

# 地球環境問題と植物

九州大学大学院農学研究院 教授 鈴木 義則 \*

## 1. まえがき

“地球環境問題”は、科学者サイドからは歴史上かなり前から認識されていたが、行政担当者や一般市民レベルでの意識化は1980年代後半になってからである。その後意識の高まりが急速に進んでいるが、それはかつての公害問題とは比較にならないほどのインパクトがあったからである。すなわち、一国のローカルな問題に留まらず地球自体の生存を脅かすものとの認識を生じさせるのに十分であったためである。はじめに酸性雨の長距離越国輸送問題、ついでオゾンホールの拡大、そして地球温暖化がつづいた。これらに対してここ十数年の間に国際的な行政上の取組みがなされてきた（茅（1990）、内嶋（1998））。中でもCOP3京都会議は記憶に新しい。とはいっても、なお世界的合意はほど遠く前途遼遠である。

環境問題には本来、環境へのあらゆる悪影響が含まれるが、ここでは今日的地球環境問題と植物の関係を論ずることにする。中でもCO<sub>2</sub>ガス環境の量的増大によって招来される地球温暖化の植物への影響と温室効果ガスの浄化役として期待されている植物の作用における問題点について論じたい。なお、ここでは、環境問題の原点となる地球生命システムの特徴にも触れておくこととする。

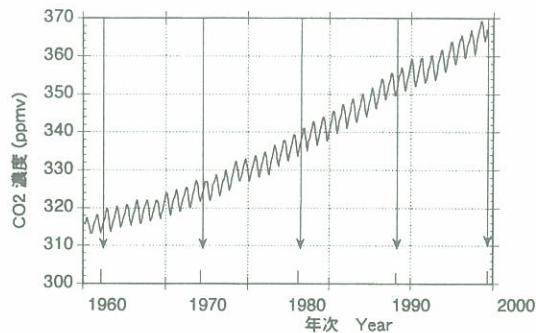


図1 ハワイマウナロア山における大気CO<sub>2</sub>濃度の経年変化 (D.Keeling, T.Whorf (2000.3) より鈴木再描画)

## 2. CO<sub>2</sub>濃度の経年変化と地球温暖化の予測

### 1) CO<sub>2</sub>濃度の経年変化

温室効果ガスCO<sub>2</sub>濃度の動きは、太平洋のほぼ中央で、かつハワイマウナロア山の高度3397m地点での1958年からの測定値に代表される。人間活動の影響を受けにくい高空のデータでありながら年内で周期的月変化を明確に示しつつ、全体では増加傾向を辿っている（図1）(D.Keeling, T.Whorf (2000.3))。その背景にはCO<sub>2</sub>の全世界における排出量の増大という統計上の事実がある。この増加傾向は将来も持続すると予測されている。

\* (財)九州環境管理協会 理事

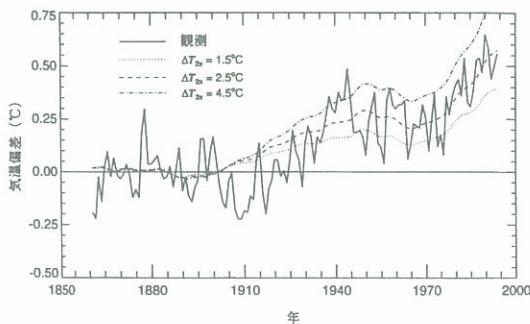


図2 地球の全球平均気温偏差と気候モデルによる推定値との比較

温室効果ガス、エーロゾル、太陽放射の変化を入れた場合で、点線はCO<sub>2</sub>倍増による平衡状態の気温変化として設定した気候感度（気象庁（1996）より）

