

古典を読む

J. R. Philip and D. A. de Vries 著

「温度勾配下における多孔体中の水分移動」を基にした研究展開

—液島モデルからマイクロ・ヒートパイプモデルへ—

粕渕辰昭¹・百瀬年彦²・坂口 巖³

Development of Research based on Philip, J. R. and de Vries, D. A. (1957) : Moisture movement in porous materials under temperature gradients

— From the liquid island model to the micro heat pipe model —

Tatsuaki KASUBUCHI¹, Toshihiko MOMOSE² and Iwao SAKAGUCHI³

1. はじめに

—エネルギー輸送と物質移動—

土中におけるエネルギー輸送と物質移動とは分かちがたく結びついている。

私たちはこれまで土中の熱伝導のメカニズムや熱伝導率測定を応用した水分量の推定などに関心をもって取り組んできた。そのため、物質移動現象については当初から十分関心があったわけではなかった。しかし、自然と物質移動にも着目せざるをえなくなった。

その端緒になったのは、土の熱伝導率の温度依存性である (Hiraiwa and Kasubuchi, 2000)。物質の熱伝導率は相が単一の状態では温度依存性はあまり大きくない。とくに気体は温度依存性が小さく、固体や液体もそれほど大きくない。ところが、土の熱伝導率は温度依存性が大きい (Fig. 1)。図からも明らかのように土の熱伝導率は温度と水分量に影響され、温度が高くなるにつれて大きくなり、適度に水分が存在するときに温度依存性は最も大きくなる。これらのことから、土の熱伝導率の温度依存性には水の相変化が影響していると考えられた。すなわち、液体→気体→液体という変化であり、水分移動によって潜熱が移動し、その結果として温度依存性が生じると考えられた。また、この温度依存性は熱伝導率から水分量を推定するうえで避けては通れない課題でもあった。(なお、潜熱による輸送は、厳密には熱伝導ではない。“見かけの熱伝導率”というのがより正確であるがここでは慣行的に熱伝導率とさせていただいた。)

土中の水分移動と熱輸送のつながりをわかりやすく説明したのは、Philip and de Vries (1957) の液島モデルであった。土壌物理の教科書にはたいして紹介されているほどよく知られている。この液島モデルを最初に発表した論文は、本誌の「古典を読む」で詳細に紹介されている (坂井・取出, 2006)。

もう1つ取り上げなければならないのは、Philip らの5年前に出された論文 Gurr, Marshall and Hutton (1952) “Movement of water in soil due to a temperature gradient” である。彼らは温度勾配下における液状水移動のトレーサーとして塩化物を用いて、さまざまな水分条件下で塩化物と水分の分布を詳細に調べた。これは熱と水の同時輸送についての記念碑的論文であり、実験データは今も参考になる。

他にもエネルギー輸送と物質移動に関連する論文は多い。これらのうち、1950年代から70年代にかけての一連の熱・水同時輸送に関する諸論文については、上記の2つの論文を含め、宮崎毅氏による優れた総説「温度勾配下の不飽和水分移動」(1976) が本誌に掲載されている。氏の20歳代後半の力作である。それまでの熱・物質同時移動現象を整理し、問題点を指摘したこの総説には現在も学ぶべきことが多い。

1970年代以降は熱・水同時輸送に関して多くの実験的、理論的な取り組みが行われてきた。その際、得られた結果に対する主要な説明の1つが液島モデルである (例えば、Cass et al., 1984)。

一方、私たちは液島モデルと Gurr らの実験結果および結論には問題点があると考えた。

そこでここでは、その問題点とそれを克服するために私たちが取り組んだ内容を中心に報告する。すなわち、土中での熱と水との同時移動を「ヒートパイプ」現象として捉え、これをどのように実験的に証明し、論文として公表したかの試行錯誤のプロセスである。

そのため、本報告はこれまでの「古典を読む」とはかなり趣を異にしている。「古典を読む」のジャンルに必ず

¹Faculty of Agriculture, Yamagata Univ., 1-23, Wakaba-machi, Tsuruoka. 997-8555, Japan. Corresponding author : 粕渕辰昭, 山形大学農学部

²Department of Hydrogeology, Barvarian Environment Agency, Hans-Hogn-Str. 12, Hof 95030, Germany.

³Ecotopia Science Institute, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan.

2011年8月12日受稿, 2011年11月22日受理
土壌の物理性 119号, 53-64 (2011)

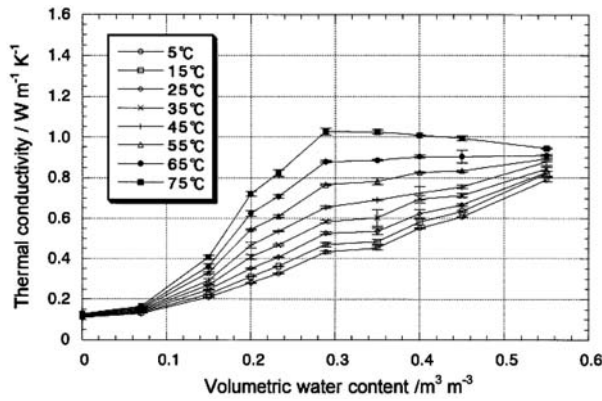


Fig. 1 土 (火山灰土) の熱伝導率の温度依存性 (Hiraiwa and Kasubuchi, 2000)

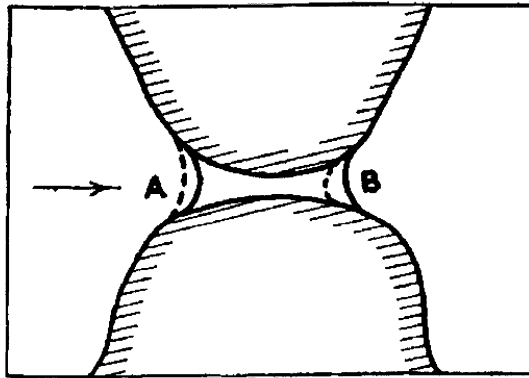


Fig. 2 液島モデル (原図) (Philip et al., 1957)

しも合致しているとは思えない。むしろ甚だしくはずれているとさえ言えるであろう。しかし、敢えて書かせていただくことにした。最初にその点を読者の皆様にご理解を得ておきたい。

2. 液島モデルへの疑問

液島モデルは、一見して分かりやすい。しかも、図に示すように、ドミノ倒しのように面白い (Fig. 2)。しかし、よくよく考えてみると、このモデルに関して次のような疑問が生じる。

疑問①：土粒子を覆う水膜を無視することはできないのではないか

土中では気体と接する土粒子の表面には少なくとも1分子層以上の水膜が存在する。水膜厚さは水ポテンシャルによって決まる。メニスカスが存在する液体表面では、当然、そのメニスカスに連結した水膜も土粒子周辺に存在する。

水分子はランダムに液状水から飛び出す。当然、飛び出す方向はメニスカスのあるところへとは限らない。液体の表面に到達した気体の水分子はそこに吸収されるか反射される。温度にもよるが気体の平均自由行程はごく短い。例えば、常温の水蒸気の平均自由行程は 10^{-4} mmのオーダーである。土の間隙内の水分子が、土粒子を取りまく水膜にも出入りしていることは容易に想像できる。

ところが、この図には水膜が描かれていない。彼らも水膜の存在は認識していたので、メニスカスにおける水分移動を強調するために敢えて書かなかったのではないかと思われる。しかし、水蒸気移動を論じる場合、固体粒子をとりまく水膜の存在を無視することはできない。

