J. Jpn. Soc. Soil Phys., December 2012, Vol. **122**, 59−69

古典を読む

Edgar Buckingham 著「土壌水分移動の研究」

宮崎　毅[1]

「Studies on the Movement of Soil Moisture」
published from U. S. Department of Agriculture, Bureau of Soils–Bulletin No.38, in 1907.

Tsuyoshi MIYAZAKI[1]

1. はじめに

土壌物理学者の間では，Buckingham の名前は広く知れ渡っている．それにも関わらず，彼が何を成し遂げたのかを正確に伝えている論文や著書は意外と少ない．ましてや，大学の教室で正確に語られているか，著者自らの経験を踏まえると，誠に心許ない．一方で，あの難解な「Buckingham のパイ定理」を世に送り出したのも同じ人物であることを，土壌物理学者としては誇らしく思っていることも事実である．そこで，いったい Buckingham とは何者なのか，どういう研究を成し遂げた人なのか知りたいという衝動に駆られた．筆者がそのような思いを起こしたのとほぼ同時期に，Soil Sci. Soc. Am. J.（2005）に「Edgar Buckingham の土壌物理学への貢献」という論文が掲載された．著者は，バージニア州レストンに本部を置き，9000 人以上の職員を擁するアメリカ地質調査所（USGS）の研究員 John R. Nimmo と Edward R. Landa である．彼らの Buckingham 研究は徹底しており，とてもかなうものではないので，本稿では彼らの論文を通じて知り得た事実を適宜使わせていただく．さらに，本稿執筆過程で，カリフォルニア大学バークレー校の T. N. Narasimhan 教授による，Buckingham に関する 2 本の論文（Vadose Zone J., 2005, 2007）の存在を知り，意を強くした．ただし，Buckingham の原著論文に関するコメントや感想などは，できるだけオリジナルな記述を行ったつもりである．

2. Buckingham 個人史

Nimmo and Landa（2005）は，Buckingham の生涯を，写真や年表を利用して詳しく紹介している．ここでは，その要約を記しておきたい．Buckingham は，1867 年 7 月 8 日ペンシルバニア州フィラデルフィアで生まれた．1887 年（20 歳）にハーバード大学物理学科を卒業し，フランスのストラースブール大学やドイツのライプチッヒ大学の大学院に在籍し，1893 年（26 歳）にライプチッヒ大学で Ph.D を取得した．ライプチッヒ大学での指導教員は，希釈率の発見で有名となり 1909 年にノーベル化学賞を受賞した Wilhelm Ostwald であった．余談であるが，ライプチッヒ大学は，森鴎外が留学（1884 年頃）した大学として日本人にも知られている．さて，Ph.D 取得後アメリカに戻った Buckingham は，大学で物理化学や物理学を教えたり，熱力学の教科書を出版したりした．その後，大学を離れて会社に就職して鉱山関係の仕事に従事，Elizabeth Holstein との結婚を経てウィスコンシン大学で 1 年間研究した．ここまでに，土壌物理学に貢献した様子は見られない．

Buckingham が土壌物理学に参入したのは，1902 年から 1906 年までの 4 年間，アメリカ土壌局（Bureau of Soils, BOS）に所属した期間であった．年齢は 35 歳から 39 歳までという研究者としてピークの時代だったかもしれない．BOS で与えられた研究課題は土壌中のガスと水の動きに関する問題であり，この間に USDA 土壌局紀要として 2 本の論文を書いた．その 2 本目が，有名な「土壌水分移動の研究」（1907 年出版）である．ちなみに，1 本目の論文タイトルは「土壌通気に関する知識への貢献」（1904）である．この 1 本目の論文では，土壌呼吸，土壌ガスの移流と拡散，気圧変化によるガス移動・ガス交換などについて議論を展開し，実に生き生きとした誇らしげな記述であったという．この中で，土壌のガス拡散係数は土壌構造，土壌圧縮，含水比などに依存せず，土壌の気相率のみによって決まることを，実験データによって示していたというから，今日的に見ても優れた論文であったに相違ない．また，「土壌中のガス移動は，気圧変化と拡散によって生ずるが，拡散移動が支配的である」という，今日の土壌物理学テキストによく記載されている知識は，すでにこの Buckingham の論

[1]Professor Emeritus at the University of Tokyo, President of the Japanese Institute of Irrigation & Drainage, 1−21−17 Toranomon NN building, Toranomon, Minato-ku, Tokyo, 105−0001, Japan. Corresponding author：宮崎　毅，東京大学名誉教授，一般財団法人日本水土総合研究所理事長
2012 年 9 月 28 日受稿，2012 年 10 月 31 日受理
土壌の物理性 122 号，59−69（2012）

文に記述されているものとほとんど同じであるという．

1906年にBOSを去ったBuckinghamは，その後1937年に定年退職するまでの31年間，アメリカ国立標準局（National Bureau of Standards，NBS）の研究員として在職し，その間に次元解析の相似則を求めるための手法である「パイ定理」を発表した（Buckingham，1914）．なお，NBSはその後改組して，現在はアメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology，NIST）となっている．ちなみに，かつての日本の工業技術院（MEL）とこれを改組した現在の産総研（独立行政法人産業技術総合研究所，AIST）が，これらと類似した組織である．1937年にNBSを定年退職したBuckingham（70歳）は，その後も研究活動を続けたが，1940年ワシントンDCにて逝去した．享年73歳であった．

3. BOSの不愉快な4年間

NimmoとLanda（2005）によると，1902年から1906年まで4年間のBOS時代，Buckinghamは上司にあたる研究者の無理解や的外れの批判にかなり苦しめられ，あまり楽しい研究生活を送ることができなかったようである．彼を苦しめた1番目は，Kingという年長研究者の公然とした批判活動，2番目はCameronという上司の理解力不足に対する煩雑な対処，そして3番目はBOS局長であるWhitneyという人物の高圧的な横暴である．

Kingは，上記土壌局紀要1本目の論文（1904）に対し，わざわざScience誌にComment論文（1905）を投稿してBuckingham批判を展開した．曰く「少数の実験データのみに基く数式いじりである」「フィールドでは一度たりとも検証されていない」などであった．Kingは，穀物収量は土壌肥料に支配されると考える立場の研究者であったので，土壌の物理性を重視する研究に対して非常に批判的だった．このKingはWhitney局長と対立して追い出された人物である．ところで，Buckinghamに向けたこのKingの批判，筆者自身も似たような批判を浴びたことがある．土壌物理論文は，しばしばこの種の批判（特に査読において）にさらされる．

