

「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」

研究開発成果報告書

(研究開発期間 平成 24 年 10 月～平成 27 年 9 月)

研究代表者： 松八重一代（東北大学）

1. 設定した課題と目標

本プロジェクトにおいて、以下の 3 つの成果を創出し、リソースロジスティクス可視化を基盤として、我が国が戦略的に推進すべき科学技術イノベーションの浮揚、牽引、導入、実装につなげる方法論を提案する。

- 1) リソースロジスティクス可視化手法の提案
- 2) 事例研究を通じて、これまでに行われてきた科学技術イノベーション推進、浮揚、実装に係わるステークホルダーの抽出と、それぞれの役割についての整理
- 3) リソースロジスティクス可視化情報に基づき、ステークホルダー間におけるサプライチェーンリスク情報の共有に向けたプラットフォーム構築ならびにその利用に関わるガイドラインの作成

2. プロジェクトの成果

確立させたリソースロジスティクス可視化手法を用いて、各事例研究グループと連携を図りつつ、分析結果の考察、データベース構築を進めた。具体的にはマテリアルフロー分析(Material Flow Analysis: MFA)、関与物質総量 (Total Materials Requirements: TMR) ならびに産業連関分析手法 (Input Output Analysis: IOA) に基づく、リソースロジスティクス可視化手法を用いた、分析結果の考察、データベース構築を行ってきた。

事例研究：ニッケルグループでは国内外のニッケルのフロー解析ならびに廃棄物・副産物中に含有される未利用ニッケルフローの解析を行った。産業連関モデルと国際貿易に随伴するニッケルフローに関して GLIO モデルを用いて接続することで、我が国の経済活動によって牽引される直接・間接のニッケル需要量を定量評価し、地図上に国別資源採掘需要量の可視化を行った。ニッケルの資源利用効率向上について関連するイノベーション技術の変遷と、その類型化を行うべく、勉強会、専門家へのヒアリング等を通じたサーベイを行った。

事例研究：リングループにおいては国内フローを精緻化するとともに、国際貿易に随伴するリンフローについても明らかにし、我が国の最終需要が国内外で直接・間接的に必要とするリン資源量の推計を行った。

さらにこれらのマテリアルフロー情報をもとに事例研究：生物多様性グループではニッケル資源、リン資源の利用がもたらすサプライチェーンを通じたリスクのうち、生物多様性損失に関わる影響を可視化する手法の開発と、その応用事例研究を進めた。

またガバナンスグループにおいては、リン資源リサイクル推進協議会ならびにリン資源戦略協議会と連携のうえ、協議会での議論の経緯をステークホルダー別に整理を行いつつ、事例研究；農業・食糧グループにおける知見とあわせて、リンのリソースロジスティクスに関わるステークホルダーの抽出ならびにイノベーション浮揚・牽引・実装に関わるステークホルダーガバナンスを解析した。

3. 各成果の概要

実施項目 1. リソースロジスティクス可視化の方法論確立に向けた調査・研究

各事例研究グループと連携を図りつつ、分析結果の考察、データベース構築を進めた。具体的にはマテリアルフロー分析(Material Flow Analysis: MFA)、関与物質総量 (Total Materials Requirements: TMR)

ならびに産業連関分析手法(Input Output Analysis: IOA)に基づく、リソースロジスティクス可視化手法の確立をおこなった。

実施項目 2. 事例研究：ニッケルに関するリソースロジスティクス可視化のための解析・調査

国内外のニッケルのフロー解析ならびに廃棄物・副産物中に含有される未利用ニッケルフローの解析を行った。産業連関モデルと国際貿易に随伴するニッケルフローに関して GLIO モデルを用いて接続することで、我が国の経済活動によって牽引される直接・間接のニッケル需要量を定量評価し、地図上に国別資源採掘需要量の可視化を行った。ニッケルの資源利用効率向上について関連するイノベーション技術の変遷と、その類型化を行うべく、勉強会、専門家へのヒアリング等を通じたサーベイを行った。

