カラム実験

杉田 文*

Laboratory column experiment

Fumi SUGITA *

1. はじめに

野外で採取した土壌や砂をカラムに詰めて溶液を通水するカラム実験は、単純で見た目にもわかりやすく、地中における水や物質の動きを手軽に室内で再現することができる実験手法である。短時間で行うことができるので、学部学生の教育目的ばかりでなく、小学生への環境教育などにも活用できる (Dunnivant and Olsen, 2007)。一方、目的を絞り注意深くおこなえば、精度のよい実験結果をえることが可能なため、汚染物質の輸送パラメータの同定や研究目的のために多くのカラム実験がおこなわれている。

一般的な一次元カラム実験装置の概要を図1に示す。カラム実験装置は、カラム本体、充填する土壌試料、通水する溶液やトレーサのほか、上下流端に流量を制御する装置、および試料水を採水・分析する機器からなる。本稿では主に1次元を想定したカラム実験の手順を追いながら、筆者が過去20年ほどの間に行ってきた1次元、2次元、3次元のカラム/砂箱実験の経験から、カラム実験の持つ特徴や利点を生かし、よりよい精度の実験を行うこつをまとめたい。当然のことながら実験はその目的により、最適な方法が異なる。読者の方にはそれぞれの実験目的を勘案して実験計画を組み立てる際の一助になれば幸いである。

2. 実験装置

2.1 カラムの材質

アクリル、塩化ビニル、ガラス、ステンレスなどがカラムの材質として用いられる。中でも透明で内部を見ることができるアクリルが多く使われる。アクリルは軽くて加工しやすく、カラム中にサンプリングポートなどをつけたい場合などにもむいている。しかし、中の砂の充填を頻繁に繰り返す場合には表面に傷がついてすぐ曇ってしまうため、ガラスの方が適している。現象の可視化の必要がなく、カラムの重量が大きくなる大型カラムや、流す溶液やトレーサの特性によっては、より耐久性のすぐれているステンレスの方が適材であることも多い。しかし、目で見ることにより得られる情報は意外と多いので、ステンレスでも可能であればのぞき窓などを作っておくと便利である。

2.2 カラムの形と大きさ

広い野外を小さいカラム内で再現しようとするカラム実験ではカラム内の現象が側壁の影響を受けないことが望ましい。側壁の影響を最小限にとどめる形状は円柱形とされる。四角柱のような角のある形だと四隅に側壁の影響を受ける比較的高い部分ができてしまうためである。

* 千葉商科大学 ()
Chiba University of Commerce

図1 カラム実験装置の概略

カラムの径は充填する粒子径の40倍以上がよいとされる (Relyea, 1982)。径が大きいほど全体の流れに対する側壁の影響は相対的に小さくなる。一方、径が大きいと1次元実験の場合には流れに垂直方向の断面において材質も流れも一様で1次元流とみなせるという条件を満たすことが難しくなる。

一般的に水みちの形成やその影響を防ぐためにカラム長はカラム径の4倍以上が良いとされるが、カラム断面方向の均質性さえ保たれればカラム径よりも短いカラム長でも十分に有用な実験が可能である。カラム容積が小さい方が小回りが利いて短時間に多種類の実験をおこなうことができ、少ない労力でより多くの情報を手に入れることができる。

2次元の実験の場合には四角柱が使い勝手が良い形状であろう。この場合、観測対象とする2次元の面に対して垂直な方向において側壁の影響が無視できる程度以上の厚みをもたせる必要がある。ただし、この厚みが大きくなると、1次元の

実験と同様、2次元の実験でも仮定される厚み方向における土壌や流れの均質性を保証することが難しくなる。また、2次元実験の場合、厚みを増やすと急激に装置全体の重量が大きくなり、カラム実験の小回りの良さといった特典が失われる。たとえば比較的小型の縦40cm、横50cm、厚さ5cmの2次元カラムに砂と水を詰めることを考えると、砂と水だけで19kg前後となりカラム本体の重量を加えると20kgを超す。この厚みを8cmに増やすと30kgほどになり、人が一人で移動させるのも困難となり、土壌の詰め替えも大作業となってしまう。

