



## 沙漠海岸にバイオマス・コンビナートを造る

(東京大学大学院農学生命科学研究科) 倉橋みどり

### 気候変動

南極の氷床コアに残された記録から、過去80万年間の地球大気中の二酸化炭素濃度を知ることができる。それによると、およそ10万年の周期で、地球上の二酸化炭素濃度は170 ppmから300 ppmの間で増減を繰り返しているが、300 ppmを超えたことはなかった(図1)<sup>1)</sup>。ところが、その濃度が1958年に315 ppmに達してしまっただけで、それから、57年後の2015年には400 ppmを突破し、それから3年後の今年、ハワイの観測所で初めて410 ppmを記録した<sup>2)</sup>。数十万年という時間軸スケールの図表からすれば、私が生きているほんの瞬間と言え間に、最高値を100 ppm近くも更新するような上昇スピードは「異常」という他ない。

この「異常なスピード」にこそ、この問題の重大かつ深刻な面が潜んでいる。二酸化炭素濃度の話題は、地球温暖化の問題として議論される。これに対し「今後地球は自然の周期に従い、寒冷化に向かうはずなので、人為的な二酸化炭素による温暖化は相殺され問題にはならない」との反論も聞かれる。しかし、非常に速いスピードで二酸化炭素が増加しているため、寒冷化へ転換するために必要な二酸化炭素濃度の閾値を超えてしまっており、すでにその機会は失われてしまっているとも言われている<sup>3)</sup>。また、これまで人類は英知を結集し、あらゆる問題に対処してきたので、今回もそのうち、どこかの誰かが良い解決案を考え出してくれるに違いないと思われる方もいるかもしれない。しかし、国連のIPCC

(Intergovernmental Panel on Climate Change) から、およそ5年ごとに気候変動予測シナリオが出されるようになって数十年経過するが、最悪のシナリオが繰り返されており、今日までどこの誰も解決策を見いだすことに成功していない。人類の英知(?)は、このスピードに追いつけない可能性が高まっている。

無用に危機感を煽る意図はないが、私たちに危機感が不足しすぎていることは事実である。酷暑の夏が過ぎれば、どこか他人事なのである。しかし、「気候変動」の中身は、「温暖化」というより「気候の極端化」「気候の凶暴化」と表現した方が適している。この気候変動の影響は、直接的な災害のみならず、今後ありとあらゆる方面から火の手があがってくるだろう。たとえば、気候変動は人の健康にも影響を与える<sup>4)</sup>という事実。ここでパンデミックの問題を考えてみる。生物は環境の変化に対し、それぞれのDNAを変化させながら適応進化してきた。ホモサピエンス種が引き起こしている超高速の気候変動に対しても、細菌などの世代交代の時間が短い生物であれば適応できる種も少なくないであろう。しかし、世代交代に数十年かかるホモサピエンス種では、間に合っていない。その結果、免疫力が衰えるなど<sup>5)</sup>体力を消耗しているホモサピエンス種に、元気のよいウイルスや細菌が襲いかかるのはたやすいこととなる。パンデミックがスクリーンから現実社会に飛び出してくるのは、もはや時間の問題と言わざるを得ない。近年、低中濃度(600~2000 ppm)であっても、それがベースとなると、人の認知能力や戦略から意思決定に至る能力を著しく低下させることが報告された<sup>6,7)</sup>。ちなみに、現在、厚生労働省の「建築物環境衛生管理基準」では、室内の二酸化炭素濃度は1000 ppm以下を保つこととされており、1000 ppmを超えると「倦怠感、頭痛、耳鳴り、息苦しさなどの症状を訴えるものが多くなる」そうである。このまま抜本的な手段を講じないでいると、100年後、200年後にその濃度に達してしまう。ひ孫の時代には、空気は「空気のような存在」ではなくなる。

実質的に日本を動かしているお偉い方々(議員、キャリア官僚、大企業経営者)のなかにも、この問題を私と

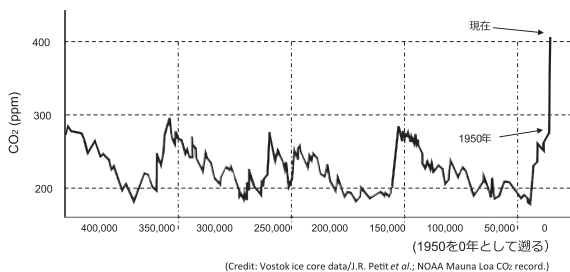


図1. 過去40万年間のCO<sub>2</sub>濃度



同程度に心配している方がいらっしゃり、あるいはどこかの大手企業の研究所では、大規模にまた短時間に二酸化炭素を吸収してくれる新技術、新素材の開発がほぼ完了に近づいていて、ただそのことを知らないのは私だけである、と信じたい。

