

環境工学における土壌物理学の役割

小松登志子*・Per Moldrup**

The Emerging Role of Soil Physics in Environmental Engineering

Toshiko KOMATSU* and Per MOLDRUP**

* Department of Biological and Environmental Science, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan

** Department of Life Sciences, Section for Environmental Engineering, Aalborg University, DK-9000 Aalborg, Denmark

Abstract

Historically, soil physics research in Japan and worldwide has focused on soil-water physics with a majority of studies on cultivated surface soils, and with the objective of optimizing water supply to plants and minimize leaching of pesticides and nutrients below the root zone. Recently, transport, fate and emissions of greenhouse gases such as carbon dioxide and methane is an area where rapidly growing environmental concerns about global warming and climate effects has provided new challenges for soil physicists.

Another important challenge originates from the increasing problems in most urban areas with contaminated sites, where soil and groundwater have been polluted with EICs (Environmental Impact Chemicals) including gasoline and chlorinated compounds. To respond to these challenges, a broader focus in soil physics research and more emphasis on soil physical properties and processes in an environmental engineering perspective is needed.

Improved understanding and better predictive models together with reliable in-situ measurement methods for a larger variety of soil physical parameters can give soil physicists a major role within the rapidly emerging research field that combines environmental engineering and polluted soil science ; soil environmental engineering. Detailed knowledge of soil physical processes in all three soil compartments (the soil-air, water and particle phases) is the platform for soil environmental engineering, including :

- Realistic calculations of transport and fate of EICs at contaminated soil sites
- Risk assessments concerning indoor and outdoor air and groundwater pollution
- Development and optimization of remediation methods for soil and groundwater

In this perspective, future soil physics research should focus on chemical diffusion, sorption, release, and convective transport in both the soil-water and soil-air phases and, also, evaluate the significance of particle-facilitated chemical transport through soil. As examples of less investigated soil physical parameters that are key parameters in soil environmental engineering, we advocate the importance of gas and solute diffusivity, air permeability, and vapor sorption coefficients in relation to both risk assessment and to remediation by soil vapor extraction and pump and treat methods.

For soil environmental engineering purposes, not only the surface soil but the entire vadose zone between the soil surface and the groundwater table should be considered during studies of

* 埼玉大学大学院理工学研究科生物環境科学, 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

キーワード : 土壌物理学, 環境工学, 物質の移動と運命, 環境インパクト化学物質, 汚染土壌浄化工法

soil physical parameters. The dominating role of soil-physical processes in controlling and optimizing biodegradation of pollutants during soil remediation should be investigated and highlighted. With this emerging role of soil physics in environmental engineering combined with the rapid developments in process understanding and non-destructive measurement equipments, we are on the brink of an exciting new era in soil physics.

Key words : Soil Physics, Environmental Engineering, Fate and Transport of Chemicals, Environmental Impact Chemicals (EICs), Soil Remediation

1. 土壌物理学と環境工学

『環境工学』における「土壌物理学」の役割』という重要な問題を論じる際には、まずそれぞれの定義をはっきりさせる必要がある。では「土壌物理学」とはいったい何か。意外にこの定義がどこにも書かれていない。そこで、土壌物理学学会会長の長谷川周一教授にお聞きしたところ、アメリカ土壌科学会用語集に記載されているという情報をいただいた。比較的簡単な定義だが、以下に引用する (SSSA, 2001)。

“Soil physics : The branch of soil science that deals with the physical properties of the soil, with emphasis on the state and transport of matter (especially water) and energy in the soil.”

また以下は、長谷川会長の「土壌物理感」であり (e-mail, 2004.4)、歴史的な経過が要約されていて「土壌物理小史」ともいえるので、そのまま引用させていただきます。

『土壌物理は水の乏しい国で農業を行うために発展した。したがって、水持ちとか灌漑 (土への水の浸入) が主であった。1931年に土壌水移動式 (ダルシー則) と連続の式を組み合わせた水移動の一般式ができあがった。測定法の開発や解析法の進歩で、1970年代には水移動は大体の条件下で解けるようになった。したがって土壌物理の論文数も少なくなってきたと思う。ところが、環境問題が出てきて、土壌物理研究は再び活性化した。その理由は、環境問題には予測が要求されたことや土壌物理は昔から移動を扱うのが得意であったことと深く関わっていると思う。しかし、それまで土を均一と見なして実験、解析してきた土壌物理は、結局予測は無理であり、現在はモニタリングと合わせて移動を追っている最中と理解して良いだろう。水田や畑を対象としてきたが、水だけだったら多少多かろうが問題なかったのが、栄養塩などが入ってきて困ったというのが実情であろう。』

