

平成25年度
環境研究総合推進費補助金 研究事業
総合研究報告書

国際的な資源依存構造に着目したレアメタルに関する
3R 効果評価手法の開発
(3K122024)

平成26年3月

課題代表者

独立行政法人国立環境研究所 南齋規介

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業(平成 24 年度～平成 25 年度)

所 管 環境省

国庫補助金 31,182,000 円

研究課題名 「国際的な資源依存構造に着目したレアメタルに関する 3R 効果評価手法の開発」

研究期間 平成 24 年 6 月 8 日～平成 26 年 3 月 31 日

研究代表者名 南齋規介(独立行政法人国立環境研究所)

研究分担者名 中島謙一(独立行政法人国立環境研究所)

小口正弘(独立行政法人国立環境研究所)

藤井 実(独立行政法人国立環境研究所)

加河茂美(九州大学)

近藤康之(早稲田大学)

安達 毅(秋田大学)

目次

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要	1
1. 研究背景と目的	14
2. 研究開発の全体構成	15
3. 研究方法	16
3.1 全世界を対象としたレアメタルに関するマテリアルフロー分析手法	16
3.1.1 国際貿易に伴うレアメタル国間移動量の推計	16
3.1.2 数理計画法（二次計画法）を用いた国別マテリアルバランスの調整	18
3.2 日本経済が依存する国際レアメタルフローの検出と採掘量の算定手法	21
3.2.1 GLIO を用いた日本の最終需要が誘引する国際レアメタルフローの同定	21
3.2.2 GLIO を用いた日本の最終需要が誘引するレアメタル採掘量の算定	25
3.3 各国の特性に着目した国際レアメタルフローの構造評価	25
3.3.1 各国の経済的・政治的リスクに着目した国際レアメタルフローの特性評価	25
3.3.2 各国の科学技術・社会システムレベルに着目した国際レアメタルフローの特性評価	27
3.4 国際レアメタルフローにおける HOTSPOT（レアメタル利用が集約的な貿易国群）の検出手法	29
3.4.1 スペクトラルグラフ理論を利用した国際レアメタルフローのクラスタリング手法	29
3.4.2 非負行列因子分解手法を利用したクラスタリング手法	31
3.4.3 最適なクラスター数の選定	32
3.5 国際レアメタルフローの経路解析と視認性の高い可視化手法	32
3.5.1 レオンチェフモデルと誘発された産業関連表	33
3.5.2 構造経路解析	35
3.5.3 構造経路に基づく行列分解法（PATH-BASED MATRIX DECOMPOSITION ANALYSIS、PMDA）	36
3.5.4 構造経路に基づく国際レアメタルフロー特性の可視化手法	37
3.6 財やサービスの 3R（リデュース、リユース、リサイクル）によるレアメタル国際依存量の軽減効果指標の開発	40
3.7 耐久財の使用延長に伴う需要減少量の推計手法	41

3.7.1	耐久財の使用年数推定手法	41
3.7.2	使用年数延長による耐久財需要減少量の推計方法	42
3.7.3	実データを用いた推計事例	44
3.8	日本の家計消費が依存する国際レアメタルフローの長期予測手法	46
3.8.1	世帯属性別消費支出額の推計	46
3.8.2	世帯別家計消費支出額における購入者価格ベースから生産者価格ベースへの変換	49
3.8.3	世帯別の誘引する国際フロー量の算定方法	50
3.8.4	世帯人口変化による世帯別家計消費支出額への擬似的コホート効果	50
3.8.5	2035年までの将来世帯別国際フロー量の推計方法	52
4.	結果と考察	53
4.1	レアメタルの国際マテリアルフロー	53
4.1.1	ネオジム	54
4.1.2	コバルト	55
4.1.3	プラチナ	57
4.2	日本経済が依存する国際レアメタルフロー	59
4.2.1	ネオジム	59
4.2.2	コバルト	61
4.2.3	プラチナ	63
4.3	国際レアメタルフローの構造特性	65
4.3.1	各国の経済的・政治的リスクに着目したレアメタルフローの特性	65
4.3.2	各国の科学技術・社会システムレベルに着目したレアメタルフローの特性	68
4.4	日本の家計消費が依存する国際レアメタルフローの2035年までの変化	74
4.4.1	今後の世帯主年来階級別の世帯数および世帯人口の推移	74
4.4.2	2005年から2035年までの誘引国際フロー量の推計結果	75
4.4.3	一世帯あたりの世帯別国際フロー量の特徴	77
4.4.4	2035年における国際フロー量の詳細な内訳	78
4.5	国際レアメタルフローにおけるHOTSPOT（レアメタル利用が集約的な貿易国群）	80
4.5.1	各レアメタル国際フローにおけるHOTSPOTと日本の位置づけ	80

4.5.2	各国の経済的・政治的リスクを加味した国際フローにおける HOTSPOT と日本の位置づけ	83
4.6	国際レアメタルフローの経路解析	85
4.6.1	テストデータを用いたネットワーク構造の視覚化手法の有効性に関する検討	85
4.6.2	構造経路に基づく国際レアメタルフロー特性の可視化	88
4.7	耐久財の使用延長と需要減少との関係	92
4.7.1	基準ケースにおける平均使用年数および使用済み台数	92
4.7.2	使用年数延長による需要減少量の推計	93
4.8	財やサービスの 3R (リデュース、リユース、リサイクル) によるレアメタル国際依存量の軽減効果指標	96
5.	結論	100
5.1	低炭素技術を支えるレアメタルの国際マテリアルフローの同定手法を開発した	100
5.2	レアメタルの国際マテリアルフローを形成する主要国および商品を明示した	101
5.3	日本経済が暗黙的に依存するレアメタルの国際マテリアルフローを検出した	101
5.4	資源採掘国と貿易国のリスクを加味した日本経済のレアメタル国際依存量を定量化した	102
5.5	レアメタルの国際フローにおいて優先的に技術改善をすべきフローを識別した	103
5.6	少子高齢化による日本のレアメタルの国際依存量の将来変化 (2035 年) を予測し、医療需要が国際依存量を上昇させることを明示した	103
5.7	ネットワーク理論に基づくクラスタリング手法を開発し、レアメタルの国際フローにおける HOTSPOT (レアメタル利用が集約的な貿易国群) を検出した	104
5.8	視認性の高い可視化に基づく国際レアメタルフローの経路解析手法を開発した	105
5.9	耐久消費財の使用延長と需要減少との関係を同定し、使用年数延長による国際依存量の低減効果の計測を可能にした	106
5.10	リデュース、リユース、リサイクルによってどれくらい日本のレアメタル国際依存量を軽減できるかを“見える化”する指標を開発した	106
5.11	本成果の社会・技術システム設計と環境政策に対する意義と提案	108
5.11.1	システム設計と環境政策に対する意義	108
5.11.2	資源採掘の課題と持続可能な資源確保に向けた将来戦略	110

6. 研究発表	114
論文発表	114
学会等発表	115
7. 知的財産権の取得状況	116
研究概要図	118
英文概要	119

図目次

図 1	8 地域間におけるネオジムを含む国際貿易の商品別フロー (2005 年値)	3
図 2	ネオジムを含む国際貿易における上位 50 のフロー (2005 年値)	4
図 3	日本の最終需要部門が誘引するネオジムの採掘量と国際フロー量 (2005 年値)	4
図 4	日本の最終需要によって誘引されたネオジムの国際フロー	5
図 5	日本経済が誘引するリスクを加味したネオジム採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合	5
図 6	日本の最終需要が誘引するネオジムの国際マテリアルフローにおける RED-FLOW、YELLOW-FLOW、GREEN-FLOW の割合	6
図 7	HOTSPOT 内・間のネオジムの国際貿易フロー (T)	7
図 8	HOTSPOT11 番におけるネオジムの国際貿易構造	7
図 9	日本における耐久財に対する最終需要に関連したネオジムのマテリアルフットプリント (可視性向上のため、中国から日本へのフローは 100 分の 1 倍の幅で描いてある)	7
図 10	二国間レアメタルフローに関連付けられた技術水準の低い国の数の平均を算出するための仮想的数値例	38
図 11	二国間レアメタルフローに関連付けられた技術水準の低い国の数の平均 (仮想的数値例) を矢印の色により図示した例	39
図 12	本研究におけるレアメタルに着目した 3R の定義と開発指標との関係	40
図 13	8 地域間におけるネオジムを含む国際貿易の商品別フロー (2005 年値)	55
図 14	ネオジムを含む国際貿易における上位 50 のフロー (2005 年値)	55
図 15	8 地域間におけるコバルトを含む国際貿易の商品別フロー (2005 年値)	57
図 16	コバルトを含む国際貿易における上位 50 のフロー (2005 年値)	57
図 17	8 地域間におけるプラチナを含む国際貿易の商品別フロー (2005 年値)	58
図 18	プラチナを含む国際貿易における上位 50 のフロー (2005 年値)	59
図 19	日本の最終需要部門が誘引するネオジムの採掘量と国際フロー量 (2005 年値)	60
図 20	日本の最終需要によって誘引されたネオジムの国際フロー	60
図 21	日本の国内最終需要によって誘引されたネオジムの国際フロー	61
図 22	日本の最終需要部門が誘引するコバルトの採掘量と国際フロー量 (2005 年値)	62
図 23	日本の最終需要によって誘引されたコバルトフロー	62
図 24	日本の国内最終需要によって誘引されたコバルトの国際フロー	63
図 25	日本の最終需要部門が誘引するプラチナの採掘量と国際フロー量 (2005 年値)	64
図 26	日本の最終需要によって誘引されたプラチナの国際フロー	64

図 27	日本の国内最終需要によって誘引されたプラチナの国際フロー	65
図 28	日本経済が誘引するリスクを加味したネオジウム採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合	66
図 29	日本経済が誘引するリスクを加味したコバルト採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合	67
図 30	日本経済が誘引するリスクを加味したプラチナ採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合	67
図 31	貿易商品 HS-852520 (TRANSMISSION APPARATUS、 FOR RADIOTELEPHONE INCORPORATING RECEPTION APPARATUS) に含まれるネオジウムの国際移動量と RED-FLOW、YELLOW-FLOW、GREEN-FLOW との関係	69
図 32	日本の最終需要が誘引するネオジウムの国際マテリアルフローにおける RED-FLOW、YELLOW-FLOW、GREEN-FLOW の割合	73
図 33	日本の最終需要が誘引するコバルトの国際マテリアルフローにおける RED-FLOW、YELLOW-FLOW、GREEN-FLOW の割合	73
図 34	日本の最終需要が誘引するプラチナの国際マテリアルフローにおける RED-FLOW、YELLOW-FLOW、GREEN-FLOW の割合	74
図 35	2005 年から 2035 年における 5 年ごとの世帯主年齢階級別の世帯数 (1000 世帯あたり：グラフ左側) と世帯人口 (1000 人あたり：グラフ右側)：世帯数は人口研による推計値、世帯人口は本研究における推計値	75
図 36	2005 年から 2035 年における、日本の家計消費が誘引するネオジウムの国際フロー量の推移：(A) は国際フロー総量、(B)-(G) はそれぞれ 20 代以下 (20S-) から 70 代以上 (70S+) の世帯属性別国際フロー量	76
図 37	2005 年の世帯属性別一世帯あたりの国際フロー量と 2035 年の世帯属性別一世帯あたりの国際フロー量	77
図 38	HOTSPOT 内・間のネオジウムの国際貿易フロー (T)	81
図 39	HOTSPOT11 番におけるネオジウムの国際貿易構造	81
図 40	HOTSPOT 内・間のコバルトの国際貿易フロー (T)	82
図 41	HOTSPOT18 番におけるコバルトの国際貿易構造	82
図 42	HOTSPOT 内・間のプラチナの国際貿易フロー (T)	83
図 43	HOTSPOT22 番にけるプラチナの国際貿易構造	83
図 44	リスク指標を含んだ HOTSPOT11 番におけるネオジウムの国際貿易構造	84
図 45	リスク指標を含んだ HOTSPOT18 番におけるコバルトの国際貿易構造	84
図 46	リスク指標を含んだ HOTSPOT22 番にけるプラチナの国際貿易構造	85
図 47	乗用車のサプライチェーンをあらわす部門間ネットワーク	86
図 48	乗用車のサプライチェーンをあらわす部門間ネットワーク (カバー率 50%)	87
図 49	乗用車のサプライチェーンをあらわす部門間ネットワーク (カバー率 30%)	87
図 50	日本における耐久財に対する最終需要に関連したネオジウムのマテリアルフットプリント (可視性向上のため、	

中国から日本へのフローは100分の1倍の幅で描いてある)	90
図 51 日本における耐久財に対する最終需要に関連したコバルトのマテリアルフットプリント(可視性向上のため、インドネシアから日本へのフローは5分の1倍の幅で、ニューカレドニアから日本へのフローおよびフィリピンから日本へのフローは3分の1倍の幅で描いてある)	90
図 52 日本における耐久財に対する最終需要に関連したプラチナのマテリアルフットプリント(可視性向上のため、南アフリカから日本へのフローは15分の1倍の幅で描いてある)	91
図 53 推計対象とした耐久財の国内出荷台数および保有台数(稼働台数)の推移	92
図 54 推計対象とした耐久財の使用済み台数推計値(2001~2010年、基準ケース)	93

表目次

表 1	ネオジムに関するリスクを加味した誘発国際フロー量の大きい上位 10 部門	9
表 2	耐久財の使用年数推定手法	42
表 3	推計対象とした耐久財の出荷単価および百万円相当台数	46
表 4	ネオジム、コバルト、プラチナに関する主要な RED-FLOW COMMODITY、YELLOW-FLOW COMMODITY および GREEN-FLOW COMMODITY	70
表 5	2035 年における 13 部門ごとのネオジムの国際フロー量上位 5 部門とその誘引量(T/Y)および全 409 部門中の総合順位: 黄色で着色されている部門は総合順位で 10 位以内	79
表 6	推計対象とした耐久財の平均使用年数推定値 (2001~2010 年、基準ケース)	92
表 7	百万円の需要を削減するために必要な平均使用年数延長分 (対基準ケース)	94
表 8	平均使用年数を 1 年延長したときの耐久財需要減少台数 (対基準ケース)	94
表 9	平均使用年数を 1 年延長したときの耐久財需要減少額 (対基準ケース)	95
表 10	平均使用年数を 1 年延長したときのネオジム誘発採掘量・誘発フロー削減効果	95
表 11	ネオジムに関する誘発採掘量 (原単位 1) の大きい上位 10 部門	97
表 12	ネオジムに関するリスク加味した誘発採掘量 (原単位 2) の大きい上位 10 部門	98
表 13	ネオジムに関する誘発国際フロー量 (原単位 3) の大きい上位 10 部門	98
表 14	ネオジムに関するリスクを加味した誘発国際フロー量 (原単位 4) の大きい上位 10 部門	99
表 15	ネオジムに関する誘発国際フローにおいて RED-FLOW (低技術国間のフロー) の割合 (原単位 5) が大きい上位 10 部門	100

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

研究課題名： 国際的な資源依存構造に着目したレアメタルに関する 3R 効果評価手法の開発

研究番号： 3K122024

国庫補助金精算所要額： 31,182,000 円

研究期間： 平成 24 年 6 月 8 日～平成 26 年 3 月 31 日

研究代表者名： 南齋規介(独立行政法人国立環境研究所)

研究分担者名： 中島謙一(独立行政法人国立環境研究所)、小口正弘(独立行政法人国立環境研究所)、
藤井 実(独立行政法人国立環境研究所)、加河茂美(九州大学)、近藤康之(早稲田大学)、安達 毅(秋田大学)

研究背景と目的

低炭素社会の実現に向けた取り組みや東日本大震災を受けて、特にその重要性が増した新エネルギー技術に対する需要の高まりに呼応し、これらの技術性能の要となるレアメタルの需要増加が見込まれている。レアメタルは世界的に地理的潜在性が強く、投機による市場価格の高騰や中国などの資源産出国における資源ナショナリズムへの動きも懸念されている。その調達の 100%を輸入に依存するわが国は、安定供給に向けた技術的、社会的取り組みを充実させる必要がある。

一方、低炭素社会への取り組みに目を向けると、GHG プロトコルや ISO（世界標準化機構）による製品や組織のカーボンフットプリントのように製品や企業活動に伴うサプライチェーンを通じた温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）排出量を算定する、いわゆる「見える化」が進んでいる。GHG の「見える化」により、生産者や消費者は自らの行動と GHG 排出量との関係を定量的に理解することができる。見方を変えれば、レアメタルについても 3R 効果の「見える化」を図ることで、わが国のレアメタル依存を低減するという観点からも、3R 活動を更に推し進めることが期待できる。しかしながら、現在ではまだ、製品やサービスのリデュースやリユースが持つレアメタルに対する依存低減効果を定量的に解明する研究は行われていない。

そこで本研究では、日本経済の国際サプライチェーンを通じた包括的な資源依存の実態を踏まえ、日本の財やサービスに対する 3R（リデュース、リユース、リサイクル）活動がどれだけ資源依存の低減（量と質）に貢献するかを定量的に示す新たな指標を開発し、主要なレアメタルを対象にその指標を計測することを目的とする。

研究方法

本研究は次の三つの課題を実施した。課題①は「レアメタルの国際マテリアルフローの実態把握とわが国との構造的関係性の解明」、課題②は「資源依存の安定性評価の枠組設計と定量化手法の開発」、そして課題③は「3R活動を対象とした資源依存安定性指標の計測」である。

課題①では、レアメタルがどのような貿易形態を通じて採取国から消費国へと移動しているかをマテリアルフロー分析（MFA: material flow analysis）によって解析し、世界各国間のレアメタルを通じた相互依存関係を理解する。そのため、本研究では世界 231 の国と地域を含むグローバルなシステム境界に基づく、レアメタルの MFA を可能とするための方法論を開発した（3.1 参照）。なお、10 種類のレアメタル（ネオジウム（Nd）、コバルト（Co）、プラチナ（Pt）、ニッケル（Ni）、クロム（Cr）、モリブデン（Mo）、タングステン（W）、チタン（Ti）、タンタル（Ta）、リチウム（Li））に焦点を当てた。次に、明らかとなったレアメタルの国際フローの中で、わが国が直接的間接的に依存している部分を同定するモデルを開発し（3.2 参照）、日本の最終需要が依存するレアメタルの国際フローを特定した。

課題②では、レアメタルの「見える化」に必要な、資源依存の“量”的要素である消費量に加え、“質”的な要素を検討するためにレアメタル国際フローの構造特性を分析する。本研究では、国際フローに存在する資源採掘国の政治的リスク、採掘後から加工そして最終製品に至る国際サプライチェーンに内在する貿易リスクを“質”的要素の一つとして、それらの分析方法の開発を行った（3.3.1 参照）。加えて、資源の消費量が同じであっても、それが効率的であるか非効率的であるかの違いがあることを“質”的要素として理解し、レアメタルの国際サプライチェーンを 3 つに分類する方法論を開発した（3.3.2 参照）。更に、レアメタルの国際フローから核となる国際貿易を検出する全く新しい解析手法を開発し（3.4 参照）、複雑な国際フローを如何なるステークホルダーに対しても容易な理解を支援するための視認性の高い視覚化手法を開発し（3.5 参照）、資源フローの新たな“質”的要素の定量化と“見える化”手法の提案を行った。

課題③では、課題①②で開発した方法論を利用して、日本の財やサービスに対して「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」を行うことにより、わが国のレアメタルに対する国際な依存がどれくらい軽減するかを示す指標を設計した。これらの「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」の国際依存量の軽減指標は、まず基本となる原単位（財やサービスの単位生産額（百万円）あたりの国際依存量）を算定し、単位生産額から単位を変換することで導出する。本研究では、日本の国産品と輸入品の約 800 の財やサービスを対象に原単位を算定した（3.6 参照）。なお「リユース」に関する指標の単位換算のため、寿命延長年を減少需要額に変換する方法論も開発した（3.7 参照）。最後に、少子高齢化による人口減少と世帯構成の変化を組み入れて家計消費の将来需要を推計するモデルを開発し、日本のレアメタル国際依存量の 2035 年までの将来変化を解析した（3.8 参照）。

結果と考察

レアメタルの国際フローの特徴

本研究で得られた国際マテリアルフローの特徴についてネオジウム(2005年値)を例として以下に記述する。

課題①では、レアメタルの国際フローの特徴として、主要貿易製品、主要輸出国と輸入国、世界地域間特性と主要な二国間フローが定量的に明らかになった。例えば、2005年では12540tのネオジウムが採掘され、18565tのネオジウムが国際貿易を通じて世界中を移動した。ネオジウムは製品材料として国に輸入され、その国で製品に組み込まれて別の国へ輸出されているため、採掘量の約1.5倍の国際フローが存在することが分かった。153種類の貿易商品別に推計した国際フローを4種類の商品分類(鉱石、材料、製品、スクラップ)に集約すると、15586tが材料中に含まれ、2968tが製品中に、そして、11tがスクラップ中に含有されて移動した。移動量の最も大きい貿易商品のHSコードは、HS-280530(希土類金属)で6294tであり、HS-850511(永久磁石)が2693t、HS-284960(希土類金属の化合物)が2219tと続いた。

このように、ネオジウムは製品中に含有されて世界を移動する量が少なくなく、そうした非意図的なネオジウムの輸出を含めると、ネオジウムの採掘国以外も主要なネオジウム輸出国と認識することができる。上位3カ国を上げると、中国(9874t)、日本(1494t)、ドイツ(765t)である。輸出品の構成は、中国の場合は、材料としての輸出が8662tあり全輸出量の88%を占めた。また、12%に相当する1214tが製品に含有された輸出であった。一方、日本とドイツの場合は、それぞれ615t(41%)と460t(60%)が材料として、879t(59%)と296t(39%)が製品としての輸出であり、採掘国である中国との輸出商品構成の違いが顕著であった。一方、輸入の場合、上位3カ国は日本(4218t)、米国(2695t)、ドイツ(987t)であった。日本のネオジウム輸入はその98%が材料として行われているが、米国とドイツについてはその割合は下がる。米国では85%(2298t)が材料として、15%(396t)が製品として輸入される。ドイツの場合は、88%(868t)が材料、そして12%(119t)が製品含有であった。

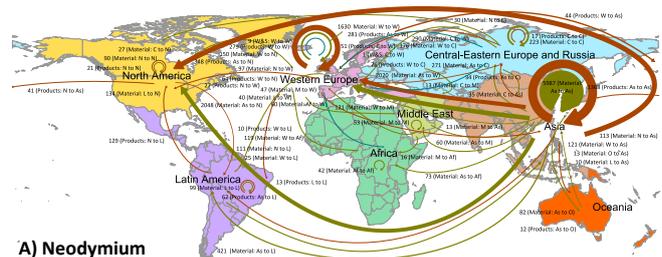


図1 8地域間におけるネオジウムを含む国際貿易の商品別フロー(2005年値)

図 1 は各国間のフローを世界 8 地域 (北米、南米、西ヨーロッパ、アフリカ、中東諸国、中央ヨーロッパとロシア、アジアとオセアニア) および 4 種の貿易商品の種類 (鉱石、材料、製品、スクラップ) に集約したものである。フローの色は、

フローの構成する貿易商品の種類を意味する。一見して、アジア内で材料としてのフローが卓越していることが分かる。アジアから西ヨーロッパや北米へのフローが比較的大きいが、製品として流れており、アジアでネオジムの採掘からそれを含有する加工度の高い製品の国外流通までが行われており、それがグローバルなフローを大きく支配している。更に、詳細に国レベルでの主要なフローを確認した。図 2 は日本を含む 231 ヶ国の国や地域間を移動した量の大きい上位 50 個のフローである。中でも、中国から日本への輸出 (4053t) が卓越しており、世界のネオジム利用を支える主要フローと言える。続いて、中国から米国 (1731t)、中国から香港 (425t)、オーストリアから不明地域 (384t)、中国からドイツ (369t) へのフローが上位の 5 つを占めた。

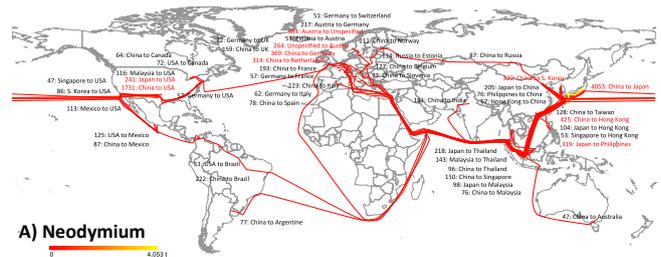


図 2 ネオジムを含む国際貿易における上位 50 のフロー (2005 年値)

日本の最終需要が依存するレアメタルの国際フロー

日本の最終需要が世界に直接的間接的に及ぼすネオジムの採掘量と国際フロー量を最終需要部門別に図 3 に示す。日本の最終需要全体 ([8]最終需要計) では、4036t の採掘量を誘引し、5835t の国際フロー量を誘引したと推計された。最終需要全体から輸出を除いた [7]国内最終需要では、1344t の採掘量と 1670t の国際フローを誘引していることから、輸出による寄与が非常に大きいことが分かる。すなわち、日本の輸出は国内需要と比較し、極めて高い国外の資源採掘と国際フローに依存している。国内最終需要の中では、[4]民間投資による影響が最も大きく、国際フロー量が 981t、採掘量が 758t であり、次に [1]家計消費がそれぞれ 483t、408t と続いた。

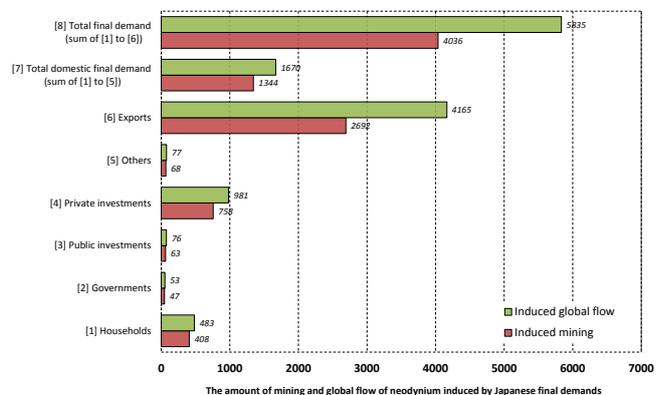


図 3 日本の最終需要部門が誘引するネオジムの採掘量と国際フロー量 (2005 年値)

図 4 は図 2 に示したネオジムの世界全体のマテリアルフローから日本の最終需要（国内最終需要+輸出）が誘発するフローを検出し、そのうち量の大きい上位 50 のフローを示している。つまり、図 3 に示した[8]最終需要による 5835t の国際フローがどこで起こったかを示す。このフローは、

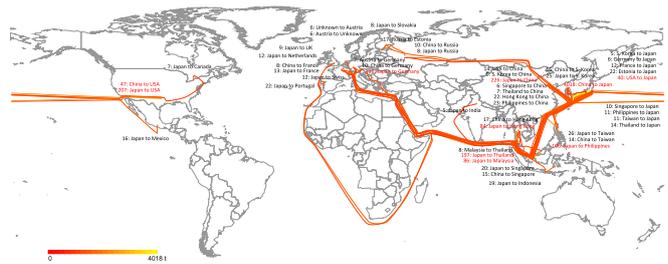


図 4 日本の最終需要によって誘引されたネオジムの国際フロー

日本経済が直接間接的に依存するネオジムの国際マテリアルフローであり、本研究では、このフローのネットワーク構造を日本のネオジムに関する国際サプライチェーンの依存構造と理解する。図 2 の世界全体のフローとは異なり、日本への輸入と日本からの輸出で形成された直接的なネオジムのフローが上位（上位 10 のフローは赤字で表示）に来る。中国からの原料輸入に加え、中でもフィリピン、タイ、マレーシア等の東アジア諸国とのフローが顕著であり、製品中に含んだ輸出によるフローがその要因である。しかし、中国から米国、ロシアからエストニアなど日本を含まない間接的なフローも顕著に現われており、日本の資源依存構造を考える上で、輸出入の直接的な関係だけでなく、グローバルなサプライチェーンを通じた間接的な依存を含めて考察することの重要性が視覚的にも確認できた。

国際サプライチェーンにおける政治・貿易リスクを加味した日本のレアメタル国際依存量

課題②では、レアメタルの「見える化」に必要な“質”的要素として、国際フローに存在する資源採掘国の政治的リスク、採掘後から加工そして最終製品に至る国際サプライチェーンに内在する貿易リスクの定量化を行った。図 5 は日本の 6 つの最終需要部門が誘引したネオジムに関する採掘量、採掘国のリスクを加味した採掘量、国際フロー量、輸出国のリスクを加味した国際フロー量の世界全体量に占める割合を示している。例えば、[8]の最終需要全体が引き起こすネオジム採掘量は世界全体のネオジム採掘量の 0.32（32%）を占める。採掘国のリスクを考慮する場合でも、日本の最終需要が世界全体に占めるリスクの割合は 0.32 と等しく、採掘量と対応のリスクを含んでいると理解できる。一方、誘引する国際フロー量は世界全体の 0.350 を占めるが、輸出国の貿易リスクを加味した国際フローで見ると、世界全体の 0.363 を占めており、若干ではあるがリスクの方が高い支配率を示したが、おおむね国際フローの場合もその大きさに対応のリスクであることが分かった。

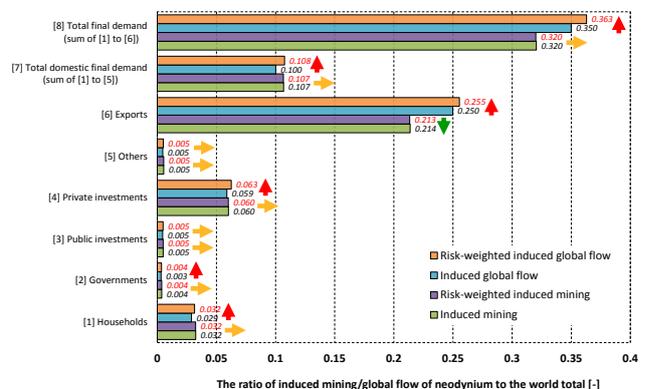


図 5 日本経済が誘引するリスクを加味したネオジム採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合

レアメタルの国際フローにおける非効率的フローの検出と日本需要との関係

本研究では、レアメタルの国間移動が生産技術・社会システムレベルの共に高い国間で行われるフローを Green-flow (潜在的に効率的にレアメタルが利用される)、生産技術・社会システムレベルが共に低い国間で行われるフローを Red-flow (潜在的に非効率にレアメタルが利用される)、レベルの低い国と高い国間のフローを Yellow-flow (Green-flow と Yellow-flow の中間) に分類した。そして、例えば、ある貿易商品に関する国際フローにおいて、Red-flow の割合が最も高い場合、その商品を Red-flow commodity と分類し、レアメタルの有効利用に向けて、国際的に技術的改善を優先する商品と位置付けた。具体的には、ネオジムを含む 153 種類の国際貿易商品を同様に分類すると、21 種類が Green-flow commodity、95 種類が Yellow-flow commodity、残りの 37 種類が Red-flow commodity であった。最も着目すべき Red-flow commodity の中で最もフローの大きい商品は、Electric accumulators (HS850780) (15.1t)、 Household/laundry-type washg mach of a dry linen capa <=10 kg, nes (HS845019) (14.8t)、 Refrigerating or freezing equipment (HS841869) (13.3t)であった。一方、Yellow-flow commodity に分類されたフローの大きいトップ 3 の商品は、 Rare-earth metals, scandium and yttrium (HS280530) (6298t)、 Permanent magnets&art intendd to become permanent magnets, of metal (HS850511) (2694t)、 Compps of rare-earth met nes, of yttrium/scandium/mx of these metals (HS284690) (2219t)であった。

図 6 は日本の最終需要が誘引するネオジムの国際フローを Red-flow、Yellow-flow、Green-flow に区分し、その内訳を示している。ネオジムの場合、どの最終需要においても Yellow-flow が 9 割近くを占めており、次に Green-flow が大きく、輸出国も輸入国も技術レベルの低い国間でのフローである Red-flow に依存するのはかなり限定的であることが確認された。

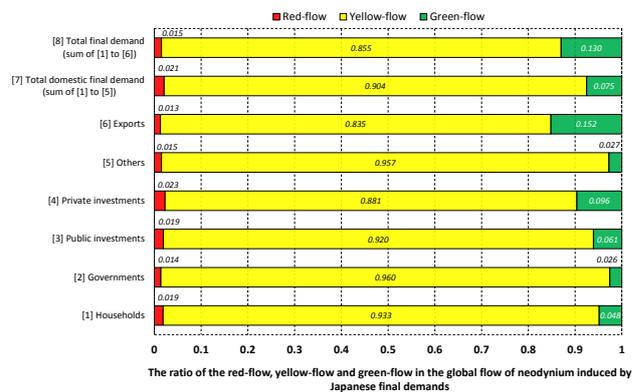
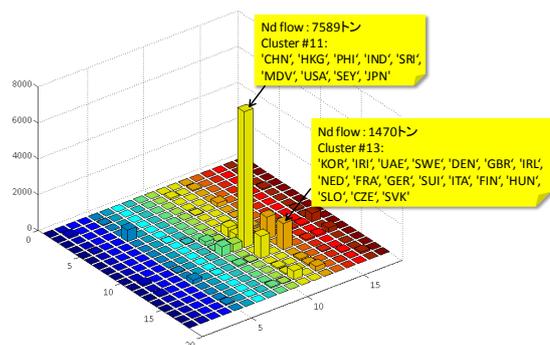


図 6 日本の最終需要が誘引するネオジムの国際マテリアルフローにおける Red-flow、Yellow-flow、Green-flow の割合

国際レアメタルフローにおける Hotspot (レアメタル利用が集約的な貿易国群)



ネオジムの国際貿易ネットワークから開発したクラスタリング手法を用いて検出した Hotspot は、合計で 18 個であった。Hotspot の中でも特にネオジムの国際貿易量が最大のものは 11 番の Hotspot であり、国際貿易総量の約 41% を占める 7589 t もの取引がされていた(図 7 を参照)。この Hotspot は、中国(CHN)、香港(HKG)、フィリピン(PHI)、インド(IND)、スリランカ(SRI)、モルディブ(MDV)、アメリカ(USA)、セーシェル(SEY)、日本(JPN) からなる Hotspot であり、特に中国が貿易量の観点から重要な役割を果たしている(図 8 を参照)。次に大きな Hotspot は、13 番の Hotspot であり、1470t のネオジムが取引されていた。この Hotspot は、韓国(KOR)、イラン(IRI)、アラブ首長国連邦(UAE)、スウェーデン(SWE)、デンマーク(DEN)、イギリス(GBR)、アイルランド(IRL)、オランダ(NED)、フランス(FRA)、ドイツ(GER)、スイス(SUI)、イタリア(ITA)、フィンランド(FIN)、ハンガリー(HUN)、スロベニア(SLO)、チェコ(CZE)、スロバキア(SVK) とい

うヨーロッパ諸国を中心としたものである。興味深い点は、日本と地理的に非常に近い韓国が日本とは違う Hotspot に含まれている点である。これは明らかに韓国のネオジムの密な貿易パートナーが日本とは違うことを示しており、特性の違いが明確になった。

構造経路に基づく国際レアメタルフロー特性の可視化

典型的な産業連関分析における SPA (Structural Path Analysis) の応用研究においては、繰返し算法によって多数の構造経路が計算・抽出されるが、少数の構造経路のみについて詳細な解釈が与えられる。その一方で、ほとんどの構造経路は、計算・抽出されるだけで解釈が与えられることはない。しかしながら SPA は、レオンチェフ逆行列(産業連関分析における遡及計算(あるいは、波及効果の計算)のための最も基礎的かつ重要な手法

図 7 Hotspot 内・間のネオジムの国際貿易フロー (t)

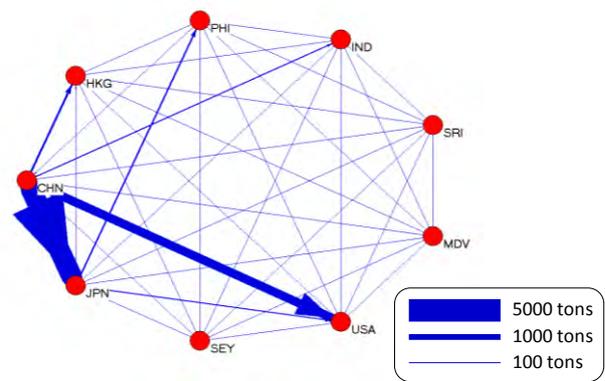


図 8 Hotspot11 番におけるネオジムの国際貿易構造

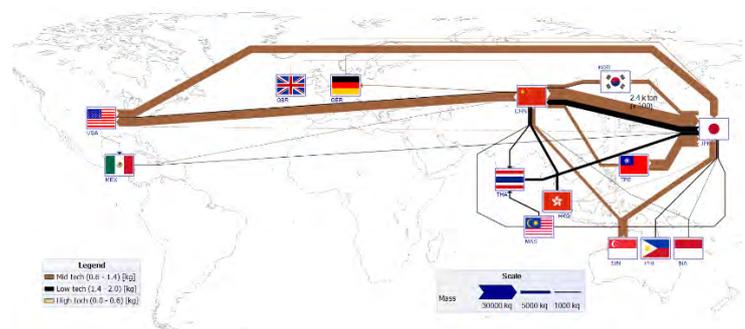


図 9 日本における耐久財に対する最終需要に関連したネオジムのマテリアルフットプリント(可視性向上のため、中国から日本へのフローは 100 分の 1 倍の幅で描いてある)

である。サプライチェーン全体を考慮した分析に用いられる)を、サプライチェーンの段階を追って遡及計算を行う手法と見なすことができる。したがって、典型的な SPA の応用研究では利用されないすべての構造経路を系統的に利用することができれば、生産ネットワーク構造を理解するために役立つと考えられる。そこで、本研究では、構造経路に基づく行列分解法 (Path-based Matrix Decomposition Analysis、PMDA) と名付けた新しい分析手法を開発した。PMDA により、複雑な生産ネットワークから重要な部分のみを抽出して簡略化し、図のかたちで可視化することが可能となった。その結果、例えば、ネオジムに関しては 675 個の構造経路が抽出された。抽出された構造経路が構成するネットワークのカバー率は 77.7%であった。国ごとの技術水準を考慮して「高技術水準国」「低技術水準国」にグループ分けすると、技術に関する各国の特性をカラースケールであらわしたネオジムのフロー (直接間接に誘発された採掘量) は図 9 のようなフロー図として表現できることを実証した。

財やサービスの 3R によるレアメタル国際依存量の軽減効果指標

課題③では、本研究では、財やサービスに対して「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」を行うことにより、わが国のレアメタルに対する国際な依存がどれくらい軽減するかを示す指標を開発した。まず、「リデュース」は財やサービスに対する需要の回避と考え、それに起因する財やサービスの生産減少によって生じるレアメタルの国際依存量の軽減を計測する。開発する指標は、単位需要 (百万円: M-JPY) 回避あたりの数値として定義する。「リユース」は財やサービスの長寿命化と捉え、寿命延長 (長期使用) に伴って減少する生産を考え、それによる依存量の軽減を計測する。開発する指標は、単位寿命延長 (一年) あたりの数値とする。「リサイクル」は製品含有中のレアメタルの回収により、回避される金属素材生産を考え、それに伴う依存量の軽減と理解する。指標は単位製品あたりとし、物量単位 (kg) または貨幣単位 (百万円相当分) で単位製品量を規定する。

これらの「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」の国際依存量の軽減指標は、まず基本となる原単位 (財やサービスの単位生産額 (百万円) あたりに誘引するレアメタル採掘量と誘引する国際フロー量) を算定し、単位生産額から単位を変換することで導出する。なお「リユース」に関する指標のための、寿命延長年を減少する需要額に変換する手法も開発した。基本となる財やサービスの原単位として、先に検討した国際フローの特性を鑑み、資源採掘量、資源採掘に関するリスク、国際フロー量、国際フローに関するリスク、国際フローの技術レベルに着目した 5 つの値を計算した。本研究で対象とした財・サービスの部門数は日本の国産品と輸入品を合わせて約 800 部門である。

結果の一例として、表 1 に財・サービスが誘発する国際フローをそのフローを形成する国々の貿易リスクによって重み付けして求めた、リスクを加味したネオジムに関する国際フローの大きい上位 10 部門を示す。リスクを加味しない場合のフローの大きい上位部門と変わりが無いことから、ネオジムの場合は貿易リスクを加味した場合でも誘発する国際フローが大きいことが国際依存の大きさを決定付けることを確認した。ネオジムは国際フローのほとんどが中国から日本へのフローであり、どの財やサービスもこの中国から日本へのフローに依存するため、リスクを加味してもフローの大きさのみを考慮する場合と変わらない結果となったと推察される。

表 1 ネオジムに関するリスクを加味した誘発国際フロー量の大きい上位 10 部門

Rank	Sector num	Sector name	Risk-weighted induced global flow	World share
			[%/M-JPY]	[-]
1	JD230	その他の電気機械器具	5.45E-06	1.19E-07
2	J1242	電子計算機付属装置	5.91E-07	1.29E-08
3	JD270	医療用機械器具	4.85E-07	1.06E-08
4	J1274	情報記録物	3.06E-07	6.67E-09
5	J1241	電子計算機本体（除パソコン）	2.77E-07	6.04E-09
6	JD248	その他の電子部品	2.49E-07	5.44E-09
7	J1240	パーソナルコンピュータ	2.08E-07	4.55E-09
8	JD254	自動車部品	1.61E-07	3.51E-09
9	J1237	携帯電話機	1.46E-07	3.19E-09
10	J1205	金属工作機械	1.21E-07	2.63E-09

日本の家計消費が依存する国際レアメタルフローの 2035 年までの変化

今日社会問題となっている少子高齢化とそれに伴う世帯構成の変化に着目し、今後の日本の家計消費需要が誘引する国内外のレアメタルの国際フロー量の 2035 年を対象とした長期予測を行った。6 つの世帯主年齢階級を世帯属性として、少子高齢化の影響を世帯属性ごとの世帯数および世帯人口（平均世帯人員数）の変化で表現し、公的統計等における過去のトレンドをもとに二次計画問題を解くことで、2035 年までの世帯別家計消費需要額を推計した。なお、この世帯別需要額は産業連関表に基づく約 800 の国産品部門および輸入品部門で詳細に定義されており、近年の国際会議で強調される社会会計表における値との整合も満たしている特長を有する。これと GLIO を用いて、2005 年から 2035 年までの国内家計消費由来の国際フロー量を推計した。

その結果、例えばネオジムでは 2035 年までに 491.5 t から 447.4 t の減少が見込まれ、少子高齢化に伴う世帯構成の変化は、今後のネオジムの国際フロー量を自然に低減させるということを示唆した。具体的には、ネオジムの場合、世帯数の変化によって 2.5%、世帯人口の変化によって 6.5%減少する。世帯別では、20s 以下と 30s の若年世帯における減少が目立つ一方、70s 以上の世帯における増大が際立っており、後者による増加分が僅かではあるが上回ることを確認した。

環境政策への貢献

本研究では、231 の国や地域を含むグローバルなシステム境界に基づきレアメタルの国際マテリアルフローを同定する手法を開発した。WIO-MFA によるレアメタルの製品含有率を併用し、数理計画法による調整を行う本手法は、レアメタルを含有する全ての貿易商品を含めることができるだけでなく、各国のレアメタルに関する質量保存則を保証することができる。推計にかかる費用を押さつつも網羅性と論理性を高めることができる方法論であり、わが国としてレアメタルの国際的な動態を経年的にモニタリングすることを支援することができる。推計から得られるレアメタルの

国際フローは、資源安全保障政策、資源のリサイクル政策を検討する上で世界を俯瞰する際に不可欠な数値情報となる。

同定したレアメタルの国際フローは非常に情報量が多いが、本研究ではその中で重要となる構造的特徴と抽出する方法論の開発を行った。一つは、レアメタル採掘量やレアメタルの国際フロー量を資源採掘国の政治的リスクや各国の貿易リスクの視点から観測する方法である。二つ目は、フローの特性を国の社会システム、科学技術レベルの違いに応じて分類 (Red-flow、Yellow-flow、Green-flow) することで、非効率的なレアメタル利用が懸念されるフローを認識する方法である。同様の方法で、どの貿易商品が非効率的なレアメタル利用に基づいているかを識別できる。各国の技術レベルの正確な分類には更に調査を要するが、世界における非効率的なレアメタル利用の発見は、レアメタルの持続的利用に向けて改善を要する国や製品の優先付けに資するものである。三つ目は、ネットワーク理論に基づくクラスタリング手法を開発し、レアメタルの国際フローにおける Hotspot (レアメタル利用が集約的な貿易国群) を検出する方法である。特に日本がどの Hotspot に含まれるかを知ることができるため、レアメタルの持続的利用に向けて日本がどの国々と共同すべきかを戦略的に選定することを理論的に支援する。これは、平成 25 年 5 月 31 日に閣議決定された第三次循環計画における国際的取り組みの推進の一つである「地球規模での循環型社会形成」の具体的な構造設計の基本材料となり得る。

世界全体のフローと日本経済との直接間接の関係性を知ることが、日本が暗黙的に抱えるレアメタルの国際依存量を把握する上で不可欠である。本研究では、GLIO を用いた日本の最終需要が誘引する国際フローを検出する方法論を開発し、国際依存量の定量化を世界で初めて可能にした。この方法論を個別の財やサービスに対して適用することで算定した約 800 の財やサービスに関する 5 種類の原単位は、今後の日本の社会・技術システムを設計する上で、常に日本の直接間接のレアメタルの国際依存量との関係を洞察することを可能にする。5 つの原単位とは、財のサービスの単位生産額(百万円)を回避することにより、どれくらいのレアメタル採掘量、採掘リスク、国際フロー量、国際フローリスク、非効率なレアメタル利用を軽減できるかを示すものである。同時に、本研究では製品利用の長寿命化によってどれくらいの新規需要が回避できるかを推算する方法論を開発しており、例えば、一年の寿命延長が何百万円の需要回避に相当するかを見積もることができる。したがって、約 800 の財やサービスに対する「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」がもたらす日本のレアメタル国際依存量の軽減効果を「見える化」することができる。こうした効果の「見える化」は、第三次循環計画においてリデュース、リユースの取り組みを支援する社会経済システムを構築する上で必須の要件であり、本研究成果の「見える化」によって望ましい技術システム、社会制度設計、消費者の選択を促進する。

迫りくる少子高齢化社会と日本のレアメタルの国際依存との関係を導出した 5 つの原単位と家計消費需要の将来予測を用いて解析した。推計結果からはネオジムの場合「民生用電気機器 (除エアコン)」や「携帯電話機」、「パーソナルコンピュータ」等の、レアメタルの使用用途先として容易に想像がつく電子機器部門による国際フロー量が 2035 年になっても大きいことが確認された。これは、3R 政策において、少子高齢化の進行による需要の変化の面からも、引

き続き現状の家電リサイクル法および小型家電リサイクル法の充実を進めることは効果的であることを支持する。また、2005 年から減少すると見られる「乗用車」および「自動車修理」に起因する国際フロー量については、将来的に電気自動車やハイブリッド自動車の普及次第で大きく変動する可能性が高い。今後大きく伸びていくことが予想される医療関係の需要の国際フロー量と合わせて、最優先でその低減のための取組みを要すると考えられる。一方で、多量のネオジムを原材料に含むMRI等の医療機械器具は、患者の治療が最優先事項である医療の特性から一概に古いものを使い続けることが良いかどうか、自動車の買替における CO₂ を解析対象とした先行研究 のように資源確保の面と併せて今後検討していくことが課題であろう。

また、本研究では複雑かつ情報量が多い国際フローの視認性を高める方法論の開発を行った。応用例として、国際レアメタルフローの量と技術的特性に関する情報などを含む図を作成した。これは、分析を行う専門家に対して気付きを与える手段であると同時に、政策担当者や一般市民にも理解しやすいかたちで情報を提供する手段として非常に有用である。例えば、様々なステークホルダーが参加して、耐久財の利用とその 3R 施策などに関する合意形成が必要な機会において、円滑な現況認識を支援する利用価値の高い方法論となる。

研究成果の実現可能性

本研究で開発した日本の財やサービスに対して「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」を行うことにより、わが国のレアメタルに対する国際な依存がどれくらい軽減するかを示す指標は、製品のレアメタルに関するフットプリントと同義といえる。本研究で得られた指標の数値自身の精度は今後も更に向上させていく必要はあるものの、フットプリントの基礎データとして政策担当者だけでなく企業の社会的責任（CSR）の管理においても実務的に利用される可能性は高いと考えられる。理由としては、UNEP（国連環境計画）の資源パネルによる「持続可能な資源利用」の提唱、Wiedmann et al¹によるグローバルなシステム境界に基づくマテリアルフットプリントの同定や米国ヴァージニア大学の James Galloway と Allison Leach が率いる個人の窒素フットプリント²把握の推進などに呼応し、国際的にもサプライチェーンを考慮した資源利用の把握と管理の重要性が増しており、製品レベル、組織レベルでの把握と管理が日本でも急速に展開される可能性は高い。温室効果ガス（GHG）の場合は、ISO（国際標準化機構）による製品や組織のカーボンフットプリント、GHG プロトコルによる SCOPE3 規格等に対応し、既に国内でも環境省、経済産業省による製品カーボンフットプリントの算定支援やサプライチェーンを通じた GHG の排出管理のためのガイドラインが策定されている。環境省はグリーンバリューチェーンプラットフォーム（<http://www.gvc.go.jp/>）を開設し、サプライチェーンを通じて排出量計算のためのデータベースを提供しており、そのデータは実際に多くの企業の実務担当者に利用されている。

¹ Wiedmann, T.O., Schandl, H., Lenzen, M., Moranc, D., Suh, S., West, J., Kanemoto, K., 2013. The material footprint of nations. *P Natl Acad Sci USA*.

