

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 9 月 15 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340085

研究課題名(和文) グリーン・レメディエーション手法導入による土壌地下水汚染対策の推進に関する研究

研究課題名(英文) Promotion of soil and groundwater contamination control measures by introduction of green remediation method

研究代表者

平田 健正 (Hirata, Tatemasa)

放送大学・和歌山学習センター・所長(特任教授)

研究者番号：30093454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：土壌地下水汚染の実サイトにおける有害物質の動態や浄化効果を数値解析するとともに、グリーン・レメディエーションの視点から土壌地下水汚染の修復対策のあり方を考察した。有機ヒ素化合物による地下水汚染については、汚染の実態解明および地下水揚水処理の効果を評価した。揮発性有機化合物については、原位置バイオレメディエーションによる分解促進効果について示した。また、原位置バイオレメディエーション技術、地下水揚水処理、および両者の併用技術を対象に、エネルギー消費量およびCO2排出量を算定するとともに、太陽光発電の導入による環境負荷の低減効果を評価した。

研究成果の概要(英文)：Dynamics of hazardous substances and purification effects at soil and groundwater contaminated sites were simulated by numerical analysis. An ideal way of soil and groundwater remediation technology was also examined from a viewpoint of green remediation. First, transport processes of groundwater contamination by organoarsenic compounds and effects of pump and treat technology were evaluated using a three-dimensional numerical simulation. Secondly, in the case of groundwater contamination by volatile organic compounds, variability characteristics of biodegradation effect was estimated at an in-situ bioremediation site. In addition, in order to analyze environmental load of remediation technology, energy consumptions and CO2 emissions to in-situ bioremediation, pump and treat and a technique which combined both technologies were calculated. Reduction effects of the environmental load by solar power generation were also evaluated.

研究分野：水工水理学

キーワード：水工水理学 地盤工学 環境技術 土壌地下水汚染 グリーンレメディエーション

## 1. 研究開始当初の背景

土壌や地下水の汚染が発見されると、なぜ汚染されたのか、健康影響が明らかな物質をなぜ使用したのか、が必ず問われる。大規模な汚染を引き起こした要因はさわめて明確で、役に立つから製造し、使用したのである。とりわけ、油脂類の洗浄能力が高い揮発性有機塩素化合物は、この物質なくして我が国の産業は成立しない、とまで言われている。

こうした背景にあって、土壌汚染対策法が改正され施行(2010年)されているが、法の趣旨そのものが十分に理解されているとは言えない現状にある。土壌汚染対策法は、汚染物質を原位置に封じ込める、あるいは原位置で分解無害化するなど、有害物質の人への暴露経路を遮断し健康影響リスク低減を基本とするのに対して、汚染が発見されるとほとんどの場合、汚染土壌は掘削除去されている。

(一社)土壌環境センターの調査によると、土壌汚染対策法に基づく調査は数%に過ぎず、大部分は土地所有者の自主調査であり、調査契機は土地の売買あるいは保有する土地資産価値の再評価であった。このように土壌地下水の汚染対策は、人への健康影響防止と私有財産としての資産リスク回避の両側面を持つ。汚染が発見されると、土壌汚染か土地汚染かが議論の対象となり、対策にしても環境基準達成はもとより、ときにはゼロリスクが問われることとなり、結果として汚染状態を一気に解消できる汚染土壌の掘削処理に依存していると推察される。

こうした性質を持つ土壌地下水汚染対策を促進するには、少なくとも土地利用形態に即した対策、しかも効率よく経済活動を阻害しない対策が必須である。対策の進んでいる欧米では、人への生涯暴露量から健康影響リスクを評価し、土地利用に応じてサイトリスク評価を実施し、必要とされる実効性ある対策が策定されている。翻って我が国では、信頼性の高い数値解析に対してさえ科学的割り切りに抵抗を示す国民性から考えて、欧米の手法をそのまま導入してもサイトリスクアセスメント手法が効率よく機能するわけではない。

こうした状況を打破するには、ステイクホルダーが信頼するリスクコミュニケーションのできる手法開発、すなわち有害物質の動態を十分に加味し、かつ合理的な説明のできる科学的手法が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、実際の汚染現場での実測データと将来予測、さらには種々の対策技術の修復効果比較に基づき、対策効果と環境フットプリントとの関連を明らかにすることによって、エネルギー消費量、炭酸ガス排出量や廃棄物など環境負荷の少ないグリーン・レメディエーションの視点から、土壌地下水汚染の修復対策のあり方を考察する。

