



野外調査による地表検証データと衛星画像解析に基づく 鉱山地域の環境影響評価*

– セルビア共和国ボル鉱山地域での取り組み –

石山大三¹ 小川泰正² 広瀬和世³
武田知己³ 中村晋作³ 若狭幸⁴
オラオツェ オセニエン² ステバノビッチ ゴラン⁵

Environmental Evaluation for Mining Areas Based on the Ground Truth from Field Surveys and Satellite Image Analysis – Efforts in the Bor mining area, Republic of Serbia –

by Daizo ISHIYAMA^{a*}, Yasumasa OGAWA^a, Kazuyo HIROSE^b, Tomomi TAKEDA^b,
Shinsaku NAKAMURA^b, Sachi WAKASA^c, Olaotse OSENYENG^a and Zoran STEVANOVIĆ^d

- a. Graduate School of International Resource Sciences, Akita University
(*Corresponding author, E-mail: ishiyama@gipc.akita-u.ac.jp)
- b. Japan Space Systems
- c. Institute of Regional Innovation, Hirosaki University
- d. The Mining and Metallurgy Institute Bor

In the study area of eastern Serbia, which includes the Bor and Maidenpek mining areas of the Republic of Serbia, a research of environmental evaluation of the study area was carried out by means of field survey for environment and satellite image analysis in order to establish and improve methods for assessing the environmental impact of mining areas by satellite image analysis. The results of this study showed that it was possible to efficiently determine the distribution of overburdens and tailings in a wide area based on the distribution of points having jarosite spectra, and that it was possible to distinguish waste rocks such as overburdens and tailings with high environmental impact from those waste rocks with relatively low environmental impact based on the mineral assemblage of the waste rocks estimated from satellite image analysis. In addition, if topographical data before and after mining development are obtained from the satellite image analysis, the volume of the waste rocks can be estimated, and the quantitative estimation of the amount of toxic elements dissolved from the waste rocks could be possible by combining the experimental data on the extraction of toxic elements from the waste rocks. In addition, the predicted hazardous area (Type I), where high concentration of Cu may be leached from the waste rocks revealed by the surface survey, corresponds to the area where waste rocks such as overburdens and tailings is distributed around the mine and the area where waste rocks such as tailing is distributed along the river downstream of the mine as estimated by the satellite image analysis. These results indicate that it is possible to predict the environmental impact in advance of the survey in the mining area, and to predict the environmental impact in the mining area where it is not possible to go directly to the survey and to consider guidelines for countermeasures.

KEY WORDS: Environmental Evaluation, Satellite Image, Mine Pollution, Acid Mine Drainage, Tailing, Overburden

1. はじめに

我々の社会活動を維持するためには鉱業活動は必要であると考
えられている。また、鉱業活動は、発展途上国においては、国を
発展させるための重要な力となっており、鉱業活動が不可欠な場
合も多い。先進国の近年の鉱業活動においては、鉱業活動は開発
当初から環境対策を行いながら進められるようになってきてい

る。一方、長い歴史を持つ鉱業地域、設備投資が十分には行われ
ていない鉱業地域、あるいは法整備が十分ではない鉱業地域で
は、過去から現在までの汚染が累積していることが多い。このよ
うな現実が存在するが、地球への環境負荷を減らすことや人間へ
の影響を減らすことは必要な事であり、鉱業活動においても環境
負荷を最小限にすることは重要な事である。これからの鉱山開発
においては、鉱山開発の初期から採掘、閉山にいたる様々なプロ
セスにおいて、合理的な技術開発が必要とされている。例えば、
鉱業活動地域の環境影響評価については、これまでの地表調査の
データに基づく環境影響評価法では、詳細なデータは得られるも
のの調査から評価を行うまでにはある程度の時間が必要であるな
どの課題があった。一方、衛星画像解析による環境影響評価では、
汚染した水の pH 等の詳細な情報を得ることは難しいが、廃さい

*2022年12月12日受付 2023年2月28日受理

- 1. 秋田大学国際資源学研究所 特任教授
- 2. 秋田大学国際資源学研究所
- 3. 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構
- 4. 正会員 弘前大学 地域戦略研究所
- 5. ボール鉱山冶金研究所

【著者連絡先】E-mail: ishiyama@gipc.akita-u.ac.jp

キーワード：環境影響評価、衛星画像、鉱害、酸性鉱山廃水、廃さい、剥土



Fig. 1 Location map of a research area in eastern Serbia.

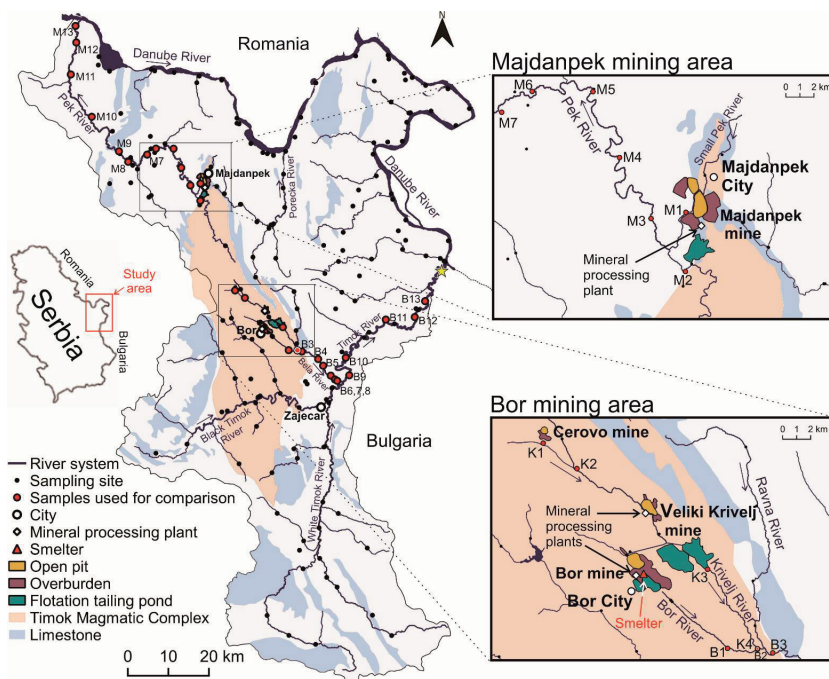


Fig. 2 Map showing distributions of sampling sites, open pits, overburdens, flotation tailing ponds, Timok Magmatic Complex, and limestone in the study area, including the Bor and Majdanpek mining areas⁽¹⁴⁾. The yellow star mark on the lower reach of Timok River represents the location of the sampling site described by Bird et al. (2010)⁽¹⁵⁾.

などの広域分布は迅速に解析できる可能性がある。また、衛星画像解析による環境影響評価が可能になれば、詳細な環境調査の事前段階での予備調査や紛争地域や感染症が存在し現地調査ができない地域における環境調査を行うことが可能になる。そこで、2015年4月から5年間にわたり、JST-JICAのSATREPS(地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム)のもとで、セルビア共和国ボール鉱山地域およびマイデンペック鉱山地域を含むセルビア東部の研究地域において、環境に関わる地表調査と衛星画像解析による鉱山地域の環境影響評価研究と廃さいや廃水からの金属元素回収による無害化の研究が行われた。特に、前者の環境影響評価の研究では、地表調査の結果と衛星画像解析の結果に基づき、正確かつ効率的な環境影響評価手法を開発することを目的に研究が行われた。本報告ではこの研究で行われた地表調査と衛星画像解析の手法を総合的に用いた環境影響評価法に関する手法や技術について解説する。

2. 調査地域概要

本研究プロジェクトで研究対象としたボール鉱山地域とマイデンペック鉱山地域を含む研究地域は、セルビア東部に位置する。国際河川であるドナウ川を介して本地域の北と東にはルーマニア、南東にはブルガリアが存在する(Fig. 1)。研究地域の面積は、約8000 km²である。本研究地域の主要河川は、ドナウ川、ペック川、ポレチカ川、ティモック川である(Fig. 2)。北部の主要河川は、ペック川とポレチカ川であり、南部の主要河川はティモック川である。ティモック川の支流の一つであるボール川の上流にはボール鉱山がある。ボール鉱山周辺にはボール川とクリベリ川がある。これらが合流してベラ川となり、ベラ川の河川水がティモック川に流れ込む。ボール鉱山の廃水は、ティモック川を經由してドナウ川へ流れ込む。ボール鉱山地域には、採掘を終えたボール露天掘り跡、現在も坑内での採掘を継続しているボール坑

