

エチレングリコール水溶液を用いたテンシオメータによる 冬期の畑土壌マトリックポテンシャル測定法

吉 田 正 則*

Method for Matric Potential Measurement of Upland Soil in Winter
 by Tensiometry Using Ethylene Glycol-Water Solution

Masanori YOSHIDA

Shikoku National Agricultural Experiment Station

Abstract

Tensiometric method using ethylene glycol (EG)-water solution was discussed to enable long-term matric potential measurement of upland soil in National Institute of Agro-Environmental Sciences, Ibaraki, Japan, where water-using tensiometer has sometimes been frozen due to daily minimum air temperature lower than -10°C in winter.

Apparent matric potential measured by EG-water solution was 7.5% larger than true matric potential. Deviation of the apparent matric potential was corrected by specific gravity of the EG-water solution. Decrease in specific gravity of EG-water solution enclosed in tensiometer, resulted from EG diffusion through porous ceramic cup, was predicted from initial specific gravity, diffusion parameter, and duration day. Thus, the decrease in specific gravity is not necessary to be monitored during field measurement.

Relationship between freezing temperature and specific gravity of EG-water solution should be measured on stirred (or disturbed) condition, because decline in the freezing temperature with increasing specific gravity is affected by the presence of disturbance. Frozen cases of the EG-water solution during the matric potential measurement in the field had good correspondence with freezing conditions estimated by laboratory experiment.

It was suggested, consequently, that long-term matric potential measurement through winter season was possible, provided that the initial specific gravity of EG-water solution and replenishing period of EG into tensiometer were considered, and that specific gravity more than lower limit (critical specific gravity) corresponding to minimum air temperature was maintained.

Key words : tensiometer, matric potential, ethylene glycol-water solution, prevention of freezing, specific gravity

1. はじめに

マトリックポテンシャルは、体積含水率や不飽和透水係数、土壤水の移動方向や駆動力を推定する上で欠かせない情報である。テンシオメータ法は、現場土壌中のマトリックポテンシャルを測定する有力な手法のひとつであり(唐ら, 1990), 土壤水分のモニタリング

(Hasegawa *et al.*, 1994) や用水計画の策定(凌・安養寺, 1996), 肥料成分の流出解析(大田ら, 1995)などに広く応用されてきた。

従来、テンシオメータの負圧測定には水銀マノメータが用いられたが、現在では、圧力トランスデューサやパーソナルコンピュータなどを組み合わせることにより、高精度かつ高感度のデータが自動的に取得できるよ

* 四国農業試験場 〒765 香川県善通寺市生野町 2575

キーワード: テンシオメータ, マトリックポテンシャル, エチレングリコール水溶液, 凍結防止, 比重

うになっている(谷川ら, 1992)。しかし, 圧力媒体として水を用いる通常の方法では, テンシオメータの上端部が地上に現れているため, 冬の間テンシオメータ内部の水が凍結し, 測定が中断したり, 圧力トランスデューサが破損する, などの欠点がある。このことは, 土壌水分が液体状態を維持しているにも関わらず, 地表付近の気温が一冬に幾度も氷点下を記録するような地域においては深刻である。

この問題を解決するための一案として, テンシオメータ全体を土壌中に埋設する方法が考えられる(例えば, 井上, 1994)。しかしこの方法では, テンシオメータを土壌中から回収しない限り, テンシオメータ内の水をチェックしたり補給することはできない。夏期の畑上層では, 地表付近のマトリックポテンシャルが著しく低下してテンシオメータ内の水が失われるため, 周年観測に支障をきたす。

また, テンシオメータの圧力媒体を地上部のみデカリン(Decahydronaphtalene, $C_{10}H_{18}$)で置換する方法が試みられたが(元木, 1971), デカリンがテンシオメータやそこに接続されたチューブを痛めることがあり, 長期間の計測には不適切であるとされた(元木, 1972)。

その他, テンシオメータ内の水で満たされている部分を地下まで下げることににより地上部の凍結を回避する方法が考えられる。しかしこの方法では, テンシオメータ地上部の気相体積変化により圧力トランスデューサの反応が鈍くなるのに加え, 水位が地下に隠れることによりマトリックポテンシャルの水柱高補正ができなくなる, などの問題が生じる。

上に述べたようなテンシオメータ法の問題点を克服し, 冬期のマトリックポテンシャル測定を可能にするためには, 圧力媒体が1) 液体であり, 2) 氷点下で凍結せず, 3) テンシオメータを侵さないこと, が重要である。McKim *et al.* (1976)は, このような特徴を備えた物質としてエチレングリコール(Ethylene Glycol, $HOCH_2CH_2OH$, 以下EGと略す)水溶液を選び, 凍結融解過程におけるマトリックポテンシャルの解析を行っている(Schmugge *et al.*, 1980)。

EGの代表的な物性を表-1に示す(日本化学会,

表-1 エチレングリコールの物性
Table 1 Physical properties of ethylene glycol

分子量 Molecular weight	沸点 Boiling point (°C)	凝固点 Freezing point (°C)	比重 Specific gravity	表面張力 Surface tension (dyn/cm)
62	198 (1 atm)	-13	1.116	48 (20°C)