疑問②：水蒸気移動が最大になるときの初期水分量の決定の仕方は妥当なのか

土中の水分が増えるに従い、低温側から高温側への液

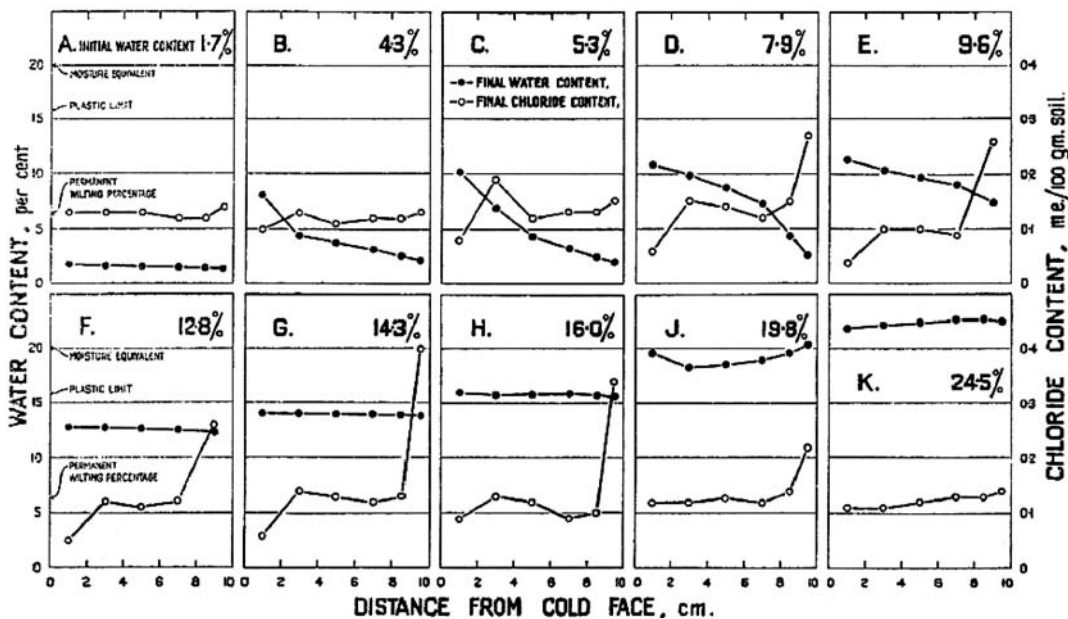


Fig. 3 Gurr らによる実験結果 (Gurr et al., 1952). 図中の数字 (%) は初期水分量。

状水の戻りが始まる。Philip らは、この水の戻りが始まる初期水分量付近で、水蒸気移動が最も大きくなると述べている。

はたして、そうだろうか。

私たちはここで、Philip らの主張が、Gurr らの実験結果と矛盾していることを見出した。

Gurr らの結果 (Fig. 3) をみでみる。Philip らの言う”液状水の戻り”が始まる水分量とは、カラム C・Dあたりであろう。カラム C よりも乾燥した水分量では、塩化物量の分布はほぼ一定であるのに対し、カラム D の塩化物量は、高温側で増加し低温側で減少する。塩化物量の増加は、当然、低温側からの液状水の戻りによってもたらされる。Philip らによれば、カラム C・D あたりで最大の水蒸気移動が起こることになる。

私たちは、C、D の pF 値がそれぞれ 4.5、3.9 (−3000 ~ −800J/kg) と比較的大きい (ポテンシャルは小さい) ことに注目した。後ほど示すように、私たちの実験で最大の熱伝導率を示したのは −600 ~ −6J/kg であった。最大の水蒸気移動は C、D ではなく、水分勾配の無くなった F、G、H であろうと私たちは考えた。

さらに、私たちはカラム G で高温側と低温側の塩化物量の差が最も大きくなっていることにも着目した。先にも述べたが、高温側の塩化物量の増加は低温側からの水の戻りによってもたらされる。つまり、カラム G は水の戻りが多い。水の戻りが多いということは、定常条件であるため、高温側から低温側への水蒸気移動も大きいはずである (水の戻りは液状水移動であるので、高温側から低温側への水移動は、水蒸気移動が主体になるであろう)。なおかつ、Gurr らのデータをよく見てみると、カラム E・F における塩化物量の高温側の測定点が、他に比べ 1 つ少ないことに気がつく。何らかの理由で測定できなかったのかも知れないが、高温側 2 点の平均値をとったようにも見える。もし、カラム E・F の塩化物量の測定点数が他と同じであったならば、カラム E・F の塩化物量の差が最も大きくなっていたのではないだろうか。

Philip らはこうした塩化物量の差について、ほとんど議論していない。そして、カラム C、D で水蒸気移動が最も大きくなるという Gurr らの結論を踏襲し、そのメカ

ニズムを液島モデル (Fig. 2) として発表した。

液島モデルの発表後、温度勾配下における水分移動に関する研究のほとんどが、水分勾配が形成される水分量、いわゆる低水分量を対象にしている。研究者たちにとって、水分勾配が形成されないような中・高水分量は、あまり関心がなかったのかもしれない。しかし、私たちは中・高水分量にこそ温度勾配下の水蒸気移動が最大になるメカニズムが隠されていると考えた。

では、液島モデルに代わるものは何だろうか。

これに関して、ヒートパイプである可能性の指摘 (粕測・中野, 1989) や、空隙内における水の循環流の仮説 (塩沢, 1991) など、かなり以前から指摘されてきていた。これらに続いて、私たちも土がヒートパイプとして機能する現象の解明へと取り組みを進めていくことになった。

3. 土がヒートパイプ現象をもつことの確信

3.1 ヒートパイプとは

ヒートパイプは、密閉したパイプの中に揮発性の作動液 (例えば水) を封入したものであり、パイプの内壁にはウイックという毛細管構造が貼り付けられていることが多い (Fig. 4)。このパイプの一端を加熱するとそこで作動液が蒸発し、その分子は低温側のもう一方の端に向かって音速で進み、そこで液化 (凝縮) する。このとき、凝縮熱が発生する。液化した作動液は毛細管を伝わり再び蒸発した高温側に移動する。この時、高温側から低温側に熱が輸送される。工業的に利用されているヒートパイプのなかには、固体では最も熱伝導率の大きい銀の千倍以上にも達するものもある。高温端と低温端近くを除いて、ヒートパイプ内の温度は恒温であり、その値は高温端と低温端の中間にある。また、近年ではパイプの長さが 1 mm 未満のものも開発されている。

3.2 減圧条件下の温度・水分依存性の実験

私たちが減圧下で熱伝導率を測ろうと考えたのは、1997 年に山形県天童市で行われた熱物性学会の東北支部例会に粕測が招かれたときである。この例会で土の熱伝導率の温度依存性などについて話したあとの質疑応答が契機になった。そこで「温度依存性はヒートパイプ現象によるものではないか」という質問が出されたが、十分

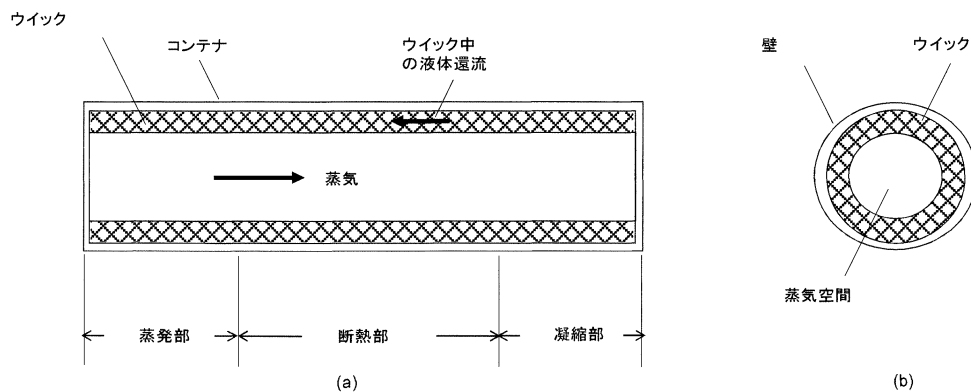


Fig. 4 ヒートパイプの概要図 (Dunn and Reay, 1978)

