特集「第11回日本LCA学会研究発表会からの投稿」

研究論文(Research Article)

責任あるサプライチェーンの実現に向けた
ニッケル資源利用に関わるリスク要因の整理と解析佐々木 翔^{1,*}・松八重 一代²・中島 謙一³・村上 進亮⁴・長坂 徹也¹

Frameworking of Risk Factors about Nickel Resource Use for Advancing Responsible Supply Chain

Sho SASAKI^{1,*}, Kazuyo MATSUBAE², Kenichi NAKAJIMA³, Shinsuke MURAKAMI⁴ and Tetsuya NAGASAKA¹

Synopsis:

Objective. Supply and demand trends for mineral resources are changing rapidly due to economic growth in emerging nations and technological innovation in industrialized nations. There is a wide range of direct and indirect impediments that pose potential risks to mineral resource supply chains. These factors include stoppage of mining operations due to strikes, interruption of transport routes due to natural disasters, and policies prohibiting ore exports due to resource nationalism. Strategic management of resources based on these direct and indirect risk factors inherent to supply chains has become an important issue. In this study, the following analyses were performed for the purpose of presenting measures to prevent adverse impacts on mineral resource supply: (1) framework design to comprehensively and broadly capture a variety of risk factors influencing the supply chain, using nickel as a case study; (2) factor analysis to analyze numerous examples of supply impediments with the number of incidents and environmental risk factors as one index; land area modified by ore extraction and geopolitical factors as one index; and a quantitative analysis of the degree of the concentration of ore production.

Results and Discussion. The five categories (Economic, Environmental, Geopolitical, Societal, and Technological) were subdivided by factor into 31 subcategories. It became clear that there were some risk factors for which obtaining data was difficult. A collection of risk events of nickel resource supply impediments confirmed countries regions, and risk factors for which cases data was difficult to obtain. Analysis of land area transformation by nickel resource extraction showed that land modification is increasing with increasing ore extraction in resource producing countries. Estimates of the degree of concentration of nickel ore production for specific mines found that, in certain countries/regions, production was concentrated in specific mines.

Conclusions. To prevent impediments to mineral resource supply, the following conclusions were determined from our analysis:

- It is necessary to pay attention to risk factors that have been difficult to identify until now.
- It is important to consider relationships between communities and specific mines or smelters, and to evaluate potential environmental issues related to land transformation.
- Finally, it is important to plan for dispersion of risk by dispersing supply. When advancing supply from expensive countries with high mineral concentrations, it is necessary to preempt potential failures in the supply chain, including storage, by putting advanced countermeasures in place.

Keywords: Material flow; nickel; supply chain risk; sustainable development

1 東北大学大学院 工学研究科 / 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02

2 東北大学大学院 環境科学研究科 / 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1

3 国立研究開発法人 国立環境研究所 / 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

4 東京大学大学院 工学系研究科 / 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

1 Graduate School of Engineering, Tohoku University / 6-6-02 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0855

2 Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University / 468-1 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0845

3 National Institute for Environmental Studies / 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

4 Graduate School of Engineering, University of Tokyo / 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

* 連絡先 (Corresponding author), sho.sasaki.r4@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒論

新興国の経済成長や先進国における技術革新に伴い、鉱物資源の需給動向は大きく変化している。近年の新興国の経済成長に伴い、鉱物資源需要の更なる拡大が予想される¹⁾だけではなく、先進国における低炭素技術の導入に伴い、鉱物資源需給は大きく変化することが予想されている²⁾。しかしながら、鉱物資源のサプライチェーンの背後には、ストライキ発生による鉱山の操業停止や、自然災害による輸送ルートの寸断、資源ナショナリズムによる鉱石輸出禁止政策など、鉱物資源の供給障害の直接的・間接的な要因となり得る様々なリスク要因が潜在している³⁾。他方、サプライチェーンのグローバル化に伴い、人権、労働、環境、腐敗に関連する社会問題が顕在化してきたことから、CSR (Corporate Social Responsibility)⁴⁾や持続可能な開発⁵⁾に対する関心が高まっている。これらの社会問題は、企業の経済活動へ大きな影響を与えるだけではなく、ストライキの発生や環境規制等の鉱物資源供給のリスク要因へと発展する可能性も有しているため、持続可能な資源調達のためには無視することのできない問題である。とりわけ、日本においては、産業競争力の源泉が、鉱物資源を原料とした次世代自動車、ネオジム磁石等の世界で大きなシェアを持つ製品である⁶⁾。しかしながら、その原料となる鉱物資源を供給するための有望な鉱山は日本国内にはほとんどなく、鉱物資源の調達は、もっぱら海外からの供給に依存している。そのため、サプライチェーンに内在する直接的あるいは間接的に供給制約となり得るリスク要因を踏まえた戦略的な資源管理が重要な課題となっている。