² <http://www.n-print.org/>

このデータベースには、本研究が用いた産業連関モデルである global link input-output model (GLIO) によって算定されたグローバル GHG 排出原単位が組み込まれており、産業連関モデルによる原単位が実社会への適用が可能であることを示す。したがって、同様の構造を有する本研究で導出した財やサービスに関するレアメタルのフットプリントも十分に政策支援や企業の資源管理において活用される可能性は大いにありと考えられる。

結論

本研究で得られた成果は以下の 10 項目に結論付けられる。

1. 低炭素技術を支えるレアメタルの国際マテリアルフローの同定手法が開発された。
2. レアメタルの国際マテリアルフローを形成する主要国および商品が明示された。
3. 日本経済が暗黙的に依存するレアメタルの国際マテリアルフローが検出された。
4. 資源採掘国と貿易国のリスクを加味した日本経済のレアメタル国際依存量が定量化された。
5. レアメタルの国際フローにおいて優先的に技術改善をすべきフローが識別された。
6. 少子高齢化による日本のレアメタルの国際依存量の将来変化(2035 年)を予測し、医療需要が国際依存量を上昇させることが明示された。
7. ネットワーク理論に基づくクラスタリング手法を開発し、レアメタルの国際フローにおける Hotspot (レアメタル利用が集約的な貿易国群) が検出された。
8. 視認性の高い可視化に基づく国際レアメタルフローの経路解析手法が開発された。
9. 耐久消費財の使用延長と需要減少との関係を同定し、使用年数延長による国際依存量の低減効果の計測が可能となった。
10. リデュース、リユース、リサイクルによってどれくらい日本のレアメタル国際依存量を軽減できるかを“見える化”する指標が開発された。

研究発表

本研究では、以下 8 編の論文発表を行った。

- [1] Shigemi Kagawa, Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Tetsuya Nagasaka, Forecasting Replacement Demand of Durable Goods and the Induced Secondary Material Flows: A Case Study of Automobiles (2014), *Journal of Industrial Ecology (Forthcoming)* (IF@2012 = 2.276). (査読有)
- [2] Yasushi Kondo (2014) Triangulation of input-output tables based on mixed integer programs for inter-temporal and inter-regional comparison of production structures, *Journal of Economic Structure (Forthcoming)*. (査読有)
- [3] Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Sangwon Suh, Yosuke Shigetomi, and Yuko

Oshita (2014) Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt and platinum, *Environmental Science & Technology* (IF@2012 = 5.257), 43(3), 1391-1400. (査読有)

[4] Shigemi Kagawa, Klaus Hubacek, Keisuke Nansai, Minori Kataoka, Shunsuke Managi, Sangwon Suh, Yuki Kudoh (2013) Better cars or older cars?: Assessing CO₂ emission reduction potential of passenger vehicle replacement programs, *Global Environmental Change* (IF@2012 = 5.236), 23(6), 1807-1818. (査読有)

[5] Shigemi Kagawa, Shunsuke Okamoto, Sangwon Suh, Yasushi Kondo, and Keisuke Nansai (2013) Finding environmentally important industry clusters: Multiway cut approach using nonnegative matrix factorization, *Social Networks* (IF@2012 = 3.381), 35, 423-438. (査読有)

[6] Shigemi Kagawa, Sangwon Suh, Yasushi Kondo, and Keisuke Nansai (2013), Identifying environmentally important supply chain clusters in the automobile industry, *Economic Systems Research* (IF@2012 = 2.098), 25(3), 265-286. (査読有)

[7] 南斉規介、近藤康之、加河茂美 (2013)、(解説) GLIO を用いたグローバル環境負荷原単位データベースの開発、*日本 LCA 学会誌*、9(2)、101-107. (査読無)

[8] Ryu Koide, Chiharu Tokoro, Shinsuke Murakami, Tsuyoshi Adachi and Akihiro Takahashi (2012) A Model for Prediction of Neutralizer Usage and Sludge Generation in the Treatment of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines: Case Studies in Japan, *Mine Water and the Environment* (IF@2012 = 0.982), 31(4), 287-296. (査読有)

1. 研究背景と目的

低炭素社会の実現に向けた取り組みや東日本大震災を受けて、特にその重要性が増した新エネルギー技術に対する需要の高まりに呼応し、これらの技術性能の要となるレアメタルの需要増加が見込まれている。レアメタルは世界的に地理的潜在性が強く、投機による市場価格の高騰や中国などの資源産出国における資源ナショナリズムへの動きも懸念されている。その調達の100%を輸入に依存するわが国は、安定供給に向けた技術的、社会的取り組みを充実させる必要がある。こうした背景の中、経済産業省では、レアメタル確保戦略として海外資源確保、リサイクル、代替材料開発、そして備蓄を取り組みの柱として挙げている。リサイクルは、循環型社会の形成と共通する取り組みであり、明示的に焦点を当てられている。しかし、循環型社会の重要基盤である「リデュース」や「リユース」も資源の安定供給に貢献することを忘れてはならない。例えば、レアメタルを含む携帯電話をリユースして長期に使用すれば、新たな携帯電話の生産を回避することができるため、レアメタルの消費抑制に寄与する。また、直接的にはレアメタルを含まない製品やサービスであっても、そのサプライチェーンを通じて間接的にレアメタルを消費している製品やサービスのリデュースやリユースも、同様にわが国のレアメタルへの依存を軽減する効果が期待できる。第三次循環基本計画（平成25年5月31日閣議決定）では「リデュース」や「リユース」の促進が基本的方向性として位置付けられた。

一方、低炭素社会への取り組みに目を向けると、GHGプロトコルやISO（世界標準化機構）による製品や組織のカーボンフットプリントのように製品や企業活動に伴うサプライチェーンを通じた温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）排出量を算定する、いわゆる「見える化」が進んでいる。GHGの「見える化」により、生産者や消費者は自らの行動とGHG排出量との関係を定量的に理解することができる。ライフサイクルアセスメント（LCA: life cycle assessment）によって、「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」のGHG削減に対する効果も「見える化」されており、個人や企業レベルでの3R（Reduce、Reduce、Recycle）活動を促進し、低炭素社会への転換の一助となっている。見方を変えれば、レアメタルについても3R効果の「見える化」を図ることで、わが国のレアメタル依存を低減するという観点からも、3R活動を更に推し進めることが期待できる。しかしながら、現在ではまだ、製品やサービスのリデュースやリユースが持つレアメタルに対する依存低減効果を定量的に解明する研究は行われていない。

リサイクルについては、その定量的効果を指標によって計測する例が存在する。例えば、各元素の回収見込量をもとに「回収見込量÷資源の輸入量」を計測する例もある。この指標は比較的容易に計算できる利点があるが、二つの重要な視点を見落としている。一つは、「間接的な資源輸入の実

態」と「グローバルサプライチェーンを通じた資源依存の実態」である。前者は鉱石や地金だけでなく、製品中にも含有されて輸入される資源が無視できないほど存在すること、後者は、わが国は国内へ直接輸入される資源だけでなく、グローバルなサプライチェーンを通じた間接的な資源消費にも暗黙的に依存している現実を意味する。こうした直接的間接的な海外への資源依存無しに日本経済は成立しないことが現実であり、わが国にとって重要なことは、資源の消費量自身を低減させることだけでなく、如何に安定した資源依存を形成していくかである。したがって、レアメタルを対象とした「見える化」には、間接的な資源輸入とグローバルなシステム境界を考慮した「量」を捉えるのみならず、その「質」、つまり国際的な依存構造についても特性化する必要がある。この構造の特性化の必要性はGHGの「見える化」と大きく異なる点である。

そこで本研究では、日本経済の国際サプライチェーンを通じた包括的な資源依存の実態を踏まえ、日本の財やサービスに対する3R活動がどれだけ資源依存の低減（量と質）に貢献するかを定量的に示す新たな指標を開発し、主要なレアメタルを対象にその指標を計測することを目的とする。

2. 研究開発の全体構成

本研究は次の三つの課題で構成する。課題①は「レアメタルの国際マテリアルフローの実態把握とわが国との構造的関係性の解明」、課題②は「資源依存の安定性評価の枠組設計と定量化手法の開発」、そして課題③は「3R活動を対象とした資源依存安定性指標の計測」である。

課題①では、レアメタルがどのような貿易形態を通じて採取国から消費国へと移動しているかをマテリアルフロー分析（MFA: material flow analysis）によって解析し、世界各国間のレアメタルを通じた相互依存関係を理解する。そのため、本研究では世界231の国と地域を含むグローバルなシステム境界に基づく、レアメタルのMFAを可能とするための方法論を開発した（3.1参照）。なお、10種類のレアメタル（ネオジウム（Nd）、コバルト（Co）、プラチナ（Pt）、ニッケル（Ni）、クロム（Cr）、モリブデン（Mo）、タングステン（W）、チタン（Ti）、タンタル（Ta）、リチウム（Li））に焦点を当てた。次に、明らかとなったレアメタルの国際フローの中で、わが国が直接的間接的に依存している部分を同定するモデルを開発し（3.2参照）、日本の最終需要が依存するレアメタルの国際フローを特定した。

課題②では、レアメタルの「見える化」に必要な、資源依存の“量”的要素である消費量に加え、“質”的な要素を検討するためにレアメタル国際フローの構造特性を分析する。本研究では、国際フローに存在する資源採掘国の政治的リスク、採掘後から加工そして最終製品に至る国際サプライチェーンに内在する貿易リスクを“質”的要素の一つとして、それらの分析方法の開発を行った（3.3.1

参照)。加えて、資源の消費量が同じであっても、それが効率的であるか非効率的であるかの違いがあることを“質”的要素として理解し、レアメタルの国際サプライチェーンを3つに分類する方法論を開発した(3.3.2 参照)。更に、レアメタルの国際フローから核となる国際貿易を検出する全く新しい解析手法の開発や(3.4 参照)、複雑な国際フローを如何なるステークホルダーに対しても容易な理解を支援するための視認性の高い視覚化手法を開発し(3.5 参照)、資源フローの新たな“質”的要素の定量化と“見える化”手法の提案を行った。

課題③では、課題①②で開発した方法論を利用して、日本の財やサービスに対して「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」を行うことにより、わが国のレアメタルに対する国際な依存がどれくらい軽減するかを示す指標を設計した。これらの「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」の国際依存量の軽減指標は、まず基本となる原単位(財やサービスの単位生産額(百万円)あたりの国際依存量)を算定し、単位生産額から単位を変換することで導出する。本研究では、日本の国産品と輸入品の約800の財やサービスを対象に原単位を算定した(3.6 参照)。なお「リユース」に関する指標の単位換算のため、寿命延長年を減少需要額に変換する方法論も開発した(3.7 参照)。最後に、少子高齢化による人口減少と世帯構成の変化を組み入れて家計消費の将来需要を推計するモデルを開発し、日本のレアメタル国際依存量の2035年までの将来変化を解析した(3.8 参照)。

以下に本研究で開発した個々の手法論について詳細を記述する。

3. 研究方法

3.1 全世界を対象としたレアメタルに関するマテリアルフロー分析手法

3.1.1 国際貿易に伴うレアメタル国間移動量の推計

本研究では、低炭素化技術や新エネルギー技術の今後の更なる普及に伴い、将来的に需要の増加が見込まれるレアメタルの中から10種類(ネオジウム(Nd)、コバルト(Co)、プラチナ(Pt)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)、タングステン(W)、チタン(Ti)、タンタル(Ta)、リチウム(Li))に焦点を当て、全世界をシステム境界とするマテリアルフロー分析手法を開発した。

まず、国際貿易で取引される商品の中から、推計対象とするレアメタルを含有する商品 k を可能な限り網羅的に選定した。国際標準的な貿易分類コードであるHS(Harmonized System)コードから、対象とするレアメタルを含有していると考えられる商品のHSコード(2桁、4桁または6桁コード)をレアメタルの種類ごとに抽出した。

次に、選定した各商品の国 i と国 j 間の貿易量 $v_{ij}^{(k)}$ を国際連合の貿易統計であるUNComtradeのミ

ラーリング問題を改良した BACI (Base pour l'Analyse du Commerce International) を用いて金額ベース (FOB 価格) または重量ベースで整備した。ミラーリング問題とは、同一商品であるにも関わらず、輸出国が報告する輸出量と輸入国が報告する輸入量が異なる問題である。システム境界として、231 の国や地域 ($i, j=1\dots 231$) を考慮し、対象年次は 1995 年から 2010 年までとした。

ここで必要なことは、貿易量 $v_{ij}^{(k)}$ からレアメタルを含む貿易量だけを抽出することである。本研究では、実際の工場が存在せず生産不可能な場合や他の資源フローに関する統計情報に全く記述がないなどの情報を参考とし、商品 k を輸出していても、それには対象とするレアメタルを含まないと推察できる国 i については該当する貿易量 $v_{ij}^{(k)}$ を 0 に置換した。また、比較的詳細な 6 桁分類での HS コードで商品 k を定義している場合でも、その中には複数の異なる商品が該当するコードがあり、レアメタルを含有する商品はその一部であることがある。本研究では、データ収集の困難性を鑑み、基本的に国 i の商品 k 別にカットオフ値 $r_i^{(k)}$ を設定し、これを貿易量 $v_{ij}^{(k)}$ に乗じることで、レアメタル含有商品の貿易量の推計精度を高めた。

続いて、選定した各商品のレアメタル含有率を国 i 別に $c_i^{(k)}$ を設定した。商品を (1) 鉱石、(2) 材料、(3) 部品・最終製品、(4) 屑・副産物の 4 区分に大別し、区分毎にレアメタル含有率を定めた。(1) 鉱石および (2) 材料に該当する商品 (HS コード) については、精鉱品位や化合物の組成式や ISO (International Organization for Standardization) や JIS (Japanese Industrial Standards) などの工業規格で定められた含有率を参考に、可能な限り単位重量あたりのレアメタル含有量を設定した。(3) 部品・最終製品と (4) 屑・副産物に区分された商品については、学術論文、技術報告書、LCA (Life cycle assessment) 用のインベントリデータを参照し、単位重量あたりまたは単位生産額あたりのレアメタル含有量を推計した。こうしたボトムアップの調査により定められた含有率は信頼性が極めて高いが、その一方で、この種の分解調査には費用が掛かることもあり、データが得られる商品の種類が限られる。そのため、ボトムアップの調査データからだけでは、本研究で選定した全ての商品にレアメタル含有率を設定することができない。本研究では、日本の産業連関表と歩留まりなどの技術データを利用して WIO-MFA (Waste Input-Output Material Flow Analysis) モデル³により推計した部門別の単位生産額あたりのレアメタル含有量を用いた。ただし、WIO-MFA による推計値に関して、レアメタルの推計値は 2000 年産業連関表に基づくことから、『1995-2000-2005 年接続産業連関表』におけるデフレーターを用いて基準価格が推計年に対応するよう補正を行った。WIO-MFA を用いたトップダウン的な金属含有量の推計は、理論的に日本で生産される全ての商品

³ Nakamura, S.; Nakajima, K.; Kondo, Y.; Nagasaka, T. The Waste Input-Output Approach to Materials Flow Analysis. J. Ind. Ecol. 2007, 11, 50-63

を対象に行うため、本研究で選定した商品は必ず WIO-MFA のいずれかの部門と対応する。そのため、HS コードと日本の産業連関表との対応関係に準じて、両者に対応させ、ボトムアップでの含有率が得られない商品に対しては、WIO-MFA により推計された含有率を設定することで、国際貿易の商品に含有されるレアメタルの網羅性を高めた。なお、商品 k について国 ij 間で固有のカットオフとレアメタル含有率が得られる場合には、それらを $r_{ij}^{(k)}$ および $c_{ij}^{(k)}$ として与えた。

最後に、各商品の国間貿易量と設定したカットオフ値およびレアメタル含有率を乗じ、商品の貿易により生じる国間のレアメタル移動量を式(1)にて算定した。なお、ここで $\theta_{ij}^{(k)}$ は国 ij 間に対して固有のカットオフと含有率を設定した場合に 1 とし、それ以外の場合は 0 を取る変数である。

$$t_{ij}^{(k)} = v_{ij}^{(k)} r_i^{(k)} c_i^{(k)} (1 - \theta_{ij}^{(k)}) + v_{ij}^{(k)} r_{ij}^{(k)} c_{ij}^{(k)} \theta_{ij}^{(k)} \quad (1)$$

この推計した移動量 $t_{ij}^{(k)}$ の妥当性を検証するため、国 j におけるレアメタルのマテリアルバランス（質量保存則）を次のように確認した。一国におけるレアメタルの入出力を簡単に表現すると、入力となるのは、国 j において地球から採掘した量 g_j と輸入品に含まれ国 j に入ったレアメタル量 $m_j = \sum_k \sum_i t_{ij}^{(k)}$ 、リサイクルにより廃棄物から再生された量 w_j 、一年以上前に生産された在庫品に含有する量 z_j である。一方、出力となるのは、輸出品に含まれ国 j から出たレアメタル量は $e_j = \sum_k \sum_i t_{ji}^{(k)}$ と計算できる。レアメタルのリサイクルによる再生の現状を鑑み $w_j = 0$ と仮定し、また在庫の推計が困難であるため同様に $z_j = 0$ と仮定すると、入力量から出力量を引いた差分 $s_j = g_j + m_j - e_j$ は国 j に新たに蓄積した量（廃棄物として社会に蓄積する量も含む）と理解することができる。したがって理論上、蓄積量 s_j は少なくとも 0 以上となる。しかし、貿易データそのものの不確実性やレアメタル含有率が日本の製品に関する値に限られるなど、利用できるデータに制約があることから、いくつかの国の s_j がマイナスの値を示しマテリアルバランスの不整合が認められた。なお、資源の採掘量 g_j は USGS (U.S. Geological Survey) 等の資料を用いて推計した。本研究では各国のマテリアルバランスの不整合を解消するため、数理計画法を用いてレアメタル移動量の調整を行った。

3.1.2 数理計画法（二次計画法）を用いた国別マテリアルバランスの調整

マテリアルバランスの不整合を解消するには、貿易データのカットオフ $r_i^{(k)}$ と含有率 $c_i^{(k)}$ のデー

タ収集を更に行い実態的な数値を入力した思考錯誤が必要となる。しかしながら、とりわけ世界各国の製品を対象とするレアメタル含有率の入手は極めて困難であるため、本研究では以下の最適化問題を解くことでレアメタル移動量を調整し、マテリアルバランスの不整合を解消した。

商品 k に伴う国間のレアメタル移動量 $t_{ij}^{(k)}$ は式(1)より推計する。 $v_{ij}^{(k)}$ は公的な貿易統計から引用しているため、本研究では $t_{ij}^{(k)}$ の誤差によるマテリアルバランスの不整合の原因をカットオフ $r_i^{(k)}$ またはレアメタル含有率 $c_i^{(k)}$ の設定に起因すると仮定し、 $r_i^{(k)}$ と $c_i^{(k)}$ を調整することでマテリアルバランスの調整を行った。

先述した方法で設定した $r_i^{(k)}$ および $c_i^{(k)}$ の信頼性は商品 k によって異なる。例えば、(1) 鉱石や (2) 材料、 (4) 屑・副産物に該当する商品 k の場合、実際の品位や ISO の規格などからボトムアップの推計により $c_i^{(k)}$ を設定しており、 $c_i^{(k)}$ の信頼性は比較的高い。一方、(3) 部品・最終製品の場合、多くを WIO-MFA によるトップダウンの推計値を適用しており、 $c_i^{(k)}$ の信頼性はボトムアップの値と比べて高くはない。また、カットオフ $r_i^{(k)}$ の設定は、利用した貿易データ BACI における商品 k の定義に依存する。例えば、自動車の場合は、BACI で自動車のみを対象とする商品 k が存在し、 $r_i^{(k)}=1$ とすればよい。しかし、多種類の商品が混在する商品 k では、 $r_i^{(k)}$ の正確な設定は難しく、その信頼性は劣る。

本研究では、上述のような商品 k のレアメタル移動量 $t_{ij}^{(k)}$ の推計根拠を鑑み、次の 4 種類に最適化による調整方法を分類した。(A) $t_{ij}^{(k)}$ は調整をしない、(B) $c_i^{(k)}$ は調整せず、 $r_i^{(k)}$ のみ調整する、(C) $r_i^{(k)}$ は調整せず $c_i^{(k)}$ (質量あたりの含有率の場合) のみ調整する、(D) $r_i^{(k)}$ は調整せず $c_i^{(k)}$ (価格あたりの含有率の場合) のみ調整する (E) $r_i^{(k)}$ と $c_i^{(k)}$ を共に調整する。ここで、変数 $x_i^{(k)} = r_i^{(k)} c_i^{(k)}$ を定義すると、上記 (A) から (E) の調整を行った後の $\bar{x}_i^{(k)}$ は以下の(2)から(5)制約を満たす。

$$\bar{x}_i^{(k)} = r_i^{(k)} c_i^{(k)} \quad \text{when } k \in A \quad (2)$$

$$0 \leq \bar{x}_i^{(k)} \leq c_i^{(k)} \quad \text{when } k \in B \quad (3)$$

$$0 \leq \bar{x}_i^{(k)} \leq r_i^{(k)} \quad \text{when } k \in C \quad (4)$$

$$0 \leq \bar{x}_i^{(k)} \quad \text{when } k \in D \text{ or } k \in E \quad (5)$$

なお、個別に $r_{ij}^{(k)}$ と $c_{ij}^{(k)}$ を与えた場合には、 $x_{ij}^{(k)} = r_{ij}^{(k)} c_{ij}^{(k)}$ として推計し、分類 A と同様に値の調整は行わない。したがって、調整後のレアメタル移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ は次式で表すことができる。ここで $\eta_i^{(k)}$ は式(2)の分類 A の条件を与えた場合を 1 とし、それ以外の場合は 0 を取る定数である。

$$\bar{t}_{ij}^{(k)} = v_{ij}^{(k)} \bar{x}_i^{(k)} (1 - \eta_i^{(k)}) + v_{ij}^{(k)} x_{ij}^{(k)} \eta_i^{(k)} \quad (6)$$

したがって、国 j の調整後の蓄積量 \bar{s}_j は式(7)となる。

$$\bar{s}_j = g_j + \sum_k \sum_i \bar{t}_{ij}^{(k)} - \sum_k \sum_i \bar{t}_{ji}^{(k)} \quad (7)$$

ここで、レアメタルの総移動量自身は調整後においても初期の推計値と不変と仮定する。

$$\sum_i \sum_i \sum_j \bar{t}_{ij}^{(k)} = \sum_i \sum_i \sum_j t_{ij}^{(k)} \quad (8)$$

加えて、国 j の輸出品に含まれるレアメタルの量について、商品の加工度の順序を考慮して次のような制約を課す。まず、鉱石 ($k \in O$) に含有され輸出されるレアメタル量は国 j の採掘量と鉱石として輸入されたレアメタル量の和より小さいとする。

$$g_j + \sum_{k \in O} \sum_i \bar{t}_{ij}^{(k)} \geq \sum_{k \in O} \sum_i \bar{t}_{ji}^{(k)} \quad (9)$$

同様に、素材として輸出される量 ($k \in M$)、部品・製品として輸出される量 ($k \in P$)、屑・廃棄物として輸出される量 ($k \in S$) は以下の制約を満たす。

$$g_j + \sum_{k \in O, M} \sum_i \bar{t}_{ij}^{(k)} \geq \sum_{k \in M} \sum_i \bar{t}_{ji}^{(k)} \quad (10)$$

$$g_j + \sum_{k \in O, M, P} \sum_i \bar{t}_{ij}^{(k)} \geq \sum_{k \in P} \sum_i \bar{t}_{ji}^{(k)} \quad (11)$$

$$g_j + \sum_{k \in O, M, P, S} \sum_i \bar{t}_{ij}^{(k)} \geq \sum_{k \in S} \sum_i \bar{t}_{ji}^{(k)} \quad (12)$$

非負条件として、以下を与える。

$$\bar{x}_i^{(k)} \geq 0, \quad \bar{s}_j^{(k)} \geq 0, \quad \bar{t}_{ij}^{(k)} \geq 0 \quad (13)$$

式(2)–(13)を制約条件とし、式(14)のように最初と調整後の移動量の差の二乗和を最小とすることを目的関数として二次計画法を解いた。本研究では $\bar{x}_i^{(k)}$ の最適解を式(6)に代入して求めたレアメタル移動量に基づき世界全体のマテリアルフローの解析を行った。

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_i \sum_j \left(\bar{t}_{ij}^{(k)} - t_{ij}^{(k)} \right)^2 \quad (14)$$

$$\text{With respect to } \bar{x}_i^{(k)}, \quad \bar{s}_j^{(k)}, \quad \bar{t}_{ij}^{(k)} \quad (15)$$

3.2 日本経済が依存する国際レアメタルフローの検出と採掘量の算定手法

3.2.1 GLIO を用いた日本の最終需要が誘引する国際レアメタルフローの同定

3.1 によって得られた国間のレアメタルフロー $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ から日本経済と直接的間接的に関係するフローを検出する。直接的に関係するフローは、レアメタルを含む貿易商品の日本の輸入と輸出である。一方、間接的に関係するフローとは、そうした日本の輸出入と関係して生じる日本以外の国間での貿易に伴うレアメタルのフローである。本研究では、Global link input-output model (GLIO) ⁴ にレアメタルの国際フロー $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ を組み込み、日本の最終需要によって直接的間接的に生じるフローの同定を以下のように行った。

GLIO では日本の国産品 ($i_1 = 1 \dots 406$) に関する生産額、日本の最終需要への直接輸入品 ($i_2 = 1 \dots 406$) に関する生産額 $\mathbf{x}^{II} = (x_{i_2}^{II})$ の需給均衡、国外地域 ($p = 1 \dots 230$) におけるレアメタルの供給量 $\tilde{\mathbf{x}}^G = (\tilde{x}_p^G)$ のマテリアルバランスを式(16)によって定式化を行う。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^{JD} \\ \mathbf{x}^{II} \\ \tilde{\mathbf{x}}^G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}^I & 0 & \mathbf{X}^{III} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sum_k \tilde{\mathbf{Y}}^{I(k)} & \sum_k \tilde{\mathbf{Y}}^{II(k)} & \sum_k \tilde{\mathbf{Y}}^{III(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}^{JD} \\ \mathbf{i}^{II} \\ \mathbf{i}^G \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{f}^{JD} \\ \mathbf{f}^{II} \\ \tilde{\mathbf{f}}^G \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここで、行列 $\mathbf{X}^I = (x_{i_1, j_1}^I)$ は日本の国産品部門間 (i_1, j_1) の取引を示す中間投入行列であり、行列 $\mathbf{X}^{III} = (x_{i_1, q}^{III})$ は国産品部門から国外部門 q への輸出額を示す。一方、行列 $\tilde{\mathbf{Y}}^{I(k)} = (\tilde{Y}_{p, i_1}^{I(k)}) \tilde{\mathbf{Y}}^{I(k)}$ は国外部門から国産品部門へ、 $\tilde{\mathbf{Y}}^{II(k)} = (\tilde{Y}_{p, j_2}^{II(k)}) \tilde{\mathbf{Y}}^{II(k)}$ は国外部門から最終需要部門へ、 $\tilde{\mathbf{Y}}^{III(k)} = (\tilde{Y}_{pq}^{III(k)}) \tilde{\mathbf{Y}}^{III(k)}$ は国外部門間でのレアメタルの移動量を示す。なお、添え字の k は貿易商品の種類を示す。

ベクトル $\mathbf{f}^{JD} = (f_{i_1}^{JD})$ と $\mathbf{f}^{II} = (f_{i_2}^{II})$ はそれぞれ国産品と最終需要輸入品に対する日本の最終需要額を、 $\tilde{\mathbf{f}}^G = (\tilde{f}_p^G)$ は国外部門に追加的に蓄積された（廃棄物として存在する量も含む）レアメタル量を示す。ベクトル \mathbf{i}^{JD} 、 \mathbf{i}^{II} 、 \mathbf{i}^G は全ての要素が 1 の集計ベクトルを指す。

貨幣単位 (Million yen: M-JPY) のベクトル \mathbf{x}^{JD} 、 \mathbf{x}^{II} 、 \mathbf{f}^{JD} 、 \mathbf{f}^{II} および行列 \mathbf{X}^I 、 \mathbf{X}^{III} について

⁴ Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Sangwon Suh, Rokuta Inaba and Kenichi Nakajima (2009), Improving the completeness of product carbon footprints using a global link input-output model: the case of Japan, *Economic Systems Research*, 21(3), 267-290

は、先行研究⁵で用いた経済データを同じデータを適用した。一方、物量単位の $\hat{\mathbf{x}}^G$ には、先に推計した国 p でのレアメタルの採掘量 \mathbf{g}_j と輸入量 $\sum_k \sum_i \bar{t}_{ij}^{(k)}$ との和を代入した。

$\tilde{\mathbf{Y}}^{\mathbf{I}(k)}$ と $\tilde{\mathbf{Y}}^{\mathbf{III}(k)}$ は、日本 ($j=231$) へのレアメタルの移動量 $\bar{t}_{i,231}^{(k)}$ を日本の国産品部門 j_1 と最終需要の輸入品部門 j_2 に配分して決定した。 $\bar{t}_{i,231}^{(k)}$ の配分は、貿易商品 k と日本の産業連関表に付帯の輸入表における商品分類 i_0 (部門 i_1 と同じ分類) との対応を取った。輸入表から国内内生部門および最終需要部門の中で輸入品 i_0 を投入する部門がわかる。輸入品 i_0 には実際には貿易商品 k 以外の複数の貿易商品 (対象とするレアメタルを含まない) が該当することから、輸入品 i_0 を投入する部門であっても必ずしもその全てが貿易商品 k ではない。そこで本研究では、まず、その輸入品 i_0 を投入する部門の中から、着目するレアメタルを含む貿易商品 k を投入する部門の技術情報等を参考に選定した。次に、輸入表から得られる選定した部門に対する国産品部門 j_1 と最終需要の輸入品部門 j_2 への輸入品 i_0 の供給額を参考に $\bar{t}_{i,231}^{(k)}$ の按分量を決定した。

$\tilde{\mathbf{Y}}^{\mathbf{III}(k)}$ には日本を除く国 ij 間の移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ を充当し、 $\tilde{\mathbf{f}}^G$ は追加的ストック量 $\bar{s}_j^{(k)}$ を用いた。したがって、式(16)はマテリアルフロー分析によるレアメタルの国際移動量に基づく数値であるため、国外部門におけるレアメタルに関するマテリアルバランスは担保されている。

続いて、投入係数行列のブロック行列を以下のように定義し、これらのブロック行列で構成される行列 \mathbf{A} を式(22)のように定義した。

$$\mathbf{A}_{11} = \mathbf{X}^{\mathbf{I}}(\hat{\mathbf{x}}^{JD})^{-1} \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{13} = \mathbf{X}^{\mathbf{III}}(\hat{\mathbf{x}}^G)^{-1} \quad (18)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{31}^{(k)} = \tilde{\mathbf{Y}}^{\mathbf{I}(k)}(\hat{\mathbf{x}}^{JD})^{-1} \quad (19)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{32}^{(k)} = \tilde{\mathbf{Y}}^{\mathbf{III}(k)}(\hat{\mathbf{x}}^{JI})^{-1} \quad (20)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{33}^{(k)} = \tilde{\mathbf{Y}}^{\mathbf{III}(k)}(\hat{\mathbf{x}}^G)^{-1} \quad (21)$$

⁵ Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Sangwon Suh, Kenichi Nakajima, Rokuta Inaba, Yuko Oshita, Takashi Morimoto, Kazumasa Kawashima, Takuji Terakawa, and Susumu Tohno (2012) Characterization of economic requirements for a "carbon-debt-free country", *Environmental Science & Technology*, 46(1), 155-163.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & 0 & \tilde{\mathbf{A}}_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sum_k \tilde{\mathbf{A}}_{31}^{(k)} & \sum_k \tilde{\mathbf{A}}_{32}^{(k)} & \sum_k \tilde{\mathbf{A}}_{33}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (22)$$

また、日本の国内最終需要ベクトル $\mathbf{f}^{JPD} = (\mathbf{f}^{JD} \quad \mathbf{f}^{JI} \quad \mathbf{0})'$ と国産品 i_1 のレアメタル含有率 $d_{i_1}^{JD}$ を要素とするベクトル $\mathbf{d}^{JD} = (d_{i_1}^{JD})$ を含むベクトル $\mathbf{d} = (\mathbf{d}^{JD} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{i}^G)$ を定義する。なお、上付き'はベクトルと転置を示す。これらの行列とベクトルを用いて式(23)を計算すると、行列 \mathbf{N}^{JPD} を得ることができる。行列 \mathbf{N}^{JPD} を式(24)のようにブロック行列に分解すると、ブロック行列 \mathbf{N}_{11} 、 \mathbf{N}_{13} 、 \mathbf{N}_{31} 、 \mathbf{N}_{32} 、 \mathbf{N}_{33} を得ることができる。 \mathbf{N}_{31} は日本の国内最終需要によって誘引された国外部門から国産部門へのレアメタルのフロー、 \mathbf{N}_{32} は国外部門から最終需要部門へのフローを示す。 \mathbf{N}_{33} は日本の国内最終需要に起因する国外部門間のレアメタルのフローを表す。 \mathbf{N}_{13} は日本の国内最終需要に起因する日本から国外部門への輸出に伴うフロー、最後に \mathbf{N}_{11} は国産品部門間でのフローである。 \mathbf{I} は単位行列である。

$$\mathbf{N}^{JPD} = \hat{\mathbf{d}}\mathbf{A} \left(\text{diag}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}^{JPD} \right) \quad (23)$$

$$\mathbf{N}^{JPD} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11} & 0 & \mathbf{N}_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{N}_{31} & \mathbf{N}_{32} & \mathbf{N}_{33} \end{pmatrix} \quad (24)$$

したがって、式(25)のように行列 \mathbf{N}_{13} 、 \mathbf{N}_{31} 、 \mathbf{N}_{32} における国内部門を 1 部門に統合し、 \mathbf{N}_{33} と結合することで、国 ij 間のレアメタルフローを示す行列 $\mathbf{T}^{JPD} = (t_{ij}^{JPD})$ してまとめることができる。このフローは世界全体のレアメタルフロー $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ から検出された日本の国内最終需要に起因するレアメタルフローである。

$$\mathbf{T}^{JPD} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{33} & (\mathbf{N}_{31}\mathbf{i}^{JD} + \mathbf{N}_{32}\mathbf{i}^{JI}) \\ (\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13} & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

日本の最終需要には国内最終需要に加えて輸出需要がある。輸出需要は日本から国外へレアメタルを直接移動させるが、同時に国外から日本への輸入と国外間での貿易を誘発する。すなわち、輸出需要もレアメタルの国際フローに依存している。本研究では、次のように日本の輸出需要に伴うレアメタルの国際フローを定量化した。

まず、国産品 i_1 に対する輸出額 $f_{i_1}^{JDX}$ を要素とするベクトル $\mathbf{f}^{JDX} = (f_{i_1}^{JDX})$ を含む日本の輸出需要

ベクトル $\mathbf{f}^{JPX} = (\mathbf{f}^{JD} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})'$ を定義する。先と同様に、 \mathbf{f}^{JPX} を用いて式(26)を求めると、式(27)のブロック行列が得られる。それを式(28)のように集約すると行列 $\mathbf{T}^{JPX} = (t_{ij}^{JPX})$ を導くことができる。

$$\mathbf{N}^{JPX} = \hat{\mathbf{d}}\mathbf{A}(\text{diag}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}^{JPX}) \quad (26)$$

$$\mathbf{N}^{JPX} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11}^{JPX} & \mathbf{0} & \mathbf{N}_{13}^{JPX} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{N}_{31}^{JPX} & \mathbf{N}_{32}^{JPX} & \mathbf{N}_{33}^{JPX} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{T}^{JPX} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{33}^{JPX} & (\mathbf{N}_{31}^{JPX} \mathbf{i}^{JD} + \mathbf{N}_{32}^{JPX} \mathbf{i}^{JI}) \\ (\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13}^{JPX} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (28)$$

この時、MRIO (Multiregional input-output model) の特性から、式(28)のブロック行列 \mathbf{N}_{13}^{JPX} は日本の輸出需要 \mathbf{f}^{JPX} によって誘引された日本の輸出に伴うレアメタル移動量を示す。つまり、 \mathbf{f}^{JPX} により追加的な輸出を計算する。この追加的な輸出量の総量を $\alpha = (\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13}^{JPX} \mathbf{i}^G$ とする。一方、既に式(25)から国内最終需要 \mathbf{f}^{JPD} により誘発される日本の輸出量 $(\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13}$ が求められている。いま、この輸出量を $\beta = (\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13} \mathbf{i}^G$ とする。しかし、実際には日本の輸出に伴うレアメタルの移動量は $\sum_k \sum_j \bar{t}_{231,j}^{(k)} = \mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX}$ であり、この量には原理的に $\beta = (\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13} \mathbf{i}^G$ が含まれている。そのため、 $\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX} - \beta$ が実際の輸出需要に伴う日本からのレアメタル移動量となる。式(28)による日本の輸出需要に伴う国際的なレアメタルフロー \mathbf{T}^{JPX} は、日本から移動量が $\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX}$ に加えて $\alpha = (\mathbf{i}^{JD})' \mathbf{N}_{13}^{JPX} \mathbf{i}^G$ も含めた量に基づいている。そのため、 \mathbf{T}^{JPX} を式(29)のように移動量を $\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX} - \beta$ に基づくように補正を行った。

$$\bar{\mathbf{T}}^{JPX} = \mathbf{T}^{JPX} \times \frac{\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX} - \beta}{\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX} + \alpha} \quad (29)$$

この $\bar{\mathbf{T}}^{JPX}$ と \mathbf{T}^{JPD} の和を $\mathbf{T}^{JP} = (t_{ij}^{JP}) = \mathbf{T}^{JPD} + \bar{\mathbf{T}}^{JPX}$ とすると、 t_{ij}^{JP} は世界全体のレアメタルフロー $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ から抽出された日本の最終需要に起因するレアメタルフローを示し、日本経済が直接間接的に依存するレアメタルの国際フローと理解することができる。なお、 t_{ij}^{JP} による日本へのレアメタル輸入量 $\sum_i t_{i,231}^{JP}$ と先に推計した国際マテリアルフロー分析による日本へのレアメタル輸入量との

$\sum_k \sum_i \bar{t}_{i,231}^{(k)}$ との差は約±2%と小さく、国際マテリアルフロー分析の結果との整合性は担保されていることを確認している。

3.2.2 GLIO を用いた日本の最終需要が誘引するレアメタル採掘量の算定

日本の国内最終需要が誘発するレアメタルの国 p の採掘量 g_p^{JPD} を求めるには、まず式(30)により各国のレアメタル生産量 $\tilde{\mathbf{x}}^{G(JPD)}$ を算定する。次に、国 q の生産量に対する採掘量の割合を要素とする行ベクトル $\mathbf{r}^G = (r_q)$ を式(31)のように得られた生産量に乗じることで、 g_q^{JPD} を要素とするベクトルを $\mathbf{g}^{JPD} = (g_q^{JPD})$ 算定する。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^{JD(JPD)} \\ \mathbf{x}^{JI(JPD)} \\ \tilde{\mathbf{x}}^{G(JPD)} \end{pmatrix} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}^{JPD} \quad (30)$$

$$\mathbf{g}^{JPD} = \hat{\mathbf{r}}^G \tilde{\mathbf{x}}^{G(JPD)} \quad (31)$$

一方、輸出需要に伴う採掘量を算定する場合は、式(29)と同様に生産量を調整する必要がある。そのため、まず、式(32)により輸出需要による生産額を求め、それを式(33)による補正を行って採掘量を決定する必要がある。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^{JD(JPX)} \\ \mathbf{x}^{JI(JPX)} \\ \tilde{\mathbf{x}}^{G(JPX)} \end{pmatrix} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}^{JPX} \quad (32)$$

$$\mathbf{g}^{JPX} = \hat{\mathbf{r}}^G \tilde{\mathbf{x}}^{G(JPX)} \times \frac{\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX} - \beta}{\mathbf{d}^{JD} \mathbf{f}^{JPX} + \alpha} \quad (33)$$

3.3 各国の特性に着目した国際レアメタルフローの構造評価

3.2 で求めた日本の最終需要が誘引するレアメタルのフローや採掘量に対して、各国の特性を考慮して評価する方法論の開発を行った。

3.3.1 各国の経済的・政治的リスクに着目した国際レアメタルフローの特性評価

式(25)により日本の国内最終需要が誘引する国際レアメタルフローが $\mathbf{T}^{JPD} = (t_{ij}^{JPD})$ として得ら

れる。本研究では、この移動量 t_{ij}^{JPD} に対して輸出国 i に関するリスク指標 η_i （リスクが高いほど数値が大きい）を用いてフローを重み付けすることで、リスクを加味したフローの特性を評価した。特に、貿易に関わるリスクに着目し、Fraser Institute による Economic freedom of the world の値の逆数を偏差値に換算した値を η_i に適用した。

重みづけは、式(34)のようにフローの大きさとリスクが 1 対 1 の重みとなるように、国 ij 間の移動量を世界全体のフローに占める割合（%）に変換し、各国のリスク指標も世界全体に対する割合（%）に変換して乗じることで、リスクを加味したフロー ρ_{ij}^{JPD} を計算した。更に、式(35)のように ρ_{ij}^{JPD} を世界全体のリスク換算されたフロー量で除することで、世界全体のリスクに対する ρ_{ij}^{JPD} の割合 $\rho_{ij}^{JPD}(-)$ を求め、異なるレアメタル間でのリスクの比較を可能にした。 $\rho_{ij}^{JPD}(-)$ を国 ij について集計することで、日本の国内最終需要が誘引するレアメタルのフローに関するリスクが世界の何%に相当するかを知ることができる。

$$\rho_{ij}^{JPD} = \frac{100 \times t_{ij}^{JPD}}{\sum_j \sum_i \sum_k \bar{t}_{ij}^{(k)}} \times \frac{100 \times \eta_i}{\sum_i \eta_i} \quad (34)$$

$$\rho_{ij}^{JPD}(-) = \rho_{ij}^{JPD} / \sum_j \sum_i \sum_k \left(\frac{100 \times \bar{t}_{ij}^{(k)}}{\sum_j \sum_i \sum_k \bar{t}_{ij}^{(k)}} \times \frac{100 \times \eta_i}{\sum_i \eta_i} \right) \quad (35)$$

