

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18780192

研究課題名 (和文) 勾配磁界による冠水根系への酸素誘導による植物発育の促進

研究課題名 (英文) Acceleration of plant growth by oxygen supply to submerged roots using a gradient magnetic field

研究代表者

谷野 章 (YANO AKIRA)

島根大学・生物資源科学部・准教授

研究者番号：70292670

研究成果の概要：

勾配磁界によって常磁性酸素分子に作用する磁気力を利用して、冠水した植物へ酸素を供給し、植物の発育を促進させることを目指した。研究の前半では、酸素、アンモニア水、銅の化学反応で生成される錯体の濃度から、勾配磁界中で溶存酸素の拡散が加速されることを確認した。次に、常磁性酸素分子に作用する磁気力を利用して、冠水したタイム (*Thymus vulgaris* L.) 実生への酸素供給を行う研究を実施した。その結果、勾配磁界によって酸素分子に作用する磁気力を利用して、冠水植物へ酸素供給するという手法は、タイム実生の根の成長には影響を及ぼさないことが明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,300,000	0	1,300,000
2007 年度	1,500,000	0	1,500,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	150,000	3,450,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：化学物理, 磁性, 農業工学, 園芸学, 植物

1. 研究開始当初の背景

水耕栽培において、根系の溶存酸素不足による作物の生育障害がしばしば問題となっている。また水田跡地のように、土壌中に酸素が十分供給されないような場合も同様である。したがって、植物生産において根系に酸素を供給する技術は重要である (例えば, Chun and Takakura, 1994; 吉田ら, 1996)。本研究は酸素の磁性化学物理的な性質を利用して、根系への酸素供給を実現しようとする基

礎的な研究である。酸素分子はモル磁化率 $3400 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ の常磁性体である (Lide ed., 2005)。二酸化炭素のモル磁化率は $-21 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 、窒素のモル磁化率は $-12 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ である。すなわち空気中に含まれる主な気体の中で酸素の磁化率のみが正であり、絶対値は他の気体よりも桁違いに大きいことがわかる (水のモル磁化率は $-13 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)。したがって、酸素の常磁性の性質を利用すれば永久磁石が発生する強い勾配磁

界によって磁石周辺に酸素を集めることが可能と考えられる。実際、Ueno and Harada (1982)は、永久磁石によって発生する勾配磁界を用いて水中の溶存酸素の拡散を加速させることに成功している。

例えば、水耕栽培では従来からバブリングなど根系に酸素を供給する工夫がなされている。本研究手法を応用すれば、水耕栽培での酸素供給効率をさらに高める可能性があるばかりでなく、完全な静水、寒天培地あるいは土壌中にまで適用できるため、適用範囲が広く、植物生産技術の進歩に貢献できる可能性があると推察する。本研究で得られる成果は、植物生産に限らず、動物の培養細胞への酸素供給などライフサイエンス全般に転用可能であると推察する。

Chun, C. and Takakura, T. (1994) Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentrations in hydroponics. *Environment Control in Biology* 32, 123-135.

Lide, RD ed. (2005) Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds. in *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Taylor & Francis, Boca Raton.

Ueno, S. and Harada, K. (1982) Redistribution of dissolved oxygen concentration under strong dc magnetic fields. *IEEE Trans. Magn. Mag-18*, 1704-1706.

吉田 敏・北野雅治・江口弘美 (1996) 水耕における溶存 O₂ 濃度制御下のキュウリ植物の生育. *生物環境調節* 34, 223-229.

2. 研究の目的

モル磁化率 $3400 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ の常磁性という酸素の磁性化学物理的な性質を利用して、冠水した植物の根系への酸素供給を加速し、以て植物の発育を促進することを目的とした。研究の前半では、酸素の常磁性によって、溶液中の溶存酸素濃度を制御できるという過去の研究を、本実験系に適用することを目的とし、磁性化学物理的基礎実験を行う。まず、シャーレ内で、酸素（可変量）、アンモニア水（定量）、銅（定量）の反応で生成されるテトラアンミン銅(II)錯体の濃度から、勾配磁界による溶液中への酸素分子の拡散が加速されることを確認する。次に、植物実生の冠水実験で供試する PCR プレートで同様の実験を行い、酸素分子の拡散が加速されることを確認する。その PCR プレート孔内で植物の実生を冠水させて勾配磁界中に置き、勾配磁界によって酸素分子の拡散を加速させることによって、実生の根の成長を加速することを目的とする。