## 3. 研究の方法

前述した学術的、社会的背景に基づき、次の対象に焦点を絞って研究を実施した。

### (1)汚染の実態解明と浄化対策の評価

実際の汚染現場で採取した有害物質の存在形態と汚染の規模など、実データに基づき土壌地下水汚染の実態を明らかにし、汚染の実態と対策効果を評価した。今回は、研究代表者と研究分担者が10年近くに渡って関わっている2つの現場を対象とした。

1つ目は茨城県神栖市の地下水汚染現場である。ここは不法投棄された産業廃棄物に含まれていた有機ヒ素化合物(ジフェニルアルシン酸)により地下水が広域に渡って汚染されていた。そこで、本研究では、現場実測データに基づいた数値解析を実施して、地下水汚染メカニズムの解明と地下水揚水処理による浄化予測を行った。

2つ目は岩手県と青森県の県境(以下、岩手青森県境)の土壌地下水汚染現場である。ここは不法投棄された産業廃棄物に含まれていた多種類の揮発性有機化合物により土壌と地下水が汚染されていた。本研究では、現場実測データに基づいた数値解析を実施して、原位置バイオレメディエーションによる浄化効果(分解促進効果)を評価した。

### (2) 汚染対策に関わる環境負荷の評価

上記の数値解析結果を基に、用いた浄化技術が対策実施に必要なとしたCO<sub>2</sub>排出量やエネルギー消費量など、環境フットプリント情報を整理した。本研究では、複数の浄化技術が適用された岩手青森県境現場を対象として、原位置バイオレメディエーション、地下水揚水処理、および両者の併用技術の評価した。

## 4. 研究成果

### (1)汚染の実態解明と浄化対策の評価

#### ①茨城県神栖市

茨城県神栖市で起きた有機ヒ素化合物(以下、DPAA)による地下水汚染機構を3次元数値解析により検討した。また、浄化対策として地下水揚水処理を適用した場合の浄化効果についても数値解析により評価した。得られた知見は以下のとおりである。

1)汚染源近辺(A地区)を対象とした挙動解析では、最初に汚染が発見された井戸(A井戸)の南東90m地点における表層地中で発見されたコンクリート様の塊から溶出したDPAAを高濃度に含む汚染水が密度流によって地下深くまで降下浸透し、深度30m付近の第二洪積砂礫層に達した後、流速の大きな地下水流れに乗ってA井戸およびその下流域にまで拡がっていく様子が示された。これにより、A井戸の汚染は、浅層部を主体に拡がってきたDPAAと深層部を主体に拡がってきたDPAAがA井戸の揚水によって引き込まれることによって引き起こされたと推察された。

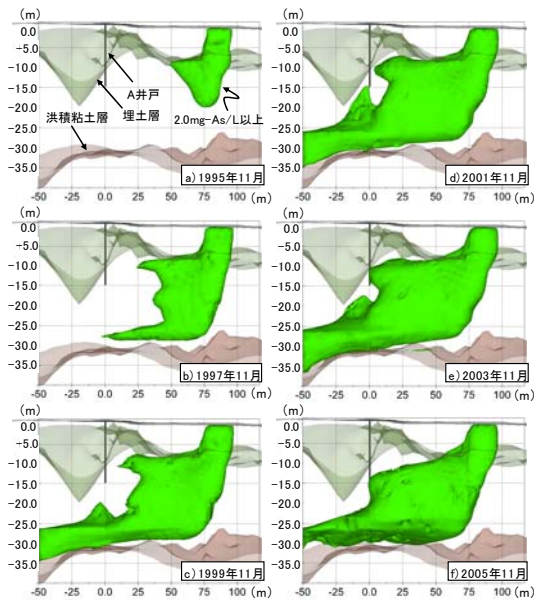


図-1 汚染源近辺を対象とした挙動解析結果

2) 一方、A地区より下流域の広域を対象とした挙動解析では、A井戸南東の90m地点直下の深度30m付近の砂礫層に到達した高濃度のDPAAブルームが、A井戸下流1km付近(B地区)やさらに下流南西部で確認されている地下水汚染の原因に成り得ることが示された。また、下流南西部へのDPAAの輸送には、企業局揚水井の揚水が関与していることが示唆された。すなわち、汚染発見時までは企業局揚水井の揚水の影響を受けて、DPAAの下流南西部への輸送が抑制されていた。このことが、企業局揚水井の一部が停止された2004年以降に、下流南西部の観測井からDPAAが検出され始めた原因と考えられる。