もう一つ、別の方法で土壌物理学の概要を知るには、土壌物理学の教科書の内容をみれば良いだろう。そこで土壌物理の教科書として世界で最も広く用いられている Daniel Hillel の著書をあげてみると、以下の通りであ

る。

- Fundamentals of Soil Physics. 1980
- Applications of Soil Physics. 1980
- Introduction to Soil Physics. 1982
- Environmental Soil Physics. 1998
(all Academic Press)

この他にも Jury and Horton (2004) や Warrick (2000) の著書もあるが、土壌物理学の本には基本的に以下のような項目が含まれている。

1. General soil physical characteristics
2. The soil solid phase
3. The soil water phase
4. The soil gaseous phase
(2-4. including key parameter and transport properties)
5. Soil temperature and heat flow

また、上述の Hillel の本の題名をみると、最新のものには “Environmental” がついているのが興味深い。長谷川による「土壌物理小史」にも初めは農業と密接に関連していた土壌物理学が、最近では環境分野にも必要とされるようになってきたことが述べられている。

では、次に「環境工学」とは何か。やや古い本であるが「環境工学入門」に、以下のように定義されているので、一例として引用する (鍋島淑郎, 1997)。

『環境工学』とは、環境科学を基礎として衛生工学、生産工学、安全工学などを加え、人間活動と環境との調和について、総合的に調査研究する学問の分野をいい、上・下水道、大気汚染、廃棄物処理、給排水設備、空気調和、騒音・振動、農薬、食品添加物等の工学的研究は環境汚染の防止技術を扱うものであり、極めて広範な領域にわたっている。』

このように環境工学が扱う分野は広範囲に及んでいるが、この中で土壌物理に関連する分野としては土壌や地盤環境に関するものであろう。具体的には「温室効果ガスの土壌からの放出」や「土壌・地下水汚染」が挙げられる。

土壌物理は、もともと農業において重要な水の移動、肥料や農薬の移動に重点があったため、これまで水と溶

質の挙動については数多くの研究がなされてきたが、土壌内の気体の挙動についての研究例は極めて少ない。近年の地球規模での環境問題の一つである温暖化に関しては、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄) などの温室効果ガスの挙動と土壌からの放出を予測する必要がある。これは土壌物理の範疇に入るもので、今後この領域の研究を大いに進めていくべきである。

土壌・地下水汚染については、地下水を飲用とする割合の高い欧米では早くから問題となっていたが、最近、日本でもこの問題が顕在化してきた。本稿では、主としてこの土壌・地下水汚染に着目し、その解決のために土壌物理学が果たすべき役割を考えてみる。なお、Hillel の著書 (環境土壌物理学) においても、とくに汚染土壌修復工法における土壌物理学の適用について述べられているので参照されたい (Hillel, 1998)。

2. 日本における土壌汚染・地下水汚染の現状

まず、日本における土壌汚染・地下水汚染はどのような現状にあるのか。Fig. 1 に土壌汚染事例数の経年変化を示す (環境省環境管理局, 2005)。土壌環境基準が制定された 1991 年頃から調査件数が増え、それに伴って基準を超えた土壌汚染事例も増加していることがわかる。この増加は単純に最近になって汚染件数が増加したとみなすこともできるが、1991 年以前は調査件数そのものが少なかったため、汚染が不明であったものも多いとも考えられる。土壌・地下水の汚染は直接目で見ることができないため分かりにくく、発見が遅れる場合が多いのである。

このような状況の中で、「土壌汚染対策法」が平成 14 年 5 月 (2002 年) に制定、平成 15 年 2 月 (2003 年) に施行されたが、これは、水質汚濁防止法 (1970)、大気汚染防止法 (1970) 等と比べると、はるかに遅れて制定されたものであることがわかる (小松, 2004 参照)。