Cameronという上司は，「土壌水分移動の研究」という論文について，基礎的な理解ができず，稚拙な質問状をBuckinghamに送り付けた．たとえば，密閉した容器内に自由水を張り，2本の高さの異なる土柱をその中に立てた場合，平衡状態では高さの異なる土柱表面の水のポテンシャルが異なることについてどうしても納得できないというのである．密閉容器中の平衡蒸気圧は一定なはずだから，水蒸気がポテンシャルの低い（つまり背の高い）土柱表面に凝縮して水分増加を起こし，これが循環することになるので，永久機関ではないか，と騒いだのである．しかし，平衡状態では，系内の水の全ポテンシャルが等しいのであって，位置のポテンシャルが異なる分だけ土柱水のマトリックポテンシャルに差が表れることは当然だし，自由水面に接する水蒸気の全ポテンシャルも各高さの土柱表面の水と平衡しなければならない．Buckinghamは質問形式でのCameronの手紙を相手にしなかったが，こうしたやり取りが，論文の公表を著しく遅らせることになり，Buckinghamは辟易としていたようである．

Whitneyという局長は，高圧的で多くの人と摩擦を起こし，しかも常に勝ち抜いて土壌部門長の座を温め続けた人物と評されている．この人は，土壌物理学に味方する人であり，Buckinghamの研究に対しては好感を持っていたが，一方で当時在籍していた土壌物理学者Lyman Briggsを激しく非難し，ついにBOSから追い出してしまった．Buckinghamに対しては，論文「土壌水分移動の研究」の原稿を提出したとたん，この結論部分は書かないほうが良い，と削除を求めた．Buckinghamは面倒臭くなって，これに従い，この論文が出版される前年の2006年，さっさとBOSから出ていってしまった．なお，後日，この削除された手書き論文が発見され，Nimmo and Landaは，それを活字にして全文紹介した．本文でも，最後にこの結論部分の訳文（意訳）を記載する．

こうして，遅れ遅れになった論文「土壌水分移動の研究」は，1907年，ようやく出版されたが，このとき，

Table 1　用語の対照表（Nimmo and Landa（2005）のTable1.を和訳したもの）

Buckinghamの使用用語	対応する現代用語
capillary potential ψ	マトリックポテンシャル　ψ
capillary conductivity λ	不飽和透水係数　K
transpiration	全圧勾配によるガスの粘性移流
transpiration constant	移流係数
current	フラックス
rinsing	通気（エアレーション）
carbonic acid	二酸化炭素
porosity	気相率

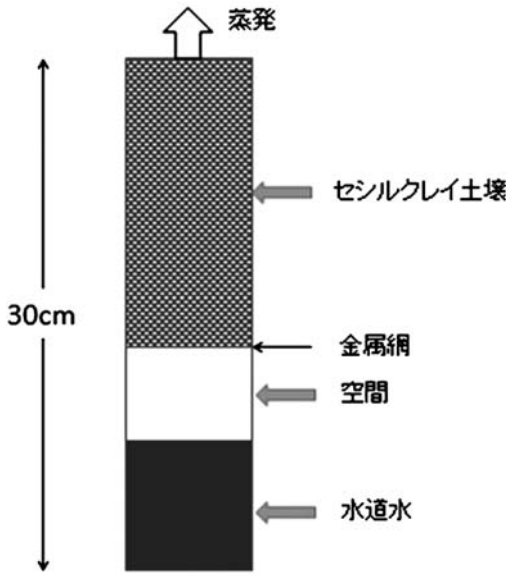


Fig. 1　Buckingham の蒸発実験推定図

すでに Buckingham は BOS を去っており，二度と土壌物理学に戻ってはくれなかった．査読が重要な論文の出版を遅らせる原因となる経緯は，今に始まったことではないのである．

4. 論文「土壌水分移動の研究」

USDA 土壌局紀要第 38 巻（1907 年）にやっと掲載されたこの論文の表紙には Whitney 局長の名前があり，巻頭言は Cameron が土壌中の不飽和水分移動研究の重要性を記述している．当時の BOS の人間関係をみると，Buckingham の論文にさんざん難癖をつけた上司が，ひとたび印刷出版が決まるや論文の冒頭に自分の名前を記載させる，といった構図だったのだろうか．この論文の発行前に BOS を去ってしまった Buckingham の気持ちもわからぬではない．

それはさておき，論文の構成を見てみよう．A，B，C 3 部構成となっており，A は「土壌表面下からの直接蒸発による水分消費」，B は「乾燥条件および湿潤条件における土壌乾燥」，そして C は「土壌の毛管現象」である．原稿では D「結論」が付いていたが，Whitney