一方、式(31)より求められる日本の最終需要が誘引するレアメタル採掘量 g_p^{JPD} についても、採掘国のリスクを加味した評価を行った。採掘国 p のリスク指標 η_p と採掘量の重みを 1 対 1 とするため、式(36)のように世界全体に対する割合（%）に換算して g_p^{JPD} と η_p を乗じて、リスクを加味した採掘量 v_p^{JPD} を算定した。また、式(37)より v_p^{JPD} を世界全体に対する割合 $v_p^{JPD}(-)$ に換算した。 $v_p^{JPD}(-)$ を国 p について集計することで、日本の国内最終需要が誘引するレアメタル採掘に関するリスクが世界の何%に相当するかを知ることができる。

$$v_p^{JPD} = \frac{100 \times g_p^{JPD}}{\sum_p g_p} \times \frac{100 \times \eta_p}{\sum_i \eta_p} \quad (36)$$

$$v_p^{JPD}(-) = v_p^{JPD} / \sum_p \left(\frac{100 \times g_p}{\sum_p g_p} \times \frac{100 \times \eta_p}{\sum_i \eta_p} \right) \quad (37)$$

3.3.2 各国の科学技術・社会システムレベルに着目した国際レアメタルフローの特性評価

商品 k に含まれたレアメタル $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ は、 i 国で生産されて j 国へ移動し、 j 国内で消費されるか、または更に加工され他国へ輸出される。本研究では、この2国間における商品 k に関するレアメタルの物質利用効率 (Material Use Efficiency) に焦点を当てた特性評価を行った。物質利用効率とは、原材料の消費量に対する原材料の有効利用量であり、副産物の再生利用と廃棄物の発生抑制の高さを示す。物質利用効率が低い場合は、製品にならず、再利用もされずに経済社会に埋もれるレアメタルが増え、採掘量の増大を招き、レアメタル利用の持続可能性を著しく低下させる。

いま、商品 k を輸出する i 国は、生産技術レベルが高く、使用したレアメタルと無駄なく製品に利用することができる世界の中でも物質利用効率の高い国と仮定する。一方、商品 k を輸入する j 国も、生産技術レベルが高く、レアメタルを含む商品 k を無駄なく、利用できると仮定する。また j 国は、商品 k を消費する場合でも、携帯電話のような使用済み製品から資源を回収する高い技術レベルを有することに加え、社会から回収することができる高度な社会システムの構築と実装が可能な国であり、総じて高い物質利用効率を実現できる国とする。この場合、国 i と j を移動するレアメタルは高い物質利用効率に基づき生産され、高い物質利用効率で消費されるため、その移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ の2国間を通じた物質利用効率は最も高く、レアメタルの持続可能性を高めると考えられる。

では、輸出国 i または輸入国 j のどちらかが、高い技術・社会システムレベルを持たない場合、すなわち低い技術・社会レベルである場合を考える。輸出国 i が低い技術レベルである場合、レアメタルの移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ は低い物質利用効率で生産されてしまう。その後、高い技術レベルを持つ輸入国 j において高い物質利用効率で適切に利用されたとしても、移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ の2国間を通じた物質利用効率は中程度となり、両国共が高い技術・社会レベルである場合に比べて劣る。

逆の場合も同様である。輸出国 i が高い技術を持ち、高い物質利用効率で商品 k を生産する。それを技術レベルの低い輸入国 j で利用する場合は、効率が悪い、または使用した後の製品の回収や資源の再生が出来ず、物質利用効率が低い。したがって、移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ の2国間を通じた物質利用効率は、両国共が高い技術・社会レベルである場合に比べて劣る。しかし、先の輸入国が低い技術レ

ベルである場合との一般的な優劣を付けることは困難であり、本研究では同等と見なす。

最後のパターンは、輸出国 i 、輸入国 j の共に生産技術・社会システムレベルが低い場合であり、移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ の 2 国間を通じた物質利用効率は最も低くなる。これは、採掘量の増大を誘引し、資源利用の持続可能性を著しく低下させることが懸念され、早急に輸出国 i 、輸入国 j の商品 k を扱うための生産技術・社会システムレベルを上げることが必要とされる。

本研究では、上述のような 2 国間を通じた物質利用効率の潜在的な違い（高、中、低）に着目し、国際的移動する商品 k の特性化を行い、優先的に生産技術・社会システムレベルの改善を国際的に協働して進めていくべき貿易商品を同定した。

特性化は次のように行う。レアメタル移動が生産技術・社会システムレベルの共に高い国 (H) i 、 j 間で生じる場合 ($i \in H, j \in H$)、その移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ を Green flow と称する。一方、輸出国または輸入国の何れかの生産技術・社会システムレベルが低い (L) 場合は ($i \in H, j \in L$ or $i \in L, j \in H$)、その移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ を Yellow flow と呼ぶ。最後に、生産技術・社会システムレベルが低い国 i, j ($i \in L, j \in L$) 間の移動量 $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ を Red flow と定義する。式(38)-(40)により、商品 k に全ての国 i, j 間を対象に $\bar{t}_{ij}^{(k)}$ を集計し、Green flow、yellow flow および red flow の各合計量を算出する。そして、Green flow の最大の場合は、商品 k を Green-flow commodity、yellow flow が最大の場合は、Yellow-flow commodity、Red flow が最大の場合は、Red-flow commodity と分類した。同値の場合は、安全側を取り低い方の物質利用効率を示す色を付与した。

$$greenFlow^{(k)} = \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \bar{t}_{ij}^{(k)} \quad (38)$$

$$yellowFlow^{(k)} = \sum_{i \in H} \sum_{j \in L} \bar{t}_{ij}^{(k)} + \sum_{i \in L} \sum_{j \in H} \bar{t}_{ij}^{(k)} \quad (39)$$

$$redFlow^{(k)} = \sum_{i \in L} \sum_{j \in L} \bar{t}_{ij}^{(k)} \quad (40)$$

各国や地域をレアメタルの利用に関する生産技術・社会システムレベルの高い国または低い国に分類するには、国 i における商品 k 中のレアメタルのライフサイクルを通じた物質利用効率を算定し、国 i の全世界における相対的な位置付けから判別することが基本である。しかしながら、そうしたレアメタルに特化した技術情報を定量的に評価した入手可能な資料や統計は存在せず、各国の

技術を個別に調査するには多大な人的かつ時間的コストを要する。また、レアメタルを利用・再生する技術は日進月歩であり、技術の潜在的向上を加味して各国を評価することが望ましい。

本研究では、各国の技術レベルを判断する指標として、Klaus Schwab らによる Global Competitiveness Report⁶で主要 144 ヶ国について評価されている 100 を超える指標の中から、科学技術に関連する次の 7 つ指標を代用した。[1] Availability of latest technologies、[2] Firm-level technology absorption、[3] Capacity for innovation、[4] Quality of scientific research institutions、[5] Company spending on R&D、[6] University-industry collaboration in R&D、[7] Governmental procurement of advanced tech products. これらの 7 指標の値が全て平均値より高い国を生産技術・社会システムレベルの高い国(地域)として定義した。定義した 29 の国や地域は次の通りである。Australia、Austria、Belgium、Brazil、Canada、Denmark、Estonia、Finland、France、Germany、Hong Kong、Iceland、Israel、Japan、South Korea、Luxembourg、Malaysia、Netherlands、New Zealand、Norway、Portugal、Puerto Rico、Qatar、Saudi Arabia、Singapore、Switzerland、Taiwan、United Kingdom、United States.

上述の Red flow、Yellow flow、Green flow の区分を日本の国内最終需要が誘引する国際レアメタルフロー t_{ij}^{JPD} に対して適用することで、日本が依存するレアメタルフローの中から物質利用効率性の低いフローと高いフローを検出することができる。

3.4 国際レアメタルフローにおける Hotspot (レアメタル利用が集約的な貿易国群) の検出手法

3.4.1 スペクトラルグラフ理論を利用した国際レアメタルフローのクラスタリング手法

ここでは、Kagawa *et al.*(2013)⁷で開発したスペクトラルグラフ理論を利用した国際レアメタルフローにおけるクラスタリング手法について述べる。クラスタリングの手法については、Shi and Malik(2000)⁸の手法を応用する。まず、 i 国から j 国へのレアメタルの国際貿易ネットワーク (有向グラフ) を示す行列 $\mathbf{Q} = (Q_{ij})(i, j = 1, \dots, n)$ を i 国と j 国間のレアメタル貿易の関係度 (無向グラフ) を示す隣接行列 $\mathbf{Q}^* = (Q_{ij}^*)$ に変換する。

⁶ Schwab, K. The Global Competitiveness Report 2012-2013: Full Data Edition; The World Economic Forum: 2012.

⁷ Kagawa, *et al.* (2013), Identifying environmentally important supply chain clusters in the automobile industry, *Economic Systems Research*, 25, 265-286.

⁸ Shi, J. and Malik, J. (2000), Normalized cuts and image segmentation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, 888-905.

$$Q_{ij}^* = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (41)$$

このとき、国際貿易ネットワークにおける各国（すなわち、ネットワークにおける頂点）の重み付き次数は $d_i = \sum_j Q_{ij}^*$ として計算できる。本節では、説明の都合上、式(41)で示される無向グラフを繰り返し二分割していくことを考える。ネットワークにおける辺の重みを頂点間（国間）の関係の強さと解釈すれば、ネットワークを A と B という2つのグループに分割する評価基準としては、例えば、グループ間関係の強さを最小にすることが考えられる。これは切断辺の重みの合計値、つまり同一グループに属さない頂点間の重みの合計値、

$$Cut(A, B) = Cut(B, A) = \sum_{i \in A, j \in B} Q_{ij}^* + \sum_{j \in A, i \in B} Q_{ij}^* \quad (42)$$

が最小になるような基準である。しかし、式(42)の評価基準を用いると、孤立した1つの頂点がクラスターとして検出されることがよく知られている。そこで上記(21)式の評価基準に加えて、集合 A と集合 B に属するクラスターサイズ $\sum_{i \in A} d_i$ と $\sum_{i \in B} d_i$ が最大になる、つまりグループ内の関係の深さが最大になるような条件を与える。すなわち、「グループ間関係の強さが最小」かつ「グループ内関係の強さが最大」になるように2つのグループに分割する方法である。この2つの評価基準を満たす指標として、下式(43)に示す基準化切断値を定義し、この値が最小になるような分割問題を考える。

$$\text{Min.} \frac{\sum_{i \in A, j \in B} -q_{ij}^* x_i x_j}{\sum_{i \in A} d_i} + \frac{\sum_{j \in A, i \in B} -q_{ij}^* x_i x_j}{\sum_{i \in B} d_i} \quad x_i = 1 (i \in A), x_i = -1 (i \in B) \quad (43)$$

しかしこの問題は NP 困難な問題である。上式(43)の $\mathbf{x}=(x_i)$ を $\mathbf{y} = \{(\mathbf{i} + \mathbf{x}) - b(\mathbf{i} - \mathbf{x})\}$ と変数変換すると、以下のような式を得られる。ここで \mathbf{i} は全ての要素が1である単位ベクトルであり、また $b = \sum_{i \in A} d_i / \sum_{i \in B} d_i$ である。このとき下式(44)を得ることができる。

$$\text{Min.}_{y_i \in \{1, -b\}} \frac{\mathbf{y}^T (\mathbf{D} - \mathbf{Q}^*) \mathbf{y}}{\mathbf{y}^T \mathbf{D} \mathbf{y}} = \frac{\sum_{i \sim j} q_{ij}^* (y_i - y_j)^2}{\sum_i d_i y_i^2} \quad (44)$$

ここで、 \mathbf{D} は重み付き次数 d_i を対角成分に持つ対角行列であり、 $\mathbf{D} - \mathbf{Q}^*$ はラプラシアン行列と呼ばれている。 y_i を実数値空間上の値と見なすと、式(44)は一般化固有値問題 $(\mathbf{D} - \mathbf{Q}^*) \mathbf{y} = \lambda \mathbf{D} \mathbf{y}$ の Rayleigh 商になる。このとき、ラプラシアン行列 \mathbf{L} の最も小さな固有値 0 に対応する固有ベクトルは \mathbf{i} であ

るので、(44)式の変数変換の際得られる $\mathbf{y}^T \mathbf{D} \mathbf{i} = 0$ という制約式を満たしつつ、実数値空間上に拡張された式(44)の最小化問題を解くということは、前述の一般化固有値問題から得られる 2 番目に小さな固有値に対応する固有ベクトル $\mathbf{y} = (y_i)$ を求めることに等しい。つまり、 $y_i \leq 0$ のとき部門 i は集合 A に属し、 $y_i \geq 0$ のとき、部門 i は集合 B に属す。

3.4.2 非負行列因子分解手法を利用したクラスタリング手法

(43)式で示される離散組み合わせ問題を(44)式に示される一般化固有値問題に緩和するときの問題点は、離散的な空間で解をもつはずの y_i を実数値空間上の値と見なすことである。そのため、一般化固有値問題の解を利用したグラフ分割法の精度はあまりよくない。こうした問題を重要視し、Ding *et al.* (2005)⁹は、(43)式で示される離散組み合わせ問題を下式(45)に示される非負行列因子分解問題へと導いている。

$$\underset{\mathbf{H} \geq \mathbf{0}}{\text{Min.}} \quad \|\mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{G}^* \mathbf{D}^{-1/2} - \mathbf{H} \mathbf{H}^T\|_F^2 \quad (45)$$

ここで、 $\|\cdot\|_F^2$ はフロベニウスノルムを示しており、 \mathbf{H} は内生的に決定される非負行列を氏示している。プライム記号は行列の転置をしめす。非負行列 \mathbf{H} は、ネットワーク構成する頂点の数 \times ネットワークに存在するクラスタの数の次元を持つ。(45)式に示される最小化問題は、

$$h_{ij} \leftarrow h_{ij} \left(1 - \beta + \beta \left(\mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{G}^* \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{H} \right)_{ij} / \left(\mathbf{H} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \right)_{ij} \right) \quad (46)$$

という繰り返し計算をすることによって求めることができる。¹⁰ここで、 β は任意のパラメータであり、 $0 < \beta \leq 1$ の値をとる。(46)式で得られた行列

$$\hat{\mathbf{H}} = n \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{h}}_1 \\ \hat{\mathbf{h}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{h}}_n \end{pmatrix} \quad (47)$$

の第 i 行目の $(K \times 1)$ の横ベクトル $\hat{\mathbf{h}}_i(1, \dots, n)$ は、頂点 i の特徴ベクトルと呼ばれており、この特徴ベクトルが類似している頂点の集合がクラスタとなる。本研究では、この類似度を利用したクラス

⁹ Ding, C., He, H. and Simon, H.D. (2005) On the equivalence of nonnegative matrix factorization and spectral clustering, *Proc. of SIAM Int'l Conf. Data Mining (SDM'05)*, 606–610.

¹⁰ Lee, D.D. and Seung, H.S. (1999) Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization, *Nature*, 401, 788–791.

タリング手法として、*K*-means 法を利用する。

3.4.3 最適なクラスター数の選定

3.4.1 で定式化された一般化固有値問題の解を利用したクラスタリング法と 3.4.2 で定式化された非負行列因子分解問題の解を利用したクラスタリング法とも基準化切断値が最も小さくなるようなネットワーク分割を求める手法であった。しかしながら、両手法とも最適問題を解く前に、事前にクラスターの数を決めておかなければいけない。つまり、ネットワークを“与えられたクラスターの数”だけ分割するとき基準化切断値が最小となるネットワーク分割を求めるものである。さらには、両問題とも事前に与えられたクラスターの数が大きくなるにつれて基準化切断値の近似解が大きくなるという性質を持っている。両手法とも最適なクラスターを決めるための手法ではないということを注意しなければいけない。そこで本研究では、両手法で得られたクラスター分割の情報を利用して、Newman and Girvan (2004)¹¹で提案されているモジュラリティ指標、

$$Q(K) = \sum_{i=1}^K (p_{ii} - q_i^2) \quad (48)$$

を計算し、その値が最大となるクラスターの数を最適なクラスター数とした。ここで、 p_{ii} は i 番目のクラスターの級内比率 (i 番目のクラスターに関する級内合計 ÷ 隣接行列の全ての要素の総計)、 q_i は i 番目のクラスターの級間比率 (i 番目のクラスターに関する級間合計 ÷ 隣接行列の全ての要素の総計) を示す (詳細は Newman and Girvan (2004))。

3.5 国際レアメタルフローの経路解析と視認性の高い可視化手法

構造経路解析¹² (structural path analysis、SPA) は、近年において産業エコロジー分野において広く用いられている¹³。SPA を用いることにより、最終需要から環境影響の発生に至る個々の構造経路 (例えば、最終需要 → 乗用車 → 車体 → 鋼板 → 粗鋼 → 銑鉄、のようにサプライチェーンの一部を遡

¹¹ Newman, M.E.J. and M. Girvan (2004) Finding and evaluating community structure in networks, *Physical Review E*, 69 026113.

¹² Defourny, J., and E. Thorbecke, Structural path analysis and multiplier decomposition within a social accounting matrix framework, *Economic Journal*, Vol. 94, No. 373, 1984, pp. 111–136.

¹³ Lenzen, M., Environmentally important paths, linkages and key sectors in the Australian economy, *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 14, No. 1, 2003, pp. 1–34; Peters, G.P., and E.G. Hertwich, Structural analysis of international trade: Environmental impacts of Norway, *Economic Systems Research*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 155–181; Strømman, A.H., G.P. Peters, E.G. Hertwich, Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, No. 2, 2009, pp. 248–254; Wood, R., and M. Lenzen, Structural path decomposition, *Energy Economics*, Vol. 31, No. 3, 2009, pp. 335–341.

及して得られる産業部門の列)を識別することができる。また、SPAをライフサイクルアセスメント(LCA)に適用することにより、1つの数値で表されるライフサイクル全体での環境影響を、それに対する個々の構造経路の寄与へと分解し、より詳細な解釈を与えることができる¹⁴。さらに、LCAにおける環境影響だけでなく、エネルギーや物質の産業間フローの分析を行うためにも、SPAは適用可能である¹⁵。

典型的なSPAの応用研究においては、繰返し算法によって多数の構造経路が計算・抽出されるが、少数の構造経路のみについて詳細な解釈が与えられる。その一方で、ほとんどの構造経路は、計算・抽出されるだけで解釈が与えられることはない。しかしながらSPAは、レオンチェフ逆行列(産業連関分析における遡及計算(あるいは、波及効果の計算)のための最も基礎的かつ重要な手法である。サプライチェーン全体を考慮した分析に用いられる)を、サプライチェーンの段階を追って遡及計算を行う手法と見なすことができる。したがって、典型的なSPAの応用研究では利用されないすべての構造経路を系統的に利用することができれば、生産ネットワーク構造を理解するために役立つと考えられる。このような背景から、構造経路に基づく行列分解法(Path-based Matrix Decomposition Analysis、PMDA)と名付けた新しい分析手法を開発した。PMDAにより、複雑な生産ネットワークから重要な部分のみを抽出して簡略化し、図のかたちで可視化することが可能となる。

3.5.1 レオンチェフモデルと誘発された産業連関表

部門数が n の産業連関表データが得られているとする。レアメタルフローをあらわす GLIO の勘定体系においては、部門はわが国における産業部門、および海外の国々に相当する。

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{t}_{12} \\ \mathbf{t}_{21} & \mathbf{t}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}^o & \mathbf{y}^o \\ \mathbf{v}^o & 0 \end{pmatrix} \quad (49)$$

ここで、 $\mathbf{Z}^o = (Z_{ij}^o)$ は $n \times n$ の部門間フローをあらわす行列、 $\mathbf{y}^o = (y_i^o)$ は $n \times 1$ の最終需要ベクトル、 $\mathbf{v}^o = (v_j^o)$ は $1 \times n$ の天然資源投入ベクトルである。上付き添字「o」は、データとして与

¹⁴ Singh, B., A. H. Strømman, and E. Hertwich, Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 5, No. 3, 2011, pp. 457–466; Majeau-Bettez, G., T. R. Hawkins, and A. H. Strømman, Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles, *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, No. 10, 2011, pp. 4548–4554.

¹⁵ Suh, S., Tracking metal flow network using hybrid Ghoshian framework, Kyenote speech, The 19th International Input-Output Conference, 14 June 14 2011, Alexandria, VA, USA; Treloar, G., Extracting embodied energy paths from input-output tables: Towards an input-output-based hybrid energy analysis method, *Economic Systems Research*, Vol. 9, No. 4, 1997, pp. 375–391.

えられたもの（観察されたデータ、observed data）であることをあらわす。また、右下端のゼロは、その位置にはデータがないために長方形の配列ではない産業連関表を、数学的に取り扱いやすい行列にするために追加したものである。ゼロを追加したため、行和・列和の値に影響を与えない点に注意していただきたい。

観察された総供給量・総生産量は $\mathbf{x}^0 = (x_i^0) = \mathbf{Z}^0 \mathbf{t}_n + \mathbf{y}^0$ により求められる（ここで \mathbf{t}_n は、すべての要素が 1 の $n \times 1$ ベクトルである）。これらのデータを用いて、産業技術をあらわす投入係数行列 $\mathbf{A} = (a_{ij}) = (\mathbf{Z}_{ij}^0/x_j^0)$ と単位直接天然資源投入ベクトル $\mathbf{d} = (d_j) = (v_j^0/x_j^0)$ を定義する。標準的な産業連関モデルにおいては、1 単位の（最終）需要が直接間接に誘発する天然資源投入量を次のようにして求めることができる。

$$\mathbf{e} = (e_j) = \mathbf{dL} = \mathbf{d}(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \quad (50)$$

ここで、 \mathbf{I}_n は n 次の単位行列であり、 $\mathbf{L} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$ はレオンチェフ逆行列である。

最終需要ベクトル $\mathbf{y} = (y_i)$ によって誘発される天然資源の総投入量 ε は、次式により求められる。

$$\varepsilon = \mathbf{e}\mathbf{y} = \mathbf{dL}\mathbf{y}. \quad (51)$$

また、最終需要ベクトル \mathbf{y} によって誘発される生産量ベクトル、部門間フロー行列、直接天然資源投入量ベクトルは、それぞれ $\mathbf{x} = \mathbf{L}\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{Z} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{v} = \mathbf{d}\hat{\mathbf{x}}$ のように求められる（ここで $\hat{\mathbf{x}}$ は、その第 i 対角要素が x_i であるような $n \times n$ の対角行列である）。なお、これらはデータとして観察されたものではなく、最終需要ベクトル \mathbf{y} によって誘発されたものとしてモデルにより算出されたものであるから、上付き添字「o」を付けていない。以上のように求められた行列・ベクトルを並べて、最終需要ベクトル \mathbf{y} によって誘発された産業連関表を次のように定義する。

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{11} & \mathbf{q}_{12} \\ \mathbf{q}_{21} & q_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}\mathbf{Z} & \hat{\mathbf{e}}\mathbf{y} \\ \mathbf{v} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} & \hat{\mathbf{e}}\mathbf{y} \\ \mathbf{d}\hat{\mathbf{x}} & 0 \end{pmatrix}, \quad (52)$$

ここで $\hat{\mathbf{e}}$ は $\hat{\mathbf{x}}$ と同様にして定義された対角行列である。行列 \mathbf{Q} の各要素は、部門間フローを内包されたレアメタル量であらわしたものである。「内包された」量とは、製品を構成している素材としてのレアメタル量だけでなく、その製品のサプライチェーンの川上で使用されたレアメタルの総量をも含む量である。GLIO の勘定体系では国内の産業間フローは政府統計である産業連関表をそのまま用いているため、フロー量は金額で計上されている。それに対して、ここで定義した最終需要ベクトル \mathbf{y} によって誘発された産業連関表 \mathbf{Q} においては、すべてのフロー量がレアメタルの質量として計上されている。したがって、例えば部門数が十分に小さいなど、行列の非零要素が少

なければ、この行列の要素をそのまま用いて、ネットワーク図やサンキー図¹⁶としての可視化に用いることができる。最終需要ベクトル \mathbf{y} によって誘発された産業連関表 \mathbf{Q} は、産業構造分析のための単位構造系¹⁷、物質フロー解析のためのUPIOM¹⁸と類似の数学的構造を持っている。また、誘発された産業連関表 \mathbf{Q} において、対応する行和と列和の値が等しいこと、すなわち $\mathbf{1}_{n+1}^T \mathbf{Q} = (\mathbf{Q} \mathbf{1}_{n+1})^T$ の成り立つことが、次のようにして確かめられる。

$$\begin{aligned} (\mathbf{Q} \mathbf{1}_{n+1})^T &= \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} \mathbf{1}_n + \hat{\mathbf{e}} \mathbf{y} \\ \mathbf{d} \hat{\mathbf{x}} \mathbf{1}_n \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}} (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{y}) \\ \mathbf{d} \mathbf{x} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\varepsilon} \end{pmatrix}^T = ((\hat{\mathbf{e}} \mathbf{x})^T \quad \boldsymbol{\varepsilon}), \\ \mathbf{1}_{n+1}^T \mathbf{Q} &= (\mathbf{1}_n^T \hat{\mathbf{e}} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{d} \hat{\mathbf{x}} \quad \mathbf{1}_n^T \hat{\mathbf{e}} \mathbf{y}) = ((\mathbf{e} \mathbf{A} + \mathbf{d}) \hat{\mathbf{x}} \quad \mathbf{e} \mathbf{y}) = ((\hat{\mathbf{e}} \mathbf{x})^T \quad \boldsymbol{\varepsilon}), \end{aligned} \quad (53)$$

ここで、上付き添字 T は行列・ベクトルの転置をあらわす。

3.5.2 構造経路解析

式(51)で与えられる誘発された天然資源の総投入量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は、サプライチェーンにおける階層ごとに分解して次のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbf{d}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{y} = \mathbf{d} \mathbf{y} + \mathbf{d} \mathbf{A} \mathbf{y} + \mathbf{d} \mathbf{A}^2 \mathbf{y} + \mathbf{d} \mathbf{A}^3 \mathbf{y} + \dots \\ &= \sum_{h \in N} d_h y_h + \sum_{h, i \in N} d_i a_{ih} y_h + \sum_{h, i, j \in N} d_j a_{ji} a_{ih} y_h + \sum_{h, i, j, k \in N} d_k a_{kj} a_{ji} a_{ih} y_h + \dots, \end{aligned} \quad (54)$$

ただし $N = \{1, 2, \dots, n\}$ である。構造経路解析は、この式(54)の分解に基づいて行われる。 n 個ある階層 0 の項 $d_h y_h$ ($h \in N$) は、最終需要部門による直接天然資源投入量の総投入量への寄与をあらわす。 n^2 個ある階層 1 の項 $d_i a_{ih} y_h$ ($h, i \in N$) は、構造経路 $h \rightarrow i$ による天然資源投入量の総投入量への寄与をあらわす。構造経路 $h \rightarrow i$ は、より簡潔に $\langle h, i \rangle$ と書くこととする。 n^3 個ある階層 2 の項 $d_j a_{ji} a_{ih} y_h$ ($h, i, j \in N$) は、同様に、構造経路 $\langle h, i, j \rangle$ による寄与をあらわす。

一般に、階層 r の構造経路 $p = \langle p_0, p_1, \dots, p_r \rangle$ の寄与 c_p は次式で与えられる。

$$c_p = \begin{cases} d(p_0) y(p_0) & (r = 0) \\ d(p_r) a(p_r, p_{r-1}) \dots a(p_2, p_1) a(p_1, p_0) y(p_0) & (r \geq 1) \end{cases} \quad (55)$$

¹⁶ Schmidt, M., The Sankey diagram in energy and material flow management—Part I: History. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 12, No. 1, 2008, pp. 82–94; Schmidt, M., The Sankey diagram in energy and material flow management—Part II: Methodology and current applications. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 12, No. 2, 2008, pp. 173–185.

¹⁷ 尾崎巖「経済発展の構造分析 3：経済の基本的構造の決定」『三田学会雑誌』73(5)、1980、720–748.

¹⁸ Nakamura, S., Y. Kondo, K. Matsubae, K. Nakajima, and T. Nagasaka, UPIOM: A new tool of MFA with application to the flow of iron and steel associated with car production, *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, No. 3, 2011, pp. 1114–1120.

ここで $d(i) = d_i$ 、 $a(i, j) = a_{ij}$ and $y(i) = y_i$ ($i, j \in N$) のような記号法を、添字が入れ子になることを避けるために用いている。このようにあらわされた寄与を用いると、式(54)は、

$$\varepsilon = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{p \in P^r} c_p = \sum_{p \in P} c_p, \quad (56)$$

のように書き換えられる。ここで $P^r = N^{r+1} = N \times \dots \times N$ は階層 r のすべての構造経路からなる集合、 $P = \bigcup_{r=0}^{\infty} P^r = \bigcup_{r=0}^{\infty} N^{r+1}$ はすべての階層のすべての構造経路からなる集合をあらわす。

3.5.3 構造経路に基づく行列分解法 (Path-based Matrix Decomposition Analysis、PMDA)

式(55)で与えられる寄与 c_p を持つ階層 r の構造経路 $p = \langle p_0, p_1, \dots, p_r \rangle$ に対して、経路行列 \mathbf{C}_p を次のように定義する。

- 経路行列 \mathbf{C}_p の $(p_0, n+1)$ 要素は寄与 c_p に等しい。
- 経路行列 \mathbf{C}_p の (j, i) 要素は、部門間フロー (j, i) が構造経路 p の中に t 回あらわれるとき、 tc_p に等しい。
- 経路行列 \mathbf{C}_p のその他の要素はゼロ。

このように定義された経路行列について、次式が成り立つ。

$$\mathbf{Q} = \sum_{p \in P} \mathbf{C}_p. \quad (57)$$

左辺の行列 \mathbf{Q} (最終需要ベクトル \mathbf{y} によって誘発された産業連関表) を経路行列 \mathbf{C}_p の和に分解する式(57)(33)は、構造経路に基づく行列分解法 (Path-based Matrix Decomposition Analysis、PMDA) の根幹をなすものである。式(57)(33)の左辺 \mathbf{Q} は、その定義式(52)(28)にそって算出することができる。右辺の値は、繰返し算法に基づく SPA を行い、そのうえで経路行列 \mathbf{C}_p を定義し、それらの合計として求められる。明らかに、左辺の定義式(28)に基づいて算出する方が計算に係る負荷は小さい。右辺に沿って PMDA を適用することの利点は、一部の経路のみを抽出することによって発揮される。例えば、分析目的に照らして特定の部門 (産業、国や地域など) を経由する構造経路のみを抽出する、ネットワークを簡略化して図のかたちで可視化するために寄与の大きい構造経路のみを抽出する、などである。

式(53)(29)で示した通り、誘発された産業連関表 \mathbf{Q} の行和と列和は等しい。この産業間フロー分析における基礎的性質は、PMDA によって一部の経路のみを抽出して経路行列の和を求める場合に

についても成り立つ。それは、個々の経路行列が、行和と列和が等しいという性質を持つからである。すなわち、可視化などを目的として分析対象システム（部門間ネットワーク）を簡略化して抽出した場合でも、そのシステムは行和と列和が等しいという、産業間フロー分析における基礎的性質を保持している。

個々の経路行列 C_p は、構造経路 p に基づいて定義されており、天然資源の総投入量に対する構造経路の寄与 c_p と関連付けられている。この寄与の合計は総投入量に等しいから、PMDA による部門間ネットワークの簡略化に対して、そのカバー率の指標を抽出された経路の寄与の総和として自然に定義することができる。部門間ネットワークをあらゆる産業連関表の要素の和を算出すると、多数の二重計算（ダブルカウント）を含むため、PMDA に基づかない簡略化では、同様のカバー率を定量化することが困難である。カバー率の指標についての PMDA の特徴は、部門間ネットワークのシステム分析に適用する際の、大きな利点と言えよう。

3.5.4 構造経路に基づく国際レアメタルフロー特性の可視化手法

式(52)および(57)であらわされる産業連関表 Q をサンキー図としての可視化する場合には、産業部門や国を、レアメタルフローをあらゆる矢印で結び、個々の矢印の太さが産業連関表 Q の要素 q_{ij} に比例するように作図する。産業連関表 Q の要素 q_{ij} がゼロのときは矢印を描かない。例えば、式(49)における天然資源投入ベクトル $v^0 = (v_j^0)$ を、産業部門別・国別のレアメタル採掘量とすれば、行列 Q の各要素 q_{ij} は、部門間・国間フローに内包されたレアメタル採掘量をあらゆる。

フローの大きさを矢印の太さであらわすことに加えて、各国の特性を考慮した国際レアメタルフローの特性評価の結果を可視化する手法として、矢印の色を活用することができる。例えば、世界の国々を技術水準の高い国々 H と技術水準の低い国々 L に分割する。また、簡単化のため、産業連関表 Q の行および列は国をあらゆるものとする。すなわち、 $H \cup L = N$ 、 $H \cap L = \emptyset$ である。

式(55)で与えられる寄与 c_p を持つ階層 r の構造経路 $p = \langle p_0, p_1, \dots, p_r \rangle$ （ただし $r \geq 1$ ）に対して、 p が経由する技術水準の低い国の数 ℓ_p を次のように定義する。

$$\ell_p = \sum_{i=0}^r 1\{p_i \in L\} \quad (58)$$

ここで、 $1\{A\}$ は定義関数であり、命題 A が真のとき 1、偽のとき 0 である。すなわち、構造経路 $p = \langle p_0, p_1, \dots, p_r \rangle$ の第 i 番目の国 p_i が技術水準の低い国である場合に $1\{p_i \in L\} = 1$ であり、技術水準の高い国である場合に $1\{p_i \in L\} = 0$ である。さらに、二国間レアメタルフロー（国

i から国 j への輸出に内包されたレアメタル採掘量) に関連付けられた、技術水準の低い国の数の平均 s_{ij} を (i, j) 要素とする行列 \mathbf{S} を次のように定義する。

$$\mathbf{S} = \left(\sum_{p \in P} \ell_p \mathbf{c}_p \right) \oslash \left(\sum_{p \in P} \mathbf{c}_p \right) = \left(\sum_{p \in P} \ell_p \mathbf{c}_p \right) \oslash \mathbf{Q} \quad (59)$$

ここで、 \oslash は要素ごとの商をあらわす二項演算子であり、同じサイズの行列 $\mathbf{A} = (a_{ij})$ 、 $\mathbf{B} = (b_{ij})$ に対して、 $\mathbf{A} \oslash \mathbf{B} = (a_{ij}/b_{ij})$ をあらわす。すなわち、 s_{ij} は、2か国 i 、 j をこの順で経由する構造経路 p の寄与 c_p をウェイトとした、技術水準の低い国の数 ℓ_p の加重平均をあらわす。例えば、図 10 に示す通り 2 つの構造経路のみがあり、2 つの経路が経由する 4 か国 (A、B、C、D) のうち、B と C が技術水準の低い国であり、A と D が技術水準の高い国であるような、仮想的数値例を考える。全体のフローに含まれる二国間レアメタルフローは、

- C→D 経路 1 (寄与 50 kg)
- B→D 経路 2 (寄与 150 kg)
- B→C 経路 1 (寄与 50 kg)
- A→B 経路 1 (寄与 50 kg)、経路 2 (寄与 150 kg)

の 4 通りである。

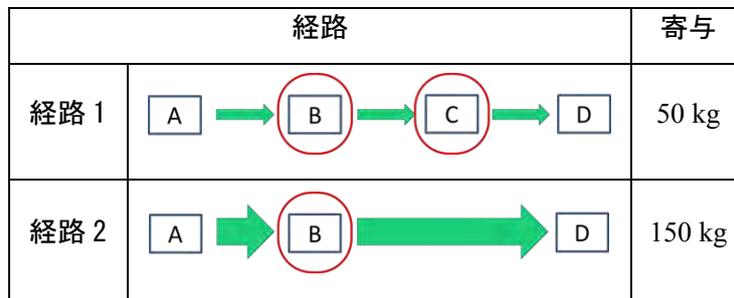


図 10 二国間レアメタルフローに関連付けられた技術水準の低い国の数の平均を算出するための仮想的数値例

したがって、行列 \mathbf{S} の要素は次のように求められる。

$$\begin{aligned} s_{CD} &= 2 \\ s_{BD} &= 1 \\ s_{BC} &= 2 \\ s_{AB} &= \frac{2 \times 50 + 1 \times 150}{50 + 150} = 1.25 \end{aligned} \quad (60)$$

B から D への (直接の) レアメタルフローは、経路 2 のみによって生じており、その経路は技術水準の低い国を 1 か国しか経由していない。C から D へのレアメタルフローは技術水準の低い国を

2 か国経由する経路 1 のみによって生じている。いずれの場合も、それぞれの経路が経由する低技術水準の国の数が、そのまま二国間フローに関連付けられた低技術水準の国の数となる。それに対して、A から B へのレアメタルフローは、経路 1 および 2 によって生じているため、それぞれの経路が経由する低技術水準の国の数の加重平均として行列 **S** の要素が定義される。

技術水準の低い国を多く経由する構造経路は、相対的に改善の余地が大きいと解釈できるから、ここで導入した行列 **S** の要素は、各二国間レアメタルフローのあいだの「技術水準の観点から見た優劣」をあらわすと言える。極めて単純化した手法であるため、誤解を招かないようにするための十分な説明が必要ではあるが、改善の余地のある、あるいは改善の余地の大きいフローを同定するために有用と考えられる。特に、二国間レアメタルフローをサンキー図としての可視化する際に、図 11 のようにフローの大きさ（行列 **Q** の要素）を矢印の太さとして、フローに関連する技術水準の低い国の数の平均（行列 **S** の要素）を矢印の色として作図することが可能である。直感的に分かりやすいかたちで結果を示しやすいため、重要なフローに関する気付きを与えることに加えて、専門家でない人々を含めた意見交換の際に有用なツールとなることが期待できる。

ここで導入した手法は、技術水準の低い国の数をあらわす指標としてだけでなく、各国の特性をあらわす様々な指標にも適用可能である。

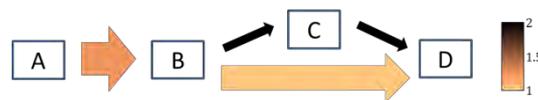


図 11 二国間レアメタルフローに関連付けられた技術水準の低い国の数の平均（仮想的数値例）
を矢印の色により図示した例

3.6 財やサービスの 3R（リデュース、リユース、リサイクル）によるレアメタル国際

依存量の軽減効果指標の開発

本研究では、財やサービスに対して「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」を行うことにより、わが国のレアメタルに対する国際的な依存がどれくらい軽減するかを示す指標を開発する。図 12 に本研究で考える財やサービスに対する 3R 活動と開発する指標との関係を模式的に示す。

まず、「リデュース」は財やサービスに対する需要の回避と捉え、それに起因する財やサービスの生産減少によって生じるレアメタルの

国際依存量の軽減を計測する。開発する指標は、単位需要（百万円: M-JPY）回避あたりの数値として定義する。「リユース」は財やサービスの長寿命化と捉え、寿命延長（長期使用）に伴って減少する生産を考え、それによる依存量の軽減を計測する。開発する指標は、単位寿命延長（一年）あたりの数値とする。「リサイクル」は製品含有中のレアメタルの回収により、回避される金属素材生産を考え、それに伴う依存量の軽減と理解する。指標は単位製品あたりとし、物量単位（kg）または貨幣単位（百万円相当分）で単位製品量を規定する。

これらの「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」の国際依存量の軽減指標は、まず基本となる原単位（財やサービスの単位生産額（百万円）あたりに誘引するレアメタル採掘量と誘引する国際フロー量）を算定し、単位生産額から単位を変換することで導出する。なお「リユース」に関する指標のための、寿命延長年を減少する需要額に変換する方法論については、3.7 で詳しく述べる。基本となる財やサービスの原単位として、3.3 で検討した国際フローの特性を鑑み、資源採掘量、資源採掘に関するリスク、国際フロー量、国際フローに関するリスク、国際フローの技術レベルに着目した 5 つの値を計算した。本研究で対象とした財・サービスの部門数は日本の国産品と輸入品を合わせて約 800 部門である。

まず、一つ目の原単位は、商品 k^* の単位生産額（百万円: M-JPY）あたりに国際サプライチェーンを通じて直接的間接的に誘引するレアメタル採掘量（t/M-JPY）である。これは、式(30)の \mathbf{f}^{JPD} を $\mathbf{i}^{(k^*)}$ は部門 k^* の要素のみを 1 とし、後の要素は全て 0 とするベクトルに置換し、式(31)と同様の計

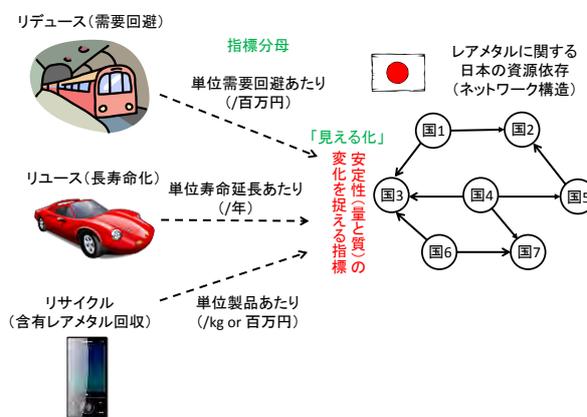


図 12 本研究におけるレアメタルに着目した 3R の定義と開発指標との関係

算を行うことで得られる各国の採掘量 $\mathbf{g}^{(k^*)} = \left(\mathbf{g}_p^{(k^*)} \right)$ を集計することで求められる。この単位生産額あたりの誘発採掘量を世界全体の採掘量で割ることで、世界採掘量に対する単位生産額の減少による寄与を得る。

二つ目の原単位は、商品 k^* の単位生産額 (M-JPY) あたりに誘引される採掘国のリスクを加味したレアメタル採掘量 (%×%/M-JPY) である。この原単位は式(36)の \mathbf{g}_p^{JPD} に $\mathbf{g}_p^{(k^*)}$ を代入することで求められる。この単位生産額あたりのリスクを加味した誘発採掘量を世界全体のリスクを加味した採掘量で割ることで、世界全体に対する単位生産額の減少による寄与が分かる。

三つ目の原単位は、商品 k^* の単位生産額 (M-JPY) あたりに誘引されるレアメタルの国際フロー量 (t/M-JPY) である。この原単位は式(23)の \mathbf{f}^{JPD} に $\mathbf{i}^{(k^*)}$ を代入し、式(25)の各要素となる $t_{ij}^{(k^*)}$ を集計することで得られる。同様に、誘引する国際フロー量を世界全体のフロー量で割ることで単位生産額の減少がもたらす寄与を計することができる。

四つ目の原単位は、商品 k^* の単位生産額 (M-JPY) あたりに誘引される輸出国のリスクを加味したレアメタルの国際フロー量である (%×%/M-JPY) である。この原単位は式(34)の t_{ij}^{JPD} に $t_{ij}^{(k^*)}$ を代入することで $\rho_{ij}^{(k^*)}$ を導き、それを全ての国 ij について集計することで得られる。世界全体の国際フローに対して、同様に輸出国のリスクを加味してフロー量をリスク量に変換し、世界全体のリスクを加味したフロー量を計算する。単位生産額あたりのリスク量を世界全体の量で割ることで、単位生産額の寄与を求めることができる。

五つ目の原単位は、商品 k^* の単位生産額 (M-JPY) あたりに誘引されるレアメタルの国際フロー量における Red flow、Yellow flow、Green flow の割合である。これは $t_{ij}^{(k^*)}$ を三つのフローに区分し、それぞれを集計して三つ目の指標で求めたフロー量に対する割合を求めて各色の割合を決定する。

3.7 耐久財の使用延長に伴う需要減少量の推計手法

3.7.1 耐久財の使用年数推定手法

レアメタル使用製品の使用年数延長によるレアメタル需要変化を計測するための入力データとして、耐久財の使用年数延長による製品の買替需要変化の定量化が必要であり、そのためにはまず実社会における現状の耐久財使用年数（実寿命）を推定、把握する必要がある。

耐久財の使用年数推定についてはいくつかの推定手法が存在する。Oguchi et al.¹⁹の整理による4つの推定手法とそれぞれの特徴を表2に示す。代表性のあるデータが得られる限りいずれの手法を用いても理論的には同様の推定結果が得られることから、入手可能なデータに合わせて推定手法を選択することが可能である。例えば、自動車については検査登録制度によって製品年齢別の廃車台数や保有台数の完全データが整備されているため、いずれの手法も利用可能である。家電製品や電子機器等の耐久消費財については使用済み製品や保有製品の製造年調査に基づいて方法(1)や(2)を用いた使用年数推定が行われているが、総保有台数に関する統計データが存在する品目については方法(4)による推定事例も多数報告されている²⁰。一方、医療機器等の業務用電気電子機器については使用年数推定が行われた事例はほとんどない。

表2 耐久財の使用年数推定手法

推定方法	必要なデータ			データ調査方法	特徴
	使用済み数	保有数	出荷数		
(1) 使用年数別使用済み数から推定する方法	○ (使用年数別)		○ ^a (時系列)	リサイクル施設等への搬入製品の調査	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特定地域での分布を求める場合に有利。 ・ 輸出中古品、不法投棄品を除く分布が推定されることに注意。 ・ 代表性、精度確保には多施設・長期間の調査が必要。 ・ 施設の標本データからの拡大推計の方法に注意が必要。
				ユーザーへのアンケート調査（または、統計データ）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国全体の分布を求める場合に有利。 ・ アンケートは消費者の記憶に基づくため誤差が大きくなる可能性がある。
(2) 製品年齢別保有数から推定する方法		○ (製品年齢別)	○ (時系列)	ユーザーへのアンケート調査（または、統計データ）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国全体の分布を求める場合に有利。 ・ 実際に保有されている製品の調査を行うため、確実なデータが得られ、推定精度が比較的高い。
(3) 期初および期末の製品年齢別保有数から推定する方法		○ (製品年齢別、最低2時点)		ユーザーへのアンケート調査（または、統計データ）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 使用年数分布の経年変化が小さい製品の推定に有用。 ・ 建築物など出荷の時系列データが入手しにくい製品の分布の推定に有用。 ・ 空間的・時間的・品目範囲を任意に設定可能。
(4) 総保有数と出荷台数の台数収支から推定する方法		○ (総保有)	○ (時系列)	統計データ、またはユーザーへのアンケート調査	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国全体の分布を求める場合に有利。 ・ 製品年齢別のデータが不要なため推定の負担が小さい。 ・ 未知のパラメータは1つ（実質的に平均使用年数のみ）でなければならない。

3.7.2 使用年数延長による耐久財需要減少量の推計方法

上記で述べた使用年数分布の推定方法のうち、方法(1)～(3)は使用年数別の使用済み台数データや製品年齢別の保有台数データといった詳細なデータが必要であるのに対し、方法(4)は総保有台数と出荷台数から推定が可能で推定の労力が小さい。そこで本研究では、方法(4)を用いた使用年数推定を応用して使用年数延長による需要減少量の推計方法を検討した。

¹⁹ Oguchi et al. (2010) Lifespan of commodities, Part. II: Methodologies for estimating lifespan distribution of commodities, *Journal of Industrial Ecology*, 14(4), 613-626

²⁰ Murakami et al. (2010) Lifespan of commodities, Part. I: The creation of a database and its review, *Journal of Industrial Ecology*, 14(4), 598-612

方法(4)では、出荷台数と使用年数分布による総保有台数の計算値(式(61))と総保有台数の統計値の差が最も小さくなるように各時点(ここでは各年末)における使用年数分布を推定する。

$$\hat{N}_t = \sum_y \{S_{t-y} \times R_t(y)\} \quad (61)$$

ここで、 \hat{N}_t は t 年末の総保有台数の計算値、 S_{t-y} は $t-y$ 年における出荷台数、 $R_t(y)$ は製品年齢 y の製品の t 年末における残存率(使用年数分布)である。 $R_t(y)$ は耐久財の使用年数分布推定によく用いられるワイブル分布関数を仮定し、(62)式のように残存率分布の平均値(本研究ではこれを平均使用年数と定義する) $y_{av, t}$ と分布形状母数 b の関数として推定する。

$$R_t(y) = 1 - \exp\left[-\left(y/y_{av, t}\right)^b \times \Gamma(1 + 1/b)^b\right] \quad (62)$$

ここで Γ はガンマ関数である。なお、この方法では未知のパラメータが1つ(実質的に平均使用年数のみ未知)である必要があるため、 b の値は既知である必要がある。乗用車や電気電子機器といった耐久消費財については推定事例が報告されており、また、年によらず一定とみなせることが報告されている^{21, 22}ので、それらの値を使用することが可能である。

次に、耐久財の需要と使用年数の関係から、使用年数延長による耐久財の需要削減効果、すなわち単位量の需要(例えば百万円分)を回避するのに何年の使用年数延長が必要か、あるいは使用年数を単位量(例えば1年間)延長した場合に耐久財需要がいくら削減されるかを推計する方法を導出する。

まずは単純な例として、対象とする地理的範囲(本研究では日本国内)における総保有台数が変化せず、保有製品を使用済みにした場合は必ず買替をする場合を考える。この場合、需要台数(=出荷台数)は使用済み台数に等しい((63)式)。また、使用済み台数は過去の出荷台数と使用年数分布の積和により推計できる((64)式および(65)式)。

$$S_t = W_t \quad (63)$$

$$W_t = \sum_y \{S_{t-y} \times f_t(y)\} \quad (64)$$

$$f_t(y) = R_{t-1}(y-1) - R_t(y) \quad (65)$$

ここで S_t は t 年の需要台数(=出荷台数)、 W_t は t 年の使用済み台数、 $f_t(y)$ は t 年における使用年数 y 年の製品の使用済み割合(使用年数分布)である。この単純な例では、過去の出荷台数と使用年数分布のデータから需要台数(すなわち使用済み台数)を推計できる。

現実には買増による保有台数の増加や買替を伴わない使用済みによる保有台数の減少により、総保有台数は変化している。この場合、 t 年の需要台数 S_t は買増需要台数 $D_{add, t}$ と買替需要台数

²¹ 田崎ら(2001) 使用済み耐久消費財の発生台数の予測方法、廃棄物学会論文誌、12(2)、49-58.