内掘り鉱山、ベリキクリベリ露天掘り鉱山、セルボ露天掘り鉱山がある (Fig. 2)。これらの露天掘りの近くには、剥土が分布し、少し離れたところに廃さいが分布する。併せて、ボール鉱山地域のこれらの鉱山からの鉱石とマイデンベック鉱山からの鉱石を精製する製錬所がボール鉱山に存在している (Fig. 2)。一方、マイデンベック鉱山は、ベック川の上流部の支流の一つである小ベック川の流域にある。同鉱山は、2か所で露天掘りによる採掘を行っており、その周囲には剥土や廃さいが広く分布する。

ボール鉱山地域とマイデンベック鉱山地域の汚染源は、1) 鉱業施設からの廃水、2) 露天掘りからの廃水、3) 鉱山周辺の剥土や廃さいからの廃水に分けられる。製錬所が存在せず、露天掘り鉱山、剥土、廃さいが存在するマイデンベック鉱山地域の小ベック川、ベック川では、河川水の pH は 7 程度である。また、ボール鉱山地域の中でも製錬所が存在せず、露天掘り鉱山、剥土、廃さいが存在するクリベリ川では、操業状態に応じて、pH が 3 ~ 6 程度の範囲で変化する。これらとは異なり、製錬所、露天掘り鉱山、剥土、廃さいが存在する水系であるボール鉱山地域のボール川では、操業状態に応じて、pH は 1.5 ~ 4 程度の範囲で変化する。ベック川やクリベリ川に比較して、鉱業施設からの廃水がボール川とその下流のペラ川流域の環境に影響を与えている。また、ボール鉱山周辺の剥土や選鉱尾鉱は、1950 年代の鉱業廃棄物管理地域の決壊のために^{1, 2)}、ボール川、ペラ川、ティモック川を通じてドナウ川まで流出し、剥土や廃さい (選鉱尾鉱) などの固体鉱業廃棄物は、これらの河川に沿って分布している (Fig. 2)。また、マイデンベック鉱山地域においても、マイデンベック鉱山南東部のポレチカ川に沿って同鉱山由来の廃さいが分布していることが確認された。

3. 調査方法

環境影響評価のための地表調査は、2015 年の 7 月から 10 月の夏季から秋季にかけて行われた。同調査では研究地域の中の水系と鉱業施設の分布を考慮して 198 か所の地点が選ばれ、水温、pH、Eh、水量の観測や河川水の観察が行われた。併せて、それぞれの地点で河川水と河川堆積物の採取が行われた。河川水の採取は、Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻等の主成分用の試料と Fe、Cu、As などの有害元素用の試料に分けられて採取された。化学組成分析は、カナダのアクトラボ社で ICP-MS を用いて行われた。Fe と Cu の高濃度試料については、本研究カウンターパートのセルビア共和国ボール鉱山冶金研究所で分析された。得られた分析値から地球化学図が作成され、各元素の分布が鉱業施設等の分布と共に検討された。これまでの鉱山廃水の研究報告では廃水中の Fe や As が検討対象とされることが多かった。鉱山廃水を含む酸化的な河川水では Fe や As は、河川水の pH が 4 よりも中性側に変化すると、懸濁物となり、河床に沈殿することが知られている。一方、Cu は、pH が 6 程度までに変化しないと沈殿しない特徴があり^{3, 4)}、Cu による汚染の影響は、Fe や As よりもより遠方に及んでいる可能性がある。鉱山廃水の影響範囲をできるだけ正確に知ることは、今後の対策を考えるうえでも重要なことはもちろんであるが、特にセルビア共和国のように大陸に存在する国では、水資源として周辺諸国と共有する国際河川への鉱山廃水の影響を把握することは、近隣の国との共存や協力関係構築のためには不可欠なことである。今回のボール鉱山もマイデンベック鉱山も Cu を対象とした鉱山であり、鉱山廃水の影響範囲を把握するために Cu に着目して解析を行った。

また、本研究では分析値をバックグラウンドグループと異常値のグループに分けるための閾値が推定された。環境影響評価を行う場合には、水質基準値などを使い影響評価が行われることが多

い。鉱山地域は、鉱山地域ではない地域に比較して、バックグラウンドとしての河川水や河川堆積物中の重金属濃度が高い可能性がある。しかしながら、鉱山地域においてバックグラウンドグループと異常値グループを分ける閾値と環境基準値の関係について検討された例はほとんどない。両者の関係を知るために、閾値を推定し、環境基準値との比較を行った。

衛星画像解析による環境影響評価調査では、ボール鉱山周辺の環境汚染の原因となっている廃さい分布を明らかにするため、現地調査と衛星画像解析が行われた。現地調査では 2015 年に鉱山周辺 22 か所で廃さいが採取された。必要試料の採取は 2016 年と 2017 年の夏季にも行われた。採取された廃さいについては、廃さいのスペクトルが実験室で測定されるとともに粉末 X 線回折法による分析が行われ、廃さい中に含まれる鉱物組合せが明らかにされた。これらのデータを基に、研究地域の廃さいについて広域的に衛星画像解析が行われた。

4. 河川水の元素分布の特徴と閾値

河川水の広域地域の地球化学図については、pH、Eh、Cl⁻、SO₄²⁻、Al、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等が作成された。その一例として、河川水中の Fe、As、Cu の地球化学図を Fig. 3 に示した。ボール鉱山地域のボール川とクリベリ川、ボール鉱山下流のペラ川、ティモック川やマイデンベック鉱山地域の小ベック川、ベック川の河川水が、高い Fe、As、Cu 濃度で特徴づけられる。Fe については、河川に沿って廃さいが分布するマイデンベック鉱山南東側のポレチカ川にも影響が認められる。

非汚染を示唆するバックグラウンドグループと汚染を示唆する異常値のグループを判別するために probability graph による方法^{5, 6)}が用いられた⁷⁾。バックグラウンドグループと異常値のグループを分ける閾値の推定には、cumulative probability diagram (CP diagram) 法^{8, 9)}と probability graph 法 (バックグラウンド値のばらつき範囲: $\pm 2\sigma$)^{5, 6)}がある。例えば、河川水中の総 Cu 濃度については、CP diagram 法での閾値は、15 $\mu\text{g/L}$ で、probability graph 法では 35 $\mu\text{g/L}$ であった。また、河川堆積物の Cu の場合には、CP diagram 法での閾値は、90 mg/kg で、probability graph 法では 125 mg/kg であった。CP diagram 法で推定される閾値は、probability graph 法において、バックグラウンド値のばらつき範囲が $\pm 1\sigma$ (68.27%) とした場合に相当する。バックグラウンドグループと異常値のグループを分ける閾値の推定には、バックグラウンドグループの平均値 $\pm 2\sigma$ に基づき 95.45% の確率でバックグラウンドグループを規定できる probability graph 法を用いた。

本方法に基づき推定された本研究地域の SO₄²⁻、Fe、As、Cu、Mn、Zn、Cd、Pb などの閾値が Table 1 に示されている⁷⁾。これらの成分の閾値は、SO₄²⁻ (180 mg/L)、Fe (350 $\mu\text{g/L}$)、As (10 $\mu\text{g/L}$)、Cu (35 $\mu\text{g/L}$)、Mn (100 $\mu\text{g/L}$)、Zn (100 $\mu\text{g/L}$)、Cd (0.1 $\mu\text{g/L}$)、Pb (2 $\mu\text{g/L}$) であった⁷⁾。これらの閾値は、セルビア共和国の河川水などの表層水の環境基準値 (“SI. glasnik RS”, br. 50/2012)¹⁰⁾と比較された (Table 1)。セルビアの表層水の基準は、Class I ~ V の 5 段階に区分されている。Class I と II は、良い水質で、ろ過と消毒で飲料水等に使える水、Class III は、凝集、ろ過、消毒を行えば飲料水等にも使用可能な水、Class IV は、かなり高度な浄水処理を行えば飲料水等にも使用可能な水、Class V は、いかなる目的にも使うことができない水である。推定された閾値は、SO₄²⁻については Class II ~ III の間の濃度であるが、その他の成分については Class II の濃度よりも低い濃度であった。このことは、鉱山地域においても十分な個数 (100 個以上) を持つバックグラウンド地域のデータから推定された閾値は、飲料水等に使える水か否かの判断の補助データの一つとなる可能性を示している。ま