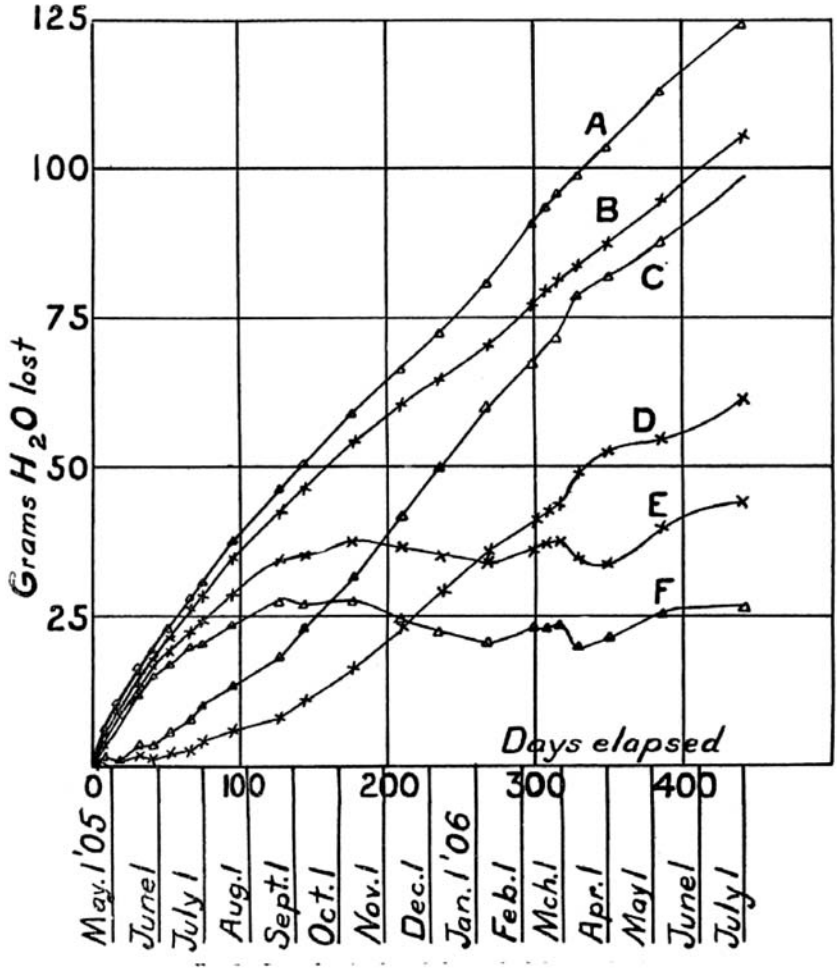


Fig. 2　441 日間の容器底部の水道水減少量（A, B），カラム全体の減少量 (C, D)，両者の差し引き増加量（E, F）．E, F は土壌中の水分増加量を表している (Buckingham 1907, Figure 2).
Loss of water from below 12-inch layers of soil.

により削除を命じられたことは，前述した．ここで，本文に入る前に，Buckingham が用いた用語と現在我々が用いている用語の対照表（Table 1）を，Nimmo and Landa（2005）に習って表示しておく．原著論文を読み解く際，現代用語との違いに注意する必要がある．

以下に，各章の内容を紹介する．

A. 土壌表面下からの直接蒸発による水分消費

Buckingham は，この記述に 10 ページを与えている．ここで面白いのは,「土壌表面からの蒸発」と記述せず,「土壌表面下から（from points below the surface）の蒸発」と書いているところである．つまり, 土壌からの蒸発は, 必ずしも土壌表面で生ずるのではなく，わずかに土壌表面から若干下がった位置で発生し，土壌の乾燥層を水蒸気体で通過して大気に散逸する，という過程を前提にして議論しているのであり，現在の我々の知識の基礎が, すでに 100 年前に記載されていることがわかる．

もう一つ気づくのは, Buckingham の実験設定である．彼は，不飽和水分移動の中でも水蒸気移動にかなり気を使っていたらしい．用意した長さ 30 cm カラムの下端には水道水をため，自由水面を与える（恐らく，Fig. 1 のような実験設定だったと推定される）．そこからいくらかの距離を置いた上部に金網を張りその上に土壌を充てん（土壌は落下しないように支える），その土壌の上側表面からは大気への蒸発を起こさせる．下端に貯めた水の質量と，カラム全体の質量（水貯めと土壌の全体質量）を連続測定して記録する．この実験では，（水）質量の減少が（水＋土）質量の減少を上回った．したがって, 両者の差から土壌部で増加した水分量が算出される．Fig. 2 は，こうして得られたグラフである．A，B は水貯めの減少量，C，D はカラム全体の減少量，E，F は両者の差分である．この実験では，初期条件を風乾土（平均含水比 1.9 %）としたので，飽和水蒸気に接していた土壌下端から徐々に含水比が増え，したがって E，F は正の値となったことが考察されている．また，A，B 間，C，D 間，E，F 間の差は，土壌の緩詰めと密詰めの差によって生じたものであり，緩詰めだと蒸発速度が遅いことを示そうとしたようである．

Buckingham は, この他に類似した実験を 3 種類行い, 合計 4 種類の蒸発実験からこの章の最終結論を得た．それは，蒸発速度というものは土壌の種類，土壌の乾燥密度，初期含水比，カラム内の土柱長さ，などによって支配されること，そして，土壌表面の乾燥層がマルチ効果を持っていること，などであった．

B. 乾燥条件および湿潤条件における土壌乾燥

約 6 ページにわたるこの実験の記述は，次章以降への理論的飛躍のための伏線となっている．まず，長さ約 122 cm，直径 6.35 cm のカラムを準備し，下層 107 cm は密詰め，上層 15 cm は緩詰めの土壌充填を行った．初期含水比 18.6 % のタコマローム土壌と初期含水比 12 % のポダンク砂質ローム土を用い，蒸発条件を変え，さらに土壌水を水道水とした場合と塩水（10 規定 NaCl）を用いた場合に分け，30 日間の積算蒸発量を図示した．ここで，蒸発条件とは，土壌カラムに熱風を吹き付け，さらに加熱用コイルで熱を与えた場合を「乾燥条件」, 室温のままで自然の蒸発を起こさせる場合を「湿潤条件」と呼んだ．また，缶を用意して水を張り，土壌カラムのそばで，比較対照のために自由水面からの積算蒸発量も測定した．この缶にはチーズ用のクロス（布）を 3 重にかぶせ，水面に対流が当たらないような工夫を施している．

測定結果の一例を Fig. 3 に示す. その特徴は, まず,「湿潤条件」下の積算蒸発量 A の方が「乾燥条件」下の積算蒸発量 B より大きいことである．これは,「乾燥条件」下では土壌表面に乾燥層が形成されて蒸発進行を妨げるためであると考察している．もう一点は，缶内の水の積

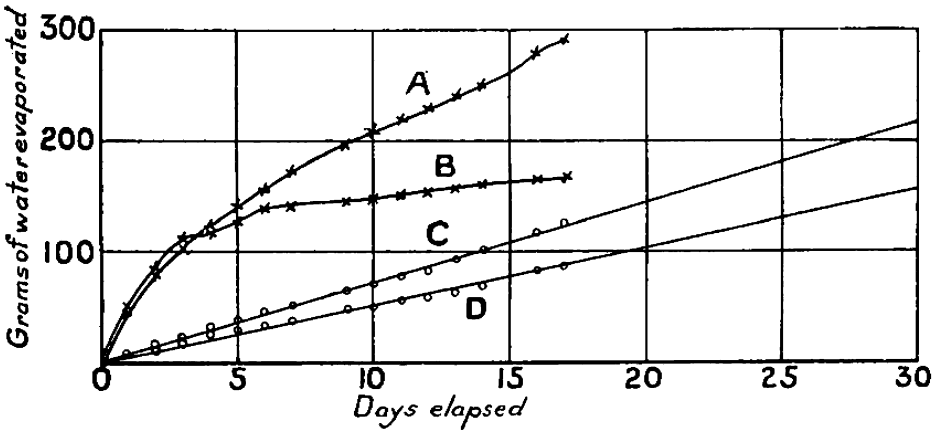


Fig. 3 A は湿潤空気中への積算蒸発量，B は乾燥空気中への積算蒸発量で，どちらも長さ 122cm カラムを用いた蒸発実験による．C（乾燥空気中）と D（湿潤空気中）は，土壌カラム近傍に置いた缶の中の水からの積算蒸発量である．なお，通常の室温空気で行われた蒸発実験を「湿潤空気中，土壌表面に高温空気を吹き付け，さらに熱線コイルで熱した場合を「乾燥空気中」と言い表している (Buckingham 1907, Figure 3).