²² 小口ら(2006) 電気・電子製品23品目の使用年数分布と使用済み発生台数の推計、廃棄物学会論文誌、17(1)、50-60.

$D_{\text{replace}, t}$ の和となる ((66)式)。

$$S_t = D_{\text{add}, t} + D_{\text{replace}, t} \quad (66)$$

買替需要台数 $D_{\text{replace}, t}$ は全ての使用済み台数 W_t から買替を伴わない使用済み台数 $W_{\text{w/o_replace}, t}$ の差に等しい ((67)式)。また、 t 年中の総保有台数の変化 ($t-1$ 年末と t 年末の総保有台数の差 $N_t - N_{t-1}$)、すなわち t 年における正味の買増台数は、買増需要台数と買替を伴わない使用済み台数の差に等しい ((68)式)。

$$D_{\text{replace}, t} = W_t - W_{\text{w/o_replace}, t} \quad (67)$$

$$N_t - N_{t-1} = D_{\text{add}, t} - W_{\text{w/o_replace}, t} \quad (68)$$

(65)式に(67)式、(68)式、および(64)式を代入して整理すると(69)式となり、 t 年の需要台数 S_t は総保有台数の変化、過去の出荷台数、および使用年数分布から推計できることがわかる。

$$S_t = (N_t - N_{t-1}) + W_t = (N_t - N_{t-1}) + \sum_y \{S_{t-y} \times f_t(y)\} \quad (69)$$

ここで、基準ケース (現状の使用年数分布に基づくケース) の需要台数を S_t とし、単位量の需要 ΔS_t を減少させることを考える。このとき、単位量の需要 ΔS_t を減少させた場合、すなわち(70)-(72)式を満たす) 平均使用年数 $y_{\text{av}, t}$ を求め、基準ケースの値と比較することで、単位量の需要を減少させるために平均使用年数を何年延長する必要があるかを推定することができる。また、同様にして、平均使用年数を単位量延長したときに需要をどのくらい減少することができるかを求めることもできる。

$$S_t - \Delta S_t = (N_t - N_{t-1}) + \sum_y \{S_{t-y} \times f_t(y)\} \quad (70)$$

$$f_t(y) = R_{t-1}(y-1) - R_t(y) \quad (71)$$

$$R_t(y) = 1 - \exp \left[- \left(y / y_{\text{av}, t} \right)^b \times \Gamma(1 + 1/b)^b \right] \quad (72)$$

なお、(70)式の右辺について使用年数延長が影響を及ぼすのは第二項のみである。これより、需要台数のうち正味の買増台数の占める割合が大きい耐久財、すなわち総保有台数が大きく成長している耐久財ほど使用年数延長による需要減少の効果は小さくなることがわかる。

3.7.3 実データを用いた推計事例

前節で示した方法を用い、いくつかの耐久財を事例として使用年数延長による耐久財の需要減少量を推計した。推計事例とした耐久財は、乗用車 (軽乗用車含む)、携帯電話 (PHS 除く)、ルームエアコン、磁気共鳴画像診断装置 (MRI 装置) とした。

推計に必要な国内出荷台数および総保有台数・稼働台数のデータは、政府統計、関連業界団体統

計や市場レポート²³から収集整備し作成した。ルームエアコンの保有台数統計データは世帯あたりの保有台数として報告されているので、国勢調査による世帯数（5年ごとの値を曲線近似した値）を乗じて総保有台数とした。なお、総保有台数・稼働台数についてアンケートや聞き取り調査による調査誤差は推計結果に直接影響するため、保有台数・稼働台数データがこれらの調査に基づいているルームエアコンとMRI装置についてはロジスティック曲線近似または移動平均（前後3年）によって平滑化したデータを用いた。

このデータを用いて前節の方法により基準ケースにおける各年末の平均使用年数 $y_{av, t}$ および各年の使用済み台数 W_t を推計した。ここでいう平均使用年数は前述した通りワイブル分布で近似した残存率分布の平均値である。ワイブル分布で近似した使用年数分布の形状パラメータ b の値は、文献で推定された代表的な値として乗用車は3.6²⁴、携帯電話とルームエアコンは2.4（電気電子機器の平均的な値）²⁵で固定して平均使用年数 $y_{av, t}$ を推定した。MRI装置については形状パラメータの推定事例が存在しないが、電気電子機器の平均的な値2.4と仮定して推定を行った。なお、 b の値を1.5~4.0の範囲で変化させて感度分析を行ったところ、平均使用年数 $y_{av, t}$ の推定値は b を2.4としたときの推定値と比較して-4%~+46%、平均して19%の範囲に収まった。

次に、前節の方法を用い、百万円の需要（百万円に相当する需要台数）を削減するために必要な平均使用年数の延長分、および平均使用年数を1年間延長したときの耐久財需要の減少分（金額換算）を推計した。本研究では、仮想的に過去において出荷台数を百万円相当台数分減少させた場合および平均使用年数を1年間延長した場合の計算を行い、使用年数延長による耐久財需要減少量を推計した。すなわち、過去の各年において一様に百万円相当台数の需要を減少させた場合および平均使用年数を1年間延長した場合を想定し、その時の平均使用年数の延長分および耐久財需要の減少分を推計した。なお、上記の計算においては、過去の各年における出荷台数が実績値よりも減少するため、その減少も反映した形で推計を行った。

需要台数の金額換算は、国内出荷台数および国内出荷金額データ²⁶を用いて求めた1台あたりの

23 一般財団法人自動車検査登録情報協会：わが国の自動車保有動向（乗用車・出荷および保有）、一般社団法人電子情報技術産業協会：民生用電子機器国内出荷データ集（携帯電話・出荷）、MM 総研：国内携帯電話端末出荷概況（携帯電話・出荷）、一般社団法人電気通信事業者協会：携帯電話・PHS 契約数（携帯電話・保有（契約数））、一般社団法人冷凍空調工業会：冷凍空調機器の国内出荷実績（エアコン・出荷）、内閣府：消費動向調査（エアコン・保有）、月刊新医療：医療機器システム白書各年版および月刊新医療各号（MRI 装置・出荷および保有（稼働数））、株式会社矢野経済研究所：医用画像システム(PACS)・関連機器市場の展望と戦略各年度版（MRI 装置・出荷）

24 Oguchi and Fuse (2014) Regional and longitudinal estimation of product lifespan distribution: a case study for automobiles and a simplified estimation method, *Environmental Science and Technology*, revised manuscript submitted.

25 小口ら(2006) 電気・電子製品 23 品目の使用年数分布と使用済み発生台数の推計、*廃棄物学会論文誌*、17(1)、50-60.

26 一般社団法人日本自動車工業会統計、一般社団法人電子情報技術産業協会：民生用電子機器国内出荷データ集、一般財団法人家電製品協会：家電産業ハンドブック、一般社団法人日本画像医療システム工業会統計

単価（百万円/台）を用いて行った。各対象品目について算出された単価および百万円に相当する台数（＝単価の逆数）は表 3 に示すとおりである。

表 3 推計対象とした耐久財の出荷単価および百万円相当台数

品目	単価 (百万円/台)	百万円相当台数 (台/百万円)	備考
乗用車	1.7	0.599	生産金額/台数、2003～2010 年平均
携帯電話	0.041	24.4	2001～2010 年平均
ルームエアコン	0.081	12.4	2001～2010 年平均
MRI 装置	89	0.0113	生産－輸出＋輸入、2009～2011 年平均

3.8 日
本
の

家計消費が依存する国際レアメタルフローの長期予測手法

レアメタルは我々の日常生活とも関わりが深い。パソコンのハードディスクや薄型テレビ、携帯電話等の電子機器には多くのレアメタルが用いられているほか、ハイブリッド自動車用のニッケル水素電池や排ガスを抑制する自動車触媒等にも使われている。最早これらを生活から切り離すことは非常に困難であり、今後ますます普及が進むことが予想されることから、その過程でどういったライフスタイル がレアメタルのフローを誘引するか把握しておくことは重要である。また、一国のライフサイクルの環境負荷における観点からも、先進国において家計消費は最も重大な環境負荷因子であることが知られており、家計消費由来のエネルギー消費量やGHGをはじめとする様々な先行研究が存在する²⁷。しかし、同様の視点で家計消費需要とレアメタルの国際依存関係に着目した事例はない。そこで本研究では、社会問題化している少子高齢化に着目し、2035年までの家計消費需要を推計し、今後の日本の家計消費が誘引するレアメタルの国際フロー量を推計した。

3.8.1 世帯属性別消費支出額の推計

家計消費に起因するレアメタルの国際フロー量は、家計がどのような財やサービスを購入するかによって決定される。世帯属性別の国際フロー量の同定には、世帯別の消費支出の構成を詳細に把握することが不可欠である。日本の産業連関表には最終需要として家計消費支出部門があり、約 400 種類の財やサービスについて、国産品と輸入品に対する年間の支出額が掲載されている。この年間支出額は、社会会計表 (SAM: Social accounting matrix) の一部を成す産業連関表の勘定体系に整合し

²⁷ Hertwich, E. G. (2011) The life cycle environmental impacts of consumption, *Economic System Research*, 23(1), 27-47.
Hertwich, E. G. (2005) Life cycle approaches to sustainable consumption: A critical review, *Environmental Science and Technology*, 39, 4673-4684.

ているという特徴があるものの、この家計消費支出部門は単一部門として定義されており、世帯別の支出額を得ることができない。

一方、日本の世帯別の消費支出額を示す公的統計として、全国消費実態調査（以下、全消調査）がある。全消調査を利用することで、世帯属性の違いによる消費構成の差異を定量的に理解することができるが、家計消費に関する国際フロー量の推計において以下のような問題がある。一つは、国産品の消費か輸入品の消費かは、誘引する国際フロー量に大きな違いを与えるが、全消調査では国産品と輸入品の区別がされておらず合計の消費額のみが計上されていることである。二つ目に、全消調査の消費額に世帯数を乗じて、12倍することで一年あたりの消費額に換算しても、前述したSAMの一部を成す産業連関表の家計消費支出額と大きく乖離することである。これは、全消調査から推計した年間支出額に基づき国際フロー量を計算することは不適切であることを意味し、このような家計消費の調査データとSAMとの不整合の解消は、近年重要な課題されている²⁸。

そこで本研究では、数理計画法に基づき産業連関表の家計消費支出額を全消調査の世帯属性別支出額を用いて分割することで、6つの世帯属性別に約400の財やサービスに対する年間消費支出額の推計を次のように行った。なお、本研究では少子高齢化による消費者基準排出量への影響に焦点を当てるため、世帯属性 ($att = 1...6$) を世帯主年齢階級別 (1=20s: ~29、2=30s: 30~39、3=40s: 40~49、4=50s: 50~59、5=60s: 60~69、6=70s+: 70~) に定義した。まず、対象とする2005年産業連関表に最も近い2004年全消調査における支出項目と2005年産業連関表の商品部門を対応付けた。その際、産業連関表の「石油化学製品」部門については細分化を行なった。次に、定義した部門対応に基づいて全消調査の支出項目別消費額を産業連関表の商品部門消費額に変換した。この時、全消調査の支出項目が産業連関表の複数部門に対応する場合は、対応する複数部門の産業連関表における家計消費支出額の大きさによって全消調査の支出額を分配した。ただし、全消調査の支出項目に該当しない産業連関表の部門（廃棄物処理、卸売、小売など）には全消調査の支出額の分配を行っていない。

得られた産業連関表の商品部門別の全消調査による支出額 P_i^{all} （百万円/m）を式(73)によって正規化し、世帯別に単位支出額あたりの部門 i に対する支出割合 p_i^{all} を求めた。 $N=409$ は細分化した産業連関表の部門数である。また、例えば20代世帯よりも60代世帯の方が、相対的に医療費が大きいことなど商品 i に関する世帯属性間のシェアを示す s_i^{att} を式(74)より求めた。 $M=6$ は世帯属性数である。

²⁸ Schreyer, P. (2013) Social accounting matrix and microdata: New areas of research, 21st International Input-Output Conference & the Third Edition of the International School of Input-Output Analysis, Kitakyushu, Japan

$$r_i^{att} = \frac{R_i^{att}}{\sum_{i=1}^N R_i^{att}} \quad (73)$$

$$s_i^{att} = \frac{R_i^{att}}{\sum_{att=1}^M R_i^{att}} \quad (74)$$

本研究では、これら r_i^{att} と s_i^{att} が示す世帯の消費特性を最も反映し、産業連関表の家計消費における部門別支出額 f_i (百万円/y) に整合する世帯属性別の部門別消費割合 \tilde{r}_i^{att} を、式(75)で定義された目的関数を式(76)-(79)の制約条件下で最小化する二次計画問題を解くことで決定した。

$$\text{Min.}_{\tilde{r}_i^{att}, \tilde{s}_i^{att}} \sum_{att=1}^M \sum_{i=1}^N \left(\frac{\tilde{r}_i^{att} - r_i^{att}}{r_i^{att}} \right)^2 + \sum_{att=1}^M \sum_{i=1}^N \left(\frac{\tilde{s}_i^{att} - s_i^{att}}{s_i^{att}} \right)^2 \quad (75)$$

s.t.

$$f_i = \sum_{att=1}^M \tilde{r}_i^{att} f^{att} \quad (76)$$

$$\sum_{i=1}^N \tilde{r}_i^{att} = 1 \quad (77)$$

$$\tilde{r}_i^{att} \geq 0 \quad (78)$$

$$\tilde{s}_i^{att} = \tilde{r}_i^{att} f^{att} / f_i \quad (79)$$

全消調査の支出項目に該当しない部門を除く産業連関表の家計消費総支出額 f^* (百万円/y) を求め、それを世帯別年間総支出額のシェアで按分して世帯別年間総支出額 f^{att} を求めた。このシェアは全消調査における各世帯の支出額合計に、2013年の国立社会保障・人口問題研究所(以下、人口研)による2005年における各世帯の総数を乗じて求めた一ヶ月当たりの世帯別総支出額の大きさに基づいて算出した。 f^{att} に \tilde{r}_i^{att} を乗じると各世帯の部門 i に対する年間消費額を示すことから、各世帯を合計すると部門 i に対する総支出額 f_i となるため、 \tilde{r}_i^{att} は式(76)の制約を満たす。 \tilde{r}_i^{att} は比率であることから各世帯の合計は1であり、また非負であるため、式(77)と式(78)を満たす。

得られた最適解 $\hat{\tilde{r}}_i^{att}$ と f^{att} を乗じて、各世帯の部門 i に対する年間消費額 $f_i^{att} = \hat{\tilde{r}}_i^{att} f^{att}$ (百万円/y) を決定した。ただし、全消調査の支出項目に該当しない産業連関表の部門(廃棄物処理、卸売、小売など)については、産業連関表による総支出額 f_i を f^{att} の大きさに按分して f_i^{att} を求めた。したがって、本研究で求めた6つの世帯属性別の消費額の合計は、産業連関表の家計消費の総支出額 f (百万

円/y) と合致する。

3.8.2 世帯別家計消費支出額における購入者価格ベースから生産者価格ベースへの変換

3.6 で導出した国際フロー量を示す原単位 (3 つ目) を用いて目的とする家計消費が誘引する国際フロー量を得るためには、3.8.1 で得られた購入者価格ベースの世帯別家計消費支出額を、原単位に対応する生産者価格ベースに変換する必要がある。購入者価格ベースは生産者価格ベースに卸売や輸送に係るマージンが上乗せされており、ここではその変換方法について詳述する。

部門 i における商業マージン (卸売、小売) や貨物運送 (鉄道、道路、沿海内水面、港湾運送、航空、運送取扱、倉庫) といったマージン k の投入額を $m_{i,k}$ 、 f_i^{att} に対応する部門 i の世帯別マージン k の投入額を $m_{i,k}^{att}$ とする。まず、 f_i に含まれるマージン k の比率 $w_{i,k}$ を f_i で $m_{i,k}$ を除して算出し、式(10)のように f_i^{att} に乗じて $m_{i,k}^{att}$ を得る。また、 $m_{i,k}^{att}$ と $m_{i,k}$ は式(80)―(81)を満たす。

$$m_{i,k}^{att} = w_{i,k} f_i^{att} \quad (80)$$

$$m_{i,k} = \sum_{att=1}^M m_{i,k}^{att} \quad (81)$$

これらを用いることで、求める生産者価格による各世帯の部門 i に対する年間消費額 g_i^{att} を式(82)で表すことができる。 $L=9$ はマージンの部門数である。

$$g_i^{att} = f_i^{att} - \sum_{k=1}^L m_{i,k}^{att} (i \neq k) \quad (82)$$

式(82)は部門 i がマージン k でないときに成立する。産業連関表ではマージンに関する部門 k のマージンは、部門 k 以外に投入されたマージン k の負の総和で与えられている。港湾運送の購入者価格による家計消費支出額は 0 であるため、 $m_{i,k}^{att}$ が得られず、式(83)では生産者価格も 0 と算出されてしまう。ゆえに部門 $i=k$ のとき、 g_i^{att} は式(83)(84)で表せる。ただしこのとき、 $m_{k,k}^{att}$ は 0 とする。

$$g_i^{att} = f_i^{att} - \sum_{i=1}^N m_{i,k}^{att} (i = k) \quad (83)$$

$$m_{k,k}^{att} = 0 \quad (84)$$

このようにして得られた世帯ごとの g_i^{att} の総和は、式(85)のように産業連関表の部門 i における生産者価格ベースの家計消費支出額 f_i^{prod} に符号する。

$$f_i^{\text{prod.}} = \sum_{att=1}^M g_i^{\text{att}} \quad (85)$$

続いて、式(86)(87)より、 g_i^{att} に産業連関表から得られる輸入品割合 m_i を乗じて、国産品に対する消費額 $g_i^{\text{JD,att}}$ (百万円/y) と輸入品に対する消費額 $g_i^{\text{JI,att}}$ (百万円/y) を決定した。

$$g_i^{\text{JD,att}} = (1 - m_i) g_i^{\text{att}} \quad (86)$$

$$g_i^{\text{JI,att}} = m_i g_i^{\text{att}} \quad (87)$$

3.8.3 世帯別の誘引する国際フロー量の算定方法

財やサービスの単位生産に伴いグローバルなサプライチェーンを通じて発生する環境負荷の発生量の同定には、システム境界の明確性の観点から多地域間産業連関分析 (MRIO) が有用である。そのため、近年では MRIO を用いた消費者基準の環境負荷量の同定が進められ²⁹、同時に MRIO のための多地域間産業連関表自体の開発も多機関で行われている。

本研究では、3.6 で説明したように Global link input-output model (GLIO)³⁰ を用いて導出した、国産品の国際フロー量を示す原単位 $q_i^{\text{MF,JD}}$ と輸入品の国際フロー量を示す原単位 $q_i^{\text{MF,JI}}$ を用いて、次式のようにレアメタルの国際フロー量を算定した。

$$MF^{\text{att}} = \sum_{i=1}^N q_i^{\text{MF,JD}} g_i^{\text{JD,att}} + \sum_{i=1}^N q_i^{\text{MF,JI}} g_i^{\text{JI,att}} \quad (88)$$

3.8.4 世帯人口変化による世帯別家計消費支出額への擬似的コホート効果

人口研による 2035 年までの予測値によると、総世帯数は 2005 年から 2015 年にかけて増加した後減少していく一方で、総人口は主に少子化によって 2005 年から減少の一途を辿る。そのため一世帯あたりの構成人数 (平均世帯人員数) は減少し、一世帯あたりの消費支出額にも影響することが考えられる。例えば、米やパン等の食料品の多くは、世帯人員数が多くなるほど支出額が大きくな

²⁹ Lenzen, M., Kanemoto, K., Moran, D., Geschke, A. (2012) Mapping the structure of the world economy, *Environ. Sci. Technol.*, 46 (15), 8374–8381. Peters, G. P., Minx, J. C., Weber, C. L. (2011) Edenhofer, O.: Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 108 (21), 8903-8908. Druckman, A and Jackson, T. (2009) The carbon footprint of UK household 1990-2004: a socio-economically disaggregated, quasi-multiregional input-output model, *Ecol. Econ.*, 68, 2066-2077.

³⁰ Nansai et al. (2009) Improving the completeness of product carbon footprints using a global link input-output model: the case of Japan, *Economic Systems Research*, 21(3), 267-290. Nansai et al. (2012) Characterization of economic requirements for a "carbon-debt-free country", *Environmental Science & Technology*, 46(1), 155-163.

ると予想される。一方で、外食のように単身世帯のほうが二人以上の世帯よりも支出額が多い消費も存在し、支出額は一概に世帯構成人数が減少することで共に小さくなるわけではない。このような傾向は、全消調査と同様に政府統計である家計調査から明らかであり、世帯人員数別に一世帯あたりの平均家計消費支出額 (円 / m) によって定量的に知ることができる。そこで、次の 2 つのステップによって、2005 年の家計調査におけるデータを利用して、少子化に伴う将来世帯別支出額への影響 (擬似的なコホート効果) を決定した。

まず、総世帯における一世帯あたりの平均世帯人員数は、人口研のデータから 2005 年以降減少していくことが示されているが、世帯属性別の平均世帯人員数の推移は不明である。そのため、過去の世帯属性別の平均世帯人員数と総一般人口の予測値をもとに時系列回帰解析を行なうことで、2005 年から 5 年毎の世帯属性別の平均世帯人員数 $J(y)^{att}$ (2005 年 ($y=1$)、2010 年 ($y=2$)、2015 年 ($y=3$)、2020 年 ($y=4$)、2025 年 ($y=5$)、2030 年 ($y=6$)、2035 年 ($y=7$)) を推計した。推計対象年は、人口研から公開されている世帯数の予測値が 2035 年であることから、2005 年から 2035 年とした。

まずこれまでの平均世帯人員数の推移については、2000 年から 2010 年までの家計調査に記載されている値を参照した。これらの推移傾向は概ね線形的に減少していることから、その線形近似によって世帯属性別の平均世帯人員数 $J(t)^{att,app}$ を推計した。 t は推計対象年を示し、2005 年 ($t=1$)、2010 年 ($t=2$)、2015 年 ($t=3$)、2020 年 ($t=4$)、2025 年 ($t=5$)、2030 年 ($t=6$)、2035 年 ($t=7$) である。将来の総一般人口数が $N(t)$ のとき、 $N(t) = \sum_{att=1}^M H(t)^{att} J(t)^{att}$ を満たしながら $J(t)^{att,app}$ による平均世帯人員数の減少傾向を反映する $\tilde{J}(t)^{att}$ を、次の式(89)(90)で定義する目的関数を解くことで算定した。ここで、 $Y=7$ は推計対象とする年数である。

$$\text{Min.}_{\tilde{J}(t)^{att}} \sum_{att=1}^M \sum_{t=1}^Y \left(\frac{\tilde{J}(t)^{att} - J(t)^{att,app}}{J(t)^{att,app}} \right)^2 \quad (89)$$

s.t.

$$N(t) = \sum_{att=1}^M H(t)^{att} \tilde{J}(t)^{att} \quad (90)$$

こうして得られた各世帯構成人数の推移は、外部データの総一般人口数と合致する。

次に、2005 年の家計調査から参照した、平均世帯人員 u 人の世帯における支出項目 l ($l=1\dots 44$) の支出額 (円 / m) を $h_l^{(u)}$ とする (u は正の整数)。世帯属性 att における平均世帯人員数 $J(t)^{att}$ が $u \leq J(t)^{att} \leq u+1$ であるとき、 $h_l^{(J(t)^{att})}$ を $h_l^{(u)}$ と $h_l^{(u+1)}$ を用いて次の式(91)で表すことにする。この式の左辺は、平均世帯人員数が u から $u+1$ の間で推移するとき、 $h_l^{(u)}$ を基準に支出額が線形的に変

化すると仮定し、その線形式に $J(t)^{att}$ を代入して得た支出額である。

$$h_i^{(J(t)^{att})} = (h_i^{(u+1)} - h_i^{(u)}) \{J(t)^{att} - u\} + h_i^{(u)} \quad (91)$$

世帯属性 att における平均世帯人員数 $J(t)^{att}$ が $J(t+1)^{att}$ に推移するとき、両者が u から $u+1$ の間にある場合、支出項目 i における支出額が変化する割合は式(92)で書ける。この値によって、一世帯あたりの平均世帯人員数の変動に伴う一世帯あたりの世帯別支出額への擬似的なコホート効果を表現する。

$$\theta(t+1)_i^{att} = \frac{h_i^{(J(t+1)^{att})}}{h_i^{(J(t)^{att})}} = \frac{(h_i^{(u+1)} - h_i^{(u)}) \{J(t+1)^{att} - u\} + h_i^{(u)}}{(h_i^{(u+1)} - h_i^{(u)}) \{J(t)^{att} - u\} + h_i^{(u)}} \quad (92)$$

2005年から2035年までに、世帯人員数が最大となるのは40sにおける3.52人、最小となるのは20sの1.43人であるので、ここでは $u=1\dots3$ と設定した。この期間中、平均世帯人員数は20sと70s以上は $1 \leq J(t)^{att} \leq 2$ 、30sと50s、60sは $2 \leq J(t)^{att} \leq 3$ で推移する。すなわち、式(92)で $att=1$ 、6のとき $u=1$ 、 $att=2$ 、4、5のとき $u=2$ をとる。40s ($att=3$) の平均世帯人員数については、2005年から2020年まで $3 \leq J(t)^{att} \leq 4$ ($u=3$)、2025年から2035年まで $2 \leq J(t)^{att} \leq 3$ ($u=2$) となるため、2020年から2025年にかけてのコホート効果 $\theta(t+1)_i^{att}$ のみ式(93)より決定した。このとき、 $att=3$ 、 $t=4$ である。

$$\theta(t+1)_i^{att} = \frac{h_i^{(J(t+1)^{att})}}{h_i^{(J(t)^{att})}} = \frac{h_i^{(3)} + h_i^{(2)} \{3 - J(t+1)^{att}\}}{h_i^{(4)} + h_i^{(3)} \{4 - J(t)^{att}\}} \quad (93)$$

家計調査の支出項目は全消調査の支出項目を部分的に統合した形で表されており、 $\theta(t)_i^{att}$ を 3.8.1で行なった対応付けを用いて産業連関表の部門 i に適用することで、平均世帯人員数の変動に伴う部門 i における世帯別支出額へのコホート効果 $\theta(t)_i^{att}$ を得た。

3.8.5 2035年までの将来世帯別国際フロー量の推計方法

最新の産業連関表が2005年基準であるため、まず2005年を対象に3.8.3の方法により $g_i^{JD,att}$ 、 $g_i^{II,att}$ および MF^{att} を算定した。以後、推計対象年 y を明示するため、これらの値をそれぞれ、 $g(y)_i^{JD,att}$ 、 $g(y)_i^{II,att}$ および $MF(y)^{att}$ と記述する。本研究では、日本の人口減少と少子高齢化に伴う世帯構成の変化に着目し、今後の $MF(y)^{att}$ の推計を行った。

2005 年以降の国産品 i および輸入品 i に対する世帯別消費額 $g(t)_i^{JD,att}$ 、 $g(t)_i^{JI,att}$ を、式(94)(95)のように世帯属性毎の世帯数 $H(t)^{att}$ と、平均世帯人員数の変動に伴う部門 i における世帯別支出額へのコホート効果 $\theta(t)_i^{att}$ を用いて推計し、求めた消費額を式(94)(95)に代入することで 2035 年までの排出量を決定した。

$$g(t)_i^{JD,att} = g(t-1)_i^{JD,att} \times \frac{H(t)^{att}}{H(t-1)^{att}} \times \theta(t)_i^{att} \quad (94)$$

$$g(t)_i^{JI,att} = g(t-1)_i^{JI,att} \times \frac{H(t)^{att}}{H(t-1)^{att}} \times \theta(t)_i^{att} \quad (95)$$

$H(t)^{att}$ は人口研による予測値を用いる。

本研究では世帯構成の変化の影響を捉えることに焦点を当てること、グローバルサプライチェーンの変化を含めた将来の技術変化の推定が容易でないことから、 $q_i^{MF,JD}$ と $q_i^{MF,JI}$ を推計対象年によらず一定として、2005 年における推計値を適用した。このことも含め、以下に本研究における家計消費が誘引する国際フロー量の推計に際して仮定した要素を列挙する。

各産業における技術レベル、および国内産業構造と国際サプライチェーンを形成する貿易構造については、どの年においても 2005 年値を基準とする。したがって昨今のエネルギー価格の変動や 2011 年の福島第一原子力発電所事故等における、エネルギー需給構造の変化は推計結果に反映されていない。また、2005 年から 2035 年にかけて、世帯主年齢の推移に伴う世帯属性別の平均的な消費パターン (ライフスタイル) の変化は起きないものとする。例えば、2005 年における 20s 世帯と 2035 年における 20s 世帯の消費パターンは時代背景の違いから変化する可能性はあるが、具体的な消費構造自体を推定することは困難である。そのため、本研究では、いずれの年のどの世帯においても、2005 年のそれぞれの消費パターンを継続すると仮定した。

4. 結果と考察

4.1 レアメタルの国際マテリアルフロー

本報告書では書面の制約から 2005 年を対象にしたマテリアルフローの結果について記述する。

4.1.1 ネオジム

4.1.1.1 主要貿易製品

2005年では12540tのネオジムが採掘され、18565tのネオジムが国際貿易を通じて世界中を移動した。ネオジムは製品材料として国に輸入され、その国で製品に組み込まれて別の国へ輸出されているため、採掘量の約1.5倍の国際フローが存在することが分かった。153種類の貿易商品別に推計した国際フローを4種類の商品分類（鉱石、材料、製品、スクラップ）に集約すると、15586tが材料中に含まれ、2968tが製品中に、そして、11tがスクラップ中に含有されて移動した。移動量の最も大きい貿易商品のHSコードは、HS-280530（希土類金属）で6294tであり、HS-850511（永久磁石）が2693t、HS-284960（希土類金属の化合物）が2219tと続く。

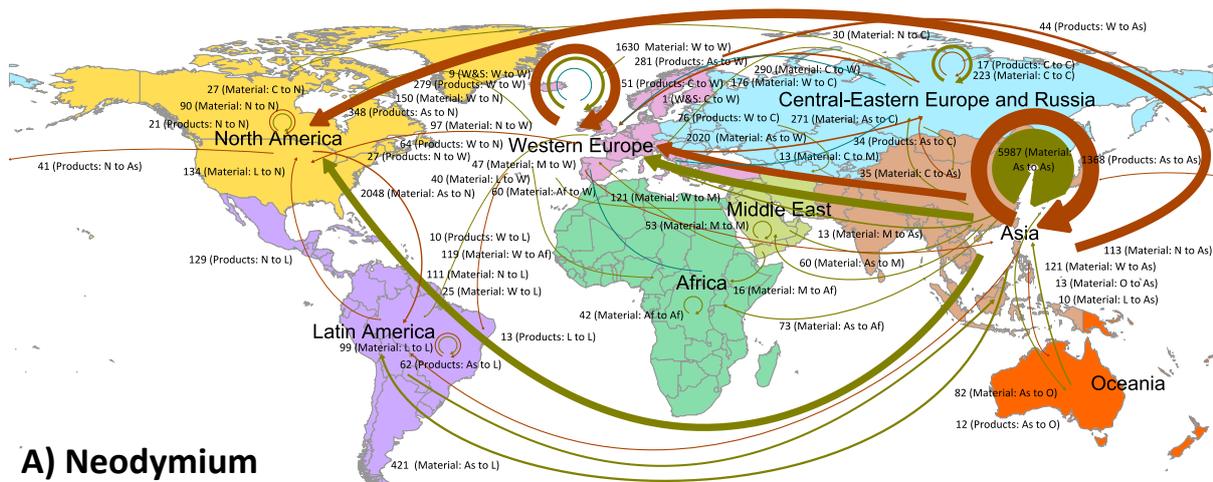
4.1.1.2 主要輸出国と輸入国

先に紹介したように、ネオジムは製品中に含有されて世界を移動する量が少なくなく、そうした非意図的なネオジムの輸出を含めると、ネオジムの採掘国以外も主要なネオジム輸出国と認識することができる。上位3カ国を上げると、中国（9874t）、日本（1494t）、ドイツ（765t）である。輸出品の構成は、中国の場合は、材料としての輸出が8662tあり全輸出量の88%を占める。また、12%に相当する1214tが製品に含有された輸出であった。一方、日本とドイツの場合は、それぞれ615t（41%）と460t（60%）が材料として、879t（59%）と296t（39%）が製品としての輸出であり、採掘国である中国との輸出商品構成の違いが顕著であった。一方、輸入の場合、上位3カ国は日本（4218t）、米国（2695t）、ドイツ（987t）であった。日本のネオジム輸入はその98%が材料として行われているが、米国とドイツについてはその割合は下がる。米国では85%（2298t）が材料として、15%（396t）が製品として輸入される。ドイツの場合は、88%（868t）が材料、そして12%（119t）が製品含有であった。

4.1.1.3 世界地域間特性と主要な二国間フロー

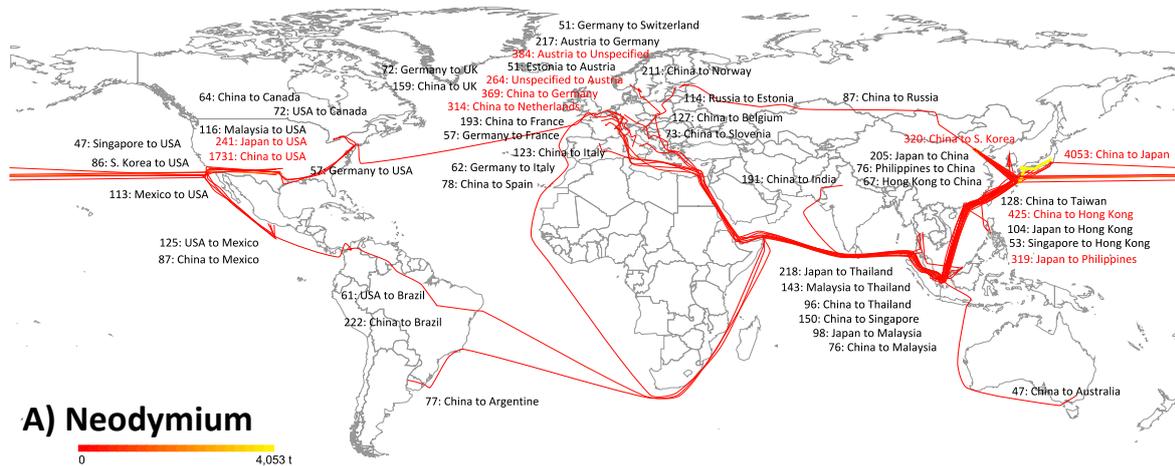
図13は各国間のフローを世界8地域（北米、南米、西ヨーロッパ、アフリカ、中東諸国、中央ヨーロッパとロシア、アジアとオセアニア）および4種の貿易商品の種類（鉱石、材料、製品、スクラップ）に集約したものである。フローの色は、フローの構成する貿易商品の種類を意味する。一見して、アジア内で材料としてのフローが卓越していることが分かる。アジアから西ヨーロッパや北米へのフローが比較的大きいが、製品として流れており、アジアでネオジムの採掘からそれを含有する加工度の高い製品の国外流通までが行われており、それがグローバルなフローを大きく支

配している。更に、詳細に国レベルでの主要なフローを確認する。



A) Neodymium

図 13 8 地域間におけるネオジムを含む国際貿易の商品別フロー（2005 年値）



A) Neodymium

図 14 ネオジムを含む国際貿易における上位 50 のフロー（2005 年値）

図 14 は日本を含む 231 ヶ国の国や地域間を移動した量の大きい上位 50 個のフローである。中でも、中国から日本への輸出（4053t）が卓越しており、世界のネオジム利用を支える主要フローと言える。続いて、中国から米国（1731t）、中国から香港（425t）、オーストリアから不明地域（384t）、中国からドイツ（369t）へのフローが上位の 5 つを占めた。

4.1.2 コバルト

4.1.2.1 主要貿易製品

コバルトの 2005 年における採掘量は 1072 kt (kt = 10³ t) であり、154kt のコバルトが国際貿易によ

り世界各国間を移動した。そのうち 38.3 kt は鉱石として、93.1 kt は材料として、2.16 kt は製品として、0.81 kt がスクラップ中に含有されていた。コバルトの移動量が大きい主要製品は、64.5 kt of HS-810510（コバルトのマットその他コバルト製錬の中間生産物並びにコバルトおよびその製品（くずを含む）の 64.5kt、HS-260500（コバルト鉱（精鉱を含む。）の 21.7 kt、そして HS-850780（蓄電池（隔離板を含む、長方形（正方形を含む。）であるかないかを問わない。）の 20.1 kt であった。

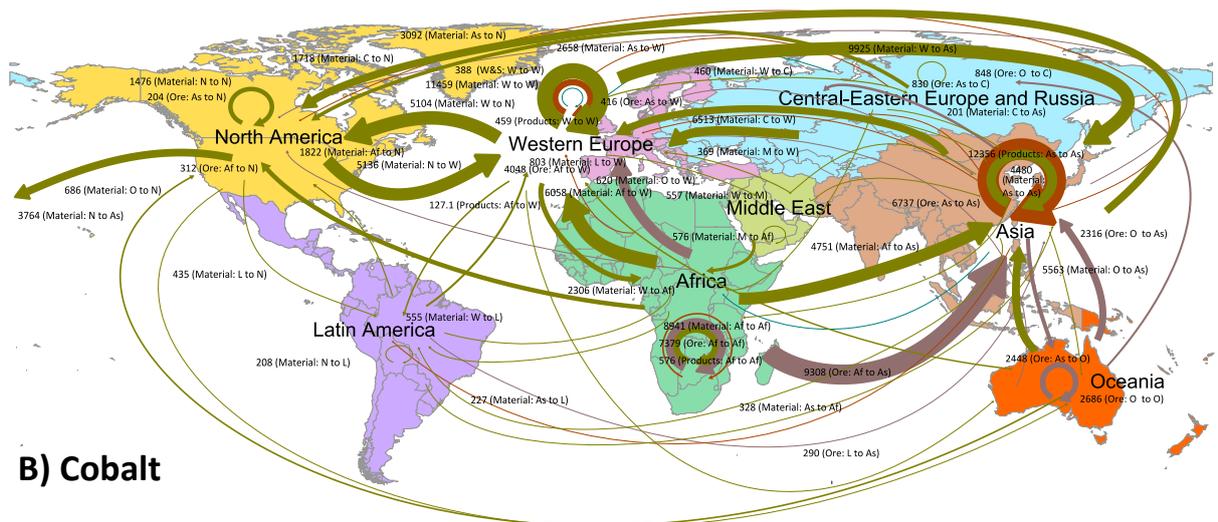
4.1.2.2 主要輸出国と輸入国

コバルトの輸出国の上位 3 か国は、コンゴ民主主義共和国 (22kt)、中国 (13kt)、日本 (10kt) と推計された。コンゴは鉱石に分類される商品の輸出を通じて主にフローが形成されており、そのシェアはそれぞれ 74%を占める。一方、中国と日本は輸出量の 59%と 76%が製品に分類される貿易商品を通じた輸出であった。

輸入の上位 3 か国は日本 (22.9kt)、中国 (18.7kt)、米国 (14.5kt) であった。日本と米国は主として材料としてコバルトを輸入しており、全輸入量のそれぞれ 60.4%と 79.4%を占める。しかし、中国は鉱石としての輸入が 52.6%を占め、主要な輸入国であってもその構成は大きく異なっていた。

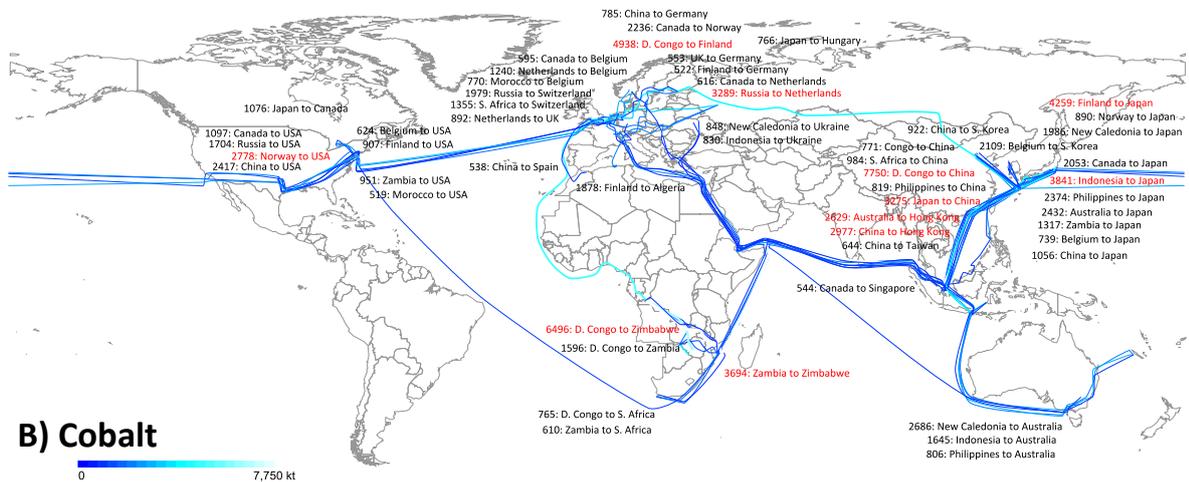
4.1.2.3 世界地域間特性と主要な二国間フロー

図 15 に示すコバルトの世界 8 地域間フローの特性を見ると、採掘国であるアフリカからアジアや西欧へ鉱石として移動し、各地域で材料として加工された後、より広範な地域に対して拡散していく様子が分かる。中でも、西欧内で材料として移動する最も大きく、西欧からアジアへのフローがそれに続く。製品のフローでは、アジアからの各地域へのフローが比較的大きいことから、コバルトを使用する製品の国際サプライチェーンの流れが、アフリカから西欧、そしてアジアへとおおよそ形成されていることが分かる。図 16 は、二国間でのコバルトフローのうち移動量の大きい上位 50 を示している。上位 5 つのフローとして、コンゴから中国 (7.7kt)、コンゴからジンバブエ (6.4kt)、コンゴからフィンランド (4.9kt)、フィンランドから日本 (4.3kt) そしてインドネシアから日本 (3.8kt) が同定された。



