

テクニカルレター*

ストロンチウム濃度を指標とする地下水動態調査の試み

長嶋真一郎¹, 矢野 良子^{®1}, 田倉 俊彦²An attempt to verify the restoration of underground water veins
by using a strontium tracerShin-ichiro NAGASHIMA¹, Yoshiko YANO¹ and Toshihiko TAKURA²¹ Department of Chemical Science and Engineering, Tokyo National College of Technology, 1220-2, Kunugida-cho Hachioji-shi, Tokyo 193-0997² DAIICHIKASEI Co., Ltd, 1-13-1, Fujimi-cho, Gyoda-shi, Saitama 361-0021

(Received 2 June 2003, Accepted 9 August 2003)

This research aimed to verify the restoration of a water vein in Hachioji-Minamino City. The developer of the new town had made an attempt to link some separated water veins with artificial strata of gravel. An aqueous solution of Sr^{2+} was injected into a probable upstream point (B12-3) of a vein, and every 2 weeks after that the Sr^{2+} levels in water samples from four probable downstream points were analyzed. About 40 days after at one (S-16) of the four points, an extraordinary increase in the Sr^{2+} concentration was observed. At the same time, the concentration levels of Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^{+} and the electric conductivity suddenly increased. These show that the two points, B12-3 and S-16, are linked to each other and that Sr^{2+} is a suitable stable indicator for analyzing underground water veins. The concentration levels of the above-mentioned cations were also observed every month for underground water samples from several sampling points where the water vein was supposed to be independent of the present tracer investigation. The quartile deviations for the observed values were shown mostly within 5% for a very long time, a max. of 34 months.

Keywords : underground water; tracer; strontium; ICP-AES.

1 緒 言

現在も一部未完成工区を残す東京都八王子市八王子みなみのシティの都市開発 (390 ha; 都市基盤整備公団東京支社東京西部都市整備事務所による) においては, 造成工事に伴って全国で初めての本格的な「水循環再生システム」を工法として導入している¹⁾. これは, 雨水の貯留浸透施設による地下水かん(涵)養, 地下に設けた透水性盛土層による地下水脈の確保, などにより洪水流出量の抑制と地域内河川である兵衛川の清流復活を図ろうというものである. 本システム導入効果については, 既に水文調査に基づ

くシミュレーションによって解析がなされている²⁾. 本研究では, 旧谷戸部の盛土造成工事において施工された透水性盛土層が, 実際に分断された水脈を連結する機能を果たし, その結果として地下水脈が復元されたかどうか, 放射性同位元素あるいは蛍光化学物質などを使用せずに検証することを目的とする. この目的のためには二つの調査を行った. 第1に, 平常時における地下水中成分濃度変動の動向を把握するため, 同地域の多数の任意の地下水の分析を長期にわたって行うことである. 第2に, 安定トレーサーを地下水脈上流より投入した後, 下流部での濃度応答を観測することである. 本研究において安定トレーサーとしてストロンチウムイオンを提案するが, その優位性は, 地下水中に本来ごく低濃度しか存在しないこと, 分析に使用する誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES) において感度が極めて高いこと, 化学的性質がカルシウムに類似し

* 若手研究者の初論文特集

¹ 東京工業高等専門学校物質工学科: 193-0997 東京都八王子市梶田町 1220-2² 第一化成株式会社行田工場: 361-0021 埼玉県行田市富士見町 1-13-1

Table 1 Analytical conditions for ICP-AES measurements

Instrument	Seiko SPS7800
Plasma power	1.2 kw
Argon flow rate or pressure	
Plasma gas	16 l/min
Auxiliary gas	0.4 l/min
Carrier gas	0.2 MPa
Chamber gas	0.6 l/min
Analytical wave length/nm	
Na: 589.592, Mg: 280.270, Ca: 317.933, Si: 251.611, Sr: 407.771	

て毒性がないこと, などで示される. 従来, このような安定トレーサーとしては塩化ナトリウムが主として利用されており³⁾, ストロンチウムが利用された例はない. したがって, 本研究では安定トレーサーとしてのストロンチウムイオンの有効性を確認することのも一つの目的としている.

