

特集「鉱物資源の持続的利用」

[解説]

持続可能な資源利用に向けた 衛星リモートセンシングによる土地改変モニタリング

佐久間 東陽^{1,*}, 山野 博哉², 中島 謙一³

1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科, 2 国立環境研究所 生物多様性領域,

3 国立環境研究所 資源循環領域

*連絡先: sakuma@c.kisarazu.ac.jp

概要：持続可能な開発目標（SDGs）の達成に向け実践と監視を推進している国際情勢において、鉱物資源の利用はとりわけ「目標 12：つくる責任、つかう責任」が強く求められており、公平かつ客観的なライフサイクルアセスメント（LCA）に基づく意思決定が重要になる。本稿では、広域かつ長期的な環境モニタリングにおいて有効な技術である衛星リモートセンシングの現状を整理するとともに、環境 LCA で用いられてきた土地改変強度の推定における衛星リモートセンシングの活用法について解説した。

キーワード：リモートセンシング、衛星画像、鉱山、土地改変強度、持続可能性

1. はじめに

人間活動は、自然界から資源を得て、道具（技術）によってこれに手を加えて様々な財・サービスを生産・供給するという生産活動と、財・サービスを購入・使用して満足を得るという消費活動の二面で成立している（井村 2009）。自然界から得られる鉱物資源は建物やインフラ、自動車、電子電気機器など、多種多様な用途において必須の材料であり、経済発展と深く結びついている（UNEP 2013）。その結果、代表的な鉱物資源（鉄・アルミニウム・銅・亜鉛・ニッケル）の需要は増大の一途をたどっており、今世紀中には2010年比の2–6倍に達する可能性が示唆されている（Watari et al. 2021）。その一方で、鉱物資源の採掘量に伴い環境負荷は増大し、温室効果ガスの排出、水利用、土地利用そして生物多様性などに影響を及ぼし続けている（IRP 2017）。さらに、2019年1月25日にブラジル・ブルマジーニョ尾鉱ダム決壊事故に代表されるように（Senra 2019）、近年頻発している鉱山の重大事故は、下流域に存在する人命および財産を一瞬にして奪うとともに、汚染水によって広域な土地の自然環境を著しく悪化させ、生態系サービスの低下を招いている。

鉱物資源の採掘および利用は共に空間的に偏在しており（SNL Metals & Mining 2015; JOGMEC 2017）、その地理的關係には大きな隔たりが存在するとともに、利用は日本を含む一部の経済的先進国に集中している（Nakajima et al. 2018; Nakajima et al. 2019）。それらのことから、鉱業に対する持続可能性への要求は、鉱業活動の影響を受ける地域社会や投資家など、様々なところからあがっている（UNEP 2020）。その際、持続可能な開発目標（SDGs; Sustainable Development Goals）は、鉱山会社の取り組

みを動機付ける重要な枠組みとして認識されており、特に「目標 12：責任ある消費と生産」の達成を推進させるべく、鉱山会社が環境的・社会的に責任ある方法で操業していることを示すよう促している（UNEP 2020）。

2. 採掘活動と地球環境の攪乱

「生物多様性条約（Convention on Biological Diversity; CBD）」は、生物多様性の保全と共に自然資源の「持続可能な利用」を明記した国際条約であり、1992年に開催された「環境と開発に関する国際連合会議（通称、地球サミット）」にて、持続可能な開発と地球環境の保全に関する「リオ宣言」と同時に採択された。CBDは「生物の多様性の保全、その構成要素の持続可能な利用及び遺伝資源の利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分」を実現することを目的とし、2020年には196の国と地域が締約している（Convention on Biological Diversity 2020a）。2010年に愛知県で開催された第10回締約国会議では、2050年までに「自然と共生する世界」を実現させるための2020年までの20の短期目標（すなわち愛知ターゲット）が定められた。しかし、2020年に報告された愛知ターゲットの最終評価文書「地球規模生物多様性概況第5版」（Convention on Biological Diversity 2020b）では、愛知ターゲット全体として達成状況は芳しくなく、2050年に向けて早急かつ更なる実践が強く求められている。そして特に、地表面のわずか10%未満しか存在していないが、世界の生物多様性の少なくとも50%を超える生物が生息している熱帯林生態系の保全においては（Myers 1988）、むしろ目標達成から遠ざかった現状にあると指摘している。したがって、熱帯林生態系における衰退の大きな要因である熱帯林の損失・劣

