

古典を読む

W. Gardner, O. W. Israelsen, N. E. Edlefsen, and H. Clyde 著
「毛管ポテンシャル関数と灌漑操作への応用」宮本輝仁¹

Reviewing classical studies in soil physics

“The capillary potential function and its relation to irrigation practice” By W. Gardner, O. W. Israelsen, N. E. Edlefsen, and H. Clyde, Phys. Rev. 20, 196 (1922)

Teruhito MIYAMOTO¹

1. はじめに

土壌のマトリックポテンシャルの測定装置の一つにテンシオメータがある。テンシオメータは、素焼カップに硬質な導管を介して圧力計と連結した構造をしており、導管内は水で満たされている。不飽和土壌の中に差し込んだとき、土壌のマトリックポテンシャルが素焼カップ内の水圧より低い場合、内外の圧力差がなくなるまで素焼カップ内の水が外に排出される。また逆に、降雨後や灌漑後に土壌のマトリックポテンシャルが高くなると、逆の流れが生じて新しい平衡状態に達する。素焼カップの内外の水圧が平衡したときの圧力を測定することにより、そのときの土壌のマトリックポテンシャルを知ることができる。

テンシオメータは、土壌物理学の初期の発展過程を振り返るレビュー論文の中で、しばしば Willard Gardner によって初めて導入されたと言われていた (Philip, 1974; Gardner, 1977; Raats and van Genuchten, 2006)。土壌物理学者の書いた論文の中でテンシオメータの構造を端的に記述したものが Gardner et al. (1922) であったからである。しかし、Or (2001) はテンシオメータの原型が Livingstone (1908, 1918) により提案されたプランター用の自動灌水装置 (Fig. 1) であることを発見した。この自動灌水装置は、植物が吸水した分が土壌内に設置した素焼カップから供給される仕組みになっており、当初、貯水槽の位置によって平衡時のマトリックポテンシャルを調節するものであった (Livingstone, 1908)。しかし、設定できるマトリックポテンシャル幅が小さかったため、素焼カップと貯水槽の間に水銀マンオメータを入れることにより改良している (Livingstone,

1918)。Or (2001) は Fig. 1 に示した自動灌水装置にはテンシオメータの全ての部分が含まれていることを指摘しているが、水銀マンオメータの初期の目的はマトリックポテンシャルの測定ではなかったようだ (Livingstone, 1918)。また、この頃 Livingstone と彼の共同研究者たちは、土壌から植物根への水供給能の指標として浸透メータ (Fig. 2) を使用しており (Pulling and Livingstone, 1915)、この装置もテンシオメータと構造が類似している。このように 1908 ~ 1918 年には土壌物理学に関連する他の研究分野では、テンシオメータに類似した構造の測定装置が開発されていたようであるが、当時、不飽和流れに関する運動理論が盛んに研究されていた土壌物理学では、あまり知られていなかったようだ。Richards (1928) は論文の脚注で、次のようなことを述べている。「1906 年は、Buckingham の毛管張力に基づ

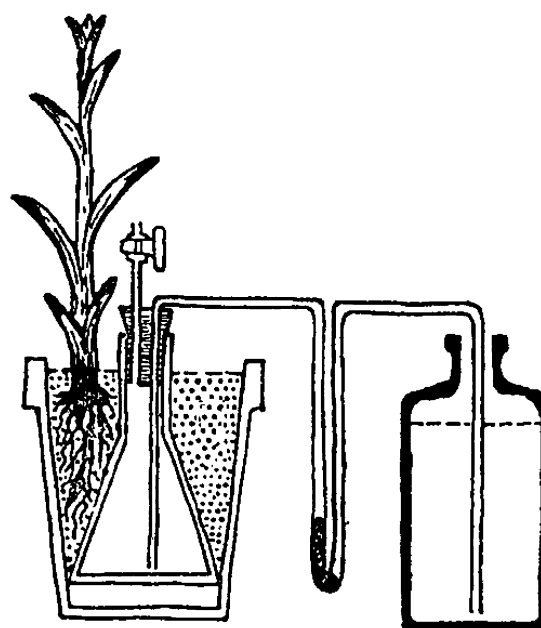


Fig. 1 Livingstone によって開発されたプランター用の自動灌水装置 (Livingstone, 1918)

