

大気中の二酸化炭素は制御可能か？

概要—化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素は、理論的には樹木を成長させることによって制御できる。定量的な見積もりは、大気中の二酸化炭素の増加を抑止するように設計された植物栽培プログラムの規模とコストからなる。

問題の提示

現在(1976年)、大気中のCO₂には 7×10^{11} トンの炭素が含まれている。化石燃料が燃焼されると、大気中に 5×10^9 トン/年の炭素が増える。この量のうち、 2.5×10^9 トン/年だけが、大気中のCO₂の正味増加量として表れる。残りの 2.5×10^9 トン/年は、海洋と生物圏に吸収される。どれだけの量が海洋に、どれだけの量が生物圏に向かうのかは、まだ推測の問題である。生物圏の現在の炭素含有量はだまかに知られているにすぎない。推定値は、おそらく2倍以内の範囲で正しいと思うが、

泥炭及び腐植土: 10^{12} トンの炭素

長寿命の植生(樹木): 6×10^{11} トン

急速交換プール(葉、根、落葉落枝、無脊椎動物)—(50%生、50%死): 2×10^{11} トン

である。

生きている植物の炭素は、大気中の総炭素量とほぼ等しい。更に、光合成によって大気中から生物圏に移動した炭素の正味量(光合成による総量から呼吸の分を差し引いた量)は、大気中の炭素の年間増加量の約20倍にあたる約 5×10^{10} トン/年になる。正味の光合成は、炭素をCO₂に変換して大気に戻す腐敗、放牧、燃焼のプロセスと、ほぼ正確にバランスが取れている。

化石燃料の燃焼による影響に匹敵するものの測定がはるかに困難な、大気中のCO₂に影響を与える可能性のある、人間の活動という他の事象が存在する。森林を開拓して耕作地や牧草地に置き換えるのは、そのような活動の1つである。毎年、熱帯林全体の1%が破壊されるとすると(そして、そのような伐採の規模について正確なことは誰にも分からない)、結果として約 1.2×10^9 トン/年の炭素が大気中に加わる。一方、肥料を大量に使用し、余った農作物を地面に埋めて耕作する現代の農業方法だと、農地の腐植土における炭素含有量が大幅に増加する可能性があるという証拠が存在する。同様に大気中から炭素を取り除き続けている第3の人間の活動とは、湖や河口の富栄養化と、その結果起きている有機堆積物の蓄積だ。最後に、大気中のCO₂の増加量に応じて光合成の速度が増加するため、生物圏の炭素含有量が増加する可能性があるという非常に複雑な問題がある。こういった大気中のCO₂の負のフィードバック効果がCO₂そのものに与える影響の大きさは、まだ解明されていない多くの生態学的相互作用に依存する。その影響は無視できるほど小さいか、 3×10^9 ト

ン/年の炭素量となる可能性がある。要約すると、生物圏の炭素含有量が、ここ数10年の多様な人間活動に応じて減少したのか、増加したのか、或いは変化しなかったのかを決定するに足る十分な証拠は存在しない、ということだ。

大気中のCO₂の増加が地球の気候に及ぼす影響の算定または予測を試みる膨大な文献が存在する。そのような試みは有用で必要なことではあるが、そこで厄介な技術的困難にぶつかる。特定の量のCO₂によって引き起こされる地球の平均温度上昇でさえ大きな不確実性に晒されているし、局地的及び時間的に変化する現象(農業やその他の人間活動にとって決定的に重要かもしれない)に及ぼすCO₂の影響は更に不確実である。CO₂の増加は、特に非常に寒く乾燥した地域の異常気象を減らす上で、全体的に人類にとって都合がよい可能性がある。危険は恩恵をはるかに上まわる、というのが優勢な意見である。しかし、様々な緊急警告にも関わらず、私たちの行動が及ぼす影響をいかなる確からしさでも知らないまま、何10年間も化石燃料を燃焼し、大気中のCO₂レベルを増やし続けることは、避けようのないことのように思える。