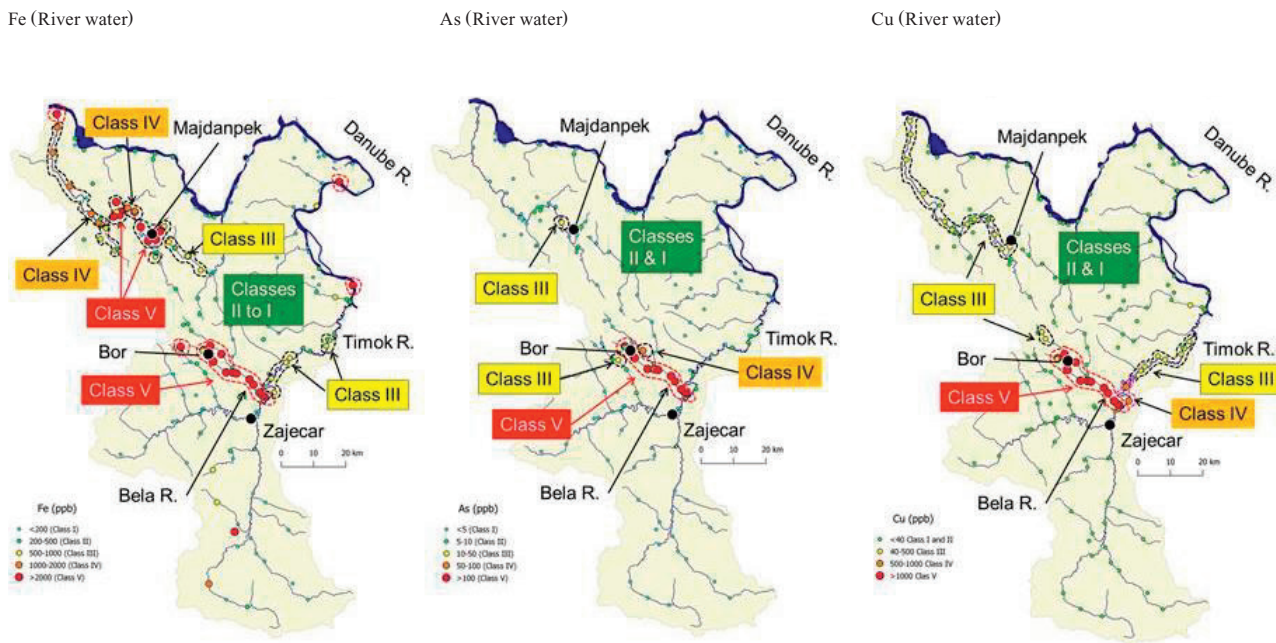


Fig. 3 Geochemical maps of Fe, As and Cu concentrations in river water in the research area in eastern Serbia.

Table 1 Estimated threshold values of surface water in eastern Serbia including the Bor and Majdanpek mining areas⁷⁾ and classification of river water by Serbian regulations for quality of surface water¹⁰⁾.

Class	I	II	III	IV	V	Threshold value
Ecological status	Excellent	Good	Moderate	Weak	Bad	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	50	100	200	300	>300	180
Fe (μg/L)	200	500	1000	2000	>2000	350
As (μg/L)	<5	10	50	100	>100	10
Cu (μg/L)	40	40	500	1000	>1000	35
Mn (μg/L)	50	100	300	1000	>1000	100
Zn (μg/L)	300	1000	2000	5000	>5000	100
Cd (μg/L)	-	-	-	-	-	0.1
Pb (μg/L)	-	-	-	-	-	2

-, not specified. Surface waters of classes I and II correspond to excellent and good ecological status, respectively. Waters classified in these classes can be used for drinking purposes with prior treatment by filtration and disinfection. Water classified into class III corresponds to moderate ecological status. Surface water in this class can be used for drinking water supply with prior treatment by coagulation, flocculation, filtration and disinfection. Water of class IV corresponds to weak ecological status. Water in this class can be used for drinking water supply after using a combination of the above-mentioned treatments and advanced treatment methods and is also appropriate for irrigation and industrial use. Water classified in class V corresponds to bad ecological status and cannot be used for any purpose (Republic of Serbia, 2012).

た、今回の研究地域において、セルビア共和国の表層水の基準をもとに汚染の判断をする場合には、おおむね Class II の濃度を基準にして判断できることを示している。

今回の研究で得られた河川水の濃度をセルビア共和国の表層水の環境基準値 (Class II) に基づき検討すると、Fe については、ボール鉱山から南東に流れるボール川、ベラ川とマイデンベック鉱山から北西に流れるベック川に汚染が認められる。Cu については、ボール川、ベラ川、ティモック川中流域から下流域とマイデンベック鉱山から北西に流れるベック川に汚染が認められる (Fig. 3)。As については、ボール川、ベラ川とマイデンベック鉱山近傍のベック川に汚染が認められる。広範囲に汚染が認められる元素は、Cu と Fe である。特に Cu の汚染が下流域まで及んでいる可能性が高い (Fig. 3)。河川水に対する環境対策対象地域と

しては、ボール鉱山下流域とマイデンベック鉱山下流域があげられる。特にボール鉱山下流域への対策が重要である。実際の対策については、汚染源の廃水よりも重金属元素濃度等が低濃度になった河川水への対策は、費用対効果が低いので、鉱山廃水発生源での廃さいや鉱山廃水の無害化の対策が重要である。

5. 河川堆積物中の Cu の特徴と溶出予測

本研究対象地域の河川水は、高濃度の Fe, As, Cu 等を含んでおり、このような元素が河床に沈殿し、河川堆積物のこれらの元素濃度が高くなっている。また、ボール鉱山地域では、1950 年代に廃さいの流出があり、ボール鉱山下流の河川には、鉱山由来の廃さいが河床に大量に堆積している部分がある。このような堆積物からの有害元素の溶出が容易に起こるのか否かは、河川下流

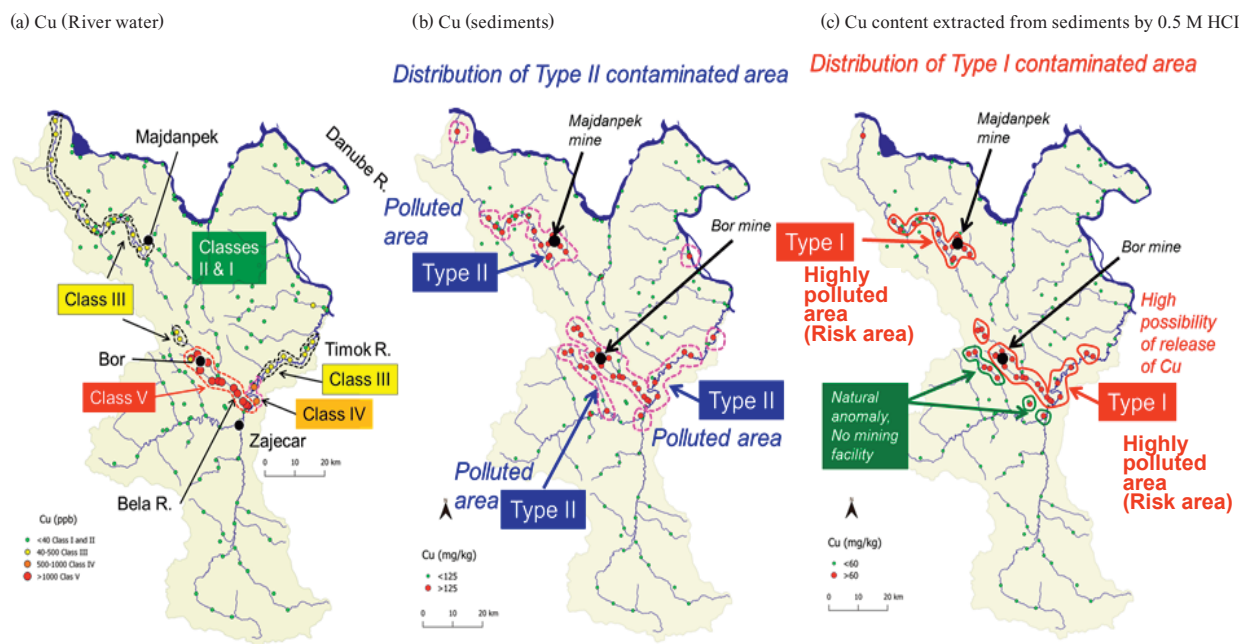


Fig. 4 (a) Geochemical map of Cu concentration in river water in the research area in eastern Serbia. (b) Geochemical map of Cu concentration in riverbed sediment in the research area in eastern Serbia. Distribution of Type II contaminated area is shown in the geochemical map. (c) Geochemical map showing distribution of sampling points where high copper concentration was extracted from riverbed sediments by 0.5 M HCl solution. Distribution of Type I contaminated area is shown in the geochemical map.

域や地下水への影響を考える際には重要である。そこで、河川堆積物試料については、河川水と同様に Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 等の地球化学図が作成され、河川堆積物中の有害元素濃度の閾値が推定された。その閾値に基づき、河川堆積物中の有害元素濃度が閾値より高い地域が第 II 種汚染地域として区分された。その地域の中で、BCR 法¹¹⁾などの逐次抽出実験で、容易に Fe, As, Cu 等を溶出する試料が存在する地域が第 I 種汚染地域とされ、対策重要地域として区分された。

非汚染地域と汚染地域からなる研究地域で採取された河川堆積物試料 181 個について Cu 濃度の分析を行った。河川堆積物の Cu 総濃度の閾値は、probability graph 法では 125 mg/kg であった。この Cu 濃度 125 mg/kg の含有量より高い地域を第 II 種汚染地域とした (Fig. 4b)。1950 年代に剥土や廃さいが下流域に流出したボール川・ベラ川・ティモック川の Cu について、河川堆積物の汚染と河川水の汚染を比べると、河川堆積物の汚染の方が遠くまで広がっていることがわかる。

土壌、堆積物中に含まれる有害元素は様々な化学形態で存在している。そのため、有害元素の土壌、堆積物中からの溶出のしやすさも、どのような化学形態で有害元素が存在しているかによって異なる。従って、Fig. 4b に示した第 II 種汚染地域のような堆積物中の全含有量に基づく汚染地域の区分だけでは、的確に有害元素溶出リスクを評価することはできない。土壌、堆積物中の有害元素の特定には、BCR 法などの逐次抽出実験が広く用いられている。BCR 法では、第 1 段階で交換態と炭酸塩態、第 2 段階で鉄・マンガン酸化形態、第 3 段階で有機物態、硫化物態 (一部のみ) として存在している元素を抽出する。第 3 段階までに抽出されなかった残渣には、ケイ酸塩態などが含まれる。人為的汚染により土壌、堆積物に取り込まれた有害元素は、主に第 3 段階まで抽出され、非汚染由来の有害元素は、ケイ酸塩態など鉱物の結晶格子の中に安定した形態で閉じ込められている。BCR 法の第 3 段階までのフラクションは、0.5 M 塩酸で抽出することができ¹²⁾、人為汚染による重金属が溶出しやすい地域とそうでない

地域の区別が可能になる。このように抽出実験データをもとに、有害元素が溶出しやすい地域が第 I 種汚染地域として抽出される。また、有害元素全含有量のうちの 0.5 M 塩酸可溶態の割合を調べることで、有害元素の起源が人為的汚染または非汚染由来であるのかの予測もできる。

具体的には、非汚染地域と汚染地域からなる調査地域から採取された 181 個の試料について 0.5 M HCl 溶液による Cu 溶出実験を行った。この実験結果について、閾値を probability graph 法で推定し (60 mg/kg, Fig. 4c)、Cu 溶出量の高い地域 (第 I 種汚染地域) を推定した。この地域の中には、鉱業施設が分布する水系の地域とそうでない水系の地域がある。鉱業施設がなくても高い Cu 溶出特性を示す地域は、かつて鉱業活動が行われた休廃止鉱山が存在する地域、または自然由来の影響により河川堆積物中に Cu が濃集している地域と推定される。鉱業施設がなくても高い Cu 溶出特性を示す地域の河川水中の Cu 濃度は、バックグラウンドのグループに属し、その河川水の pH も中性付近である (Fig. 4c)。このことから、このような地域は、安定化しており、汚染のリスクは低いと考えられる。このような地域を除き、第 I 種汚染地域を抽出した。本研究地域の第 I 種汚染地域は、ボール鉱山北西のクリベリ川上流部、ボール鉱山から下流のボール川、ベラ川、ティモック川中流域、小ペック川を含むマイデンペック鉱山周辺部と同鉱山下流のペック川に分布する。これらの第 I 種汚染地域の中には、衛星画像解析で廃さい (tailing) や剥土 (overburden) が確認される。また、第 I 種汚染地域は、おおむね河川水の Cu 高濃度地域や目視で魚を確認できない地域に対応している。

6. 衛星画像解析による廃さいの分布の把握

6・1 廃さいのスペクトル解析

ボール鉱山周辺の環境汚染の原因となっている廃さい分布を明らかにするために衛星画像解析が行われた。その解析の中では、2015 年に鉱山周辺 22 ヲ所で採取した廃さいについて反射スペクトルの測定と粉末 X 線回折法 (XRD 法) による試料の鉱物組合せ

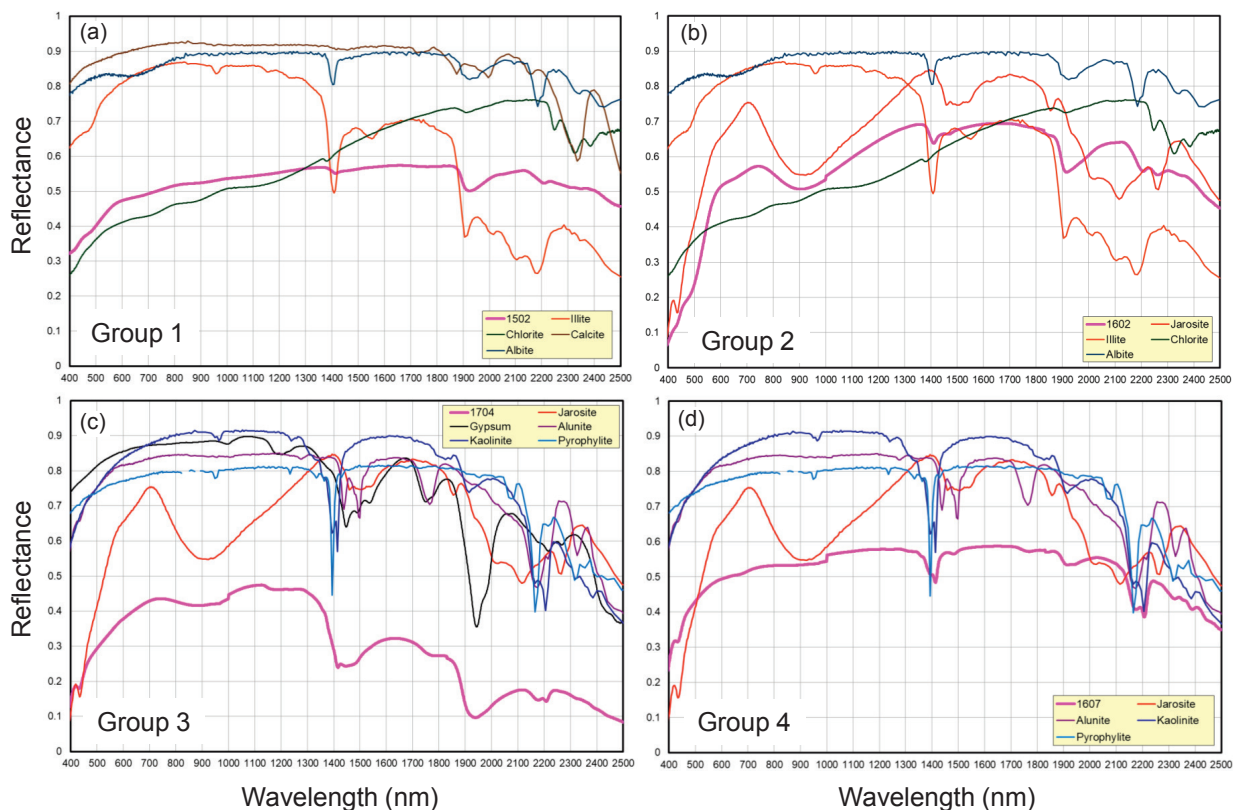


Fig. 5 Representative spectra from ASTER data of surface soils and tailing samples classified into four types based on mineral assemblage by X-ray powder diffraction. (a) Group 1: Surface soil sample at a point away from the orebody of the Bor deposit, (b) Group 2: Tailing samples derived from the periphery of the orebody at the Bor deposit, (c) Group 3: Tailing samples derived from the orebody at the Bor deposit, (d) Group 4: Tailing samples derived from the orebody at the Bor deposit.

Table 2 Classification of surface soil and tailing samples based on mineral assemblage by X-ray powder diffraction in eastern Serbia.

Group	Group 1						Group 2						Group 3				Group 4					
Sample No.	1501	1502	1503	1504	1505	1506	1508	1608	1601	1602	1603	1604	1605	1507	1703	1704	1706	1606	1607	1701	1702	1705
Quartz	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Plagioclase	△	△	△	○	△	○	○		△	○	○	○	⊙	△	△		△			△	△	△
Fayalite								△														
Actinolite							△							△	△			△	△		△	△
Montmorillonite							△															
Illite	○	○	△	△	○	△	△	△	△			△	△	△						△	△	
Chlorite	△	△	△	△	△	△			○	○	○	○	△				△					
Pyrophyllite								△	△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
Kaolin							△	○						○	○	⊙	△	⊙	⊙	○	○	○
Jarosite							△	△	△	○	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△
Gypsum							○	○	○		△	○		△	○	○	⊙					
Alunite														△	△	△	△	△	△	△	△	△
Pyrite								△														
Calcite	○	○	⊙	△	△	○																
Dolomite	△	△	△	△	△	△																

⊙: Large amount, ○: Medium amount, △: Small amount

の検討が行われた。反射スペクトルの測定では、分光放射計 (FieldSpec3, Malvern Panalytical 社) による反射スペクトルの測定が行われた。反射スペクトルの測定結果と XRD 法による結果が Fig. 5 と Table 2 に示されている。XRD 法による結果からはこれらの塵さいは、4 グループに分類された。グループ 1 は、石英 (quartz), 斜長石 (plagioclase), 方解石 (calcite), イライト (illite),

緑泥石 (chlorite) など中性な溶液で安定に存在できる鉱物で特徴づけられる。グループ 2 は、方解石を欠き、石英, 斜長石, イライト, 緑泥石に酸性の溶液で安定な鉄明礬石 (jarosite), 石膏 (gypsum), 葉ろう石 (pyrophyllite) を伴う。グループ 3 は、石英, 少量の斜長石, 鉄明礬石, 石膏, 明礬石 (alunite), カオリン (kaolin), 葉ろう石で特徴づけられる。グループ 4 は、石英, 少

Table 3 Wavelength region, center wavelength and spatial resolution of each ASTER band.