B) Cobalt

図 15 8 地域間におけるコバルトを含む国際貿易の商品別フロー（2005 年値）



B) Cobalt

図 16 コバルトを含む国際貿易における上位 50 のフロー（2005 年値）

4.1.3 プラチナ

4.1.3.1 主要貿易製品

プラチナは 259t が 2005 年に採掘され、402t が国際貿易により世界を移動した。移動した商品形態としては、鉱石含有が 6.2t、材料含有が 384t、製品含有が 3.2t、スクラップ含有が 8.9t 推計された。プラチナを移動させた主要な貿易商品は、HS-711011（白金（加工してないもの、一次製品および粉状のものに限る。））が 321t、HS-711019（その他の白金含有半製品）が 48 t、HS-711290（貴金属又は貴金属を張った金属のくずおよび主として貴金属の回収に使用する種類の貴金属又は貴金属の化合物を含有するその他のくず）が 8.7t であった。

4.1.3.2 主要輸出国と輸入国

主要輸出国は南アフリカ（135t）、イギリス（41t）、ドイツ（39t）であり、主に材料に該当する商品に含有されて輸出された。南アフリカでは、輸出量のうち99.9%が材料であり、イギリスは98.3%、ドイツは96.3%を占めた。主要輸入国は米国（72t）、ドイツ（55t）、日本（54t）であった。材料として輸入される量がほとんどであり、米国では98.7%、ドイツでは96.1%、日本では92.8%を占めた。

4.1.3.3 世界地域間特性と主要な二国間フロー

図 17 から世界 8 地域間の特性を見ると、上述の主要フローが材料に分類されたの商品によって形成されているように、採掘国であるアフリカからアジアや西欧への材料としてフローが形成され、西欧内で材料として移動し、西欧からアジアや北米へフローが流れていることが分かる。

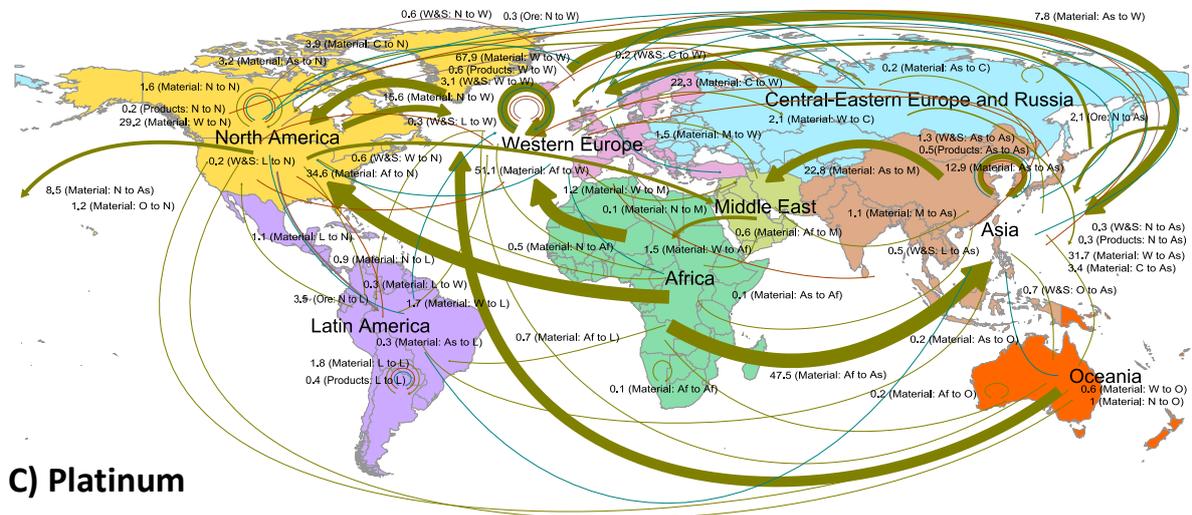


図 17 8 地域間におけるプラチナを含む国際貿易の商品別フロー（2005 年値）

図 18 に詳細な 2 国間の主要フローを示すが、南アフリカから日本（35t）が最も大きいフローである。続いて、南アフリカから米国(33t)、南アフリカからスイス(24t)、インドからアラブ首長国連邦(23t)、そしてイギリスから米国(17t)が上位 5 つのフローである。

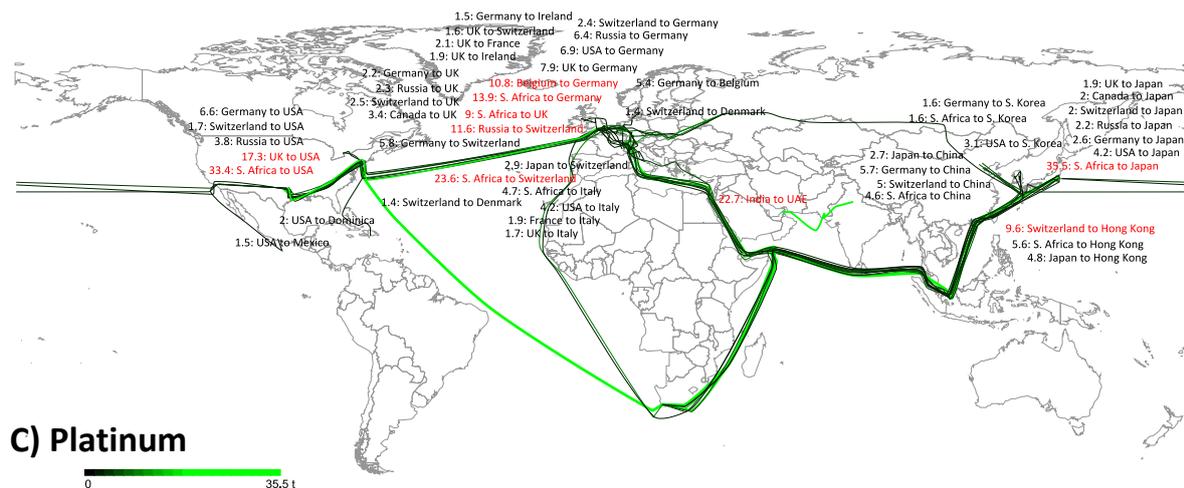


図 18 プラチナを含む国際貿易における上位 50 のフロー（2005 年値）

4.2 日本経済が依存する国際レアメタルフロー

4.2.1 ネオジウム

4.2.1.1 最終需要別の誘引する採掘量と国際フロー

日本の最終需要が世界に直接的間接的に及ぼすネオジウムの採掘量と国際フロー量を最終需要部門別に図 19 に示す。日本の最終需要全体（[8]最終需要計）では、4036t の採掘量を誘引し、5835t の国際フロー量を誘引したと推計された。最終需要全体から輸出を除いた[7]国内最終需要では、1344t の採掘量と 1670t の国際フローを誘引していることから、輸出による寄与が非常に大きいことが分かる。すなわち、日本の輸出は国内需要と比較し、極めて高い国外の資源採掘と国際フローに依存している。国内最終需要の中では、[4]民間投資による影響が最も大きく、国際フロー量が 981t、採掘量が 758t であり、次に[1]家計消費がそれぞれ 483t、408t と続く。

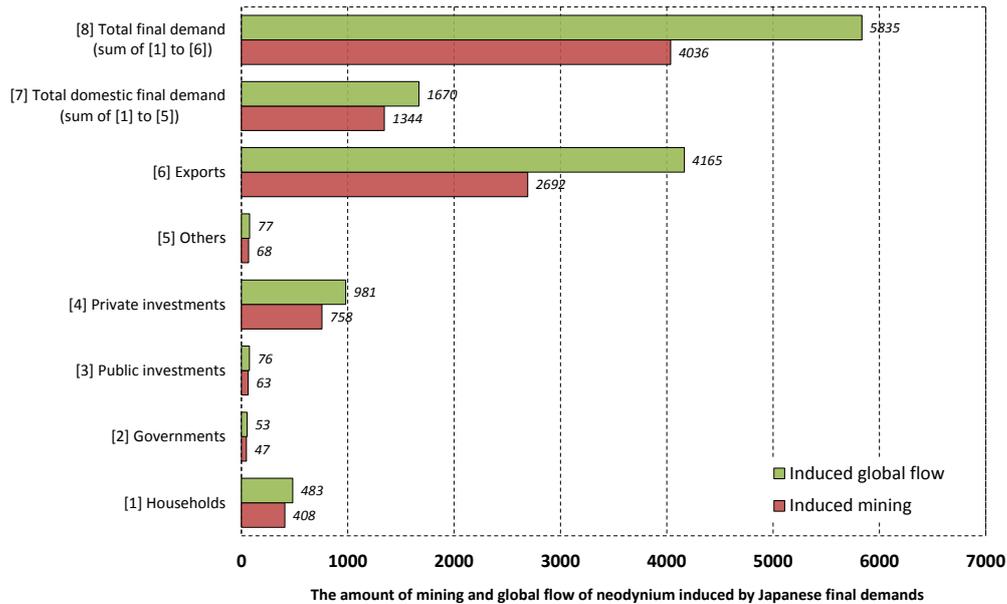


図 19 日本の最終需要部門が誘引するネオジムの採掘量と国際フロー量（2005 年値）

図 20 は図 14 に示したネオジムの世界全体のマテリアルフローから日本の最終需要(国内最終需要+輸出)が誘発するフローを検出し、そのうち量の大きい上位 50 のフローを示している。つまり、図 19 に示した[8]最終需要による 5835t の国際フローがどこで起こったかを示す。

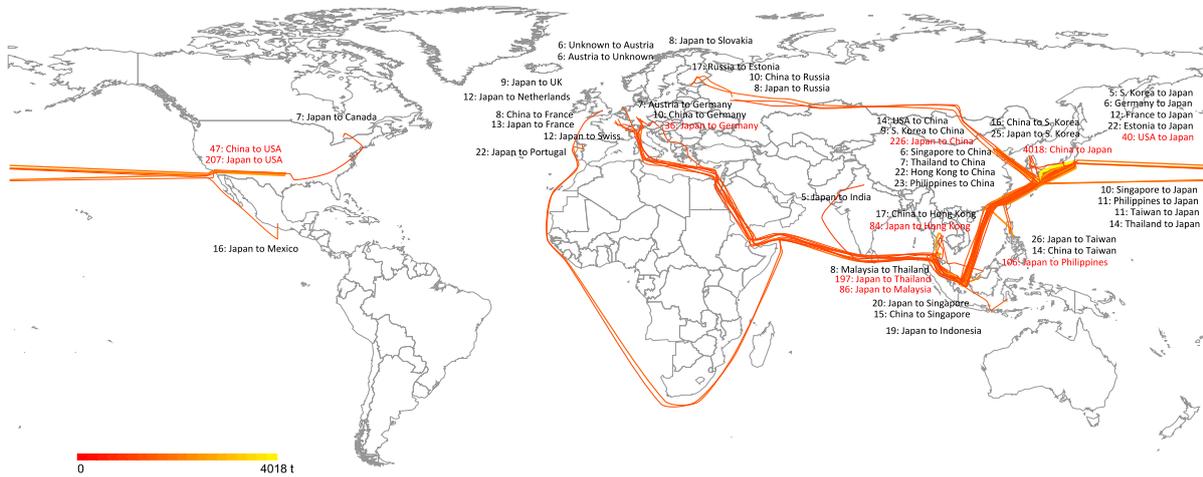


図 20 日本の最終需要によって誘引されたネオジムの国際フロー

このフローは、日本経済が直接間接的に依存するネオジムの国際マテリアルフローであり、本研究では、このフローのネットワーク構造を日本のネオジムに関する国際サプライチェーンの依存構造と理解する。図 14 の世界全体のフローとは異なり、日本への輸入と日本からの輸出で形成された直接的なネオジムのフローが上位（上位 10 のフローは赤字で表示）に来る。中国からの原料輸入

に加え、中でもフィリピン、タイ、マレーシア等の東アジア諸国とのフローが顕著であり、製品中に含んだ輸出によるフローがその要因である。しかし、中国から米国、ロシアからエストニアなど日本を含まない間接的なフローも顕著に現われており、日本の資源依存構造を考える上で、輸出入の直接的な関係だけでなく、グローバルなサプライチェーンを通じた間接的な依存を含めて考察すること重要性が視覚的にも確認できる。

一方、図 21 は日本の[7]国内最終需要による 1670t を構成する国際フローを示しており、図 19 のフローから輸出需要で起こったフローを除いたフローである。最もフローの大きい中国から日本へのフローのように日本の輸入に伴うフローが卓越しており、米国から日本、タイから日本、台湾から日本、シンガポールから日本へのフローが上位 10 個のフローに入る。輸出需要によるフローを含まないため、日本の消費自身が依存する国際フローであるため、日本の直接的な輸入が中心であるが、日本から中国への輸出、中国から米国への輸出、中国からシンガポールへの輸出など、日本を含まない取引も上位のフローとして同定された。

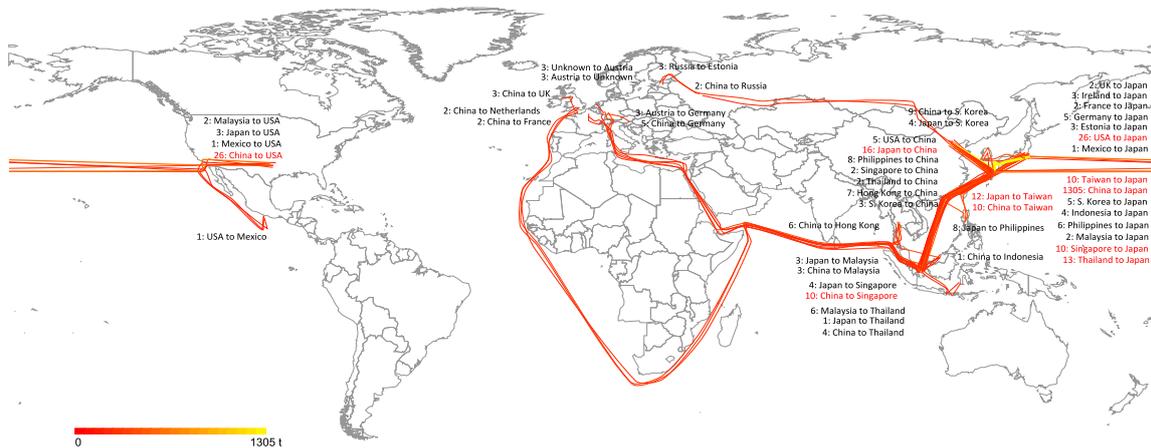


図 21 日本の国内最終需要によって誘引されたネオジムの国際フロー

4.2.2 コバルト

4.2.2.1 最終需要別の誘引する採掘量と国際フロー

日本の最終需要が世界に直接的間接的に及ぼすコバルトの採掘量と国際フロー量を最終需要部門別に図 22 に示す。日本の最終需要全体 ([8]最終需要計) により、22393t の採掘量が誘引され、その倍に近い 41859t のコバルトが国間を移動したと推計された。ネオジムと同様に輸出による誘発採掘と国際フローが大きいと推定され、[7]国内最終需要では、最終需要全体と比べ約半分の 9819t の採掘量と 3 分の 1 程度の大きさの国際フロー (14089t) を誘引した。国内最終需要の中では、[4]民間投資と[1]家計消費による影響がほぼ同じ程度であり、採掘量がそれぞれ 3938t と 3448t、国際フロー量が

それぞれ 5363t と 5208t であった。

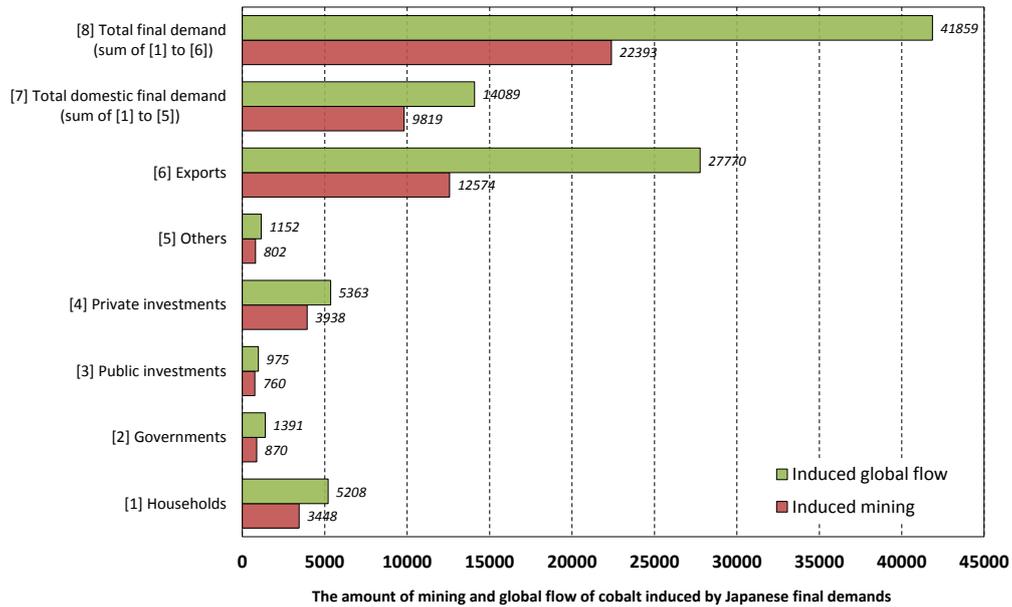


図 22 日本の最終需要部門が誘引するコバルトの採掘量と国際フロー量（2005 年値）

図 23 は日本の最終需要（国内最終需要+輸出）が誘発するコバルトフローを検出し、そのうち量の大きい上位 50 のフローを示している。上位 10 のフローは赤字で表示しているが、フィンランドから日本、インドネシアから日本、中国から日本、コンゴ共和国からフィンランドが上位の 5 つのフローである。

当然ながら多くのフローが日本への輸入であるが、コンゴ共和国からフィンランドなど日本以外

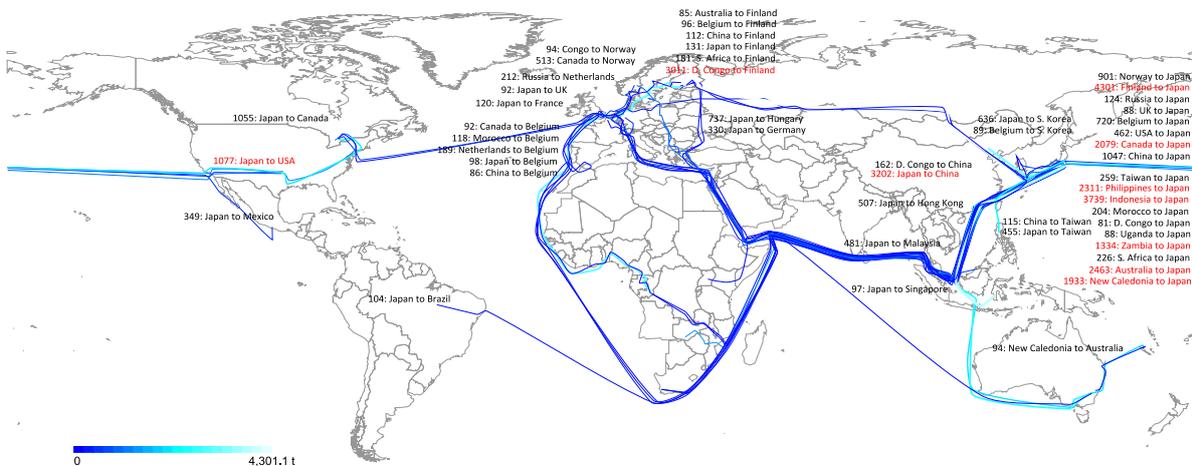


図 23 日本の最終需要によって誘引されたコバルトフロー

のフローも日本の最終需要が依存する重要なフローの中に存在することが分かった。ネオジムの場合は、中国から日本へのフローが突出していたが、コバルトの場合は多方面に日本経済が依存していると理解できる。

一方、図 24 は日本の[7]国内最終需要による 14089t を構成する国際フローを示しており、図 23 のフローから輸出需要に伴い発生したフローを除いたフローである。輸出需要が除かれているため、上位 10 のフローから日本から他国への輸出はなくなり、コンゴ共和国からフィンランドへのフロー以外は日本への輸入のフローが占めた。

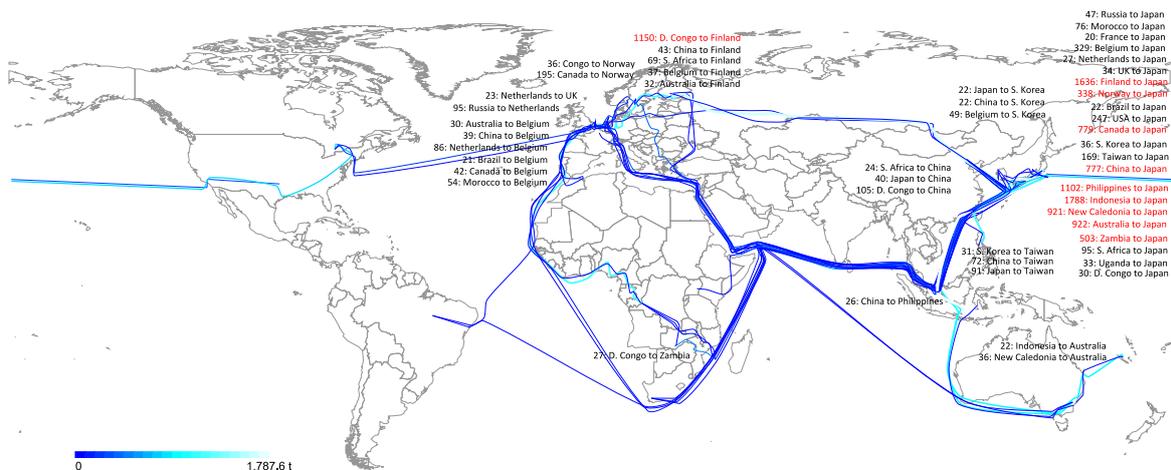


図 24 日本の国内最終需要によって誘引されたコバルトの国際フロー

4.2.3 プラチナ

4.2.3.1 最終需要別の誘引する採掘量と国際フロー

日本の最終需要が世界に直接的間接的に及ぼすプラチナの採掘量と国際フロー量を最終需要部門別に図 25 に示す。日本の最終需要全体（[8]最終需要計）が誘引した採掘量は 52.2t、国際フロー量は 98.8t と推計された。ネオジウム、コバルトと同じく、輸出による影響が大きく、[7]国内最終需要は採掘量が 20.8t、国際フロー量で 32.4t にとどまった。国内最終需要の中では、[4]民間投資が最も大きく採掘量が 8.4t、国際フロー量が 13.3t となった。一方、[1]家計消費による誘発は採掘量が 7.3t あり、国際フロー量が 11.6t あり、民間消費と同程度の影響を示した。

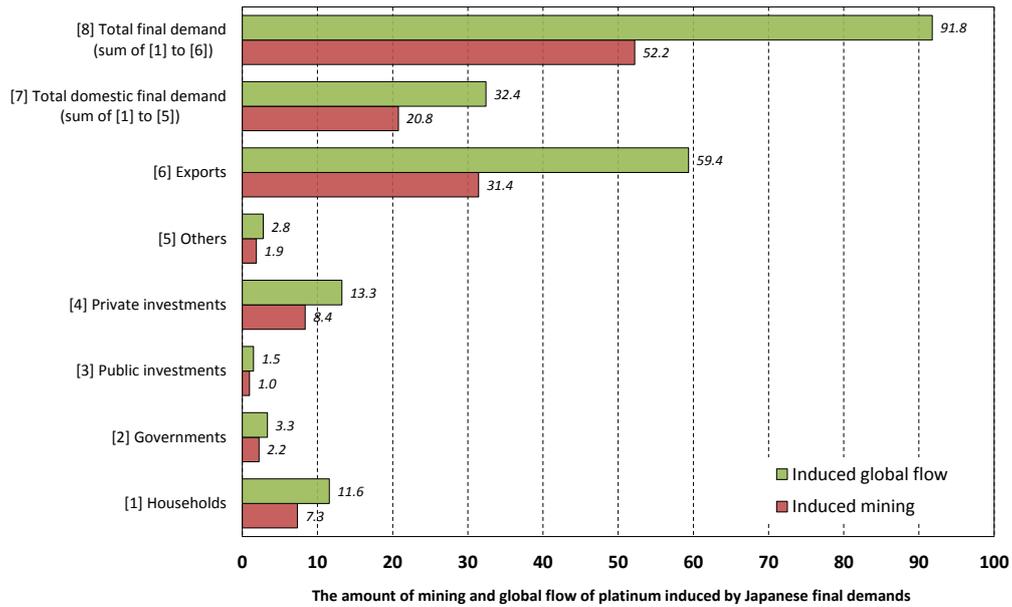


図 25 日本の最終需要部門が誘引するプラチナの採掘量と国際フロー量（2005 年値）

図 26 は日本の最終需要（国内最終需要+輸出）が誘発するプラチナの国際フローを検出し、そのうち量の大きい上位 50 のフローを示している。先と同様に上位 10 のフローは赤字で表示している。最も大きいフローが南アフリカから日本、そして、日本から香港、米国から日本、南アフリカから米国、ドイツから日本、日本からスイスと続き、日本からの輸出が主要なフローを構成する。一方で、英国、米国、スイス、ドイツを中心に日本と直接関係しないフローが散見され、日本経済がこうしたプラチナのフローにも強く依存していることが分かる。

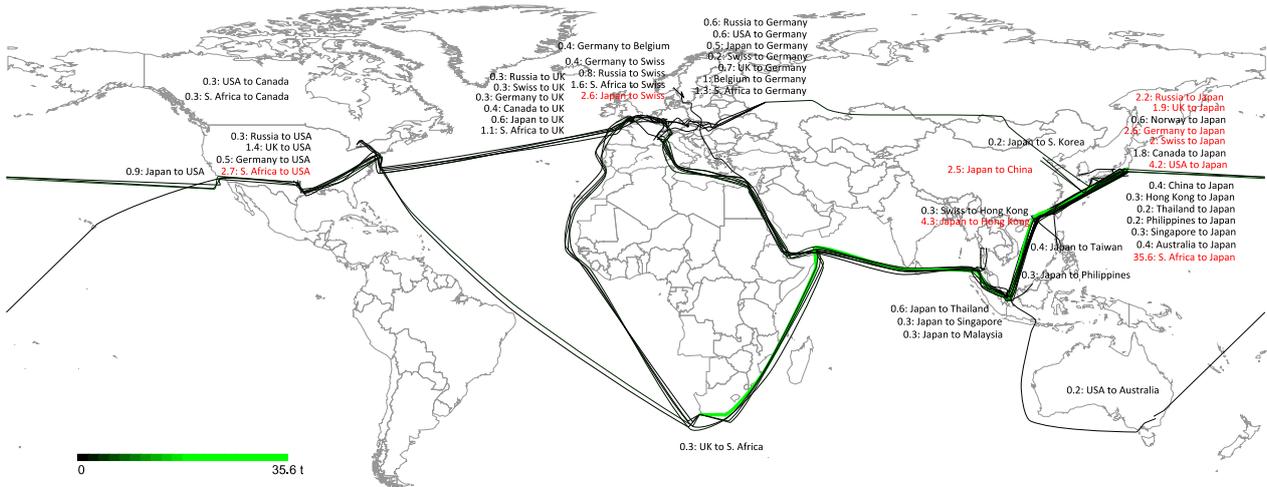


図 26 日本の最終需要によって誘引されたプラチナの国際フロー

一方、図 27 は日本の[7]国内最終需要により誘発された国際フローを示している。輸出により生じたフローを除外したため、日本への輸入が上位 50 のフローに多く含まれる。中も、主要なフローとして南アフリカから日本、米国から日本、ドイツから日本、ロシアから日本、カナダから日本、スイスから日本、イギリスから日本は上位 10 のフローに入る。日本と直接関係しないフローには、南アフリカから米国、イギリスから米国、南アフリカからスイスが生まれ、図 26 と比較しアジアでのフローが含まれるのが特徴と言えよう。

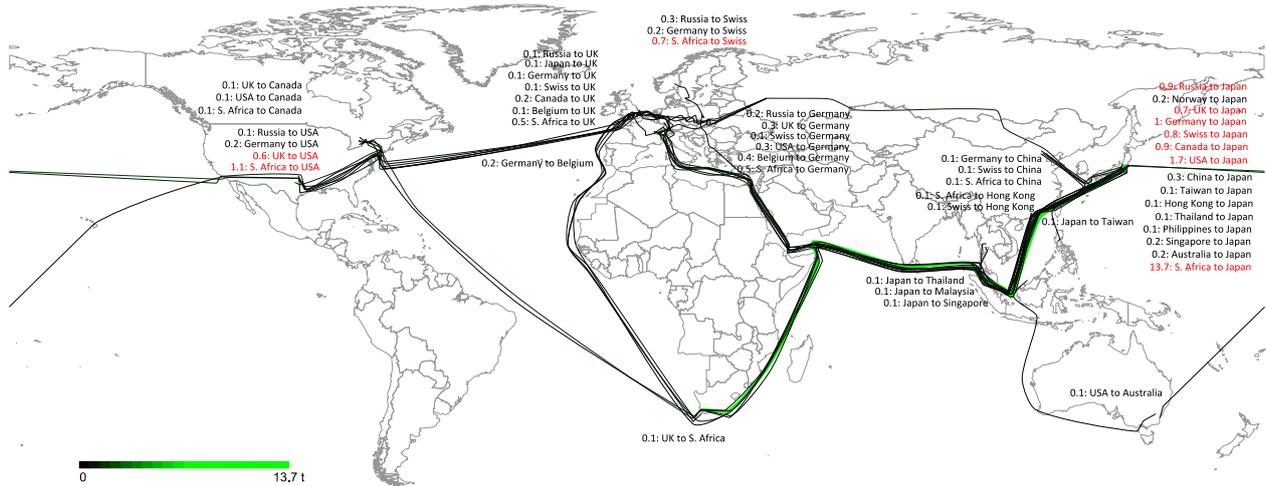


図 27 日本の国内最終需要によって誘引されたプラチナの国際フロー

4.3 国際レアメタルフローの構造特性

4.3.1 各国の経済的・政治的リスクに着目したレアメタルフローの特性

4.3.1.1 日本の最終需要が誘引するレアメタルフローのリスク評価

図 28 は日本の 6 つの最終需要部門が誘引したネオジムに関する採掘量、採掘国のリスクを加味した採掘量、国際フロー量、輸出国のリスクを加味した国際フロー量の世界全体量に占める割合を示している。例えば、[8]の最終需要全体が引き起こすネオジム採掘量は世界全体のネオジム採掘量の 0.32 (32%) を占める。採掘国のリスクを考慮する場合でも、日本の最終需要が世界全体に占めるリスクの割合は 0.32 と等しく、採掘量と相応のリスクを含んでいると理解できる。一方、誘引する国際フロー量は世界全体の 0.350 を占めるが、輸出国の貿易リスクを加味した国際フローで見ると、世界全体の 0.363 を占めており、若干ではあるがリスクの方が高い支配率を示したが、おおむね国際フローの場合もその大きさに相応のリスクであることが分かった。

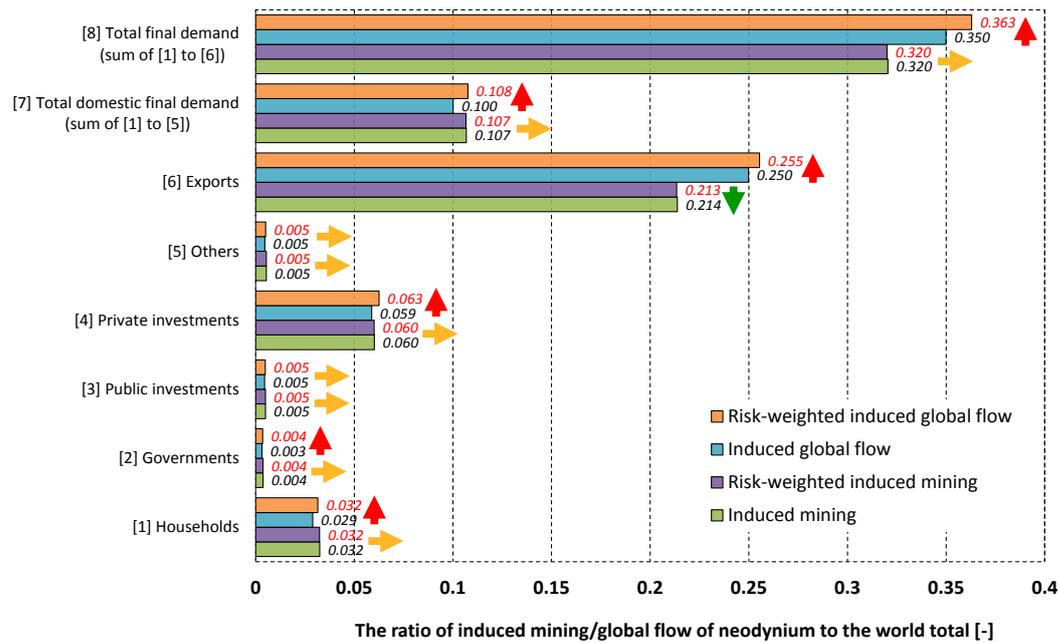


図 28 日本経済が誘引するリスクを加味したネオジウム採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合

コバルトの場合を図 29 に示す。[8]の最終需要全体が引き起こす国際フローを見ると、世界全体の 0.272 を占めるが、リスクを加味した国際フローでは 0.251 にまで低下し、ネオジウムの場合よりも両者の割合に違いが認められた。いずれの最終需要を見ても、国際フローはリスクを加味した方の割合が小さくなっており、特に輸出需要において顕著である。これは、日本から輸出されるコバルトのフローが大きいことから、日本自身の低いリスクが加味されているからである。しかし、輸出を除いた[7]の国内最終需要の場合でも、0.092 から 0.089 へと低減することを鑑みると、ネオジウムの事例よりは、日本の依存するコバルトのフローに内在するリスクは低いと考えられる。

最後に図 30 のプラチナの場合を見ると、採掘量も国際フロー量もそれらのリスクを加味した量と比較し、世界全体に対する支配率はほぼ同値であり、リスクの高い資源依存の構造ではないことが分かった。

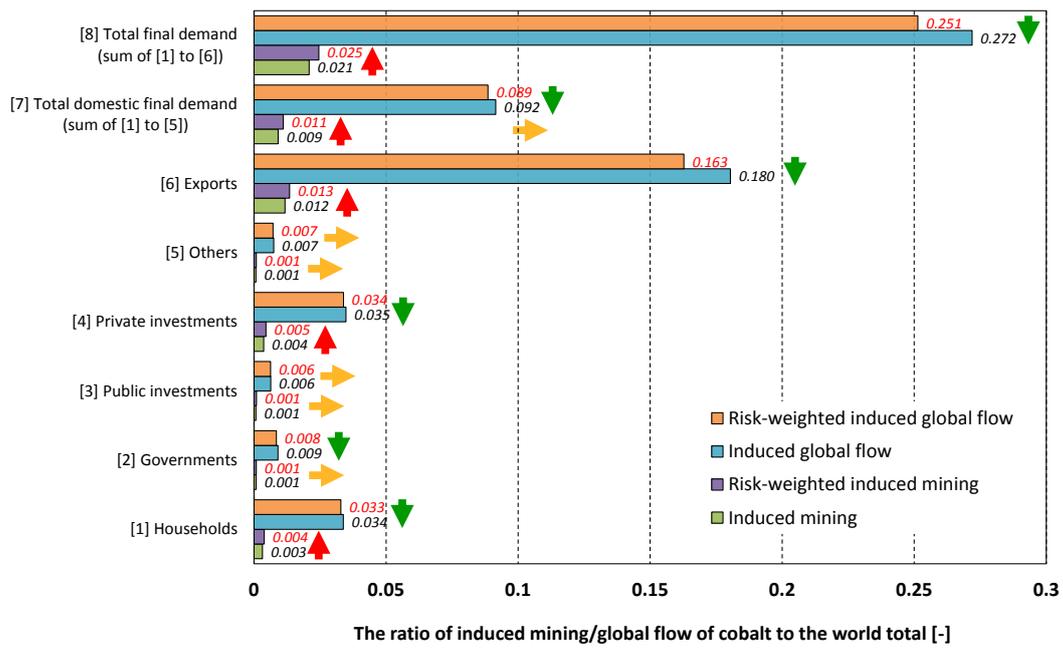


図 29 日本経済が誘引するリスクを加味したコバルト採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合

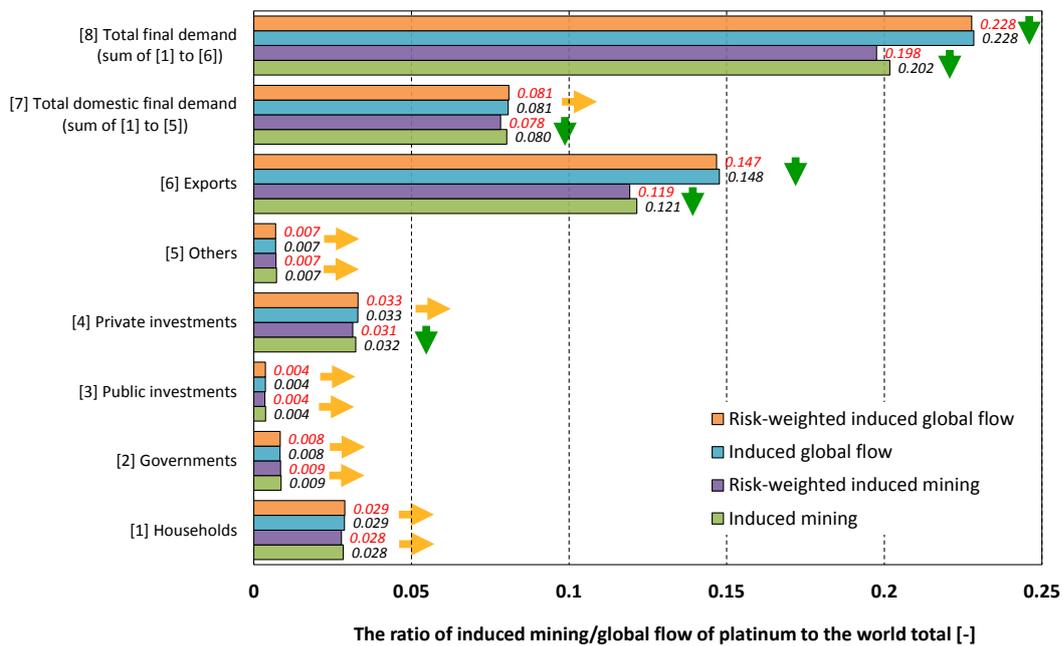


図 30 日本経済が誘引するリスクを加味したプラチナ採掘量と世界フロー量の世界全体量に対する割合

4.3.2 各国の科学技術・社会システムレベルに着目したレアメタルフローの特性

4.3.2.1 世界全体のレアメタルフローにおける非効率的フローの検出

各国の技術・社会システムレベルに着目した国際フローの特性の結果の一例として、図 31 に貿易商品 HS-852520 (Transmission apparatus, for radiotelephone incorporating reception apparatus) に含有されたネオジムの国間移動量を示す。x 軸の 1 から 201 までは技術レベルを低いとした輸入国を、202 から 231 までは技術レベルを高いとした輸入国を配置している。それぞれ区分の中では、GDP の大きさの順に国が並んでいる。Y 軸は同様の順番で輸出国が並び、Z 軸は商品に含有されて移動したネオジムの量を示す。したがって、本研究の定義によれば、1 から 201 までの x 軸と y 軸に囲まれた範囲が Red flow であり、全体の 11%を占める。一方、202 から 231 までの x 軸と y 軸に囲まれた Green flow は 36%であり、残りの Yellow flow が最も大きく 54%であるため、この商品は Yellow-flow commodity と識別された。

ネオジムを含む 153 種類の国際貿易商品を同様に分類すると、21 種類が Green-flow commodity、95 種類が Yellow-flow commodity、残りの 37 種類が Red-flow commodity であった。中でもフローの大きいトップ 3 の商品をそれぞれ表 4 に示す。最も着目すべき Red-flow commodity の中で最もフローの大きい商品は、Electric accumulators (HS850780) (15.1t)、 Household/laundry-type washg mach of a dry linen capa <=10 kg, nes (HS845019) (14.8t)、 Refrigerating or freezing equipment (HS841869) (13.3t) であった。一方、Yellow-flow commodity に分類されたフローの大きいトップ 3 の商品は、 Rare-earth metals, scandium and yttrium (HS280530) (6298t)、 Permanent magnets&art intendd to become permanent magnets, of metal (HS850511) (2694t)、 Compsd of rare-earth met nes, of yttrium/scandium/mx of these metals (HS284690) (2219t)であった。

一方、コバルトを含む 159 種類の国際貿易商品を同様に分類すると、18 種類が Green-flow commodity、51 種類が Yellow-flow commodity、残りの 90 種類が Red-flow commodity であった。中でもフローの大きいトップ 3 の商品をそれぞれ表 4 に示す。Red-flow commodity の中で最もフローの大きい商品は、Cobalt ores and concentrates (HS260500) (21.7kt)、 Drilling mches nes; numerically controlled for removing metal (HS845921) (0.56kt) 、 Television cameras (HS852530) (0.30kt)であった。一方、Yellow-flow commodity に分類されたフローの大きいトップ 3 の商品は、Nickel ores and concentrates (HS260400) (15.6kt)、 Transmission apparatus, for radioteleph incorporatg reception apparatus (HS852520) (6.0kt)、 Electric accumulators (HS850780) (0.82kt)であった。

最後に、プラチナを含む 151 種類の商品は、15 種類が Green-flow commodity、58 種類が Yellow-flow commodity、残りの 78 種類が Red-flow commodity であった。フローの大きいトップ 3 の商品をそれぞれ表 4 に示す。Red-flow commodity に分類された商品は、Household/laundry-type washg mach of a

dry linen capa ≤ 10 kg、 nes (HS845019) (0.28t)、 Freezers of the chest type、 not exceeding 800 l capacity (HS841830) (0.20t)、 Wire of alloy steel、 o/t stainless (HS722990) (0.20k)であった。一方、 Yellow-flow commodity では、 Platinum unwrought or in powder form (HS711011) (321t)、 Precious metal ores and concentrates nes (HS261690) (6.5t)、 Transmission apparatus、 for radioteleph incorporatg reception apparatus (HS852520) (2.3t)のフローが大きい。

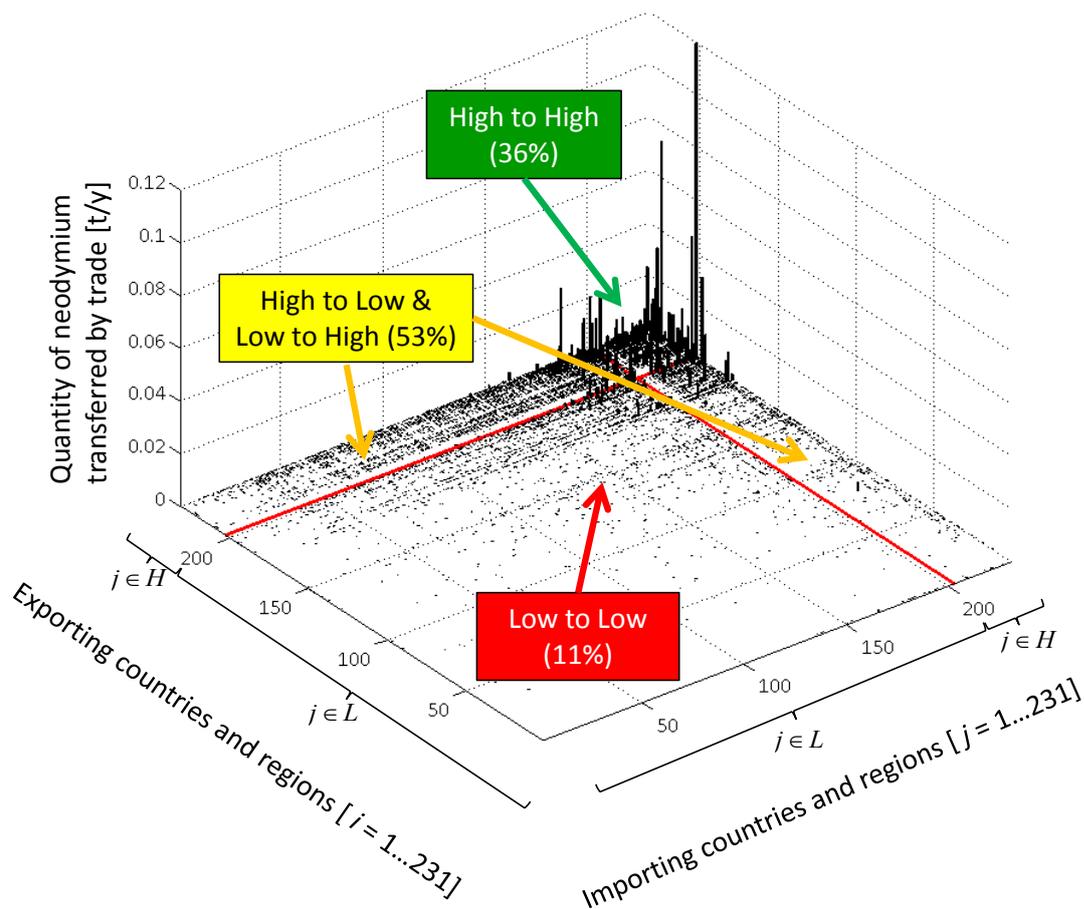


図 31 貿易商品 HS-852520 (Transmission apparatus、 for radiotelephone incorporating reception apparatus)に含まれるネオジムの国際移動量と Red-flow、Yellow-flow、Green-flow との関係

表 4 ネオジウム、コバルト、プラチナに関する主要な Red-flow commodity、Yellow-flow commodity
および Green-flow commodity

A) Neodymium (Nd)	Rank	HS code	Commodity name	Volume [kt/y]
Red-flow commodities	1	845019	Household/laundry-type washing machine of a dry linen capacity of less than 10 kg	15.0
	2	850780	Electric accumulators	14.8
	3	841869	Refrigerating or freezing equipment	13.4
Yellow-flow commodities	1	280530	Rare-earth metals, scandium and yttrium	6294
	2	850511	Permanent magnets & art intended to become permanent magnets of metal	2693
	3	284690	Compounds of rare-earth metal of yttrium, scandium or mix of these metals (excl. cerium)	2219
Green-flow commodities	1	870324	Automobiles with reciprocating piston engine displacing > 3000 cc	49.5
	2	870323	Automobiles with reciprocating piston engine displacing > 1500 cc to 3000 cc	35.6
	3	901813	Magnetic resonance imaging apparatus	20.4
B) Cobalt (Co)	Rank	HS code	Commodity name	Volume [kt/y]
Red-flow commodities	1	260500	Cobalt ores and concentrates	21678
	2	870333	Automobiles with diesel engine displacing more than 2500 cc	708
	3	841869	Refrigerating or freezing equipment	350
Yellow-flow commodities	1	850780	Electric accumulators	20058
	2	260400	Nickel ores and concentrates	16702
	3	852520	Transmission apparatus for radiotelephones incorporating reception apparatus	2671
Green-flow commodities	1	810510	Cobalt, unwrought, matte & other intermediate products, waste, scrap & powders	64548
	2	282200	Cobalt oxides and hydroxides; commercial cobalt oxides	13768
	3	282734	Cobalt chloride	1483
C) Platinum (Pt)	Rank	HS code	Commodity name	Volume [t/y]
Red-flow commodities	1	845019	Household/laundry-type washing machine of a dry linen capacity of less than 10 kg	0.28
	2	841830	Freezers of the chest type, not exceeding 800 l capacity	0.20
	3	841821	Refrigerators, household type, compression-type	0.20
Yellow-flow commodities	1	711011	Platinum unwrought or in powder form	321
	2	261690	Precious metal ores and concentrates	6.2
	3	852520	Transmission apparatus for radiotelephony incorporating reception apparatus	2.3
Green-flow commodities	1	711019	Platinum in other semi-manufactured forms	48.4
	2	711290	Waste & scrap of precious metal or of metal clad with precious metal	8.7
	3	381512	Supported catalyst with precious metal or compounds thereof as the active substance	1.4

レアメタルを使用する最終製品が比較的加工度の高い高機能製品であることから、採掘国から原料としてのフローだけでなく、それを加工する技術のある国が製品へと含有させ、レアメタルを先進国だけでなく途上国を含め世界各国へ広く分配している実態を定量的に確認した。すなわち、サプライチェーンで接続された世界経済の運営において、レアメタルの非意図的な国際流通は既に定常化している。世界に散らばったレアメタルを完全にリサイクルできれば、その持続的利用は可能であるが、その実務的困難さは Barbara and Graedel³¹が指摘する通りである。

換言すれば、レアメタルの採掘から原料、製品、再生へと流れるライフサイクルにおいて、各国がしっかりと国際的な役割を果たし、希少なレアメタルのグローバルな流通を安定的に形成して行かなければ、世界経済全体の着実な成長を阻害する要因となるであろう。更に、新エネルギー技術・低炭素技術の急速的普及を通じて世界経済のグリーン化を促進には、レアメタル利用のライフサイクルを支持する国際流通の安定性に加え、その持続性を強化する必要がある。

レアメタルの持続的利用を国際的に強化するためには、各国がレアメタルの物質利用効率を向上させていくことが一つの手段である。物質利用効率を世界的に向上するには、高い生産技術とそれを支える社会システムを有する国が、自身の技術やシステムをそれらが低いレベルの国々に戦略的

³¹ Reck, B. K.; Graedel, T. E., Challenges in Metal Recycling. *Science* 2012, 337, (6095), 690-695.

