

廃棄物最終処分場からの漏水による地下水汚染濃度シミュレーション

Simulation of groundwater contamination by the leakage from the waste disposal site

室蘭工業大学 学生員 横田典子 (Noriko Yokota)
 室蘭工業大学 学生員 河村彰一郎 (Kawamura Shouichirou)
 室蘭工業大学 正 員 吉田英樹 (Hideki Yoshida)
 室蘭工業大学 正 員 穂積 準 (Hitoshi Hozumi)

1. はじめに

日本において、廃棄物最終処分場からの漏水に起因する地下水汚染の定量的な評価を行っている研究事例はいくつか見られるが^{1,2)}、まだ十分には検討されていない状況である。

本研究では、廃棄物最終処分場からの漏水に起因する地下水汚染濃度のシミュレーションを行った。計算には、北米で実績のある漏水汚染解析ソフトウェア POLLUTE³⁾を用いた。

計算において、日本では遮水工（遮水シート、難透水性地盤）に関する構造基準の変遷の中で様々な形態の遮水工を持つ処分場が存在するため、遮水工の条件の違いを考慮した。

2. 日本の廃棄物最終処分場遮水工基準について

日本における遮水工に関する基準の今日までの変遷を以下に示す。

1) 1978年(昭和53年)の旧厚生省・総理府の共同命令⁴⁾

「遮水工としては、粘土、ビニールシート、アスファルト等を埋め立て地の側面部、底面部へ布設したり、あるいは不透水層まで止水矢板を打ち込む等の工法がとられる」と説明され、ここで遮水工の布設が必要とされる

地盤の不透水性の判断は最終処分場指針の解説によれば「透水係数 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ 」とされていた。ここで、不透水層の厚さに関する規定は示されていない。また、遮水シートが使われ始めた。

2) 1998年(平成10年)の環境省・内閣府の共同命令⁵⁾

地盤不透水性の判断は「透水係数 10^{-5}cm/s 以下で厚さ 5m 以上」とされ、初めて不透水層の厚さに言及された。さらにこれと同等の遮水性能を持つタイプとして、1) 遮水シートの2重化、2) 遮水シートと透水係数 10^{-6}cm/s 以下で厚さ 50cm 以上の地盤、3) 遮水シートと透水係数 10^{-7}cm/s で厚さ 5cm 以上の地盤、が示された。

このように遮水工に関する基準の今日までの変遷の中で、様々な形態の遮水工を持つ処分場が存在している。

一方、遮水工からの漏水汚染を監視するため、埋立開始前後で周縁地下水の水質の測定・記録を行うこととし、特に電気伝導度と塩化物イオンについては月1回以上測定・記録し、これらの項目に異常がないかどうかを確認することとされている⁶⁾。ここで言う「異常」という表現についての詳細が規定されていないため、例えば塩化物イオン濃度がどのレベルになったら「異常」とするかについての判断が必要となる。このような判断をする際

表-1 漏水汚染解析計算条件一覧

基準別		共同命令(1978)		共同命令(1998)		
		A-1	A-2	B-1	B-2	B-3
廃棄物	厚さ (m)	20	20	20	20	20
	長さ (m)	100	100	100	100	100
	密度 (kg/m ³)	1000	1000	1000	1000	1000
	降雨浸透速度 (m/a)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	塩化物イオン含有量 (%)	1	1	1	1	1
浸出水	内部水位 (m)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	濃度 (mg/l)	2000	2000	2000	2000	2000
遮水シート	厚さ (mm)	-	1.5	-	1.5	1.5
	破損 (個×1cm ² /acre)	-	1	-	1	1
	拡散係数 (m ² /y)	-	3×10^{-5}	-	3×10^{-5}	3×10^{-5}
地盤	厚さ (m)	1	1	5	0.5	0.05
	密度 (kg/m ³)	1900	1900	1900	1900	1900
	透水係数 (m/s)	10^{-7}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
	拡散係数 (m ² /y)	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}
	間隙率	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
地下水帯	厚さ (m)	3	3	3	3	3
	間隙率	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
	地下水流速 (m/y)	365	365	365	365	365