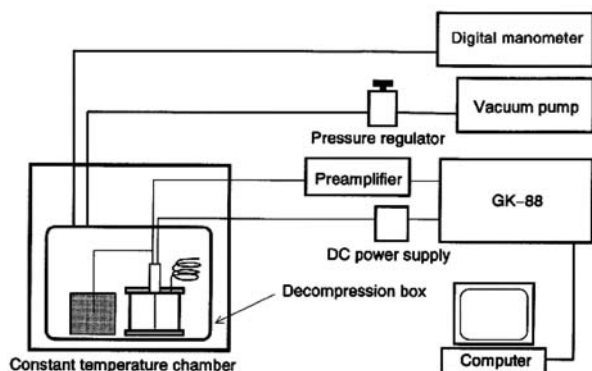


Fig. 5-1 減圧下の非定常熱伝導率測定システム (全体)
(Momose and Kasubuchi, 2002)

答えることができなかった。その帰り、会場の駐車場で行った粕瀨と百瀬との会話のなかで、もし、ヒートパイプなら土を減圧すればもっと温度依存性は大きくなるのではないかと、ということになった。土の中でも空気の大部分は窒素と酸素である。これらを減らすことにより、水蒸気の流れがスムーズになるであろう。実際に、ヒートパイプでは減圧して作動液を注入している。望月ら(1998)が減圧下で熱伝導率が大きくなることを報告していたことも思い出した。

また、当時、私たちは減圧下における固気二相系の土の熱伝導率測定にも取り組んでいた(Momose and Kasubuchi, 2004)。このため、減圧の実験に取り組みやすかったことも幸いした。

百瀬はさっそくその実験に取り組んだ。

問題は、減圧にした場合、真空ポンプへの土からの水分の蒸発をどのように抑えるのか、もう一つは気圧を正確に一定にしなければならないことであった。

蒸発を抑えるのには、パスツールの「白鳥の首」の実験がヒントとなった。パスツールの無生物から生物は生まれないということを証明したとされる「白鳥の首」は、殺菌したブイヨンを入れたフラスコの首を毛細管にまで引き伸ばし、湾曲させて大気と通じさせたものである。この結果、大気中の菌はブイヨンに届くことなく、大気のみ交換させることができた。菌の拡散による侵入が毛細管によって遮断されたのである。水の分子も菌と同じく屈曲した長い毛細管では拡散移動は抑えられるだろう、そう考えて手元にあった内径0.5mmのステンレスチューブ約1mを直径5cm程度に巻きつけたものを作った。このチューブによって長時間真空ポンプで減圧しても土が乾燥しないことを実験で確かめることができた。この方法はその後、他のさまざまな実験に用い重宝した。

真空の圧を調整するには、井上光弘氏からアメリカ製の圧力調整器があることを教えていただいた。実に優れものだった。これにデジタル圧力計をつないで制御することにした(Fig. 5)。

こうして、百瀬が実験装置を製作し集中的に実験した。予想したように減圧すると熱伝導率は増加し、設定温度の飽和水蒸気圧近くまで減圧すると熱伝導率は劇的に上昇した(Fig. 6)。

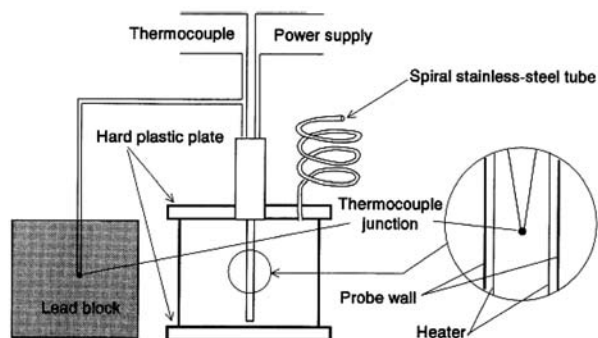


Fig. 5-2 減圧下の熱伝導率測定システム (センサー部分)
(Momose and Kasubuchi, 2002)

この減圧に伴う熱伝導率の劇的な上昇は、土の間隙内の水蒸気移動の増加に起因すると考えられた。大気圧下の土の間隙内は、酸素や窒素がそのほとんどを占める。例えば、常温(25℃)では、間隙内の気体分子の約97%が酸素や窒素である。また、酸素や窒素分子は、水分子に比べ重い。このため、常温・大気圧下では、土の中の水蒸気移動は酸素や窒素によって妨げられている。減圧とともに、酸素や窒素の気体密度は減少するのに対し水蒸気密度は一定である。その結果、水蒸気は移動しやすくなる。

熱輸送の面から土の中の水蒸気移動を考えると、以下のような過程を繰り返していると思われる。(1)高温側で潜熱を得た液状水は、水蒸気となり、低温側へ移動する。(2)水蒸気は、土粒子を取り巻く低温側の水膜で液状水に変わり、潜熱を放出する。(3)放出された熱は、土粒子や液島を通じて、さらに温度の低い方へ伝導する。(4)別の間隙内での水蒸気移動を引き起こす。

土の中では、こうした水蒸気の相変化が繰り返されることによって、熱が輸送されると考えられる。減圧下では、水蒸気は移動しやすくなるため、より多くの熱輸送が可能となる。この結果、土の熱伝導率が大きくなったと考えられた。

土の中の水蒸気移動が最大になる水分率、つまり、土の熱伝導率の気圧依存性が最大になる水分率(水分ポテンシャル)は、火山灰土で $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (-600 Jkg^{-1})、赤黄色土で $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (-100 Jkg^{-1})、豊浦砂で $0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (-6 Jkg^{-1})であった。これらの水分率は、Hiraiwa and Kasubuchi (2000)が示した、熱伝導率の温度依存性が最も大きくなる水分率とも一致した。

しかし、減圧下における熱伝導率の劇的な上昇は、すべての水分量で生じるわけではない。Philipらが最大の水蒸気移動が生じると考えた水分量(水分ポテンシャル $-3000 \sim -800 \text{ Jkg}^{-1}$)では、熱伝導率の気圧依存性はほとんどない。つまり、液島が存在すると言われる水分条件下、水蒸気がスムーズに動ける減圧条件下でさえ、熱伝導率は大きくならなかった。私たちは、熱伝導率の劇的な上昇(水蒸気移動が最大になるメカニズム)はヒートパイプ現象だと確信し始めた。

しかし、ヒートパイプ現象であることを証明するには、

熱伝導率が大きくなるだけでは不十分である。その熱伝導率の上昇の原因となる蒸発する水が発熱源に還流してくることを証明しなければならない。

3.3 液状水移動の測定

私たちは液状水の還流に関係する水分移動の測定に関して十分な知識と経験を持ち合わせていなかった。とくにノウハウの多い複雑な実験は、文献を読むだけで再現することは難しい。細かい部分は論文には書ききれないからである。実際にやってみせてもらうことによって初めて正しく理解し使うことができる。実験科学では文献だけではなく、人から人へ直接の情報の伝達も不可欠である。

不飽和の水分移動に関わる測定については百瀬が農業環境技術研究所に訪問研究員として短期間滞在させていただき、長谷川周一氏から懇切な指導を受けた。研修後も引き続きOne-step法による水分拡散係数測定(長谷川, 1998)について教えていただいた。

こうして、どの土に関しても非定常ヒートプローブ法で得られた減圧下の高い熱伝導率は、水分拡散係数が $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を超える水分域で得られることが明らかとなった (Fig. 7)。高い熱伝導率は液状水の大きい移動性と関係していたのである。これで、高温側から低温側への水蒸気移動が大きくなる現象が、低温側から液状水が戻るときに起こっている可能性を指摘することができる。私