資源を含めた資源の流れの同定については、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) の研究により、経済活動に関わる物質の流れを、サプライチェーン全体で定量化し、物質の流れを戦略的に管理することを目指した研究^{7,8)}が精力的に実施されている。一方、リスク要因の解析においては、サプライチェーンリスクを整理した事例として、パンデミック^{脚注1)}や大量破壊兵器の保持などグローバル規模リスク要因に特化した抽出^{9,10)}や、生産管理や知的財産権などビジネス向けのリスク要因に特化した抽出¹¹⁻¹⁴⁾などがある。また、Graedelら¹⁵⁾は、62種類の金属元素を対象に、それぞれの鉱種別に供給リスクの解析を行っている。しかしながら、前者⁹⁻¹⁴⁾については、対象とするリスク要因が特定のリスク要因に特化している事、後者¹⁵⁾については、鉱種別のリスク要因の解析は進んでいるものの国・地域別あるいは個別の鉱山などに関する議論までは至っていない。

そこで本研究では、鉱物資源のサプライチェーンの背後に潜在する多種多様なリスク要因の広範な抽出及び体系的な整理を行うとともに、ニッケルを事例としてサプライ

チェーンの上流部分である採掘・製錬に着目し、ニッケル資源生産国別のリスク要因を定量的に解析することで、鉱物資源供給への影響を未然に防ぐための対応策を示すことを目的とする。ニッケルは、ステンレス鋼やニッケル水素電池などを始めとする多岐に渡る用途があり、更なる需要拡大が予想される鉱物資源の1つである。また、採掘や製錬に伴い、生物多様性への影響¹⁶⁾や自然保護区との重複や近接¹⁷⁾、採掘に伴う土地改変¹⁸⁾など様々な地球環境問題が報告されているため、戦略的かつ責任ある資源管理が緊要となっている。物理的な供給寸断リスクのみならず、資源利用に伴う環境・社会的な責任の観点からの調達リスクも考慮すべき素材であることから、本研究における広範なリスク要因解析の対象素材として選択した。

2. 方法

サプライチェーンに内在するリスク要因としては、WORLD ECONOMIC FORUM¹⁰⁾が採用している5つの分類 (経済、環境、地政、社会、技術) を基本の枠組みとして、より細かな分類については、サプライチェーンリスクに関する既存の議論の定義⁹⁻¹⁴⁾、CSR調達の原則⁴⁾や持続可能な開発のための行動計画⁵⁾を網羅するように、更には、既に個別のリスク要因として顕在化している供給障害事例など^{3,19)}を包含できるように整理を行った。これにより、企業や国家が安定的かつ持続可能な資源供給・調達を行うための鉱物資源のサプライチェーンの背後に潜在するリスク要因のチェックリストを整備する。

更に、ニッケルを事例に取り上げて、総合的なリスク要因の指標として (1) 供給障害に関わる事例件数を取り上げて要因別の発生件数についての解析を行うと共に、環境に関わるリスク要因の指標の1つとして (2) 鉱山の採掘に伴う土地改変面積、そして、地政学的なリスク要因の指標の1つとして (3) 鉱石生産の集中度を取り上げて定量的な解析を実施した。これにより、資源国の供給リスクを明らかにすることで、鉱物資源供給への影響を未然に防ぐための対応策を示すことを目的とする。

はじめに、ニッケル資源の供給障害に関わる事例抽出については、鉱物資源の供給障害に関する事例を扱うWebニュース¹⁹⁾やレポート³⁾を参考に、1967年から2016年までの事例を収集した。本研究では、要因ごとにキーワードを設定して検索を実施して、顕在化している供給障害等の事例を収集した。なお、要因ごとのキーワードについては、Appendixに示した。

脚注1) ある感染症や伝染病が世界的に流行し、著しい感染や死亡被害が発生するような事態。

次に、国・地域ごとのニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積の推計を実施した。推計は、既存研究^{20, 21)}を参考に、ニッケル鉱石の採掘に伴う土地利用強度 (Land use intensity, $\text{m}^2 / \text{t-Ni in ore}$) に各年の鉱石採掘量を乗じて推計を行った。ここで、ニッケル鉱石の採掘に伴う土地利用強度とは、単位ニッケル量を含むニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積とする。鉱石採掘量については、Raw materials data (RMD) から得られる2005年および2011年の鉱石生産量を用いた。土地利用強度について、ニッケル協会が実施した調査²⁰⁾では、2種類の採掘方法 (露天掘り: Open Pit Mining (OP), 坑内掘り: Underground Mining (UG)) について、資源採掘活動に伴う土地改変面積を公表している。一方、Tangら²¹⁾は、前述の採掘方法に加えて、鉱石の種類 (硫化鉱 (Sulfide), 酸化鉱 (Laterite)), 更には、鉱石品位や剥土比などを考慮することで、鉱山毎に、資源採掘に伴う土地改変面積を推計している。また、Tangらの推計では、38の鉱山を対象とした解析結果をもとに、採掘方法や鉱石種類に加えて、鉱石品位により、資源採掘に伴う土地利用強度が大きく異なる可能性を示している。そこで、本研究では、Tangら²¹⁾の推計手法および推計結果を用いて、鉱山ごとのニッケル鉱石の採掘に伴う土地利用強度を設定した。なお、Tangらの推計手法では、鉱山毎に様々なパラメータを必要とするため、推計可能な鉱山は、操業状況などが公表されている鉱山に限定される。このため剥土比などの必要なパラメータが得られない鉱山については、Tangら²¹⁾の推計結果に基づいて相関式を

