

# ブルーエコノミー

## 刑部真弘



Masahiro OSAKABE  
東京海洋大学大学院教授。1980年東京大学大学院工学系研究科修了，博士（工学）。日本原子力研究所研究員，米国ロスアラモス国立研究所研究員等を経て現職。日本機械学会フェロー，ブルーエコノミー技術研究組合顧問。最近は，子どもたち向けにブルーカーボンや再エネを活用するスマート構想についての講演を行っている。講義中に話した脱線話アイスブレイクは，考える力を試すAO入試でも使われた。連絡先：135-8533 江東区越中島2-1-6（勤務先）/ E-mail：osakabe@kaiyodai.ac.jp

### 1 はじめに

太陽系のハビタブルゾーン（居住可能領域）にある惑星「地球」には海が存在する。そのおかげで生物が発生し，長い年月を費やして太陽エネルギーを化石燃料という形で貯蔵してくれている。人類はこの地球からの貴重な贈り物を急速に使い快適な生活を維持している。化石燃料を使うことによって生じる二酸化炭素は，大気に放出されているだけではない。海が大量に吸収してくれている。海の吸収量の10~20%程度は，海藻等の海洋生物により海底堆積物として固定されると考えられており，ブルーカーボンと呼んでいる<sup>1,2)</sup>。

### 2 地球からの贈り物

我々の惑星「地球」の近くにある太陽系惑星のことを考えてみる。かつては水金地火木土天海冥・・・と覚えていたが，2006年8月の国際天文学連合の総会で冥王星は惑星の仲間から外されてしまった。2015年，無人探査機が冥王星まで接近し鮮明な画像を送ってくれたが，人類が初めて見る富士山級の山や氷の平原には感動した覚えがある。

さて，図1に示したように，地球から見て太陽に近い隣の惑星は金星，遠い方は火星である。これらの惑星も地球と同様にほぼ球形であり，出来たメカニズムもほぼ同じ地球の兄弟惑星と考えら

れている。惑星を構成する成分はほぼ同じであるはずなのに，図中に示したように地球の大気中の二酸化炭素濃度は0.04%だが，金星や火星の大気は二酸化炭素が主成分となり，それぞれ96および95%となっている。また，惑星平均表面温度は，金星が約400°C，火星が約-55°Cと言われており，我々人類が住むのには不適当である。

地球上に生命が存在してくれたために，炭素は大気中を漂わないで固体の中に封じ込められている。例えば，古代の海藻や樹木が吸収した二酸化炭素は，石炭という形で封じ込められている。また，恐竜やプランクトン等の生物の遺骸は，石油や天然ガス（メタン）という形で目にすることが出来るが，この中には植物が吸収した二酸化炭素が変化したものが含まれているのである。

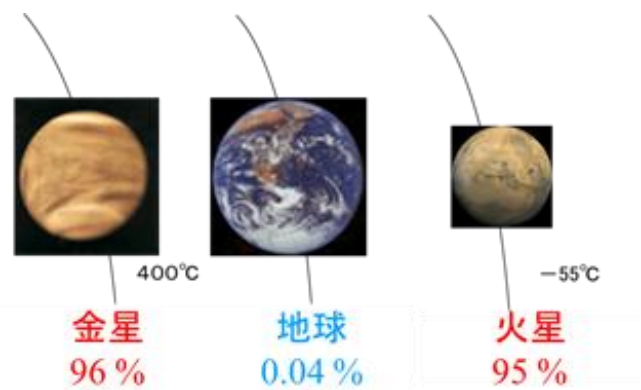


図1 地球および兄弟惑星

また、島や大陸棚を形成する岩盤には、サンゴが生成した炭酸塩が多く含まれているが、サンゴと共存する褐虫藻が吸収した海水中の二酸化炭素由来のものである。沖縄の島々は、サンゴでできている。地球にだけ青い海があり生物が発生し、二酸化炭素を化石燃料や炭酸塩等として閉じ込めてくれている。

地球は1周4万kmの比較的大きな惑星だが、大気の厚さは50km程度しかない。この距離は地球半径の0.8%、東京と横須賀間の距離程度であり、大気は地球表面に薄く張り付いているだけなのである。

かつて、横須賀市環境審議会の委員をやっていたことがあるが、東京から横須賀に着くと大気圏外に出たと思いつつ、気合を入れて会議に臨んでいた。100km上空に行けば宇宙に出たと考えても良いのである。