さて、別の疑問を提示する頃合いだ。CO₂レベルの上昇に伴い、深刻な生態学的災害に出くわしたとしよう。そのとき私たちは、産業文明を停止するというような極端な手段を取ることなく、数年以内にCO₂の上昇を停止または逆転させることは可能だろうか? 試しに、この疑問に肯定的に答えてみよう。光合成による年間代謝回転率は大気中のCO₂年間増加量よりも20倍大きいため、世界規模の緊急事態が起こっても、十分な樹木や急速に成長するその他の植物を植えて過剰なCO₂を吸収し、年間増加の抑制をもたらすことは可能なはずである。本論文の目的は、そのような緊急植物栽培プログラムの規模、費用、実現可能性を概算することである。

CO₂によって引き起こされる大災害の脅威に対する長期的対応と短期的対応を区別することが重要である。このような大災害が差し迫ってきたなら、長期的対応として、化石燃料の燃焼を停止し、私たちの産業を再生可能な光合成燃料、核燃料、地熱、直接太陽エネルギー変換に代替させなければならない。しかし、化石燃料から非化石燃料へ世界的にシフトすることを、数年で実行することはできないだろう。例えば、火力発電所で石炭の代わりにおがくずや低品質木材を使うということであれば、すぐに始めることができる。適切な準備が事前に行われていれば、化石燃料の燃焼は10年から20年で大幅に減少し、再生可能燃料への移行は基本的に50年以内に完了するかもしれない。しかし、この対応は遅すぎて、CO₂の被害を回避できないかもしれない。緊急植物栽培プログラムは、化石燃料からのシフトが実施されている間、CO₂を封じ込めるために必要な短期的対応を提供する。このプログラムの目的にとって、化石燃料を直接置き換えることができる場所を除いて、新しく成長した樹木や植物を燃料として使用しないという点が極めて重要である。新しく成長した植物は「炭素バンク」と考えられ、私たちが適切な産業マシンを構築し、それを安全に使えるようになるまで、炭素を保存する。炭素を大気から長期保存庫に移すことを可能にする主な方法は、収穫しないで残しておく長寿命の樹木を栽培する、腐植土に変わるか人工の泥炭湿原に堆

積される短寿命の植物を栽培する、の2つである。どちらの方法にせよ、広い面積の土地が必要となる。現在の非生産的な土地でも何とかなる植物もあるだろうが、その多くは、作物や肥料の管理にいくつかの変更を加えた既存の農地または生産性の高い林地で実施されるだろう。食料及び林産物の産出増加量と、森林及び腐植土にある炭素の保存増加量の間、必然的な非交換性はない。

そもそも、ここで提案された特別緊急プログラムが実施される可能性は殆どない。これに関する私の議論はあまりにも単純化されすぎている。この論文の目的は、CO₂の蓄積によって起こる大災害の危険が深刻になった場合でも、現実的なプランが持てるよう一連の心の準備を始めることである。プランを準備することは生命保険の1つであり、驚異的な大災害などが起こらなくても価値がある。そして、このプランを大気中のCO₂の緩衝材として利用するのはまったく別に、有機材料の世界的な保存庫が役に立つ他の多くの有益な目的がある。

生物学的に大気中からCO₂を除去する私の提案と、化石燃料プラントの排出物からCO₂を物理的に除去し、続けて液化CO₂を深海に廃棄するというマルケッティの提案は、互いに矛盾するものではない。どちらも利便性があり、それぞれ特定の場所や時間で優れているだけのことだ。ここでは、2つの提案のコストと時間スケールの比較は行わない。

定量的な見積り

私たちは、大気中のCO₂の現在の増加速度に匹敵する量の炭素を大気中から取り除く準備をしたい。この除去を今(1976年)から始めるとしたら、その量は炭素に換算して 2.5×10^9 トン/年になる。将来的には化石燃料の消費が増加し、必要な除去率は現在の値の数倍にまで上昇するだろう。現在の見通しでは、2000年の化石燃料使用率は、現在の2~4倍になる可能性が高いと示されている。従って、現在から2000年までの間に必要な除去率は、 $2.5 \times 10^9 \sim 10^{10}$ トン/年の範囲の炭素量になるだろう。私は、この除去プランを向こう25年以内のどこかの時点で実施しなければならないとなった場合に浮上する問題の大きさを反映して、 5×10^9 トン/年という値を採用している。2000年以降は、予測不可能な多数の偶発的事態に応じて、問題は更に深刻になる場合もあるし、そうでない場合もある。

