

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（特設分野研究）

研究期間：2018～2020

課題番号：18KT0056

研究課題名（和文）クリティカルメタルに着目した人工知能社会の資源リスクと持続可能性評価

研究課題名（英文）Sustainability assessment of artificial intelligence society from the viewpoint of critical metals use

研究代表者

南齋 規介（Nansai, Keisuke）

国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・室長

研究者番号：80391134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：リチウム、コバルト、ネオジム等のクリティカルメタルの既存予測研究は、新エネルギー技術普及の視点から需要予測を行っており、人工知能技術の拡大は明示的には考慮していなかった。しかし、バッテリーや永久磁石から人工知能技術に関係が深いコバルト、リチウム、ネオジム等は電気自動車に関連して予測研究は存在した。クリティカルメタルの物質フローとSDGs指標との関係では、重量では圧倒的に重いベースメタルと同程度に広範なSDGs指標の悪化と相関があることが分かった。国内の人工知能関連産業は国内サプライチェーンを通じて直接間接にクリティカルメタルを含有する電子回路やデータプロセス機器の輸入品に依存しており、資源効率化の重要性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、国内の人工知能関連産業への需要が国内サプライチェーンを通じて必要とする輸入品を同定し、クリティカルメタルへの依存性の高さを示すとともに、SDGs指標との関係性や貿易の将来変化を展望した。人工知能社会が気候変動対策と同時に展開するには、高い資源生産性が要求されることが示唆され、そのための対策を含めた人工知能普及施策の重要性を提示した意義がある。

研究成果の概要（英文）：Existing studies of critical metals have forecast demand from the perspective of new energy technology diffusion, and have not explicitly considered the expansion of artificial intelligence technology. However, there have been forecasting studies on cobalt, lithium, neodymium, etc., which are closely related to artificial intelligence technology from batteries and permanent magnets, in relation to electric vehicles. The relationship between the material flows of critical metals and the SDG indicators showed that they are correlated with the deterioration of a wide range of SDG indicators to the same extent as base metals, which are by far the heaviest in weight. Domestic AI-related industries are dependent on imported electronic circuits and data processing equipment containing critical metals directly and indirectly through domestic supply chains, suggesting the importance of resource efficiency enhancement.

研究分野：環境システム学

キーワード：クリティカルメタル サプライチェーン 国際貿易 輸入製品

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人工知能(AI)の普及・拡大については、ロボット内の電子機器や人工知能のクラウド化も進み、巨大なデータサーバーの整備を含めて、レアメタル等の資源需要を大きく牽引するが予想される。レアメタルの中には採掘国が偏在し、政治的にも不安定であるなど供給にはリスクを伴うことが懸念される。自動車の自動運転に代表される安全安心に資する人工知能の活用に加え、少子高齢化に直面する日本では、介護や見守りロボットなどの高齢者支援や労働力支援としての普及にも期待がある。日本が低炭素社会へと転換し、かつ、人工知能を活用した技術イノベーションにより少子高齢化への対処と経済基盤の強化を最小限の資源リスクで達成するには、人工知能を活用する社会シナリオ(人工知能社会)に焦点をあて、クリティカルメタルの将来需要と資源リスクの分析を可能にする科学的手法論の開発が急務である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、安全安心・少子高齢化に貢献する人工知能技術の普及を見据え、新たな資源消費を喚起する技術的・社会的要因に着眼した「人工知能社会」を想定して、その実現に伴うクリティカルメタルの将来需要と資源リスクを定量的に明らかにし、資源リスクから見た人工知能技術の普及を阻害する要因を解明することである。

### 3. 研究の方法

(1) クリティカルおよびメジャーメタルの現時点での将来需要予測に関する知見を整理するため、既存研究論文のレビューを行った。クリティカルメタルとして48種類の金属について調査し、ベースメタルとして5種類を調査した。需要予測研究の中でも、新エネルギー技術の普及を背景とした予測研究を注視した。

(2) クリティカルメタルの利用と持続可能性との関係を包括的に理解するため、各国の金属資源のマテリアルフローと国連の持続可能な開発目標(SDGs)との相関性をパネル分析により検証した。パネルデータとして、2004年から2013年の10年間を対象に、各年の国別の直接物質投入量(DMI指標)を6種のクリティカルメタル(Nd, Co, Pt, Ni, Cr, Mo)と5種のベースメタル(Fe, Cu, Pb, Zn, Al)を整備した。DMIには天然鉱山採掘と都市鉱山からの回収による社会への金属投入、鉱石、素材、製品輸入による金属投入を含めた。他の説明変数として、GDP、人口、一次エネルギー消費量およびガバナンス指標(WGI: World Governance Index)を加えた。