図2は、我が国の星出宇宙飛行士が、地上400kmの国際宇宙ステーションから帰る直前に撮った写真だ。ツイッターで世界中の人に送ってくれたものだが、宇宙が身近になるとともに、科学技術の進歩には驚いた。大気が地球表面に薄く張り付いているのがよく分かる。きれいに使っていかなければいけないと再認識させられる。

海も非常に薄く地球表面に張り付いている。子供のころ、潜水艦ノーチラス号とネモ艦長が登場する海底2万マイルという小説を夢中になって読み、不思議な深海に思いを馳せたことがある。ところが海底は深いところでも1万m、すなわち10kmしかない。海も空も確かに広いのだが、非常に薄いのは確かだ。そして、我々人類の活動によって海も空も大きな影響を受けつつあるのも忘れてはいけない。



図2 星出宇宙飛行士の写真

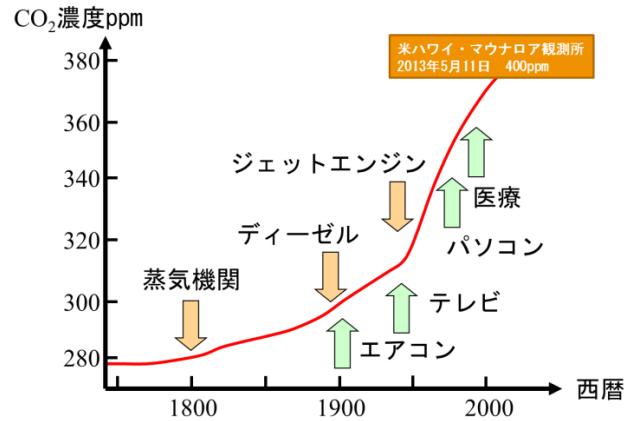


図3 二酸化炭素の増加

### 3 二酸化炭素はどこに

薄い層である地球の大気中に含まれる二酸化炭素の濃度は、図3に示したように18世紀に始まった産業革命以来、次々と新たな高性能動力源、空調用エアコンやテレビ等が開発されるとともに急速に増加している。1945年の第二次世界大戦直後の急激な上昇開始は、ジェットエンジンの発明や車の普及により人々が近代的な生活を享受し始めたことによると考えられている。2013年5月11日には、ハワイのマウナロア観測所で初めて400ppmを超えてしまった。

現在の日本人一人が1年間に放出する二酸化炭素量は10トン近くにもなり、大気中の二酸化炭素濃度は、産業革命以前は280ppm程度であったが、最近地球のいたるところで400ppmを超えている。異常気象との関連で450ppmが限度だと主張する気象学者もいる。

この二酸化炭素濃度の上昇が、何故温暖化に結びつくのか考えてみよう。実は、地球表面付近の温度は太陽から地球に降り注ぐ光エネルギーと地球から暗黒宇宙へ放出される光エネルギーの熱バランスで決まっているに過ぎない。平均気温が絶対温度で約290K (15°C) という人間にとって快適な環境は、この絶妙な熱バランスに依存している。また、地球上に豊富に存在する水は、大気圧下0°Cで大量の熱を放出して凍り、それ以上の温度では蒸発することによって大量の熱を吸収する。すなわち、温度変化を抑制する機能を持っている。

さて、太陽から来る主な光は波長が短く二酸化炭素を通過してしまうが、地球から宇宙へ放出さ

れている光は波長が長く二酸化炭素に吸収される。すなわち、二酸化炭素が増えても来る光エネルギーは変わらないのに、出て行く光エネルギーが減少され温暖化が起こる。これと同様なことが、メロン栽培等を行っている温室でも起きる。温室の屋根や壁として使われている透明なビニールやガラスは、太陽からの光エネルギーは通過させても、温室の中から放出される光エネルギーは通過させない。すなわち、温室の中は暖かく保たれることになる。このために、二酸化炭素のことを、温室効果ガスと呼ぶこともある。

二酸化炭素は大気に放出されているだけではない。図4に示したように、例えば2000年から2005年の5年間の平均で、人類の活動による二酸化炭素の57%は大気中に留まり、12.5%は森林に、残りの30.5%は海に吸収されている。なお、最近の2019年推計では、大気48%、森林14%、海洋38%となり、森林や海洋の吸収割合が若干増えているようだ。森林の吸収量はよく知られており、グリーンカーボンとも呼ばれている。海の吸収量は、それよりも大きく、ブルーカーボンと呼んでいる。