次に、土壌汚染を引き起こした汚染物質にはどのようなものがあるのかについて Fig. 2 に示す。重金属類では鉛、ヒ素、六価クロムなどが多く検出されており、揮発性有機化合物 (Volatile Organic Chemicals ; VOCs) ではやはり、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなどの検出頻度が高いことがわかる。

また、地下水汚染事例は平成 14 年度の調査結果では、調査井戸実数 5,269 にたいして地下水環境基準を超過した事例が 351 件で、超過率は 6.7% である (平成 16 年版環境白書)。なお、地下水環境基準は、土壌環境基準よりさらに 6 年遅れて、1997 年に定められている。

昔から、汚れたもの、処理に困るもの、有害なものなど、人間に都合の悪いものは土に埋めるということが行われてきた。記憶に新しいところでは、鳥インフルエンザの発生時には何万羽、何十万羽という鶏が土に埋められた。これは強烈な土壌汚染であり、地下水汚染を引き起こす可能性も高い。

今後いろいろな調査が進むにつれ、さらに多くの土壌・地下水汚染事例が顕在化してくる恐れは大きいと考えられる。

3. 汚染物質の挙動とリスクアセスメント

それでは、土壌環境中でどのような汚染物質がどのよ

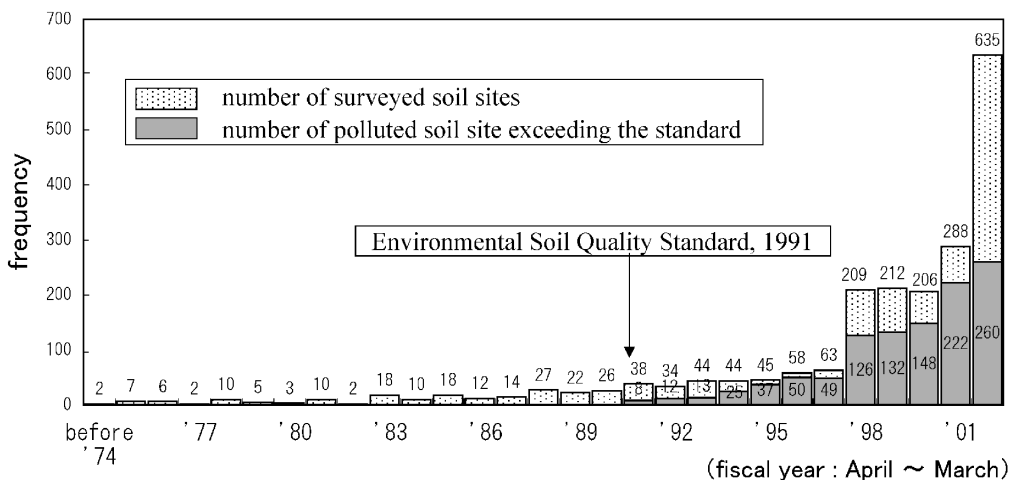


Fig. 1 Relative number of polluted soil sites exceeding the environmental soil quality standard (data from Ministry of the Environment, 2005).

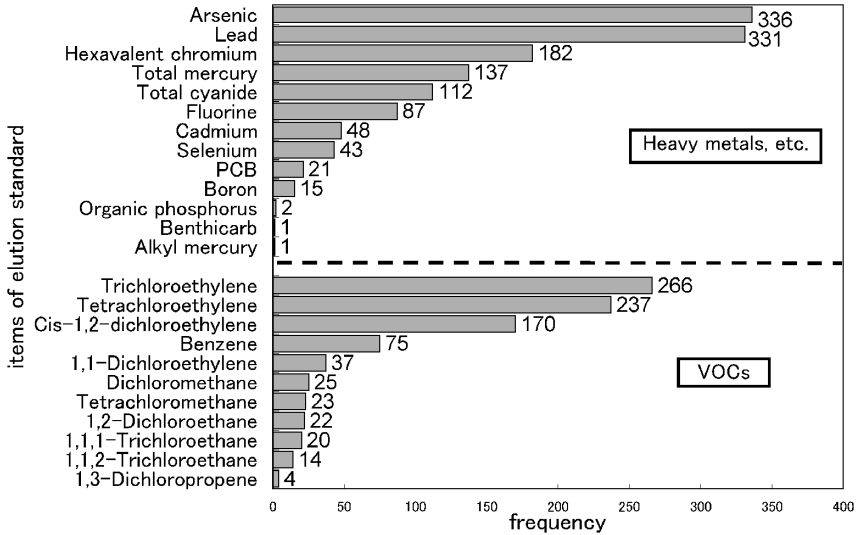


Fig. 2 Frequency of detected contaminants at 1082 polluted soil sites in Japan (~2003.3). (data from Ministry of the Environment, 2005).