には、本研究で提示する数値シミュレーションの利用が有用であると考えている。

3. 漏水による地下水汚染の解析

3.1 概要

Rowe³⁾らによって開発されたシミュレーションソフトウェア POLLUTE では、廃棄物最終処分場底部からの漏水による汚染物質の流れを鉛直方向に移流拡散方程式を用いて解く際に、汚染水が地下水帯に達した場合の水平方向の流れも考慮し、いわば疑似2次元流れ解析を行っている。遮水工直下に存在すると仮定している地下水帯内に達した汚染水は地下水帯内で均質に混合して、横方向に移動するものと仮定し、このときの地下水帯中の濃度が地下水汚染を示す濃度と考えている。

廃棄物層から地盤への浸透については地盤内が水分飽和状態であると仮定し、動水勾配 = (廃棄物層内の内部水位 + 地盤厚さ) / 地盤厚さを求め、これに地盤の透水係数をかけて浸透速度 (ダルシー速度) を求めている。地盤内が不飽和状態にあるので、危険側の仮定となっている。

遮水シートからの漏水現象に関しては、遮水シートが良好に施工されたとしてもピンホールのような破損が存在していると仮定し、Giroud ら⁷⁾が提案している推定式に基づき、漏水流量を計算している。

また、廃棄物層に浸透した降雨のうち、地盤に浸透した分を除いたものはすべて集水管網によって回収・場外へ排除されるとしている。

廃棄物層内部水の汚染物質濃度 (つまり遮水工から漏水する汚染水の濃度) については次のように計算している⁸⁾。まず廃棄物層内の汚染物質の初期含有量を設定し、浸出水集水管によって回収・場外へ排除される物質と漏水によって地盤に浸透した物質をそれぞれ求め、廃棄物層内の汚染物質残存量を逐次計算する。そして、汚染物質の初期含有率を初期浸出水中汚染物質濃度で除して仮想水量を求め、任意の時間の汚染物質残存量をこの仮想水量で除して、廃棄物層内部水の汚染物質濃度を計算している。

3.2 計算条件

日本の遮水工に関する基準の変遷を考慮して、表1のように計算条件を設定した。1978年の遮水工基準では不透水層の厚さに関する規定がないので、便宜的に1mと設定した (5mとした場合も計算結果はほぼ同じであった)。また、遮水シート布設時のシート直下の地盤に関する規定がないので、透水係数が不透水性の基準 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ より1オーダー大きい 10^{-3}cm/s (10^{-5}m/s) とした。汚染解析対象物質は、汚染現象の指標として一般に用いられている塩化物イオンとした。難透水性地盤の密度と間隙率は POLLUTE の Manual³⁾の計算例題で採用されている値を用いた。

また、遮水シートの破損については、Rowe⁹⁾は処分場建設時では 4000m^2 (1エーカー) あたり直径2mmの破損が1-2個とされているが、埋立開始後には増えると考え、 1cm^2 の破損を前提に設定することを推奨しており、これに従った。降雨浸透速度として、日本は東京 (年間

1600mm) の降雨量の50%が年間を通して一定で浸透するとした (浸透速度 0.8m/y)。浸出水中の塩化物イオン濃度については、福井による処分場での実測例¹⁰⁾を、また廃棄物中の塩素含有量は松田らの報告¹¹⁾を参考に設定した。日本の地下水流速は $0.1 \sim 10 \text{m/d}$ ($36 \sim 3650 \text{m/y}$) とされているので¹²⁾、代表値として 1m/d (365m/y) と設定した。

3.3 地下水汚染濃度計算結果

図-1~10に計算結果を示した。図-1はA-1の条件で帯水層直下の地下水中の汚染物質濃度 (塩化物イオン濃度, Aquifer) 及び、廃棄物層内の汚染物質濃度 (Waste) の変化を示したものである。縦軸は初期の廃棄物層内の汚染物質濃度 C_0 に対する相対比を求めた値で示している。