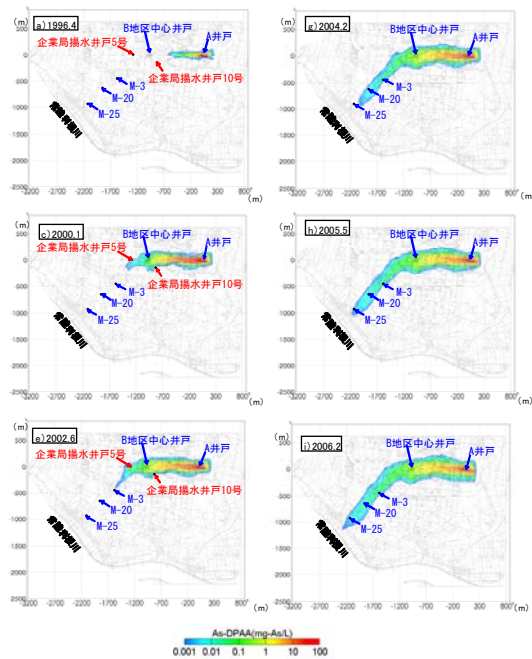


図-2 広域を対象とした挙動解析結果

3) B地区のみを対象とした挙動解析では、浅層地下水で検出されたDPAAの原因は、過

去に行われた農業用井戸による汚染地下水の揚水や揚水した汚染地下水の水田への涵養などの水利用等の影響が推察された。このことから、B地区付近の表層に別の高濃度の汚染源がなくとも、A井戸付近から移流してきた汚染地下水がB地区全体の地下水汚染源になりうるということが検証された。

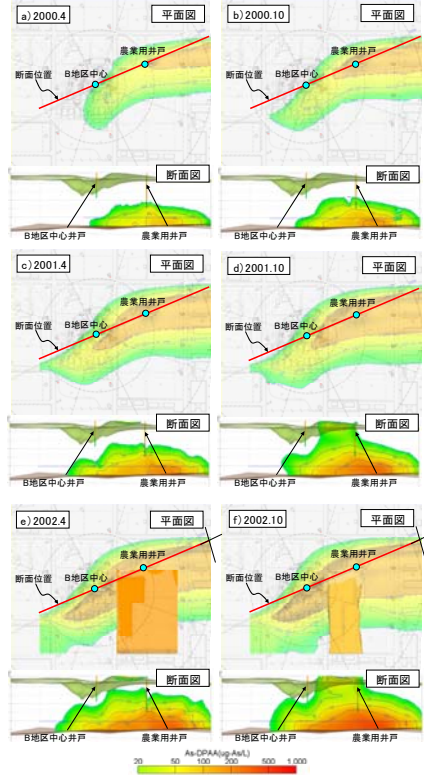


図-3 B地区を対象とした挙動解析結果①

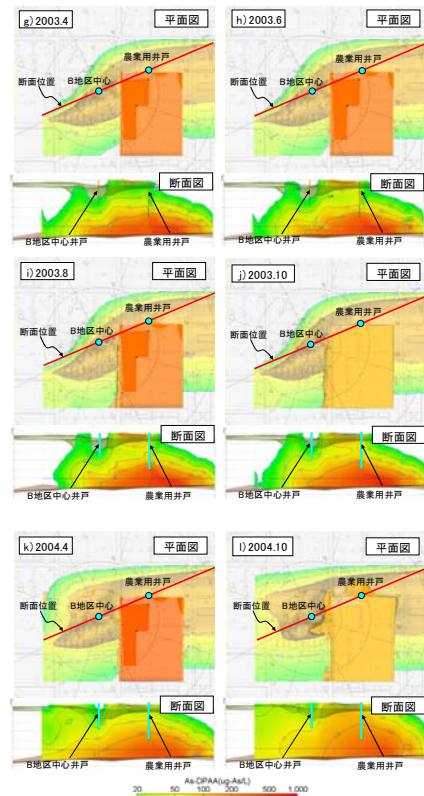


図-4 B地区を対象とした挙動解析結果②

4)汚染源対策としてA地区で地下水揚水処理を実施した場合の効果を数値解析したところ、約3年間の地下水揚水処理により高濃度(2mg/L)の汚染プルームの消失が20年ほど早まることが推察された。