1980)。EGは, 分子量が比較的小さく, 分子内にふたつの極性OH基を持つため, 水との親和性が強く, いろいろな濃度の水溶液をつくり出すことができる。そのため, EGと水との混合割合により, 凝固点降下の程度を調節することができる。また, 比重が大きいため, 水と混合したときのEG濃度と比重との関係をあらかじめ調べておけば, 比重を測定するだけで任意のEG濃度を知ることができる。さらに, EGは, 沸点が高く不揮発性であるから, 短時間であれば水溶液を空気にさらしても比重は変化せず, 取り扱いが容易である。

以上のことから, EG水溶液は, 凍結を防止するためのテンシオメータ用圧力媒体として有効であると考えられる。そこで本研究は, テンシオメータの圧力媒体としてEG水溶液を用いたときのマトリックポテンシャルの補正法や凍結回避の条件などを明らかにすることにより, 冬期のマトリックポテンシャル測定を可能にすることを目的とした。

2. 試験方法

1) 室内実験

(1) EG水溶液がマトリックポテンシャル測定値に与える影響

農業環境技術研究所(農環研)畑圃場(表層腐植質黒ボク土)内の表層土壌を, 内径5cm, 長さ7cmの試料円管により不攪乱採取する。この土壌円管に, 比重(25°C)1.001, 1.024, 1.037, 1.049, 1.055, 1.062のEG水溶液を満たしたテンシオメータ(全長29cm, 直径1.8cm)のポーラスカップ(日本化学陶業製)を挿入し, 素焼板に静置する。素焼板に接続した水だめ内の自由水面の高さを調節することにより円管内の土壌に所定の負圧水頭(真のマトリックポテンシャル)を与える。一方, ハンディマノメータ(コパル電子製PG100-101V)で測定したテンシオメータ上端の気相中の圧力(負値)にテンシオメータ内EG水溶液の高さと比重との積(正值)を加えることにより, 円管内土壌の負圧水頭を求め, みかけのマトリックポテンシャルとする(図-1a)。そして, みかけのマトリックポテンシャルを真のマトリックポテンシャルと比較することにより, EG水溶液を用いた場合のマトリックポテンシャル測定値への影響を調べた。なお, ポーラスカップから漏れ出たEGが測定に影響するのを防ぐため, 土壌および素焼板の水は負圧段階毎に交換した。

(2) EG水溶液の凍結温度

直径2.5cmの試験管に, 比重を1.002から1.070まで17段階に調製したEG水溶液20cm³を入れ, 低温恒温水槽(トーマス製TRL-112)に浸す。水槽の温度を一

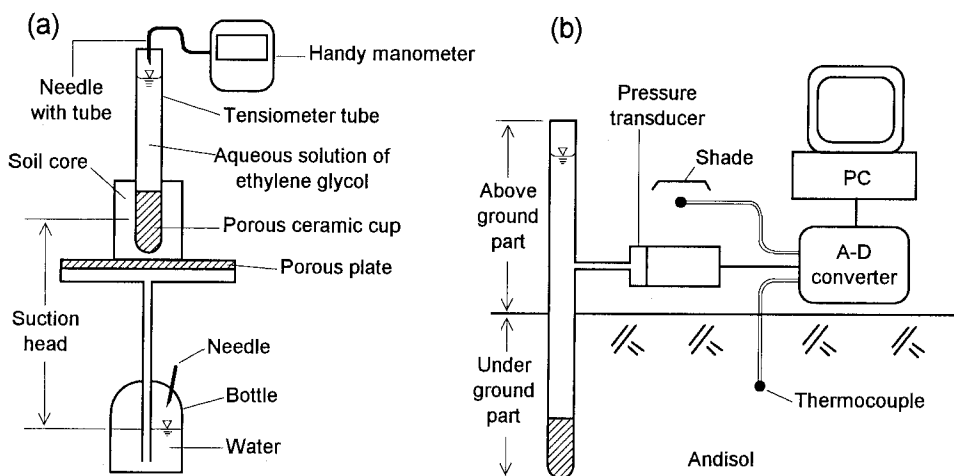


図-1 (a) EG 水溶液のマトリックポテンシャル補正および (b) マトリックポテンシャル、気温、土壌温度の圃場測定のための装置

Fig. 1 Apparatus for (a) matric potential correction of EG-water solution, and for (b) field measurement of matric potential, air temperature (30 cm high), and soil temperature (20 and 90 cm deep)

20℃まで下げたときのEG水溶液の凍結温度を、試験管に挿入したサーミスタ温度計（宝工業製 D611）で測定する。

水などの液体は、凝固点（水の場合 0℃）以下になっても凍結しないことがある（過冷却現象）。この状態にある液体は、外から振動などが加わると瞬時に凍結する。圃場のテンシオメータ内 EG 水溶液についてもこれと同じことが生じると予想される。そこで本実験では、EG 水溶液を攪拌しなかった（過冷却を維持した）ときの凍結温度と攪拌した（過冷却を起こさなかった）ときの凍結温度を求め、それぞれ、圃場のテンシオメータ内 EG 水溶液の凍結温度下限値および上限値とみなすことにした。

なお、本実験では、低温恒温水槽の能力限界である -20℃まで冷却試験を行ったが、この段階でもなお、比重 1.042（EG 原液の体積：水の体積=0.4：1、EG 水溶液を攪拌しなかった場合）ないし比重 1.054（EG 原液の体積：水の体積=0.6：1、EG 水溶液を攪拌した場合）の EG 水溶液が液状を維持することが確認された。このことから、EG 水溶液の比重を 1.042 ないし 1.054 以上にするにより、凍結温度をさらに -20℃以下に下げることが可能と考えられる。しかし、EG の凝固点は -13℃ となっているから（表-1）、EG の割合を増やしていくと、やがて凍結温度は極小点に達し、その後上昇に転じるとみられる。すなわち、EG と水が適当な割合で混合していることが凝固点を降下させるうえで重要であり、EG