¹Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, Kannondai 2-1-6, Tsukuba, 305-8609, Japan. Corresponding author: 宮本輝仁, 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所
2012年1月4日受稿, 2012年2月16日受理
土壌の物理性 120号, 61-65 (2012)

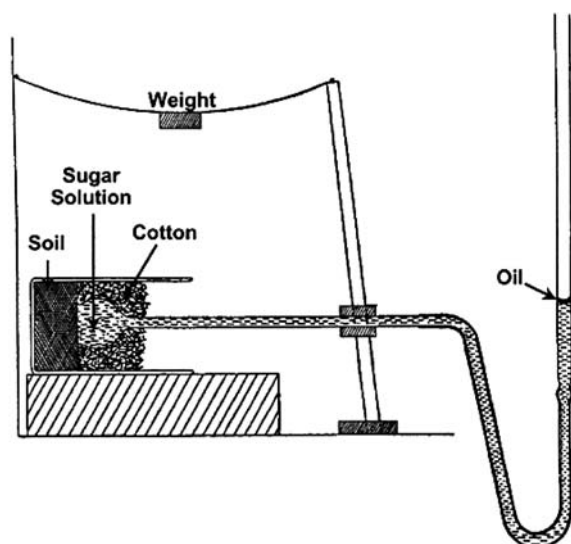


Fig. 2 土壌の植物根への水供給能を測定するために用いられた浸透メーター (Pulling and Livingstone, 1915)

く不飽和流れに関する運動理論についての論文が発表された年であるとともに、偶然にも毛管張力を定量的にコントロールする自動灌水装置がLivingstonによって発明された年である。しかし、自動灌水装置とBuckingham理論の発表のおよそ15年後、Gardnerと彼の共同研究者たちによって素焼き粘土製の装置が毛管張力を測定できることを指摘されるまで、これらの発明の間に関連性はなかったようだ。そのため、不飽和流れに関する運動理論を展開する土壌物理学の中で有用な測定装置としてテンシオメータを位置付けたのはGardner et al. (1922)であったと考えられる。そこで、今回の「古典をよむ」では、Gardner et al. (1922)の論文(実は要旨)を取り上げて読んでみたいと思う。なお、土壌物理学の基礎が確立されていく時代であるので、この論文タイトル中の「毛管ポテンシャル」などの基礎用語が引用論文において統一されていないが、ここでは原則として原著の用語を示すことにする。

2. Willard Gardner について (Taylor, 1965 参照)

土壌物理学では3人のGardnerが有名である。一人は今回取り上げるWillard Gardnerであり、他はWalter H. GardnerとWilford R. Gardnerである。ワシントン州立大学名誉教授であったWalter H. GardnerはWillard Gardnerの息子である。また、1972年にBaverのSoil PhysicsをWalter H. Gardnerと第4版として改訂し、カリフォルニア大学バークレー校でthe College of Natural Resourcesの学長も勤めたWilford R. GardnerはWillard Gardnerの甥にあたる。実はGardner家は物理学や土壌物理学での多くの著名人を輩出している家系だったので(Kirrkam, 2004; Utah State University Libraries, 2006)。

“近代土壌物理学の父”と称されるWillard Gardnerは、若い頃、速記者と銀行家として働き始める。しかし、

物理学に魅せられ、銀行業を辞めてしまう。そして、ユタ農業試験場の場長の秘書として働く傍ら、ユタ州立大学の授業を受講して物理学を勉強した。1912年に学士の称号を受け、同年、カリフォルニア大学バークレー校の助手となって働きながら1916年には物理学で博士号を取得している。Murdock Academy in Beaverの校長として、また、Brigham Young College at Loganでインストラクターとして1年過ごした後、1918年、ユタ州立大学の物理学部に採用されている。