化・断片化の減少に、より一層取り組んでいく必要がある。

鉱物資源の採掘に伴う直接的な土地の利用は、生態系の喪失、生態系の劣化や断片化など、多種多様な負の影響と密接に関連している (Maus 2020)。Curtis et al. (2018) は2001年から2015年の間に起きた世界の森林損失の27%が農業・鉱業・エネルギーインフラによるものであったと報告している。歴史的に農業や林業に起因する土地改変と比較して、鉱業由来の土地改変規模は大きくない (Miranda et al. 2003)。しかし、鉱物資源の採掘活動は、人口や財が集中分布している人間活動域から空間的に乖離した特に高い保全価値を有する人為的攪乱を受けていない熱帯の原生林で実施されており、その影響は無視できるものではないと考えられている (Dufan et al. 2013)。このような原生林の破壊は一般に不可逆的であるため、一度破壊してしまった生態系を本来の姿に戻すことは実質的に不可能である (Watson et al. 2018)。さらに鉱業は、生産物を運搬するための道路、採掘した鉱石を製錬する過程で生じる尾鉱を貯蔵・処理するためのダム、長期にわたる採掘・生産活動のための鉱業従事者の生活場造成といったインフラ整備により、実際の採掘領域に加え、その周辺環境においても継続的な環境悪化の脅威を与えている (Bebbington et al. 2018)。

土地改変領域の分布把握は採掘に付随する環境影響を理解し、緩和策を講じるための重要な指標である (Werner et al. 2020)。このような指標は、鉱区を空間的に制限することで生物多様性と生態系サービスへの鉱業に付随する影響を抑制することができるため、SDGsの実践と監視を支援する (Maus 2020)。国の地質サービスや鉱業協会等によって世界の鉱業セクターに関するデータベースは定期的に更新されているものの、これらのデータベースは土地利用やその他の環境側面ではなく、主に鉱物資源の生産に焦点が当てられている (Maus 2020)。例えば、SNL Metals & Mining (2015) では鉱物資源毎の生産量および鉱区の凡その位置が含まれているが、地理空間的な範囲を知る

ことはできない。従って、現状のデータソースのみでは、世界の採掘活動における直接的に利用された土地の改変面積を報告しておらず、採掘に関する環境への影響を、空間的そして時間的に評価することは困難である (Maus 2020; Werner et al. 2020)。

Maus et al. (2020) は、採掘活動が及ぼす環境影響の时空評価の実現を目指し、衛星画像の目視判読によって全球にわたる採掘領域の新たなデータセットを整備した。また、Werner et al. (2020) も鉱山の操業特性に関する詳細な年次データを衛星画像の目視判読によって同様のデータセットを整備し、さらに回帰分析によって鉱山の土地改変面積が主に鉱物資源の累積生産量で説明可能なことを示した (サンプルサイズ = 87、交差検証済み $R^2 = 0.73$)。この結果は、鉱山の開発計画によって想定される鉱物資源の総生産量に基づいて、将来の土地改変面積を合理的に推定できることを示唆している。一方、ニューカレドニアの6つのラテライト型ニッケル鉱山を対象としたIwatsuki et al. (2018) の研究では、衛星画像解析によって推定された土地改変強度が、各鉱山の異なる操業段階に応じて最大で10倍程度の差を有するという、鉱山毎に土地改変強度が大きく異なる結果を示した。このことは、単一の代表的なデータに依存することの危険性を訴え、鉱山毎に固有の土地改変面積の変化を定期的に監視することの重要性を示唆している。