海は頑張ってくれているが、吸収された二酸化炭素によって、ゆっくりと酸性化している。酸性化は、稚魚やサンゴの成育に影響を与え、種の多様性や養殖業、それに海に食糧や経済の基盤を置く国々は大きな影響を受けると考えられ、事態は深刻である。

実際に、小笠原諸島と奄美群島に生息するハマサンゴの骨格形成が阻害されていることが、2017年の調査で分かってきた。我々の歯の表面の堅いエナメル質も、20時間ほど酸性のレモン汁につけておくと溶けてしまうのである。英国の研究者らが2013年に発表した報告書によると、海の酸性化は過去3億年で最も早いペースで進んでいるとみられている。

図5に示した東経137度線上の北緯30度、20度および10度の日本近海で、海水表面と平衡する二酸化炭素濃度(ppm)の測定値を図6に示す。海水表面との間で二酸化炭素の出入りがなくなる状態、すなわち平衡状態となる周囲空気中の二酸化炭素濃度を示している。この海水平衡濃度が高くなるほど、海水に溶け込んだ二酸化炭素の量が増え、酸性化した状態を示すと考えられる。

例えば周囲大気中の二酸化炭素濃度が400ppm

である場合、海水平衡濃度が400ppm以下では吸収、400ppm以上では放出が起こる。北西太平洋の亜熱帯域(北緯10度以北)における海水平衡濃度は、水温が高くなる夏季に高く、低くなる冬季に低いという季節変動をしている。

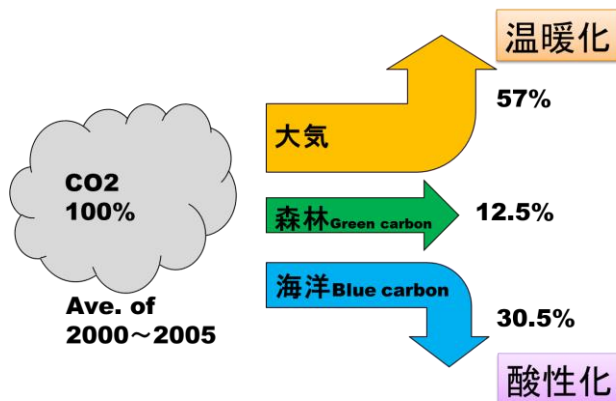


図4 二酸化炭素はどこへ

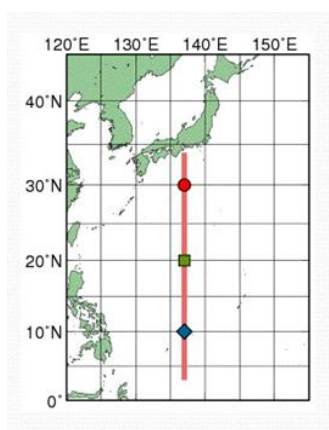


図5 海洋調査地点

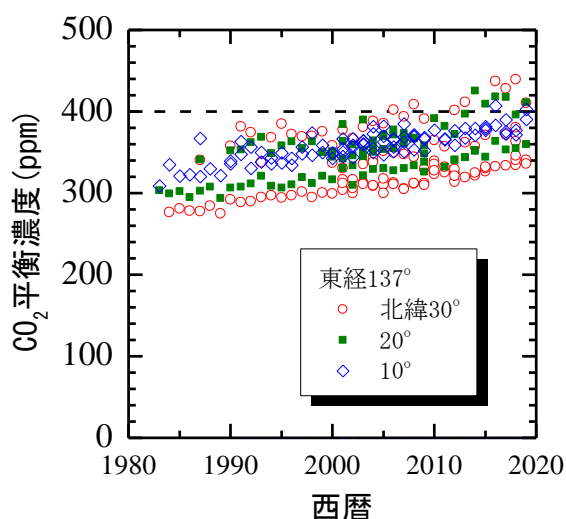


図6 海水表面の平衡二酸化炭素濃度



その変動幅は、緯度が高いほど大きくなるという特徴がある。この季節による変動はあるが、年々上昇し 400ppm を超えるまでになり、二酸化炭素が溶け込んでいるのを示している。