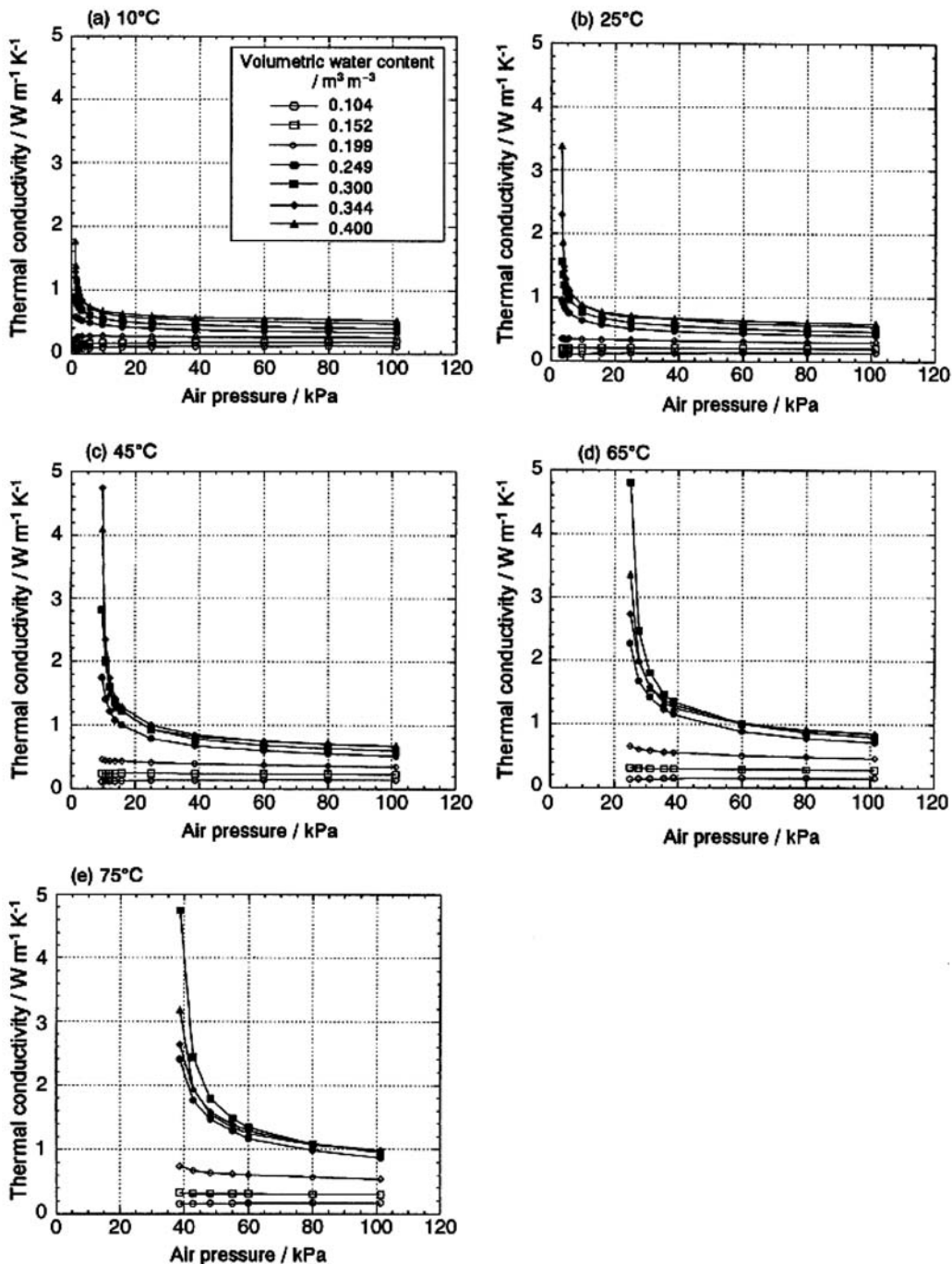


Fig. 6 減圧下の各温度条件を変えたときの火山灰土の熱伝導率 (Momose and Kasubuchi, 2002)

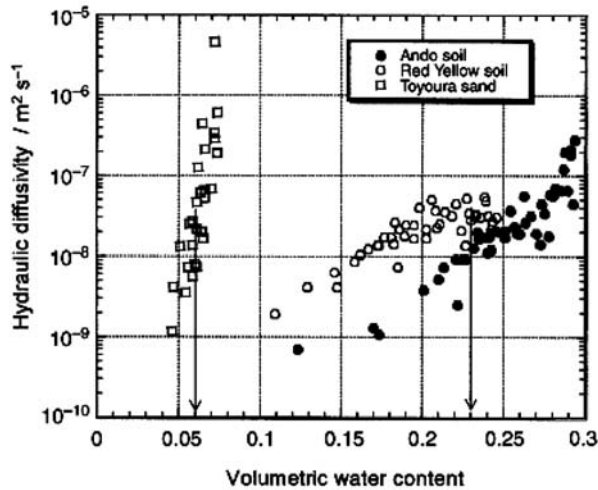


Fig. 7 体積水分率と水分拡散係数との関係 (Momose and Kasubuchi, 2002)

たちは、熱伝導率の温度依存性は、ヒートパイプ現象の結果であると確信した。

私たちがヒートパイプ現象の結果だと確信したのは、他にも理由があった。

一つは、熱伝導率測定のための試料を作っているときに偶然みつかった。熱伝導率測定のための試料づくりは、水分や固相率など均一に充填することがポイントである。低水分量の試料は、乾燥した土と水をビニル袋に入れ、よく混ぜ合わせ、それを試料容器に充填する。ところが、この方法で高水分量の試料をつくると、土が団子状になってしまい、均一にカラムに充填することができない。そこで、高水分量の試料をつくるときには、はじめに乾燥した土を試料容器に充填し、そこに水を入れラップし、電子レンジにかけける方法を使った。このアイデアは、Horton et al. (1982) の方法を参考にしたものである。この方法は、電子レンジの加熱によって、強制的に液状水を水蒸気にし、水蒸気移動を引き起こす。水蒸気は、密度の小さいところ、すなわち、乾いたところに飛んでいき、そこで凝縮する。何回か電子レンジにかけると、最終的に水分が均一になるというユニークな仕組みである。百瀬は低水分量の試料づくりにもこの方法を使おうと考えた。電子レンジを使う方がはるかに容易だからである。電子レンジを数回かけ、外見上水分が均一になっていることを確認した後、土の中の水分分布がどうなっているのかを調べた。結果は予想を大きく外れていた。試料内部は、明らかに乾燥していたのである。

電子レンジにかけた直後の土は、全体が高温になっている。それを室温で冷やすと、外側から徐々に冷える。この過程で、容器壁面に水が集積する。この集積した水は内部へ戻らない。このため、内部が乾燥したと考えられた。低水分量の土には、電子レンジは使えなかったのである。ところが、高水分量の土は、水分分布が均一になる。これは、冷却過程で、試料内部から試料壁面に向かう水蒸気移動量と同じ量の液状が試料内部に戻るからである。まさにヒートパイプ現象であった。そして、電

子レンジが使える水分量域は、減圧下で高い熱伝導率が得られる水分量域と一致することを突き止めた。そのため、私たちは、ここからもヒートパイプ現象だと確信できた。

もう一つは、熱伝導率が大きくなる水分量の土を厚さ 6 cm 直径 30 cm という大きめの円盤型容器に充填した実験から見いだした。この円盤型試料の中心にヒートプローブを設置し、プローブに数時間通電・加熱し続け、そのときのプローブの温度変化を記録した。熱をかけ続けると当然プローブ周辺の水分は移動し、熱伝導率が低下することも予想された。しかし、プローブの温度上昇は時間の対数軸に線形で表された。つまり、熱伝導率は一定となることがわかった。水分の還流をこれからも確信した。

しかし、こうした内容は、論文には書かなかった。

3.4 “ヒートパイプ現象”論文のリジェクト

最初に EJSS (European Journal of Soil Science) に投稿した原稿では、結論に「これはヒートパイプ現象」である、と書いた。表題も “Heat pipe phenomenon in soil” と自信をもって投稿した。