## 2) 21世紀の温暖化の予測

1990年にIPCC第1部会による第1回目の報告書が、次いで1995年に第2回目の報告書が発表された。現在までの地球全体、北半球、南半球における気温推移について、各種気候モデルにより予測を行った結果、温室効果ガスの昇温作用単独よりは、温室効果ガスに硫酸エアロゾルのパラソル効果（冷却作用）さらには太陽活動を同時に考慮した場合が最も適合度が高いことがわかった（図2）（気象庁（1996））。ここ100年間の気温の実測値と予測値とがよく合うことが明らかにされたことから、なお不確実性があるものの気候モデルが将来予測に有効であろうと判断されるようになっている。実測データからも、ここ100年間の気温上昇は北半球>南半球であり、工業国の大規模な存在を反映していることから、地球は温暖化しつつあり、それによる影響も現実のものになりつつあると認識されるようになっている。

今後については、地球の平均気温は、10年あたり0.3°C（誤差範囲0.2~0.5°C）上昇し、2025年までに今より約1°C、21世紀末までに

約3°C上昇すると予想される。その際、昇温の程度には地域差が生じ、極地方、とくに北極地方では6°Cに及ぶ昇温が予測され、ついでカナダ、ロシア、南米、アフリカ、南極地方で4°Cを越す昇温域が部分的に出現すると予測されている。

## 3. 地球生命システムと環境

### 1) 植物の登場と地球環境の破壊

ここで、地球の歴史をひもとき、地球の生命と環境について振り返っておこう（例えば、バリー・コモナー（1971））。地球上の生命は、地球誕生の後約9億年を経た約37億年前に発生したといわれている。それは海の中で水素、メタンに強烈な稻光、放電のもとで生じた有機物のアミノ酸が元になっている。当初の生命体（バクテリア）は生きていくためのエネルギーを醸酵という形を通して得るものであった。しかし、醸酵では有機物が使用されてしまえばエネルギー源がなくなるのと、自ら出す廃棄物の蓄積のために、いつかは生命体の存在をなくす宿命にあった。従って、その流れは直線的な一方通行というべきものであった。

そうした中で約25億年前、葉緑体を有する生命体（ラン藻）が登場した。それらは太陽エネルギーを利用して無機物から有機物を作る、それまでにはなかった全く特殊な機能“光合成機能”を備えていた。重要なことは新しく出てきた生命体は先住の生命体がエネルギー利用過程で廃棄物として放出するもの“CO<sub>2</sub>ガス”を、今度は逆に有用な食糧として利用する能力をもっていたことであった。先住生命体が汚染する一方であった環境を浄化する救いの神といつてもよかったです。しかし、その一方で、その結果として酸素が放出され

るという新たな事態が地球上で発生した。それまでの原始大気からみれば、酸素無しの状態が変えられるものであり、それはまさに環境汚染そのものであった。緑色系を有する生命体やその群生したストロマトライトなどの登場は当時の地球環境を汚染し、破壊するものであった。

## 2) 植物は地球生命システムの創始者

この環境汚染が初めの場合（先住の生命体による）と根本的に違ったことは、緑の植物の場合は太陽エネルギーに直結して循環系の創成を伴っていた点にある。まさに造物主“神（いふとすれば）”の驚くべき設計と言うべきことである。ギリシャのヘラクレーツが円の定義として与えた「始点もなければ終点もない」条件をもつ循環という系が成立することを意味するからである。その後の長い時間経過の中で、緑の植物の放出する酸素は陸上の太陽エネルギーに直結して循環系を形成する。そこで、酸素は陸上の大気の組成を変えつけ、やがて酸素3原子からなるオゾンが作られ、太陽から直接地表面に到達していた強力な紫外線をカットする働きをみせるようになり、そして、ついに植物の海中から陸上への道が拓けたのであった。それまでの砂漠のような環境を新しい生命体はつづつに侵略し破壊していったのである。

動物族の出現は植物の随分あとのことになる。これはまた不思議なことに植物の廃棄物である酸素を生命保持の根源として利用する仕組み（酸素呼吸）を備えていた。

以上のプロセスでできた地球生命システムを特徴づける複雑なエコシステムの中にあって、植物は基本的構成物として位置づけられ、一方の動物族は消費者の位置づけにある。人間は植物のもとではじめて生きることができるのを忘れてはならない。そして、水、

