあるはずがない。ある戦略が良い結果を出しているのであれば、経験的に受け入れて実施しなければならない。気候の緊急事態に対する現実的解決策は、他に発見されてはいない。しかも、もう時間がないのだ。光合成管理の戦略なら、世界中の草地、農地、森林、都市部で驚くほどの結果を出しており、海洋でも期待されている。我々の答えはここにあり、副次的な利点だけを見ても実施の価値があることを、数々の結果がすでに十分に実証しているのだ。

この議論を経済的な観点から枠付けするのも有益かもしれない。クリスティーン・ジョーンズ博士は、炭素が生物内および生物間の取引で広く使用されている通貨なのだとみなしてきた。生態学者のジョン・トッド氏によると、「人類は常に炭素を基盤としていた。歴史のほとんどの時代において我々を支えてきた炭素は、樹木やその他の植物、動物に取り入れられた「遅い炭素」だった。産業革命以来、我々は石油や天然ガスの形態をとる、「速い炭素」の使用に移行した。速い炭素は有限であり、再生不可能だ。 別の言い方をすれば、我々は現在「酸化」経済を営んでおり、過去の光合成産物を燃焼で大気に開放し、現在の光合成産物を破壊的な土地管理を通じて大気に開放してしまっているのだ。その悲惨な結果が、汚染、戦争、社会構造の崩壊、そして地球温暖化という極度の危機を招いているのだ。自らを救い、世界を再び緑に変え、生き生きとした生命で満たすには、酸化経済を捨て、遅い炭素による光合成経済に戻らなければな

らない。これを達成しうるのが土地管理戦略なのである。ただこの戦略を推進するには経済秩序を変える必要があるし、死を早めるという意味での速い炭素（それを使用した人はお金を払わされる）にも、豊かな生命を与えてくれる有機的な遅い炭素（それを築いた人には報酬が与えられる）にも、どちらにも正しい価値付けを行う必要がある。したがって、戦略を成功させるには、経済管理にかかわる要因と土地管理にかかわる要因を共に再考する必要があるのだ。

唯一現実性のある解決策即ち、気候変動に対する光合成ソリューションの実現にかけられる時間は、ほとんど残されていない。地球温暖化は、地上のソリューション可能な場所をどんどんなくしてゆくだろう。降雨帯は北と南に移動し、南欧や北米など、地球上至るところに、サハラのような砂漠を生み出す。湿地帯が消えゆく。森林が燃えきり、草原や至る所の農地が砂漠化する。海面上昇が広大な陸地を水没させる。温度が上昇し酸性化している海洋は海の砂漠となる。サンゴ礁が消える。壊滅的な現象が次々に起こるのだ。光合成ソリューションを実施することによって成功を導くことが可能な時間はせいぜい２～30 年しかないのである。

そしてその成功は、絶対に達成しなくてはならない。光合成活動の強化は、科学的調査によっても、さらに重要なことに世界中における応用結果によっても、陸地や水域の破壊を緩和できることが実証されている。しかも、最も重要なこととして、光合成の強化は、気候変動の逆転にも大きく貢献することが実証されているのである。希望を無くし、危機が増大する一方の

現状にあって、上記の取り組みや結果は人類に希望を与えてくれる。この希望を現実のものにするためには、これらの発見や方法をできるだけ早く、できるだけ大規模に適用する必要がある。それ以外、世界には選択肢はない。他の選択肢は想像を絶するほど恐ろしいものだからだ。

---

1 “Global Potential of Soil Carbon Sequestration to Mitigate the Greenhouse Effect” by Rattan Ral https://doi.org/10.1080/713610854

2 “Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate” Beer et al. Science 2010 Aug.

3 https://www.bloomberg.com/news/articles/2013-11-04/kyoto-veterans-say-global-warming-goal-slipping-away

4 “Are We Falling Off the Climate Precipice” by Dahr Jamail https://oilprice.com/The-Environment/Global-Warming/Are We-Falling-Off-the-Climate-Precipice.html

5 Ibid.

6 Natural catastrophe know-how for risk management & research by Munich RE

7 Graph from “The Siberian Traps and the End-Permian mass extinction: a critical review” by Andy Saunders and Marc Reichow Chinese Science Bulletin 2009.

8 Graph from “The Siberian Traps and the End-Permian mass extinction: a critical review” by Andy Saunders and Marc Reichow Chinese Science Bulletin 2009.

9 "Global Changes in Drought conditions Under Different Levels of Warming" by Gustavo Nauman, Lorenzo Alfieri et al. in Geophysical Research Letters, March 2018.

10 Source: Shutterstock.com

11 European Environment Agency (EEA) report No 12/2012 Climate Change, impacts and vulnerability, and quoted in Grist, Nov. 21, 2012: "The 16 scariest maps from the E.U.'s massive new climate change report" by Phillip Bump

12 Ocean Today: Arctic Sea Ice Sets Record Low – January 28, 2017.

13 Carve: The Carbon in Arctic Reservoirs Vulnerability Experiment, Charles E. Miller Conference Paper, IEEE Aerospace conference Proceedings, March 2012.

14 "Methane Hydrate: Killer cause of Earth's greatest mass extinction" Uwe Brand, et. Al.
Palaeoworld, Volume 25, Issue 4, December 2016.

15 "Methane Hydrate: Killer cause of Earth's greatest mass extinction" Uwe Brand, et. Al.
Palaeoworld, Volume 25, Issue 4, December 2016.

16 Global potential of Soil Carbon Sequestration to Mitigate the Greenhouse Effect by Rattan Ral
https://doi.org/10.1080/713610854

17 Images Republished Courtesy of the Savory Institute

18 Ibid.

19 Ibid

20 Ibid

[21] Source: Faslanyc - Complications with Complexity – November 7, 2010

[22] "Glomalin: Hiding place for a third of the world's stored soil carbon" Wright, Sara F.; Nichols, Kristine Agricultural Research; Vol.50, Iss. 9 (Sep 2002)

[23] See footnote no. 2 above

[24] The United Nations Decade for Deserts (2010-2020) and the fight against Desertification https://www.unccd.int/sites/default/files/inline-files/Quick%20Facts%20on%20drylands%2C%20deserts%2C%20desertification%20and%20land%20degradation_0.pdf

[25] "Topsoil Erosion" Eric Verso, Stanford University http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/verso2/

[26] "Global Potential of Soil Carbon Sequestration to Mitigate the Greenhouse Effect" by Rattan Lal http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/verso2/

[27] Source: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies

[28] Finance and Development, Vol 56, No 4, December 2019. "Nature's Solution to Climate Change" Ralph Chami et. al. https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2019/12/natures-solution-to-climate-change-chami.htm

[29] "Diel Vertical Migration" by Andrew S. Brierley Current Biology, Volume 24, Issue 22, November 17, 2014

[30] "Diel Vertical Migration" by Andrew S. Brierley Current Biology, Volume 24, Issue 22, November 17, 2014