

不飽和帯に残留する NAPL 質量の評価方法

名古屋大学大学院 学生会員 ○宋 徳君
名古屋大学 正会員 片山 新太

1. はじめに

ガソリン等の石油系炭化水素が難水溶性相液体(NAPL: Non-Aqueous Phase Liquid)の形態で地下環境に放出される場合、その一部は不飽和帯に残留する。降雨浸透によって BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylens) 等の可溶性成分が残留 NAPL から溶出し、長期的な地下水汚染源となる。この汚染源の動態の評価は、実際の地下水汚染評価と浄化対策の検討において、非常に重要である。

自然降雨浸透条件下の残留 NAPL は、降雨浸透による移動、揮発、可溶成分の溶出と微生物分解等の作用を受ける。本研究では、現場ライシメータ実験を通じて、降雨浸透による残留 NAPL の挙動、揮発、溶出と微生物動態を計測した。その実測結果を用いて、実用性のある汚染源評価方法について考察した。

2. 実験装置と方法

本研究では、名古屋大学農学部附属農場(愛知県東郷町)のライシメータ(図-1)を用いた。長さ 2m、幅 1m、深さ 1m の箱状で、四周及び底面は不透水材料である。ライシメータ内の土の土性は室内実験で測定した(表-1)。上部からの降雨浸透水は、底部のパイプから排出される。模擬 NAPL は Toluene(9%), Ethylbenzene(10%), Xylenes(4%), Naphthalene(6%)と n-dodecane (71%)を用いて、ガソリンの重量構成を参考に配合した。ライシメータの中心部に塩ビ管(φ200mm,長 30cm)を埋込み、405g の模擬 NAPL を塩ビ管底部に投入し揮発を抑制するための細砂を詰めた。NAPL 投入後、塩ビ管からの揮発、土中ガス及び浸透水を測定し、降雨浸透による NAPL の移動、分布と組成変化をモニタリングした。実質降雨浸透量は、隣接ライシメータでの計測結果から降雨量の 50%と推定した。実験期間中に土のコアサンプリングを実施し、土中油含有量(ガスクロマトグラフ分析)と微生物動態(呼吸鎖キノン法)を測定した。

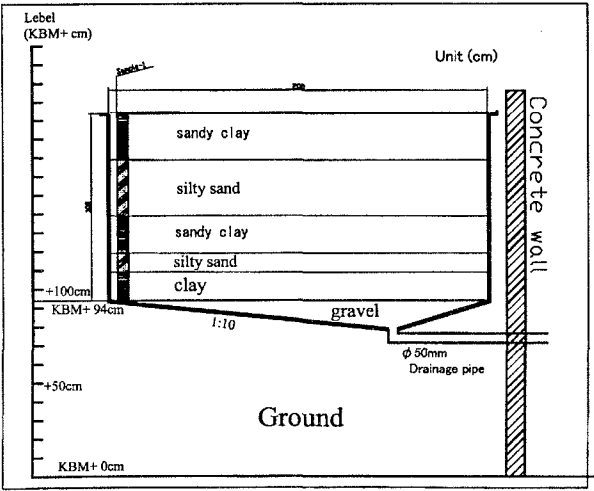


図-1 ライシメータの断面図

表-1 lysimeterの土性一覧表(平均値)

土質	間隙率	乾燥密度	体積含水比
砂質シルト	0.45	1.43	0.31

3. 汚染源の評価モデル

降雨浸透水は、残留 NAPL 帯、及びその下に位置する介在不飽和帯を通過し、地下水面へ可溶性汚染物質を供給する。残留 NAPL から溶出する可溶成分の濃度は、次の有効溶解度関係式(Wiedemeier et al.,1999)から算定される。

$C_{Li} = XS$ (1) ここで、 C_{Li} は浸透水中の可溶成分の濃度(mg/L)、 X は NAPL 中の当成分のモル分率、そして S は当成分の水溶解度(mg/L)である。

ある降雨期間 Δt を経過した際の NAPL 帯の残留濃度は、次の式で推定される。

$$C_T = \left[\frac{(S \times V_{NAPL} \times \rho_b)_i - \Delta M}{\rho_b \times V_{NAPL,i+\Delta t}} \right]$$
 (2) ここで、 C_T は当成分の土中含有濃度(mg/kg dry soil)、 V_{NAPL} は残留 NAPL 帯の体積(cm^3)、 ρ_b は土の乾燥密度(g/cm^3)、そして $V_{NAPL,i+\Delta t}$ は降雨期間 Δt 経過後の NAPL 帯の体積(cm^3)である。 ΔM は降雨期間 Δt における当成分の損失量(mg)で、次の 2 ケースを考慮している。

a) 単純に溶出のみを考慮する場合

$$\Delta M = Q_{\Delta t} \gamma X S \quad (2-1) \quad \text{ここで、} Q_{\Delta t} \text{は期間} \Delta t \text{に NAPL 帯を通過する実質降雨浸透量(L)である。}$$

b)溶出と微生物分解を考慮する場合

$$\Delta M = Q_{\Delta t} \gamma_i X_i S_i + \int_i^{i+\Delta t} M_x v_{max,x} V_{NAPL} dt \quad (2-2)$$

