

地下水流動系からみた地下水汚染問題

- ホットスポット、ホットパス、ホットパスゾーン -

Groundwater Flow System and Groundwater Contamination

- Hot Spot, Hot Path and Hot Path Zone -

田瀬則雄*

Norio Tase

はじめに

地下水汚染問題において、地下水の流動は汚染源の特定、汚染機構の解明、汚染プルームの移動(運命)予測などに考慮はされてきたものの、必ずしも地下水流動系という3次元的な視点で取り組まれてこなかったと思われる。

これまで扱われた地下水汚染では、点源あるいは工場敷地内など局所的な対応が中心であったため、そこまでの情報が求められなかったものと思われる。

最近問題となっている硝酸性窒素による地下水汚染は、農地が主な汚染源である面源汚染で、その対応もこれまでの汚染とは異なっており、実効的な浄化・修復法が確立できていないのが現状である。硝酸性窒素による地下水汚染の詳細については、田瀬(2005,2006)などを参照して頂ければ幸いである。

硝酸性窒素で広範に汚染された地下水を浄化する実効的な方法は模索の段階で、環境省は実証試験など可能性のある対策法を探索しているが、既存の水処理技術を応用するようなものが多く、発想の転換が求められている(田瀬,2004b)。一部、反応性透過壁や脱窒促進剤の注入などによる原位置浄化も試験的に実施され、効果は確認されているが、コストの問題などがある。

演者はこの数年、地下水流動系という視点から、

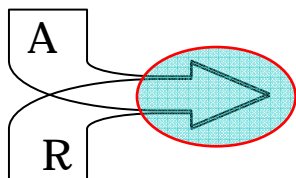
自然浄化機能(微生物による脱窒、植物による吸収、流動系での混合希釈など)について、実態の把握、活用の可能性などを調査・検討している(井岡・田瀬,2004a,b;菅原・田瀬,2004;田瀬,2005;中野・田瀬,2005)。微生物の脱窒による浄化は、ライパリアンゾーン(河畔域、台地末端部から低地・水域との境界域や移行帯)の機能としてこの10年くらい、アメリカやカナダを中心に研究が進められてきている(Böhlke and Denver, 1995; Hill, 1996; Böhlke et al., 2002)。浄化ゾーン(フロント)が存在する条件、地下水流動系との関係なども明らかにされつつある。これらの研究から、実態を正確に捉えるためには、反応の場としての地質構造と地下水流動系の把握、とくに3次元的な理解が重要であることが示されてきている。

ここでは、ワークショップの副題である「環境システムの代謝機能を構造的に診る」という観点から、流動系と地下水汚染、浄化の問題を考えてみる。

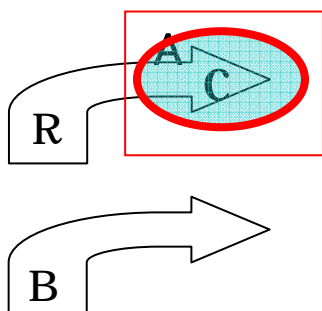
ホットスポット、ホットパス、ホットパスゾーン

McClain et al.(2003)は、biogeochemical **hot spots** と **hot moments** という用語を活発に起こる浄化ゾーンと時期にあて、とくに陸域と水域の境界域で活発で、いろいろな空間スケールで認知・設定されると

:流動型



:構造型



第1図 2種類のホットスポットの模式図

している。すなわち、ミクロなスケールでは土壌の間隙構造や団粒構造から、流域規模では湿地やライパリアンゾーンまでで、演者らが主に対象としているのはこれらの中間の台地と低地の境界域である。言い方を変えると、周囲との関係で点、線、面、あるいは立体として捉えられる。

