

低圧環境下における植物の生育と花成応答

農学研究科資源生物学専攻 博士課程 島田 明典

はじめに

月面基地や火星での長期活動を行うために宇宙での植物栽培が考案されている。しかし、宇宙では地球と異なった環境要因が、植物の生育に影響を及ぼすことが考えられる。本研究では、環境要因の1つである大気の減少（低圧）について着目し、低圧環境における植物の生育について調査した。宇宙で植物栽培施設を建設する際に、栽培施設の内部を低圧にすると、栽培施設の内部と外部の差圧を減らすことができる。これにより、施設の構造材質を軽量化し、資材輸送費は削減される。そのため、アメリカ航空宇宙局（NASA）も火星における植物栽培施設のコンセプトとして低圧栽培を検討している。これまでも低圧環境下で植物を栽培する実験は行われてきたが、全圧の低下に伴い、酸素分圧（ pO_2 ）および二酸化炭素分圧（ pCO_2 ）が低下した環境での試験や低圧による pO_2 の低下の研究事例が多い。植物の生育は pO_2 または pCO_2 の低下の影響を受ける。また、研究報告のほとんどが宇宙での食料生産を考えていることから、多くが作物の収量に関する研究であり、花成についての研究報告はほとんどない。しかしながら、宇宙での持続的な栽培を行うにあたり、花成は重要な生育ステージである。

本研究では、 pO_2 および pCO_2 を常圧と同等にした低圧環境下が花成に及ぼす影響を調査し、花成に関わる要因としてこれまでに報告されている硝酸や可溶性糖を経時的に測定した。また、低圧環境で CO_2 同化速度が促進したことが考えられたため、異なる大気圧条件下での高 pCO_2 と低 pCO_2 環境が植物の CO_2 同化速度および生育に及ぼす影響を調べた。

低圧環境下でのトレニアの栄養成長と生殖成長

低圧環境下での花成試験として、*in vitro*での花成反応について研究が進んでいるトレニアを供試植物に用いた。本実験では、栽培期間の短縮および炭素同化を大気中の CO_2 のみにするため、培地中より NH_4NO_3 を取り除き、スクロースを添加しない20%MS培地でトレニアを各条件下で栽培した。処理条件は50 kPa（ pO_2 21 kPa, pCO_2 0.08 kPa）と100 kPa（ pO_2 21 kPa, pCO_2 0.08 kPa）とした。栽培条件は温度 $24\pm 3^\circ C$ 、相対湿度 $65\pm 15\%$ 、明期16時間/暗期8時間、白色蛍光灯を用いて光強度 $100\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ で、0、7、14、21、28、36および39日後ごとにトレニアを収穫し、生育調査、クロロフィル分析、培地中の硝酸濃度、茎頂部の可溶性糖濃度を測定した。

低圧栽培開始7日後からトレニアの地上部新鮮重量と地上部乾物重量は100 kPaよりも50 kPaで増加したが、50 kPaと100 kPaで葉のクロロフィル含有量に有意な差は認められなかった。また、7日後において、MS培地中の硝酸含有量は100 kPaと比較すると

50 kPa で大幅に減少した。低圧環境では植物の光合成および蒸散速度が促進することが考えられている。そのため、本実験でも 50 kPa で CO₂ の同化速度および蒸散速度が促進し、地上部乾物重量の増加や硝酸の吸収量の増加に伴う培地の硝酸濃度の減少が生じたと考えられた。トレニアの花蕾数は 21 日後から 100 kPa よりも 50 kPa で増加した。39 日後における開花数も 50 kPa で増加する傾向がみられた。また、花蕾数に変化がみられていない 14 日後において、茎頂部のグルコース、フルクトースの含有量が 50 kPa で増加した。50 kPa で花蕾数が増加した 21 日後から茎頂部のグルコース、フルクトースに加え、スクロースも濃度が 50 kPa で増加した。39 日後における茎頂部の総可溶性糖濃度は 100 kPa よりも 50 kPa で高い値を示し、その差が顕著であった。この結果から、50 kPa の低圧環境は糖の合成や輸送を促進させている可能性が考えられた。また、培地中の窒素の減少は花成を促進させることが報告されている。茎頂部の糖の増加および培地中の窒素の減少が花成に及ぼす影響を調べるために、常圧下で異なる窒素濃度の培地に、スクロースを添加した処理区 (100 mM) と添加しない処理区 (0 mM) でトレニアを栽培し、発蕾率および開花率を求めた。結果として、スクロースを添加しなかった処理区では発蕾が観察されなかった。しかし、スクロースを添加した処理区では、培地中の窒素濃度の減少に伴って発蕾率および開花率が高くなることが示された。これらのことから、50 kPa の低圧環境で花蕾数が増加した原因として、MS 培地中の硝酸の減少と茎頂部で総可溶性糖濃度の増加の両方が関与している可能性が示された。