Band #	Wavelength region	Center wavelength	Spatial resolution
B1	VNIR	556 nm	15 m
B2	VNIR	661 nm	15 m
B3	VNIR	807 nm	15 m
B4	SWIR	1,656 nm	30 m
B5	SWIR	2,167 nm	30 m
B6	SWIR	2,209 nm	30 m
B7	SWIR	2,262 nm	30 m
B8	SWIR	2,336 nm	30 m
B9	SWIR	2,400 nm	30 m
B10	TIR	8,291 nm	60 m
B11	TIR	8,634 nm	60 m
B12	TIR	9,075 nm	60 m
B13	TIR	10,657 nm	60 m
B14	TIR	11,318 nm	60 m

量の斜長石、鉄明礬石、明礬石、カオリン、葉ろう石で特徴づけられ、グループ3に比べて石膏を欠く特徴がある。中量から多量のカオリン、少量の葉ろう石を伴うグループ3とグループ4の廃さいは、鉱体中心部から由来した廃さいであると考えられる。一方、グループ1とグループ2は、それぞれ鉱化作用伴われぬ部分の試料や鉱化作用が弱い部分からの岩石の廃さい試料であると考えられる。

これらのグループの代表的なスペクトルである試料1502, 1602, 1704, 1607がFig. 5に示されている。すべてのグループで1400 nmと1900 nm付近に、主要鉱物に含まれるOH基の吸収ピークが認められる。グループ1の試料1502のスペクトルでは、2200 nm付近に不明瞭ながらもイライトや緑泥石の吸収ピークが認められ、XRDの鉱物組合せの結果と調和的である。グループ2の試料1602には、鉄明礬石が含まれており、その反射スペクトルにおいても、鉄明礬石に特徴的な吸収波長である910 nm付近に吸収ピークが認められる。グループ3の試料1704のスペクトルには、鉄明礬石の存在を示す430 nm, 910 nm付近の吸収ピークに加え、石膏の存在を示す1450 nm, 1750 nm, 1930 nmの吸収ピークが認められる。また、1410 nmと2200 nmの吸収ピークは、カオリンの存在を、2170 nmの吸収ピークは明礬石の存在を示す可能性がある。本スペクトルは、XRDにより確認された鉱物組み合わせと調和的なスペクトルである。グループ4の試料1607のスペクトルでは、鉄明礬石の存在を示す910 nm付近の吸収ピークは、試料1602や1704に比較すると明瞭ではないが、430 nmに鉄明礬石の吸収ピークが認められる。また、本試料には、カオリンの存在を示す1410 nm, 1910 nm, 2200 nmの吸収ピークが認められる。スペクトル解析から推定される鉱物組み合わせとXRDによる鉱物組み合わせには上記の対応関係が認められる。このように反射スペクトルの解析による廃さい試料の鉱物組み合わせは、XRDによる廃さい試料の鉱物組み合わせを反映していると考えられる。廃さいは、肉眼的には白色で、その分布も均質であるように思われるが、スペクトル解析による鉱物組み合わせの結果から、廃さいは、採取位置によりその鉱物組合せや鉱物量比が異なり、後述するように廃さいを構成する鉱物の分布は二次元的に変化に富むことが示唆された。

6・2 ASTER画像による廃さい分布の解析

廃さいに含まれる鉱物の種類を広域で推定するため、日本の地球観測センサ ASTER 衛星画像を用いた画像分類を行った。ASTERは、可視近赤外域、短波長赤外域、熱赤外域のそれぞれを観測可

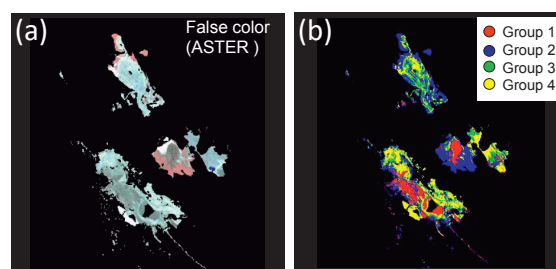


Fig. 6 (a) False color image of overburdens and tailings of the Bor mine and Veliki Kurivelj mine. (b) Image showing distribution of different types of overburdens and tailings determined by satellite image analysis using ASTER data. The groups 1 and 2 are overburdens and tailings derived from peripheral part of orebodies. The groups 3 and 4 are overburdens and tailings derived from central part of orebodies.

能なVNIR(Visible and Near-Infrared Region), SWIR(Short Wave Infrared Region), TIR(Thermal Infrared Region)の3つのセンサを搭載しており、それぞれのセンサで空間分解能や観測波長(バンド)が異なる(Table 3)。特に、ASTERは他の地球観測センサと異なり、SWIRやTIRの波長域に多数のバンドを持つのが特徴で、この波長域は粘土鉱物の吸収波長と一致することから資源探査に有用なセンサとして利用されている。

最初に、鉱山周辺22カ所で採取された廃さいサンプルは、前述のとおり鉱物組合せが類似する4つのグループに整理された(Table 2)。類似する鉱物組合せの廃さい試料は、反射スペクトルも類似することが期待される。そこで最初に、廃さいを採取した場所と対応するASTER衛星画像の画素値を教師データ(参照スペクトル)として、ASTER衛星画像の中の廃さいを採取していない場所に対応する画素が、先に述べた4つのグループのどれに属するかを、教師付き分類の1つであるSpectral Angle Mapper (SAM)法により解析した。SAM法では、教師データの各バンドの反射率を教師ベクトルとし、4つのグループの教師ベクトルと廃さいを採取していない地点の画素のベクトルとのなす角度を計算し、もっとも角度の小さかったグループに分類していくアルゴリズムである。例えば、SAM法において2つのバンドを使用する場合、それぞれのバンドの反射率をxとyの値としてプロットした2次元のベクトルとして表現することができる。Fig. 6は、ASTERのバンド5から9までの5バンドを使用してSAM法による廃さいのグループ分けと各グループの分布を計算した結果である。

Fig. 6bの廃さいの分類画像では、Fig. 6aのFalse color画像からは見分けられない構成鉱物の違いが示されており、衛星画像から廃さいを構成する鉱物の種類を推定できる可能性が示された。本検討では、現地調査データが22個と少なかつたため、22個全てを教師データとしてSAM法の分類に使用し、さらに分類精度の検証にも同じ22個のデータを使用した。この結果、全体精度については58%となった。精度が必ずしも高くない理由には、XRD分析結果をもとに4グループに分類された廃さいの各グループ内においても廃さいに鉱物組合せや鉱物量比にばらつきがあることが考えられる。例えば、石英が多く、衛星画像解析に適する鉄明礬石、石膏、カオリン等の量が少ない試料では、衛星画像解析の対象となる鉱物のスペクトルの特徴が弱くなり分類精度が低下することが挙げられる。

さらに衛星画像解析から得られた廃さいのタイプ毎(Group 1,

Table 4 Wavelength region, center wavelength and spatial resolution of each Sentinel-2 band.