3. 衛星リモートセンシングを用いた鉱物資源採掘に伴う土地改変量の推定

3.1 衛星リモートセンシングの概要

衛星リモートセンシングによる地球観測の歴史は、1972年に米国のERTS (後にLandsat-1号と改称) の打ち上げに始まった。それまでは主たる目的が軍事利用であった衛星画像を、全世界に対して原則的に有償公開したことにより、衛星リモートセンシングの民生利用が始まった。図1には、

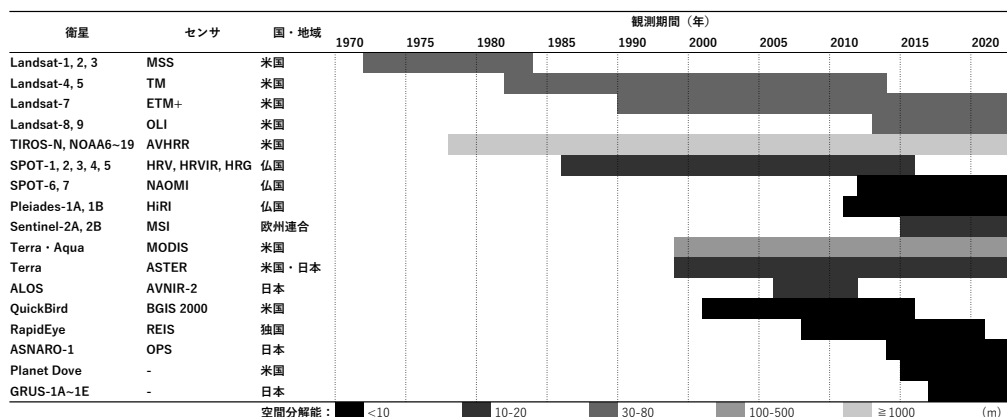


図1 代表的な陸域観測衛星の観測期間および空間分解能

鉱山の監視に一般的に用いられている可視・近赤外センサを搭載した代表的な地球観測衛星の運用期間と空間分解能を示した。Landsat衛星はその後、3号まではMSSセンサ（空間分解能＝80 m）を搭載して観測し、4号から現在の最新機である9号までは観測バンドの追加やセンサの品質向上はあるものの、搭載されたTM・ETM+・OLI・OLI2センサが空間分解能30 mでの一貫した観測を今なお続けている。この半世紀にわたってほぼ一貫した全球の地表面の様子をアーカイブしてきた衛星画像は、地球規模での科学研究や政策立案の客観的なエビデンスとしての地位を確立した。また2000年代には各国の民間企業が地球観測衛星の開発・運用に参入し、従来の政府主導で開発された大規模人工衛星に搭載された多種センサによる観測から、高空間分解能観測（数十センチメートルから数十メートル）に特化した人工衛星およびセンサによる観測が始まった。この時代、商業目的とした民間の地球観測衛星はもとより、政府系の衛星においても高空間分解能衛星画像は元来高価なものであり、衛星リモートセンシング活用の敷居は高かったと言える。しかし、2008年に米国地質調査所からインターネット経由で、これまで撮影し蓄積されてきたLandsat画像に無料で入手できるように移行していった。そして2013年に打ち上げられたLandsat-8号からは、運用開始とともに撮影された準リアルタイムの衛星画像の無償公開し、現在では政府系が運用している多くの人工衛星で観測されたデータが、原則誰でも無償で利用可能な状況にある（3.2参照）。

人間による生産活動と生態系の関係を理解し、効果的な保全策を立てる上でモニタリングは欠かせない。しかし、現在の人間活動域の拡大によって環境問題の概観を捉えるための空間的範囲は途轍もなく大きく、現地調査を基本としたモニタリング法では、その時空間的変動を伴う現象を完全に把握することは実質的に不可能になっている。また、

生物多様性が豊富な地域は人の出入りが困難な場所であり、現地調査の実施をより一層難しいものとしている。そのような中、人工衛星を用いた宇宙からの観測（すなわち衛星リモートセンシング）は、対象物に触れることなく物質の種類や状態を把握できる技術であり、地表面の時空間変化モニタリング、特に広域の長期モニタリングにおいては唯一無二の手段である。さらに、デジタルデータに基づく衛星画像を用いた評価法の開発は、評価の透明性を担保し、意思決定者に客観的なエビデンスの提示が可能である。