海にはカルシウムイオン、炭酸イオンが十分に存在し、サンゴや貝が自分の体を構成する炭酸カルシウムを簡単につくることができる。ところが、海水に二酸化炭素が溶け込んでくると、それが酸として働いて、炭酸イオンを減らしてしまう。このため生物の成長が阻害され、これを「海の酸性化」と呼んでいる。

例えば植物プランクトンが豊富にあっても、それらを食べる動物プランクトンや小さな魚は、海の酸性化によって増えないことが起こる。これが契機となって食物連鎖全体が崩壊する。さらに酸性化は、プランクトンによる有機硫黄化合物(DMS)を減少させる。この DMS は、我々が感じる海や磯の匂いの元となっている。また、DMS は雲の発生を助けるので、少なくなると更に温暖化は進むと考えられている。

#### 4 海藻類の二酸化炭素吸収

2009 年に発表された国連環境計画 (UNEP) 報告書「Blue Carbon」において、海洋で生息する生物によって吸収・固定される炭素が新たに「ブルーカーボン」と命名された。報告書では、全世界から 1 年間に排出される二酸化炭素量は炭素換算 72 億トン (2019 年には 90 億トンまで上昇)のうち、海洋全体で吸収される量を 22 億トンとしている。そのうち 2.4 億トン程度は海洋生物により海底堆積物として主に沿岸域で固定されるとされている。すなわち海の吸収量の 10~20%程度は、海藻等の海洋生物により海底堆積物として主に沿岸域で固定されると考えられており、沿岸域の環境保全は重要である。海洋生物による吸収量は、我が国やドイツ 1 国が放出する量に匹敵する。

例えば、海面下 10m 程度までの有光層内で海藻類が二酸化炭素を吸収し、それらが枯れて一部が比較的低温の海底に埋没し二酸化炭素を固定化する。地上土壌と異なり、低酸素濃度の海底土壌では腐敗が進み難く、固定できる期間は数百年以上と考えられている。

なお、紅藻類は、光合成で炭酸カルシウムを生

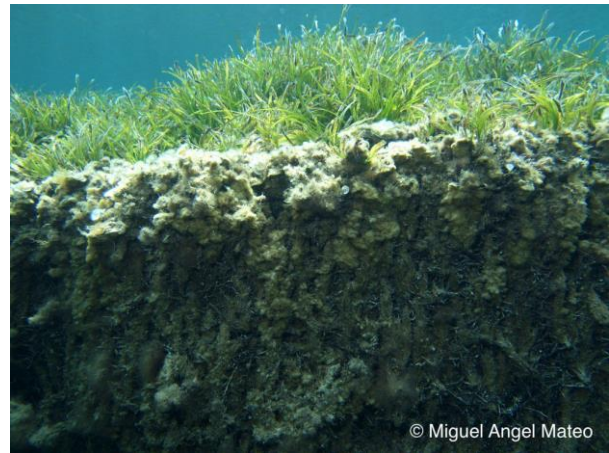


図 7 炭素貯蔵層



図 8 海面下に見える海草「アマモ」

成し固定化する。また、二酸化炭素を吸収した植物プランクトンを捕食した動物プランクトンが深海へ沈降し固定化する。さらに、海藻等の植物を食べた魚等の死骸や糞が海底に沈降し固定化する等のメカニズムも明らかになりつつある。

最近、沿岸部の海草場は、1 平方 km あたり 8 万 3 千トンもの炭素を地中に蓄えていることが報告された。一方、同じ面積の森林は、3 万トンの炭素を原木部分に蓄えているだけである。

図 7 は、1200 年の間、安定して炭素を蓄えている海草場の地中を示した写真である。沿岸海域における海草は、長期間にわたり根や地中に炭素を格納し続けるという特性を持っていると指摘する研究者もいる。ただし、埋め立てや浚渫等の人間の活動によって絶滅する可能性のある炭素貯蔵場でもある。

ところで、海が吸収する二酸化炭素(ブルーカーボン)を担う海藻と海草の違いは大きい。後者は区別するために「うみくさ」と読み、海から陸へと進化した植物の中で再び海に戻ったものである。動物で言えば、陸から海に戻ったクジラやイルカ