に普及させていくことが必要である。普及させるべき生産技術やシステムの優先順位に、本研究で実施した Red-flow、Yellow-flow and green-flow の分類が活用できる。Red-flow commodity に分類された商品は、その多くが生産国（輸出）も利用国（輸入）も生産技術・社会システムレベルが相対的に低い国を経由するサプライチェーンを有しており、Red-flow commodity を生産、利用する技術を改善する優先度は極めて高い。Red-flow commodity を生産または利用する高い技術レベルの国は世界的に限られた存在である。すなわち、高い技術を持つ red-flow commodity を輸出する国が red-flow commodity を輸出する低い技術の国へと生産技術普及を図ることが国際的な役目として求められる。同様に、高い技術を持ち、red-flow commodity を輸入する国も少ない存在であり、red-flow commodity を輸入する低い技術の国へ利用技術を供与することが期待される。

次に優先すべきは、yellow-flow commodity であり、そのサプライチェーンは生産国（輸出）または利用国（輸入）のいずれかが生産技術・社会システムレベルが相対的に低い国を経由する。まず、Yellow-flow commodity のうち、輸出国が技術レベルの高い国である場合（H to L）を考える。この商品については、高い技術レベルを持ち、yellow-flow commodity を輸入する国は相対的に少ないため、そうした国が、yellow-flow commodity を輸入している多くの技術レベルの低い国に関与し、物質利用効率を向上させていくことが必要と考える。逆に、Yellow-flow commodity のうち、輸入国が技術レベルの高い国である場合（L to H）は、yellow-flow commodity を輸出する技術レベルの高い国に役割が求められる。すなわち、その生産技術を yellow-flow commodity を輸出する多数の技術レベルの低い国へと拡充していくことが望ましい。

最後は、技術レベルの高い国の間で多くが取引される green-flow commodity である。この商品については、技術レベルの高い国は自国の生産技術や利用技術レベルを更に向上させていく開発努力を継続することは無論必須である。それに加え、レアメタルの需要そのものを低減させるため、green-flow commodity のリサイクル技術やリユースの社会的仕組みに積極的に注力することが役割であろう。

具体的に主要国の状況を確認する。表 4 に示したネオジムに関する Red-flow commodity を輸出する国（H）の中で、ネオジム輸出量が最も多い国を見ると、エストニア（Electric accumulators (HS850780)、 Furniture designed to receive refrigerating or freezing equipment (HS841891))、デンマーク（Household/laundry-type washg mach of a dry linen capa <=10 kg, nes (HS845019))、チェコ（Refrigerating or freezing equipment nes (HS841869))、シンガポール（Air compressors mounted on a wheeled chassis for towing (HS841440)) である。こうした国の該当する Red-flow commodity に関する生産技術の普及や移転が資源利用の持続可能性を高めるであろう。また、Red-flow commodity を輸入する国（H）も同様の役割を担う。すなわち、その商品の利用技術を国（L）が吸収することで、

より効率的な資源の利用に向かう。具体的は、フィンランド (Electric accumulators (HS850780)、)、マレーシア (Household/laundry-type washg mach of a dry linen capa <=10 kg, nes (HS845019)、 Air compressors mounted on a wheeled chassis for towing (HS841440))、ドイツ (Refrigerating or freezing equipment nes (HS841869) 、 Furniture designed to receive refrigerating or freezing equipment (HS841891)) が主要な輸入国 (H) である。

同様に、表 4 の Yellow-commodity (L to H) を最も輸出する国 (H) は、オーストリア (Rare-earth metals、 scandium and yttrium (HS280530)、 Compds of rare-earth met nes、 of yttrium/scandium/mx of these metals (HS284690)、日本 (Permanent magnets&art intendd to become permanent magnets、 of metal (HS850511)、 Ferro-alloys、 nes (HS720299))、韓国 (Transmission apparatus、 for radioteleph incorporatg reception apparatus (HS852520))である。これらの商品はネオジムの流通量も多く、各国 (H) が率先して技術提供を行うことで、世界全体のネオジムの物質利用効率を上げることができる。これは、間接的に各国 (H) がネオジムの国際フローの中からネオジムを調達しやすくすることにつながっていく。すなわち、戦略的に技術的提供を考えることで、自国の利益と世界全体の利益を相乗的に生み出すこともできよう。高い技術を持つ各国が自国に期待される役割を理解することで、資源利用の持続可能性を向上させる速度と実現性が高まることが考えられる。政策的にもそのための技術・研究開発を強く推進することが必要である。ただ、最も注意を要するのは、本研究のデータ収集の制約から、技術レベルの判定には一般的な科学技術レベルの情報を基にしていることである。より厳密的に精度高く商品の特性化を行うには、各国のレアメタルの生産、利用技術レベルを調査し、その優劣に基づいた判定を行う必要がある。本研究で採用した World Competitiveness Report³²のように、世界で協力して調査研究を実施していくことが望まれる。

4.3.2.2 日本の最終需要が誘引するレアメタルフローにおける非効率的フローの検出

図 32 から図 34 は日本の最終需要が誘引する国際フロー (ネオジムの場合は図 19、コバルトの場合は図 22、プラチナの場合は図 25) を Red-flow、Yellow-flow、Green-flow に区分し、その内訳を示している。図 32 のネオジムの場合、どの最終需要においても Yellow-flow が 9 割近くを占めており、次に Green-flow が大きく、輸出国も輸入国も技術レベルの低い国間でのフローである Red-flow に依存するのはかなり限定的であることが確認できた。図 33 のコバルトと図 34 のプラチナはネオジムと比較する Green-flow の割合が非常に大きいことが分かる。これは、国際的な技術改善の優先はネオジムの方が高いことを示唆しており、日本はネオジムの Yellow-flow を Green-flow に改善す

³² Schwab, K. The Global Competitiveness Report 2012-2013: Full Data Edition; The World Economic Forum: 2012.

るための技術協力を国際的に行っていくことが、自国の資源調達と持続可能な資源利用の実現において戦略的であると考えられる。

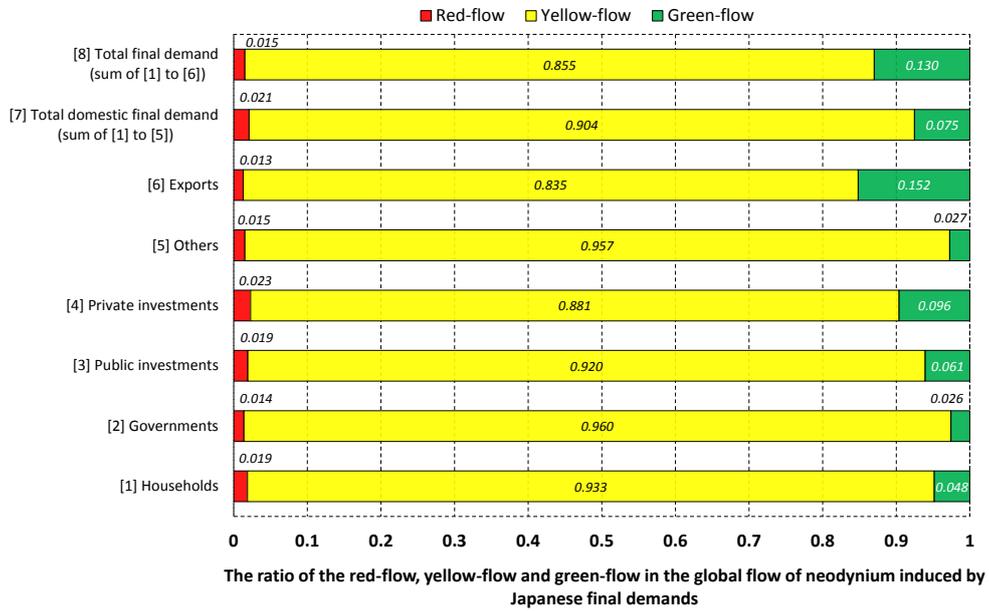


図 32 日本の最終需要が誘引するネオジムの国際マテリアルフローにおける Red-flow、Yellow-flow、Green-flow の割合

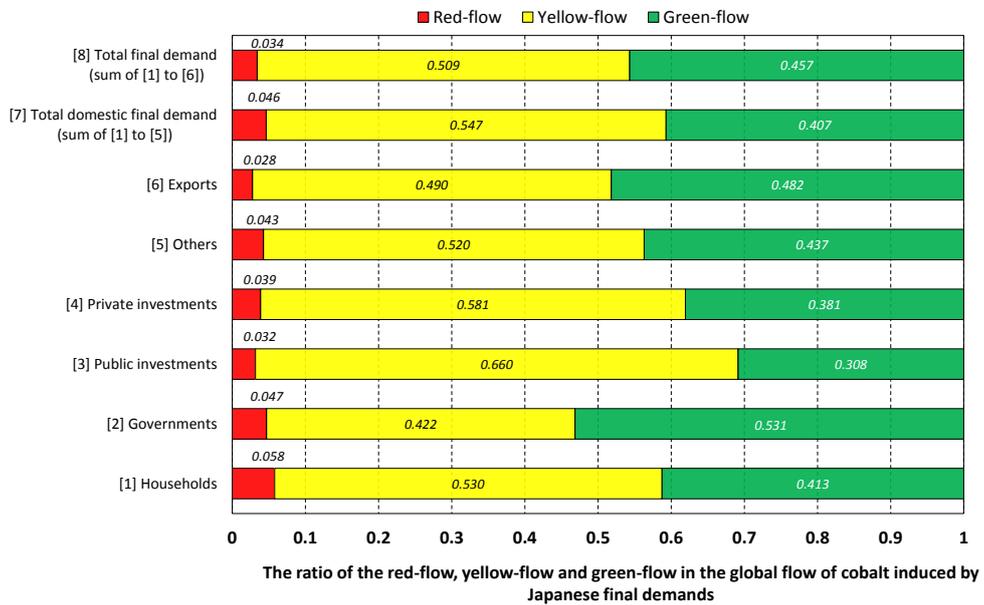


図 33 日本の最終需要が誘引するコバルトの国際マテリアルフローにおける Red-flow、Yellow-flow、Green-flow の割合

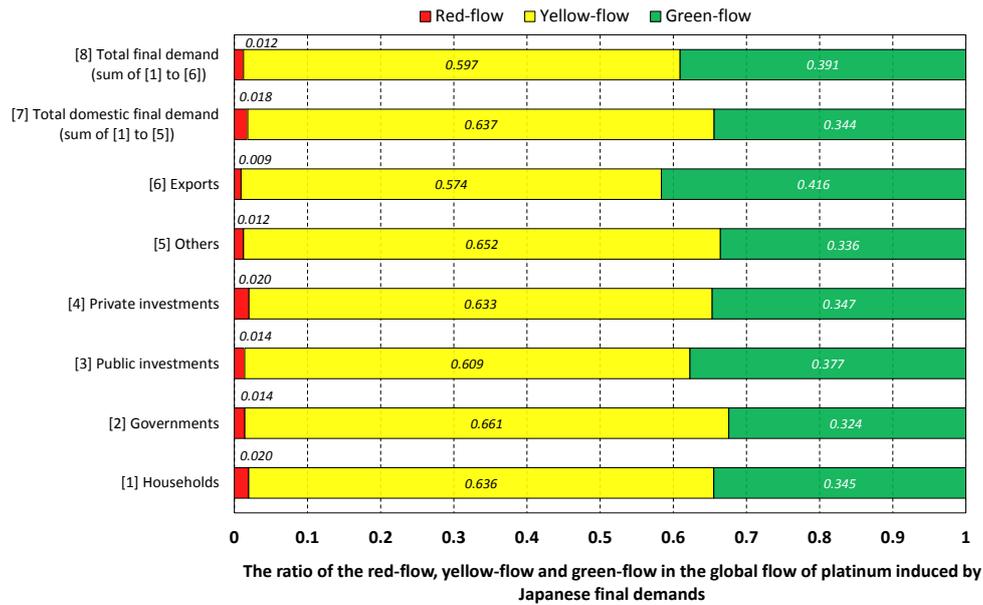


図 34 日本の最終需要が誘引するプラチナの国際マテリアルフローにおける Red-flow、Yellow-flow、Green-flow の割合

4.4 日本の家計消費が依存する国際レアメタルフローの 2035 年までの変化

4.4.1 今後の世帯主年来階級別の世帯数および世帯人口の推移

2005 年から 2035 年にかけて推移する 5 年ごとの世帯属性別の世帯数および世帯人口を、図 35 に示す。世帯数は人口研による推計値であり、世帯人口は 3.8 の手法を用いて得た推計値である。よって図 35 は、それぞれの過去の傾向をもとに、今後の少子高齢化を予測した結果と言える。世帯数は 2005 年の 491 万世帯から 2020 年の 531 万世帯まで増加し、その後減少していく。2035 年には 496 万世帯となって 2005 年の世帯数を僅かに上回る (2005 年比+1.0%)。一方、総世帯人口は 2010 年の 1.26 億人をピークに減少傾向に転じ、2035 年には 1.09 億人となる (同年比-13.0%)。

この両者の違いは、高齢化に伴う高年世帯の顕著な増加と、少子化に伴う 50s 以下の若中年世帯における人口減少に起因する。最も高年の 70s 以上の世帯数は 2025 年まで増加し続け、その後減少するも 2035 年の世帯数は 2005 年と比較して 1.7 倍弱に達する。別の見方をすると、70s 以上の世帯数は 2005 年で全世帯数の 19.0%を占めたのに対し、2035 年では 31.6%にまで上昇している。70s 以上の次に高年である 60s の世帯数と合わせると、同年で全世帯の過半数 (51.6%) となり、高齢化の急激な進行による影響が伺える。これに対し、30s 以下の世帯数およびその構成人口は 2005 年比で大きく減少している。

平均世帯人員数はどの世帯においても2005年から2035年にかけて減少していくと予想されるが、特に子持ちの多い40sと50sの世帯において減少傾向が強い。そのため平均世帯人員数がそれぞれ3.52人から2.73人と最も大きく落ち込む40sの世帯における人口は、2005年から919万人も減少する(同年比-34.5%)と推定され、少子化の影響が色濃く表れていると言える。これらの世帯における将来支出額および国際フロー量は、世帯数だけでなく平均世帯人員数の変化に由来するコホート効果が大きくなることが予想される。

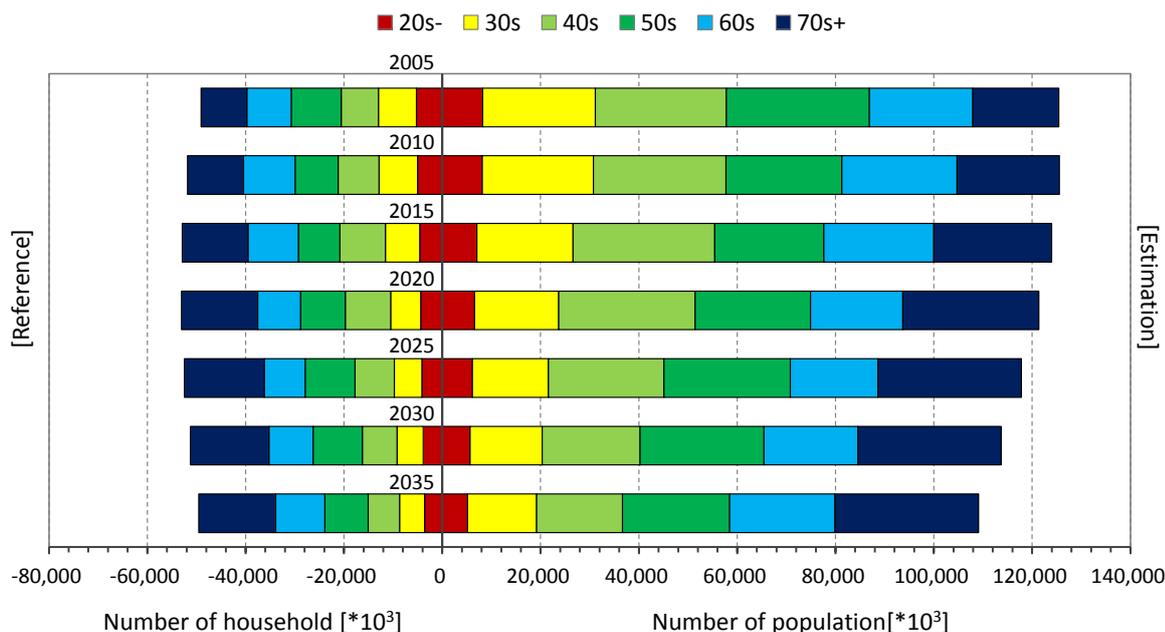


図 35 2005年から2035年における5年ごとの世帯主年齢階級別の世帯数(1000世帯あたり：グラフ左側)と世帯人口(1000人あたり：グラフ右側)：世帯数は人口研による推計値、世帯人口は本研究における推計値

4.4.2 2005年から2035年までの誘引国際フロー量の推計結果

本研究では、レアメタル対象とする2005年から2035年までの日本の家計消費需要が誘引する国際フロー量を、少子高齢化に伴う世帯構成の変化の観点から推計した。本報告書では、紙面の制約から特にネオジムについて得られた結果について詳述する。2005年から2035年にかけて変化する家計消費由来のネオジムの国際フロー量の推計結果を、図36(a)に示す。ここでは、対象とした約800部門における国際フロー量を、産業連関表の中部門分類をもとにして新たに統合した13部門で表している。誘引する国際フロー総量の推移では、2005年の491.5tから、2035年には447.4tに減少すると推計された。この間の国際フロー量の減少率は9.0%であり、この数値は少子高齢化によ

て国際フロー量が自然に減衰していくことを定量的に示した結果である。もしコホート効果がない場合、つまり 2005 年から平均世帯人員数が変化しない場合、2035 年のネオジムの国際フロー量は先の結果より 6.5% (29.2 t) 大きい 476.6 t となるため、この差がコホート効果によって国際フロー量に生じた影響である。残りの 2.5% (=9.0-6.5) は世帯数の変化による影響を表し、世帯数自体は 2005 年と比較して微増しているにも関わらず、国際フロー量は減少することになる。すなわち、少子高齢化による世帯構成の変化に伴って全体の消費構成が変化することだけでも、国際フロー量は減少する。

部門の内識別に国際フロー量を見ると、どの年も乗用車やバイク等を含む「(4) 輸送機器」と携帯電話や電化製品を含む「(5) 家電製品・日用品」だけで全体の 60%ほどを占めているが、「(12) サービス」や「(10) 医療・保健・介護」が誘引する国際フロー量も他の部門と比較すると大きい部類である。具体的にどのような商品部門が国際フロー量を誘引しているかについては、次節以降で詳述する。

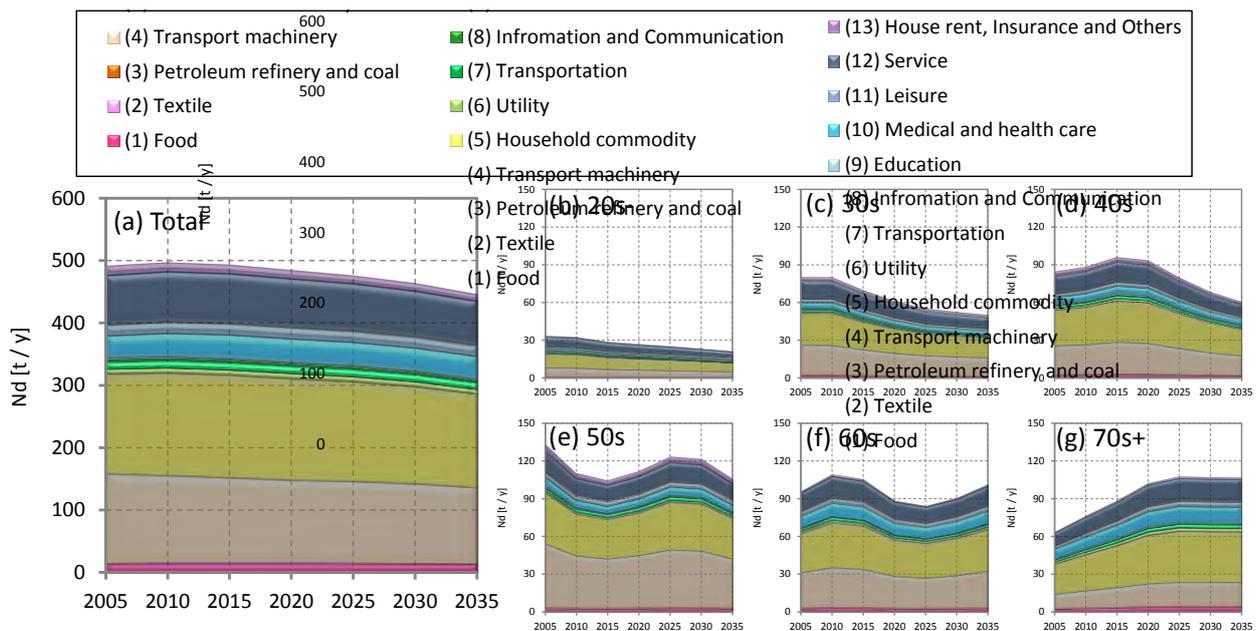


図 36 2005 年から 2035 年における、日本の家計消費が誘引するネオジムの国際フロー量の推移：(a) は国際フロー総量、(b)-(g) はそれぞれ 20 代以下 (20s-) から 70 代以上 (70s+) の世帯属性別国際フロー量

図 36(b)-(g) において世帯別の国際フロー量を比較すると、2035 年までにおいて、特に 20s 以下と 30s の若年世帯における減少が目立つ一方、70s 以上の世帯における増大が顕著である。これらの変化量の差は 1.4 t で、僅かではあるが 70s 以上による増加量が上回る。したがって、少子化によ

る若年世帯の減少による国際フロー量の減少分は、高齢化に伴う高年世帯の増加分で相殺されうる
ことが示唆される。また、70s 以上の世帯による国際フロー量誘引の寄与率は、2005 年から 2035
年にかけて 13.0%から 23.8%に大きく上昇することからも、少子高齢化による家計消費由来の国際
フロー量の誘引構造の変化が見て取れる。

4.4.3 一世帯あたりの世帯別国際フロー量の特徴

図 37 に、2005 年と 2035 年にお
ける、日本の家計消費に由来する
一世帯あたりの国際フロー量を先
の 13 部門分類によって示す。この
結果は、両年における各々の世帯
の平均的な消費形態を捉えている
と言える。まず、現状把握として、
2005 年の日本の家計消費に由来
する一世帯あたりの国際フロー量
について述べる。2005 年の一世帯
あたり家計消費額の大きさは 50s、
40s、60s の順であり、いずれの対
象金属についても一世帯あたりの
国際フロー量が最も大きかったの

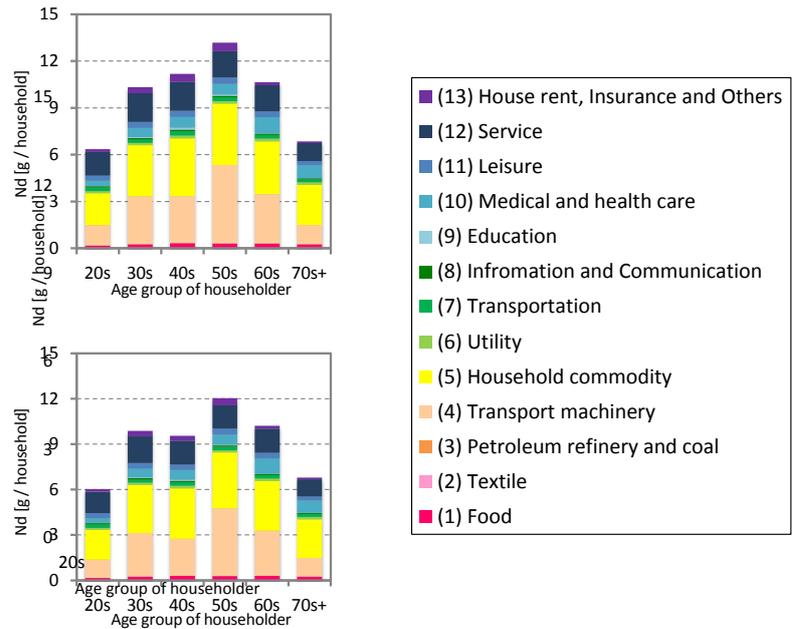


図 37 2005 年の世帯属性別一世帯あたりの国際フロー量と
2035 年の世帯属性別一世帯あたりの国際フロー量

は 50s の世帯で、ネオジムについては 13.2 g / 世帯であった。その理由としては、「(4) 輸送機器」
による誘引が他の世帯と比較して特に大きいことが挙げられる。そのうち、「乗用車」部門が顕著に
その傾向を示しているが、50s は最も世帯収入が大きく、2 台以上の乗用車の保有や比較的価格の高
い乗用車 (高級車やハイブリッド自動車等のエコカー) の購入が多い傾向を反映していると考えら
れる。また、冷蔵庫やドライヤー等の家電製品が含まれる「民生用電気機器 (除エアコン)」部門も
大きい国際フロー量を示している。50s に続く 40s の国際フロー量については、他の世帯と比べる
と「(1) 食料品」と「(9) 教育」による誘引が大きく、平均世帯人員数の多さを反映した結果とも見
られる。最も若い 20 代以下と最も高齢の 70s 以上の国際フロー量を比較すると、7%後者が上回っ
た。その主な要因として、「(5) 家電製品・日用品」に含まれる「民生用電気機器 (除エアコン)」部門
や「(10) 医療・保健・介護」に含まれる「医療用機械器具」部門における国際フロー量の差を挙げ
ることができ、若年世帯と高年世帯のライフスタイルの違いがよく表れた一例である。一方、主な

ネオジムの使用用途の一つであり、高年世帯と比べて若年世帯の普及率が高い「携帯電話機」部門については(2005年内閣府消費動向調査より)、20sにおける国際フロー量のほうが大きい、前述の2部門ほどの絶対量の差はなかった。

次に2035年の結果を参照すると、全世帯において国際フロー量は減少しているが、特に2005年から少子化に由来する平均世帯人員数の減少の影響を受けて40sの減少が顕著である。それに対して70s以上ではほとんど減少が見られないため、3.2の最後にも述べたことも含めて、高年世帯による消費と国際フロー量の結びつきが強い部門について今後も注視していくことが重要であると考えられる。

4.4.4 2035年における国際フロー量の詳細な内訳

表5は、2035年におけるネオジムの国際フロー量を誘引する、13部門分類ごとの上位5部門をまとめたものである。「乗用車」部門による国際フロー量の誘引量が最大となっており、この値は総国際フロー量の20%以上を占める。2番目は「自動車修理」部門による41.5 tで、自動車関連の部門が続いた。「(5)家電製品・日用品」の中では「民生用電気機器(除エアコン)」部門や「ラジオ・テレビ受信機」部門による誘引量が大きく、「携帯電話機」部門や「パーソナルコンピュータ」部門はこれらを下回った。これらの結果は取り立てて驚くべき隠れたマテリアルフローを明らかにしたとは言えないが、見方を変えれば、現状すでに注目されている商品について今後も効率的なレアメタル回収技術に取り組むことの重要性を裏付けている。また、対照的にあまりこれまで着目されていない隠れた国際フロー量に関して言えば、「医療用機械器具」部門や「小売」部門等は注目に値する。

次に、2035年と2005年の各国際フロー量の差が大きかった上位3部門を、それぞれ増加分と減少分の二つの視点で見ると、まず前者は「医療(医療法人等)」部門(+0.79 t)、「民生用エアコンディショナ」部門(+0.36 t)、「医療用機械器具」部門(+0.33 t)と続いた。「医療(国公立)」と「医療(公益法人等)」も増加するため、医療関係の需要の増大は、現状(2005年)の誘引量を上回って将来の国際フロー総量を増大させる方向に働かせることが明らかになり、今後の高齢化の進行に強く依存すると考えられる。一方で国際フロー総量を減少させる方向に働く上位3部門には、「乗用車」部門(-17.8 t)、「自動車修理」部門(-7.06 t)、「トラック・バス・その他の輸送機器」部門(-3.59 t)といった自動車関連の部門が並んだ。これら上位3部門による減少分は、両年における国際フロー総量の減少分のうち65%近くもある。これらは2035年時点での国際フロー量自体が大きいものの、世帯構成の変化による影響で自然に減少していく可能性が示唆された。

表 5 2035 年における 13 部門ごとのネオジムの国際フロー量上位 5 部門とその誘引量(t/y)および

全 409 部門中の総合順位: 黄色で着色されている部門は総合順位で 10 位以内

統合部門 (部門別総MFF)	商品部門 Top5	MFF (t / y)	総合順位 (409部門中)
(1) 食料品 (13.1 t)	清涼飲料	2.14	33
	精穀	1.10	48
	そう菜・すし・弁当	0.95	51
	菓子類	0.80	56
	野菜	0.68	61
(2) 衣類・繊維製品 (0.28 t)	その他の繊維既製品	0.09	145
	その他の衣服・身の回り品	0.05	163
	ニット製衣服	0.04	171
	その他の繊維工業製品	0.03	173
	じゅうたん・床敷物	0.02	190
(3) 石油化学製品 (0.34 t)	ガソリン	0.24	102
	灯油	0.06	159
	その他石油製品	0.02	194
	軽油	0.01	202
	LPG	0.01	212
(4) 輸送機器 (122 t)	乗用車	100	1
	トラック・バス・その他の自動車	20.5	5
	二輪自動車	0.88	54
	自動車部品	0.43	80
	自転車	0.16	114
(5) 家電製品・日用品 (150 t)	民生用電気機器 (除エアコン)	30.4	3
	ラジオ・テレビ受信機	22.5	4
	携帯電話機	15.1	7
	電気音響機器	11.9	8
	その他の電子部品	11.9	9
(6) 光熱・水道・廃棄物 (7.86 t)	事業用電力	5.17	19
	下水道	1.39	44
	都市ガス	0.63	64
	上水道・簡易水道	0.54	69
	廃棄物処理 (産業)	0.10	138
(7) 交通 (10.7 t)	道路貨物輸送 (除自家輸送)	3.28	25
	鉄道旅客輸送	2.85	29
	バス	1.42	43
	ハイヤー・タクシー	1.00	49
	航空輸送	0.89	53
(8) 情報通信 (3.91 t)	移動電気通信	1.33	45
	固定電気通信	0.59	67
	情報サービス	0.45	77
	公共放送	0.37	85
	その他の電気通信	0.27	92
(9) 教育 (1.48 t)	学校教育 (私立)	1.12	47
	その他の教育訓練機関 (産業)	0.18	107
	学校教育(国公立)	0.14	117
	社会教育(非営利)	0.03	183
	社会教育(国公立)	0.01	208
(10) 医療・保健・介護 (37.0 t)	医療用機械器具	20.2	6
	医療 (医療法人等)	9.87	11
	医療 (国公立)	3.03	27
	医療 (公益法人等)	2.92	28
	社会福祉 (非営利)	0.33	87
(11) 娯楽 (16.8 t)	一般飲食店 (除喫茶店)	5.58	17
	宿泊業	3.48	24
	遊戯場	3.07	26
	遊興飲食店	0.98	50
	物品賃貸業 (除貸自動車)	0.94	52
(12) サービス (71.4 t)	自動車修理	41.5	2
	小売	10.1	10
	卸売	7.22	13
	美容業	2.34	30
	個人教授業	1.64	39
(13) 住宅・保険・その他 (12.3 t)	住宅賃貸料 (帰属家賃)	6.39	16
	住宅賃貸料	3.60	22
	生命保険	1.93	36
	損害保険	0.38	83
	分類不明	0.07	154

4.5 国際レアメタルフローにおける Hotspot（レアメタル利用が集約的な貿易国群）

4.5.1 各レアメタル国際フローにおける Hotspot と日本の位置づけ

本研究で整備された 231 カ国を対象としたレアメタルの国際貿易データベースによると、ネオジウム、コバルト、プラチナの国際貿易量はそれぞれ 18565t、153916t、402t であった。ネオジウム、コバルト、プラチナは電子部品、民生用電気機器など様々な製造工業品に利用されているため特に先進工業国の輸入量の大きさが際立つ。先進工業国は、それらのレアメタルを様々な国から輸入しており、各先進工業国の輸入相手国は地理的な状況や貿易政策の状況によって異なっている。レアメタルの輸入国にとっても輸出国にとっても、自国がどのようなレアメタルの国際貿易クラスターに属しているのか把握しておくことは、輸出国から見た資源の安定供給や輸入国からみた資源の安定確保において極めて重要である。そこで本節では、3.4 で開発された国際貿易ネットワークに関するクラスタリング手法を用いて、レアメタルの国際貿易ネットワークデータからネオジウム、コバルト、プラチナの国際貿易 Hotspot を検出する。

まず、ネオジウムの国際貿易ネットワークから検出した国際貿易 Hotspot について述べる。分析の結果、合計で 18 個の Hotspot を検出した。Hotspot の中でも特にネオジウムの国際貿易量が最大のもののは 11 番の Hotspot であり、国際貿易総量の約 41% を占める 7589 t もの取引がされていた（図 38 を参照）。この Hotspot は、中国（CHN）、香港（HKG）、フィリピン（PHI）、インド（IND）、スリランカ（SRI）、モルディブ（MDV）、アメリカ（USA）、セーシェル（SEY）、日本（JPN）からなる Hotspot であり、特に中国が貿易量の観点から重要な役割を果たしている（図 39 を参照）。次に大きな Hotspot は、13 番の Hotspot であり、1470t のネオジウムが取引されていた。この Hotspot は、韓国（KOR）、イラン（IRI）、アラブ首長国連邦（UAE）、スウェーデン（SWE）、デンマーク（DEN）、イギリス（GBR）、アイルランド（IRL）、オランダ（NED）、フランス（FRA）、ドイツ（GER）、スイス（SUI）、イタリア（ITA）、フィンランド（FIN）、ハンガリー（HUN）、スロベニア（SLO）、チェコ（CZE）、スロバキア（SVK）というヨーロッパ諸国を中心としたものである。興味深い点は、日本と地理的に非常に近い韓国が日本とは違う Hotspot に含まれている点である。これは明らかに韓国のネオジウムの密な貿易パートナーが日本とは違うことを示している。

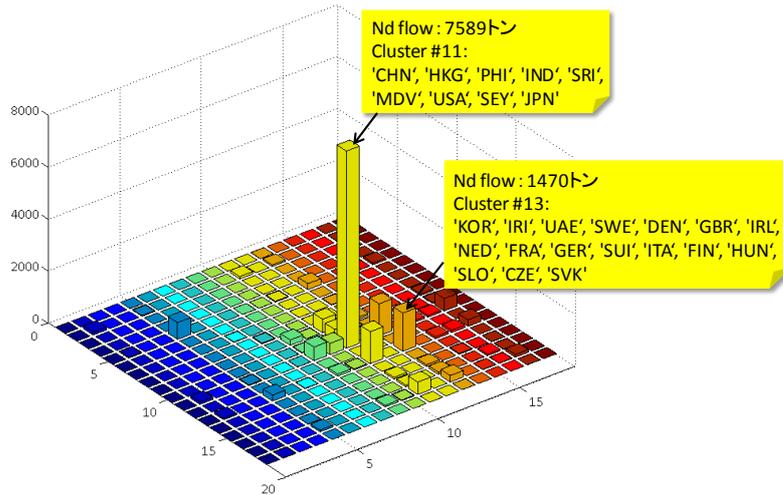


図 38 Hotspot 内・間のネオジムの国際貿易フロー (t)

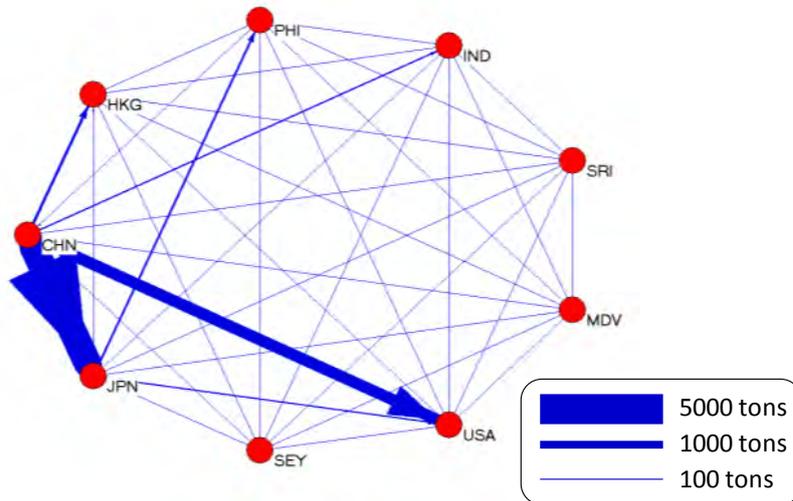


図 39 Hotspot11 番におけるネオジムの国際貿易構造

次に、コバルトの国際貿易ネットワークからの Hotspot の結果について述べる。図 40 は Hotspot 内・間のコバルトの国際貿易フローを示している。国際貿易フローが最も大きな Hotspot は 18 番であり、全貿易量の 13% を占める 20872t のコバルトが取引されている。この Hotspot は、香港 (HKG)、フィリピン (PHI)、インドネシア (INA)、ウクライナ (UKR)、オーストラリア (AUS)、ニューカレドニア (NCF)、日本 (JPN) から成っており、特に、日本は輸入集中度の高くなっている (図 41 を参照)。2 番目、3 番目に大きな Hotspot 内の貿易量は、それぞれ 17279t、11795t であり、上位 3 位の貿易シェアはそれほど大きく変わらないことが分かる。特に 2 番目に大きな Hotspot (#15) に韓国と中国が属して一方で、日本は属していないことから、ネオジムの貿易構造と明らかにことな

ることが分かる。コバルトに関しては、日本は、中国ではなく、特にニューカレドニアとインドネシアとの密な貿易関係を築いていることが明らかに分かる。したがって、ネオジムとコバルトに関する資源調達戦略もまた大きくことになってくる。

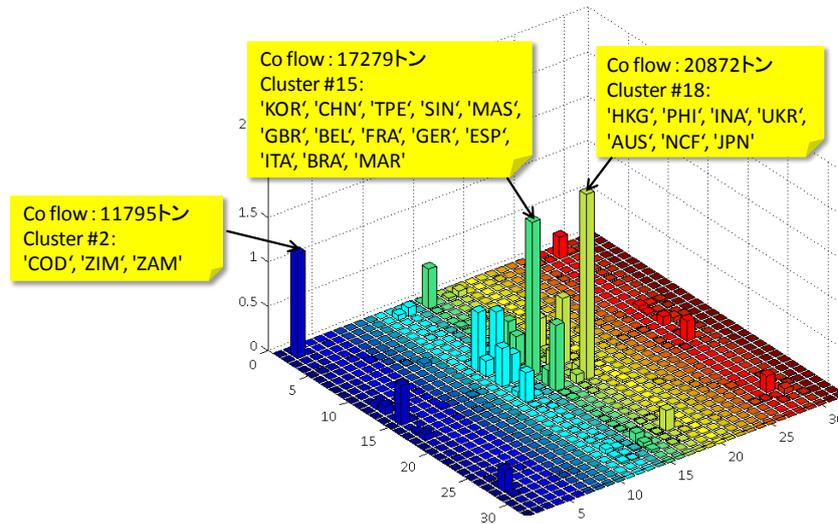


図 40 Hotspot 内・間のコバルトの国際貿易フロー (t)

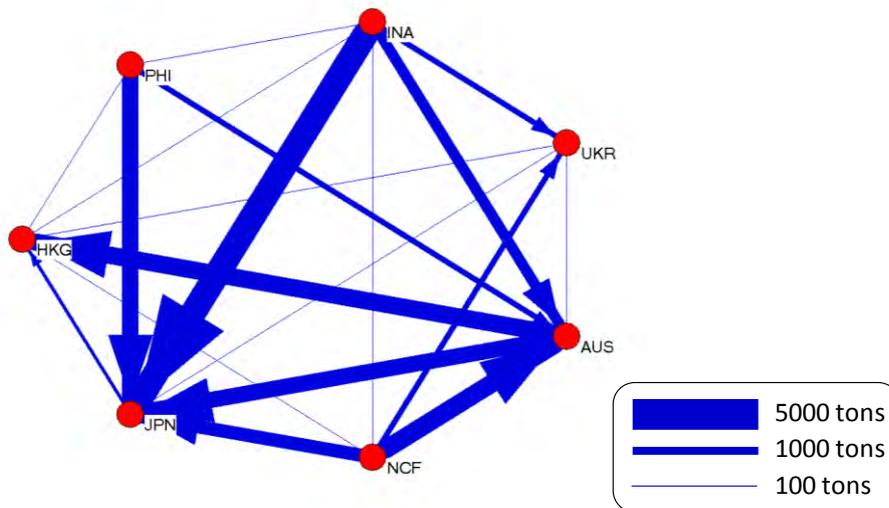


図 41 Hotspot18 番におけるコバルトの国際貿易構造

最後にプラチナの Hotspot に関して、全貿易量の約 4 分の 1 を、中国 (CHN)、香港 (HKG)、スイス (SUI)、ロシア (RUS)、南アフリカ (RSA)、日本 (JPN) から成る Hotspot22 番が占めていることが分かった (図 42)。特に、この Hotspot では南アフリカとロシアが中心的な役割を果たしていることが分かる (図 43)。プラチナに関しても、日本と地理的に近い韓国が日本と異なる Hotspot に属していることも興味深い。