窒素など無機質も循環を形成しており、大気－植物－動物－大地・海の中で極めて重要な機能をはたしている。地球はこのようにスーパー環境汚染の結果、月や火星の環境とはまったく違う内容をもつに至ったのである。

## 4. 地球温暖化の植物への影響

ごくかいつまんで地球温暖化の植物への影響を述べてみよう。

### 1) 地球温暖化の植物分布への影響

植物の地理的分布は温度面と乾湿面から説明がされる。例えば、吉良らによる暖かさの指数（温量指数ともいわれる（単位°C／月））と乾湿度の組み合わせは、地球上の植物の分布限界にうまくあてはまる（吉良（1971））。暖かさの指数だけで見た場合、各種林帯の分布は、「15」～北方針葉樹林～「45～55」～冷温帶林～「85～100」～北部暖温帶林～「140」～南部暖温帶林～「170～180」～亜熱帶林～となっている。21世紀末では平均約3°Cの昇温と予測されているが、実は100年間に3°Cという昇温は地球がこれまでに経験したことがない猛スピードであって、気候帯が約1.5～5.5km／年で北上させられることに相当している。これは植物の移動速度に比して極めて大きい。最も移動速度の早いマツでも1.5km／年、遅い方ではモミ類の0.04～0.3km／年に過ぎない。したがって、気候帯の移動速度に追いつけない種は消滅することになる。そしてこの昇温があったと仮定すると、暖かさの指数は日本付近では約23°C／月増大させられる。わずかな値にみえるかもしれないが、これが加算されると上記「」内の限界値付近では隣の樹林帯の気候にジャンプする場合がでてくるので、結果としては現在地の樹林帯

は衰退して行かざるをえないことになる。各限界値の中間に相当する場所では気温変化の影響は少なくすむが、限界値の境界前後では厳しい影響が生ずると考えられる。植物には積算値としてきくという特性のため、地点を固定して見た場合、暖かさの指標の境界値が異なる次の気候帯におおわれることも十分にありうる。

現在の頭痛の種である地球温暖化と高CO<sub>2</sub>ガス化の変動幅は、これまでの植物体内に保持されてきている遺伝形質が体験しえなかつた早い速度の変化に相当すると考えなければならない。さらにいえば、気候推移は単調に一方向に進むのではなく、過大・過小へのゆれを伴うことで、これは記録的冷夏・多雨年と記録的猛夏・少雨年が1993年と1994年という隣り合わせで出現したことからも理解できよう。そして温暖化傾向は、最高気温で観測史上第5位内の値が1980～1990年代に集中して出現している様子からも伺える。これらは植物にとって苛酷な環境となっていることであろう。

## 2) 地球温暖化の農作物への影響

個々の作物はそれぞれに適温域があり、上下の限界値以内においてのみ栽培可能である。森林の場合と同様である。ここでは生殖生長の一例についてのみ述べる。日本人の主食を生産するイネは、地球温暖化により開花受精において高温の影響を受ける（低温の影響は冷害として頻繁に出現している）。イネの穂の受精率と温度との関係を示した図3によると、受精率は日本型イネでは31°Cを越すと低下し始め、36°Cになると50%を下回るようになる（内嶋（1998））。イネの開花期は数日にわたるが、一つの穎花では1日の午前中のわずか数時

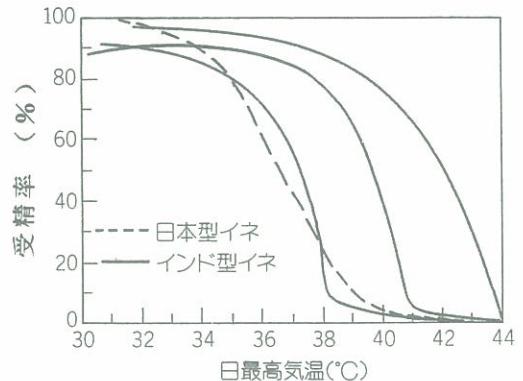


図3 イネの穂の受精率と温度との関係 (Satakeら, Horieら (内嶋 (1998) より))