第1図に示すように、ホットスポットは2つのタイプに分けられる。 のタイプは2つの異なる条件を持った地下水（たとえば、Aは還元的で溶存有機炭素に富み、Bは高濃度の硝酸イオンを持つ）が会合して、脱窒が促進し浄化が起こる。希釈もこのタイプになる。一方、 のタイプは反応が起こる条件を備えた場に、高濃度の硝酸イオンを含む地下水が流入するものである。このタイプは地質や地形条件により規定されていると考えられるが、ホットスポットの多くはこのタイプになるものと考えている。

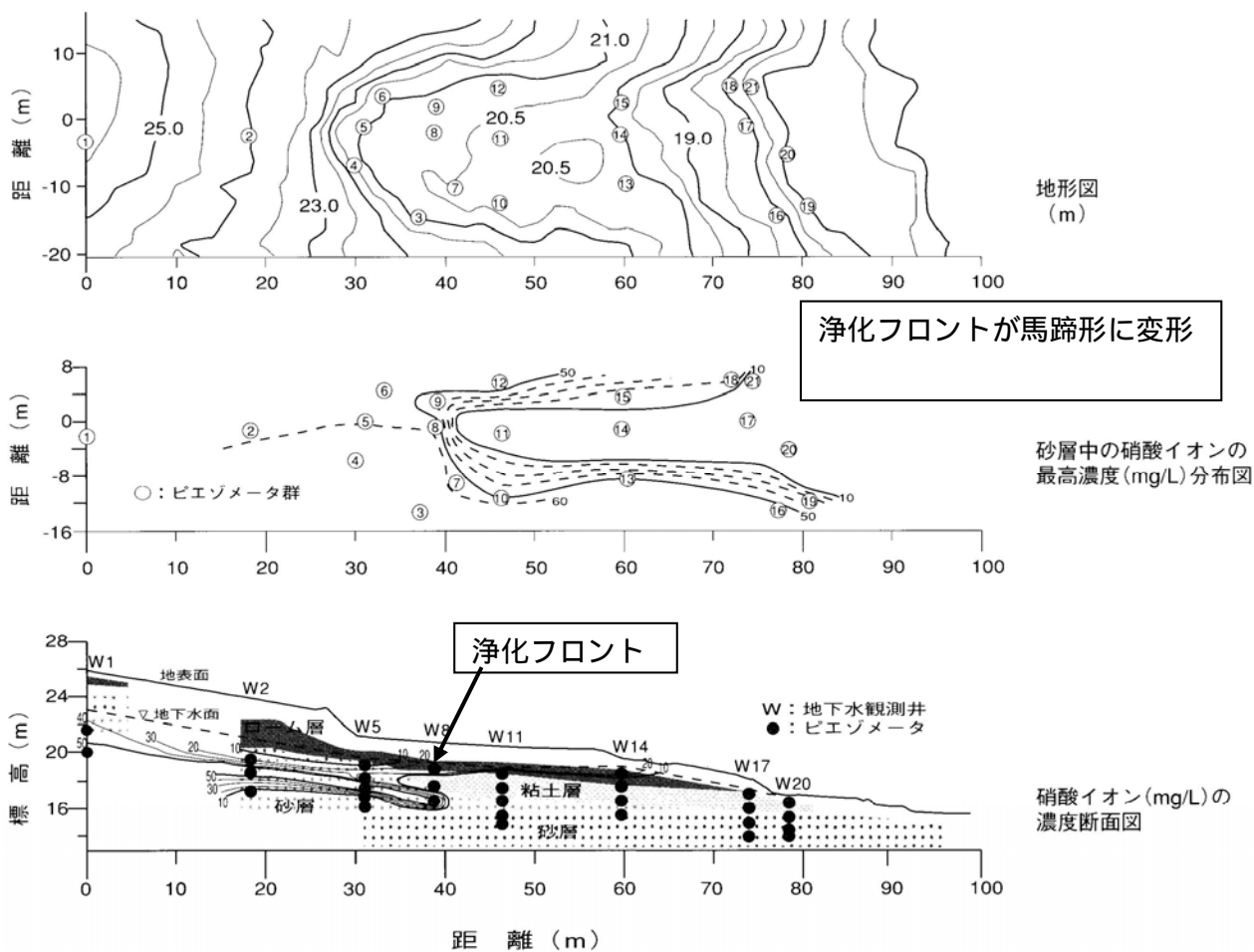
ホットスポットの同定、すなわちどこに存在し、どのような反応が生じているのかを明らかにすることが必要である。海外では多くの研究がなされてき