改めて考えてみると円柱形のカラム内にも実際には3次元の世界である。したがって、円柱形のカラムで3次元の実験をおこなうことができる (たとえば Wang ほか, 1998など)。

カラム実験を計画する時には、側壁の影響が無視できる大きさが必要である一方、時間的にも空間的にも小回りの利くサイズが望ましいので、実験者は両者の妥協点をみつけてカラムのサイズを

決定することになる。

2.3 カラムの充填

乾いた砂やビーズの場合、カラムの中に丁寧にこれらを詰めていけば簡単に短時間で均一に充填することができる。均一にするために水中で充填する手法がとられることが多いが、粒子の比重の違いによってむしろ層状構造ができてしまうことがあり、注意が必要である。水中充填の場合には粒子が浮かばない程度に水の量を徐々に増やし、かつ、密度を確認しながら充填していくことが望ましい。

不攪乱土壌の場合には側壁との接触面がスムーズで水みちができていないことを確認する必要がある。透明なカラムであれば目視により確認できる。側壁と不攪乱土壌の間を人工的にシールする場合には実験に化学的・物理的影響を与えないような材質を選ばなければならない。

2.4 カラムの上下端

土壌を詰めたカラムの上下端をふさぐために、細かい目の金属製のメッシュ、ろ紙（フィルターペーパー）、ガーゼ、ガラスウール、ポーラスプレートなどが用いられる。これらはできるだけ小さい容積で、土壌の流出を防ぐ一方、溶液や空気は抵抗なく通すものでなければならない。安価なガーゼは溶液を材質内に吸収するので、精密な実験には向かない。ろ紙は安価で容積も小さいが、下流端では目詰まりに注意が必要なほか、メッシュが細かすぎるとろ紙だけでも水の流れの抵抗になることがある。また、種類によっては窒素などを溶出するものもあるので、実験に使用する土壌や溶質と照らして、販売されている多種多様なろ紙の中から慎重に選ばなければならない。ガラスウールは、扱いにくいと溶質と反応をおこしにくく、容積も小さく抑えられ、よい材質である。ポーラスプレートも溶質と反応をおこしにくいとほかの材質にくらべ大きめの容積となるかもしれない。

トレーサ試験のためには上流端のスペース内はトレーサ溶液とスムーズに置換出来る必要あり、そのためのフラッシングポート（図1）を溶液の流入口とは別の2か所に加工してとりつけておく

と便利である。また、トレーサを導入して破過曲線を得ることが目的の場合この上下端のヘッドスペースはデッドゾーンとなり、実験誤差の元なのでできるだけ容積が小さい方がよい。上下端の蓋のシールには市販のシール剤も十分利用できるが、何度も開閉を繰り返す場合にはOリングが用いられることが多い。Oリング上に小さな砂粒がのっていると確実なシールができないことがあるのでパッキングの際には注意が必要である。

2.5 周辺装置・機器

電気伝導度やテンション測定のためのセンサーや採水装置をカラム内に設置するときには、水の流れのさまたげにならないようにできるだけ小さいものを互い違いに設置することが好ましい。カラムのサイズ、センサーの形状、土壌の特性などによるが、可能であれば土壌を充填した後でセンサーなどを挿入する方が土壌との接触の問題が少ないようである。崩れやすい乾いた砂などの場合はその限りでない。

溶液を一定の流量でカラムに送り込むには上下端で圧力を調整するか、上流側で定量ポンプが用いられる。定量ポンプは確実に流速を制御できて便利であるが、従来型のポンプだと圧力が小さく波打つこと（脈動）が避けられないので、実験の求める精度やごく低流量のときには問題となることがある。

流量やマスバランスを確認する意味でも下流端で流出する溶液はすべて採取した方がよい。連続で溶液を時間ごとに採取するためのフラクションコレクターはこの目的のためには便利である。

3. 実験手順

3.1 空気抜き

カラムに土壌を詰めて上下にふたを取り付けると、いよいよ実験開始となる。飽和実験の場合、実験開始前に間隙中の空気または水を通水溶液で置換するが、脱気した溶液をゆっくりと流すだけでは空気がカラム内に取り残されてしまう。二酸化炭素のような水に溶けやすい気体で一度カラム内の空気を置換したのち、溶液と入れ替えてしばらく放置するとカラム内の空気が溶液中にとけて

残りにくい。二酸化炭素の場合、脱気水を導入して浮いてくる気泡を2~3日放置すると目に見える気泡は溶けて無くなる。

3.2 トレーサの導入と流向

実験から得られる破過曲線を数値解や解析解と比較してパラメータを同定するような場合、境界条件としてモデルに与えることができるトレーサの形にできるだけ近い形でカラムにトレーサを導入しなければならない。モデルの境界条件がパルスインプットや階段関数の場合、流入口でカラム断面全体の溶液中のトレーサ濃度を瞬時に変化させる必要がある。そのためにはトレーサの導入前に、カラム上流側のヘッドスペースと導入用チューブ内の溶液をトレーサに入れ替えておかなければならない。流出口を閉じてカラム内の水が動かないようにしたのち、ヘッドスペースにとりつけたフラッシングポートを通じて導入用チューブとヘッドスペース内の溶液をトレーサと完全に入れ替える。この作業はトレーサのカラム内への分子拡散による流入を防ぐために、実験開始直前にすばやく行わなければならない。

パルスインプットの場合にはトレーサ導入ののち、今度はバックグラウンド溶液をカラム断面方向に素早く広げてシャープに濃度を下げなければならない。このためにはもう一度通水を止めて上流側ヘッドスペースや導入チューブをバックグラウンド溶液に入れ替える作業を行う。実験の状況によって通水を止めることができない場合には、少ない容量の水でも断面方向に均等に素早く広がるように上流側のヘッドスペースに溶液の流入口から広がる放射状の溝をつけておく効果的である。

通常の地下水と溶存物質を想定した飽和実験の場合、本来どのような方向にカラムをおいてどの方向に溶液を流しても結果に影響はないはずである。しかし、カラムを立てて下から上に向かって通水するとカラム内にわずかに残っていた空気が浮き上がってきたりするので、下から上に向かって流すとよい。

3.3 カラム内からのサンプリング

実験の途中でサンプリングポートよりカラム内

の溶液のみを抽出するときには、通水する溶液の流束、総容量に比して採取する試水量が無視しうる十分に小さい容量になるように事前に計画する必要がある。たとえば、通水する溶液量の5%以下と決めたらおよその通水容量から採水総量を算出してトレーサの動きを充分の捉えられるようなサンプリングのポイントと時間間隔を計画することになる。毎回のサンプリングでは、分析に必要な容量のほか、サンプリングチューブ内の溶液も置き換える必要があるのでその容量も考慮しなければならない。できるだけカラムに近いところでサンプリングをおこなうとともに、トレーサの動きをある程度正確に予測すると少ない採水量におさえることができる。一方、濃度のピークを逃したりテイリングを最後まで捉えられなかったりということのないように、十分に安全ファクターを乗じた時間と空間的範囲をもったサンプリングを計画しなければならない。不飽和条件の場合でも、真空ポンプを使えば非常に低い水分量条件下でもカラム内の土壌水をサンプルすることができる。しかし、低水分のカラム内から採水すれば実験そのものに影響が出ることは避けられない。

カラムを輪切りにして土壌と土壌水を同時にサンプリングするときには、輪切りにする際に土壌が崩れてしまうことが無いように注意が必要である。本番で失敗してしまうとカラムの充填からすべてをやり直さなければならなくなってしまうので、水分量の低い砂質の土壌やビーズのような試料の場合には、力のかけ具合や切る道具(ナイフや糸)を変えて事前に何度か練習しておくといよい。

