

ジオシンセティッククレイライナー中における 揮発性有機化合物の輸送とその温度特性

Effect of Temperature on VOCs Migration through a Geosynthetic Clay Liner

椋 木 俊 文 (むくのき としふみ)

Associate Research Director, Geo Engineering Centre
at Queen's and RMC, Queen's University
(ジオエンジニアリングセンター, クィーンズ大学, カナダ)

R. Kerry Rowe (ケリー・ロー)

Vice-Principal (Research) and Professor, Geo Engineering Centre
at Queen's and RMC, Queen's University

Richard J. Bathurst (リチャード・バサースト)

Professor, Geo Engineering Centre at Queen's
and RMC, Royal Military College of Canada
(ロイヤルミリタリーカレッジ, カナダ)

Henri P. Sangam (ヘンリー・サンガン)

PhD, SNC LAVALIN Engineers & Constructors Inc.
(エスエヌシー ラバリン エンジニア&コントラクション)

1. はじめに

2000年8月, カナダ Royal Military College (RMC) の環境科学グループは, バフィン島(北緯63度西経64度)にある監視システムの燃料貯留タンクからジェット燃料(ディーゼル)が流出していることを確認した。図-1に示すBAF-3がその現場である。この報告を受けて, カナダ政府および北部警戒システム機関は汚染拡大の制限および修繕の指示を出し¹⁾, その対策として, 遮水壁の設置が提案された。遮水壁には, 廃棄物埋立処分場下の遮水材としてしばしば適用される高密度ポリエチレンジオメンブレン(High Density Polyethylene: HDPE geomembrane)とベントナイトの膨潤性を利用して遮水効果を発揮するジオシンセティッククレイライナー(Geosynthetic Clay liner; GCL)によるジオコンポジットライナー²⁾(以後, 遮水壁)が適用された。現場の特徴として, 夏季(6月から9月)の平均気温が5度でそれ以外は氷点下であるため, 夏季の融解時に汚染物質の輸送率が最も高いと推測される。施工された遮水壁は難透水性材料であるが, 間隙中の拡散現象により汚染物質は確実に輸送される。そのため, 遮水壁の拡散特性および物質の遅延効果を発揮する吸着特性を把握する事は重要である。

以上のことを背景として, カナダ・Queen's 大学-RMC (Royal Military College) に発足した研究グループは, GCL, ジオメンブレン(GM)およびGM+GCLの3種類の遮水材を対象に, 異なる温度条件におけるジェット燃料の拡散および吸着特性に関する研究を進めている^{3)~5)}。本研究では, 遮水材としてGCLを対象に, またディーゼルの構成する炭化水素化合物のうち地盤内を早く移動可能な芳香族炭化水素化合物に着目して, BTEX (Benzene (ベンゼン), Toluene (トルエン), Ethylbenzene (エチルベンゼン), Xylene (ザイレン))の希釈混合溶液を用いた拡散実験(カラム溶出試験)および吸着実験(バッチ平衡試験)を実施した。BTEXの拡散および吸着の温度依存性を評価するために, 各種

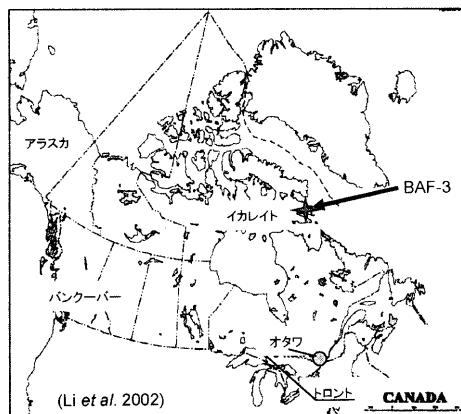


図-1 地盤汚染発生地¹⁾

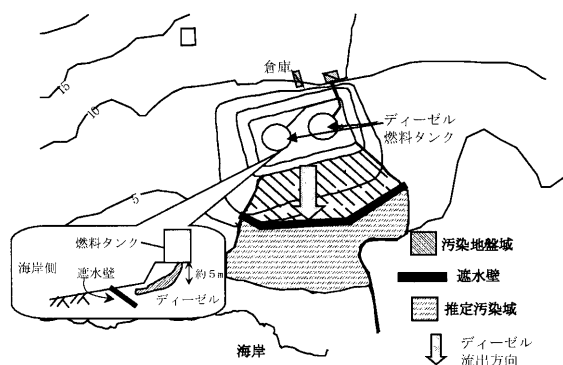
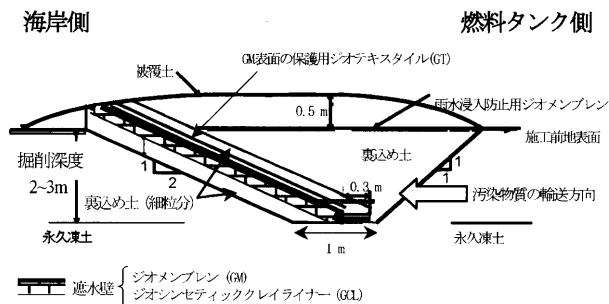


図-2 現場見取図¹⁾

実験は夏季時の平均気温5℃と室内温度22℃において実施された。本文では, トルエンに関する結果を報告する。

2. 遮水壁¹⁾

図-2と図-3に現場見取図および遮水壁の設計概略図を示す。図-2に示すように, 燃料タンクは地表面からおよそ2~3mほど高い丘陵地に建設されており, 遮水壁設置現場は海岸まで緩やかな傾斜地であった。遮水壁は, 幅およそ70mにわたって燃料タンク下の傾斜近くに施工された。永久凍土中への地盤汚染はごくわずかと考えられるため, 遮水壁設置域の地盤を永久凍



図—3 遮水壁の設計概略図¹⁾

土が存在する深さまで掘削した。遮水壁は、図—3に示すように傾斜上に設置され、裏込め土によるGM表面の損傷を防ぐためにGMの上に別途ジオテキスタイル(GT)のみも敷設された。また、施工前の地盤高まで裏込めが終了した時点で、雨水の浸入を防ぐためのGMが敷設された。

3. 実験方法

3.1 バッチ平衡試験

遮水壁に使用されたGCLの各材料の単位体積質量を表—1に示す。GCLは、GTとGTとの間に諸量のベントナイトが挟み込まれた材料であり、使用されたGTは不織布(上部GT)とスクリム(粗い織布)を用いた不織布(下部GT)によって構成されたポリプロピレン性製品である⁶⁾。本研究では、各温度条件において上部、下部GTおよびベントナイトを用いてそれぞれのバッチ平衡試験を行い、それらの吸着係数を決定した。初期濃度は0.6, 1.2, 2.5 mg/lである。ベントナイトの吸着試験は、ASTMの試験法⁶⁾を参考とした。濃度分析には、ガスクロマトグラフィーと質量分析器(V社:GC/MS)を使用した。

3.2 カラム溶出試験

図—4は、本研究で用いたステンレス製カラム溶出試験装置の概略図を示している。GCL上部には、ステンレス製のばねと厚さ1.3 mmのポラス板によって拘束圧を与えた。またGCL底部より5日間蒸留水を供給し、GCLを膨潤させた。その後、汚染源部に濃度2.5 mg/lのBTEX希釈水溶液がすばやく注入され、初期のサンプルが採取された。汚染源部、受容器内での濃度の均質性を保つために、装置内部にはテフロン加工されたマグネットをそれぞれ配置し、磁気攪拌機によって装置内部の水溶液を攪拌した。また、カラム溶出試験装置は恒温室(22℃)と低温室(5℃)に設置し、定期的にサンプル採取を実施した。

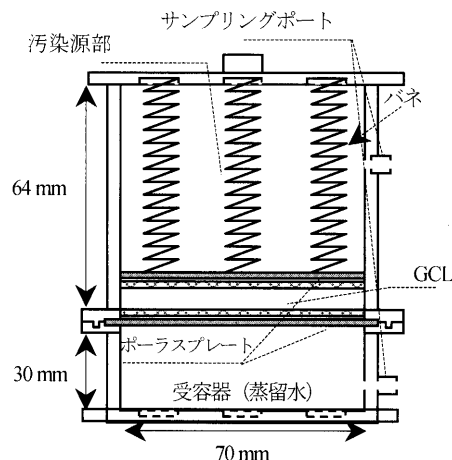
4. 汚染物質の輸送モデル²⁾

汚染物質は、その輸送過程において土成分と相互作用(拡散, 移流, 吸着および生物反応)を起こしながら移動する。本実験では、移流作用, 生物反応はないため、間隙水中における汚染物質の濃度 c [ML⁻³]の時間変化量は次式で表される。

表—1 GCLにおける各材料の単位体積乾燥質量: kg/m³

単位体積乾燥質量	
ベントナイト	320~360
GT (上部, 下部)	230(SD*: 26), 330(SD*: 13)

* 標準偏差



図—4 カラム溶出試験装置

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = nD \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \rho_d \frac{\partial S}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

各パラメーターは、 t : 時間 [T], n : 土の間隙率 [—], D : 有効拡散係数 [L²T⁻¹], z : 深さ [L], S : 単位質量に対する汚染物質の吸着量 [—], ρ_d : 単位体積乾燥質量(表—1)である。吸着量 S は、バッチ平衡試験によって評価される。低濃度においては吸着量と溶液の濃度が線形性を保つことが知られており²⁾, ここではその性質に従うと考え、次式によって吸着量が得られる。

$$S = K_d c_e \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 c_e : 平衡状態の希釈混合水溶液の濃度 [ML⁻³], K_d : 吸着係数 [L⁻³M]である。吸着係数(K_d)の定義は、吸着剤の物質(ここでは各部GTおよびベントナイト)の単位乾燥質量に吸着した汚染物質の体積となり、バッチ試験結果より算出される。

時間 $t=0$ における初期濃度を c_0 として、時間 t におけるGCL上端および下端の濃度境界条件はそれぞれ次のとおりである。

$$c_t(t) = c_0 - \frac{1}{H_r} \int_0^t f(t) dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$c_b(t) = c_{b0} + \frac{1}{H_{br}} \int_0^t f_b(t) dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

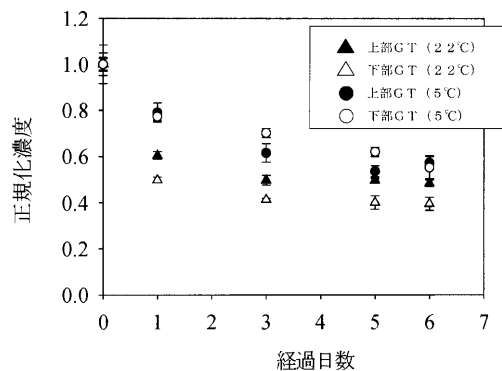
c_0 : 汚染源部の初期濃度 [ML⁻³], H_r : 汚染源部の高さ [L], $f(t)$: 時間 t における汚染物質の質量フラックス [ML⁻²T⁻¹], c_{b0} : 受容器の初期濃度 [ML⁻³]; H_{br} : 受容器の深さ [L]; $f_{br}(t)$: 時間 t における受容器に流入する溶質の質量フラックス [ML⁻²T⁻¹]である。この計算は、汎用プログラム POLLUTE[®]によって行った。

5. 実験および解析結果

5.1 吸着係数

図—5は、GTに対するバッチ平衡試験中のトルエン

論文



図—5 バッチ平衡試験中の濃度変化

表—2 各ジオテキスタイルの吸着係数: ml/g

試験温度	上部 GT	下部 GT
22°C	85.2~88.1	90.1~104.7
5°C	55.1	74.4

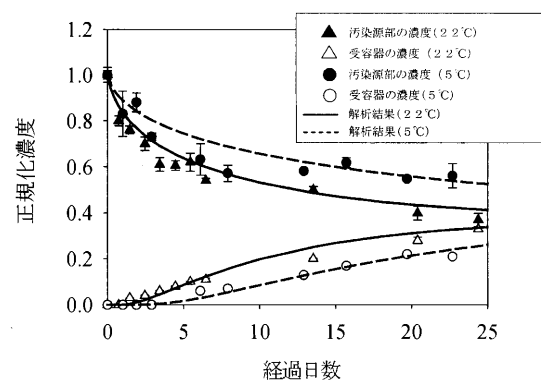
の濃度変化を示している。図中の濃度は初期濃度で正規化している。試験温度 5°C における実験結果は、22°C の結果と比較して、実験開始直後の濃度勾配が緩やかであり、平衡濃度が高い。すなわち吸着量が少ない結果を示している。このことから、極寒地の現場において、吸着特性による遅延効果は既存のデータ（室内温度条件）ほど期待できないと推測される。表—2 は、図—5 から得られる平衡状態の濃度を使って決定された各温度における吸着係数を示している。両温度において下部 GT の吸着係数が常に大きく、その値は約 1.1 倍から 1.3 倍である。ベンゼンほか 3 種類の物質を使った実験結果からもほぼ同じ比率が得られたが、これは上部および下部 GT の製品生成過程が異なるためと考えられる⁴⁾。