実施項目 3. 事例研究：リンに関するリソースロジスティクス可視化のための解析・調査

国内フローを精緻化するとともに、国際貿易に随伴するリンフローについても明らかにし、我が国の最終需要が国内外で直接・間接的に必要とするリン資源量の推計を行った。さらに未利用資源の活用において、ヒアリングを通じて誰が重要なステークホルダーであるかの抽出を行い、リンフローの流れを変えるイノベーションにおいて何が障壁となるのかを明らかにした。

実施項目 4. 資源利用の背後にあるサプライチェーンリスクの可視化

(1) 衛星画像解析による資源利用の背後にある環境リスクの可視化

資源利用の背後にあるサプライチェーンリスクの一つとして環境影響があげられる。なかでも鉱山開発により引き起こされる環境変化の大きな 1 つが土地変化であり、その結果引き起こされる問題が生態系への悪影響である。本 PJ の研究期間においては、ニューカレドニアにおけるニッケル鉱山開発による土地変化の定量的分析を行うことで、基礎的な解析のための枠組みを構築した。

(2) リソースロジスティクスに基づく様々なリスクの可視化

マテリアルフロー情報をもとにリン資源の利用がもたらすサプライチェーンを通じたリスクのうち、カントリーリスク、随伴元素による環境影響に関わるリスクを可視化する手法の開発と、その応用事例研究を進めた。

実施項目 5. ステークホルダーガバナンスに向けた情報提供のあり方について意見交換、ヒアリング調査

(1) 未利用ニッケル資源の利用促進に関わるステークホルダーへの情報提供と意見交換

ニッケルの資源利用効率向上について関連するイノベーション技術の変遷と、その類型化を行うべく、勉強会、専門家へのヒアリング等を通じたサーベイを行った。

(2) 持続可能なリン資源利用に関わるステークホルダーへの情報提供と意見交換

リン資源リサイクル推進協議会ならびにリン資源戦略協議会と連携のうえ、協議会での議論の経緯をステークホルダー別に整理を行いつつ、事例研究；農業・食糧グループにおける知見とあわせて、リンのリソースロジスティクスに関わるステークホルダーの抽出ならびにイノベーション浮揚・牽引・実装に関わるステークホルダーの役割を解析した。

4. その他の観点からの成果

1. (学術的貢献)

資源利用の背後にあるサプライチェーンリスクについて、MFA,LCA,TMR のツールに基づくリソースロジスティクス可視化を踏まえて、見える化した試みは、これまで主にこれらのツールの開発応用を行ってきた産業エコロジー、LCA 学会の分野でも新しい試みであり、多くの学術的貢献があった。このことから研究メンバーの中島、醍醐、山末、松八重はそれぞれ、その貢献を認められ LCA 学会、鉄鋼協会等より賞を受賞している。

リソースロジスティクスの可視化を行い、資源利用に関わるサプライチェーンリスクを定量的な資源フローに基づいて定量化したことは、世界的にも研究報告事例が無く、学術的な貢献が非常に大きい。国際会議において報告した際にも高い評価を受けた。

2. (産業界の関心)

本研究課題で発信してきた資源利用の背後にあるサプライチェーンリスク可視化は産業界においても関心が高く、2015年度より本田技術研究所との共同研究を開始した。

研究期間中は事例研究で解析を行ったニッケル、リンについて、それぞれニッケル協会や、リン資源リサイクル推進協議会と密に意見交換を重ね、情報共有、フィードバックを行ってきた。

これらの点から、本研究課題の出力が産業界においてもある一定の評価を受け、成果を上げたといえる。

5. 発展の可能性

データベースの構築ウェブでの公開については、商用データベースより様々な数値を参照しており、これを加工してウェブで公開することが知的財産侵害にあたる可能性があり、当初目標としていた進度を妨げることになった。