低圧環境がレタスの同化速度および生育に及ぼす影響

トレニアの乾物重量が 50 kPa で増加していたことから、低圧環境が CO₂ 同化速度を促進した可能性が考えられた。低圧環境ではガスの拡散係数が増加により、CO₂ 同化速度が促進することが報告されている。しかしながら、高い $p\text{CO}_2$ では CO₂ の同化速度が飽和しており低圧環境における CO₂ 拡散係数の増加は植物の生育に影響を及ぼさないことが考えられる。一方で、低い $p\text{CO}_2$ では CO₂ の拡散速度の増加によって、CO₂ の同化速度が促進する可能性が考えられた。よって、本実験では異なる全圧条件下において、高 $p\text{CO}_2$ (0.1 kPa) と低 $p\text{CO}_2$ (0.03 kPa) でレタスの CO₂ 同化速度を測定し、さらに低圧環境がレタスの生育に与える影響について試験した。

供試植物にはレタス ‘レッドファイヤー’ と ‘フリルアイス’ を用いた。処理区の条件は、 $p\text{O}_2$ を 21 kPa に維持して、高 $p\text{CO}_2$ (0.1 kPa)、低 $p\text{CO}_2$ (0.03 kPa) の分圧条件とし、異なる全圧 (50、70、100 kPa) で試験した。温度 27°C、相対湿度 85±5%、赤青 LED を用いて光強度 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下で CO₂ 同化速度を算出した。本試験では低圧チャンバーを同化箱として用い、30 分間順化後、低圧チャンバー内の CO₂ 濃度を 30 分間測定し、その減少量から CO₂ 同化速度を測定した。その結果、全圧が下がると高 $p\text{CO}_2$ および低 $p\text{CO}_2$ において両品種の CO₂ 同化速度が増加した。CO₂ 同化速度は低 $p\text{CO}_2$ よりも高 $p\text{CO}_2$ の方で高くなった。しかしながら、‘レッドファイヤー’ で、高 $p\text{CO}_2$ における

CO₂ 同化速度の増加率は 100 kPa に対して 50 kPa で 19%増加し、低 *p*CO₂ における CO₂ 同化速度の増加率は 100 kPa に対して 50 kPa で 35%増加した。‘フリルアイス’でも高 *p*CO₂ における CO₂ 同化速度の増加率は 100 kPa に対して 50 kPa で 36%増加し、低 *p*CO₂ における CO₂ 同化速度の増加率は 100 kPa に対して 50 kPa で 140%増加した。このように両品種において、CO₂ 同化速度の増加率は、低 *p*CO₂ の方が高い値を示した。また、低 *p*CO₂ において、CO₂ の同化速度の増加率は‘レッドファイヤー’より‘フリルアイス’の方で高くなった。

さらに、低圧環境における CO₂ 同化速度の促進がレタスの生育を増加させるのかどうかを調べるために、低圧環境下でレタスの栽培試験を行った。‘レッドファイヤー’と‘フリルアイス’を 10 日間異なる全圧条件下で栽培した。環境条件は温度 25±3°C、相対湿度 70±15%、赤青 LED を用いて光強度 250 μmol m⁻² s⁻¹、明期 16 時間/暗期 8 時間、水耕液は OAT ハウス A 処方 EC1.5 dS m⁻¹、pH6.5 で行った。全圧を 100 kPa、70 kPa、50 kPa とし、*p*CO₂ は 0.1 kPa と 0.03 kPa、*p*O₂ 21 kPa で試験した。‘レッドファイヤー’は *p*CO₂ が 0.1 kPa の条件において、全圧が 50 kPa、70 kPa、100 kPa の間で地上部新鮮重量に有意な差は認められなかった。また、*p*CO₂ 0.03 kPa においても 50 kPa、70 kPa、100 kPa で地上部新鮮重量に有意な差は認められなかった。一方で、‘フリルアイス’においても *p*CO₂ が 0.1 kPa では 50 kPa、70 kPa、100 kPa で地上部新鮮重量に有意な差は認められなかった。しかしながら、*p*CO₂ が 0.03 kPa においては全圧が低下すると 100 kPa と比べ、地上部新鮮重量が増加した。低 *p*CO₂ における低圧条件でのレタスの生育に品種間での差が認められた。これらの結果は、全圧の低下により CO₂ 分子の拡散係数が増加しても、高 *p*CO₂ 条件下では CO₂ 同化速度が飽和してしまっていることにより、CO₂ 拡散係数の増加はレタスの生育に影響を及ぼさなかった可能性がある。しかしながら、低 *p*CO₂ で全圧を低下させると、*p*CO₂ 分子の拡散係数が増加し、境界層抵抗や気孔抵抗が低下することで葉緑体内に CO₂ が入り込みやすくなり、CO₂ 同化速度が促進することで、常圧と比べてレタスの生育が増加した可能性が考えられた。