非説明変数は、世界銀行のSDGデータベース(WB-SDG)を利用した。2004年から2013年の期間内に複数年のデータがある20カ国以上の指標のみを用いた。WB-SDGデータベースに収録されている316の指標の中には、他の指標と類似・関連しているものが多くあり、このような重複性を排除して96個の指標を被説明変数として用いた。

(3) 人工知能に関連する日本の産業が直接間接的に必要とする輸入製品その含有金属種を分析するため、最新の2015年産業連関表と国際貿易データ(BACI)による5022貿易品目を接続した産業連関分析モデルを開発した。加えて、各貿易品目について15種類の金属含有の有無をデータ化し、国内の人工知能の産業のサプライチェーンを通じたクリティカルメタルに対する依存を分析した。

(4) 国内の人工知能に関連する産業が直接間接に依存する国際貿易商品の将来変化をシナリオ分析するモデルを開発した。1995年から2017年までの197カ国間の5022品目に関する貿易データをBACIにエラー処理をして整備した。BACIの重量ベースでの貿易量を時系列で観測した場合に明らかに非現実的な増減を示す年次が含まれており、それを各年の機械的に修正する方法を適用した。貿易商品ごとに国間貿易量の各年の移動平均値を算出し、移動平均値とBACIの貿易量との差分を各年で取り、その標準偏差の2倍以上の差分を示した年次のデータを異常値と見なした。異常値とした年次は線形補間を行った。修正した貿易量を被説明変数とし、将来の経済と社会の脱炭素化に焦点を当て、説明変数として各国の温室効果ガス(GHG)排出量、GHG/GDP、GHP/人口を含めたリッジ回帰分析によりモデルを定式化した。これに将来のGHG、GDP、人口のシナリオ値を付与して、貿易量の将来変化を分析した。

### 4. 研究成果

(1) クリティカルメタルの予測研究のレビューの結果、多くの先行事例が新エネルギー技術普及の視点から需要予測を行っており、人工知能技術の拡大は明示的には考慮されていなかった。しかし、バッテリーや永久磁石から人工知能技術に関係が深いコバルト、リチウム、ネオジム等は電気自動車に関連して比較的予測研究が存在した。ベースメタルについては、これらの主要金属の世界需要は、21世紀に入っても継続的に増加する可能性が高く、金属によっては約2～6倍に増加する可能性を確認した。

(2) 図 1(a)は、天然鉱山採掘と都市鉱山からの回収された金属と輸入金属の国への投入量が増加した場合の SDGs 指標への影響 (悪化した指標を 17 目標別に集計した平均値) を示す。平均値で見ると、採掘金属の投入量を増やすと 10.3 の指標が悪化するのに対し、輸入金属の使用量を増やすと 8.6 の指標が悪化するという相関関係があった。これは、採掘された金属の使用が、輸入された金属の使用よりも、より広範囲に SDGs に悪影響を及ぼしたと理解できる。図 1(b)は、ベースメタルとレアメタルで集計した場合を示す。ベースメタルとレアメタルの使用量の増加は、それぞれ 9.3 と 9.5 の指標に影響を与えているが、前述の採掘と輸入の分類とは異なり、2 つの金属分類の間に顕著な違いは見られない。レアメタルの一国への投入量はベースメタルと比較して非常に小さいが、その増加はベースメタルと同等の SDGs への影響をもたらす可能性を示唆する。一方、図 1(c)は、個別金属ごとに投入量の増加が SDGs 指標の悪化と関係した個数を示している。例えば、Co の使用量の増加は SDGs に最も広範な影響と関係した。また、採掘された Pt と輸入された Pt の投入増加は、それぞれ 6 個と 12 個の指標の悪化と相関しているが、両者に共通の指標はなかった。