間である。そのわずかな時間に危険温度が出現すれば受精できない。西日本では過去の異常高温年にすでにその兆候がみられるのである。

## 5. 植物とCO<sub>2</sub>固定能力

植物によるCO<sub>2</sub>吸収は、植物生育の基本であり、植物はきわめて巧妙に光合成を行っている。そこでは植物は1kgの植物質の生産に際して1.6kgのCO<sub>2</sub>ガスを吸収し1.2kgの酸素を出している。植物は光合成の方法の違いにより、C3植物、C4植物、CAM植物などに分類され、光合成能力も異なっている。大地に緑が存在することは、CO<sub>2</sub>の吸収固定を行っている証拠である。CO<sub>2</sub>は上述のように植物生産の基礎原料である。ハウスなど閉鎖空間系の中では炭酸ガス施肥という技術が適用されているように、CO<sub>2</sub>濃度を適度に高めると植物生産量は増大する。生産量は植物によって異なるが、概して言えば、一般大気の4～5倍の濃度にしたときに最大になる傾向をもつ（図4）（青木（1986））。このことは植物が潜在的にはきわめて大きなCO<sub>2</sub>適応能力をもっていることを示し、21世紀にCO<sub>2</sub>濃度の倍増が見込まれているとしても、生産力の増

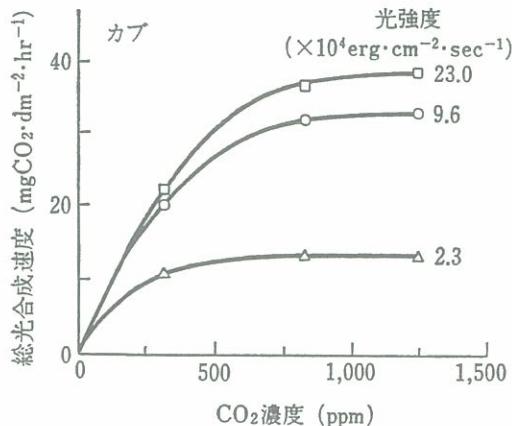


図4 CO<sub>2</sub>濃度と総光合成速度の関係  
(Gaastra (青木 (1986) より))

加をもたらすのみで、植物自体に対する害作用を生じせしめることはない。

上述のことから、化石燃料の燃焼によるCO<sub>2</sub>汚染（排出）に対しては植物による浄化が期待される。しかし、ここで植物の存在量と循環量（生と死）とが地球規模で不变、もしくは減少しているのであるならば、現在以上のCO<sub>2</sub>過剰排出分については、植物の浄化に対する寄与度は低いといわねばならない。成長がとまつたいわゆる極相林も光合成と呼吸とが釣り合うため、CO<sub>2</sub>のさらなる固定にはほとんど無関係となる。したがって、効果が期待できるのは、若くて成長が進行している林だけである。幹が太くなって行く間はCO<sub>2</sub>の固定がなされている。葉は役目が終了すると、分解されCO<sub>2</sub>再放出となるのでカウントできない。

植物体のうち木材として固定されたものが、そのまま木材として使用あるいは炭化固定物として保存されるならば、その分に相当する炭素は大気中から分離固定されたことになる（例えば、大熊（1998））。このように木材としての使用・保存がより大規模に行われ