5)地下水揚水処理は環境負荷の大きい技術と言われているが、効果的な対策を実施すれば、浄化期間を大幅に短縮できる。今回の解析事例のように、浄化期間を20年以上も短縮することができれば、以前のように水道水源としての地下水の利用再開時期もそれだけ早くなり、対策による環境負荷低減とは別のメリット(経済効果など)が得られることになる。すなわち、土壌地下水汚染対策は、汚染の浄化が主目的であるが、リスク、環境負荷、さらには経済効果などのメリットを総合的に判断しながら進めることが効果的な実施には欠かせない。そして、今後はこのような評価が可能なシステムの開発が重要となる。

## ②岩手青森県境

岩手県二戸市と青森県水戸郡田子町にまたがる27ヘクタールの原野で不法投棄が見つかった。この現場では1998年頃から産業廃棄物が不法投棄されており、1999年に掘削調査を実施したところ、揮発性有機化合物(VOCs)を含む廃油入りドラム缶が多数発見された。今回対象とする地区(N地区と呼ぶ)では、VOCs由来の土壌地下水汚染が確認されている。

N地区の浄化対策は2008年から始まり、不飽和帯では生石灰混合法、飽和帯では還元的脱塩素化を利用した原位置バイオレメディエーションが適用された。原位置バイオレメディエーションは井戸間隔を4m、使用する薬剤をアミノ酸などの有機物と水素で構成されたEDCおよびEDCよりも分子サイズを大きくし徐放性を高めたEDC-Eの2種類を用いて行われた。ただし、高濃度汚染区画においては、地下水環境基準の300倍未満の濃度が検出されたエリアはバイオレメディエーションを適用(以下、バイオ単独処理井)し、300倍以上の濃度が検出されたエリアは地下水揚水処理を行ったのち、地下水環境基準の50倍まで濃度の低下が確認され次第バイオレメディエーションに切り替えて実施する(以下、揚水併用処理)ことにした。

ここでは、バイオ単独と揚水併用における原位置バイオレメディエーションの浄化効果について、現場より得られた実対策データを利用した数値計算(移流分散解析)により評価した。今回は微生物分解過程を一次反応モデルで表している。

なお、原位置バイオレメディエーションの浄化効果は、対象物質濃度の解析値が実測値の濃度変化の傾向を再現できるように、モニタリング間隔ごとに一次反応速度定数を試行錯誤的に求め、自然減衰速度(一次反応速度定数で $10^{-3}/d$ )と比較することで評価した。なお、一次反応速度定数は測定間隔ごとの平均

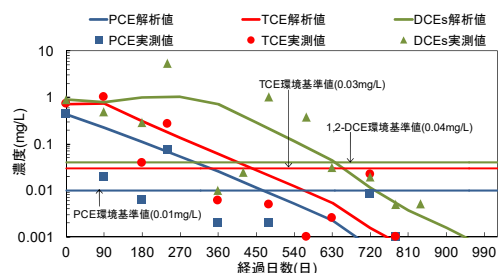


図-5 移流分散解析結果の例  
表-1 一次反応速度定数の算定結果

一次反応速度定数(d)	実対策					
		Case1		Case2		
		最小	最大	最小	最大	
PCE	$\lambda_1$	0.005	~ 0.061	0.001	~ 0.077	
TCE	$\lambda_2$	0.006	~ 0.076	0.001	~ 0.125	
DCEs	$\lambda_3$	0.009	~ 0.081	0.004	~ 0.175	
VC	$\lambda_4$	-	-	-	-	
1,1,1-TCA	$\lambda_5$	0.003	~ 0.109	0.001	~ 0.030	
1,1,2-TCA	→1,2-DCA	$\lambda_6$	0.002	~ 0.003	-	-
	→VC	$\lambda_7$	0.002	~ 0.003	-	-
1,2-DCA	→CA	$\lambda_8$	0.002	~ 0.058	0.001	~ 0.018
	→ETHENE	$\lambda_9$	0.002	~ 0.058	0.001	~ 0.018
CT	$\lambda_{10}$	0.005	~ 0.053	0.015	~ 0.038	
DCM	$\lambda_{11}$	0.010	~ 0.060	0.001	~ 0.085	
Benzene	$\lambda_{12}$	0.001	~ 0.081	0.001	~ 0.081	