ユタ州立大学で彼は土壌水分現象に関する理論と実験について研究を始める。当時、特に不飽和土壌の流体力学と呼ばれていた研究領域に大変興味を持っていた。彼は物理学の素養があり、数学を道具として使い、ポテンシャルや伝導度関数の概念を土壌の研究に導入していった。1919年に「The movement of moisture in soil by capillarity (毛管力による土壌中の水移動) (Gardner, 1919a)」, 「Capillary moisture-holding capacity (毛管水分保持量) (Gardner, 1919b)」と題する2つの論文を発表し、1920年には「A capillary transmission constant and methods of determining it experimentally (毛管伝導度係数とそれを求めるための実験法) (Gardner, 1920a)」, 「The capillary potential and its relation to soil-moisture constants (毛管ポテンシャルとその土壌水分係数との関係) (Gardner, 1920b)」と題する論文を発表している。更に、翌年1921年「The movement of soil moisture (土壌水分の移動) (Gardner and Widtsoe, 1921)」と題する論文を発表している。

また、この間、彼は土壌水分量とマトリックポテンシャルの関係を導くことに興味を持ち、マトリックポテンシャルを測るための毛管ポテンシオメータ(後のテンシオメータ)の開発にも着手した。当時のマトリックポテンシャルの測定法は、自由水面に土壌カラムの下端を接触させ、平衡時の水面からの高さにより求める方法(Buckingham, 1907)が主であった。しかし、不飽和土壌中での水移動の研究をしていたGardnerにとって、水移動の駆動力となっているポテンシャル勾配を測定し、ポテンシャルや伝導度関数の概念を使った解析を行ったことは容易に想像される。どうしたら土壌中の任意の地点におけるマトリックポテンシャルを測定できるのか色々悩んだことだろう。飽和浸透流におけるDarcy則は既に知られていたもので、圧力水頭の測定方法であるピエゾメータ法は知っていたものと思われる。飽和土壌ではピエゾメータが圧力水頭の測定に有効であるが、不飽和土壌では圧力水頭が負になるため測定が難しい。そのような折、Livingstoneと彼の共同研究者たちの研究成果がSoil Science誌に掲載される(Pulling, 1917; Livingstone and Kotetsu, 1920)。これを機会に、Plant World誌や機関紙Carnegie Institution of Washingtonに掲載されていた彼らの自動灌水装置や関連成果は、Gardnerにも知られたのではないと思われる。

しかし、実際にテンシオメータを試作してみると多くの課題を解決する必要があった。例えば、平衡に達する

までに極めて長い時間がかかること、多孔質体と土壤の触れる面で土壤が湿り凝集力により収縮を起こすこと、空気が多孔質体を通して入ってしまい圧力が下がってしまうこと、温度を一定に保つ必要があること、土壤に吸収された光により土壤温度が上がり乾燥してしまうことなどである。これらの課題を少しずつ解決しながら、テンシオメータを土壤物理学の中での有用な測定装置にしていっていったものと思われる。こうして開発されたテンシオメータを使った実験とこれまでに研究してきた土壤水移動についての理論を組み合わせるGardner et al. (1922)の論文が執筆された。

3. 「毛管ポテンシャル関数と灌漑操作への応用」の本文

Gardner et al. (1922) の論文を実際に読んでみよう。論文といっても要旨である。全文を訳出した。

まず、「本論文は灌漑操作に関する物理的課題解決のための定量法を示すことを目的としている。」と本論文の目的を述べている。

次に、土壤水分量と毛管ポテンシャルの関係について述べている。「広範にわたり土壤水分量とともに毛管ポテンシャルが連続的に増加することが示されている。実験圃場の土壤では以下の式が実験データを近似できることが分かった。

$$(\psi + 145)(\rho - 0.173) = -42.6 \quad (1)$$

ここで、 ψ は飽和時を0とした毛管ポテンシャル(g·cm)、 ρ は土壤水分量(g/cc)である。この式と既に公表されている実験データと理論式より、おおよそ1日あたり0.25cmの水が深層に流失していることが分かる。」

