

根圏ガス環境調節による植物成長の制御技術の開発

北宅善昭

大阪府立大学大学院生命環境科学研究科

Development of the control technology of plant growth by controlling gaseous environment in the rhizosphere

Yoshiaki KITAYA

School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

1. はじめに

この度は、栄誉ある日本農業気象学会学術賞を授与されることになり、大変光栄に存じます。受賞の対象となりました一連の研究は、多くの方々のご指導とご協力により続けることができたものであり、まずはお世話になった先生方、その時々研究室同僚の皆様、また学生の皆様に感謝の意を表したいと思います。

根圏ガス環境調節に関連する研究を始めたのは、今から約 30 年前、私が大阪府立大学大学院農学研究科農業工学専攻の修士課程に在籍していた時です。当時の環境調節工学研究室の教授であった矢吹萬寿先生が、以前から土壌中の CO_2 に関していくつかの興味ある論文を書かれていたもので、ある機会に「なぜ先生は土壌中の CO_2 に興味をもたれているのですか」と質問したところ、矢吹先生は、「土壌中の CO_2 濃度は、大気中の 100 倍以上にもなり、また変動も大きく、植物の成長に何らかの影響を及ぼしていると思うがよくわかっていない」といった旨のことを言われました。そこで、光合成以外の CO_2 の生物影響について調べたみたところ、麻酔や呼吸抑制の作用があることを知りました。そして CO_2 が根の機能に影響し、ひいては成長に影響するだろうことを確信し、そのことを解明すべく、修士論文のテーマに選んだのでした。その後現在に至るまで、根圏のガス環境調節は、方法論といえば大げさですが、私の重要な研究手法として、様々な対象に関する研究に用いてきました。土壌ガス環境は農業気象学の領域では地味な要素ですが、今回の受賞は、このような研究手法が農業気象学的であったことを認めていただけたものと独り合点し、うれしく思っているところです。

2. これまでの研究

この受賞題目に関連する共同研究の履歴を述べたいと思います。一般に土壌ガス組成は、植物の成長に影響する重要な根圏環境要因として、地温や土壌水分と同様に、農学分野では古くから研究の対象とされてきました。土壌中では根や微生物の呼吸により、一般に大気に比べて O_2 濃度が低く（数%～20%）、 CO_2 濃度が高く（0.1%～数%）なります。 O_2 濃度の低下が著しい場合に作

物の生育が抑制されることについては、湿害に代表されるように、農学や土壌学の分野において多くの報告があります。しかし一般的な土壌では、 O_2 濃度の低下と同時に CO_2 濃度の上昇が起こるので、生育の現場での O_2 濃度低下と CO_2 濃度上昇による植物への影響を区別することは困難です。私たちは、制御実験により根圏 $O_2 \cdot CO_2$ 濃度の個々の植物影響を調査し、通常の栽培土壌では、 O_2 濃度低下による生育抑制が生じる以前に CO_2 濃度の上昇による生育抑制が生じることを見出し、土壌中の CO_2 濃度を指標として、土壌ガス組成の植物影響および土壌通気性の改善技術に関連する以下の一連の研究を行ってきました。

2.1 植物生育における根圏 CO_2 濃度の重要性^{1) -3)}

一般の栽培土壌では、多量の降雨や灌水の直後を除いて、 O_2 濃度が作物生育を阻害する 10 % 以下に低下することはほとんどなく、1 ~ 数 % に上昇する CO_2 濃度による生育抑制が問題となることを指摘しました。また根圏 CO_2 濃度の影響は低地温下で著しくなること、根圏 CO_2 濃度上昇に伴う根の吸水抑制が原因で植物体が水ストレスを受け、光合成が抑制されることを明らかにしました。

2.2 土壌中 CO_2 濃度低減による植物成長の促進⁴⁾

畝内に埋設した有孔管内にエアープンプで送気して、土壌中 CO_2 濃度を 1 ~ 2 % 低下させて 0.1 ~ 0.5 % に維持することにより、無送気の対照区 (通常の畝栽培) に比べて葉菜、果菜および根菜類の生育が促進され、約 20 % の増収になることを実証しました。また土壌通気性を改変する実験の結果から、土壌中の CO_2 濃度を低く維持するための農業技術として、以下のことを提言しました。