の割合を大きくし過ぎると、かえって凝固点を上昇させる結果につながるので注意が必要である。

2) 圃場試験

(1) ポーラスカップからの EG 拡散

農環研畑圃場内深さ 50 cm の土壤中にテンシオメータを 7 本埋設し、1994 年 6 月 3 日に初期比重 1.051 の EG 水溶液を投入した。それから 4, 9, 14, 26, 34, 49, 62 日後の EG 水溶液をそれぞれ 1 本ずつ採取し、その比重を測定した。ポーラスカップからの EG の拡散過程はつぎのように記述できると仮定した。

$$J(t) = D \{S(t) - S_0\} \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = AJ(t) \quad (2)$$

J : 単位時間の EG 拡散量

S : EG 水溶液比重

S_0 : 土壌水比重

t : 経過日数

D, A : 定数

(1)式を(2)式に代入して整理するとつぎようになる。

$$\frac{dS(t)}{dt} = aS(t) - b \quad (3)$$

ただし $a = AD$, $b = ADS_0$ とおいた。 $t = 0$ のとき $S = S_1$ として(3)式を解くと次式を得る。

$$S(t) = (S_1 - S_0)e^{at} + S_0 \quad (4)$$

S_1 : EG 水溶液初期比重

EG 水溶液の比重実測値に(4)式を適用すれば、非線形最小二乗法により定数 a を求めることができる。

(2) マトリックポテンシャル, 気温, 土壌温度の測定

1993年11月15日から94年3月31日にかけて、農環研畑圃場の深さ20, 30, 40, 55, 75, 95 cmにおけるマトリックポテンシャル, 高さ30 cmにおける気温(地表気温), 深さ20, 90 cmにおける土壌温度を、それぞれ、テンシオメータ, T型熱電対により測定した(図-1b, 土壌温度は94年2月19日~3月31日のみ測定)。

93年11月15日に比重1.041のEG水溶液をテンシオメータに投入後、94年1月31日にその一部を採取し比重を測定した。翌2月1日, EG原液をテンシオメータに直接投入し, 残留液と混和したときの比重を測定した。そして, 3月31日にふたたびEG水溶液を採取し比重を測定した。

テンシオメータの負圧は, 圧力トランスデューサ(バルコム製VPRN)により測定し, 地表気温, 土壌温度とともに, A-Dコンバータを経てパーソナルコンピュータにより1時間毎に自動記録した。

3. 結果と考察

1) EG水溶液がマトリックポテンシャル測定値に与える影響

テンシオメータの圧力媒体としてEG水溶液を用いることが, マトリックポテンシャルの測定にどのような影響を及ぼすかを, 理論的に予測することは難しい。そこで, 所定の負圧水頭(真のマトリックポテンシャル)とテンシオメータで求めた負圧水頭(みかけマトリックポテンシャル)との関係を, いろいろなEG水溶液比重について実験的に調べてみたのが図-2である。EG水溶液比重の増加にともない, みかけマトリックポテンシャルが真のマトリックポテンシャルよりも高い値を示すようになることから, EGの溶解がテンシオメータの負圧を上昇させる働きのあることがわかる。その度合いは, 比重1.061(EG原液の体積:水の体積=1.25:1)のとき約7.5%であった。さらに, みかけマトリックポテンシャルと真のマトリックポテンシャルとの間に回帰直線を引いたときの勾配をEG水溶液比重に対してプロットすると(図-3), 両者の間に比例関係が成立していることがわかる。これらの結果は, つぎのように表すことができる。