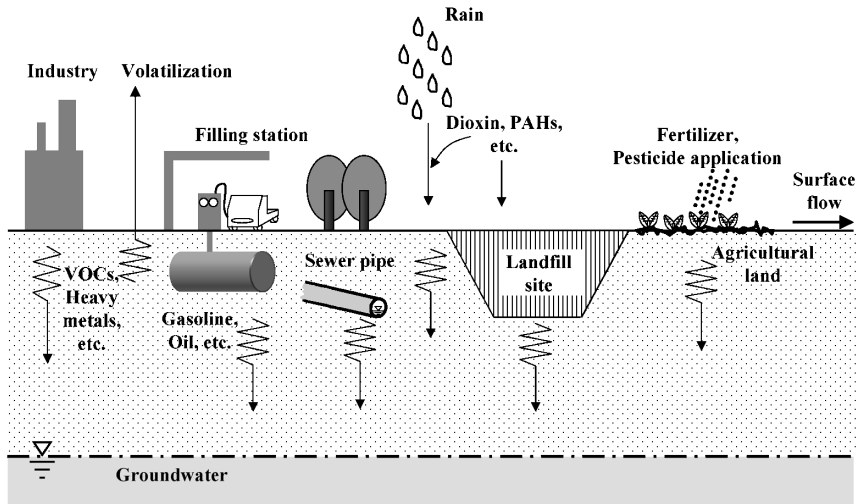


Fig. 3 Fate and transport of Environmental Impact Chemicals (EICs).

うに挙動するのか。汚染物質としては様々なものが考えられるが、著書らは、トリクロロエチレンなどの VOCs、農薬、多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ; PAHs)、また毒性物質ではないが、水域の富栄養化の原因物質となる窒素、リンなどの化学物質をまとめて環境インパクト化学物質 (Environmental Impact Chemicals ; EICs) と呼んでいる。Fig. 3に EICs の挙動のいくつかの例を示す。事業場からの VOCs、重金属等の漏出、地下タンクからのガソリンや

オイルの漏れ、下水管からの汚水の漏れ、廃棄物埋め立て地からの有害物質の漏出、農地やゴルフ場での肥料・農薬の散布、大気中のダイオキシン、PAHs の降下など、様々な原因と過程から EICs は土壤環境に浸入し、土壤中にたまったり (hot spot)、地下水へ到達したり、植物に吸収されたりする。また、揮発性のは土壤から大気へと出て行く。

このような多種多様の EICs が多種多様のプロセスを通して、移動・変換していく。この運命予測を行うのが

いうまでもなく土壌物理学の役割である。運命予測を行うためには、まず、EICs の測定による動態の把握が第一であり、そのためには正確で簡便な測定法、とくに現場での測定法の開発も重要である。正確な実測データに基づいたモデル化により、これらの EICs の「運命と移動 (Fate and Transport)」予測を行うことが、リスクアセスメントにつながる。

土壌中に漏出した VOCs などが拡散により、大気中へ揮発していくと、大気汚染を引き起こし、建物内に侵入すれば屋内空気汚染を引き起こす。リスクアセスメントは、hot spot から地表への到達時間 (travel time) や、人の健康や生態系に影響する汚染濃度となるかどうかの予測を行うものである。

逆に EICs が拡散や移流等により、土壌内を下方に浸透して地下水に達すると、地下水汚染を引き起こす。いったん地下水に浸入すると、浄化対策はますます困難になり、たとえ地下水流速が遅くても汚染は拡大してゆく。したがって地下水への到達時間を予測し、早めに対策をとることが重要となる。

土壌は Fig. 4 に示すように固相、液相、気相からなる複雑な系である。土壌内における EICs の挙動を把握するためには、各相間の物質分配と各相での移動を正確に予測する必要がある。そこで、関連するプロセスとパラメタ、測定方法を Table 1 にまとめてみた。ただし、ここにすべてのプロセスが網羅されているわけではないので、例えば、有機塩素化合物、ガソリン、オイルの原液のような非水溶性液体 (Non-Aqueous-Phase Liquid : NAPL) の浸潤については、前述の Hillel の著書を参照されたい (Hillel, 1998)。