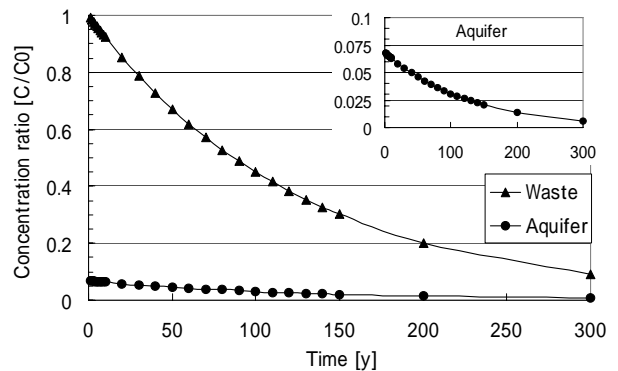


図-1 漏水汚染解析結果 (A-1 GMなし $10^{-5} \text{cm/s} \times 1 \text{m}$)

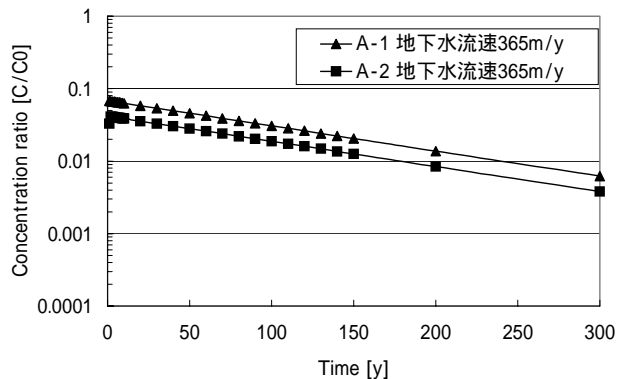


図-2 A-1,2での地下水流速による影響

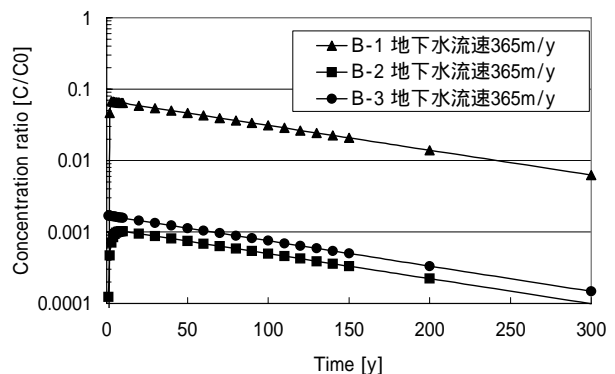


図-3 B-1,2,3での地下水流速による影響

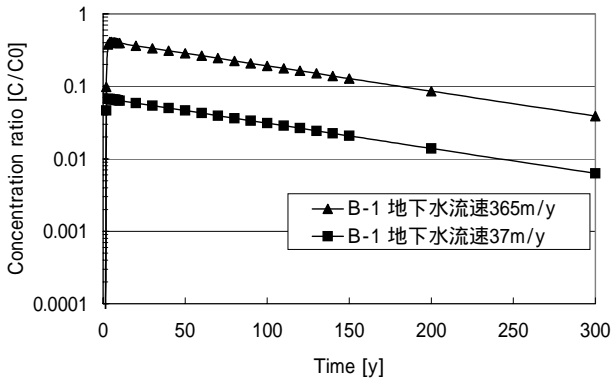


図-4 地下水流速の影響
(B-1 GMなし $10^{-5}\text{cm/s} \times 5\text{m}$)