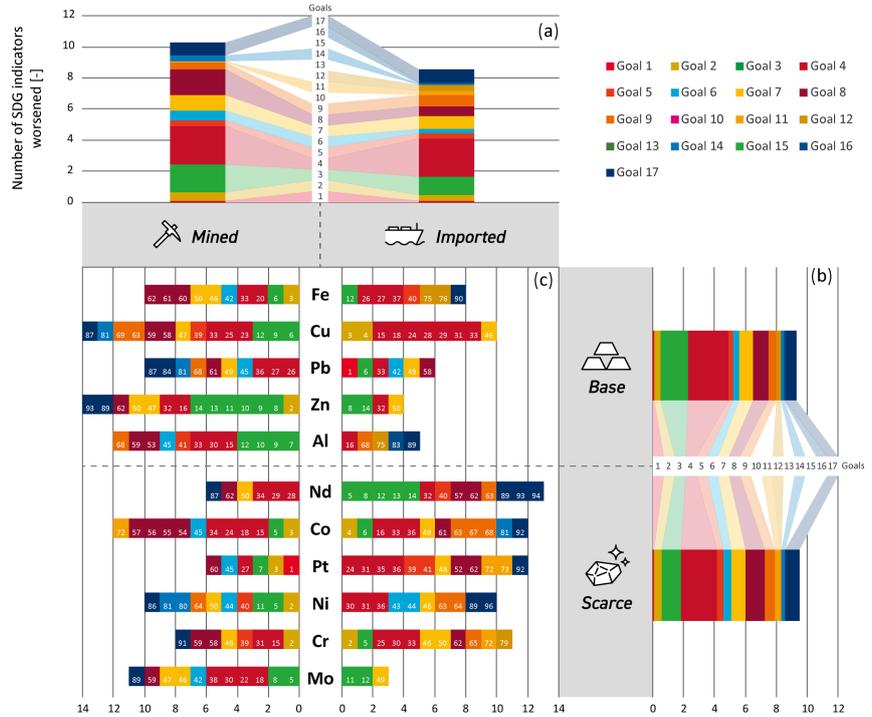


図 1：金属資源の国への投入量の増加により、悪化が認められた SDGs 指標の数

表 1：人工知能に関連産業が直接間接に必要な主輸入品目 (輸入額上位 5 つ)

表 1：人工知能に関連産業が直接間接に必要な主輸入品目 (輸入額上位 5 つ)

「電子計算機」部門への需要				
Rank	Volume (m-yen)	HS92 code	Commodity name	
1	2.635	847191	Digital processing units: whether or not presented with the rest of a system, which may contain in the same housing one or two of the following: storage units, input units, output units	
2	1.795	847330	Machines: parts and accessories of automatic data processing, magnetic or optical readers, digital processing units	
3	0.024	854219	Electronic circuits: monolithic integrated, other than digital	
4	0.009	852990	Reception and transmission apparatus: for use with the apparatus of heading no. 8525 to 8528, excluding aerials and aerial reflectors	
5	0.007	853400	Circuits: printed	

「ロボット」部門への需要				
Rank	Volume (m-yen)	HS92 code	Commodity name	
1	0.015	854219	Electronic circuits: monolithic integrated, other than digital	
2	0.013	847989	Machines and mechanical appliances: n.e.s. in item no. 8479.8, having individual functions	
3	0.010	270900	Oils: petroleum oils and oils obtained from bituminous minerals, crude	
4	0.009	854430	Insulated electric conductors: ignition wiring sets and other wiring sets of a kind used in	
5	0.007	271111	Petroleum gases and other gaseous hydrocarbons: liquefied, natural gas	

「パーソナルコンピュータ」部門への需要				
Rank	Volume (m-yen)	HS92 code	Commodity name	
1	1.024	847120	Data processing machines: digital automatic, containing in the same housing at least a central processing unit and input and output unit, whether or not combined	
2	0.496	847191	Digital processing units: whether or not presented with the rest of a system, which may contain in the same housing one or two of the following: storage units, input units, output units	
3	0.338	847330	Machines: parts and accessories of automatic data processing, magnetic or optical readers, digital processing units	
4	0.038	854219	Electronic circuits: monolithic integrated, other than digital	
5	0.016	852990	Reception and transmission apparatus: for use with the apparatus of heading no. 8525 to 8528, excluding aerials and aerial reflectors	