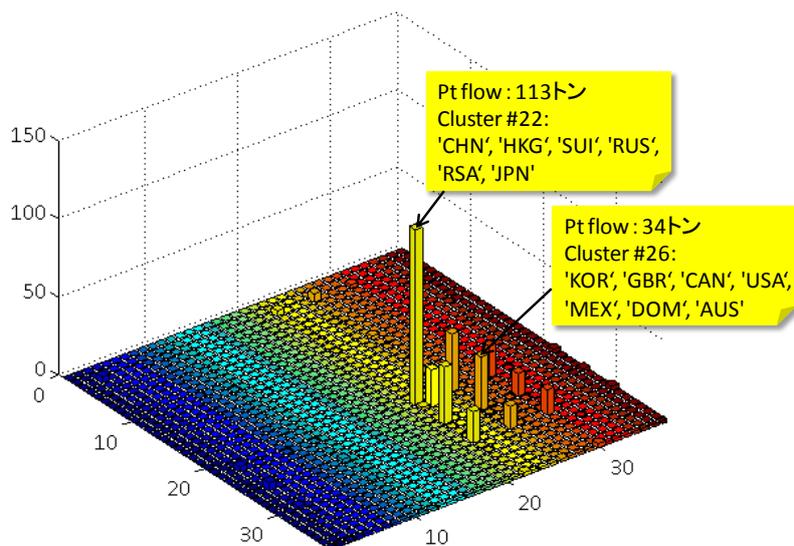


図 42 Hotspot 内・間のプラチナの国際貿易フロー (t)

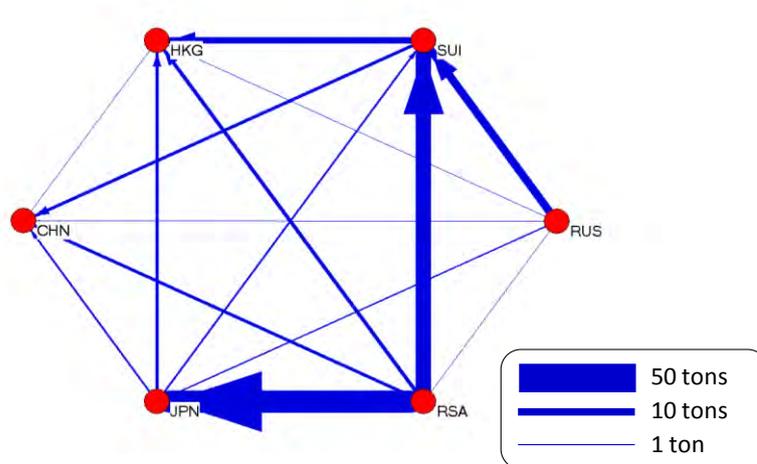


図 43 Hotspot22 番にけるプラチナの国際貿易構造

4.5.2 各国の経済的・政治的リスクを加味した国際フローにおける Hotspot と日本の位置づけ

4.5.1 における Hotspot 分析から日本のレアメタルの主要貿易相手国グループを検出することができた。次に重要な点は、政治的、経済的に不安定な国のみが主要貿易相手国だとすると、レアメタルの安定確保は時に困難な状況になることが予想されるので、それらの主要貿易相手国が政治的、経済的にどの程度安定しているかということの評価することである。カナダのシンクタンクであるフレイザー研究所(Fraser Institute)が公表している世界経済自由度 (Economic Freedom of the World)を用いることによって、政府の規模、法制度および所有権の安全度、通貨の健全度、国際貿易の自由

度、法規制といった5つの分野の評価指標（10ポイントが満点）を得ることができる。本研究では、前節で検出されたレアメタルの Hotspot の頂点情報としてこの政治的、経済的リスク指標の重みを加えることによって、Hotspot のリスク評価を行った（図 44、図 45、図 46 を参照）。

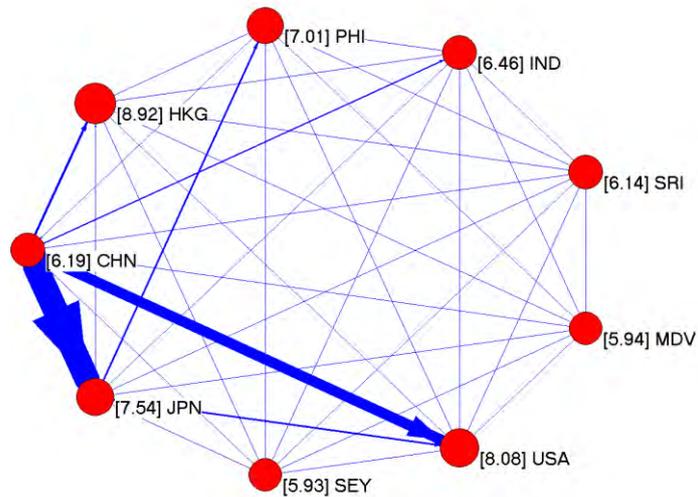


図 44 リスク指標を含んだ Hotspot11 番におけるネオジムの国際貿易構造

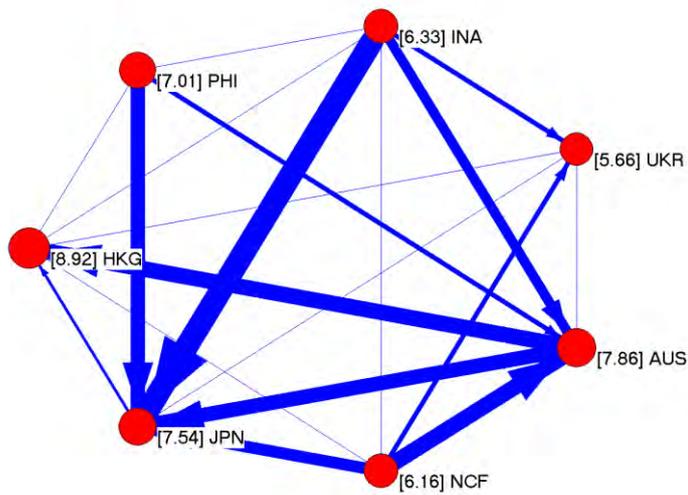


図 45 リスク指標を含んだ Hotspot18 番におけるコバルトの国際貿易構造

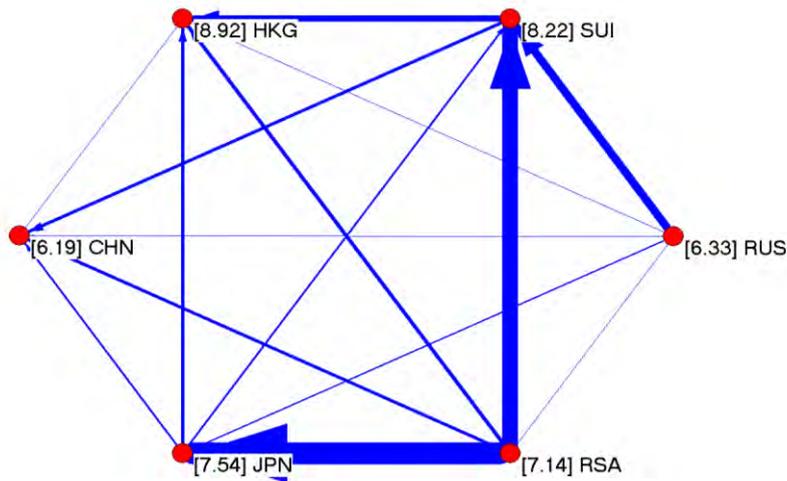


図 46 リスク指標を含んだ Hotspot22 番にけるプラチナの国際貿易構造

図 44 から、日本を含むネオジムの Hotspot11 番を見ると、リスク評価指数の合計値は 62.2 ポイントであり、その合計値を Hotspot を構成する国の数で割ると、平均で 6.9 ポイントという結果になった。同様に、図 45 と図 46 から、日本を含むコバルトとプラチナのネオジムのリスク評価指数の Hotspot 平均値はそれぞれ 7.1 ポイント、7.4 ポイントであった。この評価指数が高いほど政治的、経済的なリスクが低い Hotspot であると解釈できることから、プラチナに関しては、他のレアメタルと比較すると、日本は相対的にリスクの低い Hotspot に属していると理解することができるであろう。逆に、ネオジムに関しては、日本は相対的にリスクの高い Hotspot に属していることが分かる。

4.6 国際レアメタルフローの経路解析

4.6.1 テストデータを用いたネットワーク構造の視覚化手法の有効性に関する検討

レアメタルの部門間フローを図のかたちで可視化する目的は、大きく 2 つに分けることができる。その第 1 は、詳細な調査検討を経て、政策決定者を含むステークホルダーへ分かりやすく情報を提供することである。この場合は、分かりやすさを優先した描画が必要となる。第 2 の目的は、調査検討段階において研究の実施者自身が試行錯誤をしながらネットワーク構造を検討することである。ネットワークを図のかたちで可視化するためには、ある程度の簡略化が不可欠である。また、比較的大きな（部門の多い）データにも対応できるような、相当程度まで自動化された描画ツールが有用であるが、このようなツールはとくに第 2 の目的のために重要であると言える。

本課題で開発した可視化手法の有効性に関する検討は、同じく本課題で開発したレアメタルフローに関するデータベースが完成する前にテストデータを用いて開始していたため、以下にその結果を示す。

テストデータとして、わが国の 2005 年産業連関表（401 内生部門）と 3EID による GHG 排出量データを用いて、乗用車のサプライチェーンに内包された GHG 排出量の可視化を行った。下の図 47 は、ネットワークの簡略化をまったく行わずに、標準的なネットワーク描画ソフトウェアである NetDraw³³のデフォルト設定を用いて図示した結果である。部門間フローの大きさについての情報を用いずに、すべての部門間フローを同じ太さの矢印で示している。このことも影響してはいるが、図から読み取り得るのは、ネットワークが非常に複雑であることくらいであり、ネットワーク構造の詳細な分析のためには、このままでは利用価値が高いとは言えない。

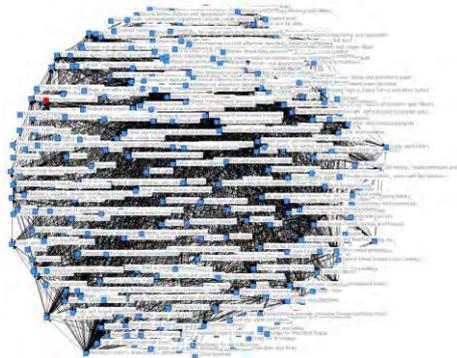


図 47 乗用車のサプライチェーンをあらゆる部門間ネットワーク

本研究で開発した PMDA による簡略化を行うため、まず SPA を行った。乗用車 100 万円あたりの GHG 排出総量は 3.80t（二酸化炭素等量）であり、寄与が総量の 0.0001%未満の構造経路は抽出しないように、文献で利用可能な算法³⁴を用いて繰り返し計算を行った。その結果、275 部門を含む 32、067 個の構造経路が抽出された。抽出された構造経路が構成するネットワークのカバー率は 87.5%である。

図 48 はカバー率が 50%となるように簡略化したネットワークをサンキー図として表したものである。同様に図 49 はカバー率が 30%となるように簡略化した結果である。

³³ Borgatti, S.P., 2002. *NetDraw Software for Network Visualization*. Analytic Technologies: Lexington, KY

³⁴ Peters, G.P., and E.G. Hertwich, Structural analysis of international trade: Environmental impacts of Norway, *Economic Systems Research*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 155–181.

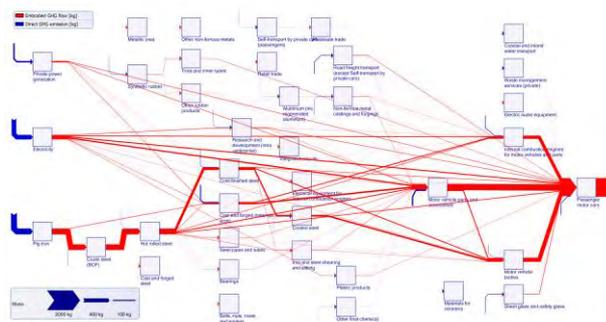


図 48 乗用車のサプライチェーンをあらわす部門間ネットワーク（カバー率 50%）

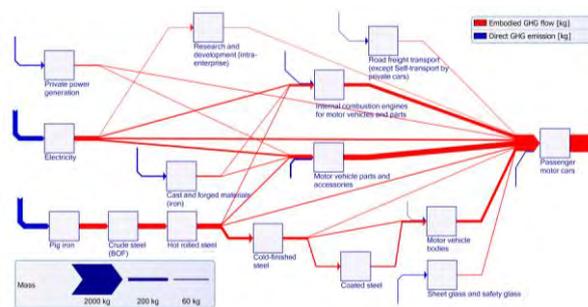


図 49 乗用車のサプライチェーンをあらわす部門間ネットワーク（カバー率 30%）

これらの図を用いれば、乗用車のサプライチェーンのネットワーク構造を、GHG 排出量の観点から詳細に検討することが可能となる。銑鉄（Pig iron）と事業用電力（Electricity）の2部門が主たる GHG 排出部門である。このことは、SPA や PMDA を行わなくとも、レオンチェフ逆行列の乗用車に対応する列を検討すれば把握できることである。他方、例えば次のようなことが、ネットワークを図示することによって明らかになる。

- ・ 銑鉄（Pig iron）→粗鋼（転炉）（Crude steel (BOF)）→熱間圧延鋼材（Hot rolled steel）を經由する経路に多量の GHG 排出が内包されている。
- ・ 銑鉄から熱間圧延鋼材に至る経路は、その後複数の経路に枝分かれして、自動車部品（Motor vehicle parts and accessories）、自動車用内燃機関・同部分品（Internal combustion engines for motor vehicles and parts）、自動車車体（Motor vehicle bodies）を経て乗用車に至る。
- ・ 製造業以外に分類される部門のうち、企業内研究開発（Research and development (intra-enterprise)）、道路貨物輸送（自家輸送を除く）（Road freight transport (except Self-transport by private cars)）を経る経路の寄与が大きい。

開発した PMDA に基づくネットワークの簡略化と図のかたちでの可視化手法を、レアメタルの国際マテリアルフローデータに適用することにより、次のことが明らかになると期待される。

- ・ 主要製品ごとに、そのサプライチェーンにおいて多量の天然資源投入を行っている部門（国と地域）を同定する。

- ・天然資源投入量は多くなくとも、それに大きく依存して生産・供給（輸出）を行っている部門（国と地域）の列としての主要な構造経路を同定する。
- ・主要な構造経路を寄与の大きい経路と定義すれば、カバー率が高いという意味で、分析の信頼性を担保できる。カバー率それ自体が、ネットワーク構造の性質をあらわす指標としての役割を果たす。
- ・主要な構造経路を、特定の国・地域を経由しない（あるいは、経由する）経路と定義すれば、各国・地域の社会経済システム等についての定量的および定性的情報を反映させた仮想的なネットワークについての検討が可能となる。

4.6.2 構造経路に基づく国際レアメタルフロー特性の可視化

本課題で開発した可視化手法を用いて、国際レアメタルフローおよびその特性を可視化するため、本課題で開発したレアメタルフローに関するデータベースを用いて、我が国における耐久財に対する国内需要が直接間接に誘発するレアメタル採掘量に関する分析を行った結果を以下に示す。

評価したフローは、いわゆる物質フロー（マテリアルフロー）ではなく、我が国における耐久財に対する国内需要が直接間接に誘発するレアメタル採掘量で評価した貿易フローである。これは、産業連関分析の用語で貿易に内包された採掘量と呼ばれるものであり、近年の研究においてマテリアルフットプリント³⁵とも呼ばれているものである。

ここでの耐久財を機械および建設と定義して、これらに対する 2005 年における国内最終需要が直接間接に誘発するネオジウム、コバルト、プラチナの採掘量は、それぞれ約 3150t、約 6714 万 t、約 43.4t であった。また、各レアメタルの 2005 年における総採掘量に占める割合は、それぞれ 25%、0.63%、17% であった。日本国内で生産されて海外に輸出される製品のサプライチェーンで誘発される採掘量が含まれないにもかかわらず、とくにネオジウムとプラチナに関しては、大きな割合を占めている。

本研究で開発した PMDA による簡略化を行うため、SPA を行った。寄与が総量の 0.01% 未満の構造経路は抽出しないように、上で説明したものと同一算法³⁶を用いて繰り返し計算を行った。その結果、ネオジウムに関しては 675 個の構造経路が抽出された。抽出された構造経路が構成するネットワークのカバー率は 77.7% であった。同様に、コバルトに関しては 1172 個の構造経路が抽出され、カバー率は 48.5% であった。プラチナに関しては 987 個の構造経路が抽出され、カバー率は 62.1% であった。

³⁵ Wiedmann, T.O., H. Schandl, M. Lenzen, D. Moran, S. Suh, J. West, K. Kanemoto, The material footprint of nations, *Proceedings of National Academy of Science of the United States of America*, 2013. doi: 10.1073/pnas.1220362110.

³⁶ Peters, G.P., and E.G. Hertwich, Structural analysis of international trade: Environmental impacts of Norway, *Economic Systems Research*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 155–181.

た。

国ごとの技術水準を考慮して「高技術水準国」「低技術水準国」にグループ分けするために、文献³⁷から得られる諸指標のうち、科学技術と研究開発投資に関する 7 指標（Availability of latest technologies、Firm-level technology absorption、Capacity for innovation、Quality of scientific research institutions、Company spending on R&D、University-industry collaboration in R&D、Governmental procurement of advanced tech products）を用いた。指標ごとに平均値を求め、平均値を上回る国を当該指標に関して「高技術水準国」とする。以下では、7 指標すべてに関して「高技術水準国」である 29 か国・地域（オーストラリア、オーストリア、ベルギー、ブラジル、カナダ、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、香港、アイスランド、イスラエル、日本、韓国、ルクセンブルグ、マレーシア、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポルトガル、プエルトリコ、カタール、サウジアラビア、シンガポール、スイス、台湾、イギリス、アメリカ）を「高技術水準国」として国際レアメタルフローの特性を可視化する。

図 50 は、技術に関する各国の特性をカラースケールであらわしたネオジムのフロー（直接間接に誘発された採掘量）を示したものである。可視性を向上するため、著しく値の大きい中国から日本へのフローは 100 分の 1 倍の幅で描いてある。図 51 は、同様の方法でコバルトのフローを示したものであり、インドネシアから日本へのフローは 5 分の 1 倍の幅で、ニューカレドニアから日本へのフローおよびフィリピンから日本へのフローは 3 分の 1 倍の幅で描いてある。図 52 は、同様の方法で描いたプラチナコのフローであり、南アフリカから日本へのフローは 15 分の 1 倍の幅で描いてある。

³⁷ Schwab, K., *The Global Competitiveness Report 2012–2013*, World Economic Forum, 2012

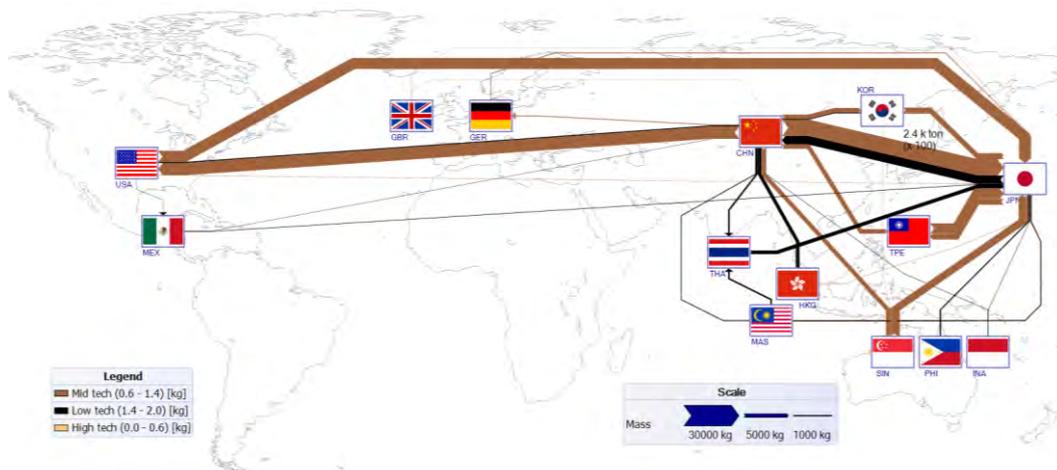


図 50 日本における耐久財に対する最終需要に関連したネオジムのマテリアルフットプリント
 (可視性向上のため、中国から日本へのフローは 100 分の 1 倍の幅で描いてある)

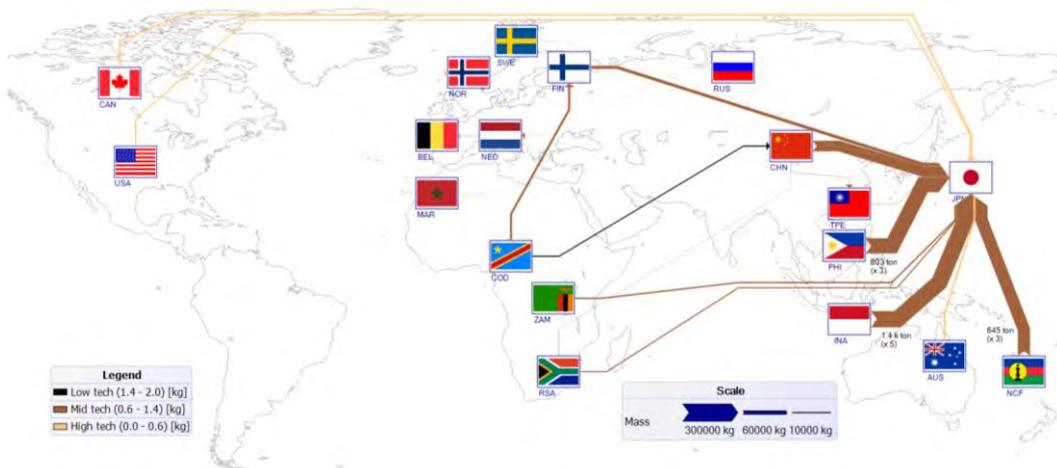


図 51 日本における耐久財に対する最終需要に関連したコバルトのマテリアルフットプリント
 (可視性向上のため、インドネシアから日本へのフローは 5 分の 1 倍の幅で、ニューカレドニアから日本へのフローおよびフィリピンから日本へのフローは 3 分の 1 倍の幅で描いてある)

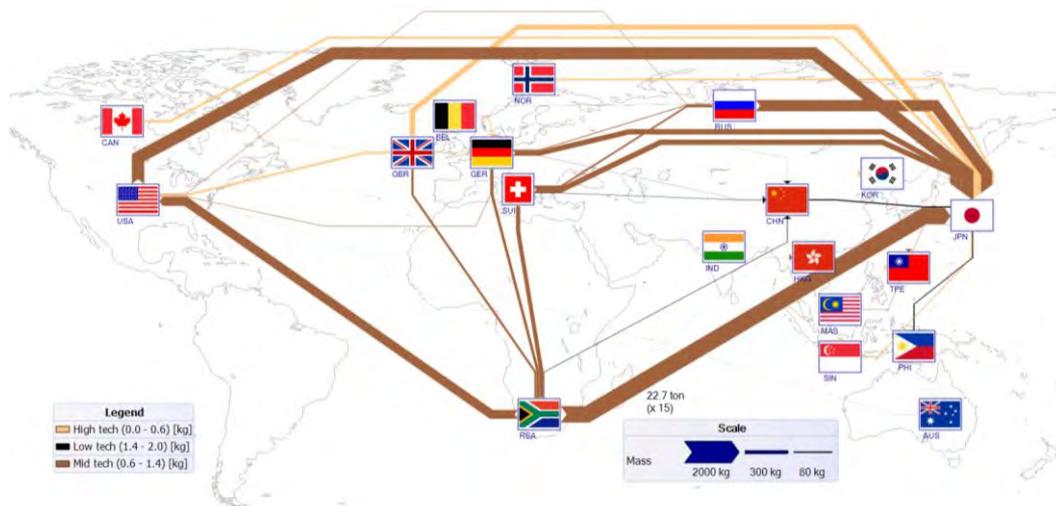


図 52 日本における耐久財に対する最終需要に関連したプラチナのマテリアルフットプリント
 (可視性向上のため、南アフリカから日本へのフローは 15 分の 1 倍の幅で描いてある)

3つの図において、サプライチェーンに係る大半のフローは「低技術水準国」の数が0.6~1.4の範囲のフロー（茶色で描かれたフロー）である。この中で、コバルトのフローに関しては、北米、北欧、およびオーストラリアから日本に至るフローは「低技術水準国」の数が0~0.6の範囲のフロー（肌色で描かれたフロー）であり、これらのフローは相対的に技術的改善の必要性が高くない、すなわち、十分に技術水準の高い国々により供給が行われていることが分かる。ただし、これらの矢印の幅が狭いことから、コバルトのフロー全体から見れば、技術的改善の必要性が高くないフローは少量に限られていることが分かる。プラチナのフローに関しては、北米、北欧、およびイギリスから日本に至るフローは、同様の意味で相対的に技術的改善の必要性が高くないことが分かる。とくに、イギリスから日本に至るフローは量も少なくない。ネオジムのフローに関しては、「低技術水準国」の数が0~0.6の範囲のフローはほとんど確認できない一方で、「低技術水準国」の数が1.4~2の範囲のフロー（黒色で描かれたフロー）が目立つ。例えば、日本から中国、タイから日本、中国・マレーシアからタイなどのフローがこれに該当する。これらの貿易フローに関連する国・地域においては、供給者の立場からは、技術改善の余地があるかどうか検証し、必要であれば技術開発に関する投資を行ったり、他国で利用可能な最新技術を導入したりすることにより技術を改善することが求められる。また、需要者の立場からは、潜在的な供給リスクに備えることが求められる。

4.7 耐久財の使用延長と需要減少との関係

4.7.1 基準ケースにおける平均使用年数および使用済み台数

乗用車、携帯電話、ルームエアコン、MRI装置について、平均使用年数および使用済み台数推定の基礎データとなる出荷台数および保有台数・稼働台数の推移を図 53 に示す。

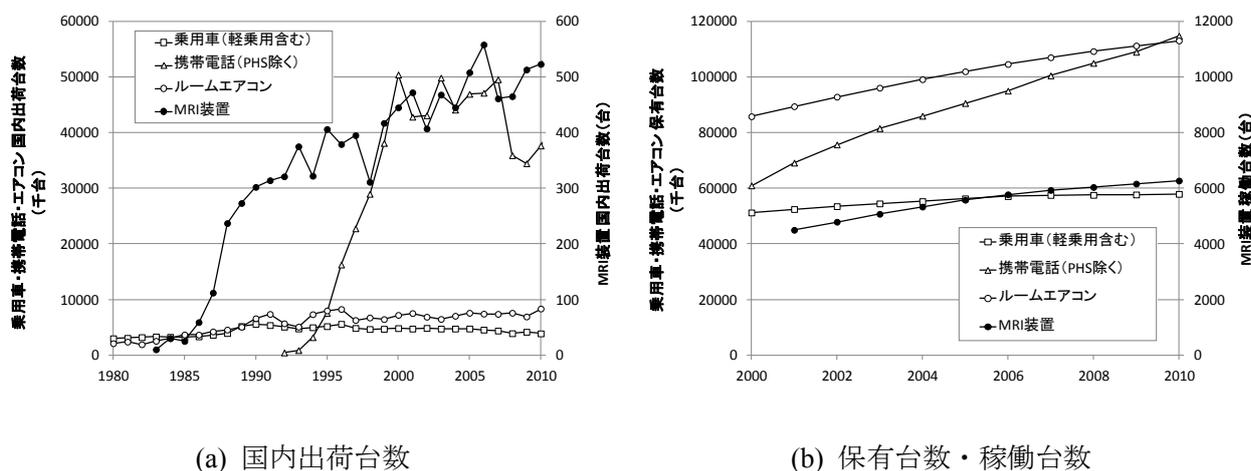


図 53 推計対象とした耐久財の国内出荷台数および保有台数（稼働台数）の推移

このデータに基づいて推計した基準ケース（現状）における各対象品目の平均使用年数と使用済み台数を表 4 表 6 および図 54 推計対象とした耐久財の使用済み台数推計値（2001～2010 年、基準ケース）に示す。平均使用年数は 2001 年から 2010 年の各年末における推計値の平均と幅を示している。なお、推計に用いた保有台数・稼働台数には退蔵品を含まないことから、ここでいう「使用年数」の定義は「国内サービス期間」（出荷から使用済みとなるまでの期間）に相当する。使用年数の定義と推計方法の詳細については文献³⁸を参照されたい。

表 6 推計対象とした耐久財の平均使用年数推定値（2001～2010 年、基準ケース）

品目	平均使用年数（年）*
乗用車	11.7（10.7 - 12.7）
携帯電話	2.1（1.5 - 3.0）
ルームエアコン	16.0（15.2 - 16.5）
MRI装置	15.6（14.7 - 16.3）

* 各年末における推定値の算術平均（カッコ内はその範囲）。

³⁸ Oguchi et al (2010) Lifespan of commodities, Part. II: Methodologies for estimating lifespan distribution of commodities, *Journal of Industrial Ecology*, 14(4), 613-626

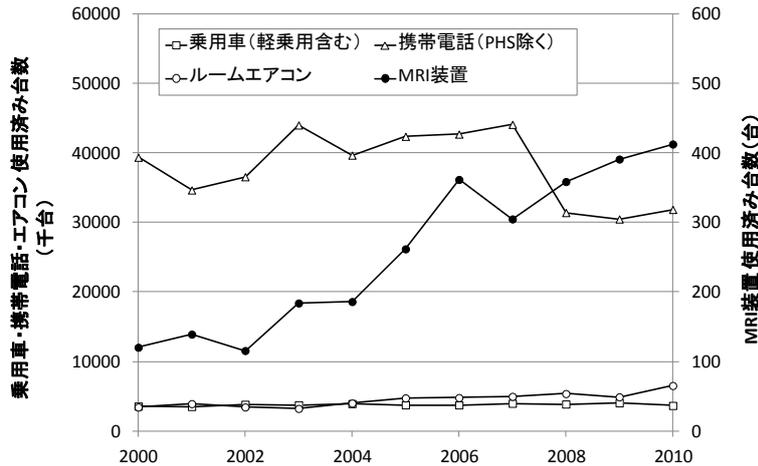


図 54 推計対象とした耐久財の使用済み台数推計値（2001～2010年、基準ケース）

乗用車、携帯電話、ルームエアコンの平均使用年数は、2001～2010年において長期化している傾向が見られる。特に携帯電話は長期化の割合が著しい。一方、MRI装置の平均使用年数は近年短期化している。使用済み台数については、乗用車とルームエアコンについては大きな変化はない。携帯電話については2007年から2008年にかけて1万台程度の減少が見られる（販売方式の変更（販売奨励金の見直し、割賦方式の導入など）に伴うものと考えられる）。一方、MRI装置については使用済み台数が増加している。これは1990年台後半の急激な出荷台数増加の影響とみられる。

4.7.2 使用年数延長による需要減少量の推計

3.9で示した方法により、過去の各年において一様に百万円（百万円に相当する台数）の需要を減少させた場合に必要となる平均使用年数の延長分、および平均使用年数を1年間延長した場合に生じる耐久財需要の減少分を推計した。なお、この推計は、前節で推計した基準ケースで過去に実際に起こっていた使用年数延長をベースに、さらに需要を減少させた場合、使用年数を延長した場合を想定して需要減少量の推計を行ったものである。

表7に百万円の需要を削減するために必要な平均使用年数延長分の推計結果を示す。推計値は、乗用車、携帯電話、ルームエアコン、MRI装置の順に小さい値となった。この傾向は、単価が高い財ほど百万円に相当する台数が小さいこと、金額換算した総使用済み量が大きい財ほど小さい平均使用年数の延長で百万円の需要を削減できることを反映している。

表 7 百万円の需要を削減するために必要な平均使用年数延長分（対基準ケース）

年末	平均使用年数延長分：対基準ケース（年）			
	乗用車	携帯電話	ルームエアコン	MRI 装置
2005	0.00000060	0.0000014	0.000014	0.00067
2006	0.00000071	0.0000015	0.000016	0.00060
2007	0.00000082	0.0000015	0.000018	0.00058
2008	0.00000093	0.0000017	0.000019	0.00055
2009	0.00000104	0.0000019	0.000020	0.00053
2010	0.00000114	0.0000021	0.000021	0.00051
平均	0.00000087	0.0000017	0.000018	0.00057

次に、各年末における平均使用年数を一様に1年間延長したときの耐久財需要減少台数の推計結果を表8に示す。また、これに単価を乗じて金額換算したものを表9に示す。1年間の平均使用年数延長による需要減少量（金額換算）は、携帯電話、ルームエアコン、乗用車、MRI装置の順に大きい値となった。携帯電話は4つの推計対象耐久財の中で最も単価が小さいが、基準ケースの平均使用年数が2.1年（2001～2010年末の平均）と短く1年間の平均使用年数延長の効果が大きいこと、基準ケースの使用済み台数が多いことから、需要減少台数が非常に大きくなり、金額換算した需要減少量も最も大きくなっている。一方、MRI装置は単価が大きいものの、基準ケースの使用済み台数自体も非常に小さいことから、需要減少台数および額が小さい。

表 8 平均使用年数を1年延長したときの耐久財需要減少台数（対基準ケース）

年末	需要減少台数			
	乗用車 (千台)	携帯電話 (千台)	ルームエアコン (千台)	MRI 装置 (台)
2005	122	15407	283	27
2006	133	14693	290	37
2007	159	14824	305	28
2008	181	10361	336	32
2009	216	9271	305	34
2010	229	8767	419	34
平均	173	12221	323	32

このように、平均使用年数が同じ年数だけ延長された場合でも、財の単価と使用済み台数の規模

の違いによって需要減少効果が大きく異なることがわかる。したがって、耐久財の使用年数延長によるレアメタルの需要削減効果を定量化するためには、本研究で提示した方法を用いて使用年数延長による需要減少量を財ごとに推計することが必要である。

表 9 平均使用年数を 1 年延長したときの耐久財需要減少額（対基準ケース）

年末	需要減少額（百万円）			
	乗用車	携帯電話	ルームエアコン	MRI 装置
2005	4987	631022	11601	2359
2006	5462	601782	11890	3300
2007	6530	607140	12506	2482
2008	7396	424368	13746	2872
2009	8828	379693	12488	3007
2010	9392	359076	17141	3035
平均	7099	500513	13229	2842

次に、表 9 に示した平均使用年数を 1 年延長したときの耐久財需要減少額に 3.6 で推計した財百万円あたりのレアメタル誘発採掘量や誘発フロー量を乗じることで、耐久財の使用年数延長によるレアメタルの誘発採掘量および誘発フロー量の削減効果を推計した。ネオジムを例とした推計結果を表 10 に示す。

表 10 平均使用年数を 1 年延長したときのネオジム誘発採掘量・誘発フロー削減効果

年末	需要削減効果（t）							
	誘発採掘量				誘発フロー			
	乗用車	携帯 電話	ルーム エアコン	MRI 装置	乗用車	携帯 電話	ルーム エアコン	MRI 装置
2005	0.13	9.5	0.13	0.30	0.15	10.9	0.15	0.34
2006	0.14	9.1	0.14	0.42	0.16	10.4	0.16	0.47
2007	0.17	9.2	0.15	0.32	0.19	10.5	0.17	0.35
2008	0.20	6.4	0.16	0.37	0.22	7.3	0.18	0.41
2009	0.23	5.7	0.14	0.39	0.26	6.6	0.16	0.43
2010	0.25	5.4	0.20	0.39	0.28	6.2	0.23	0.43
平均	0.19	7.6	0.15	0.36	0.21	8.7	0.17	0.40

1 年間の平均使用年数延長によるネオジムの誘発採掘量および誘発フロー量の削減効果は携帯電話が 8t 前後と他の財に比べて桁違いに大きいことがわかった。次いで MRI 装置が 0.4t 程度と大きく、乗用車とルームエアコンは 0.2t 程度で同程度であることが示された。

このように、提示した方法によって、各種耐久財の長期使用によるレアメタル誘発採掘量や誘発フロー量の削減効果を定量化することができることを示した。

4.8 財やサービスの 3R（リデュース、リユース、リサイクル）によるレアメタル国際依存量の軽減効果指標

3.6 の方法論で記述したように、本研究では財やサービスに対する 3R（リデュース、リユース、リサイクル）によって軽減されるレアメタルに関する国際依存量を計測するための 5 つの原単位を算定した。5 つの原単位とは財やサービスの単位生産額（百万円: M-JPY）あたりに国際サプライチェーンを通じて発生する資源採掘量、資源採掘に関するリスク、国際フロー量、国際フローに関するリスク、国際フローの技術レベル別フロー（Red-flow、Yellow-flow、Green-flow）である。

「リデュース」は財やサービスに対する需要の回避と考え、それに起因する財やサービスの生産減少によって生じるレアメタルの国際依存量を軽減する。例えば、ある製品の 200 万円分のリデュース（需要回避）をした場合、その製品に該当する原単位の 2 倍の値が、軽減できるレアメタルの国際依存量となる。「リユース」は財やサービスの長寿命化と捉え、寿命延長（長期使用）に伴って減少する生産量を求める。例えば、ある製品が長期使用により 300 万円分の新規生産量を回避した場合、その製品の原単位の 3 倍した値が国際依存量の軽減効果である。一方、「リサイクル」は製品含有中のレアメタルの回収により、回避される金属素材生産を考える。例えば、ある製品から千円相当のレアメタルが回収できる場合、その回収したレアメタルの形態（地金か素材か部品）に対応する部門の原単位の 0.001 を掛けた値が軽減できる国際依存量となる。百万円あたり生産を回避することで直接間接的に 1.66×10^{-4} t のネオジム採掘量を削減できる。この 1.66×10^{-4} t は世界の採掘量の 1.32×10^{-8} ($1.32 \times 10^{-5}\%$) に相当し、この分だけ日本の国際的なネオジムの依存量を軽減することができる。3 番目は輸入品（JI から始まる部門番号を持つ商品）の「電子計算機付属装置」であり、外付けのハードディスクなどがこの部門に含まれる。百万円の生産により 1.12×10^{-4} t のネオジム採掘されることから、この生産の回避により世界の 8.88×10^{-9} ($8.88 \times 10^{-6}\%$) に相当する依存を減らすことができる。百万円あたり生産を回避することで直接間接的に 1.66×10^{-4} t のネオジム採掘量を削減できる。この 1.66×10^{-4} t は世界の採掘量の 1.32×10^{-8} ($1.32 \times 10^{-5}\%$) に相当し、この分だけ日本の国際的なネオジムの依存量を軽減することができる。3 番目は輸入品（JI から始

まる部門番号を持つ商品)の「電子計算機付属装置」であり、外付けのハードディスクなどがこの部門に含まれる。百万円の生産により 1.12×10^4 t のネオジム採掘されることから、この生産の回避により世界の 8.88×10^{-9} ($8.88 \times 10^{-6}\%$) に相当する依存を減らすことができる。

表 11 に日本の財やサービスの中で単位生産額(百万円)あたりのネオジム採掘量が大きい上位 10 部門を示す。永久磁石の生産が該当する「その他の電気機械器具」部門が 1.86×10^{-3} t/M-JPY と最も高い値を示した。この 1.86×10^3 t は世界の総ネオジム採掘量(2005 年値)の 1.48×10^{-7} ($1.48 \times 10^{-4}\%$) に相当する。言い換えれば、例えば永久磁石の百万円分のリデュース(需要回避)することで世界の採掘量に対する日本の依存量を $1.48 \times 10^{-4}\%$ だけ軽減できることを示す。2 番目に大きいのは「医療用機械器具」であり、MRI(核磁気共鳴画像)の生産が該当する部門である。百万円あたり生産を回避することで直接間接的に 1.66×10^4 t のネオジム採掘量を削減できる。この 1.66×10^4 t は世界の採掘量の 1.32×10^{-8} ($1.32 \times 10^{-5}\%$) に相当し、この分だけ日本の国際的なネオジムの依存量を軽減することができる。3 番目は輸入品(JI から始まる部門番号を持つ商品)の「電子計算機付属装置」であり、外付けのハードディスクなどがこの部門に含まれる。百万円の生産により 1.12×10^4 t のネオジム採掘されることから、この生産の回避により世界の 8.88×10^{-9} ($8.88 \times 10^{-6}\%$) に相当する依存を減らすことができる。

表 11 ネオジムに関する誘発採掘量(原単位 1)の大きい上位 10 部門

Rank	Sector num	Sector name	Induced mining	World share
			[t/M-JPY]	[-]
1	JD230	その他の電気機械器具	1.86E-03	1.48E-07
2	JD270	医療用機械器具	1.66E-04	1.32E-08
3	JI242	電子計算機付属装置	1.12E-04	8.88E-09
4	JD248	その他の電子部品	8.53E-05	6.77E-09
5	JI240	パーソナルコンピュータ	6.22E-05	4.94E-09
6	JI241	電子計算機本体(除パソコン)	5.61E-05	4.46E-09
7	JD254	自動車部品	5.51E-05	4.37E-09
8	JD233	ビデオ機器	3.09E-05	2.45E-09
9	JI274	情報記録物	3.04E-05	2.41E-09
10	JI237	携帯電話機	2.62E-05	2.08E-09

表 12 は表 11 に示したネオジムの誘発採掘量に採掘国ごとの政治的リスクを勘案し、そのリスクによって重みづけをした採掘量の大きい上位 10 部門を示す。表 11 の誘発採掘量と同じ部門がリスクで重み付けした場合にでも上位に挙がった。ネオジムの採掘量は中国がその大半を占めるため、リスクを加味した場合の原単位も同様の特徴を示したと考えられる。具体的に見ると、「その他の電気機械器具」部門の百万円相当のリデュースやリユースは、世界のネオジムに関する採掘リスクを 1.49×10^{-7} ($1.49 \times 10^{-4}\%$) だけ回避することができることを示している。

表 12 ネオジムに関するリスク加味した誘発採掘量（原単位 2）の大きい上位 10 部門

Rank	Sector num	Sector name	Risk-weighted induced mining	World share
			[%%/M-JPY]	[-]
1	JD230	その他の電気機械器具	4.45E-06	1.49E-07
2	JD270	医療用機械器具	3.96E-07	1.32E-08
3	JI242	電子計算機付属装置	2.67E-07	8.93E-09
4	JD248	その他の電子部品	2.04E-07	6.80E-09
5	JI240	パーソナルコンピュータ	1.48E-07	4.95E-09
6	JI241	電子計算機本体（除パソコン）	1.34E-07	4.47E-09
7	JD254	自動車部品	1.31E-07	4.39E-09
8	JD233	ビデオ機器	7.38E-08	2.46E-09
9	JI274	情報記録物	7.24E-08	2.42E-09
10	JI237	携帯電話機	6.25E-08	2.09E-09

表 13 は日本の財やサービスの中で単位生産額（百万円）あたりの引き起こすネオジムの国際フロー量が大きい上位 10 部門を示す。この原単位が大きい財やサービスほどそのリデュースやリユースにより回避できる国際的なネオジムのフロー量が大きく、ネオジムから見た製品の国際サプライチェーンへの依存を軽減できる。具体的に見ると、「その他の電気機械器具」部門は 2.12×10^{-3} t/M-JPY の国際フローに依存しており、これは世界全体の $1.49 \times 10^{-4}\%$ に相当する。次に大きい部門は輸入品の「電子計算機付属装置」部門であり、表 11 の誘発採掘量では 2 番目であった「医療用機械器具」部門より上位に位置する。これは、輸入品の「電子計算機付属装置」の方がその生産過程において複数の国を跨ぐサプライチェーンを経由していることが原因と推測される。

表 13 ネオジムに関する誘発国際フロー量（原単位 3）の大きい上位 10 部門

Rank	Sector num	Sector name	Induced global flow	World share
			[t/M-JPY]	[-]
1	JD230	その他の電気機械器具	2.12E-03	1.49E-07
2	JI242	電子計算機付属装置	2.13E-04	1.32E-08
3	JD270	医療用機械器具	1.88E-04	8.93E-09
4	JI274	情報記録物	1.05E-04	6.80E-09
5	JI241	電子計算機本体（除パソコン）	9.92E-05	4.95E-09
6	JD248	その他の電子部品	9.68E-05	4.47E-09
7	JI240	パーソナルコンピュータ	7.90E-05	4.39E-09
8	JD254	自動車部品	6.25E-05	2.46E-09
9	JI237	携帯電話機	5.26E-05	2.42E-09
10	JI205	金属工作機械	4.37E-05	2.09E-09

表 14 は表 13 の誘発する国際フローをそのフローを形成する国々の貿易リスクによって重み付けして求めた、リスクを加味したネオジムに関する国際フローの大きい上位 10 部門である。表 13

と上位の部門が変わらないことから、ネオジムの場合は貿易リスクを加味した場合でも誘発する国際フローが大きいことが国際依存の大きさを決定付ける。ネオジムの国際フローのほとんどが中国から日本へのフローであり、どの財やサービスもこの中国から日本へのフローに依存するため、リスクを加味してもフローの大きさのみを考慮する場合と変わらない結果となったと推察される。

表 14 ネオジムに関するリスクを加味した誘発国際フロー量（原単位 4）の大きい上位 10 部門

Rank	Sector num	Sector name	Risk-weighted induced global flow	World share
			[%/M-JPY]	[-]
1	JD230	その他の電気機械器具	5.45E-06	1.19E-07
2	JI242	電子計算機付属装置	5.91E-07	1.29E-08
3	JD270	医療用機械器具	4.85E-07	1.06E-08
4	JI274	情報記録物	3.06E-07	6.67E-09
5	JI241	電子計算機本体（除パソコン）	2.77E-07	6.04E-09
6	JD248	その他の電子部品	2.49E-07	5.44E-09
7	JI240	パーソナルコンピュータ	2.08E-07	4.55E-09
8	JD254	自動車部品	1.61E-07	3.51E-09
9	JI237	携帯電話機	1.46E-07	3.19E-09
10	JI205	金属工作機械	1.21E-07	2.63E-09