衛星リモートセンシングを用いた環境モニタリングにおいては、第一にモニタリング対象の特性に応じて、どの程度の空間分解能と時間分解能のデータを選択するかが肝心である。空間分解能とは認識可能な最小の地物の大きさを示すもので、これは一般に1画素の大きさに相当する。一方で時間分解能とは、同一地点における衛星の観測頻度のことである。空間分解能は概ね人工衛星の高度によって決定され、低高度で周回するほど空間分解能は向上する。その反面、地表面を接写することによって観測幅が狭くなり、それに伴い時間分解能は低下する。このように空間分解能と時間分解能は一般にトレードオフの関係であることに留意する必要がある。図2にはニューカレドニアのニッケル鉱山を例に、異なる空間分解能による鉱山区内の地物の視認能力の違いを示している。空間分解能が10 m以下の場合、鉱山内の地物が明瞭に認識することが可能である。また、空間分解能30 mであれば、採掘に伴う土地改変面積の推定に用いることが十分に可能であるように見える一方で、空間分解能が250 m以上になると採掘領域と非採掘領域の境界が不明瞭になり、土地改変領域と非土地改変領域の識別が困難であることがわかる。なお、採掘活動に伴う鉱山の環境影響評価を監視する際の時間分解能は年単位で良いと考えられる。これは、鉱物資源生産量の統計データの時間分解能が一般的に年単位であることが根拠である。

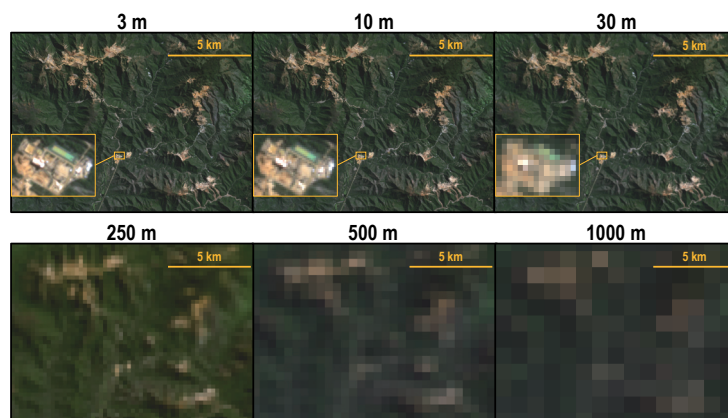


図2 衛星画像の異なる空間分解能による鉱山の見え方の違い（10, 30, 500, 1000 mの画像については、Planet Dove衛星画像（空間分解能3 m）を用いてBilinear法に基づくシミュレーション画像）

近年の地球観測衛星システムの顕著な進展としては、米国Planet社のDove衛星や日本AXELSPACE社のGRUS衛星に代表されるような、同一センサを搭載した小型衛星を多数宇宙空間に打ち上げて構築される大規模な衛星コンステレーションが、空間分解能と時間分解能を両立したシステムとして実用化されている（すなわち、数メートルの空間分解能の衛星画像が同一地点をほぼ毎日観測可能）。

3.2 単位面積当たりの土地改変量の推定

鉱物資源の採掘におけるライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）では、鉱石の単位当たりの土地改変面積に単位面積当たりの生態系への影響を乗ずることによって評価することが可能である（Tang et al. 2016）。従って、鉱物資源の採掘に伴う鉱山のLCAにおける衛星リモートセンシングの重要な貢献の一つは、土地改変面積を定期的かつ正確に推定することである。採掘による土地改変面積推定の衛星リモートセンシングを用いた初期の取り組みは、Landsat-1/MSS衛星画像（空間分解能=80 m）を用いた露天掘り鉱山の採掘領域の推定である。Anderson et al. (1977) は、大規模な露天掘り鉱山（>約0.5 km²）に対して、MSSセンサで観測された赤と近赤外バンドの衛星画像を用いて、高精度に推定できると結論付けた。1982年のTMセンサ（空間分解能=30 m）を搭載したLandsat-4号の打ち上げの結果、Irons & Lennard (1984) は空間分解能の向上により、鉱山域における土地利用土地被覆分類精度がMSSセンサと比較して17.8%向上することを報告した。