2 実 験

2.1 装置と器具

試料水中のナトリウム, マグネシウム, ケイ素, カルシウム, ストロンチウム濃度の測定に ICP-AES 装置 (セイコーインスツルメンツ製 SPS7800 型) を使用した. 測定は Table 1 に示したような条件下で行った. 電気伝導度の測定には携帯用電導度計 (東亜ディーケーケー製 CM-1 K 型, CV-101S 型セル) を使用した. 塩化カリウム溶液 (0.01 mol/kg) を用いて校正を行った. pH の測定に pH メーター (東亜ディーケーケー製 HM-20E 型, GST-5211C 型複合電極) を使用した. 地下水の採取には IS-200 型井戸用採水器 (外径 30 mm × 全長 600 mm, 採水量 200 ml) を利用した.

2.2 試 薬

検量線試料溶液作製のため, 和光純薬製 ICP 分析用多元素混合標準液 W-I (K: 2000, Na: 2000, P: 1000 ppm) 及び W-II (Ca: 1000, Co: 100, Fe: 100, Mg: 1000, Mn: 100, Ni: 100 ppm), 関東化学製原子吸光分析用: ストロンチウム標準液 (1000 ppm) 及びケイ素標準液 (1000 ppm) を使用した. 安定トレーサー調製には和光純薬製無水塩化ストロンチウムを使用した. その他の塩類, 酸類は市販の特級試薬を用いた. 実験全般にわたって使用した超純水はオートビュー WQ500 (ヤマト科学製) を用いて製造した. 分析条件あるいは分析結果の妥当性を検証するため, 河川水標準物質 JAC-0031 {認証機関: (社) 日本分析化学会} を利用した.

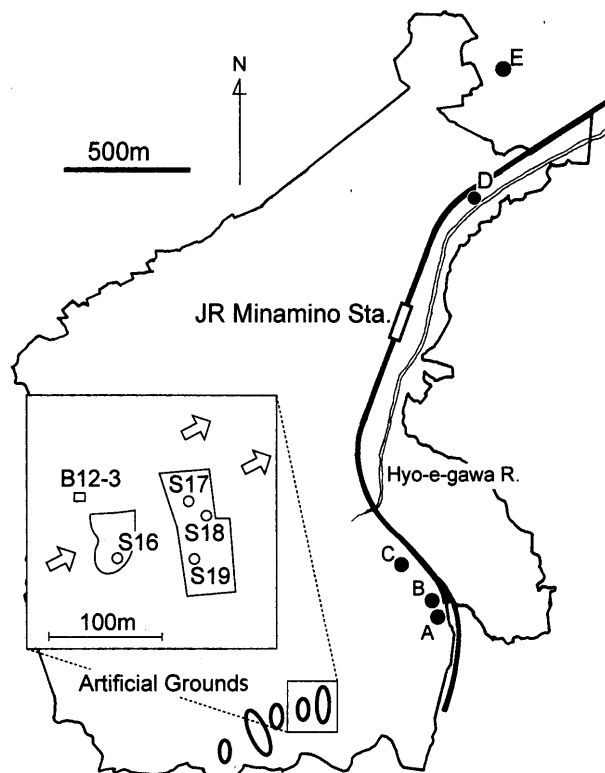


Fig. 1 Sampling points in Minamino area

At points S16, S17, S18, and S19 examination wells are dug into artificial ground. The tracer was injected into an examination well at B12-3 of natural ground. The underground water springs out of ground surface at points A, B, C, and E. A well at D is for domestic use.

2.3 採 水

本研究において採水を行った地点を Fig. 1 に示す. 八王子みなみのシティ最南部地区は現在も造成工事が進行中である. ここには水循環保全システムの機能検証を目的として現在観測を継続, あるいは中断している水文調査用地下水観測孔が存在する. トレーサーの投入とその応答の観測はそれらの地下水観測孔のうち, B12-3, S-16, S-17, S-18, S-19 を利用した. この地域の推定構成地質は, ローム層が表層を覆いその下位に上総層が分布し, その上総層自体には上位から砂層 (Ks3 層), 泥層 (Km3 層), れき (礫) 層 (Kg2 層), 砂層 (Ks4 層) が分布している. 泥層 (Km3 層) は難透水層の役割を果たしている. 上に挙げた観測孔 B12-3 は自然地盤の上総層最上位の砂層 (Ks3 層) の帯水層に設置されている. 観測孔 S-16, S-17, S-18, S-19 はいずれも Ks3 層との水脈連結を目指して盛土施工された人工地盤中の透水層に設置されている. 観測孔 S-17, S-18, S-19 は同一の人工地盤内にあるが, S-16 は自然地盤で隔たった別の人工地盤に位置している. 観測孔からの採水はトレーサー投入後, 2 週間に 1 回の頻度で行った. 観測孔からの採水のほかに, みなみ野地域と周辺のゆう水