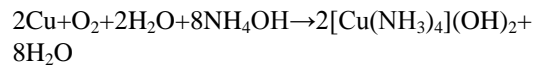
3. 研究の方法

勾配磁界中に置かれた常磁性体は(1)式に

よって磁界の強い方向へ引き寄せられる性質を持つ。

$$F = \frac{\chi}{\mu} B \frac{dB}{dx} \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 χ は磁化率、 μ は透磁率、 B は磁束密度である。そこで、酸素を引きつけるために NMR 用の希土類永久磁石 (NdFeB, 最大磁束密度 0.6 T) で強力な勾配磁界を発生させた。永久磁石周辺の磁束密度の 3 次元計測および磁気力のシミュレーションを行った。計測にはガウスメータを用いた。勾配磁界による溶液中の酸素分子の拡散の加速は、化学反応



によって生じる青色の錯体 $2[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$ の濃度を分光光度計で測定することによって定量した。磁石上に一定量のアンモニア水および銅を入れたシャーレまたは PCR プレートを静置し、一定時間ごとに溶液をサンプリングして分光光度計で錯体 $2[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$ の吸収波長である 620 nm の吸光度を測定した。磁石上と磁石外の溶液の吸光度を比較した。

研究計画時にはレタスの種子を供試することを想定していたが、PCR プレート内で実生を冠水させるためには、より小さい植物種を選択する必要が生じた。そこで、数十種類の植物種を試したが、最終的にタイム (*Thymus vulgaris* L.) を供試することとした。

タイム種子を 1% の次亜塩素酸ナトリウムで 1 分間殺菌した後、イオン交換水で洗浄し、24 時間イオン交換水中で浸水させた ($22 \pm 3^\circ\text{C}$, 暗黒)。種皮が破れたタイムを 4 個体選抜し、3 個体は PCR プレートの 3 つの孔に 1 個体ずつ入れた。PCR プレートの底部の肉厚は 0.5 mm であった。10 μL のイオン交換水 (溶存酸素濃度 7-8 mg/L) を PCR プレートのそれぞれの孔に注いだ。この時、水深は 2.5 mm となった。残りの 1 個体は PCR 孔に詰めた 20 μL のイオン交換水を含んだ紙 (JK ワイパー) の上に置かれた。この個体には十分な水分と酸素が供給されるのでポジティブコントロールとした。選抜された 4 つの種子を含む PCR 孔の間隔は 9 mm であった。次に、この PCR プレートを気温 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $75 \pm 5\%$ の暗黒の部屋の中の NdFeB 磁石 (98 mm \times 98 mm \times 35 mm) の上に置いた。この時、図 1 のように磁石の縁の 1 辺の中心を基準として x-y-z 座標系を定義した。1 つの種子は磁石上の $x = -9 \text{ mm}$, $y = 20 \text{ mm}$, $z = 0.5 \text{ mm}$ に位置した (処理 A)。2 つ目の種子は磁石の縁上の $x = 0 \text{ mm}$, $y = 20 \text{ mm}$, $z = 0.5 \text{ mm}$ に位置した (処理 B)。3 つ目の種子は磁石の外側の $x = 9 \text{ mm}$, $y = 20 \text{ mm}$, $z = 0.5 \text{ mm}$ に位置した (処理 C)。4 つ目のポジティブコントロール種子は磁石の外側の x

= 18 mm, y = 20 mm に位置した (処理 D). 4 つ目の種子 (処理 D) の z 座標は吸水紙の折りたたんだ形状に依存するような PCR 孔内の不定の位置であった. 処理 A, B, C の種子は PCR 孔内で冠水しており, 水中から溶存酸素を吸収する. その結果, 種子周辺の溶存酸素濃度が低下するはずである. 空中の酸素が水中に拡散する過程で, 処理 B だけは強い勾配磁界の磁気力により酸素の水中への拡散が加速されると推察した. よって, 処理 D > 処理 B > 処理 A > 処理 C の順に根の成長が速いと仮定した. 24 時間処理後に種子を取り出し, 実体顕微鏡で幼根の長さや直径, 根毛の長さ, および根系の投影面積を測定した. 一連の実験を 9 回反復した. 処理間の根のパラメーターの差を ANOVA および Tukey-test で検定した.