- ・土壌中での CO_2 の発生を抑えるために、過剰に有機物を施用しない。
- ・土壌のガス拡散係数を高く維持するために、団粒構造が維持された気相率の高い膨軟な土壌を作り、含水率を過度に高めない適切な水管理を行う。
- ・土壌表面での CO_2 交換を促進するために、うねを高くして土壌と大気とのガス交換面積を広げる。また多くの利点を持つマルチングは、土壌と大気とのガス交換を妨げる可能性があるので、敷設時には密閉にならないようにする。

2.3 農業や生態系保全における根のガス環境調節の応用研究

1) 湿潤圃場での根菜類生産のための土壌ガス環境調節技術の開発^{10) -16)}

低湿地を多く抱える東南アジアなどの途上国での農業生産向上のため、湿潤圃場で根菜類を栽培するための簡易な土壌 CO_2 濃度調節技術の開発研究を行いました。この研究は、1991 年から約 4 年間、バングラディッシュからの留学生と共に行いました。まず湿地圃場において、畝内に有孔プラスチックパイプを埋設して、土壌中 CO_2 濃度を低下させることにより、サツマイモ塊根収量を標準収量まで高められることを実証しました。次に湿地圃場において、土壌中に空気層を設け土壌中 CO_2 濃度を低下させるため、途上国において入手が容易な稲藁、麦藁、籾殻あるいは籾殻燐炭を、それぞれ湿潤土壌畝内に塊として埋設する試験を行い、とくに籾殻を埋設することで、サツマイモ塊根収量が高められることを実証しました。また途上国でのビタミン A 供給野菜として重要なニンジンを用いた試験でも、サツマイモとほぼ同様の結果が得られ、湿潤土壌でも畝内に空気層を設けることにより、根菜類の生産が可能であることを実証しました。

2) 植物組織培養苗生産の効率化のための根圏通気性改善技術の開発^{7) -8)}

1991 年に千葉大学園芸学部へ転勤し、当時、植物組織培養による苗生産分野において、世界に先駆けて光独立栄養培養技術の開発研究をされていた古在豊樹先生の研究室で約 5 年間、研究と

教育に従事することになりました。そこでは組織培養技術開発研究の一環として、タイからの留学生と共に、途上国での植林樹種として重要なユーカリの組織培養における培地の環境調節の研究を行いました。この研究では、従来から用いられる寒天培地に替えて、バーミキュライトなど通気性に優れる培地を用いた結果、培養植物の水の吸収や光合成の促進により成長が促進され、また培養器外に出した後の生存率が高まり、さらにその後の成長が促進され、組織培養苗生産の効率が飛躍的に向上することを実証しました。

3) 根のガス環境を最適化できるサツマイモ簡易養液栽培法の開発²³⁾

相賀一郎先生が大阪府立大学教授として赴任された 1987 年ごろから、研究室では宇宙閉鎖生態系における植物を中心とした物質循環システム構築に関する研究を開始しました。この研究の一環として、将来の宇宙農場における主要候補作物であるサツマイモを簡易に養液栽培する技術の開発研究を行いました。これまで大阪府立大学で上和田勉先生を中心に行われてきたサツマイモ養液栽培技術の開発研究をさらに発展させるために、根のガス環境調節の観点から、より簡易な栽培方法について検討しました。その結果、板状の吸水性培地を組み合わせることで閉鎖空間内で塊根を形成させ、通常の土壌栽培に比べて同等以上の収量を得ることに成功しました。現在、このサツマイモの簡易養液栽培技術を、屋上・壁面緑化に応用する技術として展開しており、温度低減によるヒートアイランド現象の緩和に加えて、収穫物を食糧のみならず、バイオエタノールや生分解性プラスチック等の原料として利用することにより、低炭素社会の構築に寄与できればと考えています。