Table 2 Variations of observed values of the underground water samples for long term

Sampling site Sampling term Number of samples		Chemical elements observed					Electric conductivity/ $\mu\text{S cm}^{-1}$
		Na/ mg l^{-1}	Mg/ mg l^{-1}	Ca/ mg l^{-1}	Si/ mg l^{-1}	Sr/ $\mu\text{g l}^{-1}$	
A 2000.7~2003.2 $n = 28, \text{Sr}; n = 20$	Min.-Max.	4.5-6.0	3.7-4.7	11.9-16.8	14.4-22.7	69-92	100-167
	Median	5.3	4.3	14.0	19.5	84	140
	Quatile dev.	0.2	0.2	1.0	1.0	6	10
B 2001.4~2003.2 $n = 21$	Min.-Max.	4.1-4.9	3.2-4.1	6.3-8.8	15.0-19.4	40-52	86-124
	Median	4.5	3.7	7.9	16.1	45	101
	Quatile dev.	0.1	0.1	0.4	0.5	3	6
C 2001.12~2003.2 $n = 13$	Min.-Max.	2.6-3.1	2.4-3.6	3.8-6.6	10.6-12.9	13-20	69-82
	Median	2.9	3.2	5.2	11.7	17	76
	Quatile dev.	0.1	0.1	0.1	0.6	1	2
D 2001.7~2003.2 $n = 18$	Min.-Max.	6.3-7.2	9.3-12.3	17.9-24.8	16.5-21.3	104-140	217-291
	Median	6.6	11.3	22.7	18.3	126	259
	Quatile dev.	0.1	0.4	0.8	0.4	7	17
E 2000.4~2003.2 Sr2001.4~2003.2 $n = 30, \text{Sr}; n = 21$	Min.-Max.	3.4-4.8	4.6-6.8	10.5-14.4	10.9-16.6	38-51	100-171
	Median	4.2	5.4	12.0	14.5	44	141
	Quatile dev.	0.2	0.4	0.7	0.8	4	10

(Fig. 1; A, B, C, E) と井戸水 (Fig. 1, D) については 1 か月に 1 回の頻度で, 最長 34 か月にわたって採水を行った。

試料水採取と同時に現地で気温, 水温, 電気伝導度の測定を行った。実験室に持ち帰ったら直ちに 0.45μ のメンブランフィルターで濾過し, pH を測定した後, 試料体積に対して 1% の濃硝酸を加えて冷蔵保存し ICP-AES 測定用試料とした。

2・4 ストロニウム塩の投入

2002 年 11 月 27 日の採水作業終了後, トレーサーとして無水塩化ストロニウム 500 g を純水約 1.5 l に溶かして (Sr として 276 g), 観測孔 B12-3 へ投入した。孔は直径 50 mm の塩化ビニル管製で水面まで約 4 m あるため, よく洗浄したビニルチューブを水面近くまで挿入し, チューブを通して Sr 溶液を投入した。

3 結果及び考察

3・1 長期観測による地下水成分濃度及び電気伝導度の変動

トレーサー投入前のバックグラウンド確認のため長期にわたって得た試料水の成分及び電気伝導度の測定結果を Table 2 にまとめた。本来であれば実際にトレーサー応答を観測する地点でのバックグラウンド確認が必要であったが, 工事区域内への立ち入りがスケジュール上困難であったので, モデル地点を 5 箇所選定して一般的傾向を見るにとどめた。各採水地点の各測定項目について最大値と最