Band #	Wavelength region	Center wavelength	Spatial resolution
B1	VNIR	443 nm	60 m
B2	VNIR	493 nm	10 m
B3	VNIR	560 nm	10 m
B4	VNIR	665 nm	10 m
B5	VNIR	704 nm	20 m
B6	VNIR	740 nm	20 m
B7	VNIR	783 nm	20 m
B8	VNIR	833 nm	10 m
B8A	VNIR	865 nm	20 m
B9	VNIR	945 nm	60 m
B10	SWIR	1,374 nm	60 m
B11	SWIR	1,610 nm	20 m
B12	SWIR	1,610 nm	20 m

2, 3, 4)の分布, それらの鉱物組み合わせ, 鉱物組合せが持つ地質学的・鉱床学的意味を考慮すると, Group 3と4は, 明礬石, カオリン, 葉ろう石が存在することから, 鉱石が存在する鉱体の中心部由来の廃さいのグループと推定される。一方, Group 1と2は, 明礬石を欠き, 緑泥石, イライト, 方解石が存在することから, 鉱化作用の影響が弱い鉱体の周縁部由来の廃さいのグループと推定される。Group 3と4は, Group 1と2に比較すると, 鉱化作用の影響が強く, 含有黄鉄鉱や黄銅鉱の量が多いと予想され, 環境負荷が大きい廃さいであると考えられる (Fig. 6)。衛星画像解析の情報は廃さい表面の二次元的情報ではあるが, 肉眼観察では区別ができない廃さいの特性を分類することができ, タイプ分けされた廃さいの環境負荷を予測する手がかりを与えてくれる。

6・3 鉄明礬石の分布と量に基づいた廃さいの分布

廃さいが風化を被ると廃さい中の黄鉄鉱などの硫化鉱物が分解

して, 廃さい表面に鉄明礬石が形成されることが知られている。また, 本研究で示されるように, 鉄明礬石には 910 nm 付近に特徴的な吸収波長が存在する。このことを利用して鉄明礬石の分布と量に着目し, 空間分解能 20 m の衛星搭載マルチスペクトルセンサの Sentinel-2 を用いて, 鉄明礬石の分布と量に基づき廃さいの分布を推定する手法について検討した。Table 4 に, 解析に使用した Sentinel-2 のそれぞれのバンドの空間分解能と観測波長を示す。Sentinel-2 には 910 nm の吸収波長のバンドが含まれないため, 鉄明礬石の吸収波長に近い Sentinel-2 のバンド 8A (中心波長: 865 nm) を使用した。解析には, 2017 年 7 月 21 日に取得された Sentinel-2 画像を使用し, 現地で採取した鉄明礬石の含有量が異なる 56 個のサンプルを教師データとして, バンド間演算と SAM 法を組み合わせる方法により地球化学図と同じ範囲の鉄明礬石の分布を広域で推定した。手法の詳細については, Wakasa et. al.¹³⁾ を参照されたい。

今回の解析結果から, ベリクリベリ露天掘り鉱山, 終掘後のボール露天掘り鉱山, そしてマイデンバック鉱山周辺の廃さいには, 鉄明礬石が広く分布しており, かつその量も多いことが明らかになった (Fig. 7a)。また, クリベリ川とボール川の合流地点 (Fig. 7b 中の左側拡大図), ベラ川とティモック川合流点, ティモック川とドナウ川合流点付近の河川の両側には廃さいが存在しており, そこには多量の鉄明礬石が存在していることが示された (Fig. 7b)。前述した方法で分類精度を確認した結果, 全体精度は 41% であった。必ずしも良い精度ではない結果については, 鉄明礬石の吸収波長のピークである 910 nm の吸収波長を使用できなかったことが考えられる。今後ハイパースペクトルセンサを使い, 910 nm の吸収波長が観測できるようになると鉄明礬石の吸収を直接観測できるようになり, 精度は向上すると期待される。このような課題はあるが, 空間分解能 20 m の解像度の Sentinel-2 により取得された衛星画像を用いることで, 鉄明礬石の分布から, 廃さいの分布を広域地域において迅速に推定できることが明らかになった。

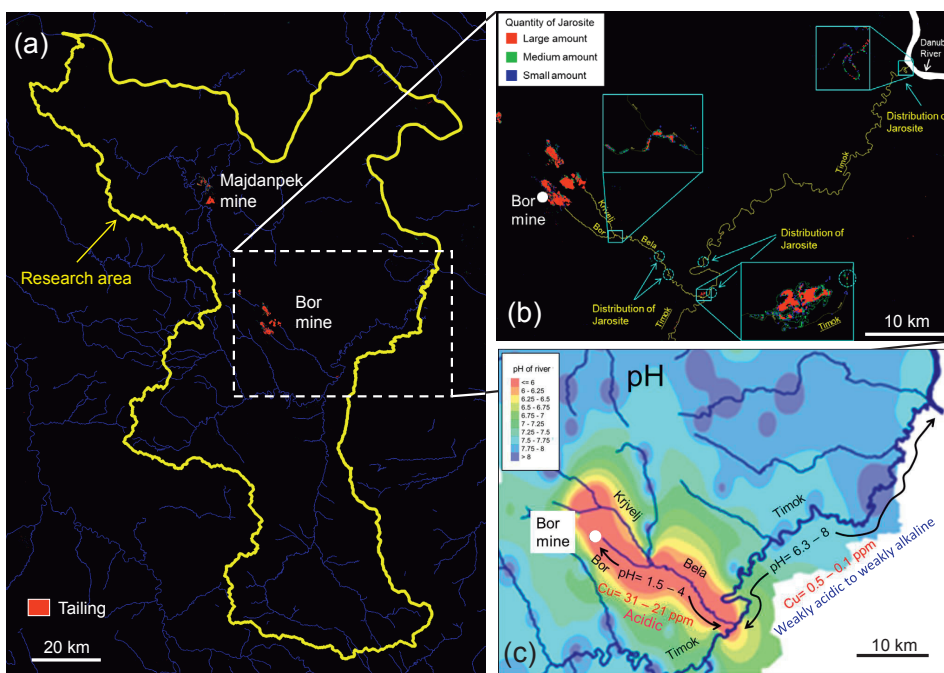


Fig. 7 (a) Distribution of tailings in the research area based on the presence of jarosite determined by satellite image. (b) Distribution of tailings in the area from the Bor mine to Danube River. Distribution of tailings along rivers due to the collapse accident of tailing from the Bor mine in 1950s is also identified in this figure. (c) Map showing relationship between pH values and Cu concentration of river water in the area from the Bor mine to Danube River.

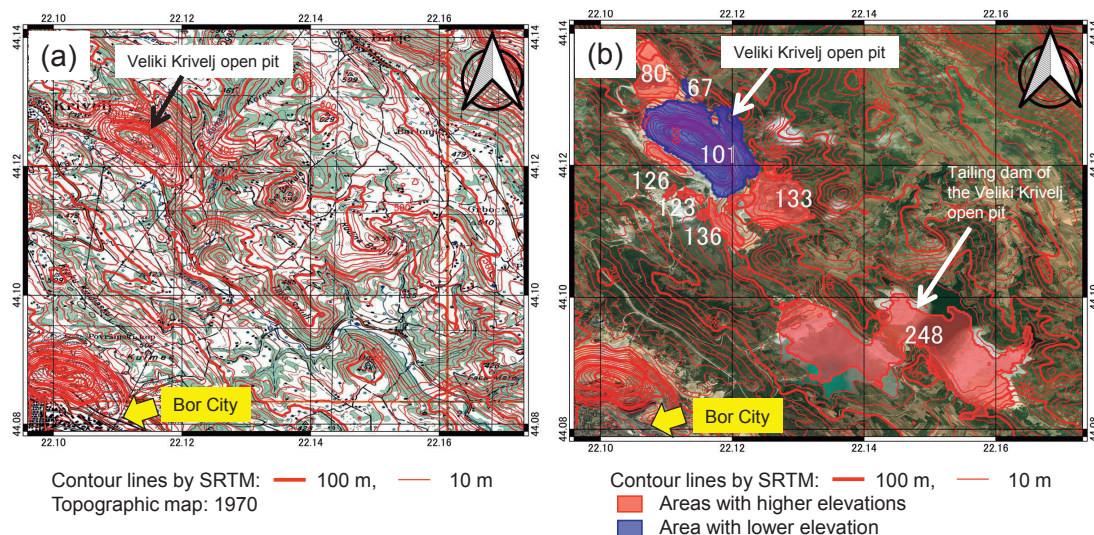


Fig. 8 (a) Map showing a topographic map in 1970 around the Veliki Krivelj open pit and contour lines determined by analysis of the digital elevation data in Shuttle Radar Topography Mission (SRTM data) in 2000 (red color). (b) Map showing distribution of area with lower elevations and areas with higher elevations estimated on the basis of the difference of the contour data of the 1970 topographic map and the 2000 SRTM data.