Evaporation of water from Takoma loam soil fed with tap water: A, soil under humid conditions; B, soil under arid conditions; C, water under arid conditions; D, water under humid conditions.

算蒸発量より土壌カラムからの積算蒸発量の方が大きい事実であるが，これは，缶を3重のチーズクロスで覆ったことによる対流防御効果によるものであろう．

Buckingham は，これと類似した合計4つの図を示し，最後に，乾燥条件下の土壌は表面の乾燥層を形成しこれがマルチ効果を有して土壌からの水分蒸発を自動的に（automatically）防ぐのだ，という結論に至った．かなり地道というか初歩的な実験であるが，土壌物理学が成立していない100年前に，自ら実験計画を立て，測定したことが伺える．日曜日と休日のデータは欠測していることを正直に記述しているところが，人間らしくて良い．

C. 土壌の毛管現象

Buckingham の名を土壌物理学の歴史に刻みこんだ，38ページに及ぶ有名な記述はここに登場する．この章は4節25項目から構成されている．多少長くなるが，まず，その構成を列挙してみよう．

Ⅰ．序論；問題の性質
- §1. 毛管水
- §2. 水の毛管流
- §3. チューブ内の水の流れ
- §4. 熱移動；フーリエの法則
- §5. 定常電流；オームの法則
- §6. 土壌中の毛管流
- §7. 問題の定式化

Ⅱ．キャピラリーポテンシャル
- §8. キャピラリーポテンシャルの定義
- §9. ψの決定法
- §10. （ψ，θ）曲線形状
- §11. 異なる土壌タイプにおける曲線形状に関する留意点
- §12. 実験方法の改良

Ⅲ．毛管伝導度，λ
- §13. 一般的考察；毛管水と薄膜水
- §14. 含水比による伝導度変化
- §15. λ =f（θ）に関する特別な仮説
- §16. プリズム状くさびに保持された毛管水
- §17. 膜状水移動に関する更なる考察
- §18. 土壌の毛管伝導度と電気伝導度

Ⅳ．水の毛管流動
- §19. 問題の特質
- §20. 実験方法
- §21. 実験結果の要約
- §22. 異なる土壌間の比較
- §23. 実験継続時間の違いの影響
- §24. $\overline{\theta}$によるM/Δの変化
- §25. §24の結果の可能な説明

以上の構成をみると，その項目名だけでも Buckingham の問題意識の高さ，あるいは普遍性を求めた視点が伺われる．A．土壌表面下からの直接蒸発による水分消費，B．乾燥条件および湿潤条件における土壌乾燥，という2種類の実験の現象論を終え，ここから一気に物理的な考察に向かい，C．土壌の毛管現象，という普遍的な原理へと展開したと思われる．そこで，C．土壌の毛管現象における4節において特に重要と思われる点を強調しよう．

Ⅰ．序論；問題の性質

ここで最も重要なことは，土壌水の移動法則と熱移動法則（フーリエの法則）・電気伝導法則（オームの法則）との共通点と本質的な違いを明確に記述していることである．Buckingham は，土壌水移動も，熱移動も，電気伝導も，駆動力となる勾配と比例係数の積がフラックスを決めることは共通であることを示した．フラックスは，単位時間に単位断面積を通過する物理量として定義される．フラックスの式は，フーリエの法則の場合

$$H = KG \qquad H_s = -K\frac{\partial T}{\partial S}$$

ただし，Hは熱フラックス，Kは熱伝導度，Gは温度勾配，HsはS座標方向熱フラックス，Tは温度である．オームの法則の場合

$$C = LE \qquad C_s = -L\frac{\partial V}{\partial S}$$

ただし，Cは電流，Lは電気伝導度，Eは電位勾配，CsはS座標方向電流，Vは電位である．そして，土壌水フラックスは，Buckingham により

$$Q = \lambda S \qquad S = \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

と表示された．ただし，Qは土壌水フラックス，λは毛管伝導度，Sはキャピラリーポテンシャルψの勾配，そして，ψは，土壌がそこにある水を引き付ける作用の指標（a quantity which measures the attraction of the soil at any given point for water）であることを明確に述べている．Table 1に示した通り，このキャピラリーポテンシャルが，今日のマトリックポテンシャルそのものである．すなわち，マトリックポテンシャル概念は，1907年，Buckingham によって確立されたのである．ただし，ψの定義は仮説段階だったので，座標xの進行方向に向かってポテンシャルψが増加する場を想定し，その勾配に正の記号を用いた．一般にポテンシャル勾配に比例するフラックスは，ポテンシャル勾配を打ち消す方向に向かうのであるから，ポテンシャル勾配は

$$S = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

と書くのが正しいだろう．その場合，上式は

$$Q = \lambda S \qquad Q_x = -\lambda\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

となり，今日の不飽和水分移動式そのものである．Buckingham の原著論文では，表記上はこのように整理されてはいなかったが，論旨から読み取った式はこのように表記して間違いないものであり，ここに Buckingham–Darcy 式が完成したと断言して良い．

この式が，フーリエの法則，オームの法則と決定的に異なるのは，以下の物理的根拠による．すなわち，第 1 に，熱伝導度 K も電気伝導度 L も熱流や電流と独立な定数であるのに対し，毛管電導度（不飽和透水係数）λ は土壌含水比の関数

$$\lambda = f(\theta)$$

であり，すなわち位置と時間の関数であること，第 2 に，温度 T や電位 V と異なり，マトリックポテンシャル ψ も土壌の種類や土壌水分の違いに依存する変数

$$\psi = \psi(\theta)$$

であって，その決定方法は未知な部分が含まれている，とするものであった．ここで，毛管伝導（不飽和水分移動）の問題は今ここに始まったばかりである，と宣言している．この記述は，100 年前の状況を想像すると，非常に的確な表現に思える．

Ⅱ．キャピラリーポテンシャル（Table 1 によりマトリックポテンシャルと同義語）

この節と，続くⅢ．毛管伝導度，の 2 節は，上記の $\psi(\theta)$，$\lambda(\theta)$ をどう定義し，どのように測定すべきか，についての Buckingham 自身の苦闘が記述されている．既存の研究や実験データでは満足できず，全て自分のデータを見ながらの考察だったと思われる．論文に費やした文字数は多いが，この 2 節は要点のみを記述すれば十分であろう．