小値の範囲, 中央値, 四分位偏差を示した。一連の測定の定量限界は, ナトリウム: 0.4 mg/l , マグネシウム: 0.009 mg/l , カルシウム: 0.1 mg/l , ケイ素: 0.07 mg/l , ストロニウム: $0.52 \mu\text{g/l}$ であった。大部分の観測値の四分位偏差が中央値に対して 5% 以下の小さなばらつきしか持たず, 観測対象とした地下水成分濃度が長期にわたって安定であることを示している。もともと地下水に含有されている成分をトレーサーとすることの妥当性を表している。中でもストロニウムは, 四分位偏差が他元素と比べるとやや大きい傾向にあるとはいえ, 絶対濃度は 10^{-2} から 10^{-1} mg/l , カルシウム濃度の $1/300$ から $1/500$ の程度であり, トレーサーとして利用する場合に特に有利な条件を持っている。いずれの成分も季節変動と思われる傾向は示さなかった。

Table 2 に掲げた電気伝導度は水温による補正後の値である。電気伝導度のばらつきも四分位偏差の中央値に対する割合として 2% から 7% 程度であったが, 採水ポイント E においては冬から春にかけて電気伝導度がやや低くなる傾向を示した。このポイントの背後にある台地が広く畑地となっており, 施肥に由来するアンモニウムイオンあるいは硝酸イオンなどに原因があると推定している。実際に硝酸イオン濃度はイオンクロマトグラフ法 (Shodex I-524A カラム; 0.75 mM フタル酸水素カリウム溶離液) により, 2001 年 4 月から 2002 年 9 月まで 17 回にわたってほぼ定期的に測定された⁴⁾が, 中央値 29 mg/l を示した採水ポイント E のみが環境基準である 10 mg/l を大幅に超えた。最小~最大値は $21 \sim 36 \text{ mg/l}$, 四分位偏差も 4