### フォアキャストとバックキャスト

二酸化炭素を回収、固定化するには、物理的、化学的、生物学的な手法がある。生物学的手法の中心は、光合成生物による二酸化炭素の固定化である。いわゆるバイオマスの活用による解決法の模索は日本でも散見するが、残念ながら、そのうたわれている効果に大きくうなずけるものにはまだ出会っていない。特に期待される微細藻類によるものは、失敗続きである。それはなぜか？フォアキャスト的思考（現在の状況を基に未来のことを考える思考法）から転換できないことが一因ではないかと考えた。

バックキャスト思考（未来の目的を実現させるために必要なことを考える思考法）においては、目的をしっかりと見据えることは非常に重要である。フォアキャスト的思考は、これまでの経験や技術のある方向に少し拡大させたり、ステップアップさせたりする解決法なので、距離のある目的を設定すると、それ自体は単なる「希望」に過ぎなくなることも少なくない。一方、バックキャスト思考は「目的（ゴール）」から始まり、その実現のために何をすべきかを考えていくので、「目的」が曖昧だったり揺らいだりすることはない。

地球規模の喫緊の課題に対処するには、一つの「コア技術」や一つの「尖った技術」にばかり固執しては、その実現可能性の時期を明確化できない。一方、バックキャスト的思考を採用すれば、実現可能性については、すぐに判断がつく。ただしこの方法では、分野全体を見渡し、あらかじめ問題点を洗い出し、目的達成のグランドデザイン（全体構想）を描き出すことが必要なため、ある程度のキャリアがないと難しい。第一回目の微細藻類ブーム（1980年代）のときに、筆者はこのテーマに関わり「石油生産微細藻類 *Botryococcus braunii* に関する研究」を担当した経験から、バックキャスト思考の採用を試みた。

### 目的、目標、課題解決

本稿で紹介するプロジェクトの目的は、「二酸化炭素を削減しながら産業活動を行える社会を構築する」ことである。

目標は多数あり、状況によっては途中変更もありうるが、いまのところ以下の3点を最重要な目標として掲げている。①大規模である（大気中の二酸化炭素濃度に、

表1. 課題と解決策

課題	解決策
培養用の広大な場所	沙漠を利用
培養用の大量の水	海水利用
大量の肥料	海洋深層水を利用
培養コストの低減	農業的な培養
大量培養の技術的な壁	すでに事業化されている種
コンタミネーション対策	高度好塩性藻類

多少なりとも影響を与える程度の規模でなければ意味がない)、②プラス経済（持続的に事業を行うには、絶対的な条件である)、③短時間で実用化可能（喫緊の課題であるため、基本的には既存技術の組合せや改変で対応できるようなシステムを構築しなければならない)。

大まかな課題と解決策について表1にまとめた。微細藻類は水中に浮遊して光合成をするので、大規模栽培を行うには相応の広大な場所と水が必要になるが、食料生産に適するような土地は避けるべきである。また、降雨量が多い場所でのオープン培養は、培養液の流失や培養液濃度の急激な変化、コンタミネーションの問題などから現実的ではない。さらに土地収用のコスト面も考慮すると、沙漠が適している。水は海水を利用する。これらの両方を満たす地形として海岸にできる沙漠(沙漠海岸)があげられる。光合成生物として、微細藻類を採用する理由の一つは、淡水ではなく海水を利用できるという点にある。もう一つ陥りやすい思考として、「培養効率最優先」をあげておかなければならない。いわゆる工業的な培養法は、培養効率を上げるために、環境をコントロールする。しかし、環境をコントロールするためにかかるコストと、それによって増える収量を天秤にかけると、低付加価値品をターゲットにした場合、プラス経済収支にはならない。なぜなら、光合成効率は、植物のもつ遺伝的要因によるところが大きく、たとえば、肥料を少し与えすぎれば、かえって収量は落ちてしまう。一方、農業的培養は、生態を理解し環境をうまく利用する方法である。したがって、工業的ではなく農業的な培養を選択した。

### グランドデザイン

まず、海洋深層水を沙漠に汲み上げ、温度差を利用して濃い海水と淡水に分ける。このとき、汲み上げや淡水化に必要となるエネルギーは、沙漠に豊富に存在する再生可能エネルギーを利用する。特に、沙漠に降り注ぐ太陽熱と海洋深層水の冷熱エネルギーの利用価値は高い。現在、中東などで行われている温度差淡水化事業では、



濃い海水は捨てられているが、バイオマス・ショア構想（本稿で紹介するプロジェクトの基になる構想）では、濃い海水を使って沙漠海岸地帯に大規模水田を造成し、*Dunaliella*という高度好塩性藻類を培養する。海洋深層水には、窒素、リンなどが、表層海水の数十倍含まれており、さらに太陽熱で濃縮させ、肥料コストを圧縮する。

*Dunaliella*から抽出できる脂質は、食料用油脂や化学品の原料として利用可能である。この脂質は、今後原油価格が高騰するような事態が起きれば、いわゆるバイオマス燃料油としての価値も出てくる。また、*Dunaliella*の作り出すタンパク質は、飼料としての価値が高いことがわかっており、今後プロテインクライシスが深刻化するにともない、需要が高まることが予想される。さらに、*Dunaliella*は、グリセリンという形で大量の炭水化物を生産する。これは、一般的な植物油脂を加水分解したときに得られるグリセリンではなく、もともと細胞壁をもたない*Dunaliella*が浸透圧調整のために蓄積するピュアな天然グリセリンである。ちなみに現在、食品原料、化粧品原料としてのグリセリン市場は、バイオディーゼル燃料の低迷を受け逼迫してきている。グリセリンの用途は非常に広いが、バイオマス・ショア構想では、上記以外の用途として発酵原料とすることも視野に入れている。なぜなら、発酵産業は酵素など工業用途も開発され裾野が広がり、原料が不足してきている。そのため、*Dunaliella*が生産する大量のグリセリンやタンパク質には、沙漠に発酵産業を集積させるに十分な魅力がある。続いて、発酵産業の残渣として窒素やリンを回収し、もとの*Dunaliella*培養に追肥することができる。またここ

までのグランドデザインを振りかえると、すでに植物生産に必要な「太陽光」「淡水」「肥料」がそろっており、大規模なアグロインダストリーユニットを設置する経済的メリットがある。さらに、海洋深層水の特徴（富栄養性、冷熱エネルギー、清浄性）をすべて活かした多段生産によるアクアインダストリーユニットの設置も可能である。アクアインダストリーユニットからの排水中アンモニアは、大型海藻に窒素源として利用させ、大型海藻からはマンニトールを抽出し発酵ユニットに送る。発酵により生産された水素は、エネルギーユニットへと送られる。

このように、沙漠海岸付近に、未利用資源である海洋深層水、微細藻類、太陽熱などを利用して、「微細藻類バイオマス生産」「植物由来化学品生産」「発酵生産」「アグロインダストリー」「アクアインダストリー」「エネルギー生産」など各ユニットが有機的に結合したバイオマス・コンビナートを形成させる。これは、持続可能社会の一つのモデルとなり、今後、持続可能社会を目指すときに、「沙漠海岸」は非常に価値の高い地域の一つであることに気づかされるであろう。

### おわりに

現在、当プロジェクトは三菱ガス化学様より講座維持のご協力をいただいております。静岡県水産技術研究所様、関東職業能力大学校様などには技術的なご支援をいただきながら進めている。また、ペルーのペルー国立海洋研究所（IMARPE, Instituto del Mar del Peru）様<sup>2)</sup>およびラ・モリーナ国立農科大学（La Molina National Agrarian University）様と共同研究を開始している（図2）。他団体様からもプロジェクト参加の打診をいただいているが、大きな構想であるため、より多くの皆様からお声がかかることを祈念しつつ、このプロジェクトのプラットフォーム形成を急ぎたい。

### 文献

- 1) Petit, J. R. *et al.*: *Nature*, **399**, 429 (1999).
- 2) 共同通信社: <https://this.kiji.is/365442548707591265> (2018/5/5).
- 3) Ganopolski, A. *et al.*: *Nature*, **529**, 200 (2016).
- 4) Patz, J. A. *et al.*: *Nature*, **438**, 310 (2005).
- 5) Patz, J. A. *et al.*: *JAMA*, **275**, 217 (1996).
- 6) Satish, U. *et al.*: *Environ. Health Perspect.*, **120**, 12 (2012).
- 7) Allen, J. G. *et al.*: *Environ. Health Perspect.*, **124**, 6 (2016).



図2. 3枚の写真は、IMARPEとの共同研究の様子。左上新聞記事は、PeruShimpo（2017/3/31）に、プロジェクトの紹介記事が掲載されたもので、写真中央は筆者。