$$h_t = G(S)h_a \quad (5)$$

$$G(S) = -0.220 + 1.231S \quad (6)$$

h_t : 真のマトリックポテンシャル

h_a : みかけのマトリックポテンシャル

G : 回帰直線の勾配

(6)式を(5)式に代入すると次式を得る。

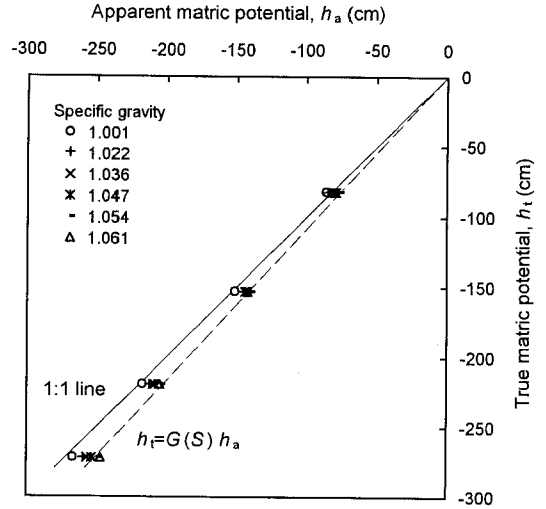


図-2 みかけマトリックポテンシャルと真のマトリックポテンシャルの関係

Fig. 2 Relationship between apparent matrix potential and true matrix potential

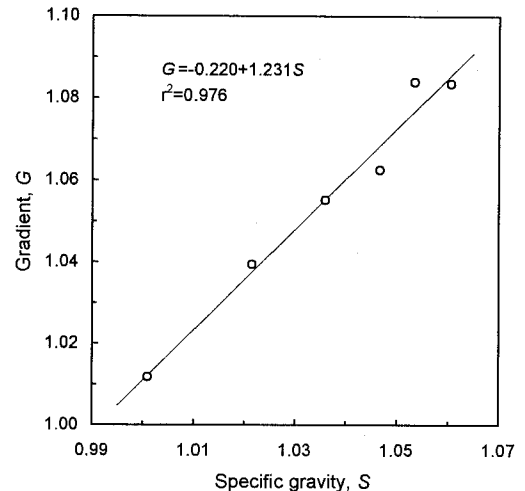


図-3 比重の関数として表した回帰直線の勾配

Fig. 3 Gradient of regression line between apparent and true matrix potential as a function of specific gravity

$$h_t = (-0.220 + 1.231S)h_a \quad (7)$$

(7)式を用いれば, 任意比重のみかけマトリックポテンシャルから真のマトリックポテンシャルを求めることができる。

2) ポーラスカップからのEG拡散

テンシオメータ内のEG水溶液はポーラスカップを通

じて土壌水と連続しているため、EG成分の土壌中への拡散とそれともなう比重低下は避けられない。一般に、土壌中の溶質拡散は流体力学的分散係数と濃度勾配に支配されるが(中野, 1991), ここでは簡単のため、濃度勾配の代わりにEG水溶液比重と土壌水比重との差をとり、テンシオメータ内のEG水溶液比重が時間とともにどのように変化するかを検討した(図-4)。その結果、

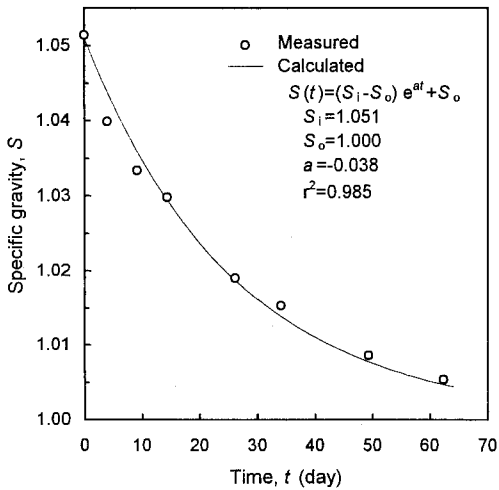


図-4 EG 拡散による EG 水溶液比重の低下

Fig. 4 Decline in specific gravity of EG-water solution due to EG diffusion through porous ceramic cup

試験開始時に 1.051 あった比重は、62 日後には 1.005 まで指数関数的に減少することが明らかになった。 $S_1=1.051$, $S_0=1.000$ において(4)式を実測値に適合させたところ、 $a=-0.038$ を得た ($r^2=0.985$)。パラメータ a は EG の土壌中への拡散強度を示す値で、ポーラスカップの孔隙率や面積、EG 水溶液の量などに依存すると考えられる。

S_1 に 1993 年 11 月 15 日および 94 年 2 月 1 日の初期比重を与え、圃場マトリックポテンシャル測定期間中のテンシオメータ内 EG 水溶液の比重を計算すると図-5 のようになる。図中の点は比重の実測値を示す。ただし、11 月 15 日は同じ比重の EG 水溶液を各深さのテンシオメータに与え、1 月 31 日は各深さのテンシオメータ内 EG 水溶液の混合液の比重を測定した。3 月 31 日に深さ別の対応がよくなかったことを除けば、1 月 31 日、3 月 31 日とも計算値が実測値を再現していることがわかる。このことは、測定期間中の比重変化が、初期比重 S_1 、拡散強度 a 、経過日数 t によって与えられることを示している。なお、3 月 31 日に深さ別の比重対応がよくなかったのは、EG 水溶液量の深さによる違いが a の大きさに影響したためと考えられる。

3) EG 水溶液の凍結温度

観測地点の気象条件に適した EG 水溶液比重を求めるためには、比重と凍結温度との関係を明らかにしておかなければならない。図-6 のふたつの曲線(攪乱凍結曲線、非攪乱凍結曲線)は、いろいろな比重において EG

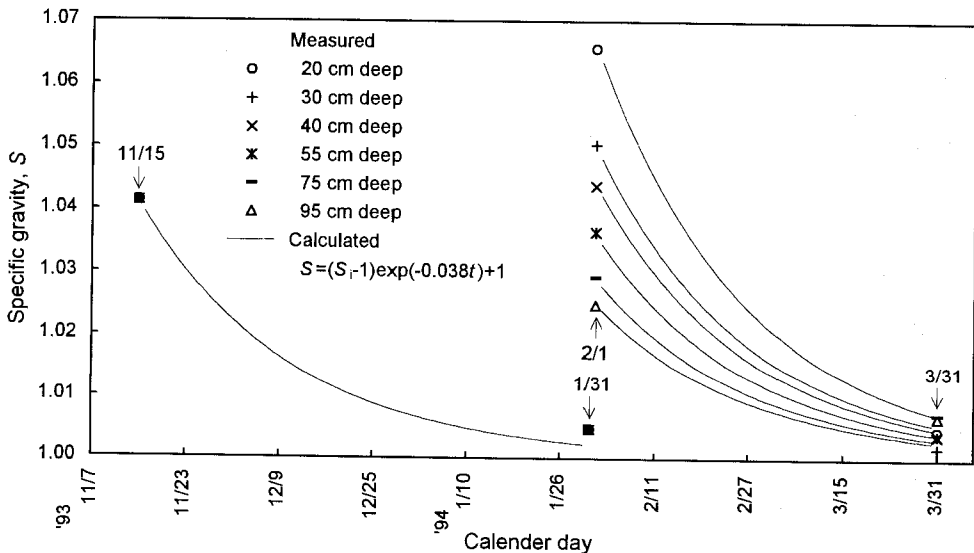


図-5 マトリックポテンシャル測定中のテンシオメータ内 EG 水溶液比重の推移

Fig. 5 Variation in specific gravity of EG-water solution in tensiometer during matrix potential measurement

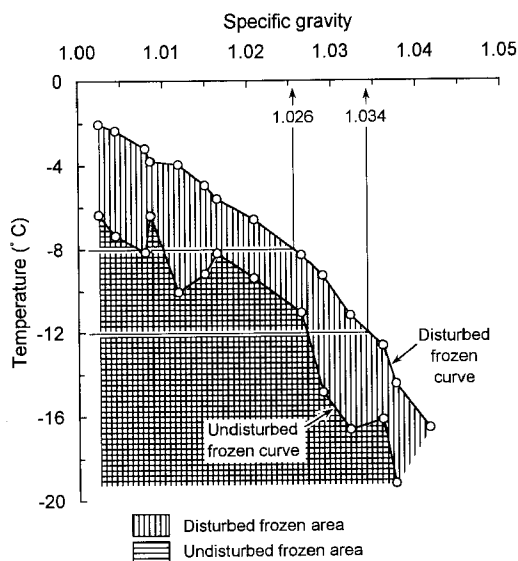


図-6 室内実験で求められたEG水溶液の凍結温度
Fig. 6 Freezing temperature of EG-water solution under laboratory experiment

水溶液が凍り始める温度を、水溶液を攪乱した場合と静置した場合とで求めた結果である。これらの曲線より下の領域は、EG水溶液が凍結していることを示す。

図-6の結果は、凍結温度が比重の増加によって低下することを明らかにするとともに、攪乱が凍結温度を約4°C高くすることも明らかにした。このことは、ふたつの曲線に挟まれた領域にあるEG水溶液が、外乱の有無によって凍ったり凍らなかつたりすることを示している。圃場に設置されたテンシオメータの地上部は、風などに揺すられて振動することがある。このようなとき、EG水溶液の凍結温度は、非攪乱凍結曲線から攪乱凍結曲線の方にずれると考えられる。したがって、圃場におけるEG水溶液の凍結温度は、図-6のふたつの曲線で挟まれた領域に分布すると予想される。

4) 土壌中の温度状況

本研究は、地表気温が氷点下になっても土壌温度が0°C以上を保つことを前提としている。農環研畑圃場がこの条件を満たしていたかどうかを知るために、1994年2月19日から3月31日にかけての地表気温と土壌温度との関係をプロットしてみた(図-7)。ただし深さ20cmの土壌温度は、地表気温との位相のずれをなくすため4時間前の気温と対応させた。また、深さ90cmの土壌温度に関しては、その変化が気温の変化に比べ非常に小さく、位相のずれによる相関係数の改善がほとんどみられなかったため、位相差は0時間と仮定した。その結果、1) 地表気温が-6°Cまで低下しても土壌温度はなお4°C

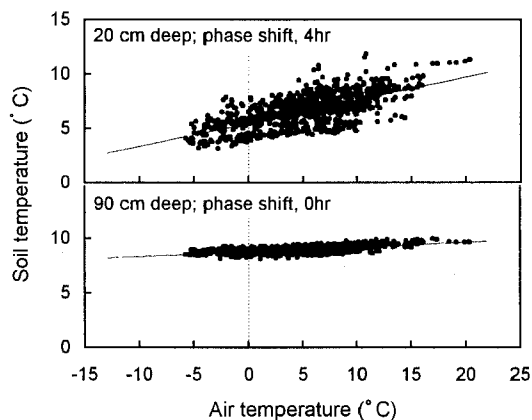


図-7 地表気温と土壌温度の関係

Fig. 7 Relationship between air temperature and soil temperature

以上を保ち続けること、2) 地表気温に対する土壌温度の変動はきわめて緩やかであること、3) 下層土が概して高い温度を維持していること、が明らかになった。これらの事実から、マトリックポテンシャルの測定期間(1993年11月15日~94年3月31日、この間の地表最低気温は94年1月31日午前4:00の-12.0°C)を通じて、深さ20cm以深の土壌が0°C以上を維持していたことが推察される。深さ20cmより浅い土壌に関して凍結の可能性は否定できないが、マトリックポテンシャルの測定深度が20cmより深かったことを考え合わせると、先に述べた条件は実質的に満たされていたと判断される。

5) テンシオメータの凍結履歴

$S_0 = 1.000$, $a = -0.038$ とおいて(4)式を(7)式に代入するとつぎのようになる。

$$h_t = 1.231 h_a (S_t - 1) \exp(-0.038 t) + 1.011 h_a \quad (8)$$

したがって、初期比重 S_t 、経過日数 t 、そのときのみかけマトリックポテンシャル h_a を与えれば、(8)式から真のマトリックポテンシャル h_t を計算することができる。図-8は、このようにして求めた畑土壌中のマトリックポテンシャルと地表気温の推移を、1994年1月19日から31日にかけて示したものである。地表の冷却が進行する夜半から早朝にかけて、マトリックポテンシャルの値が不連続に振動する現象がみられる。この振動は、地表気温がおよそ0°C以下に下がるときに上に大きく振れ、およそ0°C以上に上がるときに下に大きく振れていることから、凍結・融解にともなうEG水溶液の膨張・収縮に起因すると推察された。このように、テンシオメータ地上部がほぼ連日わたり凍結を繰り返したのは、夜間の冷え込みが厳しかったうえに、拡散によるEG水溶液比重の低下がかなり進行していたため(図-5参照)とみ

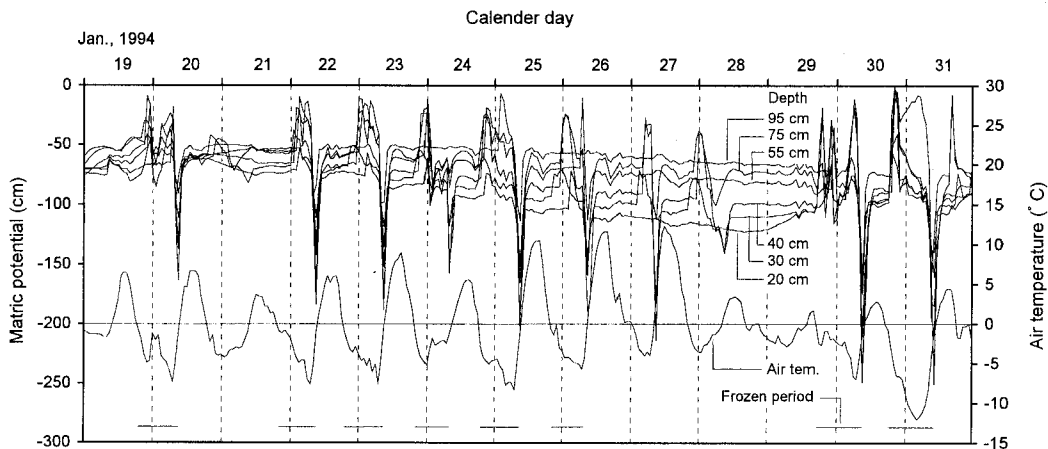


図-8 マトリックポテンシャルと地表気温の推移

Fig. 8 Variations in matric potential and air temperature in field

られる。

図-9は、1993年11月15日から94年3月31日の日最低気温とEG水溶液比重との関係を、マトリックポテンシャル値の挙動から判断したテンシオメータ凍結の有無とともにプロットしたものである。図中には、テンシオメータ地上部のEG水溶液温度が地表気温に等しいとみなしたうえで、室内実験から求めたEG水溶液の凍結温度(図-6)を合わせて表示した。深度の浅いテンシオメータほど比重分布が広範囲にわたっているのは、94年2月1日のEG原液投入によって深度の浅いテンシオメータほど初期比重が大きくなったためである(図-5参照)。

テンシオメータの凍結事例に注目すると、ほとんどすべての点が攪乱凍結曲線よりも低温側に位置していることがわかる。逆に、非凍結事例の多くが攪乱凍結曲線よりも高温側に分布していることも明らかである。先に、攪乱凍結曲線と不攪乱凍結曲線とに囲まれた領域では、気象条件によって凍結の有無が分かれる可能性があることを述べた。図-9にみられる凍結・非凍結事例の分布はこの考え方を支持するものであると同時に、テンシオメータ内EG水溶液の比重予測法ならびに凍結の有無の判定法が妥当なものであったことを示唆している。

その他、テンシオメータの凍結を防止するためには、一冬の地表最低気温に見合った限界比重を維持することが不可欠であることがわかる。ここで限界比重とは、ある温度でEG水溶液を凍らせないための比重下限値を意味する。また、地表気温が -3°C を下回らない限り、EG水溶液の代わりに水を用いても凍結のおそれがないことが明らかである。

6) EG水溶液の比重管理

長期にわたって限界比重を維持するためには、1) EGの拡散損失を見越した上で大きめの初期比重を与え、2) 比重が低下してきたらEGを補給すること、が重要である。そこで、初期比重とEG補給をどのように組み合わせれば合理的な比重管理が行えるかを、1993年から94年の冬を例にして考えてみる。

一冬の地表最低気温 -12°C (94年1月31日午前4:00)に対応する限界比重は1.034である。また、一冬に2回程度の凍結を許すとすれば、地表最低気温は -8°C になるので限界比重は1.026となる(図-6、図-9参照)。これらの限界比重を基準にして、EG水溶液の比重経過を想定したのが図-10である。ケースIとケースIIは初期比重を1.05とした場合、ケースIIIは初期比重を1.07とした場合である。実線と破線は、それぞれ、拡散による比重低下($S_0=1.000$, $a=-0.038$ とにおいて(4)式により計算)とEG補給による比重回復を示す。

各ケースの特徴は表-2のようにまとめられる。どのケースにも長所と短所があるから、どの項目を優先するかによって選ばれるケースは異なる。例えば、EGの補給回数を少なくしたいとすればケースIIかケースIIIを選ぶことになるし、一度も凍結を許したくないとすればケースIかケースIIIを選ぶことになる。ただし、ケースIIIを選んだ場合、初期比重が大きいため大量のEG原液を必要とするほか、土壤汚染の心配もでてくるので注意しなければならない。

以上の議論から、凍結を防ぎたい温度とそのときの限界比重を決めたうえで、可能な限り小さな初期比重と少ないEG補給回数とを組み合わせるのが最も合理的な方法といえる。

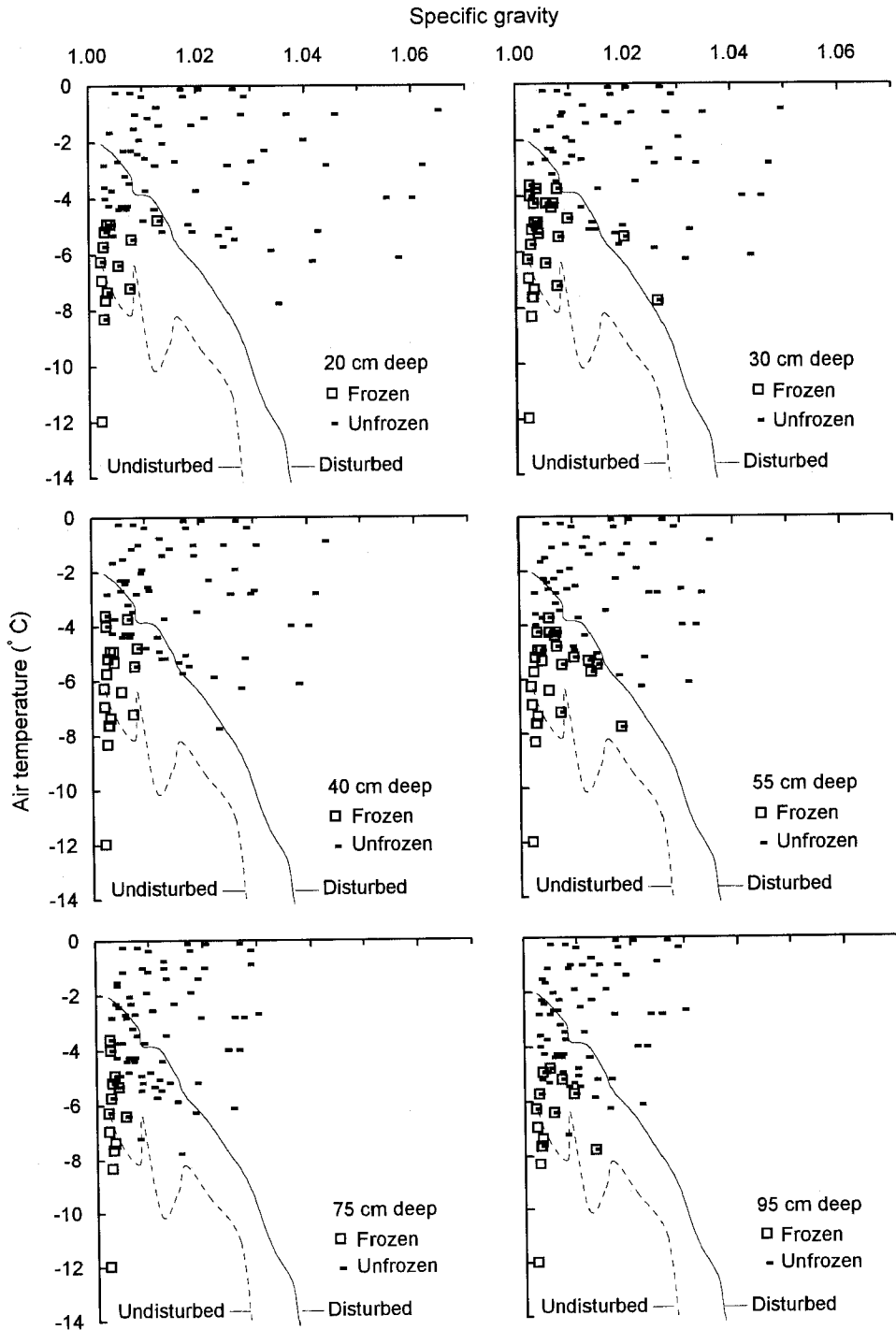


図-9 EG 水溶液の凍結と日最低気温および比重の関係

Fig. 9 Distribution of frozen EG-water solution in tensiometer on specific gravity-daily minimum air temperature diagram. Curves in the diagram show freezing temperature obtained by laboratory experiment.