値として算出した。図-5と表-1に解析結果を示す。得られた知見は以下のとおりである。

1)塩素化エチレン類の分解促進効果は自然減衰速度と比較すると数十倍から百倍程度であった。これは塩素化エチレン類を対象とした他の実現場スケールの事例と同程度であり、VOCsによる塩素化エチレンの脱塩素化の阻害は分解促進効果を見る限りは認められなかった。

2)塩素化エタン類の分解促進効果は塩素化エチレン類の自然減衰速度の数倍から数十倍程度であり、塩素化エチレン類の一次反応速度定数の数分の一程度であった。

3)塩素化メタン類の分解促進効果は塩素化エチレン類の自然減衰速度の数十倍であり、塩素化エチレン類の一次反応速度定数と同程度であった。特に嫌気条件下では分解されにくいDCMに関しても本現場では数十倍の分解促進効果が得られた。

4)ベンゼンは実証試験ではほとんど分解されなかったが、実対策では濃度低下が確認された。本現場地下水を用いた嫌氣的ベンゼン分解実験より、本現場はベンゼンを嫌氣的に分解できる環境条件下にあることがわかっている。これより、ベンゼンの分解促進効果は塩素化エチレン類の自然減衰速度の数十倍程度であったと推測できる。

5)本現場では研究事例の少ない塩素化エタン類、塩素化メタン類およびベンゼンが検出されており、その分解促進効果を評価できた。特に嫌気分解が困難と言われているDCMやベンゼンにおいても、塩素化エチレン類の自然減衰速度の数十倍程度の分解促進効果が見られたことは興味深い。

## (2)汚染対策に関わる環境負荷の評価

岩手青森県境の不法投棄現場で実施され

たバイオ単独処理および揚水併用処理と、比較のために地下水揚水処理(以下、揚水単独処理)に対して、環境負荷量の算定としてエネルギー消費量、温室効果ガスおよび大気汚染物質排出量を算出した。今回は(一社)土壤環境センターが開発したCOCARAを今回の現場に適用できるように改良したモデルを用いた。対象として3技術の工程は図-6であり、調査、対策工事、運用の全ての工程を評価対象とした。エネルギー消費量は、各工程で機材の使用時に消費される電力、軽油、ガソリンの消費量である。算出方法は機材の使用回数(分析器など)および稼働時間(ボーリングマシンなど)より求めた。また、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>排出量は各工程のエネルギー消費量および機材の損耗あたりの排出量の和で求めた。

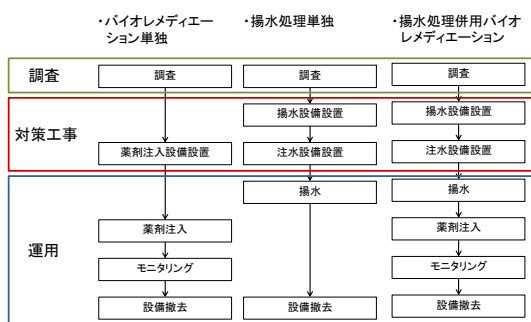


図-6 対象とした3技術の工程

一方、3技術の対策期間については、バイオ単独処理は、前述した数値解析の結果(図-5)より、DCEs濃度が環境基準を下回るまでと考えて2年間とした。揚水併用処理の対策期間は、図-7に示した数値解析結果から、地下水揚水処理から原位置バイオレメディエーションに切り替えたタイミングから約1年で全ての物質が環境基準値未満になっていると判断できるため、地下水揚水期間1年プラス原位置バイオレメディエーション期間1年の計2年とした。揚水単独処理を実施した区画は存在しないため、地下水揚水処理による濃度低下は、対象物質濃度と運転期間の間に両対数軸上で直線関係が認められるという知見を使って実測値より推測して3年間とした(図-8)。得られた結果は以下のとおりである。