また、Table 1 には入れていないが、近年、汚染物質輸送の新しい経路として、コロイド粒子による物質移動 (particle-facilitated chemical transport) が注目されるようになった。Nature 誌にも地下水には溶けにくいプルトニウムがコロイドによって長距離運ばれたという報告がある (Kersting, *et al.*, 1999)。著者らも数年前から、コロイドの生成、流出、汚染物質輸送に関する研究を行っている (e.g. 本下ら, 2001, Schelde, *et al.*, 2002, Motoshita, *et al.*, 2003)。

なお、本稿では研究紹介もかねて、主として著者らの

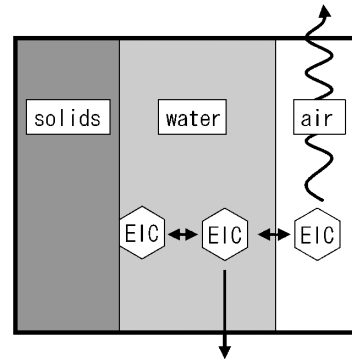


Fig. 4 The three physical phases (solids, water, air) of a soil system. Environmental Impact Chemicals (EICs) can distribute among the three phases and can be transported by all three phases (colloid-facilitated transport, solute transport, and gas transport).

Table 1 Soil physical and physical-chemical processes and measurement methods

Processes in soils	Parameters	Measurement methods*
Unsaturated and saturated water flow	unsaturated and saturated hydraulic conductivity	TDR (Time Domain Reflectometry) and mini-TDR
Solute dispersion and diffusion	dispersivity and solute diffusivity	EC sensors (electrical conductivity sensors), HPLC micro-column method**, and undisturbed half-cell methods***
Air and gas transport	air permeability, gas diffusivity	air permeameter, GC micro-column method****, and gas diffusion chambers
Heat transport	thermal conductivity	heat probes
Physical/Physical-chemical sorption (hydrophobic sorption)	linear or Freundlich sorption coefficient, vapor sorption coefficient	batch and column set-ups, and HPLC and GC micro-column methods****

*Dane and Top (2002), **Komatsu (2002), ***Olesen (2000), ****Yamaguchi (Komatsu) (1997).

従来の研究を中心に引用させていただく。

Table 1の中で、疎水性吸着は化学物質の土壌有機物への吸着であり、化学物質の局所的拡散に支配されるため、物理吸着あるいは物理化学的吸着といえる。一般には吸着・脱離は土壌化学の範疇と考えられるが、物質移動を制御する点から土壌物理の取り扱い範囲でもある。例えば、吸着係数は移流分散方程式 (Convection Dispersion Equation ; CDE) の中に遅延係数 (retardation factor) として取り込まれる。もちろん拡散についても同様である (Fick's law)。

同様に土壌内における微生物反応も物質移動の観点から土壌物理の範疇にも含まれると考えてよいだろう。例えば、肥料として散布されたアンモニウム塩 (NH_4^+) は土壌に吸着 (イオン交換) するが、それが硝化反応により硝酸イオン (NO_3^-) に変換されると、負イオンであるため、土壌から離れて地下水へ浸入していく。

また、VOCsのような揮発性の物質には、気液平衡を表すヘンリー則 (Henry's law) を適用して、液相、気相間の平衡濃度を推定する必要がある。

このように、土壌物理は広い範囲のプロセスを含むあるいは統合するものと考えられる。もちろん、土壌化学、土壌微生物学などとの相互の補完が必要である。

さらに、土壌という媒体そのものの性質も当然、物質移動に大きな影響を与える。物質移動予測モデルには、土性、粒度分布、土壌間隙分布、保水性 (Campbellの保水係数)、CEC、pH、有機物含有量等のパラメータをできるだけ取り込むことが必要である。それによって、土壌の物理特性を反映したより正確な予測モデルとなりうる。

ここで、環境工学における土壌物理の担当領域を大まかにまとめてみると、次のようになると考えられる。

- (1) 汚染土壌サイトにおけるEICsの移動と運命予測
- (2) 大気・室内空気汚染、地下水汚染のリスクアセスメント
- (3) 汚染土壌・地下水の浄化 (修復) 工法の開発と最適化