表 15 は表 13 で示した誘引する国際フローのうち、3.3.2 の方法により特定した Red-flow の割合の高い上位 10 部門を示している。Red-flow とは技術レベルの比較的低い国や地域間でネオジムの移動するフローを指しており、Red-flow の割合が大きい財やサービスであるほど、国際サプライチェーンを通じたネオジムの利用が非効率的である可能性を有している。したがって、Red-flow の割合が高い財やサービスの新規需要をリデュース、リユース、リサイクルによって回避することは、非効率的な資源利用を回避するうえで、最も効果が高い。言い換えれば、Red-flow の割合が大きい財やサービスのサプライチェーンには資源を有効に利用するために改善すべきフローが多く存在していることを意味する。サプライチェーンにおいてどのように資源が利用されているかを優先的に見直すべき商品といえる。ネオジムの場合、「乗用車」、「その他の最終化学製品」、「金属工作機械」がそれぞれ誘発するネオジムの国際フローのうち、16%、13%、12%が低技術国間で生じており、非効率的な資源利用に依存している割合が高いことを示唆する。

表 15 ネオジムに関する誘発国際フローにおいて Red-flow（低技術国間のフロー）の割合（原単位 5）が大きい上位 10 部門

Rank	Sector num	Sector name	Red flow rate
			[%]
1	J1249	乗用車	16
2	J1137	その他の化学最終製品	13
3	J1205	金属工作機械	12
4	J1250	トラック・バス・その他の自動車	12
5	J1166	熱間圧延鋼材	11
6	J1234	電気音響機器	11
7	J1229	電池	10
8	J1199	ポンプ及び圧縮機	10
9	J1212	その他の特殊産業用機械	10
10	J1247	磁気テープ・磁気ディスク	9

5. 結論

5.1 低炭素技術を支えるレアメタルの国際マテリアルフローの同定手法を開発した

本研究では、低炭素化技術や新エネルギー技術のさらなる普及に伴い、将来的に需要の増加が見込まれるレアメタルを対象に、全世界（231 の国と地域間の国際貿易）をシステム境界とするマテリアルフロー分析手法を開発した。

開発した方法論ではまず、国際標準的な貿易分類コードである HS（Harmonized System）コードから、対象とするレアメタルを含有していると考えられる商品の HS コードをレアメタルの種類ごとに網羅的に抽出した。抽出した商品の国間貿易量とカットオフ値および商品中のレアメタル含有率を乗じ、商品の貿易により生じる国間のレアメタル移動量を推計した。カットオフ値とは、比較的詳細な 6 桁分類での HS コードで貿易商品を定義している場合でも、その中には複数の異なる商品が該当するコードがあり、レアメタルを含有する商品はその一部であることがある。カットオフ値とは、HS コードで定義される貿易商品に占めるレアメタルを含有する商品の割合であり、これを貿易量に乗じることで、レアメタルを含む商品のフローのみを抽出した。レアメタル含有率の設定においては、WIO-MFA（Waste input-output material flow analysis）の手法を用い、ボトムアップでは含有率のデータ収集が困難な高加工製品についても含有率を設定することで、推計対象とする貿易商品の網羅性を理論的に高めた。

本研究では、全世界をシステム境界とする物質フロー分析であるため、各国で生産されるレアメタル、輸入に含まれて国に投入されるレアメタル、輸出に含まれて国外へ出るレアメタル、国に蓄積されるレアメタルには必ず質量保存則が成り立つ。しかしながら、実務的には全世界の商品別の

レアメタル含有率のデータを入手することが不可能であることや、貿易統計にも誤差を含むことから、各国の質量保存則が成立しないことがある。本研究では、この質量保存則の不整合を二次計画法によって調整する方法を開発し、限られたデータ整備コストであっても質量保存則を満たす世界全体のレアメタルフローを同定する方法論を確立した。

5.2 レアメタルの国際マテリアルフローを形成する主要国および商品を明示した

レアメタルがどのような貿易商品に含有され、どの国と国間でどれくらい移動しているかが定量的に明らかになった。例えば、ネオジムでは2005年の場合、12540tのネオジムが採掘され、18565tのネオジムが国際貿易を通じて世界中を移動した。ネオジムは製品材料として国に輸入され、その国で製品に組み込まれて別の国へ輸出されているため、採掘量の約1.5倍の国際フローが存在することが分かった。153種類の貿易商品別に推計した国際フローを4種類の商品分類（鉱石、材料、製品、スクラップ）に集約すると、15586tが材料中に含まれ、2968tが製品中に、そして、11tがスクラップ中に含有されて移動した。移動量の最も大きい貿易商品のHSコードは、HS-280530（希土類金属）で6294tであり、HS-850511（永久磁石）が2693t、HS-284960（希土類金属の化合物）が2219tと続いた。

各国間のフローを世界8地域（北米、南米、西ヨーロッパ、アフリカ、中東諸国、中央ヨーロッパとロシア、アジアとオセアニア）および4種の貿易商品の種類（鉱石、材料、製品、スクラップ）に集約すると、アジア内で材料としてのフローが卓越していることが分かった。アジアから西ヨーロッパや北米へのフローが比較的大きいが、製品として流れており、アジアでネオジムの採掘からそれを含有する加工度の高い製品の国外流通までが行われており、それがグローバルなフローを大きく支配している。加えて、詳細に国レベルでの主要なフローも明かにした。ネオジムの場合は、中でも、中国から日本への輸出（4053t）が卓越しており、世界のネオジム利用を支える主要フローと言える。続いて、中国から米国（1731t）、中国から香港（425t）、オーストリアから不明地域（384t）、中国からドイツ（369t）へのフローが上位の5つを占めた。

5.3 日本経済が暗黙的に依存するレアメタルの国際マテリアルフローを検出した

本研究で推計した世界全体のレアメタルの国際フローと日本経済は直接的間接的に関係している。直接的に関係するフローは、レアメタルを含む貿易商品の日本の輸入と輸出であり、これは貿易統計からも直接観測することができる。一方、間接的に関係するフローとは、そうした日本の輸出入

と関係して生じる日本以外の国間での貿易に伴うレアメタルのフローである。本研究では、この間接的なフローを含めて世界全体のレアメタルのフローから日本経済が関係するフローのみを抽出する方法論を開発した。Global link input-output model (GLIO) に推計したレアメタルの国際フローデータを組み込むことにより、日本の最終需要を満たすために必要となる国際フローだけを検出することができた。また、GLIO を用いることで、日本の最終需要によって生じるレアメタルの各国採掘量の推計が可能となった。

例えば、ネオジムでは、日本の最終需要が世界に直接的間接的に及ぼすネオジムの採掘量と国際フロー量は、日本の最終需要全体では、4036t の採掘量を誘引し、5835t の国際フロー量を誘引したと推計された。最終需要全体から輸出を除いた国内最終需要では、1344t の採掘量と 1670t の国際フローを誘引していることから、輸出による寄与が非常に大きいことが分かった。すなわち、日本の輸出は国内需要と比較し、極めて高い国外の資源採掘と国際フローに依存していることが判明した。国内最終需要の中では、民間投資による影響が最も大きく、採掘量が 981t、国際フロー量が 758t であり、次に家計消費がそれぞれ 483t、408t と続いた。

上記のような日本の最終需要が依存する国際フローの構造を詳細に見ると、日本への輸入と日本からの輸出で形成された直接的なネオジムのフローが上位に来る。中国からの原料輸入に加え、中でもフィリピン、タイ、マレーシア等の東アジア諸国とのフローが顕著であり、製品中に含んだ輸出によるフローがその要因である。しかし、中国から米国、ロシアからエストニアなど日本を含まない間接的なフローも顕著に現われており、日本の資源依存構造を考える上で、輸出入の直接的な関係だけでなく、グローバルなサプライチェーンを通じた間接的な依存を含めて考察すること重要性が視覚的にも確認することが可能となった。

5.4 資源採掘国と貿易国のリスクを加味した日本経済のレアメタル国際依存量を定量化した

全世界のレアメタルの国際フローから GLIO によって検出された日本の最終需要が依存するフローに対し、そのフローを形成する国と地域の貿易リスク値を組み込む手法を開発した。この開発した手法により日本の最終需要が依存するレアメタルの国際依存量をリスク基準で評価することが可能となった。また、日本の最終需要が誘引する資源採掘量に対しても採掘国の政治的リスクを組み込む手法を開発した。これにより、日本の資源採掘国に対する依存リスクの定量化を可能にした。

具体的な結果として、最終需要全体が引き起こすネオジムの採掘量は世界全体のネオジムの採掘量の

32%を占める。採掘国のリスクを考慮する場合でも、日本の最終需要が世界全体に占めるリスクの割合は32%と等しく、採掘量と相応のリスクを含んでいることが分かった。一方、誘引する国際フロー量は世界全体の35%を占めるが、輸出国の貿易リスクを加味した国際フローで見ると、世界全体の36%を占めており、若干ではあるがリスクの方が高い支配率を示したが、おおむね国際フローの場合もその大きさに相応のリスクであることを確認した。

5.5 レアメタルの国際フローにおいて優先的に技術改善をすべきフローを識別した

全世界のレアメタルの国際フローを形成する国や地域の社会システム・科学技術レベルに着目することにより、レアメタルの二国間のフローを次の3つに分類した。世界各国を社会システム・科学技術レベルの高い国と低い国に二分すると、二国間のフローは、低い国間のフロー、低い国と高い国のフロー、そして高い国間のフローとなる。本研究では、これらを Red-flow、Yellow-flow、Green-flow と称して、レアメタルの国際フローにおける各色のフローの割合を算定した。Red-flow は社会システム・科学技術レベルの相対的に低い国間でレアメタルを利用しているため、非効率的に金属が利用されている可能性が高い。すなわち、Red-flow の割合が大きいいレアメタルについて優先的に技術改善を世界全体で進めていくことが持続可能な資源利用にむけて戦略的と考えられる。

日本の最終需要が誘引する国際フローを Red-flow、Yellow-flow、Green-flow に区分し、その内訳を明らかにした。ネオジムの場合、どの最終需要においても Yellow-flow が9割近くを占めており、次に Green-flow が大きく、輸出国も輸入国も技術レベルの低い国間でのフローである Red-flow に依存するのはかなり限定的であることが確認できた。しかし、コバルトとプラチナはネオジムと比較する Green-flow の割合が非常に大きいことが分かる。これは、国際的な技術改善の優先はネオジムの方が高いことを示唆しており、日本はネオジムの Yellow-flow を Green-flow に改善するための技術協力を国際的に行っていくことが、自国の資源調達と持続可能な資源利用の実現において戦略的であると推察される。

5.6 少子高齢化による日本のレアメタルの国際依存量の将来変化(2035年)を予測し、医療需要が国際依存量を上昇させることを明示した

今日社会問題となっている少子高齢化とそれに伴う世帯構成の変化に着目し、今後の日本の家計消費需要が誘引する国内外のレアメタルの国際フロー量の2035年を対象とした長期予測を行った。

6つの世帯主年齢階級を世帯属性として、少子高齢化の影響を世帯属性ごとの世帯数および世帯人口（平均世帯人員数）の変化で表現し、公的統計等における過去のトレンドをもとに二次計画問題を解くことで、2035年までの世帯別家計消費需要額を推計した。なお、この世帯別需要額は産業連関表に基づく約800の国産品部門および輸入品部門で詳細に定義されており、近年の国際会議で強調される社会会計表における値との整合も満たしている特長を有する。これとGLIOを用いて、2005年から2035年までの国内家計消費由来の国際フロー量を推計した。

その結果、例えばネオジムでは2035年までに491.5tから447.4tの減少が見込まれ、少子高齢化に伴う世帯構成の変化は、今後のネオジムの国際フロー量を自然に低減させるということを示唆した。具体的には、ネオジムの場合、世帯数の変化によって2.5%、世帯人口の変化によって6.5%減少する。世帯別では、20s以下と30sの若年世帯における減少が目立つ一方、70s以上の世帯における増大が際立っており、後者による増加分が僅かではあるが上回った。

2035年において家計消費により引き起こすネオジムの国際フローの主要因として、「乗用車」部門や「自動車修理」部門といった自動車関連の部門、「民生用電気機器（除エアコン）」部門や「ラジオ・テレビ受信機」部門等による誘引が顕著であった。また、2035年と2005年の部門別の国際フロー量を比較すると、「乗用車」部門や「自動車修理」部門の需要に由来するフロー量が大きく減少した。その一方で、高齢化に関連して「医療用機械器具」をはじめとする医療関係に由来するフロー量が今後伸びていくことが示された。

5.7 ネットワーク理論に基づくクラスタリング手法を開発し、レアメタルの国際フローにおける Hotspot（レアメタル利用が集約的な貿易国群）を検出した

本研究では、スペクトラルグラフ理論や非負行列因子分解手法を用いて、国際貿易ネットワークからレアメタルの貿易フローが密集している Hotspot を検出する手法を開発した。また検出された Hotspot 情報と政治的、経済的リスク指標を示す世界経済自由度を組み合わせることによって、核となる資源貿易 Hotspot のリスク評価を行った。

結果として、ネオジム場合、国際貿易ネットワークデータから合計で18個の Hotspot を検出し、特に日本を含む Hotspot には、9つの国と地域（中国（CHN）、香港（HKG）、フィリピン（PHI）、インド（IND）、スリランカ（SRI）、モルディブ（MDV）、アメリカ（USA）、セーシェル（SEY）、日本（JPN））が含まれた。この Hotspot 内でのネオジムフローは最も大きく、ネオジムの国際フロー総量の約41%を占める7589tもの取引がされていた。この Hotspot 内の国や地域の取引で最も多くのネオジムの世界フローをカバーできるため、ネオジム利用の技術レベルの向上や、使用済み製品

からの回収システム、リサイクル技術の共同開発など Hotspot 内でコンソーシアムを組み、進めることが望ましいと考えられる。政治的、経済的リスクを考慮すると、コバルト、プラチナと比較すると、日本は特にネオジムに関して取引リスクの高い Hotspot に属していることが分かった。

今後は、本研究で検出された Hotspot 情報を精査し、レアメタル貿易に関して日本が置かれている立場についてより深く考察していく。また、よりリスクの少ない Hotspot の形成が可能であるかどうかを分析するため、多目的最適化問題への展開など Hotspot 検出手法の更なる改良を行うことが課題である。

5.8 視認性の高い可視化に基づく国際レアメタルフローの経路解析手法を開発した

本研究で開発した PMDA (path-based matrix decomposition analysis) は、標準的な産業連関分析の方法と同様に需要主導型モデル (需要が供給・生産を誘発する構造のモデル) に基づいている。したがって、マテリアルフロー勘定 (material flow accounting) でよく行われるような、特定の期間に観察された実際のフローを記述するだけでなく、最終需要が直接間接に誘発するマテリアルフローやマテリアルフットプリントに関する分析を行うことができる。また、PMDA は構造経路解析 (structural path analysis、SPA) に基づいている。したがって、生産誘発の出発点となる最終需要 (耐久財の購入) と終着点 (レアメタルの採掘) とを直接につなぐだけでなく、そこに至る経路を明らかにすることができるため、結果を図の形で示しやすい点で優れている。

本研究で用いた国・地域ごとの技術水準を定める指標は極めて簡便なものであり、大いに改善の余地があると言える。作図上の「低技術水準国」「高技術水準国」の意味するところについて、誤解を招かないように十分に説明を行うなどの注意が必要である。実際、現時点で生産活動の行われている国・地域は、経済性など何らかの現実に重要な基準に照らして効率的である可能性が高いことにも留意する必要がある。より精緻な分析を進めるためには、国ごとの指標として定義したものを、各国における技術ごとに定義しなおすことが求められる。これに必要な情報の調査は、残された重要な課題である。また、本研究で開発した手法は、国または二国間取引を何らかの意味で2つのグループに分けることができれば、その視点での改善可能性やリスクを図示する目的で適用可能である。例えば、自由貿易協定や経済連携協定を結んでいる二国間貿易と、その他の貿易の2つのグループに分類したり、各国への投資の意思決定などにも用いられている政情安定度指標を用いて2つのグループに分類したりして、レアメタルのクリティカリティ、とくに供給リスクに関する分析に応用することが考えられる。

5.9 耐久消費財の使用延長と需要減少との関係を同定し、使用年数延長による国際依存量の低減効果の計測を可能にした

耐久財の使用年数分布および使用済み台数の推計方法を応用し、使用年数の延長によるレアメタルの誘発採掘量や誘発フロー量削減効果を定量化する方法を提示した。乗用車、携帯電話、ルームエアコン、MRI装置を例として提示した方法を適用し、使用年数延長によるネオジム誘発採掘量や誘発フロー量を推計したところ、1年間の平均使用年数延長によるネオジム誘発採掘量、誘発フロー量の削減効果は携帯電話が8t前後と他の財に比べて桁違いに大きいことがわかった。次いでMRI装置が0.4t程度と大きく、乗用車とルームエアコンは0.2t程度で同程度であることが示された。

他の財についても国内出荷台数と総保有台数データが整備できれば、提示した方法を用いて同様に使用年数延長によるレアメタル誘発採掘量や誘発フロー量を定量化することができる。特にレアメタルの総需要量が大きい耐久財について基礎データを作成、整備し、使用年数延長による誘発採掘量や誘発フロー量削減効果を推計、データベース化することが望まれる。これにより、耐久財の長期使用によるレアメタルの誘発採掘量や誘発フロー量の削減効果を「見える化」し、サプライチェーンを通じたレアメタル資源の国際依存の観点から3R施策の立案のための基礎情報を提供することができる。

5.10 リデュース、リユース、リサイクルによってどれくらい日本のレアメタル国際依存量を軽減できるかを“見える化”する指標を開発した

本研究では、財やサービスに対して「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」を行うことにより、わが国のレアメタルに対する国際依存量がどれくらい軽減するかを示す指標を開発した。これは、3Rの貢献を資源の国際サプライチェーンに対する依存度の低下という視点から見える化するものである。具体的には、GLIOを用いて財やサービスへの需要とレアメタルに関する国際依存量を計測するための5つの原単位を約800の商品について算定した。5つの原単位とは財やサービスの単位生産額（百万円：M-JPY）あたりに国際サプライチェーンを通じて発生する資源採掘量、資源採掘に関するリスク、国際フロー量、国際フローに関するリスク、国際フローの技術レベル別フロー（Red-flow、Yellow-flow、Green-flow）である。

「リデュース」は財やサービスに対する需要の回避と考え、それに起因する財やサービスの生産

減少によって生じるレアメタルの国際依存量を軽減する。例えば、ある製品の200万円分のリデュース（需要回避）をした場合、その製品に該当する原単位の2倍の値が、軽減できるレアメタルの国際依存量となる。「リユース」は財やサービスの長寿命化と捉え、寿命延長（長期使用）に伴って減少する生産量を求める。例えば、ある製品が長期使用により300万円分の新規生産量を回避した場合、その製品の原単位の3倍した値が国際依存量の軽減効果である。一方、「リサイクル」は製品含有中のレアメタルの回収により、回避される金属素材生産を考える。例えば、ある製品から千円相当のレアメタルが回収できる場合、その回収したレアメタルの形態（地金か素材か部品）に対応する部門の原単位の0.001を掛けた値が軽減できる国際依存量となる。

例えば、一つ目の原単位である日本の財やサービスの中で単位生産額（百万円）あたりのネオジム誘発採掘量が最も大きい部門は、永久磁石の生産が該当する「その他の電気機械器具」部門であった。原単位は 1.86×10^3 t/M-JPYと最も高い値を示した。この 1.86×10^3 tは世界の総ネオジム採掘量（2005年値）の 1.48×10^7 （ $1.48 \times 10^{-4}\%$ ）に相当する。言い換えれば、例えば永久磁石の百万円分のリデュース（需要回避）することで世界の採掘量に対する日本の依存量を $1.48 \times 10^{-4}\%$ だけ軽減できることを示す。

二つの原単位は、ネオジムの誘発採掘量に採掘国ごとの政治的リスクを勘案し、そのリスクによって重みづけをした採掘量であるが、誘発採掘量と同じ部門がリスクで重み付けした場合にでも上位に挙がった。ネオジムの採掘量は中国がその大半を占めるため、リスクを加味した場合の原単位も同様の特徴を示したと考えられる。具体的に見ると、「その他の電気機械器具」部門の百万円相当のリデュースやリユースは、世界のネオジムに関する採掘リスクを 1.49×10^7 （ $1.49 \times 10^{-4}\%$ ）だけ回避することができることを示した。

三つ目の原単位である単位生産額（百万円）あたりの引き起こすネオジムの国際フロー量の中で最も大きいのが「その他の電気機械器具」部門であった。単位生産あたり 2.12×10^3 t/M-JPYの国際フローに依存しており、これは世界全体の $1.49 \times 10^{-4}\%$ に相当する。次に大きい部門は輸入品の「電子計算機付属装置」部門であり、一つ目の原単位の誘発採掘量では2番目に大きかった「医療用機械器具」部門より上位に位置する。これは、輸入品の「電子計算機付属装置」の方がその生産過程において複数の国を跨ぐサプライチェーンを経由していることが原因と推測される。

四つ目の原単位は、誘発する国際フローをそのフローを形成する国々の貿易リスクによって重み付けして求めた、リスクを加味した国際フローである。ネオジムの場合、三つ目の原単位の国際フロー量と上位の部門が変わらないことから、ネオジムの場合は貿易リスクを加味した場合でも誘発する国際フローが大きいことが国際依存の大きさを決定付けることが分かった。ネオジムは国際フローのほとんどが中国から日本へのフローであり、どの財やサービスもこの中国から日本へのフ

ローに依存するため、リスクを加味してもフローの大きさのみを考慮する場合と変わらない結果となったと推察される。

最後の五つ目の原単位は、誘引する国際フローを Red-flow、Yellow-flow、Green-flow に分類し、Red-flow の割合の高い部門に着目した。Red-flow とは技術レベルの比較的低い国や地域間でレアメタルが移動するフローを指しており、Red-flow の割合が大きい財やサービスであるほど、国際サプライチェーンを通じたレアメタルの利用が非効率的である可能性を有している。したがって、Red-flow の割合が高い財やサービスの新規需要をリデュース、リユース、リサイクルによって回避することは、非効率的な資源利用を回避するうえで、最も効果が高い。言い換えれば、Red-flow の割合が大きい財やサービスのサプライチェーンには資源を有効に利用するために改善すべきフローが多く存在していることを意味する。サプライチェーンにおいてどのように資源が利用されているかを優先的に見直すべき商品といえる。ネオジムの場合、「乗用車」、「その他の最終化学製品」、「金属工作機械」がそれぞれ誘発するネオジムの国際フローのうち、16%、13%、12%が低技術国間で生じており、非効率的な資源利用に依存している割合が高いことが明らかとなった。

これらの5つの原単位を「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」により回避される新規需要額に適用することにより、「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」によるレアメタルの日本の国際依存量の軽減効果をリスクをも加味して定量化することが可能となった。また、リユースによる使用年数延長がどれほどの新規需要回避に相当するかを推計することも可能となったため、耐久消費財のリユース効果の計測にも十分適用できると考えられる。

5.11 本成果の社会・技術システム設計と環境政策に対する意義と提案

5.11.1 システム設計と環境政策に対する意義

本研究では、231 の国や地域を含むグローバルなシステム境界に基づきレアメタルの国際マテリアルフロー同定する手法を開発した。WIO-MFA によるレアメタルの製品含有率を併用し、数理計画法による調整を行う本手法は、レアメタルを含有する全ての貿易商品を含めることができるだけでなく、各国のレアメタルに関する質量保存則を保証することができる。推計にかかる費用を押させつつも網羅性と論理性を高めることができる方法論であり、わが国としてレアメタルの国際的な動態を経年的にモニタリングすることを支援することができる。推計から得られるレアメタルの国際フローは、資源安全保障政策、資源のリサイクル政策を検討する上で世界を俯瞰する上で不可欠な数値情報となる。

同定したレアメタルの国際フローは非常に情報量が多いが、本研究ではその中で重要となる構造

的特徴と抽出する方法論の開発を行った。一つは、レアメタル採掘量やレアメタルの国際フロー量を資源採掘国の政治的リスクや各国の貿易リスクの視点から観測する方法である。二つ目は、フローの特性を国の社会システム、科学技術レベルの違いに応じて分類（Red-flow、Yellow-flow、Green-flow）することで、非効率的なレアメタル利用が懸念されるフローを認識する方法である。同様の方法で、どの貿易商品が非効率的なレアメタル利用に基づいているかを識別できる。各国の技術レベルの正確な分類には更に調査を要するが、世界における非効率的なレアメタル利用の発見は、レアメタルの持続的利用に向けて改善を要する国や製品の優先付けに資するものである。三つ目は、ネットワーク理論に基づくクラスタリング手法を開発し、レアメタルの国際フローにおけるHotspot（レアメタル利用が集約的な貿易国群）を検出する方法である。特に日本がどのHotspotに含まれるかを知ることができるため、レアメタルの持続的利用に向けて日本がどの国々と共同すべきかを戦略的に選定することを理論的に支援する。これは、平成25年5月31日に閣議決定された第三次循環計画における国際的取り組みの推進の一つである「地球規模での循環型社会形成」の具体的な構造設計の基本材料となり得る。

世界全体のフローと日本経済との直接間接の関係性を知ることは、日本が暗黙的に抱えるレアメタルの国際依存量を把握する上で不可欠である。本研究では、GLIOを用いた日本の最終需要が誘引する国際フローを検出する方法論を開発し、国際依存量の定量化を世界で初めて可能にした。この方法論を個別の財やサービスに対して適用することで算定した約800の財やサービスに関する5種類の原単位は、今後の日本の社会・技術システムを設計する上で、常に日本の直接間接のレアメタルの国際依存量との関係を洞察することを可能にする。5つの原単位とは、財のサービスの単位生産額（百万円）を回避することにより、どれくらいのレアメタル採掘量、採掘リスク、国際フロー量、国際フローリスク、非効率なレアメタル利用を軽減できるかを示すものである。同時に、本研究では製品利用の長寿命化によってどれくらいの新規需要が回避できるかを推算する方法論を開発しており、例えば、一年の寿命延長が何百万円の需要回避に相当するかを見積もることができる。したがって、約800の財やサービスに対する「リデュース」、「リユース」、「リサイクル」がもたらす日本のレアメタル国際依存量の軽減効果を「見える化」することができる。こうした効果の「見える化」は、第三次循環計画においてリデュース、リユースの取り組みを支援する社会経済システムを構築する上で必須の要件であり、本研究成果の「見える化」によって望ましい技術システム、社会制度設計、消費者の選択を促進する。

迫りくる少子高齢化社会と日本のレアメタルの国際依存との関係を導出した5つの原単位と家計消費需要の将来予測を用いて解析した。推計結果からはネオジムの場合「民生用電気機器（除エアコン）」や「携帯電話機」、「パーソナルコンピュータ」等の、レアメタルの使用用途先として容易に

想像がつく電子機器部門による国際フロー量が 2035 年になっても大きいことが確認された。これは、3R 政策において、少子高齢化の進行による需要の変化の面からも、引き続き現状の家電リサイクル法および小型家電リサイクル法の充実を進めることは効果的であること支持する。また、2005 年から減少すると見られる「乗用車」および「自動車修理」に起因する国際フロー量については、将来的に電気自動車やハイブリッド自動車の普及次第で大きく変動する可能性が高い。今後大きく伸びていくことが予想される医療関係の需要の国際フロー量と合わせて、最優先でその低減のための取組みを要すると考えられる。一方で、多量のネオジムを原材料に含む MRI 等の医療機械器具は、患者の治療が最優先事項である医療の特性から一概に古いものを使い続けることが良いかどうか、自動車の買替における CO₂ を解析対象とした先行研究³⁹のように資源確保の面と併せて今後検討していくことが課題であろう。

また、本研究では複雑かつ情報量が多い国際フローの視認性を高める方法論の開発を行った。応用例として、国際レアメタルフローの量と技術的特性に関する情報などを含む図を作成した。これは、分析を行う専門家に対して気付きを与える手段であると同時に、政策担当者や一般市民にも理解しやすいかたちで情報を提供する手段として非常に有用である。例えば、様々なステークホルダーが参加して、耐久財の利用とその 3R 施策などに関する合意形成が必要な機会において、円滑な現況認識を支援する利用価値の高い方法論となる。

5.11.2 資源採掘の課題と持続可能な資源確保に向けた将来戦略

近年よく知られてきたように、鉱山で採掘される鉱石に含有される金属の量はわずかであり、金属を取り出した残渣は廃棄物として処分されている。例えば、ネオジム鉱石中の品位は 1%程度、ニッケル鉱石では 1~2%、銅鉱石で 0.5~1%、プラチナ鉱石や金鉱石にいたってはそれらより 1 万分の 1 の濃度である 1-5ppm(0.0005%)の含有率で金属が存在している。廃棄物が占める割合が 99%~99.9999%にも達する計算となる。この廃棄物にはヒ素やカドミウムなど過去には深刻な公害を引き起こしてきたとされる不要な重金属が付随することも多く、鉱山で排出されたものは鉱山近くの水質管理されたダムに埋め立てられ、製錬所で排出されたものは製錬所内で厳重に保管されている。鉱山や製錬所はこの廃棄物処理と環境対策に多大な労力と費用を払っている。

また、鉱山での採掘にあたっては、鉱石のみを採掘することはできず、露天掘りでは垂直に近い形で存在する鉱床の上部と周囲も掘削し、すり鉢状のピットを形成するため、少なくとも鉱石の数倍の岩石も採掘する必要がある。これはズリと呼ばれ、ズリを積み上げる堆積場も必要である。坑

³⁹ Kagawa, S., Hubacek, K., Nansai, K., Kataoka, M., Managi, S., Suh, S., Kudoh, Y. (2013) Better cars or older cars?: Assessing CO₂ emission reduction potential of passenger vehicle replacement programs, *Global Environmental Change*, 23, 1807-1818

内堀の場合も、鉱床に到達するトンネルを蟻の巣のように張り巡らせ採掘し、採掘方法によっては地表部の陥没を引き起こすため、露天掘りと同様に環境への負荷が発生する。

最近の研究では、金属が生産されるまでに排出された廃棄物量も勘案すべきだとして、フロー全体での環境負荷を測る試みもなされてきている。これは、隠れた物質フロー、エコロジカル・リユックスアックや TMR（関与物質総量）と呼ばれ、土地の改変量としてズリや廃石の量だけでなく、鉱山から半永久的に流出する AMD（酸性鉱排水）による負荷や、鉱山開発全体における生態系への影響なども含めた総合的な環境負荷として算出された例が出つつある。その他にも、重機やプラントからの粉じんや排気ガスによる大気への影響、地下水の汚染や枯渇、発破による振動の影響など、程度の差は鉱山によって様々であるが鉱山開発には一定の環境破壊と負荷が避けられない面がある。

資源の採掘量を減少させることには、採掘と製錬にともなうこのような環境負荷を減少させることにダイレクトに影響を与える。また、そもそも資源は地球上で有限であることには変わりなく、将来世代に引き継ぐべき資産であることも考え合わせると、3R の促進が持続可能な資源利用につながる一つの手段であることは間違いない。

資源開発の観点からも将来の課題とされている点が多い。鉱山は開発が容易で費用が安いところから開発されるため、今後残されている鉱床は開発がさらに困難な場所が残されてくる。例えば、現在の鉱山開発で課題となっている事項を列挙すると、鉱石に含まれる不純物が多くなってきたこと、鉱石の品位が低下してきたこと、新しいタイプの鉱物を処理しなければならないこと、鉱床にたどりつくまでの道路や鉄道などのインフラが整備されていないこと、鉱床の位置が地中深くになり露天掘りでは対処できず効率が悪い坑内掘で採掘しなければならないことなど、すでに世界各地の資源国でその兆候は出始めている。今後、これらに対処するための技術開発が必要であるが、実験室での小規模な実験では可能でも、鉱山での処理量が膨大となるため抜本的な新技術の適用は難しく、坑内掘での大規模操業例はまだ少ない。また、将来的にたとえ適用されたとしても生産費用が大幅に上昇することは避けられず、生産費用の増加は資源価格の上昇または高値維持を引き起こすと考えられるだろう。さらなる資源高までを勘案すると、現時点で 3R を推進することが経済性の面で折り合わなくとも、将来的には大幅に緩和される施策も多くなることが期待できる。それに遅れないように現時点から、3R の制度と技術を整える努力を継続することが、世界的にも求められる。

これらのことを本研究のレアメタルフローの見える化と合わせて考えると、日本が資源や加工品をどのような国や地域から調達しているかが明確となることは大変重要である。日本の資源確保のリスクを考えた場合、調達先が単に多くの国や地域に分散していることがそのままリスクを低減させるわけではなく、各国のカントリーリスクとともに、我が国との友好度も加味して考える必要が

ある。また、部品の調達先は多様であっても、その元となる資源供給国が限定されていることなど、資源のサプライチェーンを一覧できるようになることから、資源確保のボトルネックが明確になる点もフロー見える化によって明らかになる重要な点である。中間投入財と最終製品を生産する国と最終消費をする国が連携・協同することによってバーゲニングパワーを増し、資源ナショナリズムが高まる資源生産国との交渉をより有利に進め、資源確保につなげることも、今後重要な資源政策になると考えられる。

さらに、環境負荷の観点からは、金属生産にともなう環境負荷のトレーサビリティを測るきっかけを与えることが期待できる。各資源供給国での主な採掘方法や環境対策、閉山後の対策、資源開発に関する制度・法律などについてさらに調査を進めて、環境負荷に関する要因をさらに加えることで、消費する金属の総合的な環境負荷を測り、今後の資源開発への投資先も含めて、より負荷の少ない金属を消費するような方策を立てることも今後重要となってくる。

一方で、社会的も大きく取り上げられたことから、近年レアメタルに関する分析が多くなってきているが、従来から大量に消費されているベースメタルについても注視する必要があることについて述べる。多くのレアメタルに共通する特徴として資源生産が特定の地域に偏在していること、短期的な世界情勢や製品需要の急増に大きな影響を受けること、レアメタルを使用する製品サイクルの早さなどをあげることができる。また、中期的にみれば企業の技術開発によって金属の代替や省資源化が可能な用途もある。加えて、金属としての市場の流通量が少なく、市場規模が小さいことは価格の変動が大きくなる要因となっている。このためレアメタル需要の長期的な見込みを立てることが困難であり、レアメタルを採掘する資源産業側からの視点では、ベースメタルと比較して取引額の割に非常にリスクが高い鉱山開発となる。これが多国籍資源企業の手メジャーがレアメタルの鉱山開発に消極的な理由であり、そのため開発は地域の小規模な企業にゆだねられることが多い。鉱山開発企業が小規模であることは、投資が少なく新しい開発が進まないだけでなく、供給の不安定さが増す原因にもなる。生産計画の透明性も確保されていないことから、消費側の材料調達リスクが一段と増す要因につながる。これに付け加えて中国のように国による生産や輸出調整が行われ政治リスクが高い金属についてはさらに調達リスクは高くなり、レアアース問題として顕在化してきた。

一方で、銅・亜鉛などのベースメタルは過去より大量に生産され大量消費が続いてきているため、世界中で新たに大規模で高品位な鉱床が発見されることが非常に希になってきている。すでに述べたように、鉱石に含まれる金属品位の大幅な低下、不純物や毒性の高い重金属の混入などが新規に開発される鉱山の大きな問題点となってきたのが現状である。これはベースメタルの従来型の鉱床が枯渇に近づいて来ている兆候ととらえることもできよう。また、レアメタルのうちコバルト、

モリブデン、ガリウム、インジウムなどはベースメタルの副産物として産出されるため、ベースメタルの生産動向に大きく左右される。それに対してその他のレアメタルは、その金属種の性格にもよるが、多くは未探査あるいは資源として価値がないものとみなされ未開発に終わってきた地域が世界にはまだ多く残されており、レアメタルの開発・精製技術にも改善の余地が多く残されていると考えられる。今後の探査や技術開発によっては資源が追加されることが期待できる点で、ントリーリスクを除外して資源の供給のポテンシャルだけを見るとベースメタルより余裕がある金属も多いと考えられる。

以上を鑑みると、短期的な国際情勢や資源ナショナリズム、対中国などの地政学的要因を主な課題であると考えれば、レアメタルは戦略的な武器となり我が国にとってはその安定的な確保は製造業の生産を守るうえで非常に脅威となるが、長期的に資源の持続的な確保を考える際には、国内・国際的な3Rも含めてベースメタルの持続的な供給も視野に入れて総合的に検討すべきであると言えよう。

6. 研究発表

論文発表

- [1] Shigemi Kagawa, Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Tetsuya Nagasaka, Forecasting Replacement Demand of Durable Goods and the Induced Secondary Material Flows: A Case Study of Automobiles (2014), *Journal of Industrial Ecology (Forthcoming)* (IF@2012 = 2.276). (査読有)
- [2] Yasushi Kondo (2014) Triangulation of input-output tables based on mixed integer programs for inter-temporal and inter-regional comparison of production structures, *Journal of Economic Structure (Forthcoming)*. (査読有)
- [3] Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Sangwon Suh, Yosuke Shigetomi, and Yuko Oshita (2014) Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt and platinum, *Environmental Science & Technology* (IF@2012 = 5.257), 43(3), 1391-1400. (査読有)
- [4] Shigemi Kagawa, Klaus Hubacek, Keisuke Nansai, Minori Kataoka, Shunsuke Managi, Sangwon Suh, Yuki Kudoh (2013) Better cars or older cars?: Assessing CO₂ emission reduction potential of passenger vehicle replacement programs, *Global Environmental Change* (IF@2012 = 5.236), 23(6), 1807-1818. (査読有)
- [5] Shigemi Kagawa, Shunsuke Okamoto, Sangwon Suh, Yasushi Kondo, and Keisuke Nansai (2013) Finding environmentally important industry clusters: Multiway cut approach using nonnegative matrix factorization, *Social Networks* (IF@2012 = 3.381), 35, 423-438. (査読有)
- [6] Shigemi Kagawa, Sangwon Suh, Yasushi Kondo, and Keisuke Nansai (2013), Identifying environmentally important supply chain clusters in the automobile industry, *Economic Systems Research* (IF@2012 = 2.098), 25(3), 265-286. (査読有)
- [7] 南斉規介、近藤康之、加河茂美 (2013)、(解説) GLIO を用いたグローバル環境負荷原単位データベースの開発、*日本 LCA 学会誌*、9(2)、101-107. (査読無)
- [8] Ryu Koide, Chiharu Tokoro, Shinsuke Murakami, Tsuyoshi Adachi and Akihiro Takahashi (2012) A Model for Prediction of Neutralizer Usage and Sludge Generation in the Treatment of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines: Case Studies in Japan, *Mine Water and the Environment* (IF@2012 = 0.982), 31(4), 287-296. (査読有)

学会等発表

- ・南齋規介、中島謙一、加河茂美、近藤康之 (2014)、日本のマテリアルフローフットプリント、第9回日本 LCA 学会研究発表会、2014年3月4~6日、東京.
- ・近藤康之、南齋規介、中島謙一、加河茂美 (2014) 我が国における耐久財使用に係るネオジム、プラチナ、コバルトの国際貿易フローおよび技術的見地からの Hotspot の可視化、第9回日本 LCA 学会研究発表会、2014年3月4~6日、東京.
- ・Nansai K., Kagawa S., Kondo Y., Nakajima K. (2013) Estimate of rare metal footprints for Japanese products with a global link input-output model. *SETAC Europe 19th LCA case study symposium*, Roma, Italy.
- ・Shigetomi Y., Nansai K., Tohno S. (2013) Environmental footprints of households from the viewpoint of an aging society with fewer children. *SETAC Europe 19th LCA case study symposium*, Abstracts, 78-79, Rome, Italy.
- ・Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo and Sangwon Suh (2013) Characterization of Global Flows of Rare Metals and Their Relation to Japan's Economy, *Book of Abstracts of 21th International Input-output Conference*, p77, July, Kitakyushu, Japan.
- ・Shigetomi Y., Nansai K., Tohno S. (2013) Future Projection of Global Greenhouse Gas Emissions Associated with Japanese Household Consumption with a Global Link Input-Output Model. *21th International Input-output Conference*, Abstracts, 100.
- ・Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo and Sangwon Suh (2013) International shared responsibility for enhancing global material efficiency of rare metals, *Proceedings of 7th International Conference on Industrial Ecology*, 520(CD-ROM), June, Ulsan, Korea.
- ・Shigetomi, Keisuke Nansai, Susumu Tohno (2013) Change in consumption-based greenhouse gas emissions and energy consumptions from households associated with the future transition of household composition in Japan, *Proceedings of 7th International Conference on Industrial Ecology*, 440(CD-ROM), June, Ulsan, Korea.
- ・Keisuke Nansai (2013) (Keynote speech) Characterisation of global flow of rare metals in order to promote the sustainability of global resources, *Rare Earth Minerals Symposium*, May, Brisbane, Australia.
- ・Yasushi Kondo, Kenichi Nakajima, Shinichiro Nakamura, Kazuyo Matsubae, Tetsuya Nagasaka (2013) Simultaneous material and substance flow analysis: An extension of WIO-MFA and its application to effective recycling of steel alloys. *The 7th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference*, June 25-28, 2013, Ulsan, Korea

- Yasushi Kondo, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa (2013) Visualizing international bilateral material flow of neodymium, platinum and cobalt associated with use of durable goods in Japan and detecting bottlenecks in the supply chains from technology perspectives. *World Resources Forum 2013*, October 6–9, 2013, Davos, Switzerland
- Yasushi Kondo, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa (2013) Visualizing international bilateral material flow of neodymium, platinum and cobalt associated with use of durable goods in Japan and detecting hotspots in the supply chains. *3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management*, March 10–12, 2014, Kyoto, Japan
- Tsuyoshi Adachi and Kazuya Uzuwa (2013) Risk indicators of materials supply for future photovoltaic expansion – the case of silver -, *World Mining Congress 2013*, August, Montreal, Canada.
- Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Kenichi Nakajima, Sangwon Suh (2012), Green technologies and their global resource dependency: Material flow analysis using a global link input-output model, *20th International Input-output Conference*, June, Bratislava, Slovakia.
- Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Sangwon Suh (2012), International Material Flow Analysis on Green Technologies with a Global Link Input-Output Model, *Proceedings of The 10th International Conference on EcoBalance*, CD-ROM (C2-11), Nov., Yokohama, Japan.
- 南斉規介、中島謙一、加河茂美、近藤康之 (2012)、貿易に伴うレアメタルの国際移動と日本経済との関係、第8回日本LCA学会研究発表会、2013年3月、滋賀。
- Yasushi Kondo, Anders Hammer Strømman, Shigemi Kagawa, Keisuke Nansai (2012) Path-based Matrix Decomposition Analysis: Theory and Application. *Presented at the 20th International Input-Output Conference*, June 2012, Bratislava, Slovakia
- Yasushi Kondo, Anders Hammer Strømman, Shigemi Kagawa, Keisuke Nansai (2012) Structural Understanding of Production Network by Visualizing Inter-sector Carbon Flow: A Path-based Matrix Decomposition Analysis. *Presented at the 10th International Conference on EcoBalance*, November 2012, Yokohama, Japan
- Kenichi Nakajima, Keisuke Nansai, Kazuyo Matsubae and Yasushi Kondo (2012) Global flow of metals and phosphorus: Identifying its network structure and implication for sustainable resource management. *MFA - ConAccount Section Conference 2012* (September 26 - 28, 2012 Darmstadt, Germany)

7. 知的財産権の取得状況

なし

英文概要

In light of the overall resource dependence of the Japanese economy in international supply chains, this study was conducted to develop a new quantitative indicator of the contribution of reducing, reusing, and recycling (3R) activities involving Japan's goods and services to both quantitative and qualitative reduction of resource dependence and to measure the indicators for major rare metals necessary for low-carbon technologies. The study consisted of the following three themes. Theme 1 was "to understand the condition of international material flow of rare metals and explain its structural relationship with Japan," Theme 2 was "to design the framework for risk assessment of resource dependence and develop a quantification method," and Theme 3 was "to measure the risk indicator of resource dependence for the 3R activities on goods and services in Japan."

The results were the following. In Theme 1, the form of international trade through which rare metals moved from countries of origin to consumption countries was examined using material flow analysis (MFA) to elucidate the interdependence relations of respective countries with respect to rare metals trade. To do this, the study developed a methodology that would enable MFA of rare metals based on a global system boundary encompassing 231 countries and regions. This analysis specifically examined rare metals of 10 types necessary for low-carbon technologies, including neodymium (Nd), cobalt (Co), platinum (Pt), nickel (Ni), chromium (Cr), molybdenum (Mo), tungsten (W), titanium (Ti), tantalum (Ta), and lithium (Li). Subsequently, a global link input-output model (GLIO) was applied to identify the parts of international flow of rare metals on which Japanese economy caused directly and indirectly. This means that Japanese economy depends on this identified parts of the international flows of rare metals.

In Theme 2, structural characteristics of the international flow of rare metals were analyzed to consider the qualitative factors of resource dependence, in addition to the amount of consumption as a quantitative factor required for the supply risk indicators of rare metals. By positioning the political risk of resource mining countries existing in international flows and trade risk latent in international supply chains from processing after mining to end products as qualitative factors, the study developed a method of MFA involving those risk factors. Furthermore, as another qualitative factor, the study classifies the international supply chains of rare metals into three groups by focusing on differences in social and technological level of each country, and identified flows that preferentially need technological improvement on rare metal use. In addition, the study developed a new technique to extract the international transactions that constitute the core of the international flow of rare metals and a visualization method that is expected to yield high visibility to help all stakeholders understand the complex international flow easily.

Finally under Theme 3, the indicators of reduction in Japan's international dependence on rare metals through reducing, reusing, and recycling Japan's goods and services was designed using the methodologies developed under Themes 1 and 2. Such indicators of reduced international dependence through reducing, reusing, and recycling can be derived from the intensity of goods and services representing how much Japan's international dependence is reduced by avoiding unit of production (one million yen) of goods and services. The study calculated the intensity of approximately 800 goods and services among the domestic products and imports of Japan. A methodology to convert the extended years of lifespan to the amount of reduced demand was also developed to derive the indicator of "reusing." Finally, a model to estimate future demand for household consumption was developed by incorporating the population reduced by the declining birth-rate and aging society and changes in household structure. Based on the estimate future demand, changes in

Japan's dependence on international supplies of rare metals up to year 2035 were analyzed.