まず，Buckingham は，現在我々が水分特性曲線として理解している曲線を得ることに専念した．そのために，6 種類の土壌を用意して上面と底面を閉鎖した長さ 121 cm のカラムに充填し，底面横のチューブから水を導入して自由地下水面を与え，53 日から 68 日間吸水を行わせ，水を吸わなくなったと判断された時点でカラムを解体し，含水比分布を測定した．その結果が Fig. 4 に示される．この含水比分布図について，Buckingham は，本当の平衡状態には達していないこと，計算に際して土粒子比重を全て 2.65 に仮定したこと，などの限界を有していて，近似的なデータであると断っている．この図の特徴は，縦軸の表記法にある．すなわち，自由地下水面上の高さ x は，キャピラリーポテンシャル ψ ではなく，ψ /A で表すことにした．ここに A は

$$A = \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

すなわち，キャピラリーポテンシャル勾配である．A の値は使用する単位系によって決まる定数と定義された．（ψ を水頭値 cmH_2O で表せば，A＝1 であると理解して良い．なぜなら，水頭値で表せば ψ＝x で定義されるからである．）

Fig. 4 は，我々が今日，吸水過程の水分特性曲線と呼んでいるものと非常に近いものである．ただし，カラム最上部の含水比が急激に減少しているのは，恐らく，カラム最上部の蒸発防止が不十分だったか，あるいは平衡時間が不十分なために吸水過程が完了していなかったことを表しているのであろう．

次に，土壌の含水比 θ の関数としての $\psi(\theta)$ であるが，

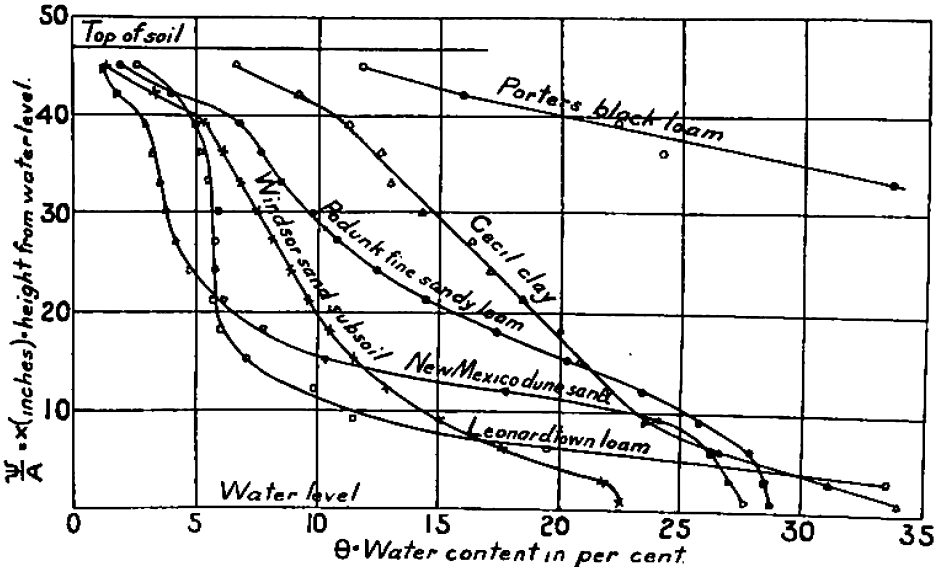


Fig. 4　121cm カラム中の 53 日～ 68 日後の土壌水分分布．縦軸の ψ /A は，今日のマトリックポテンシャルと等価である (Buckingham 1907, Figure 7).
Distribution of water in 48-inch columns of soil after 53 to 68 days.

理論的には「土壌と水の間の吸引力は保存力である」こと，また，厳密には「熱力学的ポテンシャル」または「自由エネルギー」で扱うことが正しいが，これを「力学的ポテンシャル」に単純化し，「土壌水から，ある量$\delta\theta$の水を取り去るのに必要な力学的仕事量は$\psi\delta\theta$」としてψを定義することを提唱した．Buckingham は，完全乾燥した土壌が水を吸うときには浸積熱の発生（sensible development of heat during the wetting）も考慮しなければならないので，$\psi(\theta)$の定義は，ある値以上の含水比を有する土壌を想定すると断っている．もともと熱力学を教えていた物理学者なので，概念の定義は非常に厳密に行おうとしている姿が論文に浮き出ており，$\psi(\theta)$を仕事の概念で定義できる水分量は限定的であることをも指摘していたことは，驚きである．そして，この問題の最後に，真の平衡状態を実現すれば，必ずキャピラリーポテンシャルψの値を求めることができるはずだ，と結んでいる．

もし，ここであえてこの論文の限界を指摘するとすれば，1つは水分特性曲線のヒステリシスを考慮しなかったことと，含水量を体積含水率で統一しなかったことであろう．本文中ではθの定義を「1g 乾土中の水分量」としているので，これは含水比（water content）に間違いない．体積含水率や乾燥密度といった概念の整理は，当時，まだできていなかったと思われる．これらを考慮した記述であれば，ポテンシャル理論はほとんど完成していたといえる．

Ⅲ．毛管伝導度，λ

Buckingham は，$\lambda(\theta)$の関数がどのような形状であるかを，2つの側面からのアプローチで予測した．どちらの予測も極めて的確であり，今日知られている不飽和透水係数モデルの原点が明確に示されている．

第1のアプローチは，土壌中の不飽和水分移動のミクロ形態を丹念に考察する手法である．すなわち，土壌水は土粒子表面の薄膜水と土粒子接点の毛管水が連続系で存在するものと考え，毛管水の凹曲面に発生する負圧と薄膜水・土粒子間の相互作用で発生する圧力が平衡するように水分移動が起こることを明確に記述した．そして，水分量が多い状態から少ない状態へと変化する過程では，隣り合う毛管水同士が連携しあう段階から，お互いが徐々に離散して薄膜水を介してのみ連携しあう段階へと移行するので，毛管水連携が途切れる瞬間から急激にλの値が減少すると予測した．Buckingham は，このように，飽和状態から絶乾状態までの土壌水形態を丹念に考察し，Fig. 5 のような概念図を提示した．