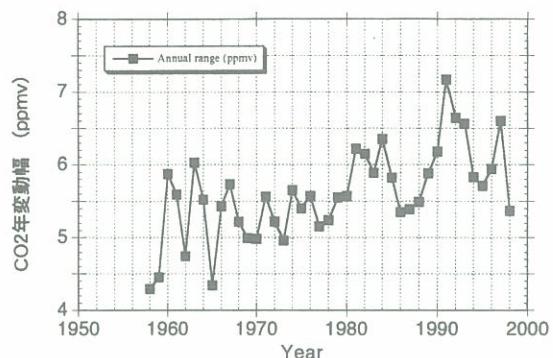


図5 マウナロアにおけるCO<sub>2</sub>の年間変動幅の経年変化（インターネット公開データより鈴木描く）

ること、そしてその跡地に新しい植林がなされることが浄化の立場では重要である。

ここで、高空でのCO<sub>2</sub>濃度データを利用して、地球全体の観点から植物の機能を考えてみよう。図1のマウナロアのCO<sub>2</sub>トレンドが上昇し続けている事実は、CO<sub>2</sub>放出量が年次により不变ならば植物の現存量が少なくなったこと、CO<sub>2</sub>放出量が増加していれば植物の現存量は不变であってもよいことを物語る。実際には化石燃料の使用量は増加の一途をたどっており、植物の方は伐採により減少している。このように両者とも変動している。また、海洋もCO<sub>2</sub>を吸収／放出しており、その程度は海水温により年次変動をもつていて。その中で、月間値が示す年周期変動（図5（D. Keeling, T.Whorf (2000.3) より鈴木描く））は主として植物の活動によると仮定すると、その年間CO<sub>2</sub>変動幅—ここでは最高値を最低値に引き落としていることを意味する—は、植物が吸収する能力を示すと考えてよい。化石燃料の使用時期と植物による吸収時期には交互にオンオフするような時間差がある訳ではなく、同時平行的に推移するものであることを承知の上で考えている。1970年代に比し

て1980, 1990年代は、植物の現存量が減っているながらCO<sub>2</sub>年変動値が増加しているのは、CO<sub>2</sub>の絶対値が330ppmvから345, 360ppmvへとわずかだが増大したことが植物の光合成能力に好影響を与えていたからではなかろうか。それにもかかわらず、大気中のCO<sub>2</sub>のトレンドが上昇傾向にあるのは、植物の個々の能力は増大する中で植生地の減少の方が先行しているためと考えるべきであろう。年変動値のばらつきは干ばつや日照不足その他の気象条件の変動によると考えられる。

植物のCO<sub>2</sub>吸収能力は潜在的には大きい。しかし、その能力を発揮させるにはいくつかの条件がある。まずは耕地の植物群落面でCO<sub>2</sub>吸収の実態に目を向けることが必要で、注目すべき点を見失わないことである。

耕地や林地における日中のCO<sub>2</sub>濃度の垂直分布の経時変化をみると、植物群落面と内部ではきわめて大きな濃度低下が生じており、植物によって吸収されたことがわかる(図6)(内嶋(1982))。光合成速度が日射量に依存することから、太陽高度に応じて日変化するのはなんら不思議はない。しかし、この場合は晴天で無風から弱風という低風速条件が、日中植物群落面のCO<sub>2</sub>濃度の極端な低下を招いたためというべきで、植物はCO<sub>2</sub>吸収能力はあるものの食料飢餓・原料不足の状態にあるといわざるをえない。このことは太陽光のもとでも光合成が日中連続してスムーズに行われていないのではないかという疑問を呈する。以上の問題点は自然の中でのCO<sub>2</sub>拡散に帰着する。何故ならそれは葉面上に境界層が発達したことによる強制的「植物の昼寝」現象であるからである。

浄化の観点からこれをみると、これはCO<sub>2</sub>拡散には限界があることを意味し、群落のす

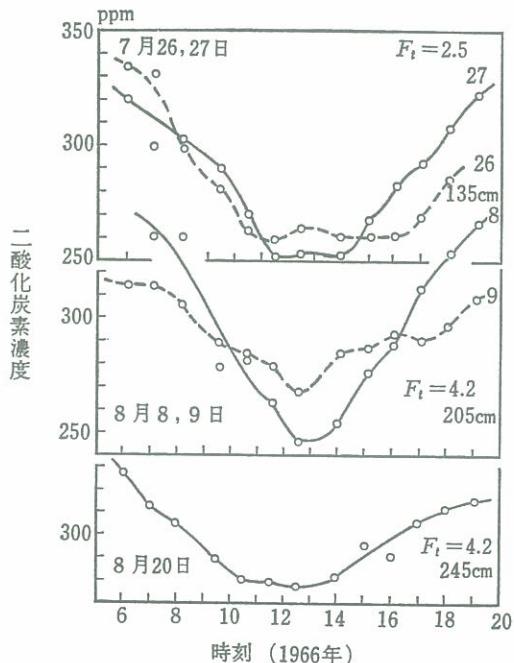


図6 トウモロコシ畑の上のCO<sub>2</sub>濃度日変化  
Ftは葉面積指数、その下の数値cmは草高を示す(内嶋(1982)より)