これらはいずれも密接に関係している課題である。著者らも(1)、(2)に関連した研究を行っており、通気係数、透水係数、気体と溶質の拡散に関する予測モデルを提案している (e.g. Moldrup, *et al.*, 2003a, Poulsen, *et al.*, 2004, Moldrup, *et al.*, 2004, Moldrup, *et al.*, 2003b)。さらに(3)に関連した研究も行っているが、汚染土壌浄化工法については次節で述べる。

4. 汚染土壌・地下水浄化工法

汚染された土壌・地下水の浄化 (clean-up) あるいは修復 (remediation) には様々な工法がある。浄化工法は

まず、汚染土壌を掘削・除去する方法 (Excavation)、現場 (原位置) で浄化する方法 (in situ Treatment) の2つに分けられる。原位置浄化法には、物理的除去法 (Removal)、微生物分解法 (Bioremediation)、化学的処理法 (Chemical Treatment) などがあげられる (Pepper *et al.*, 1996)。

ここではその中で土壌ガス吸引法と揚水処理法のみについて概説する。

4.1 土壌ガス吸引法

VOCsの修復工法として最も広く用いられているのは土壌ガス吸引法 (Soil Vapor Extraction ; SVE) である。このSVE工法は、Fig. 5に示すように、土壌中のVOCを気体として吸引・除去する方法である。アメリカのスーパーファンド法 (superfund act) で指定された汚染サイトではVOCs浄化法の約27% (1977年) がこのSVE工法であるといわれる (USACE, 2002)。

この工法ではトリクロロエチレン等のVOCsを気体として真空ポンプで吸引して土壌内から取り除くため、空気とVOCガスの流れが問題である。透水係数に相当する通気係数 (air permeability) が重要なパラメータとなる (Table1参照)。また、ガスの土壌への吸着 (遅延) を考える必要がある。土壌が乾燥している場合にはガスは直接土壌へ吸着するが、土壌水分がある場合には気液平衡、固液平衡を考慮する (Fig. 4参照)。VOCsの土壌への吸着力が強い場合には浄化効率を下がる。吸着は土壌水分との競合性があるので (乾燥土壌へのガス吸着は大きい)、土壌水分の把握も重要となる。

著者らはSVE工法に関連しては、現場での通気係数測定法 (Iversen, *et al.*, 2003)、気体の遅延係数直接測定法 (Yamaguchi (Komatsu), *et al.*, 1997)、気体の土壌吸着 (Yamaguchi (Komatsu), *et al.*, 1999)、SVE工法の最適化 (Poulsen, *et al.*, 1998, 1999) などの研究を行ってきた。

4.2 揚水処理法

揚水処理法 (pump and treat) はFig. 6に示すように、汚染域 (contaminant plume) が地下水中にある場合に、地下水とともに汚染物質を汲み上げて処理する方法である。この方法もSVE工法とともに広く用いられてきた。地下水の汲み上げにより地下水位が下がるので、処理された水を再度、注入井から注入する。注入井は、汚染域の上流側か、汚染域から離れたところに設置する必要がある。

この方法においては、汚染物質を水とともに汲み上げるため、透水係数、土壌への汚染物質吸着などが重要なパラメータとなる。従来、水と溶質の移動に関しては多くの研究がなされてきたが、著者らの研究例としては、溶

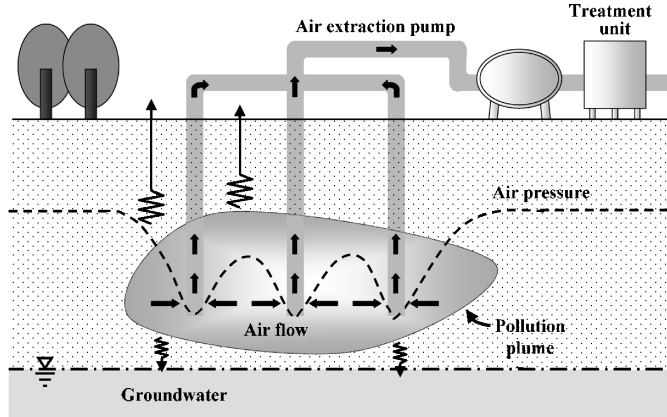


Fig. 5 Schematic illustration of a Soil Vapor Extraction (SVE) system.