作成し土地利用強度を設定した。相関式を式 (1), (2), (3) に、各相関式の相関関係を Figure 1 に示す。

$$\text{OP} : \ln L = -1.66 \ln a + 1.30 \quad (R^2 = 0.58) \quad (1)$$

$$\text{SU} : \ln L = -0.81 \ln a - 2.20 \quad (R^2 = 0.35) \quad (2)$$

$$\text{SO} : \ln L = -1.61 \ln a + 1.58 \quad (R^2 = 0.87) \quad (3)$$

ここで、 L はニッケル鉱石の採掘に伴う土地利用強度 (Land use intensity, $\text{m}^2 / \text{t-Ni in ore}$)、 a はニッケル鉱石品位 (%), SU は硫化鉱 (Sulfide) で坑内掘り (Underground) の鉱山を、 SO は硫化鉱 (Sulfide) で露天掘り (Open Pit) の鉱山を示す。相関式の決定係数 (R^2) については、採掘方法別ではOPが0.58、SUが0.35であった。OPを鉱種毎に分けた場合、SOの鉱山については0.87というより高い相関係数が得られたため、それらの鉱山については式 (3) を適用した。世界の各鉱山の採掘方法、鉱種、鉱石品位、ニッケル鉱石生産量については、RMD²²⁾ のものを用いた。採掘方法や鉱石品位が不明な鉱山については、それらの鉱山が属する国の中で土地改変量が既知である各鉱山の生産量によって加重平均した値を土地利用強度とした。

最後に、鉱石生産の集中度については、特定の国あるいは地域への集中度を把握するために、各国あるいは各地域における鉱山ごとの鉱石生産量をもとに、HHI (ハーフィンダール・ハーシュマン・インデックス) を用いて指標を作成して解析を実施した。推計式を式 (4) に示す。

$$(1) \text{ OP} : \ln L = -1.66 \ln a + 1.30 \quad (R^2 = 0.58)$$

$$(2) \text{ SU} : \ln L = -0.81 \ln a - 2.20 \quad (R^2 = 0.35)$$

$$(3) \text{ SO} : \ln L = -1.61 \ln a + 1.58 \quad (R^2 = 0.87)$$

Figure 1. Correlation between previous results and ore grade

$$HHI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{total}} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 P_i はA国の*i*番目の鉱山における鉱石生産量(kt-Ni)を、 P_{total} はA国全体のニッケル鉱石生産量(kt-Ni)を示している。ある国全体のニッケル鉱石生産量とその国内の全鉱山のニッケル鉱石生産量に差異がある場合、その差分を、鉱石生産量が不明ではあるが、操業状況がOperatingまたはActiveとなっている鉱山に均等分配することで計算した。各鉱山のニッケル鉱石生産量は土地改変量と同様にRMD²²⁾のデータを用いて推計した。

3. 結果

3.1 サプライチェーンリスクの背後のリスク要因の類型化

サプライチェーンの背後に潜在する様々なリスク要因の抽出結果と、収集されたニッケル資源の供給障害に関わる事例件数、更に既存のサプライチェーンリスクを整理した議論との対応関係をTable 1に示す。

上述の5つの分類（経済、環境、地政、社会、技術）を要因別に31分類に細分化した。その結果、既存のサプライチェーンリスクにおける議論⁹⁻¹⁴⁾にて共通して焦点があてられている要因（ストライキ、自然災害、テロなど）の他に、グローバル規模のリスク要因の把握と管理を目的

Table 1. Organization of proposed risk factors and correspondence to prior discussions