省庁の有している情報の共有についても、同様の懸念があり、入手したい情報を共有することが困難であることという状況にしばしば直面した。

この点の解決無くして、情報の共有の糸口は見えないものと思われる。

6. 付録

Resource Logistics

リソースロジスティクス情報の 提供プラットフォーム構築に向けて



資源利用に関わるサプライチェーンリスクの明確化

- ✓ 採掘 (鉱床タイプ × 国)
- ✓ 精錬・精製 (技術 精錬方法 × 国)
- ✓ 加工 (技術)
- ✓ 組立 (製品)
- ✓ 消費
- ✓ 回収・再資源化 (精錬方法 × 国)

[illegible]

リスクの分類

1. Economy インフラの有無 市場 原料 エネルギー 人的資本 等
2. Environmental 水・生態系、
3. Societal 人権 教育 ストライキ 等
4. Geopolitical 輸送経路 (越境輸送)
5. Technological 知的財産流出 技術バスケット

Fig.1 リソースロジスティクス情報提供プラットフォーム構築に向けたリスクの分類

リソースロジスティクス情報の提供



資源消費量削減

調達リスクの大きさ
輸入国のカントリーリスク
資源供給寸断リスク

?



MFA **SCA** **TMR** **RSA** **SCRA**

マテリアルフロー分析
資源の流れ

サプライチェーン分析
産業連関分析による
直接/間接の資源の流れ

関与物質総量
ライフサイクル視点
による資源利用

衛星画像解析による
資源利用に伴う
土地改変量の把握

資源利用に伴う
サプライチェーン
リスク解析

現状把握 ステークホルダー 隠れた環境影響 資源利用に関わ
抽出 外国資源依存度 るリスク可視化

