

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05357

研究課題名(和文)最終処分場都市鉱山学の確立とその実践 - 採鉱・選鉱技術の開発 -

研究課題名(英文) Establishment of landfill urban mining and its practice - development of mining and mineral processing technology -

研究代表者

香村 一夫 (Kamura, Kazuo)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10434383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：「最終処分場」に焦点をあてて、この場から希少金属を回収し再利用するための方策の確立を目的としている。処分場埋立層内の希少金属の賦存形態や金属濃集部の探査法についてはすでに報告した。本研究では、1)金属高濃度ゾーンから対象物を省エネで回収する工法の確立と、2)回収物から有用な金属を選別・濃縮する技術の開発に焦点をあてた。

1)に関しては、いわゆる「エアリフト工法」を改良した技術で、過剰な掘削なしにピンポイントで対象物を採取することが可能となった。2)に関しては、重力選別・磁力選別・浮遊選別とそれらの組合せを試みた結果、重力選別と浮遊選別によって、ある種の金属類は効果的に取り出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球上の資源は有限である。よって、消費・廃棄された物質を回収し再利用することは持続可能な社会をつくるために必須である。本研究では、とくに「消費された希少金属資源の回収」に焦点をあてている。これらの分野の現況は、携帯電話・カメラ・PC等の基盤類や電池からの回収が主であり、これは「廃棄物処理フローの中流部」にあたる。一方、本研究では「フローの下流部」にあたる最終処分場からの回収をめざしている。最終的には、「最終処分場鉱山学」の理論的体系化を行う。

日本は、これらの資源に乏しい一方、資源消費国である。この種の研究や技術提案は、希少金属資源に対する国家戦略として、また、その消費国の責務として必須である。

研究成果の概要(英文)：The project focuses on the recovery of the minor metals contained in waste landfills. We have previously reported on the method of investigating the existing chemical morphology of each element in landfills, creating a high concentration zone for specific element, and non-destructively exploring the position of that within the fills.

In this study, the following two items were examined; 1)an energy-saving method for recovering buried materials from high metal concentration zone, and 2)a method for concentrating useful metals from the recovered materials.

The results are as follows; 1)it became possible to get pinpoint the objects without excessive excavation by using the technology that is an improvement of the so-called "air lift method", and 2) as a result of trying gravity sorting, magnetic force sorting, flotation sorting and their combination, certain metals could be effectively extracted by gravity sorting and floatation sorting.

研究分野：総合工学ー地球・資源システム工学ー

キーワード：最終処分場 都市鉱山 リサイクル レアメタル 採鉱技術 選鉱技術 物理選別 浮遊選別

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 消費・廃棄された資源を回収し再利用することは、持続可能な社会をつくるために必須である。日本では、1998年に家電リサイクル法が制定された。それ以前には、家電製品は破碎後に焼却処理されるか、あるいは未処理のまま、最終処分場へと廃棄・埋立された。しかし、そのような処分場の浸出水から金属類はほとんど検出されない (Kamura, 2002)。即ち、埋立層内の金属類は、炭酸塩・硫酸塩・水酸化物など溶解度の低い塩として存在するか、あるいは、土壌粒子に吸着していることが推測される。他方、ある種の金属類は浸透水に溶出し、埋立層内を移動、そして嫌気的な雰囲気により、主に硫化物として沈殿し、そこに高濃度ゾーンを形成している可能性がある (Kamura et al., 2019)。何れにせよ、金属類は層内にトラップされている。

(2) 近年では、処分場へ埋め立てられる前のハイテク電子部品などから希少金属類を回収・抽出する研究が盛んである。しかし、処分場埋立層を「都市鉱山」とみなし、そこから希少金属類の回収を試みる研究は少ない。