まとめ

*p*O₂ (21 kPa) および *p*CO₂ (0.08 kPa) を常圧 (100 kPa) と同等にした低圧 (50 kPa) 環境はトレニアの生育を促進させ、発蕾数を増加させることを明らかにし、これには茎頂部の可溶性糖濃度や培地中の硝酸含有量に関わっている可能性が示された。また、低圧環境における CO₂ 分子の拡散係数の増加は、低 *p*CO₂ (0.03 kPa) で植物の生育により強く影響を及ぼすことが示された。本研究は低圧環境が生殖成長に及ぼす影響について新たな知見を提示し、CO₂ 分子の拡散係数と低圧環境における *p*CO₂ の関係性について理解を深め、今後の低圧環境における植物栽培の発展に繋がることが期待される。

令和 4 年度 学位論文 (博士) 審査票

| 玉川大学大学院 農学研究科 資源生物学専攻 博士課程後期 | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------|---|---|---|---|---|-------------|-------|----|-------|
| 学籍番号 | 2 | 0 | 2 | 2 | 1 | 5 | 0 | 0 | 1 | 氏名 | 島田 明典 |
| 論文題目 | 低圧環境下における植物の生育と花成応答 | | | | | | | | | | |
| 指導教員 | 渡邊 博之 | | | | | | | | | | |
| <p>審査要旨</p> <p>本研究内容は、将来を見据えた人類の食料確保の問題について、地球内外での様々な環境を想定した新しい知見を模索するための基礎的知識を得る上で大いに役立つ内容である。</p> <p>島田君はこの点につき、植物の環境応答への基礎的な知見を得ることを目的にして、低圧条件下で植物が示す反応を調べていることは、将来的に宇宙や無重力空間などでの食料生産を行う上で、大いに役立つ基礎的な知見を見出している。</p> <p>植物の生長は、その生活環の中で発芽から根、茎、葉を展開する栄養成長の時期と、子孫を残すための開花、結実の生殖成長の時期に分けられる。植物の環境応答に関する研究は、この過程のいずれかの部分に絞り込んだものが多いが、本研究では栄養成長段階ではレタスとトレニア、生殖成長段階ではトレニアについて、低圧環境を設定する実験段階からの試行錯誤を重ねた研究は、新規性があり、今後、同様の知見を得る上で参考になる基礎資料であると評価できる。</p> <p>栄養成長時期におけるレタスでの知見では、葉の光合成能力への影響を研究しているが、長年にわたる本学での植物工場を用いた実績データ（渡邊博之教授）を駆使した知見に加えて、低圧条件による栄養的成長を促進する効果も得られている。特に栽培の困難なフリルのあるレタスを用いている点は興味深い。食料とする葉（葉菜類）の栽培ができる可能性を示唆したものとして高く評価できる。生殖成長に関する研究に関しては、これまでに多くの <i>in vitro</i> での研究実績がある、東京農業大学の雨木若慶教授の基でトレニアを用いた研究が行われている。低圧条件にした場合に、トレニアにおいても炭酸同化の促進によって花芽分化が促進されている。この成果は、今後、低圧条件による花芽分化に関わる遺伝子解析の研究が可能となるので、今後の研究の発展につながる研究である。また、開花した際の花器官の分化過程や結実、種子生産が可能であるか、などの発展的な研究内容を含んでいるので大いに期待される。</p> <p>このように、本研究のレタス、トレニアを用いた低圧環境下での基礎的知見は、植物の栄養成長、あるいは生殖成長の観点から、植物の環境応答をまとめたものとして新規性があり大いに評価されるものである。また、研究内容、特に手法などは相応の工夫が必要であり、他の園芸作物に関しても応用ができる。特に栄養価や機能性の優れた食材を使った研究に応用ができる。今後の研究に大いに期待したいものである。応用的には特に海、宇宙などの圧力の異なる条件下での知見へと、発展する基礎的な資料になる得るものとして、今後の食料生産をこれまでとは異なった視点で発展でき得る内容を包括していることが認められるので、博士論文に十分に値するものと評価する。</p> | | | | | | | | | | | |
| 審査委員 | 主査 | 田淵 俊人 | | | | 印 | | | | | |
| | 副査 | 渡邊 博之 | | | | 印 | | 副査 (外部審査委員) | 雨木 若慶 | | 印 |
| | 副査 | | | | | 印 | | 副査 | | | 印 |