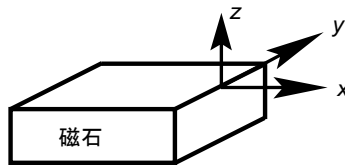


図 1. 供試磁石上における座標系の定義

4. 研究成果

永久磁石近傍の磁束密度の測定結果を図 2 に示す. 磁束密度の最大値は 0.6 T, 磁束密度の大きさと磁束密度勾配の積は $44 \text{ T}^2/\text{m}$ であった. その永久磁石の上にアンモニア水が入ったシャーレを静置した. その容器の内側底面 (溶液中) に銅の薄板を静置した. 酸素, アンモニア水, 銅の反応で生成されるテトラアンミン銅(II)錯体の濃度を分光光度計で測定した. 対照実験では磁石を用いなかった. 勾配磁界はテトラアンミン銅(II)錯体の生成

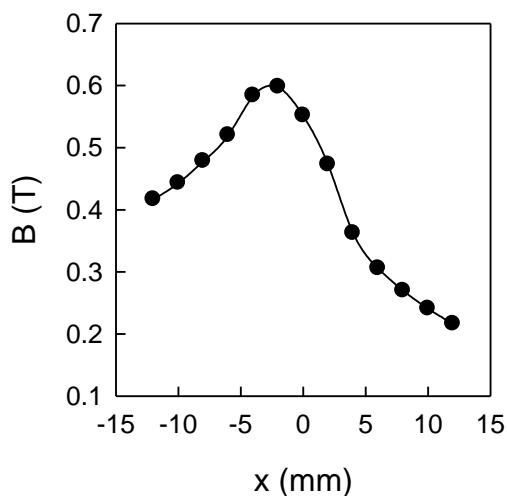


図 2. z = 2 mm における x 方向への磁束密度 B の分布

量を有意に増加させた. 溶液の深さが 2 mm 以下の時には勾配磁界はテトラアンミン銅(II)錯体の生成量を際立って増加させた. 解析的に求めた酸素分子に働く磁気力の空間分布はこの結果を説明した. 以上の結果から, 酸素分子に働く強い磁気力によって酸素, アンモニア水, 銅の反応速度が加速されると結論した. 以上の内容を一篇の論文として発表した (Aoyagi et al., 2006).

次に, 植物冠水実験で使用する PCR プレートでも酸素, アンモニア水, 銅の反応で生成されるテトラアンミン銅(II)錯体の濃度を分光光度計で測定した. シャーレでの実験と同様, 磁気力が最大となる磁石の縁で最大の吸光度が得られた (図 3).

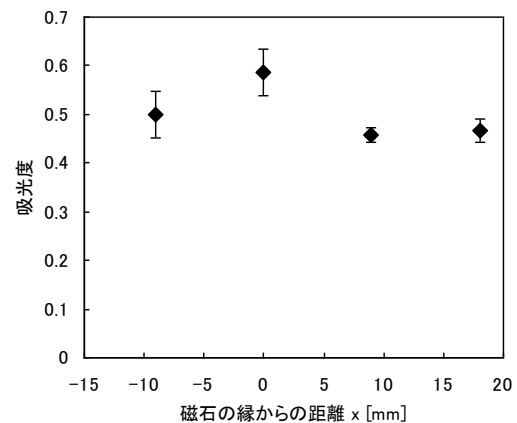


図 3. テトラアンミン銅(II)錯体の吸光度誤差線は標準偏差 (n = 3)

永久磁石の上に 10 μL /孔のイオン交換水を注いだ PCR プレートを置いた. その PCR プレートの 1 孔に 1 粒の発芽直後のタイム *Thymus vulgaris* を移植した. 冠水したタイム種子を気温と相対湿度を制御した暗室中に 24 時間静置した. 幼根の長さ, 幼根の直径, 根毛の長さ, 根系の投影面積を計測した. 磁束密度の異なる位置間で前述の根の成長パラメーターを比較した. その結果, 非冠水のポジティブコントロール (処理 D) の根の成長パラメーターは冠水処理群のそれらよりも有意に大きかった (図 4a および図 5). このことは, 冠水処理が植物の初期生育を有意に遅らせることを示した. しかしながら, 冠水処理した種子では磁束密度の違い (酸素に働く磁気力の違い) とは無関係に, 総じて根の成長パラメーターの値が小さかった (図 4b および図 5). これらの結果から, 永久磁石近傍の勾配磁界によって常磁性酸素分子に作用する磁気力を利用して, 冠水植物へ酸素供給するという磁性化学物理的手法は, 少なくともタイム種子では根の成長に影響を及ぼし得ないことが明らかとなった. 以上の結果を専門誌に投稿した. さらに, 以上の結果を

2008年6月に国際会議で発表した(Yano and Takashima, 2008).