## 2. 研究の目的

(1) 社会における廃棄フローの最下流部にあたる最終処分場に眠る希少金属資源の回収をめざしている。この研究は、廃棄物埋立層内に賦存する希少金属の種類・濃度およびそれらの層内化学形態の把握、希少金属高濃度ゾーン特定のための非破壊による探査法の確立、特定した高濃度ゾーンから当該埋立物をピンポイントで回収する省エネ工法の検討、回収した埋立物から有用な金属類を濃縮・選別する技術の開発、から構成される。本研究は、前述のとこの項目に焦点をあてている。

(2) 研究全体としては、「最終処分場鉱山学」の体系を確立するとともに、廃棄物埋立層から有用資源を効率的に抽出し、再利用することが目的である。

## 3. 研究の方法

(1) 埋立層内の環境と賦存金属類の化学形態の関係の解明：海面・内陸水面・内陸谷などの埋立て場の環境は、層内に賦存する金属類の化学形態に影響を与えることが予測された。異なる埋立環境に賦存する金属類の化学形態の特徴を知ることが、前述の2(1)に記した技術開発における手法選択の判断資料として重要となる。これらの特徴を明らかにするために、様々な埋立環境の処分場から採取したポーリングコア試料に対し、逐次抽出法 (Tessier et al., 1979; 貫上ほか, 2008) を用いて、金属類の賦存化学形態の特徴を検討した。

(2) 層内から金属濃集埋立物を回収する工法の開発：この技術開発では「省エネ」かつ「ピンポイント」の経済的回収が重要となる。そこで圧入水を利用して、ターゲットとした濃集ゾーンを流体化することによる回収工法を立案した。そのための機材や回収プロセスを決定するため

に、石油開発等で用いられている地層流体化の数値計算を試みた。また、既往の技術の検討のために多くの文献も検索し、参考にした。

(3) 回収埋立物から有用金属を選別・濃縮する技術の開発： 3(1)で検討した試料ほかを用いて、それに含まれる有用金属を選別・濃縮する方法を検討した。重力や磁力を用いた物理選別、浮遊選別、さらにこれらを組み合わせた選別を実施し、それらの有効性を検討した。

(4) 現場実験による、埋立物回収から濃縮・選別まで一連の工程の再確認： 内陸水面埋立の処分場にて、開発したプロセスの有効性を確認した。

#### 4. 研究成果

(1) 内陸の谷埋立と水面埋立の両処分場で掘削・採取した試料に含まれる各金属の化学形態を二つの逐次抽出法を用いて明らかにした。その結果、埋立の場と賦存金属の化学形態の特徴に顕著な関係は認められなかった。一般に、深部試料の方が有機物態以降の割合が増加しており、この傾向はいずれの逐次抽出法においても認められた。

(2) 地下からの埋立物回収では、非破壊探査より解明した地下の金属高濃度ゾーン上面までボーリング掘削した後、その孔に二重管を設置し、それに圧縮空気を通過させることを試みた。この方法でターゲットとする埋立物の回収が可能となった。

(3) 重力を用いた選別では、重液比重が 2.5 と 2.75 の場合で、メタルの濃縮に大きな相異があり、この値域の重液比重に注意を要する。一方、この選別は、特定の金属を濃縮することは期待できないが、試料全体の金属濃度を増加させることには有効である。

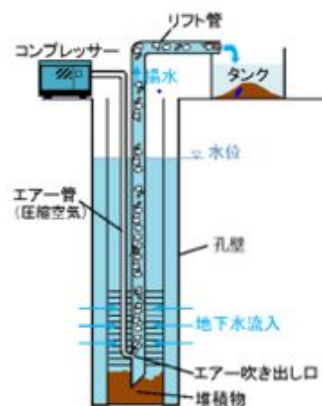


図 1 埋立物回収概略図

(4) 磁力を用いた選別では、低磁場選別とその非磁着物に対する高磁場の選別を試みた(図 2)。低磁場の選別では、Fe が高い濃縮率を示す一方、数種類の希少金属類にも濃縮が認められた。高磁場選別の磁着物では数種類の試料にある種の金属の濃縮が認められている。しかし、これらの傾向は試料の特性に依存したものと考えられ、選別結果は不安定である。このように、この選別法は、対象試料の構成物に大きな影響を受ける。一方で、金属と非金属を効率的に分別できることから、次のステップへの前処理として有効といえる。