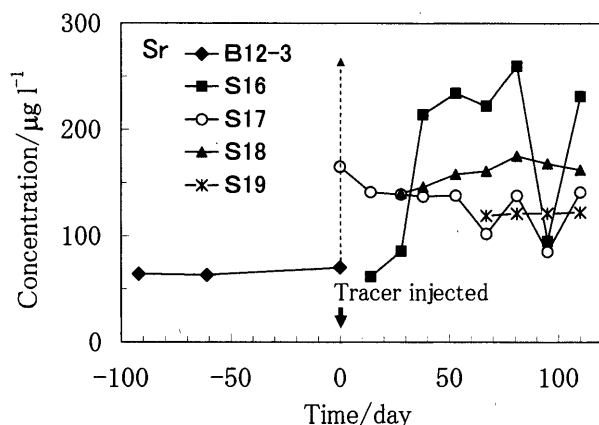


Fig. 2 The response in Sr concentration after injection of the tracer

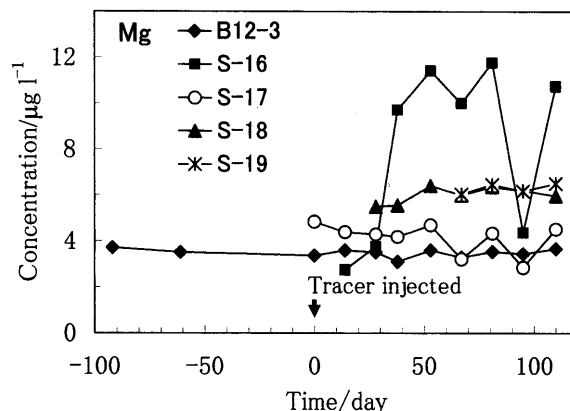


Fig. 4 The response in Mg concentration after injection of the tracer

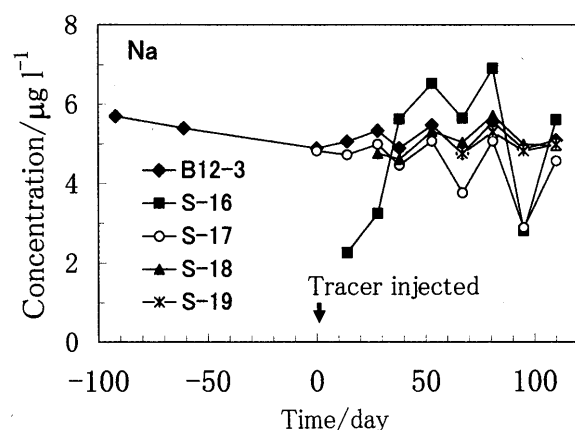


Fig. 3 The response in Na concentration after injection of the tracer

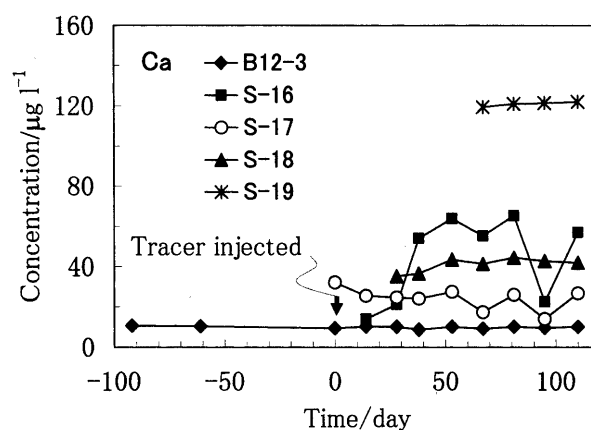


Fig. 5 The response in Ca concentration after injection of the tracer

mg/lであり、濃度変動が大きい。地下水動態調査の指標のひとつとして電気伝導度が利用される場合には、施肥による影響は考慮すべき問題点であることが示された。

3.2 地下水観測孔におけるトレーサー応答

トレーサー投入地点 B12-3 及び各応答観測地点の成分濃度と電気伝導度の測定結果を Fig. 2 から Fig. 6 に示した。S16 地点ではトレーサー投入約 40 日後に高濃度のストロンチウムを検出した (Fig. 2)。この 2 地点間のトレーサー到達予想時間は、式 (1)⁵⁾ を用いて算出される地下水実流速、 v_0 を用いて計算すると 27 日であった。

$$v_0 = \kappa i / \mu \quad (1)$$

κ : 透水係数 (Ks3 層 2.0×10^{-3} cm/s, 復元帯水層 2.0×10^{-3} cm/s), μ : 有効空げき率 (Ks3 層 8%, 復元帯水層 16%), i : 動水勾配 (地点間の地下水位の差/距離)。

実際のトレーサー到達に要した時間は計算よりやや長い

が、B12-3 と S16 を結ぶ方向が推測されている地下水の流れに対してほぼ垂直方向であり、拡散を考慮するならばよく一致しているといえる。

極めて興味深いことに、S16 観測孔地点ではトレーサー ストロンチウム濃度の上昇と同時に、ケイ素を除く 3 成分、すなわち、ナトリウム、マグネシウム、カルシウムの濃度上昇が起きた (Fig. 3~Fig. 5)。電気伝導度もストロンチウム濃度の上昇では説明ができないほどに増大している (Fig. 6)。その増加分は観測されたナトリウム、マグネシウム、カルシウムの濃度上昇にちょうど見合う値となっている。一方、トレーサー投入点では、ストロンチウム以外の金属イオンの顕著な濃度上昇は起きていない。ストロンチウムが帯水層を移動する過程で固相と相互作用して、より易溶性のナトリウム、マグネシウム、カルシウムと置換していった可能性を示唆する。吸着あるいは沈殿をしないことはトレーサーが備えるべき性状ではあるが、置換して溶出したイオン、特にナトリウムは、Table 2 で既に見たように、自然地下水中での濃度変動が極めて小さい

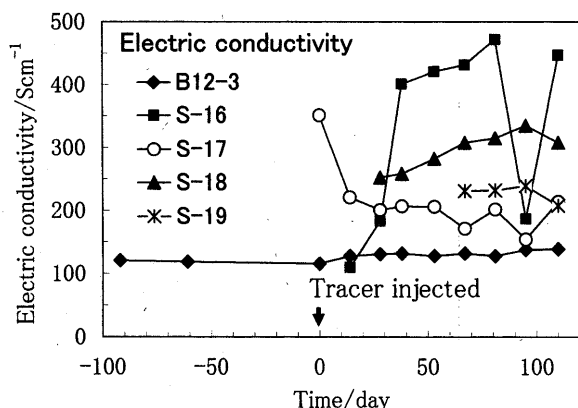


Fig. 6 The response in electric conductivity after injection of the tracer.