しかし、査読者からはあっさりと「その結論は受け入れられない。もし、そのことを主張するのなら、査読者とかかなりの論議が必要である。実験事実だけの論文としてなら掲載に同意するが」とのコメントが帰ってきた。論議が長引きそうなことが予測された。悩んだ末に、最終的にこの提案を受け入れ、ヒートパイプ現象であるとの結論は削除した。

削除したのは、実験事実だけでも論文として意義があると考えたこと、もう一つは、ヒートパイプ現象であるという確固たる「事実」が提出できていないことであった。熱伝導率の測定法が非定常法であるということも納得が得られない理由の一つであった。つまり、定常的なヒートパイプ現象ではなく、一過性の単なる蒸発を測っているのではないか、という懸念もあったと思う。すなわち、定常温度勾配下の減圧状態で熱流量が大きくなり、同時に低温部から高温部への液状水の移動量も大きくなることを「実験事実として」示していないという点であった。

私たちは、このとき、それならヒートパイプ現象を「実験事実」として証明してみよう、と決意した。そして論文の最後に近い部分で、

“We should need to measure the heat and water fluxes in a steady state under reduced air pressure” と書いた (Momose and Kasubuchi, 2002)。

このことに関連して、かつて、何かの機会に岩田進午氏から聞いた話を思い出した。それはヨーロッパ学派とアメリカ学派の相違についてである。氏は、「ヨーロッパ、とくにイギリスはジョン・ロック以来の経験主義 (empiricism) が伝統的に強く、実験事実に基づき厳密に解析する傾向が強い。一方、アメリカはプラグマティズム (pragmatism) の影響が強い」と話しておられた。私たちは、この経験主義を受け入れることになった。

4. 実験的証明

ヒートパイプ現象であることを実験的に証明するには、定常温度勾配下で大きな熱流が生じていること、水が循環していることの2つを示す必要があった。

もしGurrらが土のカラム内のどこか1ヶ所に熱流板を設置して、熱流量を測定していたならば、ヒートパイプ現象と同様の現象を観測していたはずである。彼らが熱流量測定を行わなかったのはなぜだろうか。熱輸送にまで思慮が及んでいなかったのか、あるいは測ろうとしたが測れなかったのか。

とにかく、一つひとつ実験してみるしかない。そう考えて実験を開始した。以下はその経過である。

4.1 装置開発の2つの問題点

さっそく熱流板を作ることにした。2002年の夏である。卒論のテーマにも取り上げ、開始した。しかし、これは思いのほか難題だった。熱流板そのものは容易に作ることができる。すなわち、一定の熱伝導率を有する板（普通はアクリルなどのプラスチック板。この時は熱流量が大きくなることが予想されたため、熱伝導率が比較的大きなステンレス板を選んだ）を熱の流れる方向に垂直に置き、金属板の両面の温度差を求めれば可能である。物理の実験書にはそのように書かれている。

結果から言うとなれなかった。理由は、2つあった。1つは、カラム周辺の環境温度（周辺温度）を一定にしなければならないが、土のカラムをGurrらのように10 cmと長くすると、断熱材で覆っても、カラムと周囲との間に温度差が生じ、複雑な熱流が生じることである。

最初、その温度をカラムに接する高温側と低温側の平均値（中間値）にした。その後、周辺温度を高温端や低温端の温度に設定する実験も行った。

その結果わかったのは、周辺温度を平均値にした場合、高温に近いカラムの部分からは熱が流れ出し、低温に近い部分には熱が流入していた。そのためカラムの温度勾配が場所によらず一定にならなかった。カラムを断熱しようとしても、実際は完全な断熱はできないからである。

もう1つは、熱流板の位置によっても異なるが、試料と熱流板との間に熱の接触抵抗が生じることである。このため熱流板両面の温度差は測れてもカラムの正確な熱流量が得られない。

4.2 問題点の解決

最初の問題であるカラムと周囲との間に生じる複雑な熱損失・熱流入については、試料箱を金属板（ステンレス）で覆うことで切り抜けることができた。この金属箱の両端を熱源（ヒートソースとヒートシンクの両者）に直接接触させることで、金属板に一定の温度勾配を生じさせ、金属板と試料との温度分布をほぼ同じにすることを考えた。これによって、土のカラムに線形の温度分布を生じさせることが可能になった。

しかし、2つ目の課題、すなわち、接触抵抗によって生じる温度差（とくに、高温側における）を避けることはどうしてもできなかった。この難問は、しばらくして

百瀬の「サーモモジュールに通電して熱流板として使う」という逆転の発想によって解決することができた。すなわち、サーモモジュールを副次的な熱源として利用する方法である。

サーモモジュールは数センチ角、厚さ数ミリで、半導体の集合体（熱電対の集合体である熱電堆と原理は同じ）であり、両端を薄いセラミックで覆ったものである。両面の温度差1度あたり数mVの出力が得られるので、温度差を測定するためのプリアンプを必要としない。逆にサーモモジュールに電気を流して温度差を作り出すことも可能である（直流を使った冷蔵庫、温蔵庫にはサーモモジュールが使われている）。

百瀬の提案は、サーモモジュールを温度差を測る熱流板（ゼーベック素子）として使うのではなく、発熱体（ペルチェ素子）として使う方法であった。具体的にはサーモモジュールの1面を熱源に接着し、もう一方の面に熱伝導率が高い銅板を貼り付け、土のカラムと接触させる。銅板にサーミスタを貼り付け温度を測定し、サーモモジュールの両端の温度が同じになるようにサーモモジュールに通電する。この時の電流量を記録する。つまり、サーモモジュールの両端を常に同じ温度にするために熱抵抗のあるモジュールの本体部分を発熱させる。こうすることで土の試料が熱抵抗なしに直接熱源と接している状態を作り出す。もちろん、サーモモジュールの電気抵抗値が測定温度によって変化しないことを確かめた上である。理論上、この時の発熱量が試料への熱流量と一致する。なぜなら、定常流であるなら、どこでも熱流量は同じとなるからである。

4.3 装置の様々な工夫

最初から熱源（ヒートソース、ヒートシンクとも）には十分注意を払った。熱源は銅の箱を用い、この中に一定の温度の水を流す方法をとった。水温を一定にするために大きめの断熱水槽を用いた。熱容量が小さいと温度変動が大きくなるからである。また、熱源となる銅の箱には水流が層流となって土との接触面に温度分布が生じないよう、箱内に邪魔板を入れ、乱流を生じさせた。これは、熱源について相談した萩原清市氏（東京理工）からいただいたアドバイスであり、同社に特注して製作していただいた。

水分がどのように分布しているかは、ヒートパイプ現象の重要なポイントである。破壊して測定することも可能だが、繰り返し実験するためには非破壊計測が不可欠である。この測定にはキャンベルのTDR装置を使った。長さ5 cmの電極2本からなる小さなセンサーを作成し、縦・横5 cm、長さ10 cmのカラムの長さ方向に2 cm間隔で5ヶ所にセンサーを垂直方向に挿入した。センサーそれぞれをキャリブレーションし、少なくとも1%以下の精度で水分が測定できることを確認した。これにより試料を破壊することなく繰り返し正確に水分を追うことができた。TDRセンサーの2本の電極の片方に温度測定のための熱電対を組み込んだ（Fig. 8）。

4.4 百瀬と坂口の交代, そして新しい装置による実験の開始

装置を作り上げ, ようやく測定できるようになった2004年の春, 百瀬は就職するために大学を離れることになった. このとき, 入れ替わるように坂口が博士課程に入学した. そこで百瀬の就職先に無理にお願いして, 1ヶ月だけ就職を延期してもらうことにした. この間を利用して坂口と百瀬の間で装置の詳細な引継ぎを行うことが

できた.