No.	Categories	Subcategories	Correspondence to prior discussions					
			Global scale risk factors		Risk factors for business and corporate			
			Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5	Ref. 6
1	Economic	Strikes		✓	✓	✓	✓	✓
2		Volatility	✓	✓	✓		✓	✓
3		Energy/Infrastructure shortage	✓	✓				
4		Disorder in an operating unit					✓	✓
5		Failure of raw material procurement			✓		✓	✓
6		Barrier to entry	✓					
7		Product management	✓				✓	
8		Intellectual property			✓	✓	✓	
9	Environmental	Pandemic	✓	✓				✓
10		Natural disaster	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11		Extreme weather	✓	✓				✓
12		Environmental impact		✓		✓		✓
13		Depletion		✓				
14	Geopolitical	Defect in transport	✓		✓	✓	✓	✓
15		Possession of weapons of mass destruction	✓	✓				
16		Terrorism	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17		Political instability	✓	✓	✓	✓		✓
18		Trade barrier	✓		✓	✓		✓
19		Bilateral relationship	✓	✓	✓	✓		✓
20		Shutdown based on the law			✓			✓
21	Societal	Social operating permit		✓	✓	✓		✓
22		Scarcity of food		✓				
23		Large-scale involuntary migration		✓				
24		Failure of urban planning		✓				
25		Gender discrimination						
26		Inadequate education						
27		Caught in another's dispute						✓
28	Technological	Misuse of technologies		✓				
29		Data security/IT incidents	✓	✓	✓		✓	✓
30		Accident/Breakdown of equipment			✓			✓
31		Risks of the press						

Ref. 1 : New Models for Addressing Supply Chain and Transport Risk⁹⁾

Ref. 2 : WORLD ECONOMIC FORUM Insight Report Global Risks 2015 10th Edition¹⁰⁾

Ref. 3 : INNOVATIVE APPROACHES TO SUPPLY CHAIN RISK¹¹⁾

Ref. 4 : bsi. Supply Chain Solutions¹²⁾

Ref. 5 : Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown¹³⁾

Ref. 6 : AGCS Managing disruptions¹⁴⁾

とした議論^{9, 10)}でのみ焦点をあてている要因（大量破壊兵器の所持、食料不足、テクノロジーの悪用など）やビジネスや企業戦略向けのリスク要因の把握と管理を目的とした議論¹¹⁻¹⁴⁾でのみ焦点があてられている要因（事業所の経営状態の混乱、知的財産権、設備の事故/故障など）が明らかとなった。更に、ジェンダー差別、不十分な教育、報道リスクについては、既存のいずれの議論⁹⁻¹⁴⁾においても焦点があてられていなかった事が明らかとなった。このうち、ジェンダーや教育に関する問題は、持続可能な開発の議論⁵⁾においても持続可能な開発目標として取り上げられている要因であり、注視が必要であると考えられる。

3.2 ニッケル資源の供給に関わる事例解析

3.2.1 鉱物資源の供給障害に関わる事例件数の解析

鉱物資源の供給障害に関する事例を扱うWebニュース¹⁹⁾やレポート³⁾を対象とした検索により、81件（経済：30件、環境：14件、地政：10件、社会：8件、技術：19件）の供給障害に関する事例を抽出した。収集した事例を発生国別にまとめた結果をFigure 2に示す。

Figure 2の国の表記は、文献²²⁻²⁵⁾から把握できた1969年から2014年までのニッケル鉱石の累積生産量の降順である。ここで、1969年から1983年までは鉱物資源データブック²³⁾、1984年から2013年まではRMD²²⁾及び世界の鉱業の趨勢²⁴⁾、2014年については世界の鉱業の趨勢²⁴⁾及びUnited States Geological Survey²⁵⁾からデータを引用した。なお、ドミニカ共和国（2014年）、ベネズエラ（1969年～1983年、2014年）、グアテマラ（1984年～2005年）、ザンビア（1969年～1983年）、ベトナム（1969年～2000年）については、鉱石生産量が把握できていないため含めていない。また、ロシアの1969年から1990年までの生産量については、ソビエト連邦のデータを引用した。

国別に見ると、カナダやオーストラリア、ニューカレドニア、インドネシアなど累積鉱石生産量が大きい国ほど収集された事例件数が多い傾向が見られた。一方で、ロシアやフィリピンなど累積生産量が大きいにも関わらず抽出された事例件数が極端に少ない国も見受けられた。また、リスク要因別に見た場合は、経済（30件）、技術（19件）、環境（14件）に該当する事例が多く抽出された。

累積生産量かつ事例件数が多い国は、以前から大規模な開発を行っている国^{22, 23)}である。一方、累積生産量が6位であるにも関わらず、事例件数が少なかったフィリピンについては、2006年から急激に生産量を伸ばしており²²⁾、大規模な開発を行っている期間が比較的短い。このことから、大規模な鉱石生産を行っている期間が長いほど事例件数が多くなると考えられる。

また、同様の情報源でニッケル以外の鉱種に関する事例件数を収集した結果、経済が111件、環境が68件、地政が59件、社会が37件、技術が26件であった。技術に関する事例は比較的少ないものの、経済、環境の事例件数が多くなっており、ニッケル資源の事例件数と類似した傾向を示すことがわかる。このことから、要因別の差異は情報源における事例抽出の傾向によるものであると考えられる。