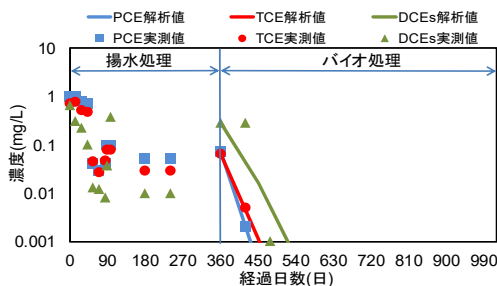


図-7 地下水揚水と原位置バイオレメディエーションを併用した区画の解析結果

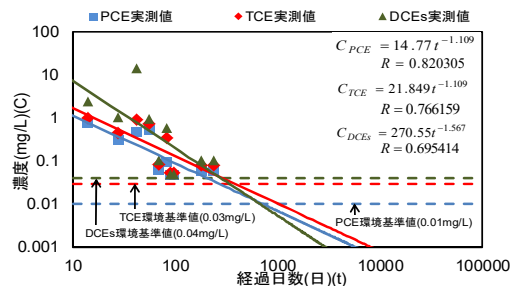


図-8 地下水揚水処理の実測データを用いた対策期間の分析結果

1)最も環境負荷の小さい対策はバイオ単独処理、最も大きい対策は、揚水単独処理であった。CO<sub>2</sub>排出量に関しては言えば、バイオ単独処理に対して、揚水単独処理は5.6倍、揚水併用処理は2.9倍、揚水併用処理に対して揚水単独処理は1.9倍であった(図-9)。そのため、分解促進効果が十分得られていれば、原位置バイオレメディエーションが最も環境に優しい対策であると言える。

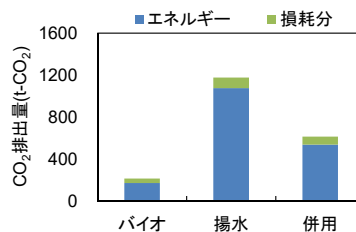


図-9 CO<sub>2</sub>排出量の算定結果

2)各技術のエネルギー消費量を示した表-2によると、揚水単独処理が高負荷な要因は、電力消費量が大きいためであることが分かる。したがって、揚水単独処理の運用期間の短縮か負荷の小さい発電(太陽光発電など)の選択により環境負荷を減らすことが望まれる。一方、揚水併用処理は地下水揚水処理の運転期間が短いため、環境負荷は揚水単独処理の半分程度で済んだ。

3)すなわち、原位置バイオレメディエーションの適用が困難な高濃度汚染エリアにおいて揚水併用処理は有力な技術であるが、揚水期間を短くできれば、低負荷での浄化が可能となる。

4)ただし、揚水併用処理よりは低負荷といっても、バイオ単独処理の約3倍なので、太陽光発電などを導入するメリットは大きい。そこで、太陽光発電設備を現地に導入した場合の3つの技術の効果を分析した。今回は、浄化対象地に隣接し、不飽和土の石灰混合処理を実施した建屋の屋根を使い、屋根面積の50%と100%に太陽光パネルを設置した場合の効果を分析した。その結果を図-10に示すが、揚水単独処理のCO<sub>2</sub>排出量は70%削減された。これは、バイオ単独処理の3.4倍、太陽光発電を導入しないバイオ単独処理の1.7倍であった。一方、揚水併用処理はバイオ単独処理の1.7倍、太陽光発電を導入しないバイオ単独処

理の0.84倍となった。

表-2 CO<sub>2</sub>排出量などの算定結果

浄化対策	エネルギー	バイオレメディエーション単独		揚水処理併用バイオレメディエーション	
		電力	軽油	電力	軽油
CO <sub>2</sub> 排出量 (t-CO <sub>2</sub> )	電力	154.54	1044.65	502.46	
	軽油	13.11	26.11	26.11	
	ガソリン	0.07	0.07	0.07	
	損耗分	40.83	99.52	76.72	
合計		208.54	1170.35	605.36	
SO <sub>2</sub> 排出量 (t-SO <sub>2</sub> )	電力	0.13	0.85	0.41	
	軽油	0.02	0.04	0.04	
	ガソリン	0.00	0.00	0.00	
	損耗分	0.10	0.13	0.15	
合計		0.24	1.03	0.60	
NO <sub>x</sub> 排出量 (t-NO <sub>x</sub> )	電力	0.17	1.14	0.55	
	軽油	0.09	0.17	0.17	
	ガソリン	0.00	0.00	0.00	
	損耗分	0.10	0.21	0.17	
合計		0.35	1.52	0.89	
削減費用 (万円)		235.39	1203.36	649.94	