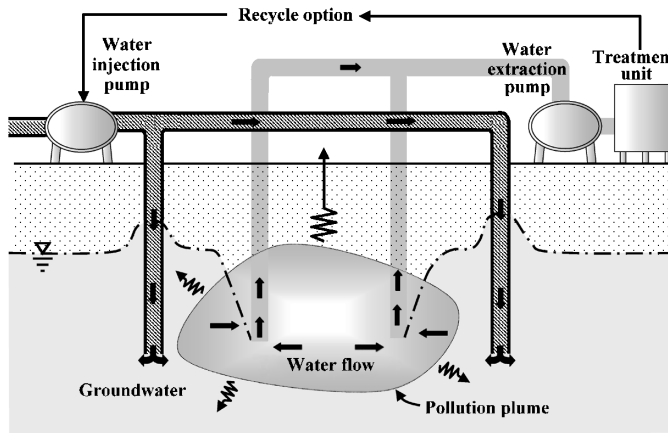


Fig. 6 Schematic illustration of a pump and treat system setup.

質の流速，分散係数同定法 (Yamaguchi (Komatsu), *et al.*, 1989)，溶質の遅延係数直接測定法 (Komatsu, *et al.*, 2002)，透水係数予測モデル (Poulsen, *et al.*, 2004) などである。

5. 今後の課題

環境工学における土壌物理学の重要な役割について述べてきたが，今後取り組んでいくべきいくつかの課題について簡単にまとめる。

その一つは，3節で述べたコロイドによる汚染物質の輸送促進である。これについては未解明の部分が多く，コロイドの生成と移動，コロイドへの汚染物質の吸着性，マクロポアの影響等，様々なテーマが考えられる。

流動水 (mobile water)，付着水 (immobile water) の問題もある。実際には，Fig. 4 の土壌水の部分はこ

2つの領域になっているはずである。土壌に吸着している物質やコロイド粒子は immobile water の中で濃度拡散によって移動し，mobile water へと出て行く。逆の場合も同様である。

また，土粒子内間隙 (intra-particle pore) に関する研究も興味ある領域である。例えばアロフェンのように，粒子内に間隙がある場合には，汚染物質は拡散により，その間隙に入っていく，内部での吸着・脱離も起こる。汚染物質の挙動は複雑となり，吸着の非線形性，時間依存性などを考慮した新しいモデルが必要となる。

さらに汚染土壌浄化法に関しては，今後，物理的・化学的方法より，微生物分解による Bioremediation が主流となっていくものと思われる。この工法についてもまだに多くの課題があり，土壌物理学の持つ知識の蓄積を生かすことのできる領域の一つである。