3.2.2 ニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積

次に、既存研究^{20, 21)}を参考に、世界のニッケル資源生産国におけるニッケル鉱石採掘に伴う土地改変面積を推計した結果をFigure 3に示す。本研究の対象ではないが、将来的に産業連関分析を応用した手法を用いて、物質フロー・サプライチェーン情報に基づいた解析を行うことを想定して、ここでは産業連関表の対象年度である2005年及び2011年について解析を行った。

Figure 2. Number of risk event impediments to nickel resource supply by country and by risk factor

Figure 3. Land area transformed by nickel ore mining in (a) 2005 and (b) 2011

結果から、2005年と2011年のいずれにおいても、オーストラリアの土地改変面積が突出して大きいことが明らかとなった。また、2005年から2011年にかけて、フィンランド (5.3倍)、フィリピン (12.5倍)、ブラジル (2.4倍)、インドネシア (1.7倍) の土地改変面積が大きく増大していることが明らかとなった。さらに、2005年と2011年のいずれにおいても、露天掘り (OP) による土地改変が支配的であることが明らかになった。

オーストラリアのニッケル鉱石生産量を見ると、2005年はロシア、カナダに継いで3位、2011年はフィリピン、ロシア、カナダ、インドネシアに継いで5位²²⁾であり、生産量が突出して大きいわけではないことがわかる。故に、オーストラリアの改変面積の突出は、オーストラリアの鉱山の剥土比が大きい²¹⁾ことに起因していると考えられる。

次に、2005年から2011年にかけて、一部の国の土地改変面積が増大した理由について考える。それぞれのニッケル鉱石生産量が増加した (フィンランド: 5.6倍、フィリピン: 12倍、ブラジル: 2.1倍、インドネシア: 1.6倍)²²⁾ことに起因していると考えられる。

最後に、2005年と2011年のいずれにおいてもOPによる土地改変が支配的であった理由について考える。UGは、地表から坑道を開削し地下の鉱体を採掘する方法であるのに対し、OPは地表付近の鉱体に対して、崩落の発生を防ぐために、安定なピットを形成するように採掘を行う²⁶⁾。そのため、ズリと呼ばれる鉱石採掘の際に発生する岩石・土砂等の鉱業廃棄物が大量に発生し、OPのLand Use Intensity ($\text{m}^2/\text{t-Ni}$) はUGのそれに対し15～135倍と非常に大きな偏差を有する²¹⁾。一方で、採掘方法別の生産量の割合を比較すると、OPによる鉱石生産が全体に占める割合は、2005年は48%、2011年は65%²²⁾であり、生産量が支配的であるわけではない。以上の理由で、OPによる土地改変が支配的であったと考えられる。

3.2.3 国・地域別のニッケル鉱石生産の集中度

最後に、HHI (ハーフィンダール・ハーシュマン・インデックス) を用いて、世界のニッケル生産国における特定の鉱山へのニッケル鉱石生産の集中度を推計した結果をFigure 4に示す。3.2.2と同様に、対象年度は2005年及び2011年とした。

2005年においてはロシア、オーストラリア、ニューカレドニア、南アフリカ共和国等の国々のHHIが低い一方で、コロンビア、ドミニカ共和国、ギリシャ、ベネズエラ、マケドニア、スペイン、ノルウェーといった国々のHHIが1を示した。また2011年においては、フィリピン、オーストラリア、ロシア、南アフリカ共和国のHHIが低い一方、コロンビア、マケドニア、ギリシャ、ベネズエラ、ドミニカ共和国、ノルウェーといった国々のHHIが1を示した。このように、全体的な傾向として、鉱石生産量の多い国ほど鉱石生産の集中度が低く、鉱石生産量が少ない国ほど鉱石生産の集中度が高いことが明らかとなった。また、2005年から2011年にかけて、フィリピン、カナダの集中度がそれぞれ0.45倍、0.51倍と大きく低下していることがわかる。

鉱石生産量と集中度の傾向については、生産量が多い国ほど多くの鉱山を保有している²²⁾ことに起因すると考えられる。また、2005年から2011年にかけてのフィリピン、カナダにおける集中度の低下については、新規鉱山の開発が進められたことや大規模な生産を行っていた鉱山の減産^{22, 23)}に起因するものであると考えられる。

4. 考察

4.1 資源の直接的・間接的な供給制約による影響を未然に防ぐための対応策

情報源の網羅性については後述するが、鉱物資源の供給障害のリスク要因を広範に捉えるための枠組み設計、及びそれぞれの指標の定量的な解析に対する考察を行う。

Figure 4. Degree of concentration of nickel ore production by country in (a) 2005 and (b) 2011

サプライチェーンリスクを整理した既存の議論からリスク要因を抽出した結果、グローバル規模のリスク要因の把握と管理を目的とした議論^{9, 10)}でのみ焦点をあてている要因やビジネスや企業戦略向けのリスク要因の把握と管理を目的とした議論¹¹⁻¹⁴⁾でのみ焦点があてられている要因、更に既存のいずれの議論⁹⁻¹⁴⁾においても焦点があてられていなかった要因があることが明らかになった。