4) 根のガス環境から見たマングローブ植物の嫌氣的塩性地への適応機構の解明およびその植林技術への応用^{5), 6), 9), 18) -20)}

多くのマングローブ樹種は、塩分濃度が高く嫌氣的な泥中の吸収根に O_2 を供給するため、気根を発達させています。気根は、表面の皮目を通して大気中の O_2 を根に拡散させる機能を持つことが従来から知られていました。東京農業大学の中村武久先生、檜垣宮都先生を中心とするマングローブ調査団について、矢吹先生と共にタイのマングローブ林に出かけた時、矢吹先生と私は気根の薄い表皮の下が鮮やかな緑色であることに気づき、日本に持ち帰って気根のガス交換を調べたところ、光合成をしていることがわかりました。その後、気根が泥中の吸収根で産生された CO_2 を体外に排出する機能を持ち、日中には、その CO_2 を用いて気根内で光合成が行なわれていることを見出しました。またその後の研究で、多くのマングローブ樹種の実生幼植物体が持つ発達した胚軸も、気根と同様に CO_2 排出機能と光合成機能を持っており、塩濃度の高い泥中にある根に O_2 を供給していることを明らかにしました。光合成で生成した O_2 を吸収根に供給できるこの機能は、気根や胚軸が水没している時に特に有効であり、この O_2 生成機能がマングローブの耐嫌氣性・耐塩性機構として重要であることを、私たちは世界に先駆けて指摘しました。これらの研究結果から、植林後の苗の生存率を高め、さらにその成長を促進するためには、定植時に胚軸部分を土中に深く埋設しないこと、胚軸部分が長期間水没しないようにすること、および胚軸の遮光の原因となる水の汚濁、胚軸表面の汚れ、海藻やフジツボなどの付着がないようにすることなどを提言しました。

5) 根圏ガス環境調節によるタケ類の成長抑制^{21) -22)}

最近、日本ではタケ林の拡大が問題となっており、その繁茂を制限する必要があります。そこでタケの成長抑制方法について、土壌ガス環境調節の観点から検討しました。管理の悪い竹林に入りますと、地下茎や根が縦横に張り巡らされていることが、靴裏の感触で分かります。またタケノコ堀をする時、地下茎や根が邪魔をして、思うように鍬がささりません。しかし少し掘ると、

その地下茎や根の分布深さは数十 cm 程度の浅い土層に限定しており、タケ林内にあるアオキやツバキなどの低木でさえ根がさらに深くまで達しているのに比べて不思議に思います。そこで、これまでの知見である土壌深に伴う CO₂ 濃度上昇と、タケの根が土壌深くまで伸長しないことに関連があるかも知れないと考え、タケ林内の調査、および温室等での制御実験を行いました。その結果、土壌中の CO₂ 濃度が数%に上昇すると、タケ地下部の呼吸活性が抑制され、根の成長抑制、葉面ガス交換の抑制が生じ、タケの成長は抑制されることがわかりました。そして一例として、土壌表面の被覆処理が、土壌中 CO₂ 濃度を上昇させてタケの成長を抑制できる有効な方法であることを提言しました。

3. おわりに

土壌中 CO₂ 濃度を指標として、根圏環境をモニタリング・制御する方法論を用いて、植物の成長を制御しようとするこれら一連の研究は、まだ技術として確立したものには至っていません。これらを実用技術として植物生産や自然生態系の現場に適用していくためには、まだ解決しなければならない課題が少なからずあり、今後、基礎研究と応用研究の両面から、この研究をさらに進めていければと思っています。

この研究のきっかけを作っていただき、ご指導いただいた矢吹先生は、いつも「現場で研究課題を見つけることが重要だ」と言われていました。振り返れば、この一連の研究課題の多くも現場で見つけたものです。大学等での組織運営に関連する仕事が多くなってきたこの頃ですが、今回の受賞を機会に初心に帰って、現場で研究課題を見つけることのできる感覚を取り戻したいと思っています。

最後になりましたが、今回のこの受賞の榮譽に浴する機会を作っていただいたご推薦者の北里大学皆川秀夫先生、また学会賞審査委員会の小林和彦委員長はじめ各委員、および御世話いただきました菅谷博表彰担当理事の皆様方に厚く御礼申し上げます。

関連論文

1. 矢吹万寿・北宅善昭・清田信, 1984: 根圏ガス環境の制御に関する研究 (1)灌水後の土壌中 CO₂ 濃度とガス拡散係数の変化. 農業気象, **40**, 1-7.
2. 北宅善昭・矢吹万寿・清田信, 1984: 根圏ガス環境の制御に関する研究 (2)キュウリの生育に対する根圏空気中の CO₂ の影響. 農業気象, **40**, 119-124.
3. 北宅善昭・矢吹万寿・清田信, 1987: 根圏ガス環境の制御に関する研究 (3)キュウリの生育に対する根圏の CO₂ 濃度と温度の影響. 農業気象, **43**, 215-221.
4. 北宅善昭, 1987: 根圏ガス環境の制御に関する研究. 大阪府立大学紀要, **39**, 135-173.
5. 矢吹万寿・北宅善昭・杉二郎, 1990: マングローブ気根のガス交換機能に関する研究(1). 生物環境調節, **28**, 95-98.
6. 矢吹万寿・北宅善昭・杉二郎, 1990: マングローブ気根のガス交換機能に関する研究(2). 生物環境調節, **28**, 99-102.
7. Kirdmanee, C., Kitaya, Y. and Kozai, T., 1995: Effects of CO₂ enrichment and supporting material on growth, photosynthesis and water potential of Eucaliputus shoots/plantlets cultured photoautotrophically in vitro. *Environ. Control Biol.*, **33**, 45-53.
8. Kirdmanee, C., Kitaya, Y. and Kozai, T., 1995: Effects of CO₂ enrichment and supporting material in vitro on photoautotrophic growth of Eucaliputus plantlets in vitro and ex vitro. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Pl.*, **31**, 144-149.