ているが、わが国での研究例は少ない。第2図などは構造型のホットスポットの代表例と考えられるが、日本国内での事例の蓄積によるタイプ分けなどが、対策として活用するためには必要である。

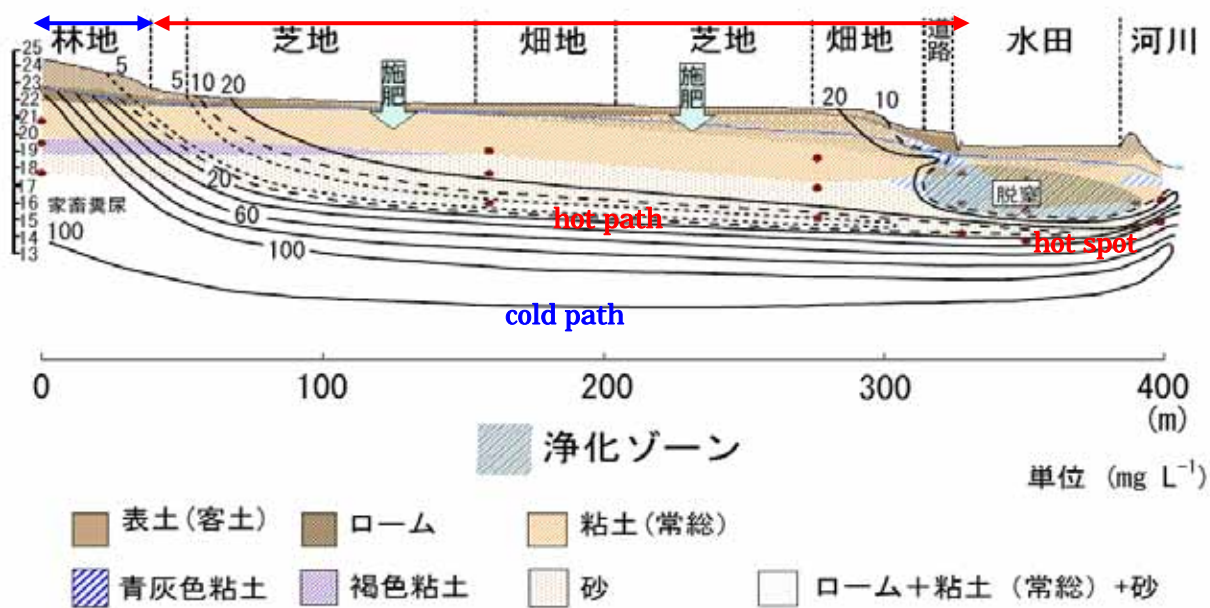
演者はホットスポットを通過するような地下水流動を**ホットパス**とし、逆に通過せずに流出する流動を**コールドパス**と名付けた(田瀬,2005b)。ホットパス、コールドパスはホットスポットと地表面（流域）の関係、すなわちホットパスが地表に現れたものが**ホットパスゾーン**、コールドパスと繋がった地域が**コールドパスゾーン**である。これらの考え方は、今後の汚染源対策、土地利用計画、自然浄化機能の活用などで重要なコンセプトになると考えられる。すなわち、汚染源対策は、コールドパスのゾーンで集中して実施する、あるいは堆肥置場などはホットパスゾーンに設置すれば、浸透したとしても浄化されることになる。また、将来的にはホットパスを制御したり、創出したりすることも可能かもしれない。

第2図はつくば市の小さな谷地において、詳細な3次元的観測ネットワークによって、明らかにした硝酸イオンの濃度分布と浄化ゾーン（フロント）の位置で、地質構造とも密接に関係していることが示されている（菅原・田瀬,2004）。すなわち、黒色粘土の存在により、還元的雰囲気形成と有機物の供給により、その直下で脱窒が進行している。この構造型の浄化ゾーンでは流入してくる年間30kg近くの窒素が浄化されていると試算しており、浄化能は十分評価できると考えられる。

第3図はつくば市の緩斜面での状況に、ホットパスなどを模式的に示したものである。台地中央部の集落と林地の境界が過去の養豚の影響により高濃度の硝酸イオンの供給源となっている（飯泉ほか,2005）。これがなければ、ホットスポット、ホットパスから見ると理想的な（硝酸性窒素を河川へ流出させない）土地利用がなされていると見ることができる。ただし、圃場・河道整備以前は河床面が今より高く、コールドパスの範囲はもっと狭かったものと推測される。



第2図 つくば市の谷地における硝酸イオンの分布と浄化ゾーン (菅原・田瀬, 2004)



第3図 ホットスポットとホットパス・コールドパス (飯泉ほか(2005)に加筆)

ホットパスの同定は重要であるが、必ずしも容易ではない。3次元的地質構造と水理ポテンシャルの分布、さらに硝酸イオン濃度などの分布を基礎として、ホットパス、流動系の特定を行うことになる。この際、数値シミュレーションも有効な補助手段となる。また、フローパスに時間情報が加われば、時空間スケールで土地利用の変遷を含め窒素の輸送、変質を理解することが可能となる(Dunkel et al., 1993; Böhlke et al., 2002; Tesoriero, 2005)。なお、Tóth(1999)の考え方なども重要である。

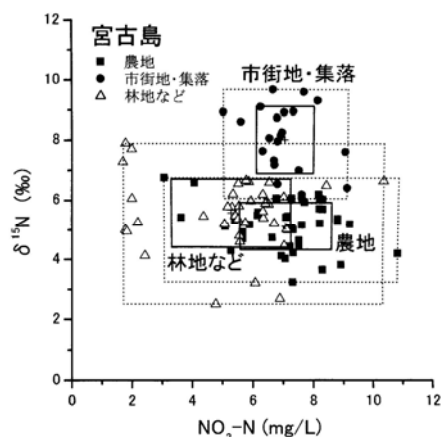
ホットパス・コールドパスという視点に立った保護区(protection zone)の設定は非常に効果的である。ゾーニングは負荷源の削減と希釈効果が期待できる。Thomsen and Thorling(2003)はデンマークのTunø島で水源井の周辺300mを保護区に設定し、肥料の使用制限、草美化をはかり、設定前に150mg/Lを越えていた硝酸イオンを10年でほぼEUの基準値(50mg/L)まで低下させた。さらに今後10年で非汚染涵養地下水が帯水層下部まで到達すると予測している。施肥量の削減を伴ったゾーニングは、もっとも効果的な対策と考えられるが、配置の仕方や面積比などの検討のほか、経済的保証なども課題としてあげられる。

ホットパス、コールドパスは必ずしも一定でなく、ホットスポットが変動したり、逆に流動系が変動することにより季節的に変動すると考えられる。実際にホットパスを確定するためには、詳細に汚染プルームを追跡することが基本であるが、汚染源に特異なトレーサー(例えば、家畜排せつ物起源であればウロピリン、あるいは¹⁵N安定同位体など)を利用することも有効と考えられ、検証の価値がある。

ホットスポット、ホットパス、ホットパスゾーンの特定には、3次元の水理地質構造(帯水層、難透水層、そして反応層など)とポテンシャル分布(流線)の情報が必須となってくる。自然浄化能(脱窒、植生による吸収、混合希釈など)のあるホットスポットを見つけ、ホットスポットからホットパスゾーンを特定するback-tracing(逆追跡)の手法を確立することが要である。