ぐ上の空気にはCO<sub>2</sub>濃度の高いものがあったとしても、風速が弱いと結果としては植物はそれを吸収することができない。これはみかけの上では緑(植物)があってもその能力が100%発揮されているとは言えず、より積極的なCO<sub>2</sub>拡散を行わしめることが必要ということである。

光合成を低下させるこの外の条件は、植物の生育環境、栽培環境自体の悪化である。例えば、土壤水分が不足すれば、光合成機能は強制的にダウントしてしまう。これは熱帯地方の乾季にみられる強日射条件下での植物のCO<sub>2</sub>吸収量激減の原因である。熱帯地方の乾季にはCO<sub>2</sub>浄化機能が大幅に低下している事実に注目すべきである(青木(1986))。

## 6. 植物群落を利用した積極的CO<sub>2</sub>浄化法について

日中風の弱いときには、他の条件が整っていたとしても、植物が必要とする原料不足が頻繁におきている事実が判明した。生産力の向上は、CO<sub>2</sub>浄化機能の向上に連動する。

風の有無・強弱が関連しているので、自然界でも人為的にファンを用いて、植物面にCO<sub>2</sub>を供給すれば、植物のCO<sub>2</sub>吸収能力がアップするはずと考えた実験が行われている。大阪府立大の矢吹グループの実験によれば、適度の風を与えた所は、草丈も収量も増加する結果がでた（図7）（矢吹・松田（1986））。すなわち、1±0.3m/sのほどよい風速のもとでは、若干のCO<sub>2</sub>不足はあるものの気孔の開度の方が十分となり、風速のより弱いところよりも5%以上も生育がよくなつた。しかし、風が強すぎると、イネ面でのCO<sub>2</sub>の不足はおこらないが、今度は強風のため気孔が閉じる結果となり生長は逆に低下した。当時の実験の狙いは群落のCO<sub>2</sub>環境改善であったが、それはまさしく環境浄化につながるものであった。問題は自然の中に人為的にエネルギーを導入している点で、これが解決できれば効果はあがる。

農林業にあっては目的部分の収量増加にのみ眼が向いていて、たとえば穀類では必ずしも茎葉部分の増大を図らざることがある。この場合には浄化機能の増加にはつながらない。もし、茎葉の成長を増加させるのに新しくエネルギーを追加使用しなければならぬとしたら、汚染の増加になるし、また目的外部分の処理に困るケースかでてくる。燃すとなればCO<sub>2</sub>放出が直ちにおこり、土壤中の鉱込みでも分解の過程でCO<sub>2</sub>の放出がおこる。植物体は一時的に固定するだけである。その時

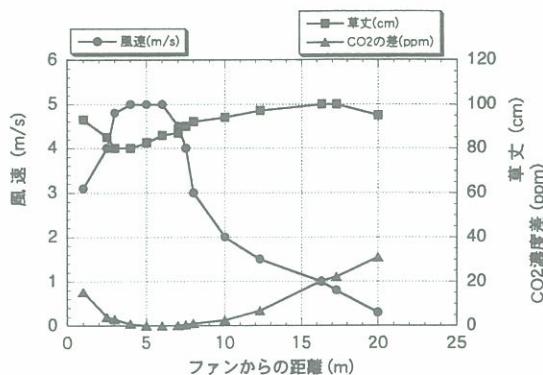


図7 水田水稻栽培時にファン送風した場合のイネの生育、群落内外のCO<sub>2</sub>濃度差、風速のファンからの距離による変化（矢吹・松田他（1986）より鈴木描く）