Fig. 5 で，縦軸横軸ともに通常の線形軸であり，含水比が下がるに連れて ABCDF という経路をたどるであろうと予測した．AB 間，DF 間は上に凸型，BCD 間は上に凹型である．AB 間は毛管水同士の直接連携が維持されており，B 点でこの連携が限界に達し，薄膜水を媒介とするようになる．CD 間は薄膜水が支配的に存在する区間であり，この間λはあまり変化しないが，さらに含水比が低下して薄膜が断絶するようになると，λは急激にゼロに向かう．そして，含水比がゼロ（絶乾）になる前にλ値はゼロになる（すなわち F 点）になるとした．これらの中で，実際に重要なのは BCD 間の凹型形状であると断言し，その必然性を表現するモデル化を行った．

Fig. 6 は，土壌中の毛管水と薄膜水を単純化し，三角形状くさびに保持された毛管水と薄膜水に代表させたモデル図である．このモデルから体積を求める場合は，くさびの奥行厚さを1として与えればよいことにしてある．

このモデル図は，印象深くて記憶に残りやすいものではあるが，何を表しているかをうまく後世に伝えていないように思われる．つまり，このモデルは個々の間隙内の毛管水の状態を表現しているようにも見え，そうだとするとメニスカス半径，表面張力，三角形くさびサイズの分布などの情報なしには数量化ができないような印象を与えるからである．ところが，本文をよく読むと，さまざまな間隙サイズ分布を持つ土壌の不飽和水分状態の全てをこの単純化した図に置き換えた Buckingham の

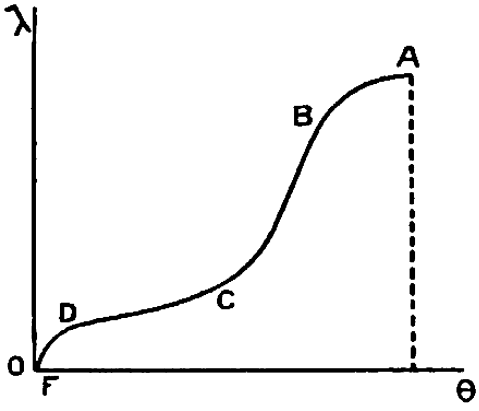


Fig. 5　Buckingham の$\lambda(\theta)$予測図（Buckingham 1907, Figure 14）.
Variation of conductivity(λ)with water content(θ)

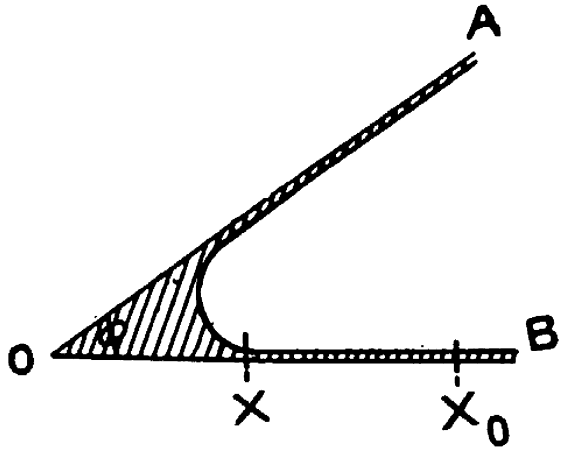


Fig. 6　三角形くさびに保持された毛管水モデル．
土粒子接点水と土粒子表面の薄膜水とをうまく表現した，非常に独創性のあるモデル（Buckingham 1907, Figure 15）.
Capillary water held in a prismatic wedge.

抽象力に驚かざるを得ない．まずは，Buckingham の思考を追いかけよう．

まず，Fig. 6 において大きく 2 つの仮定を設ける．

1. 毛管伝導度 λ は，Fig. 6 の薄膜水長さ $X_0 - X$ に反比例する（つまり，薄膜水が長いほど毛管伝導度は低下すると考える）．
2. 全体の含水量は毛管水体積のみによって決まり，薄膜水体積は無視でき，したがって水の全体積は Fig. 6 の X^2 に比例する．

この仮定は，大胆にして素晴らしいと思う．不飽和土壌水の存在状態を見事に抽象化している．もちろん，土壌の間隙サイズ分布という概念は使っていないので，ただ一つの三角形くさびで表現して良いのか，との疑義が呈されてもおかしくはないが，サイズを相対化（無次元化）することで話を進めることができる．

さて，仮定 1 から，直ちに

$$\lambda = \frac{\alpha}{x_0 - x}$$

と書ける．ただし，α は三角くさび形状で決まる比例定数である．また，仮定 2 から，このくさび型毛管水が飽和しているときの体積を

$$\theta_1 = \beta^2 x_0^2$$

水が Fig. 6 のように不飽和なときの体積を

$$\theta = \beta^2 x^2$$

と書く．β^2 は三角くさびの形状から決まる定数であり，特に数値を与えておく必要はない．これら 2 式より

$$x_0 - x = \frac{\sqrt{\theta_1} - \sqrt{\theta}}{\beta}$$

を得るので，これをもとの λ の式に代入すると，

$$\lambda = \frac{\alpha\beta}{\sqrt{\theta_1} - \sqrt{\theta}}$$

となる．ここで，この問題を無次元化することを考える．その場合，係数 α，β は任意の定数なので，$\alpha\beta = 1$ と与えてよい．また，三角くさび体積は飽和状態を 1 とすることによって $\theta_1 = 1$ となる．その結果，定式は

$$\lambda = \frac{1}{1 - \sqrt{\theta}}$$

となる．これらの単純化は，いろいろな変数を無次元化することによって全体の見通しを明確化する，という普遍的な手法につながっているようであり，後に次元解析の理論を完成させた Buckingham はここで発想の起点を得たのだろうか，と想像する．確かに，飽和含水比 $\theta_1 = 1$ とすれば，含水比 θ は相対値（飽和度のような）として扱うことができるし，個々の土壌における $\alpha\beta$ の値は，それぞれの実験値から決めることができるだろう．こうして得た曲線が Fig. 7 の曲線（原著論文 (12) 式）

$$\theta = \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^2$$

である．概念 Fig. 5 の BCD 部分を Fig. 6 のモデルに関する物理的な考察により Fig. 7 の関数形で表した論理展開（第 1 のアプローチ）は，矛盾のない爽快な物理的思考を見た思いがする．

第 2 のアプローチは，不飽和水分移動と電流のアナロジーである．土壌の電気伝導度も土壌含水比の関数であり，やはり毛管水と薄膜水の存在形態を直接反映するはずである，という考察のもとに，Buckingham は，既往

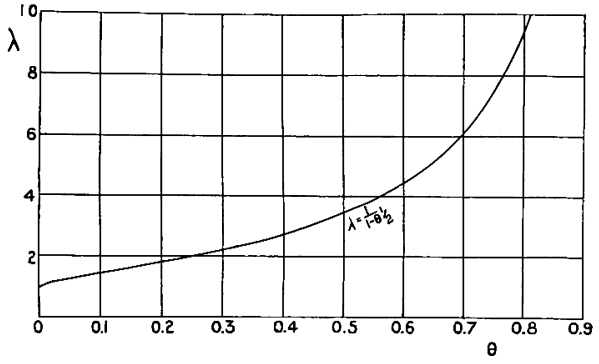


Fig. 7 三角くさび毛管水の毛管伝導度（Buckingham 1907, Figure 16）．
Relation of conductance (λ) and water content (θ).