9. Aiga, I., Nakano, Y., Ohki, S., Kitaya, Y. and Yabuki, K., 1995: Photosynthetic CO₂ fixation in pneumatophores of gray mangrove, *Avicennia marina*. *Environ. Control Biol.*, **33**, 97-101.
10. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 1997: Growth characteristics and yield of sweetpotato grown by a modified hydroponic cultivation method under field conditions in a wet lowland. *Environ. Control Biol.* **35**, 123-129.
11. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 1997: Effects of placing rice straw, wheat straw and rice husks in soil ridges on growth, morphological characteristics and yield of sweetpotato in wet lowlands. *J. Agric. Meteorol.* **53**, 201-207.
12. Islam, A.F.M.S., Hirai, H., Kitaya, Y., Yanase, M., Mori, G., Tani, A. and Kiyota, M., 1997: Effective utilization of waste rockwool for sweetpotato production under wet lowland field conditions. *J. Jpn. Soc. Agric. Technol. Manag.* **4**, 47-53.
13. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 1998: Sweetpotato cultivation with rice husk charcoal as a soil aerating material under wet lowland field conditions. *Environ. Control Biol.*, **36**, 13-20.
14. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 1998: Growth characteristics and yield of carrots grown in a soil ridge with a porous tube for soil aeration in a wet lowland. *Sci. Hortic.*, **77**, 117-124.
15. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 1998: Effects of application method of plant residues inside soil ridges on the growth and yield of carrots grown in wet lowlands. *Thai J. Agric. Sci.*, **31**, 485-498.
16. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 1998: Effects of water table levels on soil gas composition and the growth characteristics of carrot. *Appl. Biol. Sci.*, **4**, 135-142.
17. Islam, A.F.M.S., Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G. and Kiyota, M., 2000: Effect of volume of rice husk charcoal masses inside soil ridges on growth of sweetpotato in a wet lowland. *J. Agric. Meteorol.*, **56**, 1-9.
18. Kitaya, Y., Sumiyoshi, M., Kawabata, K. and Monji, N., 2002: Effect of submergence and shading of hypocotyls on leaf conductance in young seedlings of the mangrove *Rhizophora stylosa*. *Trees - Struct. Funct.*, **16**, 147-149.
19. Kitaya, Y., Jintana, V., Piriyaiotha, S., Jaijing, D., Yabuki, K., Izutani S., Nishimiya, A. and Iwasaki, M., 2002: Early growth of seven mangrove species planted at different elevations in a Thai estuary. *Trees - Struct. Funct.* **16**, 150-154.
20. Kitaya, Y., Yabuki K., Kiyota, M., Tani, A., Hirano, T. and Aiga, I., 2002: Gas exchange and oxygen concentration in pneumatophores and prop roots of four mangrove species. *Trees - Struct. Funct.*, **16**, 155-158.
21. Wei, X., Kitaya, Y., Shibuya, T. and Kiyota, M., 2005: Effects of soil gas composition on transpiration and leaf conductance of bamboos. *J. Agric. Meteorol.*, **60**, 845-848.
22. Wei, X., Kitaya, Y., Shibuya, T. and Kiyota, M., 2005: Soil respiration in a bamboo forest as affected by soil temperature and soil moisture contents. *Phyton-Ann. Rei Bot.*, **45**, 295-298.
23. Kitaya, Y., Hirai, H., Wei, X., Islam, A.F.M.S. and Yamamoto M., 2008: Growth of sweetpotato cultured in the newly designed hydroponic system for space farming. *Adv. Space Res.*, **41**, 730-735.