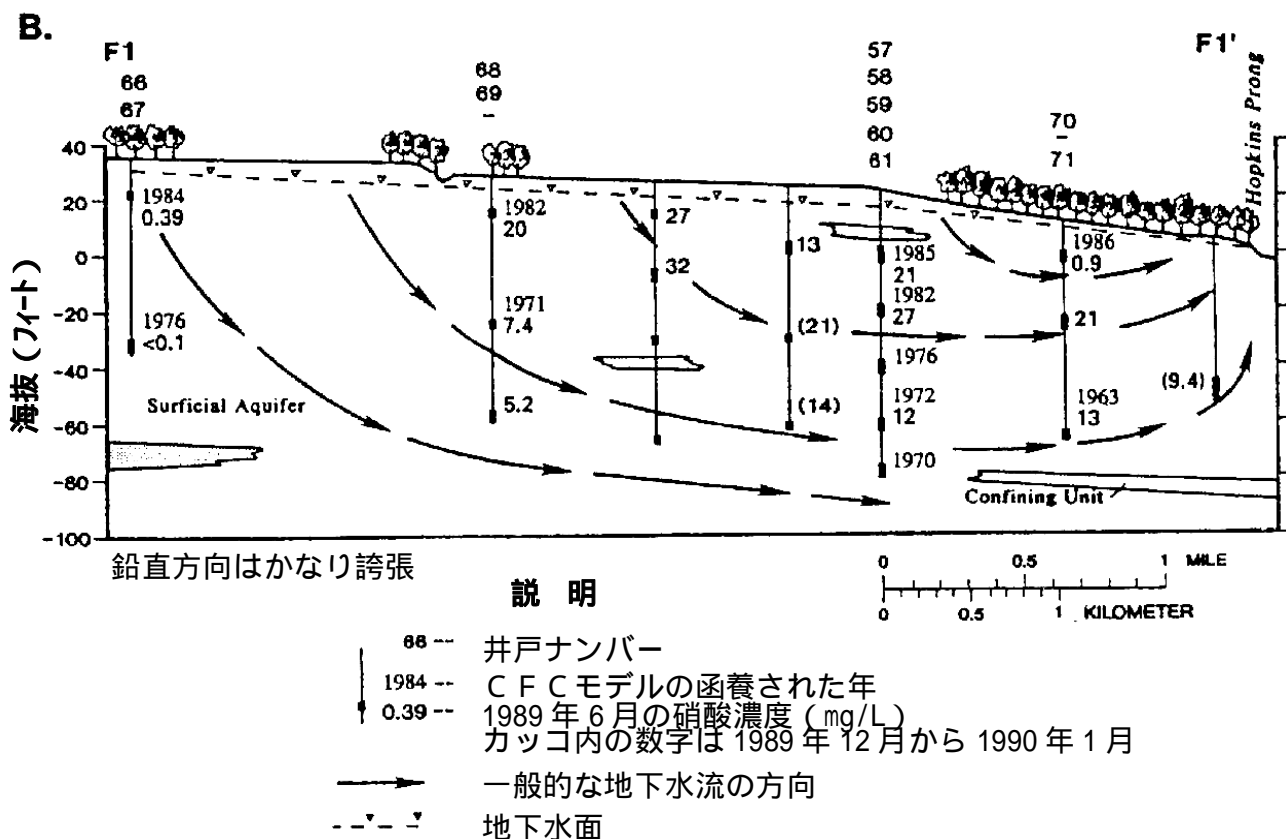
ここで、同位体トレーサー技術がどのように活用できるのだろうか。第4図に示したように、汚染源(物質)の同定には、窒素の安定同位体(¹⁵N)の利用が可能である(田瀬,2003)。また、酸素・水素の安定同位体を利用して涵養高度を推定することも可能である(Suzuki,2003)。しかし、そのパスを直接同定することは難しいので、シミュレーションなどとともに何らかの工夫が必要となる。ただし、3次元的にプルームを追うことにより、ホットパスに乗っているか、乗っていないかの判定は可能であろう。その際に、同位体などの特異なトレーサーを利用できる場合がある。たとえば、窒素の供給源の同定に利用されている¹⁵Nだけでなく肥料や土壌資材を構成するCa、Mgなどの一般項目や微量元素なども利用できる可能性もある。