ので、トレーサー応答指標として本来のストロンチウムと併せて利用すれば有効であると思われる。ストロンチウムの投入量を低くすればこのような現象が起きないことも予想される。本研究では、投入すべきトレーサー量の算出に当たって、S17, S18, S19の観測孔が含まれる人工地盤が約 6000 m³ の地下ダムの機能を持つことを考慮し、このダムで均一に拡散しても検出できる量を投入した。

そのほかの観測孔の結果をみると、S18 地点で成分濃度及び電気伝導度の応答が見られた。投入前の B12-3 地点における変動と比較すると、わずかとはいえ、明らかな応答と考えられる。グラフから濃度上昇の開始は 70 日前後と考えられ、計算によるトレーサー到達時間である 75 日とよく一致した。ストロンチウムだけでなく、ナトリウム、マグネシウム、カルシウム及び電気伝導度が類似の応答挙動を示していることは S16 地点と同様に考察することができる。

一方、計算によるトレーサー到達予想時間が 64 日である S17 地点と 94 日である S19 地点ではトレーサー投入後 100 日を過ぎても応答が見られない。なんらかの理由で地下水実流速が計算値より遅いことも懸念されるが、以下の点にも注目すべきであろう。すなわち、初期の時点で S17 地点で採水を行うと、試料水とともに動植物の残がいや明らかに腐敗過程物と思われるものなどのごみが大量に採取され、また強いドブ臭を放っていた。観測孔パイプの最上部が地表面すれすれである上、ふたがされていないことが原因と思われる。その後、ドブ臭は徐々に弱まっていったが、帯水層の厚みは初期と同様に 0.7 m ほどで 1~2 m 前後ある他の観測孔より明らかに薄かった。したがって、この観測孔パイプのストレーナーはごみのたい積により目詰まりを起こしており、新しい地下水の正常な流入が阻害されていると想像される。電気伝導度の観測値は当初の 350

Scm⁻¹ から急激に減少している (Fig. 6)。この理由は、観測孔内の水量は約 1.5 l と算出されるが、採水ごとに約 1 l をくみ上げることによって新しい地下水の流入を強制した結果であると考えている。このような条件下でも地下ダムでストロンチウムが均一に拡散していれば検出できるはずであるが、強制的に流入した地下水にはもとの濃度を大きく変えるほどのストロンチウムは含まれていなかったものと結論できる。S17 と S18 がある人工地盤の地下ダムの北半分はせき止められ、地下ダムのいっ水は南半分の東側面である。地下水の有効な流れが S17 に到達しない理由のひとつとして推測できる。S19 地点で応答が見られないことも同じ理由で、地下水の有効な流れが到達していないためと考えることができる。計算によるトレーサー到達時間は投入地点からの直線距離で求めたが、最短距離でいったん人工地盤へ到達したならば人工地盤内の実流速は約 21 m/day であり、地盤内に流れがあれば計算値よりかなり速くトレーサーの到達が観測されるはずだからである。

すべての成分及び電気伝導度がいったん低下する現象が S16 観測孔地点で見られたが、これは採水日直前の降水によるものと見られる。

4 結 論

ストロンチウムを指標とした地下水の動態調査は可能であり、引き続き、周辺のゆう水を含めた調査を行うことにより Sr 投入場所である B12-3 との地下水脈による連結について広範囲にわたる情報が得られると予測できる。

本研究を進めるに当たって、工事地域内への立ち入りの便宜を図っていただくとともに多数の有益な助言を賜った都市基盤整備公団東京支社東京西部都市整備事務所、並びにトレーサー追跡に当たって資料提供をいただいた日本工営(株)社会環境エンジニアリング事業部に深謝します。また、井戸水の採水に協力いただいた八王子市片倉町塚本永治氏に感謝します。

文 献

- 1) 住宅・都市整備公団首都圏都市開発本部: “八王子みなみ野シティ水循環再生システム技術報告書”, p. I-1 (1997).
- 2) 住宅・都市整備公団首都圏都市開発本部: “八王子みなみ野シティ水循環再生システム技術報告書”, p. III-93 (1997).
- 3) 地下水ハンドブック編集委員会: “改訂地下水ハンドブック”, p. 1504 (1998), (建設産業調査会).
- 4) 田倉俊彦: “みなみ野シティ地域の湧水・地下水の分析 (1) 無機成分について (東京工業高等専門学校物質工学科卒業論文)”, p. 36 (2001). (未発表データ).
- 5) 建設省河川局監修: “地下水調査及び観測指針(案)”, p. 125 (1978). 日本工営株式会社社会環境エンジニアリング事業部提供資料 (2002).