ここで示されている、 a, b, c が定数の関数($\psi + a$)($\rho - b$) = c は、Gardnerが求めた実験式である。当時、土壤水分量と毛管ポテンシャルの関係を記述する関係式はまだ確立されていなかった。そのため、実験結果の統計処理を行い、色々な土性の土壤で土壤水分量と毛管ポテンシャルの関係を記述するのに上式を用いた(Israelsen, 1927)。また、後半部分で述べられている「おおよそ1日あたり0.25cmの水が深層に流失」はどのように得られたのか定かでないが、次のように推定したのかもしれない。ある深さを仮定し、その深さの毛管ポテンシャルから(1)式によって土壤水分量を推定する。既に土壤水分量と毛管伝導度係数の関係は求められており、重力流れを仮定して浸透量を求める。現在では、不飽和透水係数と動水勾配を用いる「フラックス法」が深部浸透量を見積もる一方法として確立されているが(長谷川, 2002)、当時、不飽和土層内の水分移動を定量的に評価すること自体、画期的なことだったに違いない。

そして、最後に上記の結果を得るために使用したテンシオメータについて述べている。「使用した装置は水を漏らさない継ぎ手で閉じられ、背の高いチューブで排気

ポンプにつながれた素焼カップである。素焼カップは容器に入れた土壤の薄い層によって囲まれており、土壤側は大気圧に保たれている。(素焼カップ内の)水圧が下がり、その圧力が測定される。そしてガラス管を使用して素焼カップ内から土壤への排水量が測定される」。ここに出てくる排気ポンプは、通常私たちが使っているテンシオメータでは使用しない。想像するに、水マノメータに取り付けて減圧し、測定できるマトリックポテンシャルの範囲を広げるために用いたのかもしれない。このテンシオメータの構造を記述した部分はわずか数行の記述のため、詳細については不明な部分もある。

Gardner が指導したIsraelsen (1927) の学位論文には、当時、Gardner の研究室で使用していたテンシオメータの概要図が載っている(Fig. 3)。多孔質磁器カップ(P)にロート(F)を逆さまにして接着し、土壤の入った容器内に埋設する。逆さまにしたロートは接続管(B)を介してU字ガラス管(U)と接続されている。この図では排気ポンプは見当たらず、水銀マノメータが挿入されている。この点はGardner, et al. (1922) の論文発表後になされたテンシオメータの改良なのかもしれない。

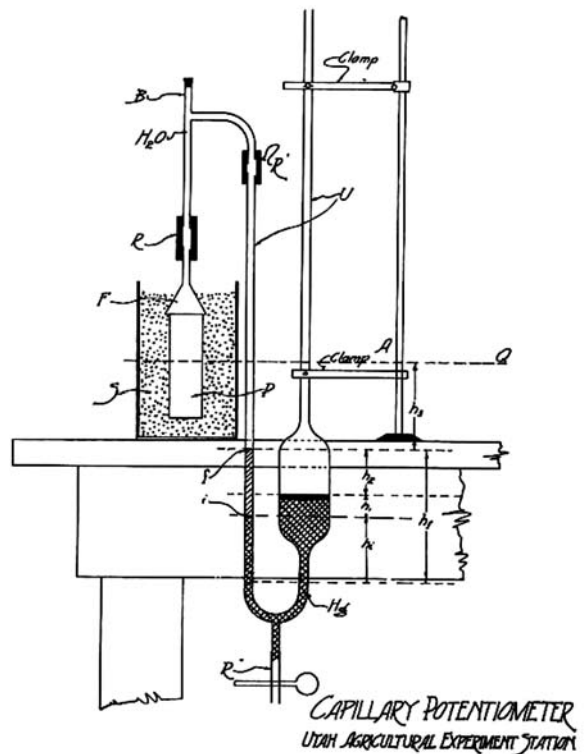


Fig. 3 Gardnerによって設計されたテンシオメータ (Israelsen, 1927)