のようなものである。

海藻の根は岩などに接着するだけのものだが、海草は進化し、陸上植物のように地下茎から栄養を吸い上げることができるようになった。さらに、海面下では海水中の二酸化炭素を吸収し、海面上に露出したときには、空気中の二酸化炭素を吸収し光合成を行う能力を持った。図 8 は海面下に見える典型的な海草「アマモ」だ。

日本の海岸線延長は約 35,000km と世界第 6 位の長さを誇っており、世界的にも主要なブルーカーボン貯蔵国である可能性が高いことから、ブルーカーボンは温暖化防止対策の新たな手段として期待を集めている。しかし、吸収量に関する知見が限られている等の理由から、ブルーカーボンは京都議定書における吸収源対策として認められていない。そのため、グリーンカーボン（森林による二酸化炭素吸収）と異なり、ブルーカーボンの吸収量を評価し促進する確立した仕組みはみられない。

ただし、海の中に海藻類が生い茂り、多種多様な海洋生物が多いということだけでも、海の中に固定化された炭素が多いということである。海藻も魚も炭素できており、これらがいなくなることは空気中の炭素が増えるということになる。同じように大地に緑が多いということも、そこに固定化された炭素が多いということだ。草木も炭素できています。空気中の炭素は、メタンや二酸化炭素といった地球温暖化物質である。空気中の炭素を減らすためには、青い海と緑の大地を守ることが大事である。

なお「海の熱帯雨林」ともいわれるサンゴ礁は、海底全体面積の 0.1% を占めるに過ぎないが、世界中にいる魚の 25% がそこをすみかとしている。我々人間と同じ動物であるサンゴは、生命維持のために呼吸し二酸化炭素を排出するが、体内に共存する褐虫藻が二酸化炭素を吸収する。サンゴは、ほぼ二酸化炭素排出と吸収がバランスしている。

陸の熱帯雨林を構成する植物も、生命維持で排出する二酸化炭素よりも、光合成で吸収する方が多い。光合成を行っていない夜は、二酸化炭素を排出するだけになる。非常に成熟し、炭素貯蔵部である幹や枝等の増加がないアマゾンのような熱帯雨林では、ほとんど排出と吸収がバランスしていると考えられている。

## 5 おわりに

日本の海岸線は、世界第 6 位の長さを誇っており、世界的にも主要なブルーカーボン貯蔵国である可能性が高いことから、ブルーカーボンは温暖化防止対策の新たな手段として期待を集めている。しかし、海藻や植物プランクトン等が吸収する二酸化炭素は、地球温暖化防止のクレジットとして認められていない。

ただし、海藻や植物プランクトン等にクレジットという価値を持たせ保護していくことは、沿岸域の生態系および環境保全に重要なことは明らかである。このため、この量をクレジットにすることを自治体等で決め、クレジットへの資金供給を行う必要がある。地球温暖化防止のクレジットとして認められている海洋関係の CO<sub>2</sub> 削減技術等のブルーリソースと、海藻や植物プランクトン等のブルーカーボンを一緒に扱うことによって、全体として資金に裏打ちされたクレジットの仕組みが成立したブルーエコノミー社会が可能になる。

ブルーリソースとして注目されるのは、洋上風力だ。最近の洋上風力 1 基当たりの発電容量は 10MW にも達する。世界 6 位の長さの我が国沿岸 1km おきに、グルッと設置すると、稼働率 30% としても 113GW（大型原発 113 基分）の電力が得られる。我が国の風力発電容量は、2018 年 3 月末には 3.5GW に達し、今後も洋上風力を中心に急激な増加が想定され、2030 年には 35GW、2050 年には 75GW まで増加する予想もある。発電容量ポテンシャルとしては 1900GW に達し、そのうち洋上発電は 1600GW を占める。さらに、風力とは別だが、海岸線に打ち寄せる波のエネルギーは 36GW を超えるとの試算も心強い。

本稿で述べた概念を研究および普及するブルーエコノミー技術研究組合<sup>3)</sup>が、2020 年 7 月に発足し活動を開始した。海という共通のフィールドで環境及び発電エンジニアの活躍が期待される。

## 引用文献

- 1) 刑部真弘, エネルギーと環境問題の疑問 55, 成山堂, (2018)
- 2) 刑部真弘, ブルーカーボン, kindle 版, (2015)
- 3) <https://www.blueeconomy.jp/>