リソースロジスティクス可視化に基づくイノベーション戦略策定支援

Fig. 2 リソースロジスティクス可視化に基づくイノベーション戦略策定支援のステップ

事例研究：ニッケル

MFA **SCA** **TMR** **RSA** **SCRA**

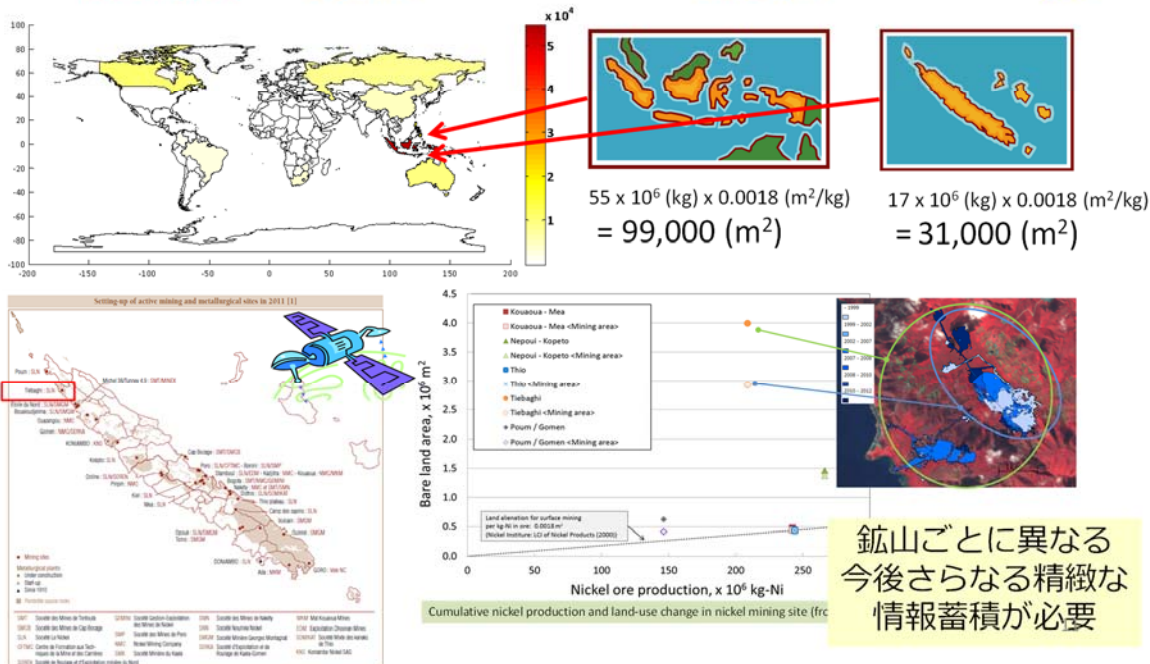


Fig. 3 我が国の直接間接のニッケル消費が引き起こす土地改変による環境リスクの解析例



$$R_i = \sum_j^n r_{i:j} * F_{p:j}$$

R_i i 番目のリスク

$r_{i:j}$ j 国における i 番目のリスク係数 $0 \leq r_{i:j} \leq 1$

$F_{p:j}$ 我が国の最終需要を満たすために
需要される直接、間接の j 国におけるリンフロー

リン資源に関わる関心リスク

- R_N 1. NORMs
- R_H 2. 重金属
- R_C 3. カントリーリスク

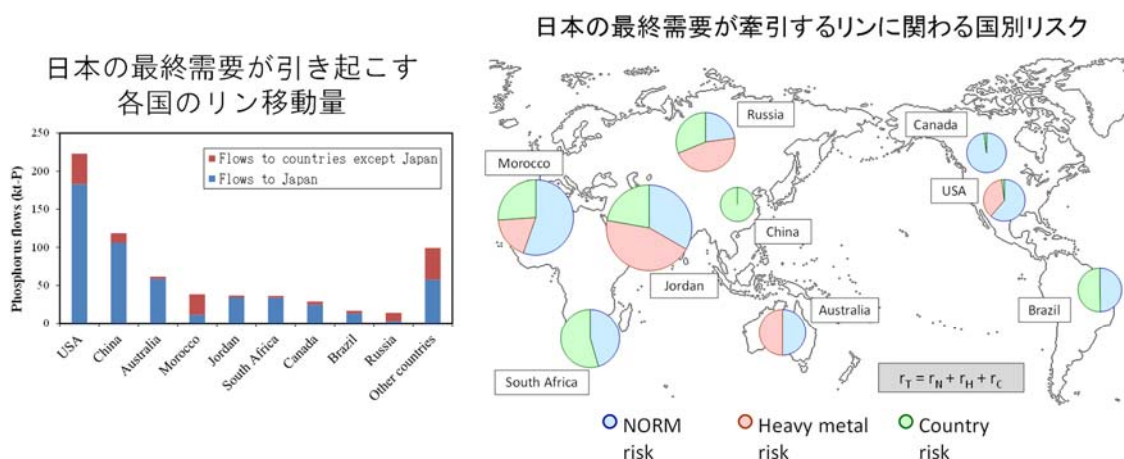
リスク係数

$r_{N:j}$ NORMs を付随する鉱石産出する鉱山数/ j 国における全鉱山数

$r_{H:j}$ 重金属を付随する鉱石産出する鉱山数/ j 国における全鉱山数

$r_{C:j}$ j 国のOECD country risk index

Fig. 4 事例研究：リンにおけるサプライチェーンリスク可視化の定式化



- ✓ 日本におけるリン資源需要
- ✓ 鉱石は直接米国から輸入していないが、米国のリン資源に大きく依存
- ✓ モロッコから鉱石はほとんど輸入していないが、間接的にはある程度依存している
- ✓ リスクベースで見ると、モロッコ、ヨルダンのリン資源に関わるリスクは大きい