3.4 再現性の確認

長時間にわたってカラムに通水していると、水みちが形成されたり化学反応などにより、実験条件が知らない間に変ってしまうことがある。実験の間カラム内の条件がずっと同じであったか確認するために、実験の最後に一番初めに行った実験と全く同じ実験を行うとよい。これにより、実験全体に齟齬が無かったことが確認できて、実験結果を安心して使うことができる。このような確認により信頼性の高い実験ができることがカラム実験の最大のメリットの一つである。

4. 実験結果の解釈

典型的なカラム実験ではカラムの流出口で得られたトレーサ濃度変化を時間に対してプロット（破過曲線）したもの、あるいはカラム内の濃度分布を距離に対してプロットしたものを結果として得る。汚染物質回復の評価などで濃度や時間の絶対値が重要であればそのままでもよいが、他の実験結果と比較したり、数値解や解析解と比較する場合には各軸を無次元化しておくとし便利である。濃度は初期トレーサ濃度で、時間はポアボリュームで、距離はカラム長で実測値を無次元化するのが一般的である。

実験で得られた破過曲線や濃度分布曲線に種々の解析解をあてはめて、輸送や反応のパラメータを推定できるフリーのプログラム STANMOD (version 2.2, Simunek, *et al.*, 2004) がインターネット上で提供されており、簡単に手に入れて走らせることができる。これを用いると、モデルの種類を選ぶことにより分散係数や遅延係数ばかりでなく、二重間隙構造や一部や全部の非平衡反応を想定した各反応係数、生成・分解係数なども推定できる。

実験結果として得られた濃度値は一般にグラフ上に無限に小さい点（曲線）としてプロットされるが、その点は有限の体積の試水からその平均値として得られたデータであることを忘れてはならない。特に非常に精度のよい実験結果を解釈するときは、得られるパラメータに影響を与えるので、プロットするデータが時間方向、空間方向のどちらのどの区間の平均値であるか確認して確実にプロットしなければならない。また、このことはモデルで用いる境界条件の選択時にも注意が必要である (Parker and van Genuchten, 1984)。

5. カラム実験の利用とその限界

実際の地下水中では水の流れと同時に化学反応や物理的な拡散などが複雑に同時におきている。実験条件を種々に設定した一連のカラム実験をおこなうことにより、実際の野外の土壌を使いながら、それら一つ一つのプロセスを分離して理解・説明することができる。また、私たちは地下でお

きている目で見ることはできない現象を理論的に理解できてもそれが本当に起きていると実感しにくい。そのような現象を目の前で再現して支配方程式の中の一つ一つの項（物理的プロセス・化学的プロセス）やパラメータと照合することにより、方程式と現象の結びつきが実感できることもカラム実験の利点の一つであると考えられる。透明なカラムで目に見えるトレーサを用いればさらに効果的である。そのほか、パラメータ同定の目的で行われる室内バッチ試験とくらべると、溶液と土壌の比や接触時間が実際の野外のそれに近いという利点もある。

一方、室内におけるカラム実験装置は野外の帯水層に比べてはるかにスケールが小さいため、大スケールで生じる現象は再現できない。また、すべての数値モデリングがそうであるように、実験から得られた結果は実験で設定した条件や仮定が成立するとみなせる野外にのみ有効に適用できる。

参考文献

- Dunnivant F.M. and R. Olsen (2007): A simple sand column laboratory exercise to illustrate pollutant hydrology in groundwater systems. *Journal of Geoscience Education* 55, 51-55.
- Parker J.C. and M. Th. van Genuchten (1984): Flux-averaged and volume-averaged concentrations in continuum approaches to solute transport. *Water Resources Research*, 20, 7, 866-872.
- Relyea J.F. (1982): Theoretical and experimental considerations for the use of the column method for determining retardation factors. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*, 3, 151-166.
- Simunek, J., M. Th. van Genuchten, M. Sejna, N. Toride and F.J. Leij (2004): STANMOD (STudio of Analytical MODEls for solving convection-dispersion equation, ver2. 2).
- Wang, Z., J. Feyen, M. Th. van Genuchten and D.R. Nielsen (1998): Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resources Research*, 34, 2, 213-222.

(受付：2008年6月6日、受理：2008年7月7日)