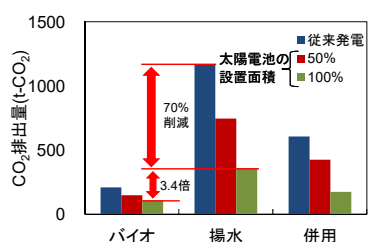


図-10 太陽光発電導入によるCO<sub>2</sub>排出量の低減効果

4)太陽光発電を導入した場合でも、最も負荷が小さい対策はバイオ単独処理であった。ただし、揚水単独処理との差は大きく縮まった。揚水単独処理は常に稼働しているため、電力消費量が大きい、太陽光発電などの負荷の少ない発電を利用すると環境負荷は大きく減少する。

5)複数の浄化対策を組み合わせることにより、浄化効果が高くかつ低負荷での対策が可能になる。さらに、太陽光発電などの再生可能エネルギーを利用して各対策の環境負荷が同程度になれば、より対策現場の状況に即した選択が可能になる。

6)ただし、今回は太陽光発電による発電量を簡易計算しているため、実現場で適用した場合には、本研究で得られた発電量が得られない可能性がある。特に太陽電池モジュール総数は設置可能面積を基準に設定したが、厳密には太陽電池モジュールの直列数と並列数の積で決まり、かつ直列あるいは並列によって発電量が大きく変わることもありうる。このような効率的な運用に関しては今後の課題といえる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

①丸山裕嗣, 江種伸之, 平田健正, 川原恵一郎: 地下水循環併用型原位置バイオレメディエーションによる塩素化エチレン類の分解促進効果, 土木学会論文集B1(水工学)(土木学会), Vol.70, No.4, I\_1117-I\_1122, 2014.

[学会発表] (計7件)

①江種伸之, 丸山裕嗣, 平田健正: VOCsを対象とした原位置浄化技術のLCA評価, 第16回地下環境水文学に関する研究集会(in名古屋), 土木学会, 名古屋市, 2015年11月21-22日.

②丸山裕嗣, 江種伸之, 平田健正: 多種類の揮発性有機化合物に汚染された地下水を対象とした原位置バイオレメディエーションの浄化効果, 第15回地下環境水文学に関する研究集会(in富山), 土木学会, 富山県, 2014年10月3-4日.

③貴志直稀, 江種伸之, 平田健正: 一次元移流分散方程式の解析解に関する一考察, 第15回地下環境水文学に関する研究集会(in富山), 土木学会, 2014年10月3-4日.

④丸山裕嗣, 江種伸之, 岩崎祐二, 平田健正・川本克也: 岩手青森県境不法投棄現場における原位置バイオレメディエーションの浄化効果, 第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 和歌山県, 2014年6月19-20日.

⑤丸山裕嗣, 江種伸之, 平田健正, 川本克也: 岩手・青森県境不法投棄現場における揮発性有機化合物を対象としたバイオレメディエーションの現場実証試験, 第16回日本水環境学会シンポジウム, 沖縄県, 2013年11月9-10日.

⑥丸山裕嗣, 江種伸之, 平田健正, 川本克也: 岩手・青森県境の不法投棄現場における土壌地下水汚染浄化対策の効果, 第14回地下環境水文学に関する研究集会, 東京都, 2013年10月5-6日.

⑦ S.Watanabe, N.Egusa, T.Hirata, N.Yokoyama, Y.Yamazato and M.Morita: Effects of Groundwater withdrawal and its agricultural Use on Groundwater Quality in a Shallow Aquifer, Groundwater Quality 2013, IAHS, USA, 2013年4月21-26日.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

平田 健正 (HIRATA TATEMASA)  
放送大学・和歌山学習センター・所長  
研究者番号: 30093454

### (2)研究分担者

江種 伸之 (EGUSA NOBUYUKI)  
和歌山大学・システム工学部・教授  
研究者番号: 00283961