鉱物資源の供給障害に関する事例を収集した結果、事例が発生した国・地域、または要因に差異が見られた。これは、その国・地域の開発期間や情報源の傾向によるものであると考えられる。事例件数は1967年から2016年までの累積で計上しているため、大規模な開発を行っている期間が長ければ長いほど、多くの事例が抽出されやすいということが考えられる。また、本研究で事例抽出の際に用いた情報源の性質上、報道対象になりやすいもの、時勢に応じて社会的関心が高いものの事例が多く収集される傾向があったと考えられる。また、環境規制が緩いあるいは実効性を有しない国・地域の場合、同程度の環境汚染事例が発生したとしても、報道の対象とならない場合がある²⁷⁾。そのため各国の事例件数の多寡がリスク要因の数に正比例しない点は留意すべきである。

また、資源採掘に伴う土地改変面積の推計により、大規

模な土地改変を行っている国・地域があることが明らかとなった。資源の採掘に伴う土地利用に関連して、先住民の土地の不正使用を受けて操業停止命令が下された事例（ブラジル：2012年）¹⁹⁾や、鉱山活動が水源や生物多様性へ深刻な影響を与え、環境保護団体が活動停止を求めたことにより鉱山操業を一時閉鎖した事例（ドミニカ共和国：2013年）¹⁹⁾などが確認されている。

最後に鉱石生産の集中度について、特定の鉱山における鉱石生産に伴い集中度が高くなっている国・地域があることが明らかになった。例えば、一つの鉱山で鉱石生産を行っているスペインでは、2005年では鉱石生産が行われていたが、2011年では鉱石生産が行われていなかった。この背景にあるのは、大雨を原因とした採掘場の崩壊事故による操業停止（2010年12月から2012年8月）²⁴⁾である。このように、特定の鉱山へ生産が集中している国・地域は、一度自然災害や事故等により供給障害が生じた場合に大きな影響を受けやすいと考えられる。

以上を踏まえ、資源供給への影響を未然に防ぐために、以下の対応策が示唆された。

対応策①：大量破壊兵器の所持、設備の事故/故障、ジェンダー差別や教育など今まで注視されにくかったリスク要因に配慮する必要がある。

対応策②：鉱山操業に際しては、地域コミュニティとの関係や生物多様性への影響などの環境問題に配慮する必要がある。3.2.2の土地改変面積に関する分析結果より、世界的に今後、供給増大が予想される地域におけるニッケル鉱山開発は主にOPで行われていることから、歴史的なニッケル利用と比較して、より土地利用強度が大きくなることが予想される。そのため、今後のニッケル資源利用の際は、土地改変に伴う生物多様性への影響や地域コミュニティとの土地の権利をめぐる紛争などのリスク要因により注意を払う必要がある点が定量的な解析結果に基づき示された。対応策③：調達に際しては、2次3次サプライヤーを用意する等して、リスクの分散を図る措置を取る必要がある。3.2.3の鉱石生産の集中度解析の結果より、2005年と2011年の比較においては、大きな資源供給を行う国々はおおよそ集中度が低下傾向にあり、市場集中度の観点からのリスクは軽減傾向にあったと考えられる。しかしながら、今後、新規に鉱山開発が進められる国・地域からの資源調達を考える際には、集中度が高いことによるリスク、たとえば鉱山周辺での災害等による影響が背後にあることに留意の上、対応策を講ずるべきである。

4.2 不確実性と限界

事例抽出に際しては、4.1でも述べたように、社会的な関心が大きく、報道対象になりやすい事例が抽出される傾向が、事例抽出の偏りを生むことは留意されるべきである。情報源の選択という点では、本研究で解析対象としたもの以外に、USGS (United States Geological Survey) のニュースから同様の情報抽出を行った結果、同様の傾向を示し、抽出傾向に大きな差が出ないことが確認されている。そのため、さらに情報抽出の網羅性を高めることによって不確実性を回避するためには、発展的な取り組みとして、自然言語処理技術を活用したビッグデータ解析等より、現状では報道対象になりにくい事例を抽出できるような仕組みを構築することも必要であろう。

資源採掘に伴う土地改変面積、鉱石生産の集中度の推計においては、RMDからデータを引用した。土地改変面積は、各鉱山の採掘方法、鉱種、剥土比や鉱石品位によって大きく異なる。また、鉱石生産の集中度は、鉱山数と各鉱山の生産量によって決定される。しかしながらRMDでは、推計に必要な情報（採掘方法、鉱種、鉱石品位、操業状況）が欠落している鉱山や、生産が行われているにも関わらず、鉱山が一つも掲載されていない国・地域があった。また、RMDに掲載されている鉱山の鉱石生産量の和と、その国・地域全体の鉱石生産量の間に差異が見られる国・地域もあった。さらに、複数の鉱山が企業体やプロジェクト毎に一つにまとめられている場合もあった。今後の解析の課題