6・4 廃さい体積の推定

露天掘りによる鉱山開発の場合には、地表面に近い低品位部は剥土 (overburden) として、また、鉱石として採掘された岩石は、選鉱処理後に廃さいとして露天掘りの近くに保管されることが多い。廃さいには黄鉄鉱などが含まれており、これらが雨水などと反応し酸性の鉱山廃水が形成される。これらの鉱業廃棄物の環境への影響を推定するためには、廃さいなどの体積と廃さい中の金属濃度を推定する必要がある。衛星画像解析では、過去の地形と開発後のある時点での地形を比較することにより、廃さいなどの体積を推定できる可能性がある。このことを確認するために、1983年に開発が開始されたベリクリベリ露天掘り鉱山を対象に、開発開始から2000年までに同鉱山で採掘された岩石の体積を、1970年に作成された地形図の標高値と2000年にスペースシャトルのミッションとして作成されたデジタル標高データ SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) の標高値との差分から計算した (Fig. 8a)。これらの結果が Fig. 8b に示されている。青で示された部分が、開発により標高値が低くなった地域で、ベリクリベリ露天掘り鉱山に対応する (Fig. 8b の No. 101 と No. 67)。ベリクリベリ鉱山では、標高が露天掘りによって元の地形よりも 240 m 以上低くなっている。一方、赤で示される部分は、開発により標高値が高くなった地域で、露天掘り鉱山開発時の剥土の保管場所や谷を埋めた廃さい堆積場に対応する。ベリクリベリ鉱山の周囲には赤色の部分が存在しており、このような場所は、鉱山開発時に地表近くに存在していた低品位部が、剥土として露天掘り周辺に保管され、標高が高くなった部分である。また、ベリクリベリ鉱山の南東約 4 km の谷に標高が高くなった場所 (No. 248) が認められる (Fig. 8b)。この部分では、ベリクリベリ鉱山で採掘された岩石が、選鉱処理後にこの廃さいダムに運び込まれ谷が廃さいダムとして埋め立てられ、その結果標高が 100 m 以上高くなっている。

標高の変化から体積を計算した結果、露天掘りの場所 (Fig. 8b の No. 101) で採掘された岩石の体積はおおよそ 110,000,000 m³、廃さいダムの体積 (Fig. 8b の 248) は、おおよそ 150,000,000 m³ であった。露天掘りの岩石と廃さいダムの廃さいの密度を、それぞれ 2.3 g/cm³ と 1.3 g/cm³ と仮定すると、体積と密度から質量を求めた結果、露天掘りと廃さいダムでそれぞれ約 250 Mt と約 200

Table 5 Volumes of Field 1 and Field 2 of tailing dams of the Veliki Krivelj mine determined by on-site survey.

	Field 1	Field 2
1982 - 1989	63,900,900 m ³	
1990 - 2007		89,400,000 m ³
2008 - 2019	64,100,000 m ³	

Mt となった。同露天掘り鉱山から掘り出された岩石の一部は、剥土として別な場所に保管されているものもある。露天掘り鉱山から掘り出された岩石の質量より同鉱山由来の廃さいの質量が小さいことは、定性的には調和的な関係である。

廃さいダム (Fig. 8b の 248) の廃さいの体積については、研究プロジェクトのカウンターパートであるボール鉱山冶金研究所から提供された地表での測量による実測データに基づき比較された。Table 5 の Field 1 と Field 2 の体積を加えた体積が、廃さいダム (No. 248) の体積になる。1982年から2000年までの廃さいダムの体積を推定する際には、Field 2 への年間廃さい導入量が一定であると仮定して1990年から2000年までと2001年から2007年に分けて、Field 2 の体積 (89,400,000 m³) を案分し、1982年から1989年までの Field 1 の体積に1990年から2000年まで Field 2 の体積を加えて求めた。この結果、実測データに基づく2000年時点の廃さいダム (Field 1+Field 2) の体積は、おおよそ 119,000,000 m³ であり、質量に換算すると約 154 Mt で、衛星画像解析により標高の変化から推定した質量 (200 Mt) よりも小さい値であった。ボール鉱山冶金研究所から提供された2000年時点の廃さいダムの実測の体積値を基準にすると、デジタル標高データ SRTM の標高値と露天掘り開発前の地形図の標高値の差から体積を計算した廃さいダムの質量は、1.3倍になっているが、衛星画像解析によりおおよその廃さいの体積の推定が可能であることが示された。

7. バックグラウンド解析と衛星画像解析の統合

7・1 衛星画像解析による河川水中の金属濃度の推定と分布の把握

衛星画像解析による鉱山地域からの流下する汚染河川の両岸に

Table 6 Estimated quantity of metals from overburdens, tailings of tailing dams and tailing distributed along the Krivelj River, Bor River and Bela River.

Sample ID	18090402	17083101	16081010	16081002	16080214	16080206	16080915	16080303
Location	Overburden near Saraka stream*1	Overburden near Robule lake*2	Old Bor Field 1*3	Veliki Krivelj Field 2*4	Krivelj River*5	Bor River*6	Bela River*7	Bela River downstream of Vrazogranac
Sample type	Rocks of overburden	Rocks of overburden	Tailing from tailing dam	Tailing from tailing dam	Tailing along river	Tailing along river	Tailing along river	Tailing along river
Total volume (m ³)	90558000	140981000	2212000	89400000	1070	108800	84800	802800
Mass (Mt)	163	253	3.0	116	0.001	0.1	0.1	1.0
Concentration (mg/kg)								
Mn	1.7	3.8	27.9	6.2	5.9	0.4	1.8	0.6
Fe	< 3.0	23.3	234	29.3	119	< 3.0	309	1230
Co	0.1	0.2	5.4	1.5	0.4	0.0	0.2	0.2
Ni	0.1	0.2	1.4	0.6	0.5	0.2	0.2	0.1
Cu	4.1	27.5	503	29.3	21.7	1.8	17.5	11.4
Zn	0.2	4.0	271	1.2	2.6	0.8	2.7	0.7
As	0.02	0.4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2
Cd	0.001	0.08	0.2	0.002	0.013	0.002	0.006	0.001
Pb	0.001	0.07	0.03	0.01	0.01	0.004	6.2	0.7
Quantity of metals (ton)								
Mn	280	964	80.2	716	0.01	0.06	0.20	0.58
Fe	< 490	5910	673	3400	0.16	< 0.40	34.1	1280
Co	18.3	50.8	15.5	179	0.00	0.00	0.02	0.21
Ni	11.0	50.8	3.89	74.5	0.00	0.03	0.02	0.11
Cu	675	6980	1460	3400	0.03	0.25	1.93	11.9
Zn	34.1	1020	778	140	0.00	0.11	0.30	0.77
As	3.62	102	0.64	9.55	0.00	0.02	0.03	0.19
Cd	0.14	20	0.46	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.13	19	0.08	0.59	0.00	0.00	0.69	0.77

*1: Overburden from the Veliki Krivelj open pit; *2: Overburden from the Bor open pit; *3: Old tailing of the Bor mine; *4: Tailing of the Veliki Krivelj open pit; *5: Krivelj River near the confluence between Krivelj River and Bor River; *6: Bor River near the confluence between Krivelj River and Bor River; *7: Bela River between Rgotina Settlement and Vrazogranac Settlement

分布する廃さいの分布と地表環境調査による河川水の pH および河川水中の金属元素濃度の比較を行い、河川における相対的な金属濃度の差異について検討を行った。廃さいの分布と河川水の pH の関係においては、河川水の pH が 4 よりも酸性の河川水が存在するボール川、ベラ川では河川に沿って廃さいで覆われた裸地が存在し、衛星画像の解析により鉄明礬石の分布が比較的容易に確認される。一方、河川水の pH が 6.3 ~ 8 ないしは 8 以上の河川水が流れるティモック川流域では、河川沿いの裸地に植生が回復し、結果的に鉄明礬石の検出も難しいことが多い (Fig. 7c)。このように、衛星画像解析による河川に沿った鉄明礬石が含まれる裸地の検出と河川水の pH にはある程度の関連性が確認された。地表環境調査の結果から、本研究地域の河川水中の Cu, Fe 等の金属元素濃度は、河川水の pH が 4 よりも酸性の河川水では高く、pH が 6.3 よりも中性からアルカリ性では、それらの濃度は低いことが示されている。この関係に基づくと、衛星画像解析により河川に沿って鉄明礬石が比較的容易に確認できる河川では、河川水中の金属成分の濃度が高いことが予想される。河川に沿った鉄明礬石を含む裸地の分布から、河川水中の金属濃度が高い地域とそうでない地域を推定できる可能性がある。

7・2 バックグラウンド解析と衛星画像解析による環境負荷地域の推定

研究地域の将来の環境影響評価を予測するうえで、ボール鉱山地域やマイデンベック鉱山地域の廃さいや剥土が雨水と反応した場合にどの程度の量の金属元素が溶出するのかを見積もることが必要である。ボール鉱山地域を対象に、ボール鉱山周辺の廃さいや剥土とボール川とベラ川にそって存在する堆積物 (ボール鉱山由来の廃さい) について検討を行った。この検討では、雨水が廃さいや剥土と反応する場合は、蒸留水が廃さいや剥土と反応する場合に近いと仮定し、蒸留水による廃さいや剥土からの元素の抽