時間情報も重要となるが、³⁶Cl(戸崎ほか,2005)、³H/³He やフロンガスなどによる単独の時間情報(滞留時間や年齢)だけでなく、第5図のような地表の土地利用履歴などとパスに絡めた情報にしなければならない。なお、わが国では絶対年代を恒常的に測定できる分析機関が存在しないという現状を早急に解決しなければならない。



第4図 硝酸性窒素濃度と窒素安定同位体比の関係(+は各土地利用別の平均、実線は平均±標準偏差の範囲、点線は包絡四角形)(田瀬, 2003)

おわりに



第5図 CFCより推定した年齢（涵養年）と流線にのる硝酸性窒素の濃度の関係(Dunkel et al., 1993)

地下水研究の基本は、やはり3次元、できれば時間軸を含めて4次元で、流動系を把握することである。これは詳細な水理地質、水理ポテンシャル分布の把握である。これらを基に、汚染物質の挙動が詳細に解明できることとなる。

この中で、同位体などのトレーサーの利用は、時空間情報、プロセス情報を与えてくれることになるが、相互のフィードバックが不可欠である。今回のワークショップなど、多様な研究対象、手法での情報交換は非常に重要である。

引用文献

飯泉佳子・田中智也・木内豪・田瀬則雄・深見和彦 (2005)：筑波台地緩斜面における地下水の流動と硝酸イオンの濃度分布．水文・水資源学会 2005年研究発表会要旨集．208-209.

井岡聖一郎・田瀬則雄(2004a)：地下水中の硝酸イオンに対するシルト、粘土層の役割 - 水理的バリアか生物化学的バリアか - ．地下水学会誌，46(1)，37-50．
 井岡聖一郎・田瀬則雄(2004b)：茨城県筑波台地、斜面-湿地プロットでの地下水帯における硝酸イオンの還元場．地下水学会誌，46(2)，131-144．
 環境省(2002)：硝酸性窒素による地下水汚染対策の手引．公害研究対策センター，359p．
 環境省(2004)：硝酸性窒素による地下水汚染対策事例集．286p．
 近藤洋正・田瀬則雄・平田健正(1997)沖縄県宮古島における地下水中の硝酸性窒素の窒素安定同位体比について，地下水学会誌，39，1-15
 菅原洋平・田瀬則雄(2004)：台地末端部における硝酸イオン浄化ゾーンの3次元分布．地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第10回講演集，383-390．

