

論文の内容の要旨

論文題目 都市環境の改善を目的とした地下水の利用可能性評価

氏 名 黒田 啓介

本研究では、東京都区部における地下水の飲料用水、水洗トイレ用水、散水用水、環境用水、災害時生活用水としての利用可能性を水質と水量の両面から評価し、地下水利用の有効性を評価した。水質に関しては、現在知見が少なく水質基準に含まれていない有機フッ素化合物を地下水汚染物質として測定した。また、医薬品類や人為起源 Gd を地下水中の下水マーカーとして測定し、地下水中の分布や下水マーカーとしての特性を明らかにし、地下水汚染物質の起源推定に用いた。

まず、地下水の採水調査結果から、飲料用水、水洗トイレ用水、散水用水、環境用水、災害時生活用水としての利用可能性を評価し、水質に応じて用いられる処理方法を想定した。飲料用水の水質基準は水道水質基準に加え、海外で近年問題となっている PFOA と PFOS を加えた。飲料用水には、無処理では 51 地点中基準に適合した地点が 1 箇所のみであったが、マンガン接触ろ過と MF/UF 膜ろ過、凝集により鉛と TOC を除去することで 51 地点中 33 地点 (65%) まで基準に適合すると考えられた。残りの地点は、1) PFOS と PFOA (活性炭で除去)、2) 硝酸性・亜硝酸性窒素 (イオン交換樹脂で除去)、3) ホウ素、ナトリウム、塩化物イオン (RO 膜で除去) が支障となり、それぞれ追加の処理が必要となることがわかった。水洗用水・散水用水には、無処理では 112 地点中 27 地点 (24%) の地点で基準に適合しており、残りの地点については塩素消毒や濁度と鉄・マンガンの除去が必要であった。修景用水と親水用水では、全 51 地点中 37 地点 (73%) で亜鉛が水質基準を超過しており、凝集、マンガン接触ろ過、MF/UF 膜ろ過により 51 地点中 46 地点 (90%) で基準に適合すると考えられたが、51 地点中 5 地点 (10%) の地点では PFOS が基準を超過していた。災害時生活用水には、無処理で 121 地点中 103 地点 (85%) が使用できると考えられた。

飲料水では鉛、TOC (凝集で除去) に加えて PFOS・PFOA (活性炭で除去)、硝酸性・亜硝酸性窒素 (イオン交換樹脂で除去)、ホウ素、ナトリウム、塩化物イオン (RO 膜で除去) が処理上の主な障害となり、より簡易な処理の適用を妨げると考えられた。水洗用水・散水用水では濁度・鉄・マンガンの基準超過が大きな障害となっている一方、大腸菌のみが基準を満たさない地点も存在した。修景用水および親水用水では、亜鉛の基準超過が大きな障害であり、続いて鉄・マンガン、PFOS が続いていた。

第二に、地下水の利用上で問題となる物質について帯水層ごとの分布特性や起源を推定し、水質改善の対策を検討した。濁度、鉄、マンガン、DOC は Eh の低い地下水と関連していた。Eh は武蔵野礫層や上総層群で高く、有楽町層や東京層で低い傾向があった。亜鉛と鉛はクロム、コバ

ルト、ニッケル、カドミウムなど道路塵埃中に含まれる重金属類と正の相関があり、道路排水といった人為的な起源が考えられた。窒素は、不圧地下水では Eh の高い武蔵野礫層で硝酸性窒素として、Eh の低い有楽町層や東京層（被圧）などで検出された。窒素の収支から、降水、水道漏水、農地における施肥以外の下水、道路排水、土壌由来などの窒素源が存在し、それらは市街地において発生する窒素負荷の 1% に相当した。窒素同位体比からは、アンモニア性窒素はし尿による窒素負荷が考えられ、硝酸性窒素は地質由来や施肥などの起源が示唆された。大腸菌 *E. coli* は湧水において 80% の地点で検出され、検出率が最も高かった。表層からの汚染を受けやすい不圧地下水は 19% の地点で検出されただけでなく、通常表層からの汚染を受けにくい被圧地下水から 5% の地点で検出された。アデノウイルスは 44 地点中 4 地点で検出され、大腸菌の検出地点と異なっていることから、地中での挙動が異なることが示唆された。PFCs は 53 地点中 51 地点（96%）で検出され、不圧地下水、被圧地下水、湧水ともに PFCs の汚染を受けやすいことがわかった。特に、一般に水質が良好であるといわれる被圧地下水においても PFCs が高濃度の地点が見られ、PFCs に関し被圧地下水の利用に際しても注意が必要であると考えられた。地下水中の PFOS, PHpA, PFDA, PFUA の濃度の中央値は河川水中の濃度の中央値を上回っていた。主成分分析と回帰分析により、PFCs の 68% が下水起源、32% が道路排水起源と推定された。長鎖/(長鎖+短鎖)比率を用いて推定した道路排水由来の PFCs 濃度は重金属や DOC と有意な正の相関がみられ、これらの起源に道路排水の寄与が大きいことが示唆された。