として、把握できていない鉱山や情報が不足している鉱山、企業やプロジェクトごとにまとめられている場合は鉱山毎に解析を行うことでより精度の高い解析が可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では、鉱物資源の供給に関わるサプライチェーンに内在するリスク要因を広範に抽出し、5分類（経済、環境、地政、社会、技術）に整理した。更に、ニッケルを事例として、供給障害に関わる要因別の発生件数、資源採掘に伴う土地改変面積、そして特定の鉱山への鉱石生産の集中度を取り上げて、それぞれについて定量的な解析を実施した。以下に、本研究の主な結論と共に、資源供給への影響を未然に防ぐための対応策を示した。

- ・ 鉱物資源のサプライチェーンの背後のリスク要因を抽出した結果、これまで注視されにくかったリスク要因があることが明らかになった。資源供給への影響を未然に防ぐためには、これらのリスク要因に注意する必要がある。
- ・ 国・地域別のニッケル資源採掘に伴う改変面積の解析により、資源産出国では鉱石の採掘に伴い土地改変が進行していること、さらに、急速に土地改変面積が拡大している国・地域があることが明らかとなった。調達に際しては、資源の供給制約を回避するために、鉱山・製錬所の地域コミュニティとの関係性や土地改変に伴う環境問題への対策の配慮が必要であると考えられる。
- ・ 特定の鉱山へのニッケル鉱石生産の集中度の推計により、特定の鉱山に生産が集中している国・地域があることが明らかになった。調達に際しては、分散的な調達によるリスクの分散を図る必要がある。あるいは、集中度の高い国・地域からの供給を進める際には、備蓄を含めて供給障害が生じた場合を想定した対応策の整備等を図る必要がある。

謝辞

本研究は、JST-RISTEXによる科学技術イノベーション政策のための科学研究開発プログラム「リソースロジスティクスの可視化に立脚したイノベーション戦略策定支援」研究開発プロジェクト、科学研究費助成事業「サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響の解析と資源利用の高度化・高効率化研究」（KAKENHI 26281059）および「サプライチェーンが産み出す価値と環境・資源ストレスの統合的ホットスポット分析」（KAKENHI 15H01750）で取り組んでいる研究成果の一部です。また研究支援を株式会社本田技術研究所より受けております。ここに記して深く感謝申し上げます。

（平成28年7月29日受付、平成28年12月29日採択）

参考文献

- 1) van Vuuren D. P., Strengers B. J., De Vries H. J. M. (1999): Resources Policy, 25 (4), 239-255
- 2) Kleijn R., van der Voet E., Kramer G. J., van Oers L., van der Giesen C. (2011): Metal requirements of low-carbon power generation, Energy, 36, 5640-5648
- 3) 掘琢磨 (2006): 地質ニュース, 623, 21-41
- 4) グローバル・コンパクト・ネットワーク・ジャパン, 国連グローバル・コンパクトの10原則, グローバル・コンパクト・ネットワーク・ジャパンホームページ, 入手先 <<http://ungc.jn.org/gc/principles/index.html>>, (参照 2016-6-17)
- 5) United Nations, SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGs), United Nationsホームページ, 入手先 <<http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>>, (参照 2016-6-17)
- 6) 経済産業省 (2014): 今後の鉱物資源政策のあり方について (骨子案), 1-7
- 7) Nakajima K., Ohno H., Kondo Y., Matsubae K., Takeda O., Miki T., Nakamura S., Nagasaka T. (2013): Environmental Science & Technology, 47, 4653-4660.
- 8) Nakajima K., Otsuka Y., Iwatsuki Y., Nansai K., Yamano H., Matsubae K., Murakami, Nagasaka T. (2014): Metallurgical Research and Technology, 111, 339-346.
- 9) WORLD ECONOMIC FORUM (2012): New Models for Addressing Supply Chain and Transport Risk, 25pp.
- 10) WORLD ECONOMIC FORUM (2015): Global Risks 2015 10th Edition, 65pp.
- 11) SCM World (2014): INNOVATIVE APPROACHES TO SUPPLY CHAIN RISK, 21 pp.
- 12) The British Standards Institution (BSI), Supply Chain Risks, BSI Supply Chain Service and Solutionsホームページ, 入手先 <<http://bsi-supplychainsolutions.com/en-US/supply-chain-risks/>>, (参照 2015-12-15)
- 13) MIT Sloan (2004): Managing Risk To Avoid Supply-Chain Breakdown, 53-61
- 14) Allianz Global Corporate & Specialty (2012): Managing disruptions Supply chain risk: an insurer's perspective, 34 pp.
- 15) Graedel T. E., Harper E. M., Nassar N. T., Nuss P., Reck B.K. (2015): PNAS, 112(14), 4257-4262
- 16) G. M. Mudd (2010): Resources Policy, 35, 98-115
- 17) Durán A. P., Rauch J., Gaston K.J. (2013): Biological Conservation, 160, 272-278
- 18) Nakajima K., Ohno H., Kondo Y., Matsubae K., Takeda O., Miki T., Nakamura S., Nagasaka T. (2013): Environmental Science & Technology, 47, 4653-4660
- 19) JOGMEC 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ニュース・フラッシュ, 金属資源情報, JOGMEC ホームページ, 入手先 <<http://mric.jogmec.go.jp/>>, (参照 2016-1-4)
- 20) Ecobalance, Inc.・Nickel Industry LCA Group (2000): Life Cycle Assessment of Nickel Products Final Report, 87pp.
- 21) Tang L., Nakajima K., Murakami S., Itsubo N., Matsuda T. (2016): Int J Life Cycle Assess, 21, 51-59
- 22) SNL Metals & Mining, Raw Materials Data, SNL Metals & Miningホームページ, 入手先 <<http://www.intierrarmg.com/Products/Raw-Materials-Data.aspx>>, (参照 2015-2-2)
- 23) 資源・素材学会資源経済部門委員会、東京大学生産技術研究所 (2006): 世界 鉱物資源データブック (第2版), 442-443
- 24) JOGMEC 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 世界の鉱業の趨勢, 金属資源情報, JOGMEC ホームページ, 入手先 <<http://mric.jogmec.go.jp/>>, (参照 2016-7-17)
- 25) United States Geological Survey (USGS), Nickel Statistics and Information, USGSホームページ, 入手先 <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/>>, (参照 2016-6-17)
- 26) 西川有司, 嶽山輝夫, 白井凱也, 家守伸正, 飯田修, 山富二郎, 賀川鐵一, 福田勇, 阿部一郎, 後藤敬一, 木村卓郎, 西谷毅, JOGMEC 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (編) (2008): 非鉄金属資源の開発技術, 金属資源開発の基礎, 朝倉書店, 東京, 122-125
- 27) G. M. Mudd (2010): Ore Geology Reviews, 38, 9-26