急速に成長する栽培樹林に相応しい2つの有望な候補は、樹木と湿地植物である。多種多様な樹木は、世界の様々な場所にある耕作限界地で育つ可能性がある。アメリカ南東部に適した樹木作物の例として、私はジョージア大学の森林資源学部によって実験的に栽培されたアメリカスズカゲノキを考えている。これにより、1km²あたり約750トン/年(1エーカーあたり3トン/年)の炭素が産出される。私たちには、樹木が植えられる前の土地開拓でどれだけの植物が破壊されたか知りようがないし、また栽培樹林が土壌に含まれる腐植土に保存された炭素量に及ぼす影響も分からない。もし私たちが1エーカーあたり3トン/年の固定炭素の正味増加量を達成できると仮定するなら、この特定作物によって大気中のCO₂増加量を相殺するには、約 7×10^6 km²の土地が必要である。もちろん、アメリカスズカケノ

キの栽培樹林に適した面積は、 $7 \times 10^6 \text{km}^2$ よりはるかに小さい。ある種の栽培樹林に適したアメリカ国内の土地は、約 $7 \times 10^5 \text{km}^2$ と推定されている。これは、年間降水量が少なくとも 20 インチで、現在は非生産的な土地だ。この土地の多くはすでに低品質の森林で覆われており、急速な成長を促進するために、移植しなければならない部分と、単に肥料を与えて管理しなければならない部分を決定する詳細な調査が必要とされる。こうして、アメリカは、必要とされる樹木の育成の約 1/10 を提供できるだろう。世界の森林の総面積は約 $5 \times 10^7 \text{km}^2$ である。大気中から 5×10^9 トン/年の炭素を吸収するには、世界全体で炭素に換算して 1 エーカーあたり 0.4 トン/年の平均増加量が見込める長期的な森林の成長、またはその面積の 1/7 で 1 エーカーあたり 3 トン/年の増加量が見込める森林の成長を達成する必要がある。それらの炭素が腐敗によって大気中に戻らないように、50 年以上生きる樹木種を追加的に育成しなければならない。販売されている殆どの樹木種は、この目的に対して十分に長寿命である。

植林に代わる方法は、水生植物の集約栽培である。ホテアオイは、成長が早く、丈夫であるため、特に興味深い。それらは、アメリカズズカケノキの約 8 倍である、 1km^2 あたり約 6000 トン/年の炭素(1 エーカーあたり 24 トン/年)を生産する。それらは、豊富な淡水が湧きだす土地、または運河や池でのみ育成できる。 5×10^9 トン/年の炭素を固定するには、 $8 \times 10^5 \text{km}^2$ の土地が必要になる。ホテアオイにいくらか適していると思われる熱帯湿地の総面積は、約 $25 \times 10^5 \text{km}^2$ である。その土地の殆どは南アメリカ、アフリカ、東南アジアにある。アメリカは $2 \times 10^5 \text{km}^2$ にすぎず、その大部分は、昔から水抜きして農業に使用されているミシシッピ氾濫原である。それでも、CO₂ 問題の改善に無視できない貢献をするのに十分な湿地帯がアメリカに残っている。

ホテアオイの集約栽培は、大型の発酵タンクで嫌氣的に植物を分解することで得られるパイプライン品質ガス(実質的に純粋メタン)の供給源として提案されてきた。もし植物を大気中の CO₂ のシンクとして使うならば、メタンへの分解が起こらないように、収穫後、半永久的なやり方で CO₂ を保存することが不可欠である。私たちは、自然の泥炭湿原で生育した植物に、メタンではなく泥炭を形成させる酸性度と無菌性の条件を人工的に再現しなければならないだろう。必要な規模の人工泥炭湿原が実現可能か、また環境的に許容可能かを明らかにするために、広範な実験が必要である。

耕作地または自然の湿地及び湿地帯のいずれにせよ、腐植土の形で炭素を保存するために利用されたホテアオイ以外にも、ソフトな植物の種類は多い。これらの植物の中には、サトウキビのように、炭素固定剤としての価値に加えて、食用作物またはエネルギー作物としての商業的価値を持っているものもある。ここでは、いろいろな代替可能性に対する評価は行わない。

樹木とソフトな植物のいずれかで「炭素バンク」を構築する場合に考えられる主要な問題の 1 つは、植物が純粋なセルロースで構成されていないどころか、窒素、リン、カリウムといった元素を大量に含有しているという点である。世界の多くの場所で、自然林は人工肥料が

なくても成長するが、樹木や植物を強制的に急成長させるプランでは、肥料の使用が必要になるだろう。この問題の大きさを推定するために、私は、ジョージア州でアメリカスズカケノキの苗木を実験的に植林したときの入出力データを使用している。1 エーカーあたり乾燥重量で 13.4 トンの作物を生産する 2 年間のサイクル(これは約 6 トンの固定炭素量を意味する)の場合、肥料の投入量は窒素 215 ポンド、リン 20 ポンド及びカリウム 40 ポンドだった。そして、収穫された作物におけるこれらの元素の量は、窒素 51 ポンド、リン 5 ポンド及びカリウム 19 ポンドだった。大雑把に言えば、これらの入力量は上限を設定し、出力量は集約的な急成長プログラムに必要なとされる肥料の量に対して下限を設定する。栽培面積が広ければ広いほど、大量の施肥は必要なくなっていく。もし私たちが必要条件を推計するのに出力量を用いるならば、 5×10^9 トン/年の炭素を固定するために、年率で窒素 2×10^7 トン、5 酸化 2 リン 7×10^6 トン、及び酸化カリウム 10^7 トンを肥料として消費する必要がある。これらの数値は、1973 年の全世界の肥料使用量の約半分だ。肥料の入手可能性は、炭素固定の規模とスピードを制限する重要な因子となる可能性が高い。

財務コストを見積もる際の不確実性は、必要とされる肥料を見積もる際の不確実性よりも更に大きい。エネルギー生成のために、樹木作物を大規模に植林し収穫する 1 つの提案では、土地の開拓と植林に 1 エーカーあたり 140 ドル(1975 年)のコストが見積もられている。もしその後、1 エーカーあたり 3 トン/年の炭素を固定するとすれば、私たちは 5×10^9 トン/年の炭素を固定する栽培植林を確立するために 2×10^{11} ドル(数年間で拡大)を費やす必要があるだろう。これに、 12×10^9 ドル/年オーダーにもなる肥料の継続コストを追加する必要がある。このようなコストは、地球規模の緊急事態に対応する世界規模の取り組みとしては、法外なものではない。もし植林の殆どが、労働力の安い国で労働集約的な方法で行われたとすると、このコストはおそらくもっと低くなるだろう。

コストを計算するもう 1 つの方法は、化石燃料のすべての燃焼装置に、大気中から CO_2 を除去する作業分に支払えるだけの高い税率で課税してみることだ。私は、現在の大気中における炭素の増加率の 2 倍である 5×10^9 トン/年の炭素を除去することを仮定してきたので、世界の化石燃料の消費量は現在の 2 倍であると仮定しても、一貫性は損なわれない。次に、私たちが 1.2×10^{14} kWh/年(熱)の化石燃料を消費し、肥料の年間コストに対し、12%の利息で栽培植林の資本コストを加えたとして、 25×10^9 ドル/年の収益が得られるように課税する。税率は 0.021 セント/kWh、つまり 100 万 Btu あたり 6 セントである。私のコスト見積もりは非常に大雑把で、栽培植林に使用される土地コストを考慮に入れることはしていない。それでも、大気汚染物質に課せられる税に換算すると、見積もられたコストが容易に支持できるものになった点は心強い。

結論

仮にそういう必要に駆られる事態になったとしても、大気中の CO_2 の増加を数年以内に抑止または逆転させるにあたって、私たちが措置を講じることを妨げる物理法則や生態学的

法則はないように思える。多くの可能な選択肢のうち、大気中から炭素を除去する 2 つの方法を説明した。1 つは、急速に成長する樹木を大規模に耕作限界地に植えることである。もう 1 つは、湿地植物を育てて収穫し、腐植土または泥炭に変えることである。これらの操作が可能な規模とスピードは、土地コストや財務コストというよりも、肥料の利用可能性によって制限されているように思える。樹木や泥炭の形で、そのような「炭素バンク」を確立することは、CO₂問題の恒久的な解決策と見なされるべきではない。これは、大気中の CO₂ レベルを数 10 年間抑制し、化石燃料への依存から再生可能な光合成(または核)燃料への恒久的なシフトが完了するまでの時間を稼ぐための応急処置である。