次に、医薬品類（PPCPs）と人為起源 Gadolinium（以下 Gd とする）を地下水中の下水マーカーとして測定し、下水による地下水汚染の現状を明らかにするとともに、下水マーカーとしての評価を行い、さらに下水マーカーを用いて汚染物質の起源推定を行った。医薬品は不圧地下水（32 地点中 21 地点、湧水 2 地点中 2 地点と、表層からの汚染を受けやすい帯水層において検出率が高かった一方、深さ 50 m までの比較的浅い被圧地下水においても検出された。測定した医薬品 6 種のうち、carbamazepine と crotamiton がそれぞれ 19 地点 18 地点と最も多く検出された。carbamazepine は crotamiton より保存的で減衰しにくい一方、crotamiton は流入下水と定量下限値の比率が大きいため、検出されやすかったと考えられた。以上より、本研究ではこれら二つの医薬品が地下水中の下水マーカーとして有効と考えられた。crotamiton は大腸菌 *E. coli* より幅広く検出され、crotamiton が *E. coli* の先行指標として地下水水質の管理や監視において有効であることが示唆された。一方、MRI 造影剤に由来する人為起源 Gd は、地下水から 8 地点で検出されたが、医薬品や *E. coli* の分布と異なっていた。人為起源 Gd は病院排水中に高濃度に含まれるため、人為起源 Gd は地下水中で MRI がある病院の排水を含む汚染を高感度に検出できるマーカーとして有用である可能性があった。測定した中で最も保存的な下水マーカーと考えられた carbamazepine を下水マーカーに用いると、東京都区部で少なくとも 0.71% の下水が地下に漏出していると考えられた。これはヨーロッパの他の都市と比較して同程度と考えられた。地下水中で PFCs は PPCPs より幅広く検出された。また、マスフラックスにおいては PPCPs により示唆された晴天時汚水量の下水負荷よりも汚染の程度が大きかった。これらのことから、地下水における PFCs の継続的なモニタリングの重要性と、地下水水質の保全には下水と道路排水の両方の負荷の

低減の重要性が示唆された。

第三に、不圧地下水、湧水、被圧地下水について今後持続的に利用可能な水量を推定した。不圧地下水は、降水浸透により夏場に水位が上昇するが、降水の少ない冬場には水道漏水量が水位をサポートしていると考えられ、冬場の低水位を保つために降水浸透量のみが利用できると考えられた。土地利用情報をもとにした水収支計算によって、利用可能な水量を1979年から2008年の30年間の降水浸透量の平均値にあたる257,308 m³/日（151 mm/年）とした。

被圧地下水とトンネル湧水は、被圧地下水の水位を下げるための揚水量はトンネル湧水量とほぼ等しいと考え、1994年~1996年のトンネル湧水の平均値32,968 m³/日とした。被圧地下水の水位制御のための揚水を行う場合は利用できるトンネル湧水量はなく、被圧地下水の水位制御のための揚水を行わない場合はトンネル湧水として得られると考えた。

最後に、地下水の有効利用のケーススタディと、水質と水量を考慮した地下水利用の可能性の評価を行うことにより、都市域での地下水利用の有効性と可能性を評価した。まず、ヒートアイランド緩和のための地下水散水の効果を実証実験により確かめ、地下水の散水量に応じた地表面温度の低下量を明らかにし、0.8 mmの散水により非散水面との温度差が15~20分程度持続することが明らかになった。このため、散水を1日8時間行う場合に19.2~25.6 mmの地下水が必要になることがわかり、メッシュによりひと夏に5~20日間、一日の最高気温が33℃から35℃以上の日に散水が可能とわかった。

水質情報と利用可能な水量を統合し、不圧地下水の地下水利用可能性を評価したところ、散水利用には14%にあたる33,587 m³/日が無処理で利用でき、6%は塩素消毒を要し、15%は塩素とMF/UF膜によるろ過を要し、残り65%はマンガン接触ろ過とMF/UF膜を要すると考えられた。飲料用には、塩素消毒のみでは全体の2%にあたる5,344 m³/日が利用でき、凝集+マンガン接触ろ過+MF/UF膜まで含めると全体の78%が利用可能と考えられたが、地下水への下水による負荷や道路排水による負荷を半減することで全体の82%までが凝集+マンガン接触ろ過+MF/UF膜により利用可能となった。特に道路排水による負荷の低減は、塩素消毒のみにより利用可能な水量を10,688 m³/日まで増加させるため、効果的な対策であると考えられた。

本研究により、都市域における地下水の有効利用の可能性と水質・水量の面の課題が明らかとなった。本研究で得られた知見は、今後国内外の都市域における地下水管理を考える際に役立つと考えられた。