

処理水を散布した芝生土壌における
N-ニトロソジメチルアミン動態の数値解析
Numerical Analysis of Fate and Transport of *N*-Nitrosodimethylamine
in Turfgrass Soil with Treated Wastewater Application

○治多伸介*, Jay Gan**, Jirka Šimůnek**, Andrew Chang**
Shinsuke Haruta, Jay Gan, Jirka Šimůnek, Andrew Chang

1. はじめに 下水処理水は水不足地域における貴重な水資源であり、米国では既に景観用水・農業用水等として積極的に利用されている。しかし、一方で、発ガン性のある *N*-ニトロソジメチルアミン(以下、NDMA)が、下水処理の塩素消毒過程で発生することが近年明らかとなり、米国では、処理水利用の際に、飲料水源の地下水に NDMA が混入することが危惧されている。なかでも芝生地は、米国での主要な処理水利用場所ゆえ、そこからの NDMA 流出が特に重要視されている。そこで、本研究では、芝生ライシメータでの ¹⁴C-NDMA と実際の処理水の散布実験結果を、水分・溶質移動解析プログラムの Hydrus-1D で解析し、芝生土壌での NDMA の動態と地下水流出リスクを検討した。

2. 研究方法 実験は、カリフォルニア大学リバーサイド校内の Loamy Sand 及び Sandy Loam のライシメータで実施された。実験 1¹⁾では、¹⁴C-NDMA を含む NDMA 溶液(200μg L⁻¹)が 25mm 散布され、散布直後と 4・8・12 時間後に土壌中の 30cm 深さまでの ¹⁴C-NDMA 濃度分布が測定された。その結果、12 時間で約 90%以上の高率の NDMA 消失があったこと等が明らかとされた。実験 2²⁾では、週に 3 回の割合で 4 ヶ月間、NDMA 平均濃度 930ng L⁻¹、ET₀(ポテンシャル蒸発散量)に対し 110-160%量の処理水が散布され、ライシメータ底部(89cm 深さ)からの流出水中の NDMA 濃度が測定された。この実験では、流出水で NDMA は殆ど検出されなかった。本研究では Hydrus-1D により、先ず、実験 1 の結果を再現できる土壌中の NDMA 分解定数を検討した。そして、その定数を用いたシミュレーションで、実験 2 の結果の再現性を確認した後、NDMA 流出リスクを数値解析によって検討した。具体的には、① 1 週間の散水量は同じままで散水頻度が増減した場合、② 散水頻度は週に 3 回のままで散水量が増減した場合、③ NDMA 濃度が実測値より高くなった場合、④ 土壌の NDMA 吸着定数が実測値 0.56cm³ g⁻¹ より低くなった場合、⑤ 実際にはなかった、実験開始後 40 日目からの 10cm 降雨の継続時間が変化した場合、をシミュレーションした。

3. 結果と考察

(1) NDMA 分解パターンと分解定数 攪乱土壌を用いて別途実施された室内実験¹⁾で得られた、NDMA の 1 次分解定数を用いたシミュレーションでは、実験 1 での NDMA の高率除去は再現できなかった。また、実験 1 の NDMA 分布に対する逆解析で求めた 1 次分解定数は、室内実験の 100-1000 倍程度の高い値となり、信頼性が十分でない

Table 1 NDMA の 0 次分解定数
Zero order degradation constants of NDMA

土層	Loamy Sand		Sandy Loam	
	液相 ng cm ⁻³ d ⁻¹	固相 ng g ⁻¹ d ⁻¹	液相 ng cm ⁻³ d ⁻¹	固相 ng g ⁻¹ d ⁻¹
0-10cm	169.9	25.5	206.7	31.0
10-25cm	124.0	18.6	37.7	5.7
25-89cm	12.0	1.8	17.3	2.6

*愛媛大学農学部, Faculty of Agriculture, Ehime University **University of California, Riverside, Department of Environmental Sciences キーワード: 処理水利用, NDMA, 地下水汚染

考えられた。そこで、室内実験での分解速度初期値を 0 次分解定数として用いたところ、Sandy Loam では、NDMA の高率除去と ^{14}C -NDMA 分布の良好なシミュレーションが達成できた。Loamy Sand では、分解速度初期値の 3 倍の 0 次分解定数で良好なシミュレーション結果が得られた。Table 1 には、それらの解析に用いた、0 次分解定数を示した。

以上の結果は、実際の芝生土壌中での NDMA 分解は、室内実験とパターンの異なる 0 次反応である可能性が高く、その分解定数は室内実験の分解速度初期値に近いことを示唆した。

(2) 流出リスクが高まる条件と NDMA 消失原因

Table 1 の定数を利用して、実験 2 をシミュレーションしたところ、ライシメータ流出水の NDMA

は、4 ヶ月間、常に水質分析の検出限界 (2ng L^{-1}) 以下となり、実験結果を良好に再現できた。そこで、Table 1 の定数を利用してシミュレーションを行った結果、Loamy Sand での 4 ヶ月間の NDMA のライシメータ底部からの流出率 (Fig.1) は、散水頻度が低く、散水量が多く、NDMA 濃度が高く、吸着定数 (K_d) が小さく、降雨継続時間が長いほど高かった。この傾向は Sandy Loam でも同様であったものの、Sandy Loam での流出率は、Loamy Sand よりも 3 オーダー以上低かった。そして、NDMA 濃度がカリフォルニア州飲料水基準 (Advisory Level) の 10ng L^{-1} を上回ったのは、Fig.2 のように、ライシメータ流出水では Loamy Sand での $\text{ET}_0 \times 3$ の散水条件の場合だけで、50cm 深さの土壌水では Loamy Sand の $\text{ET}_0 \times 3$ と $K_d=0$ の場合だけであった。以上の結果は、NDMA の芝生地からの流出による地下水汚染の危険性は必ずしも高くないものの、危険性が顕著に高まるのは透水性が高く吸着定数の低い土壌であり、管理面からは、過大量の散水時であることを示唆した。

今回のシミュレーションでの、ライシメータにおける NDMA 消失は、土壌中での NDMA 分解と土壌表面からの気散が、各々 35.3-78.7%、22.1-64.7%であった。このことは、NDMA の流出リスクの低減には、分解と気散の両者がともに強く寄与していることを示した。

謝辞：本研究は、愛媛大学外国派遣研究員制度によって実施した。記して感謝の意を示します。

引用文献：1) M. Arienzo et al. (2006) J. Environ. Qual. pp.285-292. 2) J. Gan et al. (2006) J. Environ. Qual. pp.277-284.

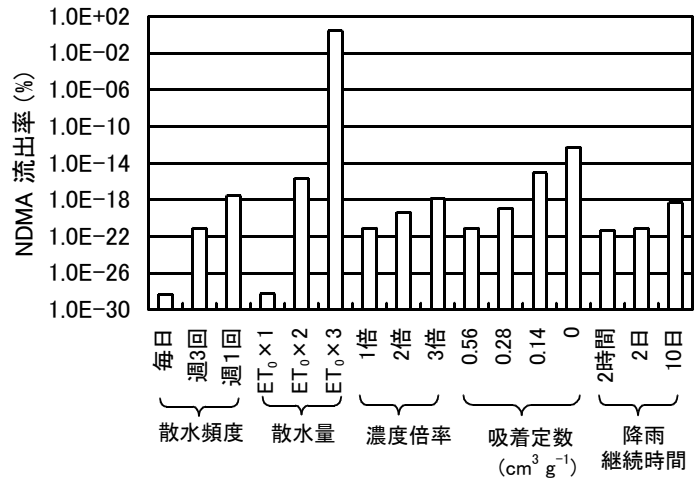


Fig.1 4 ヶ月間の NDMA 流出率 (Loamy Sand)
NDMA leaching rates in 4 months (Loamy Sand)

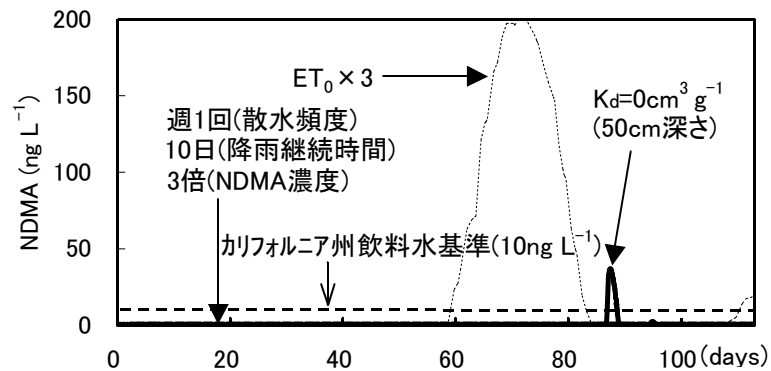


Fig.2 Loamy Sand 流出水の NDMA 濃度 ($K_d=0$ のみ 50cm 深さ)
NDMA in Loamy Sand effluents (Only $K_d=0$ is the data at 50cm depth.)