4. 野外観測へのテンシオメータの改良

土壤のマトリックポテンシャルを測定するこの装置は、当時「毛管ポテンシオメータ (Gardner et al, 1922)」や「土壤湿度計 (Hack, 1934)」など様々な名前で呼ばれていた。Richards and Gardner (1936) は簡潔

さと明瞭さからこの測定装置を「テンシオメータ」と名付けた。以後、このテンシオメータが使われるようになる。ここで、筆頭著者である Richards は、以前「古典を読む」で取り上げた不飽和水分移動式を確立した Richards である (登尾, 2008)。コーネル大学大学院で Ph. D. 取得後アイオワ州立大学の土壌学の助教授となった Richards は、ユタ州立大学に学部と修士課程で在学中、土壌物理学の手ほどきを受けた Willard Gardner 教授とともにテンシオメータの改良にも取り組んでいたのだ。

この後も Richards はテンシオメータの数々の改良に携わった。1930年代に入ると、圃場でのマトリックポテンシャル測定が行われるようになり、圃場に設置しやすいように改良したもの、長期観測が行なえるように自記記録装置をつけたもの、2深度のマトリックポテンシャルの差を測定するものなどテンシオメータの改良が進んだ (Richards and Gardner, 1936; Richards and Neal, 1936; Richards et al., 1937)。また、圃場におけるマトリックポテンシャルの経時的な変化が把握できるようになると、室内実験で検討されてきた土壌水分現象に関する理論を圃場で起こっている現象に適用し、検討することが可能となる。こうして、フィールド科学としての土壌物理学が徐々に発展してきたものと考えられる。

5. おわりに

Or (2001) の論文に刺激されてテンシオメータの開発史を少し紐解いてみた。当初思っていた以上に Livingstone と彼の共同研究者たちにより土壌から植物への水の供給について詳細な研究がなされていたことに驚くとともに、不飽和流れに関する運動理論を展開する土壌物理学の中で有用な測定装置としてテンシオメータを位置付けたのは Gardner et al. (1922) であったことも再確認できた。そして、今回の「古典を読む」を執筆しながら、改めて似たもの (ここでは土壌中の水分) を対象にした違う分野の研究にも興味を持つことの重要性を感じたしである。しかしそのためには、Willard Gardner のように自身の専門分野について詳細に理解し、研究課題を常に見つけておく姿勢が必要なかもしれない。

また、Willard Gardner の思想は弟子の Richards, 息子である Walter H. Gardner, 甥の Wilford R. Gardner らに受け継がれた。Richards と Wilford R. Gardner は、1950～60年代に U. S. Salinity Laboratory で共に研究に取り組んだ。また、大学院で物理学を専攻していた William A. Jury は、土壌中の水蒸気移動の研究で Wilford R. Gardner と出会い、それをきっかけに土壌物理学の道へ進んだようだ。このように見ていくと、アメリカにおける土壌物理学の発展の中での Gardner 家の貢献は多大なるものがあつたことがわかる。興味を持たれた読者は、土壌物理学を発展させてきた重要人物たちの繋がりを調べてみるのも面白いかもしれない。研究の発展には、人と人の繋がりが重要な要素となっていると考えられるからである。