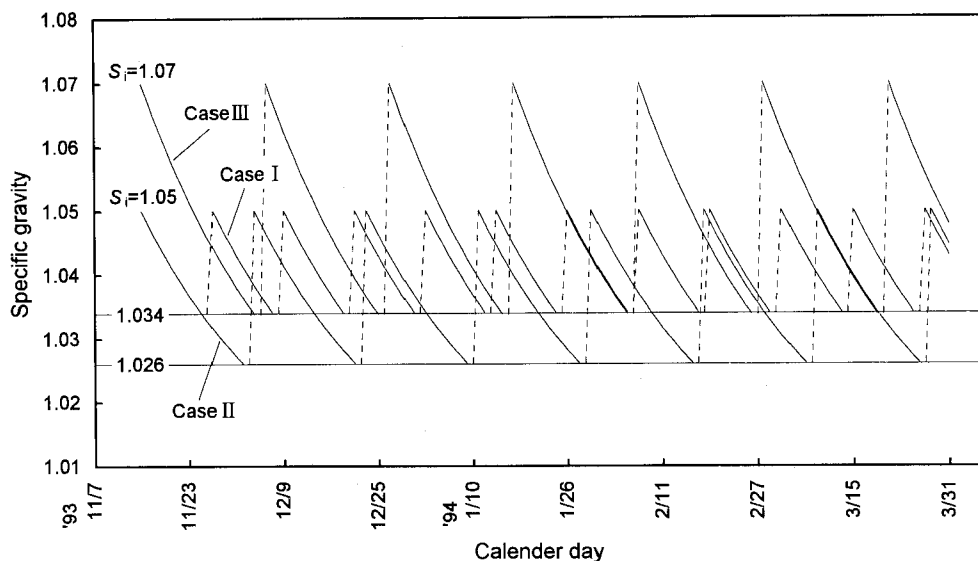


図-10 想定されたEG水溶液比重

Fig. 10 Hypothetical specific gravity of EG-water solution

表-2 想定されたケースの特徴

Table 2 Features of hypothetical cases

	初期比重 Initial specific gravity	凍結 Frozen case	補給回数 Number of replenishment
ケース I Case I	小さい Small	無し Not exist	多い Many
ケース II Case II	小さい Small	有り Exist	少ない Few
ケース III Case III	大きい Large	無し Not exist	少ない Few

逐次測定する必要はない。

比重の増加にともないEG水溶液の凍結温度は低下するが、その関係は攪乱の有無によって異なっている。EG水溶液の凍結を防止するためには、攪乱を与えた条件のもとで凍結温度と比重との関係を求めておく必要がある。

圃場観測期間中のテンシオメータの凍結事例は、EG水溶液の凍結温度実験から予想した凍結の条件によく対応していた。すなわち、EG水溶液の初期比重とEGの補充期間を適切に管理して地表最低気温に対応した限界比重を維持することにより、冬期のテンシオメータ凍結を回避しつつマトリックポテンシャルの長期観測が可能であることが示された。

4. ま と め

圧力媒体としてエチレングリコール(EG)水溶液を用いることにより、冬期のテンシオメータ凍結を防止する方法について検討した結果、以下の知見を得た。

みかけのマトリックポテンシャルは、EG水溶液の比重が1.061(EG原液の体積：水の体積=1.25：1)のとき、真の値に対し約7.5%過大な値を示したが、このずれは、比重を考慮することにより補正可能である。

ポラスカップからのEG拡散によるテンシオメータ内EG水溶液の比重低下は、初期比重 S_i 、拡散強度に関するパラメータ a 、経過日数 t を用いることにより予測可能である。したがって、圃場観測期間中の比重変化を

謝 辞

本研究を行うにあたりご指導、ご助言をいただいた農業環境技術研究所の長谷川周一室長、北海道農業試験場の加藤英孝氏ならびに香川県環境研究センターの石原曉氏に対し、厚く感謝の意を表する。

引用文献

- Hasegawa, S., Osozawa, S. and Ueno, H. (1994) : Measurement of soil water flux in Andisols at a depth below a root zone of about 1 meter. Soil Sci. Plant Nutr., 40 (1) : 137~147.
- Hillel, D. (1980) : Fundamentals of soil physics. p. 47,

- Academic Press, New York.
- 井上光弘 (1994) : 埋設型土壌感圧水分センサー, 日本砂丘学会誌, **41** (2) : 74~79.
- McKim, H.L., Berg, R.L., McGaw, R.W., Atkins, R.T. and Ingersoll, J. (1976) : Development of a remote-reading tensiometer/transducer system for use in subfreezing temperatures, Proceedings of the second conference on soil-water problems in cold regions. Edmonton, Alberta, Canada : 31~45.
- 元木征治 (1971) : 畑地かんがいのための土壌水分に関する研究, 東海近畿農試依頼研究員報告, **10** : 1~16.
- 元木征治 (1972) : かんがい畑における土壌水分の利用向上に関する研究, 東海近畿農試依頼研究員報告, **11** : 1~23.
- 中野政詩 (1991) : 土の物質移動学, p. 48~52, 東京大学出版会, 東京.
- 日本化学会 (1980) : 化学便覧応用編, p. 607~610, 丸善, 東京.
- 大田弘毅・大場和彦・塩野隆弘 (1995) : 畑地における降雨の浅層地下水までの移動モデル, 生態系からみた畑生産技術体系の確立, 九州農業試験場, 研究成果 : 28~38.
- Schmugge, T.J., Jackson, T.J. and McKim, H.L. (1980) : Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Res., **16** (6) : 961~979.
- 凌 祥之・安養寺久男 (1996) : 土壌水分張力とLAIを用いた蒸発散量と作物係数の推定法, 農土論集, **185** : 15~22.
- 谷川寅彦・矢部勝彦・千家正照・西出 勤 (1992) : 負圧センサーを用いた自記テンシオメータシステムの試作, 土壌の物理性, **64** : 53~58.
- 唐 常源・平田健正・村岡浩爾 (1990) : シリコンオイルを用いた自記テンシオメータの開発と森林土壌への応用, 地下水学会誌, **33** : 7~14.

受稿年月日: 1997年9月12日
受理年月日: 1998年1月16日