本研究の結果から、酸素分子の常磁性の性質を用いて溶液中への酸素分子の拡散を加速するという磁性化学物理的過程は確認されたが、その結果を植物の成長の促進に利用するという、生物学的なプロセスへの応用には至らなかった。より強い磁気力を発生する勾配磁界の導入や、より酸素への感受性の強い植物で実験することが今後必要と考える。

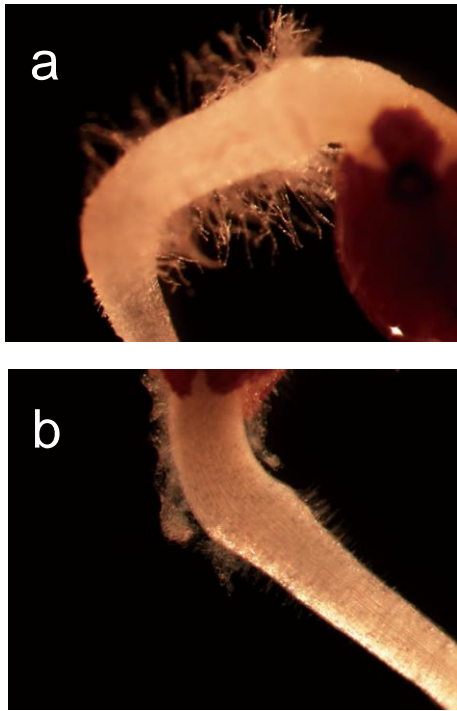


図4. 冠水させずに24時間成長したタイム実生(a, 処理D)および冠水させて24時間成長したタイム実生(b, 処理C)

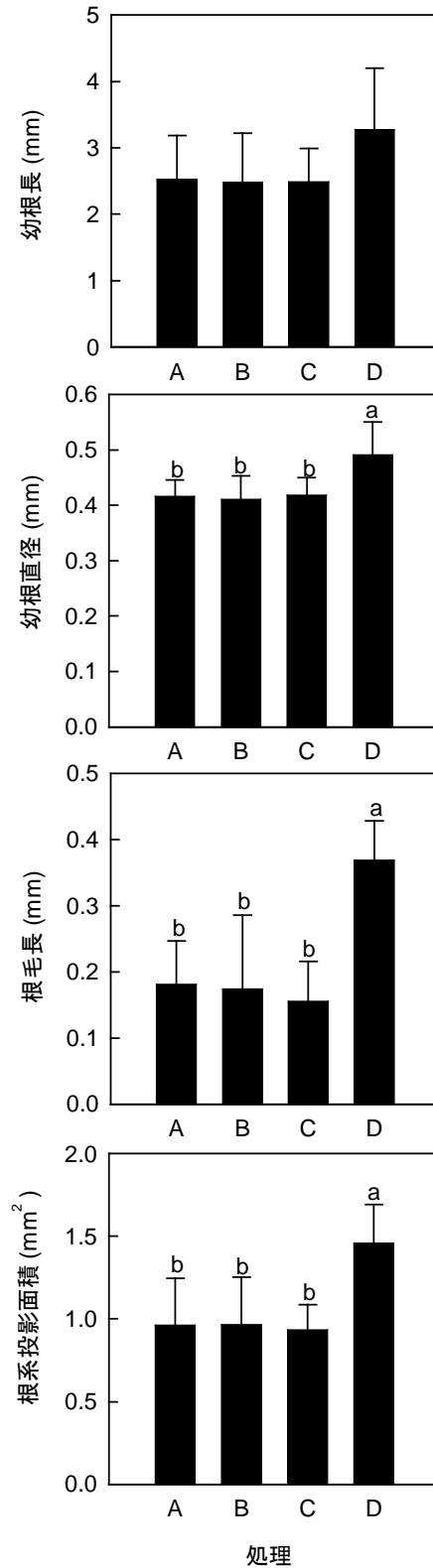


図5. タイム実生の幼根長, 幼根直径, 根毛長, および根系投影面積
 平均値±標準偏差
 添字 a と b の処理間に有意差有り.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Aoyagi S, Yano A, Yanagida Y, Tanihira E, Tagawa A, Iimoto M. Control of chemical reaction involving dissolved oxygen using magnetic field gradient. Chemical Physics 331(1):137-141, (2006), 査読有

[学会発表] (計 1 件)

① Yano A, Takashima K. Root growth of submerged thyme seeds in a gradient magnetic field. The Bioelectromagnetics Society 30th Annual Meeting, P-68. 2008 年 6 月 11 日, San Diego

6. 研究組織

(1)研究代表者

谷野 章 (YANO AKIRA)

島根大学・生物資源科学部・准教授

研究者番号：70292670

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし