

植物反応の予測因子となる土壌の電気伝導率

Electrical Conductivity of Soil as a Predictor of Plant Response

植物は成長の為栄養素が必要であり、適正な栄養素を適正濃度で供給できないと、植物機能に影響を及ぼす。高過ぎる濃度で肥料を与えると、植物機能に影響を与える事があり、致命的となることもある。我々のほとんどは、恐らく偶然に、芝生の一部に肥料を与え過ぎ、その部分の芝生を枯らした経験を持っている。そのダメージの原因は一般的に、栄養素そのものではなく、栄養素が水に与える影響にある。水分中の塩分は水の潜在力を低下させ、植物への利用を低下させる。塩分はそれ故、植物中の塩分ストレスを引き起こす。

土壌中の塩分は肥料に含まれるが、灌漑及び溶解した土壌鉱物にも含まれる。比較的少量の肥料は収穫される植物によって除去されるが、ほとんどは土壌断面の底部から浸出する。水が土壌表面又は葉から揮発する際、それは純粋な水で塩度を含んでおらず、蒸発散量は土壌中の塩分を濃縮する。浸出したり収穫される植物によって取り去られる以上に、灌漑水の塩分が多いと、土壌はより多くの塩分を含むようになり、やがて農業生産を阻害するようになる。このような過程で、数千エーカーの農地が生産できなくなっており、それ以外の数万エーカーで生産量が大きく減少する。

土壌塩度と導電率

100年以上、土壌塩度は電気伝導率を用いて測定されている。塩水が導電性である事は、良く知られている。この事実を利用し、Whitney及びMeans (1897)は土壌中の塩分濃度を測定した。初期の手法では、土壌ペーストを直接測定したが、ペースト状土壌が測定に及ぼす影響は、最近まで完全には理解されず、測定に不確実性を与えていた。1949年まで、土壌塩度を測定する受容されていたのは、特定手法により飽和土壌ペーストを調製し、ペーストから溶液を抽出、その溶液の電気伝導率を測定する手法で行っ

た (Richards, 1954)。本測定は飽和抽出物電気伝導率と呼ばれる。これらの値は、作物応答と相関性を取る。

Richards (1954)は、表1に示されるように4種類の土壌塩度を定義した。これら種類に適した作物は、Richardsが報告し、より広範なリストがRhoades及びLovejoyが提出されている(1990)。例えば、豆は敏感な作物として記載されている。豆はECが2 dS/m未満の土壌では収率がダメージを受けずに育成可能だ。大麦は耐久性作物である。大麦はECが16 dS/mまでのいかなる土壌でも、収率低下を起こさず育成可能である。

USDA クラス	導電率 範囲 dS/m	土壌中 塩分 g/100g	浸透 ポテンシャル kPa	作物塩分 耐性	作物例
A	0-2	0-0.13	0 to -70	敏感	豆
B	2-4	0.13-0.26	-70 to -140	中程度に 敏感	とうもろこし
C	4-8	0.26-0.51	-140 to -280	中程度の 耐性	麦
D	8-16	0.51-1.02	-280 to -560	耐性	大麦

表 1. 土壌の塩度クラス

2つの列を本表に示す。「土壌中塩分」列は、土壌を塩で処理するのに、どの程度の塩が必要とされるかを示す。全土壌量に対しては、塩度に大きな変化をもたらすのに必要とされるのは、ごく少量のパーセント変化のみだが、大量の肥料添加を意味する可能性もある。200 kg/haの肥料追加は、非常に大きい量を意味している。これが土壌表面15cmに関連するならば、

$$200 \frac{\text{kg}_{\text{fert}}}{\text{ha}} \times \frac{1\text{ha}}{10^4 \text{m}^2} \times \frac{1}{0.15 \text{m}} \times \frac{1\text{m}^3}{1.3 \times 10^3 \text{kg}_{\text{soil}}} \times 100 = 0.01\%$$

これは、土壌塩分パーセントを大きくは変化させない。他の列は、飽和抽出物の浸透ポテンシャルを示す。この数字に言及すると、土壌に関し、公称の永久萎れ水ポテンシャルは-1500 kPa であることに留意する。植物の葉の浸透

ポテンシャルは、その種類によって大きく異なるが、-1500 kPa は中間値に相当する。表中の値は永久萎れ (PW) 値に比べると小さいように見えるかもしれないが、飽和時の値である事に留意する。土壌が飽和している時、水はおおよそ飽和値の約半分量の「排出上限(UL)」水量を急速に排出する。

土壌の有用な水貯蔵は、ULとPW間又はPW以下の水分率で、やはりULの約半分量である。ULでの塩分濃度は飽和時と ほぼ同じである。これは、水が排出されるからであるが、ULとPW間の水損失は 大抵蒸発散によるもので、塩はほとんど全く失われない。下限での濃度はそれ故、表1記載の2倍で、永久萎れ(PW)水ポテンシャルと比べると大きい値となる。

同様に、200 kg/kaの肥料を施して混合した後の土壌溶液の浸透ポテンシャルは大きくは変わらないが、種近傍で濃縮された同量の肥料は、非常に大きな影響を及ぼす。

土壌溶液の電気伝導率測定

上記の通り、最も初期の溶液電気伝導率は土壌サンプルで測定されたが、土壌溶液の抽出及び測定により信頼性があることが判明した。不飽和土壌の値が必要な場合、飽和値に基づき計算され、土壌がどのように現在の状況まで乾燥したか推測できる。土壌溶液の直接的電気伝導率測定は、それによって信頼性を得ることができるならば、明らかに良い手法である。本測定には2手法が用いられている。第一は、気泡圧力15バールを与えながら、セラミックに埋め込まれた白金電極を用いる手法である。植物が成長する範囲を通じて、土壌が飽和していなくてもセラミックは飽和状態を保ち、セラミック中での溶液測定を可能にする。セラミックと土壌間で十分な交換が行われる限り、本測定は土壌溶液のEC、間隙水のECを求める。他の方法ではバルク土壌の電気伝導率を測定し、実験式または理論式を用い間隙水ECを求める。ECH20-TEは第2の手法を用いる。この手法では、土壌とセンサー間で塩の交換は必要なく、それ故、実際の溶液電気伝導率を示す事が期待される。次の分析は、バルク土壌電気伝導率測定から飽和抽出物電気伝導率を求める数種の方法の一つである。

Mualem及びFriedman (1991) は、土壌水圧特定に基づくモデルを提案した。そのモデルでは、2つの並列の導電経路を仮定し、それらの一つは土壌粒子表面、他方は土壌水分を通じての経路になる。

そのモデルは以下となる。

$$\sigma_b = \sigma_s + \sigma_w \frac{\theta^{n+2}}{\theta_s} \quad (1)$$

ここで、 σ_b はプローブによって測定されるバルク電気伝導率、 σ_s はバルク表面電気伝導率、 σ_w は間隙水の電気伝導率、 θ は体積含水率、 θ_s は土壌の飽和水分率、そして、 n は実験パラメーターで約0.5が推奨される。

現時点では、表面電気伝導率を無視し、飽和ペースト($n = 0.5$ 及び $\sigma_s = 0.5$ と仮定)電気伝導率の算出に式1を用いるならば、 $\sigma_b = 0.35 \cdot \sigma_w$ が得られる。明らかに、土壌が存在しない場合のバルク値は、水の電気伝導率と等しくなるが、土壌が存在する場合、バルク電気伝導率は溶液電気伝導率の約3分の1となる。それは、土壌粒子が一定スペースを占め、イオン流の断面を減少させ、一方の電極から他方へイオンが移動する距離を延ばす(粒子の周囲)為である。不飽和土壌でも同じ概念が適用されるが、ここでは土壌粒子と空隙両方がイオン移動を妨げるために、バルク電気伝導率は間隙水電気伝導率の一部よりも小さくなる。

我々の興味は、もちろん、間隙水電気伝導率にある。式1の逆転によって、以下を得た。

$$\sigma_w = \frac{\sigma_b - \sigma_s}{\theta^{n+2} / \theta_s} \quad (2)$$

土壌中の測定から間隙水電気伝導率を知りえる為、土壌体積含水率、飽和体積含水率及び表面電気伝導率を知る必要がある。ECH20-TEは体積含水率を測定する。飽和体積含水率は、土壌のバルク密度から計算される。

$$\theta_s = 1 - \rho_b / \rho_s \quad (3)$$

ここで、 ρ_b は土壌バルク密度、 ρ_s は鉱物 土壌中に存在する固体粒子の密度で値は約2.65 Mg/m³である。粗目の土壌では、表面電気伝導率は0と仮定する。それ故、ECH2O-TEの使用により、上記仮定を適用して間隙水ECの定量化が可能になる。この知見は、肥料スケジュールに非常に有用なツールとなる可能性を秘めている。

電気伝導率の温度依存性

土壌又は溶液の電気伝導率は摂氏1度あたり2%変化する。その為、有用な測定には温度補正される必要がある。Richards (1954)は、任意の温度での測定値を25 °Cでの値に補正する表を提供した。次の多項式は表の概要を示しています。

$$\sigma_{(25)} = \sigma(-6.04 \times 10^{-6}T^3 + 8.511 \times 10^{-4}T^2 - 0.0515 T + 1.849)$$

ここで、 t は摂氏温度である。本式のプログラムはECH2O-TE に入力されるため、自動で温度補正される。

電気伝導率の単位

電導度のSI単位はジーメンスなため、電気伝導率の単位はS/mである。過去の文献で使われた単位はmho/cm (mhoはohmの 逆数)で、S/cmと同じ値である。土壌電気伝導率は概ね、mmho/cmで報告されるため、1 mmho/cmは1mS/cmである。SIは分母の約数使用を推奨しないため、この単位はデシジーメンス・パー・メートル(dS/m)に変換されるが、数字上はmmho/cm又はmS/cmと同じである。ECはmS/m又は・S/mとして報告される場合もある。1 dS/mは100 mS/m、又は10⁵ ・S/mである。

参考文献

Richards, L. A. (Ed.) 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agriculture Handbook 60, Washington D. C.

Rhoades, J. D. and J. Loveday. 1990. Salinity in irrigated agriculture. In Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy Monograph 30:1089-1142. Americal Society of Agronomy, Madison, WI.