坂口は修士課程まで過ごした鳥取大学で熱の取り扱いや解析に必要な知識と経験をかなり有していたので, 引継ぎは比較的容易であった. 引き継いだ彼は, 3年間, 徹底して計測と解析に没頭した. おそらく, 研究室で過ごした時間が最も長かった一人ではないだろうか. そのため, 坂口に粕測はいつでも会うことができた.

彼の緻密な実験結果が次々にもたらされ, 大きな熱流

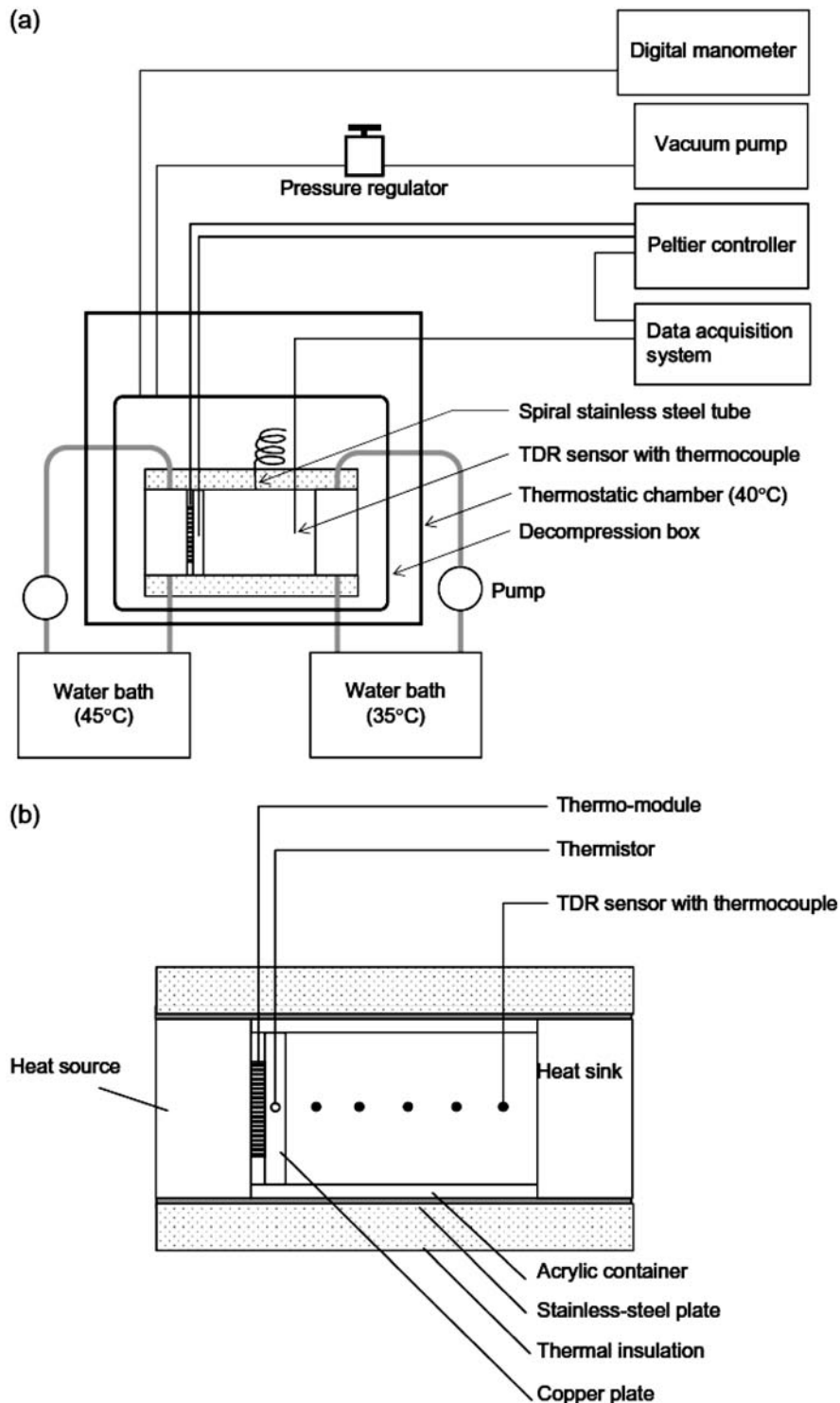


Fig. 8 減圧条件下の定常熱フラックス測定システム (Momose et al., 2008)

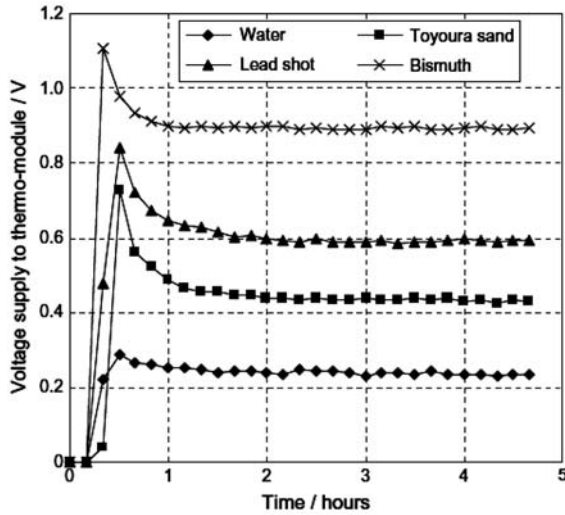


Fig. 9 減圧条件下の各種試料におけるサーモジュールへの供給電圧の時間変化。
(熱フラックスはこの供給電圧の2乗に比例している.)
(Momose et al.,2008)

が定常的に生じること、そのときの温度勾配とフラックスとから得られた熱伝導率が、非定常法で測定した熱伝導率と一致することを確認することができた。また、水分分布がカラム全体で均一になっていること、これが長時間継続すること、すなわち土がヒートパイプとして機

能していることを実験によって確かめることができた (Fig. 9, 10)。

実験そのものも決してスムーズに進んだわけではなかったが、論文として受理されるためにはさらに5年が必要であった。

5. 論文としてのとりまとめ

—装置開発の論文化—

論文として発表できるためにもいくつかの問題を解決しなければならなかった。論文を発表する雑誌は最初からEJSSと決めていた。それまでに掲載された一連の論文の経過があること、さらに、編集長や査読者とフェアで真摯なやり取りが可能であることを実感していたからである。ときにはレフリーから表現法、句読点にいたるまで論文の細部にわたり鉛筆で細かく（とても読みづらかったが）指摘を受けることもできた。

装置開発の論文と、ヒートパイプの証明の論文の2つにすることにした。1報では長すぎて収まりきらなかったからである。装置に関する論文は百瀬が、ヒートパイプの論文は坂口がそれぞれコレスポンディングオーサーになった。