(5) 浮遊選別は、逐次抽出で有機物態以降の占める割合が高い試料で有効であった(図 3)。試料採取区画の保有水の酸化還元電位(ORP)は、F2 で-100 ~ -200mV、F5 で-300 ~ -400mV である。

(6) 処分場埋立物の大部分は径1~2cmの細粒焼却灰である。即ち、木片等の非金属類はほとんど含有せず、磁力を用いた選別はほとんど必要としない。一方、試料採取ゾーンの層内環境はいずれも嫌気的な雰囲気呈しており、逐次抽出では有機物態以降の割合の高い試料が多い。よって、比重2.75の重液による選別後、浮遊選別を行うことにより、金属硫化物等が効率的に濃縮可能といえる。

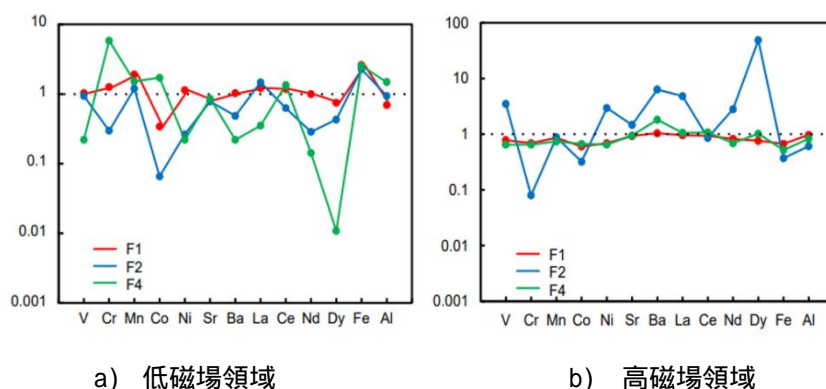


図2 磁力選別による各元素の濃縮傾向 (F1、F2、F4 サイト試料)

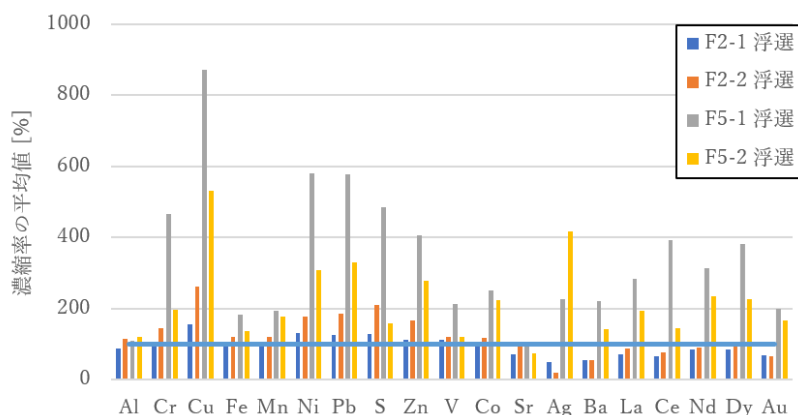


図3 浮遊選別における各元素の濃縮傾向 (F2、F5 サイト試料)

## 文献

Kamura, K. (2002) Relationships between electrochemical properties of leachate and resistivity of strata in the landfill site consisting mainly of combustion residuals. Environ. Geol. 41(5), 537-546.

Kamura, K., Omori, M., Kurokawa, M., Tanaka, H. (2019) Estimation of the potential of landfill mining and exploration of metal-enriched zones. Waste Manage. 93, 122-129

貫上佳則・毛利光男・加瀬隆雄 (2008) 改良 BCR 逐次抽出法による汚染土壤中の重金属の形態と溶出特性の評価. 土木学会論文集 64(4)、304-313 .

Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals. Anal. Chem. 51(7), 844-851.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kamura, K., Makita, R., Uchiyama, R., Tanaka, H.	4. 巻 141
2. 論文標題 Examination of metal sorting and concentration technology in landfill mining - with focus on gravity and magnetic force sorting -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Waste Management	6. 最初と最後の頁 147-153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.wasman.2022.01.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Back, S., Sakanakura, H.	4. 巻 126
2. 論文標題 Distribution of recoverable metal resources and harmful elements depending on particle size and density in municipal solid waste incineration bottom ash from dry discharge system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Waste Management	6. 最初と最後の頁 652-663
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.wasman.2021.04.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hidari, K., Miyata, M., Yamazaki, S., Kamura, K.	4. 巻 7
2. 論文標題 Visualization of rare metal enriched zones in waste landfills using induced polarization method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environments	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/environments7110095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kamura, K., Omori, M., Kurokawa, M., Tanaka, H.	4. 巻 93
2. 論文標題 Estimation of the potential of landfill mining and exploration of metal-enriched zones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Waste Management	6. 最初と最後の頁 122-129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.wasman.2019.04.050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 香村一夫
2. 発表標題 わが国におけるレアメタル供給の現状と最終処分場鉱山学確立への展望
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会関東支部シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 肴倉宏史
2. 発表標題 全国市区町村における熱処理残渣の資源化状況とその要因
3. 学会等名 第42回全国都市清掃研究事例発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関根健太・栗原正典
2. 発表標題 実験と数値シミュレーションによる炭酸塩岩油層における低塩分濃度水攻法メカニズムの解明
3. 学会等名 令和3年度石油技術協会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kawanami, T., Kurihara, M.
2. 発表標題 Examination on practical coupling methods of flow simulator for predicting methane hydrate dissociation and production behavior
3. 学会等名 The 25th Formation Evaluation Symposium of Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎聡司朗、香村一夫
2. 発表標題 最終処分場埋立層における電気的パラメータに対する含水率および塩濃度の影響
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kamura, K., Omori, M., Kurokawa, M., Tanaka, H.
2. 発表標題 Evaluation of industrial landfill sites for potential as urban mines
3. 学会等名 29th ISWA World Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 香村一夫、蒔田るみ、田中宏和、大森雅史、黒川雅裕
2. 発表標題 都市鉱山としての最終処分場評価のための一考察
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会第30回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 蒔田るみ、香村一夫
2. 発表標題 最終処分場埋立試料を用いた2種の逐次抽出法の比較
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会第30回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中宏和、石井敦、香村一夫
2. 発表標題 埋立廃棄物が有する陽イオン交換容量と腐植物質の関連性
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会第30回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 左一洋、宮田匡人、山崎聡司朗、香村一夫
2. 発表標題 埋立廃棄物層内メタル濃集ゾーンの把握に対する電気探査IP法の有効性について
3. 学会等名 物理探査学会第140回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎聡司朗、左一洋、香村一夫
2. 発表標題 模擬廃棄物層における通電時間に着目したIP法の基礎的検討
3. 学会等名 物理探査学会第140回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮田匡人、楠山永介、左一洋、香村一夫
2. 発表標題 実験カラムにおける各汚染水浄化層での重金属吸着と比抵抗の関係
3. 学会等名 物理探査学会第140回学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 左一洋、宮田匡人、山崎聡司朗、香村一夫
2. 発表標題 廃棄物埋立層内におけるメタル濃集ゾーンとIP効果の関係について
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>早稲田大学理工学術院香村研究室ホームページ www.kamura.env.waseda.ac.jp/</p>
---------------------------------------------------------------

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大和田 秀二  (Owada Shuji)  (60169084)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	
研究分担者	肴倉 宏史  (Sakanakura Hirofumi)  (70331973)	国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・室長   (82101)	
研究分担者	栗原 正典  (Kurihara Masanori)  (70609304)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------