謝辞

本稿の執筆にあたり、三重大大学の取出伸夫博士から Gardner 家と土壌物理学の発展の経緯に係る情報をいただきました。ここに記し、謝意を表します。

引用文献

- Buckingham, E. (1907): Studies on the movement of soil moisture. U. S. Dept. Agr. Bur. Soils Bul. 38: 1-61.
- Gardner, W. H. (1977): Historical highlights in American soil physics, 1776-1976. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 221-229.
- Gardner, W. (1919a): The movement of moisture in soil by capillarity. Soil Sci. 7: 313-317.
- Gardner, W. (1919b): Capillary moisture-holding capacity. Soil Sci. 7: 319-324.
- Gardner, W. (1920a): A capillary transmission constant and methods of determining it experimentally. Soil Sci. 10: 103-126.
- Gardner, W. (1920b): The capillary potential and its relation to soil-moisture contents. Soil Sci. 10: 357-359.
- Gardner, W., and J. A. Widtsoe. (1921): The movement of soil moisture. Soil Sci. 11: 215-232.
- Gardner, W., O. W. Israelsen, N.E. Edlefsen, and H. Clyde. (1922): The capillary potential function and its relation to irrigation practice. (Abstract) Phys. Rev. 20: 196.
- 長谷川周一 (2002): 土壌浸透水のモニタリングと予測, 日本土壌肥料学会監修: 環境負荷を予測する—モニタリングからモデリングへ—. 13-22, 博友社, 東京.
- Heck, A. F. (1934): A soil hygrometer for irrigated cane lands of Hawaii. Agron. J. 26: 274-278.
- Israelsen, O. W. (1927): The application of hydrodynamics to irrigation and drainage problems. Hilgardia 2: 479-528.
- Kirchham, M. B. (2004): Gardner's equation for water movement to plant roots. In Principles of soil and plant water relations, 229-240, Elsevier Academic Press, USA.
- Livingstone, B. E. (1908): A method for controlling plant moisture. Plant World 11: 39-40.
- Livingstone, B. E. (1918): Porous clay cones for the auto-irrigation of potted plants. Plant World 21: 202-208.
- Livingstone, B. E., and N. Kotetsu. (1920): The water-supplying power of the soil as related to the wilting of plants. Soil Sci. 9: 469-485.
- 登尾浩助 (2008): L. A. Richards 著「多孔質体を通る液体の毛管伝導」. 土壌の物理性. 109: 75-79.
- Or, D. (2001): Who invented the tensiometer? Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 1-3.
- Philip, J. R. (1974): Fifty years progress in soil physics. Geoderma 12: 265-280.
- Pulling, H. E. (1917): The rate of water movement in aerated soils. Soil Sci. 4: 239-268.
- Pulling, H. E., and B. E. Livingstone. (1915): The water-supplying power of the soil as indicated by osmometers.

- Carnegie Institution of Washington. 204 : 49-84.
- Raats, P. A. C., and M. T. van Genuchten. (2006) : Milstones in soil physics. *Soil Sci.* 171 (6) : S21-S28.
- Richards, L. A. (1928) : The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. *J. Agr. Res.* 37 : 719-742.
- Richards, L. A., and W. Gardner. (1936) : Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. *J. Am. Soc. Agron.* 28 : 352-358.
- Richards, L. A., and O. R. Neal. (1936) : Some field observations with tensiometers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 1 : 71-91.
- Richards, L. A., M. B. Russell, and O. R. Neal. (1937) : Further developments on apparatus for field moisture studies. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 2 : 55-64.
- Taylor, S. A. (1965) : Willard Gardner 1883-1964. *Soil Sci.* 100 : 79-82.
- Utah State University Libraries (2006) : USUSC Mss 269 : Wilford R. Gardner Papers. (URL : <http://library.usu.edu/specol/manuscript/collms269.html>. 2012年1月閲覧)

要 旨

Or (2001) が指摘したように、テンシオメータの原型は Livingstone の開発した自動灌水装置であったが、Buckingham の毛管張力に基づく不飽和流れに関する運動理論をもとに「毛管力による土壌中の水移動」や「毛管ポテンシャルとその土壌水分係数との関係」などの研究に取り組んできた Willard Gardner によって土壌物理学の中で不飽和流れに関する運動理論を研究する際の有用な測定装置としてテンシオメータを位置付けられたことを Gardner et al. (1922) をもとに紹介した。その後、圃場におけるマトリックポテンシャルの測定装置としてテンシオメータの改良が進み、フィールド科学としての土壌物理学が発展していく礎となった。

キーワード：テンシオメータ，毛管ポテンシャル，土壌水分