Iwatsuki et al. (2018) はニューカレドニアのニッケル鉱山において、複数の地球観測衛星（SPOT/HRVとTerra/ASTER）で観測された赤バンドの衛星画像と、鉱山の操業データに報告されている鉱物資源生産量を用いて、式（1）に示す土地改変強度（単位鉱物資源当たりの土地改変面積）を鉱山毎に推定し、鉱山毎の土地改変強度の違いを議論することを可能にした。

$$\text{土地改変強度}(\text{m}^2/\text{t}) = \frac{\text{任意の期間における土地改変面積}(\text{m}^2)}{\text{任意の期間における鉱物資源生産量}(\text{t})} \quad (1)$$

Iwatsuki et al. (2018) が土地改変面積推定のために用いた衛星画像解析方法は、解析領域内の画素を2つのカテゴリー（つまりは採掘領域および非採掘領域）に分類するための自動閾値選定法の一つである大津の判別分析法（Otsu 1979）を適用している。これは、将来的な時空間範囲の拡張を視野に入れ、解析の自動化が可能なアルゴリズムとなっている。

一方でIwatsuki et al. (2018) は単時期毎の衛星画像を解析に使用していることから、解析領域内の雲被覆の影響

により、解析時期に大きな制約を受けた。特に画像選定における人的資源の負担は大きく、解析範囲を拡張する妨げになることから極力避けるべき事柄である。そこで、筆者らはLandsat衛星の年間最大NDVI合成法と自動閾値選定法を組み合わせた年毎の採掘領域時系列推定法を開発した（佐久間ら 2020）。NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) とは植生の活性度を示す指標であり、式（2）で算出される。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (2)$$

ここで、 ρ_{Red} と ρ_{NIR} はそれぞれ赤と近赤外の反射率であり、-1~1の値域をとる。NDVI値の解釈は多くの知見が集積されており、例えばChen et al. (2006) では植生域では0.2以上、裸地域では0.2未満、水域では0.0未満のNDVI値を示すと報告している。同一鉱山において年間に複数枚（通常22枚程度）のNDVI画像が得られるが、これらを最大値合成することによって雲による地表面観測の欠損画素を抑制するとともに、種や環境条件、さらには人為的操作に起因して時間的に変化する植生活性度の空間的なばらつきをも抑制し、非採掘領域である植生域と採掘領域である裸地域のNDVI値の差異を明瞭にする効果が期待できる。また、前述した解析に使用する画像選定の手間を省くことができる。しかし、その一方で全球の鉱山における時空間変化の監視は膨大な枚数の衛星画像を要してしまい、それらの解析には大容量ストレージと高性能計算機が要求される。

近年、衛星観測データをクラウドベースでデータ提供・分析・可視化可能なプラットフォームのサービスが始まり、全球における時系列衛星画像の解析がとても容易になった。例えば、Google社が提供する衛星画像の地理空間分析プラットフォームであるGoogle Earth Engine (GEE) は、従来の衛星観測データの解析に要求されていた膨大な衛星観測データのダウンロードおよびそのデータを解析するための高性能計算機や解析ソフトウェアを必要とせず、世界中の宇宙・研究機関が整備した膨大かつ多種多様な衛星観測データを一括して扱うことが可能である。Gorelick et al. (2017) によるGEEの概要を紹介した記事は、リモートセンシング分野の代表的な国際誌であるRemote Sensing of Environmentにおいて最もダウンロードされた記事の一つに選出されるなど現在大きな注目を集めている。GEEを利用するためにはまずgoogleアカウントを取得し、GEEサイト (<https://earthengine.google.com>) から利用申請を実施する必要がある。このとき、開発・研究・教育目的である場合は無償での利用が可能である。GEEのCode Editorを用いたデータ処理においてはJavaScript言

