

# 高CO<sub>2</sub>環境は植物の生産性を高めるか

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 生物機能利用研究部門  
植物・微生物機能利用研究領域 植物機能開発ユニット 上級研究員

いわた まさお  
岩本 政雄

## はじめに

温室効果ガスの1つである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は、メタン等の他の温室効果ガスと比べて排出量が圧倒的に多く、地球温暖化に対して最も大きな影響を与えています。気象庁は今年5月、2015年のCO<sub>2</sub>年平均濃度が国内にある観測地点すべてで初めて400 ppmを超えて過去最高を記録したことを発表し、国内の各新聞社がこぞって報道したことは記憶に新しいところです。

国連の「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」によると、今世紀末までにCO<sub>2</sub>を含む温室効果ガス濃度を450 ppmに抑える必要

がありますが、近年みられるCO<sub>2</sub>濃度の急激な増加からは、今後実施しなければならない地球温暖化防止への道の困難さが予見されます。

農作物を含む植物は、太陽からの光のもとで光合成を行い、大気中のCO<sub>2</sub>は植物内で消費もしくは蓄積される糖やデンプンなどの炭水化物をつくる材料として利用されています。大気のCO<sub>2</sub>濃度が高くなると、光合成で利用されるCO<sub>2</sub>が増えることになるので、植物の生産性増加には一見好都合のようにみえます。しかし、植物の生産性は単に高いCO<sub>2</sub>濃度だけでは顕著な増加を示さないことが分かっています。また、地球温暖化はCO<sub>2</sub>濃度以外にも植物に影響を与える多くの変化をもたらします。

本稿では、高CO<sub>2</sub>環境を中心に、地球温暖化が起因となって生じる環境変化が植物の生産性に与える影響について、考えられることをお示ししたいと思います。

## 植物は大気CO<sub>2</sub>濃度に影響を与えている

大気中のCO<sub>2</sub>濃度は一年を通じて一定というわけではなくて、一年周期で上下に変動しています。その原因は、地球上の植物の光合成能が大気CO<sub>2</sub>濃度に影響を与えているためで、地球規模で光合成が高まる時期はCO<sub>2</sub>濃度が低下し、逆に、光合成が弱まる時期はCO<sub>2</sub>濃度が増加します(図1)。

広大な熱帯雨林で知られるアマゾン以南は南半球にありますが、北半球は南半球に比べて陸

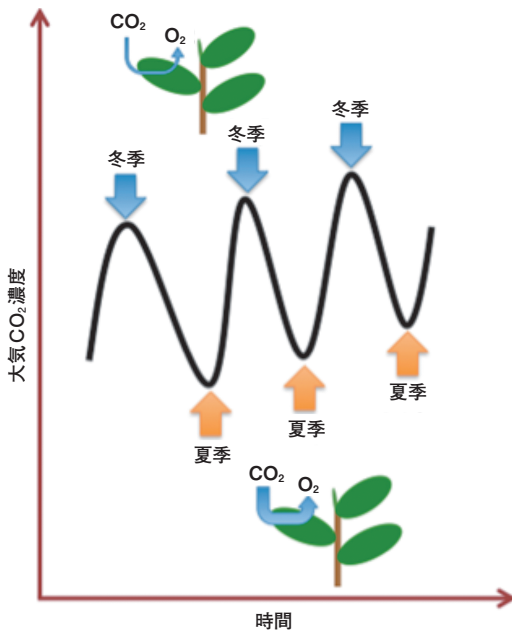


図1 大気CO<sub>2</sub>濃度の経年変化に関する模式図  
冬季および夏季は、北半球における季節を示す。

上植物が繁茂する陸地が多いことから、北半球の季節変化に沿ってCO<sub>2</sub>濃度が変動する傾向がみられます。よって、産業革命以降における大気CO<sub>2</sub>濃度は、季節変化による一年周期の上下変動を繰り返しながら徐々に増加してきたこととなります。また、植物の光合成能によるCO<sub>2</sub>濃度変化は身近なところでも起きていて、ある暖かく晴れた日の正午に筆者がCO<sub>2</sub>計を用いて調べた際は、屋外の草木の生えている緑地のCO<sub>2</sub>濃度は、すぐ近くにある植物のない屋内の部屋と比べて約2%低い数値を示しました。