出実験を行った。

本実験では、3.0 g の乾燥した廃さい試料 (< 2.00 mm) と 30 mL の蒸留水 (pH=5.6) を混合したものを作成した。この混合物を、レシプロシェーカー (TAITEC 社, モデル SR-2W) を用いて、200 rpm の速度で 6 時間攪拌した。攪拌後、遠心分離機 (Himac 社, モデル CT6EL) を用いて 3000 rpm の速度で 20 分間の遠心分離を行い、上澄みと固形残渣を分離した。その後、孔径 0.2 μm のセルロースアセテート親水性フィルターを用いて溶液をろ過した。この浸出液の一部を使い、pH メーターを用いて浸出液の pH を測定した。また、分取された浸出液を使い、比色法で鉄の濃度が分析された。残りの浸出液は、50 mL のポリプロピレンボトルに保存され、1% 容量の硝酸で酸性化した後、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を用いて銅などの重金属とヒ素の濃度が分析された。また、浸出液の主要陽イオン、Al, SO₄²⁻濃度は、誘導結合プラズマ発光分光法 (ICP-AES) で分析された。得られた分析結果が Table 6 に示されている。

今回検討された試料は、剥土試料 (ベリキクリベリ露天掘り鉱山の剥土 (Saraka 川近傍), ボール露天掘り鉱山の剥土 (ロープレ湖近傍)), 選鉱尾鉱 (Old Bor Field 1, Veliki Krivelj Field 2), ボール川, クリベリ川, ベラ川に沿って分布する廃さい試料である。ベラ川に沿って分布する廃さい試料は、Rgotina 集落と Vrazogranac 集落の中間のベラ川に存在する廃さいと Vrazogranac 集落下流の廃さいである。実験の結果、廃さいや剥土から溶出する元素の濃度は、例えば、Fe では約 230 ~ 3 mg/kg ないしそれ以下、Cu では 500 ~ 4 mg/kg, As では 0.4 mg/kg 以下であった。一方、河川の両岸などに堆積する堆積物から溶出される元素の濃度では、Fe では約 1200 ~ 3 mg/kg, Cu では 20 ~ 2 mg/kg, As では 0.3 ~ 0.2 mg/kg であった (Table 6)。ボール鉱山近傍の廃さいや剥土から溶出する元素濃度も河川の両岸に堆積する廃さい堆積

物から溶出される元素濃度も、試料により濃度にばらつきが認められる。そして、ボール鉱山近傍の廃さいや剥土から抽出される元素濃度が、河川に沿って分布する廃さい堆積物から溶出される元素濃度よりも高い、あるいはその逆など、鉱業廃棄物のタイプによる濃度の違いも認められなかった。

衛星画像解析から推定された廃さい、剥土、河川の両岸に分布する堆積物の体積とこれらを構成する物質の密度(廃さい 1.3 g/cm³, 剥土 1.8 g/cm³)から、これらの廃棄物の質量が推定できる。この質量と抽出実験で得られる溶出元素濃度を組み合わせることで、廃さい、剥土、河川の両岸などに分布する堆積物から今後溶出する金属元素量が推定される。河川の両岸に存在する堆積物に比べて鉱山周辺の廃さいと剥土の体積は大きいので、鉱山近傍の廃さいと剥土から今後溶出すると予想される金属量は大きい。河川の両岸に分布する廃さい堆積物では、鉱山近傍の廃さいと剥土の体積に比べるとその体積が小さいため、今後溶出する金属量は、相対的に小さい。しかしながら、河川に沿って分布する廃さい堆積物は、河川近傍の地域の地下水に影響を与える可能性があり、これらの廃さいからの有害元素の溶出には注意が必要である。鉱山周辺の廃さいや剥土から溶出される Fe, Cu, As の量は、Fe については 6000 ~ 490 トン、Cu では 7000 ~ 680 トン、As については 100 ~ 1 トンの元素が溶出すると考えられる。一方、河川の堆積物では、Fe については 1300 ~ 0.4 トン以下、Cu では 12 トン以下、As については 0.2 トン以下の元素量が溶出すると考えられる (Table 6)。全岩分析による剥土中の総 Cu 濃度の分析結果に基づくと、ボール鉱山地域の廃さいや剥土には、21 ~ 5.4 万トンの Cu が存在することが明らかになっている (Stevanovic, 私信)。振とう実験により抽出された元素濃度と実際の鉱山廃水の元素濃度を、単位時間あたりに溶出する元素濃度として比較すると、実際の鉱山廃水として溶出される元素濃度は、振とう実験による濃度よりも低いと思われる。このことを考慮すると、自然環境下での降水と廃さいや剥土との反応では、汚染が長期間にわたり継続することが予想される。

8. ま と め

セルビア共和国ボール鉱山地域およびマイデンペック鉱山地域を含むセルビア東部の研究地域において、衛星画像解析による鉱山地域の環境影響評価法の確立と高度化のために、環境に関わる地表調査と衛星画像解析による鉱山地域の環境影響評価研究が行われた。鉱山地域を含む地域を対象にして衛星画像解析を行うことで、鉄明礬石のスペクトルの存在に基づき、広域な地域の中から迅速に廃さいの分布を把握することが可能であること、衛星画

像解析から推定される廃さいの鉱物組合せから環境負荷が大きい廃さいと相対的に環境負荷が小さい廃さいを区別できることが明らかになった。そして、開発前の地形データと開発後の地形データが衛星画像解析から得られれば、廃さいの体積が推定可能であり、さらに、廃さいからの有害元素の抽出実験データを組み合わせることで、廃さいから溶け出す有害元素量の定量的な推定が可能になる。また、地表調査から明らかにされた Cu が廃さいから高濃度で溶出する可能性がある危険地域 I は、衛星画像解析から推定された鉱山周辺の廃さいが分布する地域や鉱山下流の河川に沿って廃さいが分布する地域に対応している。これらのことは、鉱業活動地域を対象とする環境調査の事前段階での環境負荷予測や、紛争や感染症のために現地調査ができない鉱業活動地域の環境負荷予測と対策指針を考える事が可能であることを示している。また、鉱業活動による環境負荷がドナウ川のような国際河川を介して多国間にわたる場合には、これらの情報を関係国で共有することで適切な環境対策が実施できるものと思われる。

謝辞 この成果は、JICA-JST によるセルビア共和国における SATREPS 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム「持続可能な資源開発実現のための空間環境解析と高度金属回収の融合システム研究」により得られたものである。記して感謝申し上げます。

References

- 1) P. Paunovic: Proceedings of XVIII International Scientific and Professional Meeting "Ecological Truth" Eco-Is'10, 1-4 June, Spa Jankovic, Apatin, Serbia, Publisher Univ. Of Belgrade - Technical Faculty in Bor, Serbia, (2010), 224-251.
- 2) D. Bogdanovic, L. Obradovic and S. Miletic: Mining & Metallurgy Engineering Bor, 4(2014), 137-156.
- 3) M. Balintova and A. Petrilakova: Chemical Engineering Transactions, 25(2011), 345-350.
- 4) S. Park, J. Yoo, S. Ji, J. Yang and K. Baek: Environ. Sci. Pollut. Res., 22(2015), 3013-3022.
- 5) A. J. Sinclair: Journal of Geochemical Exploration, 3(1974), 129-149.
- 6) A. J. Sinclair: Society of Economic Geologists: Reviews in Economic Geology, 3(1986), 97-115.
- 7) D. Adamovic, D. Ishiyama, S. Dordievski, Y. Ogawa, Z. Stevanovic, H. Kawaraya, H. Sato, L. Obradovic, V. Marinkovic, J. Petrovic and V. Gardic: Resource Geology, 71(2021), 123-143.
- 8) C. Reimann, P. Filzmoser and R. G. Garrett: Science of the Total Environment, 346(2005), 1-16.
- 9) C. Reimann and P. de Caritat: Science of the Total Environment, 578(2017), 633-648.
- 10) Republic of Serbia: Serbian official gazette 50, 1 (in Serbian). (2012). <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/uredba/2012/50/1/reg>.
- 11) A. M. Ure, P. H. Quevauviller, H. Muntau and B. Griepink: Int. J. Environ. Anal. Chem., 51(1993), 135-151.
- 12) R. A. Sutherland: Applied Geochem., 17(2002), 353-365.
- 13) S. A. Wakasa, T. Takeda, V. Marincovic and K. Hirose: Environ. Earth Sciences, 79(2020), 307-317.
- 14) Institute for Geological and Mining Exploration and Investigation of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Belgrade. (1970) SFR Yugoslavia, Geol. Map 1:500000. Beograd: National Gov. Pub., Federal Geol. Sur., p. 1.
- 15) G. Bird, P. A. Brewer, M. G. Macklin, M. Nikolova, T. Kostev, M. Mollov and C. Swain: Water, Air, & Soil Pollution, 206(2010), 105-127.