ここで、 M_x は分解菌のバイオマス(mg/kg dry soil)、 $v_{max,x}$ は分解菌による汚染物質の最大消費速度(1/day)である。

4. 結果と討論

(1) 分析結果

土中ガス測定とコアサンプリングの分析結果から、NAPL は降雨浸透によって平面的には、汚染源を中心とする 20cm 程度の範囲内で、下方には約 0.13cm/mm 降雨の移動速度で範囲を拡大した。この結果に基づき NAPL 帯の体積を算定した。

(2)単純溶出モデルによる推定

残留濃度の推定結果は、実測値より約 1 ～3 オーダーも高く、その経時変化の傾向も実測値と一致しなかった(図-2)。汚染源からの揮発量の測定値では揮発量は最大 1 ～2mg/day 程度で、下部流出水中の可溶成分の濃度は最大 0.3mg/L 程度であった。したがって、揮発と流出による損失は最大でも数百 mg しかなく、可溶成分の予測結果と実測値の差を説明することが困難である。

(3)微生物分解を考慮した場合

土中の微生物動態を呼吸鎖キノン法によって測定した。またキノン種によって分解菌を特定し、そのバイオマスを求めた。NAPL 帯の油濃度は大きいことから、ここでは微生物の 0 次成長モデルを採用した。解析に必要なパラメータを表-2 に示す。

$$\frac{1}{M_x} \frac{dM_x}{dt} = Y v_{max,x} \quad (3)$$

ここに、Y：分解菌の増殖収率

微生物分解を考慮した場合、残留濃度の計算値は、実測値の経時的な変化傾向と一致している。また、最大分解速度の上限値による推定結果は、実測値とほぼ同じオーダーであった。

5. 結論

本研究は、不飽和帯に残留する NAPL の濃度評価において、微生物分解の評価は特に重要で、また現場での実測バイオマス情報に基づく簡単な評価モデルでも残留濃度をより精度高く推定できることを示した。今後は現場でのバイオマス測定とそれに基づく推定方法の実用化を図る予定である。

参考文献

1.Wiedemeier T. H., Rifai H. S., Newell C. J., Wilson J. T. Natural attenuation of fuel and chlorinated solvents in the subsurface, 1999, John Wiley & Sons, Inc.

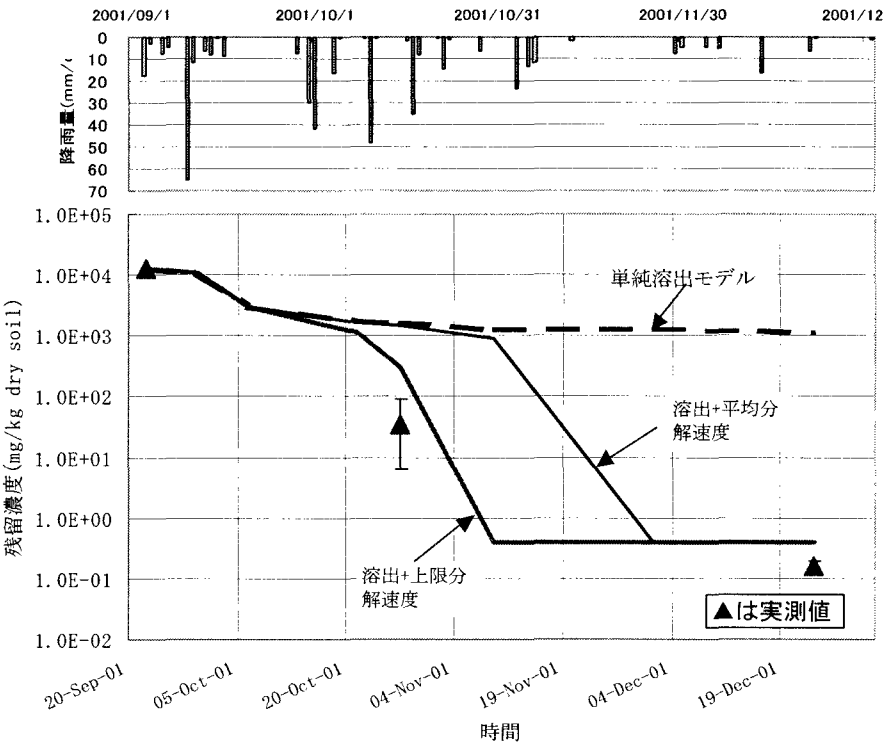


図-2 NAPL 帯の残留濃度の推定値と実測値の比較

表-2 微生物分解のパラメーター一覧表

項目	初期バイオマス (mg/kg)	最大分解速度vmax (1/day) (上限と平均)		増殖収率Y
採用値	3.53	0.57	0.3	0.3
備考	測定平均値	測定上限値	測定平均値	一般文献値