Appendix

Table A1. Keywords for proposed risk factors

No.	Categories	Subcategories	Keywords
1	Economic	Strikes	Strikes, Dismissal, Working conditions, Labor environment
2		Volatility	Demand volatility/slump, Commodity price volatility/slump, Fluctuation of the exchange rate, Reduced production
3		Energy/Infrastructure shortage	Shortage of energy, Power shortage, Shortage of water, Disruption of infrastructure
4		Disorder in an operating unit	Confusion of business conditions, Shareholder's dispute, Corporate acquisition
5		Failure of raw material procurement	Shortage of raw material, Bankruptcy of critical supplier, Failure of tier 2 supplier
6		Barrier to entry	Barriers to entry
7		Product management	Inaccurate forecasts, Capacity, Shortage of labor force, Product value, Product obsolescence, Inventory holding cost
8		Intellectual property	Breach of intellectual property rights, Counterfeit products
9	Environmental	Pandemic	Pandemic, Spread of infectious diseases
10		Natural disaster	Earthquake, Volcanic activity, Tsunami, Sediment disaster, Land subsidence
11		Extreme weather	Heavy rain, Cyclone, Hurricane
12		Environmental impact	Influence of biodiversity, Soil pollution, Water pollution, Atmospheric pollution
13		Depletion	Depletion of resources
14	Geopolitical	Defect in transport	Disruption of transportation routes, Border delays, Closure of trading port
15		Possession of weapons of mass destruction	Nuclear, Chemical, Biological and Radiological technologies and materials
16		Terrorism	Terrorism
17		Political instability	Armed conflict, Corruption, Financial crisis
18		Trade barrier	Resource nationalism, Trade regulations, Tariff
19		Bilateral relationship	Economic sanctions, Asset freezing
20		Shutdown based on the law	Cancellation of mining license, Unpaid license fee, Environmental regulation
21	Societal	Social operating permit	Forced and Child labor, Relationship with local communities, Exception from pro-environment group, Illegal mining
22		Scarcity of food	Food crisis
23		Large-scale involuntary migration	Large-scale involuntary migration
24		Failure of urban planning	Failure of urban planning
25		Gender discrimination	Sexual discrimination, Woman's suffrage
26		Inadequate education	Illiteracy
27		Caught in another's dispute	Caught in another's dispute
28	Technological	Misuse of technologies	Misuse of 3D printer, Artificial intelligence, Geoengineering
29		Data security/IT incidents	Critical information infrastructure breakdown, Cyber attacks, Data fraud or theft
30		Accident/breakdown of equipment	Equipment accident/breakdown/repair
31		Risks of the press	The news to incite supply anxiety