最初の難関は、測定装置の論文化であった。装置の論文が通らなければ、ヒートパイプ現象を説明することはできない。しかし、この装置は複雑であり、これに先行する論

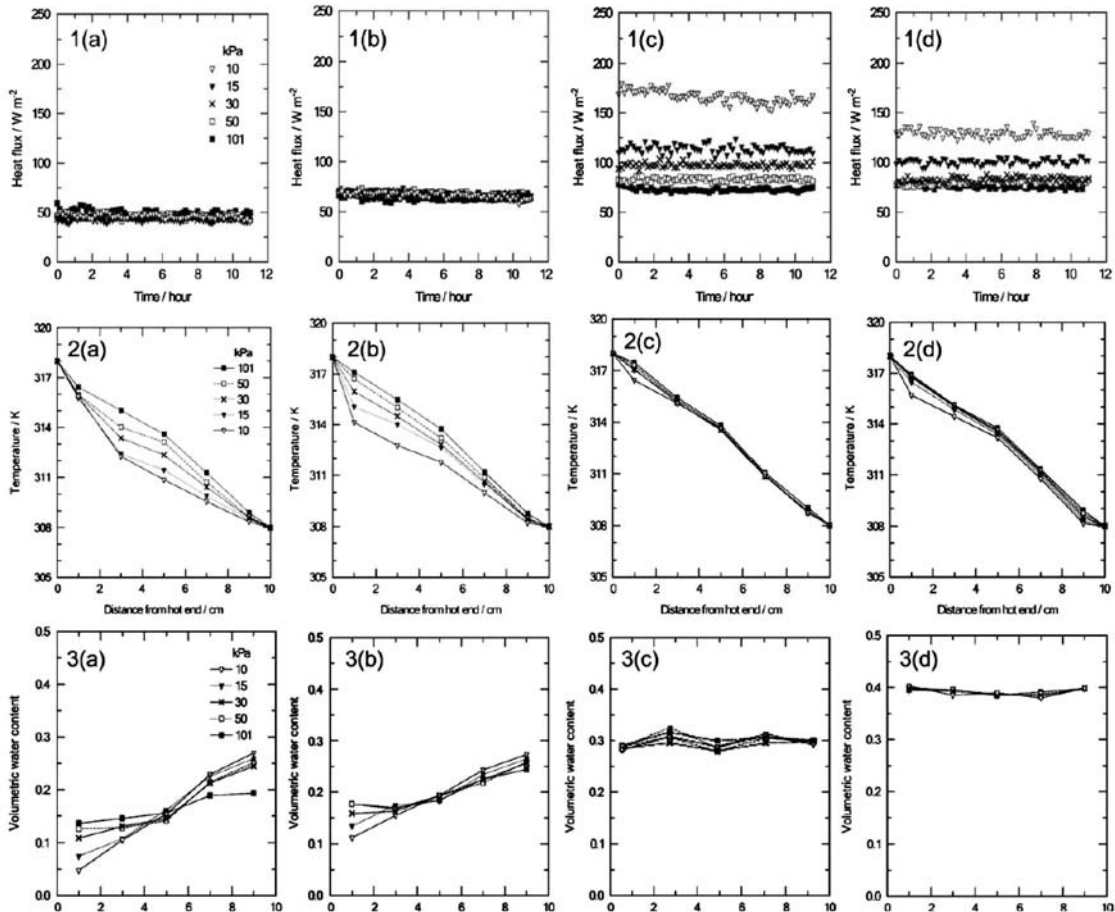


Fig. 10 定常温度勾配下の減圧状態の、1: 熱フラックス, 2: 温度, 3: 水分量の変化。
(初期水分 a:0.15, b:0.20, c:0.30, d:0.40) (Sakaguchi et al., 2009)

文がないため、どのような構成にするかに手間取った。

最初、装置の開発の経緯をそのまま論文にして投稿した。しかし、レフリーの理解が全く得られなかった。ほぼ却下で返ってきた。論文の意図が不明と取られたのである。

そこで、論文の構成を根本から変え、定常熱伝導測定装置である Guarded-hot-plate method (ASTM-C177) (ASTMは日本のJISに相当するアメリカ材料試験協会の規格)を減圧下の土の定常熱伝導率を測定するために改良したという構成にして再投稿した。実際は、最初から ASTM-C177 の存在を知っていたのではなかった。しかし、いろいろ調べていくうちにこの規格に出会い、やや、強引ではあるがこの規格を改良したという筋書きにすれば、納得が得られるのではないかと考えたからである。

論文の結論部分には、Gurrらの実験結果を液島モデルでは説明できないことを書き、併せて次の論文への伏線も忘れずに入れた。

“These experimental facts are entirely at odds with the interpretation by Gurr et al. (1952), although they obtained similar results to ours. In their conclusion, the maximum vapour transfer occurred when the largest gradient of water content was formed. Their misunderstanding may have been the result of not having a heat flux measurement. In addition, we found that the liquid island theory did not explain the maximum vapour transfer in the soil. The mechanism of vapour transfer requires further examination.”

こうして、ようやくこの論文は受理された (Momose et al., 2008)。最初に投稿してから3年が経過した。百瀬から論文が受理されたというメールがポスト先のカナダから届いた。百瀬はこの間に退職し、新たな展開を目指してセントメリーズ大の Vlodék Tarnawski 教授の下にいた。長い3年間であった。

6. ヒートパイプ現象の証明と論文化

先にも述べたように、この装置を使って、辛抱強く精密な実験を繰り返したのは坂口である。彼は、この実験に博士課程の大半を費やした。この論文だけでなく、関連した興味ある実験結果を投稿して受理されている (Sakaguchi et al., 2007)。

この論文も液島モデルに疑問を投げかける重要な視点の1つとなった。通常、土の熱伝導率は、Fig.1に示したように、温度上昇に伴って増加する。ところが、低水分状態の砂では、温度が上昇するほど熱伝導率が低下するという、これまでの常識とは逆の実験結果を得た (この現象は、砂のみにみられるものであり、ほんの少しの粘土(このときはカオリンを重量比3%)を混合しただけで、その現象はみられなくなる)。その現象が生じた低水分状態とは、水分率 $0.03-0.05\text{m}^3\text{m}^{-3}$ 付近 (水分ポテンシャルで -10Jkg^{-1} 付近) であり、液島の存在が十分に考えられる水分域であった。つまり、液島が存在する条件下でも、水蒸気移動が大きくなるを見いだした。Sakaguchi et al. (2007) ではこの現象と、液島よりも土粒子表面の水膜を重視したメカニズムについて報告した。

ヒートパイプ現象であることの証明の論文構成をどうするか、長い時間をかけて論議した。タイトルは簡潔に、“Heat pipe phenomenon in soil under reduced air pressure” とした。

6.1 マイクロ・ヒートパイプ・モデル

論文を書き進めるうちに、土がヒートパイプのように機能するという説明に1点だけ矛盾があることに気付いた。それは、前述したようにヒートパイプでは高温端と低温端を結ぶ中間領域では、温度がほとんど変化しない。一方、土のカラムでは、高温端と低温端の間で温度が線形に低下していることである。この矛盾は、土がマイクロヒートパイプの連続体であるということの説明できる

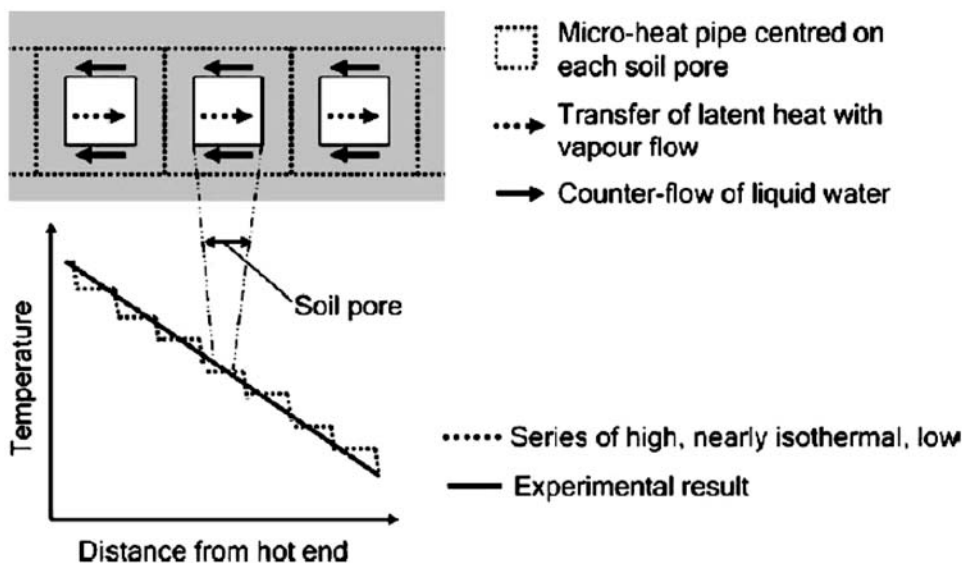


Fig. 11 マイクロ・ヒートパイプモデルの概念図 (Sakaguchi et al., 2009)

と考えた。土の小さな間隙の一つひとつがヒートパイプであり、その小さなヒートパイプが連続したものが土である、という説明である (Fig. 11)。

6. 2 最後の難問

投稿した論文のレフリーとのやり取りが終ったあと、エディターから最後の難問が提起された。それは、「減圧という実験条件と現存する土との関わりは何なのか」という問題だった。これに答えなければ受理できないというのである。正直、このような設問を受けることは予想もしていなかった。減圧下で熱伝導率が大きくなる事実があり、それを証明できたのであればそれで十分ではないか、と考えたからである。しかし、答えなければ通らない。そこで、思い切って火星の土 (レゴリス) の解析にも使えるかも知れない、とイントロ部分で書くことにした。

“The experimental changes in air pressure that we used reflect those that might be experienced by regoliths on planets such as Mars.”