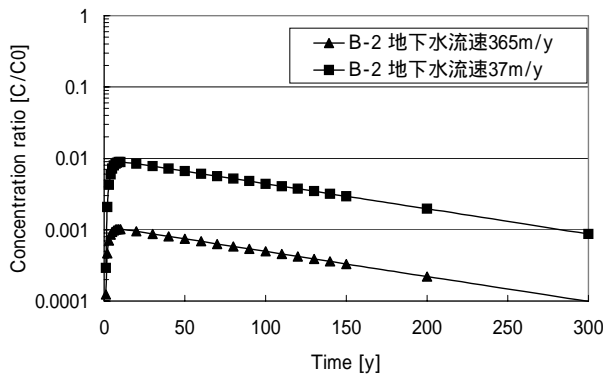


図-5 地下水流速の影響
(B-2 GMあり $10^{-6}\text{cm/s} \times 0.5\text{m}$)

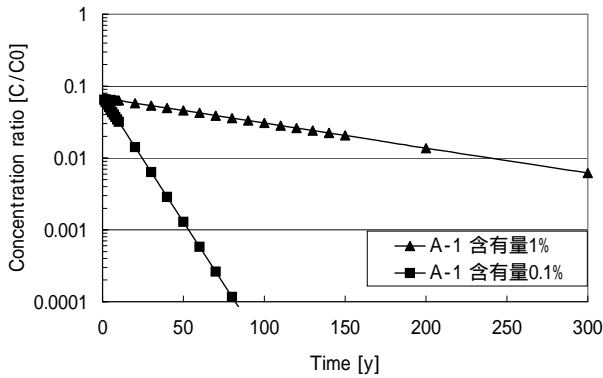


図-6 廃棄物中の汚染物質含有量
による影響

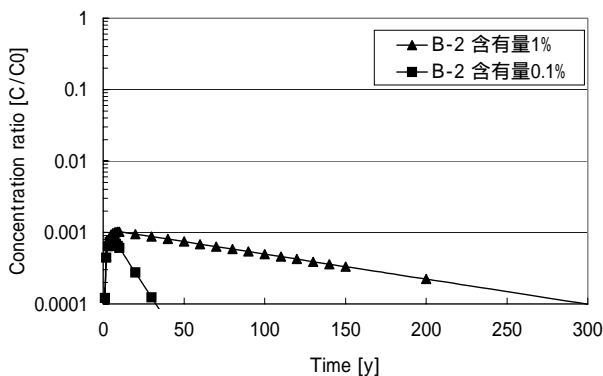


図-7 廃棄物中の汚染物質含有量
による影響

廃棄物層内の汚染物質濃度は 90 年後には初期濃度の 50% (相対比 0.5)、200 年で 20% (相対比 0.2) まで減少している。これは先に述べたように、地盤への汚染水の浸透によって廃棄物層内の汚染物質の量が減少することを考慮した結果である。このケースでは地盤の透水係数が大きいため、廃棄物層に浸透した降雨のすべてが汚染水として地盤に浸透しているものとして計算している。一方、地下水中の汚染物質濃度は極めて早期に上昇し、初期濃度の約 7% のピーク濃度を示し、その後漸減している。これは漏水汚染物質濃度が減少するためである。

次に、図 2 は A-1 と A-2 の同地下水流速での地下水中の汚染物質濃度を比較したものである。A-2 の条件は、A-1 の条件よりも地盤の透水係数が 2 オーダー高いにも関わらず、A-1 よりも濃度が低い。これは A-2 で遮水シートがあることによって、シート破損の存在にもかかわらず、汚染物質の遮断効果が高いことを表している。

図 3 は B-1,2,3 の同地下水流速での地下水中の汚染物質濃度を比較したものである。B-1 と B-2, B-3 の濃度の差が大きいのは、遮水シートの有無によるものである。遮水シートがある B-2 と B-3 の条件を比較すると、B-3 の方で汚染濃度がピークで 1 オーダー程大きいことがわかる。これは、いくら地盤の透水係数が小さくても層厚が薄くては漏水の影響を受けることを示している。B-2 の地盤の透水係数は B-3 より 1 オーダー高いものの、地盤の厚さは 10 倍である。このことから、遮水シート存在下では地盤の透水係数よりむしろ地盤の厚さが汚染リスクを減らすために重要であることがわかる。