本文では触れなかったが、高温を発する放射性廃棄物の地下埋設や汚染土壌の原位置熱処理などに関連して、土壌内の熱伝導も今後の重要な研究課題である。

いずれにしても工学の基礎は科学であり、環境工学の中の土壌環境に関する領域において、基礎科学としての土壌物理学の果たすべき役割は大きいと考えられる。

引用文献

- Dane, J.H. and Topp, G.C. eds. (2002) : *Methods of Soil Analysis : Part 4 : Physical Methods*, SSSA Book Series No. 5, Madison, WI.
- Hillel, D. (1998) : *Application of Soil Physics to Remediation of Hazardous Waste Sites*, Environmental Soil Physics, Part III, Chapter 2 : 677-690, Academic Press.
- Iversen, B.V., Moldrup, P., Schjønning, P. and Jacobsen, O.H. (2003) : Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. *Vadose Zone Journal*, **2** : 618-626.
- Jury, W.A. and Horton, R. (2004) : *Soil Physics*, 6th edition, John Wiley & Sons.
- 環境省 (2004) : 平成16年版環境白書, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/hakusyo.php3?kid=219>
- 環境省環境管理局水環境部 (2005) : 平成14年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要, <http://www.env.go.jp/water/report/h16-05/index.html>.
- Kersting, A.B., Efurud, D.W., Finnegan, D.L., Rokop, D. J., Smith, D.K. and Thompson, J.L. (1999) : Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. *NATURE* 397 (7 JANUARY) : 56-59.
- 小松登志子 (2004) : 土壌汚染の現状と法的規制, 水, 46-1 (651) : 22-29.
- Komatsu, T., Kawashima, H., Motoshita, M., Moldrup, P., Ozaki, N. and Fukushima, T. (2002) Retardation of multiple Environmental Impact Chemicals in soils : Direct measurements by impulse type HPLC Micro-column method. *Environmental Engineering Research* 39 : 167-482. (環境工学研究論文集)
- Moldrup, P., Yoshikawa, S., Olesen, T., Komatsu, T. and Rolston, D.E. (2003 a) Air permeability in undisturbed volcanic ash soils : Predictive model test and soil structure fingerprint. *Soil Science Society of America Journal*, **67** (1) : 32-40.
- Moldrup, P., Olesen, T., Komatsu, T., Yoshikawa, S., Schjønning, P. and Rolston, D.E. (2003 b) : Modeling diffusion and reaction in soils : X. A unifying model for solute and gas diffusivity in unsaturated soil. *Soil Science*, **168** (5) : 321-337.
- Moldrup, P., Olesen, T., Yoshikawa, S., Komatsu, T. and Rolston, D.E. (2004) : Three-porosity model for predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil. *Soil Science Society of America Journal*, **68** (3) : 750-759.
- Motoshita M., Komatsu, T., Moldrup, P., de Jonge, L. W., Ozaki, N. and Fukushima, T. (2003) : Soil constituent facilitated transport of phosphorus from a high-p surface soil, *Soils and Foundations*, **43** (3) : 105-115.
- 本下晶晴・小松登志子・Moldrup, P.・尾崎則篤・福島武彦 (2001) : 降雨時における土壌カラムからのコロイド粒子の流出挙動, 土木学会論文集 No. 678/VII-19 : 111-122.
- 鍋島淑郎, 他. (1997) : 環境工学入門, 産業図書, p. 73.
- Olesen, T., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Nissen, H.H. and Rolston, D.E. (2000) : Undisturbed half-cell method for measuring the solute diffusion coefficient in unsaturated soil. *Soil Science*, **165** (11) : 835-840.
- Pepper, L., Gerba, C.P. and Brusseau, M.L. (1996) : *Pollution Science*, Academic Press.
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Worsten, H. and Jacobsen, O.H. (2004) : Predicting three-region unsaturated hydraulic conductivity from three soil-water retention points. *Soil Science*, **169** (3) : 157-167.
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Schjønning, P., Masmann, J.W. and Aa. Hansen, J. (1998) : Gas permeability and diffusivity in undisturbed soil : Soil Vapor Extraction implications. *ASCE Journal of Environmental Engineering*, **124** (10) : 979-986.
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Schjønning, P. and Aa. Hansen, J. (1999) : Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil vapor extraction efficiency. *Ground Water Monitoring & Remediation*, **19** (3) : 61-70.
- Schelde, K. Moldrup, P., Jacobsen, O.H., de Jonge, H., de Jonge, L.W. and Komatsu, T. (2002) : Dif-

- fusion-limited mobilization and transport of natural colloids in macroporous soil. *Journal of Vadose Zone Hydrology*, **1** (1) : 125-136.
- Soil Science Society of America (2001) : Glossary of Soil Science Term, <http://www.soils.org/sssagloss/>.
- USACE (US Army Corps of Engineers) (1995) : Military Programs Engineer Manuals, 1110-1-4001, <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/cemp.htm>.
- Warrick, A.W. (2000) : *Soil Physics Companion*, CRC Press.
- Yamaguchi (Komatsu), T., Poulsen, T.G., Moldrup, P. and Fukushima, T. (1999) : Predictive model for adsorption of volatile organic chemicals in soils. *Environmental Engineering Research*, **36** : 477-482.
- Yamaguchi (Komatsu), T., Inoki, H. and Moldrup, P. (1997) : Gas chromatography micro-column method for measuring retardation of volatile organic chemical gas transport in soils. *JSCE Journal of Environmental Systems and Engineering* 559 (VIII-2) : 13-22. (土木学会論文集)
- Yamaguchi, T., Moldrup, P. and Yokosi, S. (1989) : Using breakthrough curves for parameter estimation in the convection-dispersion model of solute transport. *Soil Science Society of America Journal*, **53** (6) : 1635-1641.

受稿年月日 : 2005 年 4 月 26 日

受理年月日 : 2005 年 5 月 23 日