語を使用するのが基本であるが、現在ではPythonやRのプログラミング開発環境からデータの検索・処理することも可能である。我々もGoogle社が提供する衛星画像の地理空間分析プラットフォームであるGoogle Earth Engine (GEE) を用いることにより、植生帯および農地帯に位置するニッケル鉱山の採掘領域の時空間変化モニタリングを実現した(図3)。そして、Iwatsuki et al. (2018) と同様に、鉱山の操業データを組み合わせることにより、鉱山毎に任意の期間における土地改変強度の推定を可能とした。

3.3 低空間分解能衛星画像を用いた採掘領域面積率の推定

熱帯域における光学衛星を用いた観測は、地域特有の気候帯の特徴である高頻度な雲被覆により、地表面の観測が妨げられることが多々発生する。そのため、要求される時間分解能および精度での土地改変強度の推定が困難になる場合がある。そこで、筆者らはほぼ毎日観測可能な低空間分解能衛星画像を用いた土地改変面積の推定法の開発に取り組んだ(佐久間ら 2019)。図2に示すように、空間分解能500 mの衛星画像は、1つの画素内に複数の土地被覆カテゴリが混在するミクセル状態である。そのため、3.2で述べた閾値判別法を適用した画素毎の分類に基づく面積推定法では、適切な解析結果を得ることは困難である。そこで式(3)に示すように、低空間分解能衛星画像の画素値(つまりは反射率)を各カテゴリ(ここでは採掘領域と非採掘領域)で代表される反射率とその面積率によって

表現される線形混合モデルを仮定し(稲村 1987)、画素毎のカテゴリ面積率を推定するミクセル分解法を適用した。

$$p = \sum_{j=1}^k a_j r_j + \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 p は衛星画像の一画素の反射率、 k はカテゴリ数、 a と r はそれぞれ一画素内で各カテゴリが占有している面積率と代表するカテゴリ反射率、 ε は誤差項である。面積率は合計で1になるため、ここで示した2つのカテゴリの場合では、最低1つの波長帯もしくは指標の画像(例えば、赤バンドやNDVI)を用いることにより、線形計画法に基づき目的関数 ε を最小にするときの各カテゴリの面積率を推定することが可能である。図4にはニューカレドニアのニッケル鉱山に対して、ミクセル分解法を適用した採掘領域の面積率推定結果の一例を示した。

4. おわりに

本稿において、鉱物資源採掘のLCAにおいて、特に鉱物資源の採掘に伴う土地改変面積の衛星リモートセンシングを用いた推定について述べてきた。現在、空間分解能10～30 m程度の衛星画像が準リアルタイムで無償公開されており、その解析にエンドユーザー側で高性能な計算機を用意する必要がなくなっていることから、衛星リモートセンシングを用いた鉱物資源採掘のLCAの導入がより一層進んでいくことが期待される。