次に、地下水による希釈効果の影響を検討するために、地下水流速を変化させた場合について計算した。計算には地下水流速を 365m/y から 37m/y まで 1 オーダー低くして計算した。

図-4,5 は B-1, B-2 の条件についての計算例である (B-3, A1,2 での計算結果の傾向はほぼ同じであった)。地下水流速が 365m/y から 37m/y へと 1/10 になると、地下水中の汚染物質濃度はほぼ 10 倍になっている。これは地下水による希釈効果が 1/10 になるためである。このように、地下水汚染の評価では地下水流速が極めて重要なパラメータになっていることがわかる。

次に廃棄物層内の汚染物質含有量を 1% から 0.1% に変えた場合、つまり汚染物質の不可が 1/10 になった場合の計算結果を示す。ここでは図-2 ~ 図-5 までの計算結果を参考に、A-1 から B-3 の条件の中でも特に地下水汚染の影響が大きいものとして A-1, 小さいものとして B-2 を選択し、地下水中の汚染物質濃度の計算を行ったものが図-6,7 である。廃棄物層中の汚染物質含有量が 1/10 になると、廃棄物層中の汚染物質濃度は 10 年 ~ 20 年まではほぼ同様の濃度を示すが、それ以降は濃度低下が早い。そして、このため図に示したように地下水中の汚染物質濃度の低下も早くなっている。このように、廃棄物層中の汚染物質含有量を正確に推定することが地下水汚染の評価で重要であることがわかる。

4. おわりに

本研究で地下水汚染シミュレーションを行った結果、

以下のような結果が得られた。

- 1) 日本の廃棄物最終処分場遮水工基準についての変遷を考慮した場合、遮水シートの有無が最も影響が大きく、破損を想定した遮水シートでも汚染物質の遮断性が優れていることがわかった。
- 2) 遮水シートを布設した場合では、シート直下の難透水性地盤の透水性や厚さが地下水汚染に大きな影響を与えるが、特に厚さによる影響が大きいことがわかった。
- 3) 地下水流速及び廃棄物層中の汚染物質の含有量による地下水汚染への影響が極めて大きく、これらのパラメーターを正確に把握する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 勝見武・Benson,C.H.・Foose,G.J.・嘉門雅史:廃棄物処分場遮水ライナーの性能評価について, 廃棄物学会誌, Vol.10, No.1, pp.75~85, 1999.
- 2) Chai, J.C.,・Miura N. :Comparing the performance of landfill liner systems, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol.4, No.2, pp.135~142, 2002.
- 3) Rowe, R.K.・Booker,J.R.・Fraser, M.J.:POLLUTEv6 User's Manual, GAEA, 1994.
- 4) 廃棄物処理技術開発センター: 廃棄物最終処分場しゃ水工, 全国都市清掃会議, p16, 1987.
- 5) 全国都市清掃会議: 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領, p.214~215, 2001
- 6) 最終処分場技術システム研究会: 廃棄物最終処分場技術システムハンドブック, 環境産業新聞社, pp.657~658, 1999.
- 7) Giroud, J.P.・Bonaparte, R. :Leakage through a composite liner due to geomembrane defects, Geotextiles and Geomembranes, Vol.11, No.1, pp.1~29, 1992.
- 8) Rowe, R.K.・Quigley, R.M.・Booker, J.R. : Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities, E&FN SPON, pp.246~255, 1999
- 9) Rowe, R.K. : Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishers, pp.802, 2001.
- 10) 福井博:最終処分場浸出水による地下水汚染の監視指標について, 廃棄物学会研究発表会講演論文 II, pp.1006~1008, 2002.
- 11) 松田賢士・箕原伸二・島岡隆行:既埋立焼却残渣中の塩分の性状について, 廃棄物学会研究発表会講演論文 II, pp.960~962, 2002.
- 12) 山本荘毅: 地下水水文学, 共立出版, p.85, 1992.