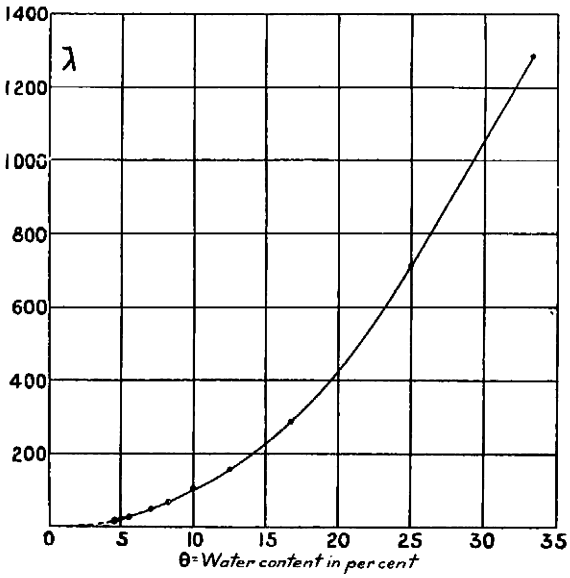


Fig. 8 石英砂の電気伝導度と含水率の関係．縦軸に λ と記載しているが，ここは電気伝導度を表している（Buckingham 1907, Figure 19）．
Electrical conductivity of moist quarts sand.

の土壌電気伝導度データを集めた．Fig. 8 はその一例である．そして，Fig. 5 の BCD 部や Fig. 7 と類似した曲線を得ることは当然であると考察している．こうして，Buckingham は，$\lambda(\theta)$ の関数形をほぼ言い当てていたのである．言い換えれば，不飽和透水係数はなぜ土壌含水比の関数なのか，という物理的考察は，Buckingham の論文で深く議論されていた，と言ってよい．

Ⅳ．水の毛管流動

この節も，Buckingham らしさが色濃く出ていて，興味深い．$\lambda(\theta)$ をいかにして定量化すべきか考えた Buckingham は，まず，原理的には不飽和土壌水分移動の定常状態を実現すればこれを定義通り測定できるはずだが，実際には時間と手間が著しくかかる上に反復実験が容易ではないことに留意し，むしろ，厳密性には欠けるが簡便な手法を用いて本質に迫ろうと決めた．ここで用意したのが，内径 4.6 cm 高さ 6 cm のランプ用円筒である．下 3 cm に比較的湿った土，上 3 cm に比較的乾いた土をできるだけ充てんし，湿った土から乾いた土への水移動量 M を 2 日目から 15 日目まで測り続けた．一方，初期含水比の差を Δ で表し，M/Δ の値を追究したのである．ここでも，関連する物理量を無次元化することによって現象の本質を探り出そうとする基本姿勢がある．

ところで，M/Δ とは何であろうか？それは，M と Δ の定義から直接決まる量であり，含水比の差 1 % の同一土壌を接触させたときの水分移動量である．さて，ここで Buckingham の水分移動式を再掲すると

$$Q = \lambda \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

であった（原著論文を忠実に再現するため，敢えてマイナス記号を記載しないが，前述したとおり，今日的には右辺に負号をつけなければならない）．これを変形すると

$$Q = \lambda \frac{d\psi}{d\theta}\frac{\partial \theta}{\partial x}$$

となる．ここで，$Q/(\partial\theta/\partial x)$ という量は単位水分量勾配に関する水分フラックスであり，

$$\frac{Q}{\partial\theta/\partial x} = \lambda \frac{d\psi}{d\theta} = D$$

であるから，これは今日我々が水分拡散係数 D と呼んでいる量そのものである．そこで，M/Δ と D の定義を並べてみると，

$\frac{M}{\Delta}$ ： 含水比の差 1% の同一土壌を接触させたときの水分フラックス

D ： 体積含水率勾配が 1 cm^{-1} の土壌中での水分フラックス

である．この時代には水分拡散係数という概念は成立していなかったので，名称がついていないが，Buckingham の M/Δ は，今日の水分拡散係数 D に非常に近い概念であったことは，明らかである．Buckingham 自身も M/Δ は何か重要な概念を代表していることを十分に気づき，そのことを表現するために

$$\frac{M}{\triangle} = \lambda \frac{d\psi}{d\theta} \times \text{constant}$$

とした（原著論文 (24) 式．ただし，微分記号 ∂ を d に訂正して記述した）．つまり，当時存在していなかった土壌水分拡散係数 D を用いれば

$$\frac{M}{\triangle} = D \times \text{constant}$$

であると言い切ったとみなすことができる．

さて，Buckingham は 11 種類もの土壌を用いてひたすら M/Δ の値が示す特性を記述した．もちろん，これは水分拡散係数 $D(\theta)$ の特性を追究していたことと等価であった．これらの検討の結果，Buckingham は，理論的帰結として Fig. 9 を提起した．図の横軸は土壌含水比，縦軸はそれぞれの曲線に応じて定義される量である．曲線 A は M/Δ，すなわち $D(\theta)$ ×定数である．実際，曲線 A は水分拡散係数の特性をよく表している．曲線 B は毛管伝導度，すなわち不飽和透水係数に他ならない．そして，曲線 C は $\partial\psi/\partial\theta$ であり，これは現在水分容量（water capacity）と呼ばれる量の逆数である．Fig. 9 に