5.2 拡散係数

図—6 は、カラム溶出試験結果と POLLUTE[®] による解析結果を示している。表—3 は、それぞれ解析に導入した拡散係数を示している。ジオテキスタイルは、排水材として用いられることから高い拡散係数を有していると推測される。本数値解析では、GT 中の拡散係数に水中 (22°C および 5°C) における拡散係数を用いた。よって、ペントナイト層の拡散係数のみが繰り返し計算され、最小二乗誤差法により最適値を評価した。また、ペントナイトの吸着係数は、バッチ平衡試験結果から得られた 1.9 ml/g を使用した。表—3 は、低温では拡散係数も小さくなる傾向を示している。もし拡散性が温度に依存しなければ、吸着性の低下から 5°C における受容器の濃度は高い値を示す。しかし、図—6 より明らかなように、低温時の方が受容器の濃度は小さい。このことから温度変化に伴う GCL 中のトルエンの輸送は、拡散現象に支配されているといえる。受容器の濃度低下をもたらす要因が拡散速度の低下であり、さらにそれが温度低下によって引き起こされていることから、現地の低温条件は汚染物質の輸送を抑制する有利な条件であるといえる。

6. おわりに

本報では、異なる 2 種類の温度において GCL 中のト



図—6 カラム溶出試験結果と数値解析結果

表—3 各温度におけるトルエンの拡散係数 ($\times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)

実験温度	22°C	5°C
ポーラスプレート, 上部 GT および下部 GT	8.8	5.8
ペントナイト	2.9(2.5~3.3)	1.9(1.6~1.9)

ルエンの輸送特性を評価した。温度低下に伴う物質輸送の遅延は、吸着特性よりも拡散特性によって発揮することが明らかとなった。

本報告のほかに本プロジェクトでは、凍結融解前後の GCL に関するジェット燃料を使用した柔壁、剛壁透水試験、また凍結中の GCL に対する透水試験なども実施中である。これらの試験結果から、遮水壁の長期遮水性能の検討を行う予定である。

謝 辞

Queen's 大学への留学の好機を与えてくださった熊本大学教授の大谷順先生に、心より厚く御礼申し上げます。また、室蘭工業大学の吉田英樹先生には多大なご助言をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Li, H. M., Bathurst, R. J. and Rowe, R. K.: Use of GCLs to Control Migration of Hydrocarbons in Severe Environmental Conditions, International Symposium on Geosynthetic Clay Barriers, Nuremberg, Germany, April, pp. 187~198. 2002.
- 2) Rowe, R. K.: Geotechnical and Geoenvironmental Engineering handbook, Kluwer Academic publishers, Boston. 2001.
- 3) Rowe, R. K., Mukunoki, T., Li, H. M. and Bathurst J. R.: Effect of freeze-thaw on permeation through a GCL, Journal of ASTM International, Vol. 1 No.2, 1~13, 2004.
- 4) Rowe, R. K., Mukunoki, T. and Sangam, P. H.: Effect of temperature on BTEX through a GCL, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. (to apply).
- 5) Mukunoki, T., Rowe, R. K., Li, H. M., Sangam, H. P., Hurst, P., Bathurst, R. J. and Badv, K.: Hydraulic conductivity and diffusion characterization of GCLs, 56th Canadian Geotechnical Conference & North American Geosynthetics Society, Winnipeg, September, 1: 668~674. 2003.
- 6) ASTM: Standard test method for determining a sorption constant (Koc) of organic chemical in soil and sediments, E1195-87, The American society for Testing and Materials, Vol. 11.05, pp. 497~503. 1993.

(原稿受理 2003.9.25)