(3) 人工知能社会においては需要の高まりが予想される、例えば「電子計算機」部門に対する百万円の需要は、国内サプライチェーンを通じて表 1 の輸入品が輸入額の大きい上位 5 つの貿易商品として同定された。具体的には、「HS847191: デジタル処理ユニット」, 「HS847330: 自動データ処理の部品および付属品、磁気または光学リーダー」, 「HS854219: 電子回路」, 「HS852990: 受信・送信装置」, 「HS853400: 回路: プリント」である。「ロボット」部門への需要では、電子回路や機械器具、絶縁電導体などの輸入依存があり、「電子計算機」と同様に金属含有製品が上位に含まれた。「パーソナルコンピュータ」部門は、データ処理機器やユニットの輸入が上位となり、より部品や素材よりもより製品輸入が多い特徴があった。

(4) 表 1 に示した主要輸入品に関して、2050 年までの世界貿易量 (重量ベース) の変化を GHG 排出量のシナリオに応じて予測した結果を図 2 に示す。気候 2°C 目標に向

かう場合、多くの製品が貿易量の低減または現状維持の経路を進むため、資源や製品を高効率な利用を同時に展開することが人工社会技術の普及に肝要であることを示唆する。

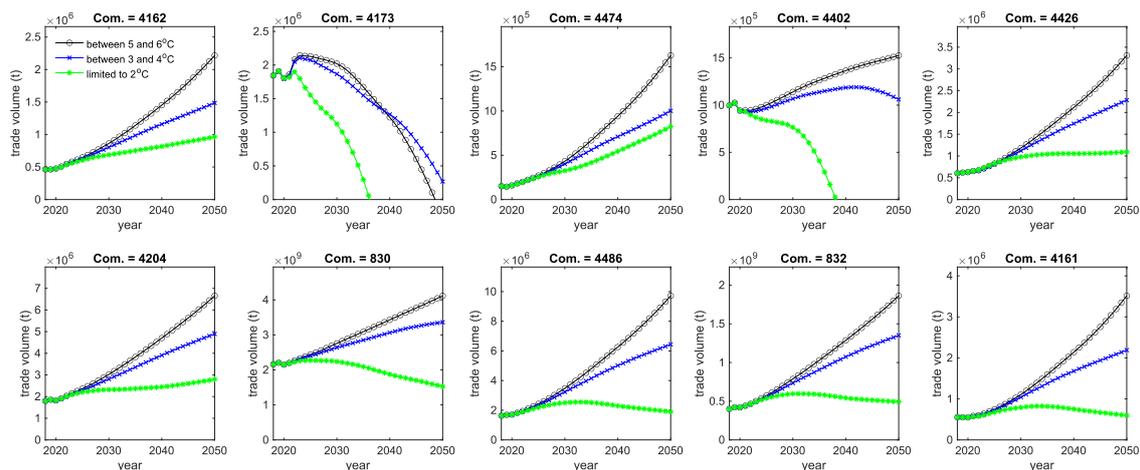


図 2：人工知能に関連産業が直接間接に必要とする主輸入品目の世界貿易量の将来シナリオ；商品番号 (Com. =) が示す HS コードは以下の通り 4162 (HS847191), 4173 (HS847330), 4474 (HS854219), 4402 (HS852990), 4426 (HS853400), 4204 (HS847989), 830 (HS270900), 4486 (HS854430), 832 (HS271111), 4161 (HS847120)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Watari Takuma, Nansai Keisuke, Nakajima Kenichi	4. 巻 155
2. 論文標題 Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 104669 ~ 104669
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.resconrec.2019.104669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nansai Keisuke, Kondo Yasushi, Giurco Damien, Sussman David, Nakajima Kenichi, Kagawa Shigemi, Takayanagi Wataru, Shigetomi Yosuke, Tohno Susumu	4. 巻 149
2. 論文標題 Nexus between economy-wide metal inputs and the deterioration of sustainable development goals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 12 ~ 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.resconrec.2019.05.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Watari Takuma, Nansai Keisuke, Nakajima Kenichi	4. 巻 164
2. 論文標題 Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 105107 ~ 105107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.resconrec.2020.105107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryoko Morioka, Koji Tsuda, Kenichi Nakajima, Keisuke Nansai
2. 発表標題 Estimating global material trade based on the future global warming scenarios
3. 学会等名 10th ISIE conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Nansai, Takako Wakiyama, Manfred Lenzen
2. 発表標題 Global supply risk of critical metals in regional economy in Japan
3. 学会等名 The 13th International Conference of EcoBalance (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中島 謙一 (Nakajima Kenichi)  (90400457)	国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・主任研究員  (82101)	
研究分担者	森岡 涼子 (Morioka Ryoko)  (90415323)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業情報研究センター・主任研究員  (82111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------