- 田瀬則雄(1996)窒素安定同位体を利用した調査法．平田健正編著「土壌・地下水汚染と対策」, 181-193, 日本環境分析協会.
- 田瀬則雄(2000): 土壌層の持つ土地利用メモリーと地中水との相互作用の解明．平成9～11年度科学研究費補助金(基盤研究B2)研究成果報告書(09460113), 77p.
- 田瀬則雄(2003): 水文学における環境同位体の利用．化学工業, 67(2), 97-99.
- 田瀬則雄(2004a): 硝酸・亜硝酸性窒素による地下水汚染の現状と動向．環境管理, 40(3), 47-55.
- 田瀬則雄(2003b): 硝酸・亜硝酸性窒素による水質汚染の現状と動向．水環境学会誌, 26(9), 2-6.
- 田瀬則雄(2005a): 台地・谷地境界域における地下水流動系、湧出形態と硝酸性窒素の自然浄化ゾーン．平成14～16年度科学研究費補助金 基盤研究B(2)研究成果報告書、102p.
- 田瀬則雄(2005b): 地下水循環と硝酸汚染 - ホットスポットとホットパス．シンポジウム「トレーサーを用いた水循環研究の現状と将来」講演要旨集, 9-13, 日本学術会議 大気・水圏科学研究連絡委員会 陸水専門委員会.
- 田瀬則雄(2006): 硝酸性窒素による地下水汚染．地下水技術, 48(1), (印刷中)
- 田瀬則雄・井岡聖一郎(2003): 水文地質と地下水・土壌汚染．地下水学会誌 45(1), 49-58.
- 田淵俊雄(1999)地下水の硝酸汚染と対策, 農業土木学会誌, 67, 59-66.
- 戸崎裕貴・田瀬則雄ほか(2005): 放射性核種 ^{36}Cl による地下水の滞留時間の推定．地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集、H060-10.
- 中西康博編著(2002)サンゴの島の地下水保全 - 「水危機の世紀」を迎えて．宮古島地下水水質保全対策協議会・宮古広域圏事務組合・宮古島水道企業団, 182p.
- 中野誠一郎・田瀬則雄(2005): 樹木による地下水中の硝酸性窒素の吸収浄化の可能性．地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第11回講演集, 212-217.
- 森田明雄(2002): 15N値を用いて窒素の流出起源を知る．長谷川周一ほか編「環境負荷を予測する - モニタリングからモデリング - 」, 75-94, 博友社.
- Böhlke, J.K. and J.M. Denver (1995): Combined use of groundwater dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal plain, Maryland. *Water Resources Research*, 31(9), 2319-2339.
- Böhlke, J.K., Wanty, R., Tuttle, M., Delin, G., and Landon, M.(2002): Denitrification in the recharge area and discharge area of a transient agricultural nitrate plume in a glacial outwash sand aquifer, Minnesota. *Water Resources Research* 38(7), 10-1 ~ 10-26.
- Dunkle, S.A., L.N. Plummer, E. Bunsenberg, P.J. Phillips, J.M. Denver, P.A. Hamilton, R.L. Michel, and T.B. Coplen(1993): Chlorofluorocarbons(CCl_3F and CCl_2F_2) as dating tools and hydrologic tracers in shallow groundwater of the Delmarva Peninsula, Atlantic Coastal Plain, United States, *Water Resources Research* 29(12), 3837-3860.
- Gallardo, A. and Tase, N.(2005): Role of small valleys and wetlands in attenuation of a rural-area groundwater contamination. *IAHS Publication* 294, 86-92.
- Hill, A.R. (1996): Nitrate removal in stream riparian zones. *Journal of Environmental Quality*, 25(4), 743-755.
- McClain, M.E., et al.(2003): Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems* 6, 302-312.
- Okada, R., Tase, N., Tamura, K., Negishi, M., and

- Takagi, K. (1999):Fate of fertilizer from surface to groundwater - How much does it accumulate in the soil?-. Proc. Internat. Symp. Groundwater in Environ. Problems, Chiba University, 57-62.
- Suzuki, H.(2003):Chemical and isotopic compositions of spring water around Asama volcano, central Japan. Science Reports Sec.A, Vol.24, Inst. Geosci, Univ. Tsukuba, 51-70.
- Tesoriero, A.J., Spruill, .B., Mew, H. E., Jr., Farrell, .M., and Harden, .L.(2005) : Nitrogen transport and transformations in a coastal plain watershed: Influence of geomorphology on flow paths and residence times. Water Resour. Res. 41(2), W02008 10.1029/2003WR002953
- Thomsen, R., and Thorling, L.(2003):Use of protection zones and land management restore contaminated groundwater in Denmark. EOS, 84(7), 99.
- Tóth, J.(1999):Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeology Journal 7, 1-14.