Fig. 5 日本の最終需要が引き起こす各国のリン移動量と、その背後にある国別リスク

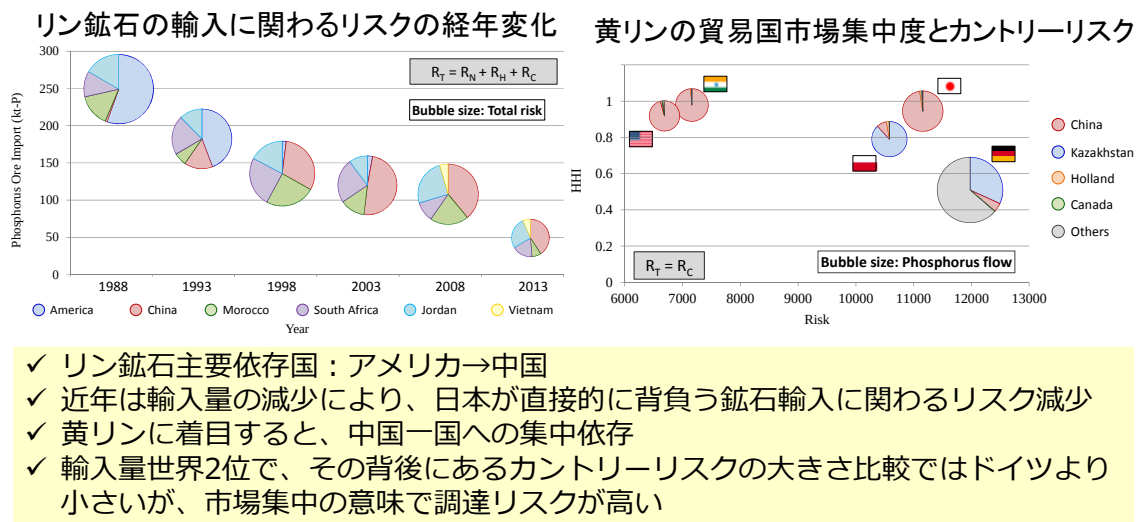


Fig. 6 リン鉱石の輸入に関わるリスクの経年変化と、黄リン貿易に伴うカントリーリスクと HHI の関係

7. 主な成果発表

- 第一回持続的リン利用シンポジウム、2014年3月10日、伊藤国際学術研究センター
- Workshop on Resource Logistics and Mining Responsibility、2014年10月27日、Tsukuba International Congress Center (Epochal Tsukuba), Japan
- 松八重一代、科学技術イノベーション政策におけるコミュニケーションツールとしての LCA, 日本 LCA 学会誌、10 (2014) 4, 435-436
- Global Environmental Research, Vol.19(2015)No.1, 特集号共同編集, Sustainable Use of Phosphorus in Asia
- Kenichi Nakajima, Hajime Ohno, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Osamu Takeda, Takahiro Miki, Shinichiro Nakamura, and Tetsuya Nagasaka, Simultaneous MFA of nickel, chromium and molybdenum used in alloy steel by means of input-output analysis, Environmental Science & Technology, 2013, 47, 4653-4660, DOI: 10.1021/es3043559is, [V,Ni]
- K. Nakajima, Y. Otsuka, Y. Iwatsuki, K. Nansai, H. Yamano, K. Matsubae, S. Murakami and T. Nagasaka: "Global supply chain analysis of nickel: importance and possibility of controlling the resource logistics", Metallurgical Research and Technology, 111, (2014), 339-346
- 鎗目雅、グレゴリー・トレンチャー、「社会的課題の解決に向けたイノベーションの創出：ステークホルダー連携と社会実験の分析」、研究技術計画、29 (2/3), 118-131 (2014).
- Kazuyo Matsubae, Eiji Yamasue, Tadahiro Inazumi, Elizabeth Webeck, Takahiro Miki, Tetsuya Nagasaka, Innovations in Steelmaking Technology and Hidden Phosphorus Flows, Science of the Total Environment, (2015) [Accepted]