結果は、即、OKであった。

こうして、ようやく論文は受け入れられた (Sakaguchi et al., 2009)。長い道のりであった。論文は2009年1月に電子版に掲載され、2月に印刷出版された。

7. 終わりに

「古典を読む」ことから出発して、そこにある矛盾を明らかにし、その矛盾をどう克服することができたのかという、いわば内輪話を紹介させていただいた。

液島モデルが出てから50年以上が経過した。そしてようやくそのモデルを克服するマイクロ・ヒートパイプ・モデルに到達することができた。その間に計測装置の基本部分であるサーモモジュール、TDR法、データロガーなどが進歩したことにより、私たちの取り組みが初めて可能になったといえよう。

しかし、これで終わりではなく、むしろ新たなスタートと考えている。

たとえば、この実験は減圧ということもあり、密閉に近い状態で得られた。しかし、現実の土は密閉状態ではなく、大気と接しているオープンシステムである。このシステムのなかでどのようなエネルギーと物質の輸送現象が生じ、それが地球環境のなかでどのように機能しているのだろうか。さらに、土が持っているヒートパイプとしての機能をより発揮させる技術開発も可能ではないだろうか。一方、ここで示したようにヒートパイプ現象は土のすべての水分域で生じているわけではなく、液島モデルを完全に否定したわけでもない。あらためて液島モデルの再評価も必要になるであろう。また、温度勾配下の現象は熱力学的平衡 (熱平衡) 状態ではない。この条件下で熱平衡を仮定したこれまでの水分ポテンシャルの考え方では扱いきれない部分も生じているであろう。このため非平衡の理論・方法の導入も不可欠であろう。すべて今後に残された課題だと考えている。

多くの方々のご協力をいただいたこともあらためて記

しておきたい。

圧力調整機を教えていただいた鳥取大の井上光弘氏、水分拡散係数の測定法をご教示いただいた長谷川周一氏 (現・北大名誉教授)、装置の改良にご協力いただいた東京理工 (株) の萩原清市氏、私たちの知らなかった多くの論文を紹介していただいたセントメリーズ大の Vloděk Tarnawski 教授、失敗の多い実験に果敢に挑戦してくれた多くの卒業研究生のみなさん、などなど。

また、論文を書くなかで出会ったすばらしいレフリーの方たちへも心から感謝したい。かな釘流の下手な英語を見違えるように直していただいたり、中には関連する論文を送っていただいた方もあった。編集長以外、名前はすべて不明である。編集長とともにレフリーの方々からは著者と一緒に科学を発展させようという、あつい志を感じることができた。

最後に蛇足になるが、単純な「わかりやすさ」は、時に危険な落とし穴を内包していることがある、とつくづく思う。これをいったん受け入れてしまうと、長い間混乱が継続する。それは、ここで紹介した液島モデルに限らない。とくにそれが“著名”な研究者によって提案される場合である。その落とし穴から抜け出すには、どうしたらいいのか。私たち一人ひとりが考えるべき大切な課題だと思う。

引用文献

- ASTM C177 (2004) : Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. ASTM International. West Conshohocken, PA [WWW document]. URL <http://www.astm.org>
- Cass, A., Campbell, G.S. and Jones, T.L. (1984) : Enhancement of thermal water vapor diffusion in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 48:25-32.
- Dunn, P.D. and Reay, D.A. (1978) : Heat pipes, 伊藤謹司訳, p.3, 学敵社, 東京
- Gurr, C.G., Marshall, T.J. & Hutton, J.T. (1952) : Movement of water in soil due to a temperature gradient. *Soil Science*, 74:335-345.
- 長谷川周一 (1998) : 畑作土の -0.1MPa 以下の透水係数の値, *土壤肥料学会誌*, 第70巻:194-197.
- Hiraiwa Y. and Kasubuchi T. (2000) : Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75°C). *European Journal of Soil Science*, 51:211-218.
- Horton, R., P.J. Wierenga, and D.R. Nielsen (1982) : A rapid technique for obtaining uniform water content distributions in unsaturated soil columns. *Soil Science*.133:397-399.
- 粕測辰昭, 中野政詩 (1989) : 講座「土の中の物質移動 (その9)」 - 熱エネルギーと物質移動との関係 - . *農業土木学会誌*, 57:237-241.
- 宮崎毅 (1976) : 温度勾配下の不飽和水分移動. *土壤の物理性*,

- 34:21-31.
- 望月秀俊, 宮崎毅, 中野政詩 (1998) : 豊浦砂の熱伝導率の塩類依存性, 農業土木学会論文集, 198:41-46.
- Momose, T. and Kasubuchi, T. (2002) : Effect of reduced air pressure on soil thermal conductivity over a wide range of water content and temperature. *European Journal of Soil Science*, 53:599-606.
- Momose, T. and Kasubuchi, T. (2004) : Estimation of the thermal separation of soil particles from the thermal conductivity under reduced air pressure. *European Journal of Soil Science*, 55:193-199.
- Momose, T., Sakaguchi, I. and Kasubuchi, T. (2008) : Development of an apparatus for measuring one-dimensional steady-state heat flux of soil under reduced air pressure. *European Journal of Soil Science*, 59:982-989.
- Philip, J.R. and de Vries, D.A. (1957) : Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38 : 222-232.
- Sakaguchi, I., Momose, T. and Kasubuchi, T. (2007) : Decrease in thermal conductivity with increasing temperature in nearly dry sandy soil. *European Journal of Soil Science*, 58:92-97.
- Sakaguchi I., Momose T. Mochizuki H. and T. Kasubuchi (2009) : Heat pipe phenomenon in soil under reduced air pressure *European Journal of Soil Science*, 60:110-115.
- 坂井 勝, 取出伸夫 (2006) : J.R. Philip and de Vries 著「温度勾配下における多孔質体中の水分移動について」. 土壌の物理性, 103:105-112.
- 塩沢 昌 (1991) : 米国での水と熱の移動の研究, 土壌物理部会集会報告集 : 1-16.

要 旨

Philip ら (1957) の提案した液島モデルのもつ問題点を, Gurr らの実験データ (1952) とあわせて検討し, 液島モデルには, ①土粒子を覆う水膜がないこと, ②水蒸気移動が最大になるときの初期水分値が低いことを示した. この問題点を克服するには, 土がヒートパイプ現象を有することを明らかにする必要がある. そのため最終的に, 減圧下で定常温度勾配を与えた土の熱流量と水分量とを同時に測定できる定常熱フラックス測定装置を開発するとともに, それを用いて火山灰土について気圧, 水分量を変えた実験を行った. この結果, 中・高水分量域において, 土がヒートパイプとして機能することを明らかにし, マイクロ・ヒートパイプモデルとして表現した.

キーワード : 液島モデル, 温度勾配下の物質移動, 定常熱フラックス測定, マイクロ・ヒートパイプモデル