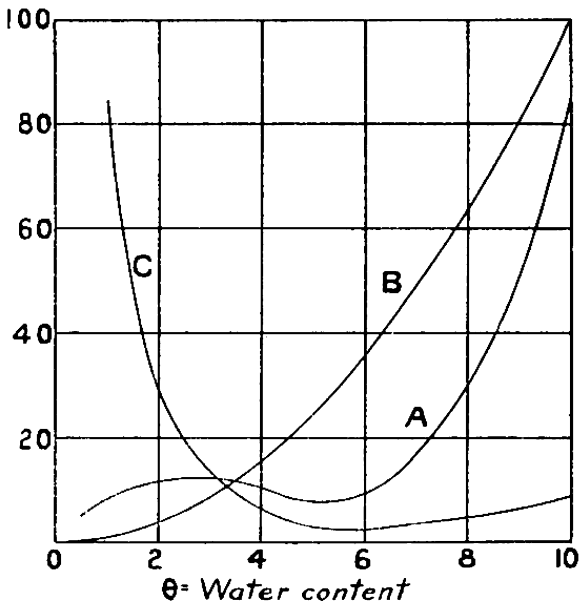


Fig. 9　土壌含水比と各種関数との理論的関係．
A は M/Δ すなわち今日の水分拡散係数 $D(\theta)$ に近い関数，B は毛管伝導度 λ すなわち今日の不飽和透水係数 $K(\theta)$，C は $\partial\psi/\partial\theta$ すなわち今日の比水分容量の逆数．（Buckingham 1907, Figure 23）．
Diagram showing theoretical relationship between water content, conductivity for moisture, and the potential function.

は，今日我々が不飽和水分移動を解析するときに用いる概念の全てが理論的に導かれ，図示されているのである．

さて，この論文は，ここで突如終了である．何の結論も記述されていない．そのため，この論文は，書きかけの未完成品ではないか，と疑っても不思議ではない．この疑問に答えてくれたのが，2005年のNimmo and Landaによる論文である．すなわち，当時のBOS局長WhitneyとBuckinghamとの，日付入りの書簡のやり取りを子細に点検した結果，Whitneyが難癖をつけてBuckinghamの結論文章を削除させたという事実を突き止めた．それだけでなく，Nimmo and LandaはBuckingham自身の手書きの結論部分を発見し，克明に活字に直して論文に書き残している．そこで，この結論部分を箇条書きに訳出（一部意訳にて）してみたい．

結論

① この論文は毛管伝導の法則を，実験結果の記述とともに検討したものである．
② 従来の経験的な知識では厳密な理論を確立できない．
③ 実験は大変難しく，恐ろしく時間がかかるので，これまでせっかく苦労して得た実験結果ではあるが，得られた結果は貧弱と言わざるを得ない．
④ 理論と実験の難しさはこれまで指摘されている通りなので，この論文が今後の研究の出発点となる．
⑤ 新たな理論は，現象の寄せ集めではなく，独立した個別の実験事実を包括し，土壌水分移動を説明するものでなければならない．
⑥ 物理学者にとって，熱伝導問題を扱うのにフーリエの法則を知らず，熱流計も持たずに立ち向かうのが困難なのと同様に，有効な土壌水分計を持たずに土壌水移動を扱うのは困難である．
⑦ 問題は困難だが，望みはある．主な問題は，広範な注意深い実験を必要としていることだけだからである．

以上である．この結論は，もちろん立派な見識を述べており，削除すべきではなかった．その後の歴史はこの通りに展開したのであるから，Whitney局長は余計なことをしたのである．

5. おわりに

Buckinghamという人は，どんな人だったのだろうか？私の主観によれば，まず，あまり笑わない，気難しい人物，という印象を持つ．しかし，これは集中している研究者であれば，みな似たようなものだろう．ただ，どちらかというと孤独感の強そうな人物であったと思われる．その孤独は，思索が深すぎて，周囲の研究者がついてこられないことにも原因があり，レベルの高い研究者であるが故の宿命であったかもしれない．BOSからNBSに移った後，そこでの同僚研究者は「彼は，論文書きがうまかっただけでなく，批判力も優れていた．人によっては，彼は厳しすぎる，とも評していた．彼は，意見の異なる科学者や役人に対して“ペテン師だ”といってはばからなかった」と評したという．

BuckinghamがDarcy則のことを全く触れなかった事実について，Nimmo and Landa（2005）は，Darcy則の発表が1863年であって余りにも古いので，触れなかったか，または，Darcy則とBuckingham則には共通性がないと考えていたからだろうと推測している．また，Narasimhan（2005）は，BuckinghamはDarcy則を知っていたが，不飽和水分移動の法則はこれと区別すべきものと考え，敢えて導入や引用を行わなかったと推定している．一方，Sposito（1986）は，Buckinghamは単にDarcy則を知らなかっただけだろうと示唆している．諸説あるが，この原著論文を詳細に読めば，やはり土壌水の不飽和移動の法則はBuckinghamによって樹立されたものであり，この法則をBuckingham–Darcy則と呼ぶことは，適切である，と結論できる．

改めて見直してみると，Buckinghamは，今日の不飽和土壌水移動の基礎概念として欠かせない諸概念，すなわち，マトリックポテンシャル，水分特性曲線，比水分容量，不飽和透水係数，水分拡散係数，薄膜流，浸漬熱などの概念のほぼ全てを把握していたことは明らかであり，Nimmo and LandaやNarasimhanが高く評価したように，私もBuckinghamの1907年論文は，古典と呼ぶに相応しいと考える．

引用文献

Buckingham, E. 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. Bulletin 25. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.

Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. Bulletin 38. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.

Buckingham, E. 1914. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. Phys. Rev., Vol.4, Ser.2, 345–376.

Narasimham, 2005. Buckingham, 1907： An Appreciation, VZJ, 434–441.

Narasimham, 2007. Central Ideas of Buckingham (1907)： A Century Later, VZJ, 687–693.

Nimmo, J. R., and Landa, E. R., 2005. The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham. Soil. Sci. Soc. Am. J. 69：328–342.

Sposito, G., 1986. The “Physics” of soil water physics. Water Resour. Res. 22：83S–88S.

要　　旨

100 年以上前に Buckingham が発表した論文「Studies on the movement of soil moisture」を古典として読み解いた．この論文は，不飽和土壌水分のポテンシャルについて世界で初めて定義し，またその移動法則を提示した画期的なものであったが，所属していた研究機関の上司らの理解を得ることに多くの労力を費やすことになった．そこで，この論文発表をめぐる Buckingham の個人的かつ歴史的事情についても，資料に基づいて解説した．なお，論文本体において，当時の用語と現代の使用用語との間に違いがあるので，極力現代用語を用いて記述した．原著論文は非常に科学的で示唆に富み，特に理論的考察は味わい深いものであり，この分野に携わる研究者や若手研究者，大学院生にも，ぜひ読んでもらいたい．土壌物理学会事務局経由でも，原著論文のコピー（pdf）が入手可能と聞いている．

キーワード：不飽和水分移動，Buckingham-Darcy 則，毛管ポテンシャル，マトリックポテンシャル，毛管伝導度