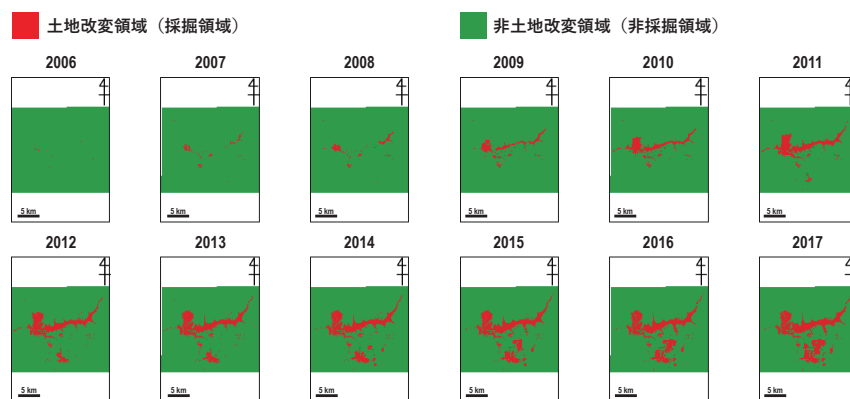


図3 Landsat衛星画像を用いた2006年から2017年にわたる採掘領域の時空間変化推定結果の一例

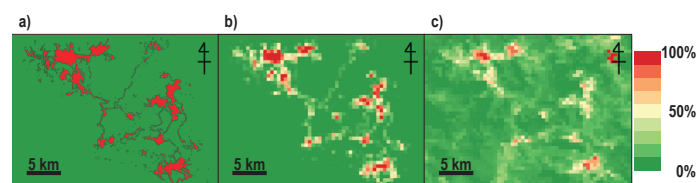


図4 Terra/MODIS衛星画像(空間分解能=500 m)を用いた線形混合分解法を適用した採掘領域面積率推定の一例(a)採掘領域ポリゴン、b)検証用の採掘領域の面積率、c)推定された採掘領域の面積率)。

将来の期待として、全球における鉱物資源のサプライチェーンの管理には、現状における植生・農地帯のみに適用可能な土地改変量推定法では対処することはできない。そのため、植生が疎な裸地域の鉱山も含めた推定手法に改良する必要がある。また、鉱山における開発・生産過程を詳細に理解するためには、鉱山における構成要素（尾鉱ダムなど）の細分類が必要である。このような分類法の改良には、衛星画像への応用が現在急速に進展しているAI（例えば、畳み込みニューラルネットワーク）を用いた物体認識によって解決できる可能性がある。さらには、地域が持つ環境資源によって保全の重要度は異なるため、本稿で述べてきた土地改変面積のみに基づく土地改変強度を用いた評価および議論では不十分である。これらの対処として、地理情報システム（Geographic Information System: GIS）を用いて衛星画像で推定した採掘領域と生物多様性や生態系サービスを表現したマップを重ね合わせることで、その損失を見積もることが可能になると考えられる。GISを用いた分析においては、本稿で扱った環境LCAのみならず、社会・経済的なインベントリ情報を表現したマップも重ね合わせることで社会LCAを評価することが可能になると期待される。将来的に更なる宇宙開発事業の拡大が計画されている現代および近未来において、それに伴う衛星リモートセンシングの進展は、その鳥瞰的な視点から採掘や都市化などによる生態系への影響の俯瞰的、且つ、網羅的な把握を支援する可能性を秘めており、LCAによる環境・社会影響の議論を支援していくであろう。

(2022年8月6日受付)

謝辞

本研究の一部は、科研費（18KT0010, 22K18433）の助成による。

参考文献

- Anderson A. T., Schultz D., Buchman N., Nock H. M. (1977): Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43 (8), 1027-1036
- Bebbington A. J., Bebbington D. H., Sauls L.A. et al. (2018): Proceedings of the National Academy of Sciences, 115 (52), 13164-13173
- Chen X. L., Zhao H. M., Li P. X., Yin Z. Y. (2006): Remote sensing of environment, 104 (2), 133-146
- Conservation on Biological Diversity (2020a), List of parties, Conservation on Biological Diversityホームページ, 入手先 <<https://www.cbd.int/information/parties.shtml>>, (参照 2022-07-11)
- Conservation on Biological Diversity (2020b), Global biodiversity outlook 5, Conservation on Biological Diversityホームページ, 入手先 <<https://www.cbd.int/gbo5>>, (参照 2022-07-11)
- Curtis P. G., Slay C. M., Harris N. L., Tyukavina A., Hansen M. C. (2018): Science, 361 (6407), 1108-1111
- Duřan A. P., Rauch J., Gaston K. J. (2013). Biological Conservation, 160, 272-278
- Gorelick N., Matt H., Mike D., Simon L., David T., Rebecca M. (2017): Remote sensing of Environment, 202, 18-27
- 稲村 實 (1987): 電子情報通信学会誌, 70C (2), 241-250
- 井村 秀文 (2009): 日本LCA学会誌, 5 (1), 2-11
- IRP(International Resource Panel) (2017), Assessing Global Resource Use, IRPホームページ, 入手先 <<https://www.resourcepanel.org/reports/assessing-global-resource-use>>, (参照 2022-07-11)
- Iwatsuki Y., Nakajima K., Yamano H., Otsuki A., Murakami S. (2018): Resources, Conservation and Recycling, 134, 361-366
- JOGMEC(Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) (2017): 鉱物資源マテリアルフロー 2017 9. ニッケル (Ni), JOGMECホームページ, 入手先 <http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2018/03/material_flow2017_Ni.pdf>, (参照 2022-07-14)
- Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., da Silva D. M., Probst M., Gass S. L. B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I. (2020): Scientific data, 7 (1), 1-13
- Miranda M., Burris P., Bingchang J.F., Shearman P., Briones J.O., La Vina A., Menard S. (2003): Mining and Critical Ecosystems: Mapping the Risks, World Resources Institute, Washington, DC, USA, 58pp.
- Myers N. (1988): Biodiversity, 1, 28-35
- Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2018): Resources, Conservation and Recycling, 133, 369-374
- Nakajima K., Noda S., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M. (2019): Environmental Science & Technology, 53, 1555-1563
- Otsu N. (1979): IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9 (1), 62-66検索
- 佐久間東陽, 山野博哉, 中島謙一 (2019): 日本リモートセンシング学会第66回 (令和元年度春季) 学術講演会, 埼玉
- 佐久間東陽, 山野博哉, 中島謙一 (2020): 日本リモートセンシング学会誌, 40 (5), 271-274
- Senra R. (2019): Brazil's dam disaster, BBC News, BBC