このように、植物は身近な場所から地球規模の広大な範囲に至るまで、光合成を通じて常にCO<sub>2</sub>濃度に影響を与えています。

## 高CO<sub>2</sub>環境は植物の生産性に影響を与える

植物の持つ光合成能は大気CO<sub>2</sub>濃度に影響を与えていますが、一方で、大気CO<sub>2</sub>濃度は植物の成長に影響を与えます。高CO<sub>2</sub>環境下における植物の成長への影響を実験的に調べるために、人為的にCO<sub>2</sub>濃度を高めた人工気象装置内で栽培すると、CO<sub>2</sub>濃度が大気CO<sub>2</sub>濃度である以外は同じ条件の人工気象装置で栽培した植物と比べて成長が促進します(写真)。また、複数の農作物においてCO<sub>2</sub>濃度を人為的に高めると収量が増加することが報告されています。

このように、高CO<sub>2</sub>環境は植物の光合成能を増強させることで成長促進や収量増加を可能にします。しかし、単に高いCO<sub>2</sub>濃度のみで生産性向上が可能ということではありません。植物を高CO<sub>2</sub>環境下で長期間にわたり生育させると光合成能が徐々に低下することが知られていて、高CO<sub>2</sub>環境下における光合成能の低下は、肥料三要素の1つである窒素が少ないと顕著であることが分かっています。

写真に示した植物も、高CO<sub>2</sub>環境下で長期間栽培すると栄養分が不足して、それに伴っ



写真 高CO<sub>2</sub>環境による成長促進効果

左は通常の大気CO<sub>2</sub>濃度で生育させたイネ、右は高CO<sub>2</sub>濃度(1,000 ppm)で生育させたイネをそれぞれ示す。人工気象装置に移してから2週間後の植物を比較した。

て葉色が薄くなり光合成能も低下します。植物が成長するためには、光合成によるCO<sub>2</sub>固定反応を利用した炭水化物の生合成とともに、根における窒素等の栄養分の吸収もとても重要で、両方がバランスよく存在することで成長が促進されます。よって、高CO<sub>2</sub>環境下において生産性を向上させるためには、栄養分(特に窒素)の供給が重要になるといえます。

## 高CO<sub>2</sub>環境による生産性の促進効果は植物種によって異なる

前項で述べましたように、高CO<sub>2</sub>環境は植物の光合成能を促進させますが、どんな植物でも現在のCO<sub>2</sub>濃度のときと比べて高CO<sub>2</sub>環境下で光合成能が顕著に促進するわけではありません。

光合成においてCO<sub>2</sub>を炭水化物として固定する反応は、主にリブローズ1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ(略称:ルビスコ, Rubisco)と呼ばれる酵素によって調節されています。ルビスコはCO<sub>2</sub>固定反応だけでなく、CO<sub>2</sub>の代わりに酸素を使用する

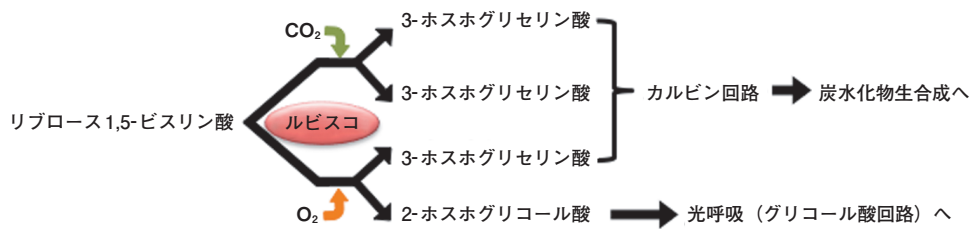


図2 ルビスコが触媒する2つの反応

1分子のリブローズ1,5-ビスリン酸を基質として、CO<sub>2</sub>固定反応では2分子の3-ホスホグリセリン酸、酸素(O<sub>2</sub>)を使用する別の反応では1分子の3-ホスホグリセリン酸と1分子の2-ホスホグリコール酸を生成する。2-ホスホグリコール酸は光呼吸(グリコール酸回路)と呼ばれる別の代謝経路へ進む。

別の反応も触媒します(図2)。ルビスコがどちらの反応を触媒するかは葉緑体内のCO<sub>2</sub>濃度によって左右されていて、CO<sub>2</sub>濃度が高いとCO<sub>2</sub>固定反応を促進して光合成能の増強に寄与します。高CO<sub>2</sub>環境はルビスコによる反応をCO<sub>2</sub>固定側に向けさせることから、生産性を上げるためには好都合といえます。

しかし、高CO<sub>2</sub>環境下で生産性の向上がそんなに望めない植物も存在します。農作物はC<sub>3</sub>植物とC<sub>4</sub>植物に大きく分けることができ、イネやコムギはC<sub>3</sub>植物、トウモロコシやアワ等の雑穀はC<sub>4</sub>植物にそれぞれ分類されます。両者は光合成の過程が一部異なっていて、C<sub>4</sub>植物は取り込んだCO<sub>2</sub>を特定の細胞内に濃縮させる機構を持ちますが、C<sub>3</sub>植物は持っていません。この違いが高CO<sub>2</sub>環境における光合成能の促進効果を左右していて、高CO<sub>2</sub>環境はC<sub>3</sub>植物の光合成能を増強させますが、C<sub>4</sub>植物はCO<sub>2</sub>濃縮機構があることで現在の大気CO<sub>2</sub>濃度で既に最大値に近い、高い光合成能を発揮しているために、高CO<sub>2</sub>環境下でC<sub>3</sub>植物と同等の生産性の促進効果は期待できません。