間を長く維持する方策をさぐることが必要となろう。農業の植物部分は、CO<sub>2</sub>を循環系においていることで環境保全に貢献していることになる。

植物の存在量が一定の値で安定しているならば、CO<sub>2</sub>の吸収・放出も量的には変化しないことになる。一次生産力が熱帯雨林で高いことがあっても変化はない。定量のCO<sub>2</sub>を吸収し、定量を放出する。これが極相林であり生態系としては安定した姿である。

しかしながら、現実には熱帯林の破壊が進んでおり、CO<sub>2</sub>の吸収源の減少は明らかに進行している。農産物の增收を狙っての技術開発は、CO<sub>2</sub>の吸収能力のアップにもつながり、地球温暖化にいくばくかの歯止めとなりうる。

ここで一層厄介な問題は、一つはCO<sub>2</sub>拡散が成層圏の近くまでの大気に及ぶこと、二つ目は植物の存在範囲が高度的に限定されていること、しかも植物の厚みは大気の厚さに比べれば極めて薄い層にすぎないことである。いかに植物の吸収能力が及ぶ範囲へCO<sub>2</sub>を降

ろしてやるか、その手段の開発が不可欠である。水田のファン実験規模とは別の思考法が必要となる。台風とか低気圧とかの上昇気流を伴う大規模の大気攪拌は下層の高濃度CO<sub>2</sub>を上空に運ぶことになるであろう。逆に高気圧は下降気流を作るので上空のCO<sub>2</sub>を下層に運んできているのだろうか。それらは現実に起こっている現象であり、その現実のなかでマウナロア山のCO<sub>2</sub>濃度は増加しつづけているのである。対策には新たな発想が必要となる。

CO<sub>2</sub>の増大を直接的に抑える方法としては、当然のことながら出さないことがまず第一である。排出源でのCO<sub>2</sub>の回収、固型化、液化炭酸ガス化、海中深くにシャーベットとして貯蔵する方法などがあげられる。

## 7. むすび

現在、植物あるいは農業の立場から、CO<sub>2</sub>の吸収能力、CO<sub>2</sub>濃度の影響について、多くの研究が進められている。アメリカではFACE計画(Free Air Carbon dioxide Enrichment project)が代表例であり、わが国でも農水省研究機関によって同様な研究が進められている。また、温暖化に付随して起ころのは蒸発・蒸散の増加であり、水利用型農業と天水農業のいずれも関心を寄せている。さらにまた、COP3京都会議以降、森林によるCO<sub>2</sub>吸収に期待した排出権の売買問題が表立ってきている。

本文は地球環境問題と植物というテーマからは九牛の一毛をみるにとどまってしまったが、CO<sub>2</sub>濃度抑制に対する植物の寄与を考え

る上で問題となる点を紹介した。地球温暖化問題に対して、私たちはいろいろな角度から認識を深めつつ、全力をあげて取り組むことが要求されている。

## 引用文献

- ◇青木正敏(1986)：作物の生理生態と環境農業気象・環境学(長野敏英・青木正敏他)，朝倉書店，p.65-78.
- ◇大熊幹章(1998)：炭素ストック、CO<sub>2</sub>収支の観点から見た木材利用の評価、木材工業，53(2)，p.54-59.
- ◇茅陽一(1990)：地球環境問題の動向、学士会会報，788，p.68-76.
- ◇D.Keeling, T.Whorf(2000.3)：Mauna Loa, Hawaii, インターネット <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/graphics/siolgr.gif>
- ◇気象庁(1996)：地球温暖化の実態と見通し(IPCC第二次報告書)，pp.598.
- ◇吉良竜夫(1971)：生態学からみた自然、河出書房新社，p.278-290.
- ◇バリー・コモナー(1971)：The Closing Circle-Nature, Man and Technology(なにが環境の危機を招いたか)(安部・半谷訳)，講談社，p.22-57.
- ◇内嶋善兵衛(1998)：地球温暖化とその影響、裳華房，pp.202.
- ◇内嶋善兵衛(1982)：農林・水産と気象、朝倉書店，p.60.
- ◇矢吹万寿・松田一美他(1986)：日本農業気象学会三支部合同大会講演要旨，p.108-111.