- ホームページ, 入手先 <https://www.bbc.co.uk/news/resources/idx-sh/brazil_dam_disaster>, (参照 2022-07-11)
- SNL Metals & Mining (2015): Raw Materials Data. 入手先 <<http://www.intierrarmg.com/Products/Raw-Materials-Data.aspx>>, (参照 2015-02-02)
- Tang L., Nakajima K., Murakami S., Itsubo N., Matsuda T. (2016): The International Journal of Life Cycle Assessment, 21 (1), 51-59
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2013): Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, IRPホームページ, 入手先 <<https://www.resourcepanel.org/reports/environmental-risks-and-challenges-anthropogenic-metals-flows-and-cycles>>, (参照 2022-07-11)
- UNEP (2020): Sustainability Reporting in the Mining Sector, UNEPホームページ, 入手先 <<https://www.unep.org/resources/report/sustainability-reporting-mining-sector>>, (参照 2022-07-11)
- Watari T., Nansai K., Nakajima K. (2021): Resources, Conservation and Recycling, 164, 105107
- Watson J. E. M., Evans T., Venter O., Williams B., Tulloch A., Stewart C., Thompson I., Ray J.C., Murray K., Salazar A., McAlpine C., Potapov P., Walston J., Robinson J., Painter M., Wilkie D., Filardi C., Laurance W.F., Houghton R.A., Maxwell S., Grantham H., Samper C., Wang S., Laestadius L., Runtting R.K., Silva-Chávez G.A., Ervin J., Lindenmayer D. (2018): Nature Ecology & Evolution, 2, 599-610
- Werner T. T., Mudd G. M., Schipper A. M., Huijbregts M. A., Taneja L., Northey S. A. (2020): Global Environmental Change, 60, 102007

[Commentary and Discussion]

Monitoring of Land Use Change Using Satellite Remote Sensing for Sustainable Resource Management

Asahi SAKUMA^{1,*}, Hiroya YAMANO² and Kenichi NAKAJIMA³

1 Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Kisarazu College;

2 Biodiversity Division, National Institute for Environmental Studies;

3 Material Cycles Division, National Institute for Environmental Studies

*Corresponding author: sakuma@c.kisarazu.ac.jp

Synopsis: In the international situation, where implementation and monitoring are being promoted to achieve the Sustainability Development Goals, "Goal 12: Responsible consumption and production" is particularly important for the use of mineral resources, and decision-making based on fair and objective Life Cycle Assessment (LCA) is essential. This paper summarizes the current status of satellite remote sensing, which is an effective technology for widespread area and long-term environmental monitoring and explains how satellite remote sensing can be used to estimate the land use change intensity, which has been used in environmental LCA.

Keywords: remote sensing; satellite imagery; mining area; land use change intensity; sustainability