ただし、C<sub>4</sub>植物は乾燥や高温、強光などの環境に強く、こうした環境下で生産性を上げるためには、C<sub>4</sub>植物が持つCO<sub>2</sub>濃縮機構の存在はとても有効です。例えば、乾燥に強い理由を挙げますと、光合成を行う上で必要なCO<sub>2</sub>と水は、「気孔」と呼ばれる、葉の表面にある複数の小さな穴を通じて移動します。

乾燥した環境では、植物は水分の損失を抑えるために気孔を狭くします。そうすると、外から流入するCO<sub>2</sub>量が減少するために、C<sub>3</sub>植物ではルビスコによるCO<sub>2</sub>固定反応が減少して光合成能が低下します。一方、C<sub>4</sub>植物はCO<sub>2</sub>濃縮機構があることで、少ないCO<sub>2</sub>を集約させて高い光合成能を保つことができます。

## 地球温暖化はさまざまな要因を介して植物に影響を与える

上述のように、植物(C<sub>3</sub>植物)はCO<sub>2</sub>濃度が高くなると光合成能を促進し、栄養分を十分供給することで収量の増加が期待されます。しかし、地球温暖化は高CO<sub>2</sub>濃度以外にも地球上にさまざまな変化をもたらすので、それらが植物にとって重大なダメージを与えることが危惧されています。

温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の増加は気温上昇を引き起こしますが、気温の上昇は植物の成長に大きな影響を与えます。植物はそれぞれ生育する上で適した気温があり、農作物は生産地の気候に適合した植物種や品種が選ばれて栽培されています。気温が上昇すると農作物の適温から外れることで生産量低下を導く恐れがあります。その一方で生産性にプラスの効果が期待される例として、一部の果樹では、これまでは栽培できなかった地域が気温上昇によって栽培可能となることが考えられます。高温は花粉の受粉や実の成熟に障害を

生じる原因にもなり、実りが悪くなり収量が減少するとともに、イネでは米粒に白濁や亀裂（それぞれ白未熟粒、胴割粒と呼ばれる）等が生じやすくなり、品質の低下が発生します。

さらに、地球温暖化は北極や南極の氷を溶かして海面上昇により海拔の低い耕作地を水没させたり、気象条件を不安定化することで洪水や渇水を起こしやすくすること等が懸念されています。また、気温変化によってこれまで発生したことのない病害虫が増殖し、植物に被害を与えることが予測されています。

このように、実際には農作物の生産性にとってマイナス要因が多く生じることから、地球温暖化は農作物の成長や収量に悪影響を与える可能性が高いといえます。

## 植物における地球温暖化に対応した研究・開発

もし植物の光合成能をさらに増強させることができれば、植物はより多くの大気CO<sub>2</sub>を固定化することで生産性向上と収量増加が可能になると同時に、大気中のCO<sub>2</sub>濃度をより大幅に下げることができ、地球温暖化の抑制につながることができます。

現在、光合成能を強化させた植物の開発を目指した研究が進められています（図3）。また、地球温暖化が抑制できずに進行した場合に備え、温暖化に適応できる耐性植物および、温暖化による被害を改善・回避できる技術の開発も進められています。このような植物の研究・開発は、地球温暖化の抑制もしくは高温等による収量や品質の低下の回避につながることを期待されます。

## おわりに

植物と大気CO<sub>2</sub>濃度は互いに影響を与えて

光合成能を強化させた植物の開発



収量低下を抑制できる植物および技術の開発



品質低下を抑制できる植物および技術の開発



病害虫被害を抑制できる植物および技術の開発



図3 植物における地球温暖化に対応した研究例

いることから、両者は密接に関連しているといえます。人類による活動がもたらした高CO<sub>2</sub>環境は、植物によっては生産性を高める期待がありますが、温暖化によって引き起こされる高CO<sub>2</sub>濃度以外の環境変化は、多くの植物にとってマイナスに働く恐れが多分にあります。

このまま地球温暖化が進行する状況は植物の生産性からみても決して望ましいことではなく、生産性を安定かつ維持するためには、植物の光合成能強化を目指した研究も含めて、あらゆる分野・方面からの地球温暖化の防止・抑制に向けた対策が必要といえます。