

資源パラドックス問題の解決に向けた 「関与物質総量データベース」の構築

立命館大学 理工学部 教授 山末 英嗣

研究背景

グリーンイノベーションという言葉がある。これはあらゆる科学技術を用いて変革をうみ、世界的な課題である環境問題に対する取り組みを意味する。多くの研究者や企業がグリーンイノベーションの創発に取り組んでいるが、その中には、脱炭素・脱物質を実現するために過剰に「資源」を投入してしまうという現象が少なからず見られる。申請者はこの問題を「資源パラドックス問題」として定義している。

資源パラドックス問題を解決するためには、種々の素材、製品について二酸化炭素排出係数（や地球温暖化係数等）のデータベースを整備するだけでなく、「資源強度」に関するデータベースを整備しなければならない。前者については、IPCC国連気候変動に関する政府間パネルは130カ国以上からの450名超の代表執筆者・800名超の執筆協力者による寄稿、および2500名以上の専門家が関わるほどの規模になっている。一方、資源に関してはUNEP国際資源パネルが代表であるが、専門家30名程度のパネルメンバーと20を超える各国政府やEC、OECD、UNEPなどの国際的な機関からなる運営委員会で構成されているに過ぎず、明らかに規模は小さい。その結果、多くグリーンイノベーションについて、多くの消費者・ステークホルダー・企業・政府等が「炭素制約を解決するために、資源をいくらでも投入していいのか？」といった問題意識をときおり思い浮かべるものの、それを定量的に表すような指標も無いことから、現実には具体的な解決策を出すどころか、自力で問題の程度を把握することすらできない状態である。

このような状況を受け、申請者は「資源消費」を採掘活動量という視点から評価できる「関与物質総量 (Total Material Requirement, TMR)」という指標に注目し、10年以上にわたって継続してデータベースの構築を進めてきた。その結果、「金属」を中心とする素材のデータはある程度整備され、これらを多用する製品についての資源パラドックス問題について可視化することに成功してきた。一方、セラミックスと行った無機材料や樹脂といった有機材料については、その整備が不十分であるのが現状である。そこで、本研究では、無機材料や有機材料、さらにはそれらの製造に関わる間接投入物質・エネルギーについて、関与物質総量データベースを構築・整備することを目的とする。具体的には、研究ではアルミニウム合金、合成樹脂において、TMRを推算したため、その結果について報告する。

研究手法

評価指標

本研究では採掘活動量を定量化する必要があるため、その指標として関与物質総量(TMR, Total Material Requirement)を用いた。TMRとは、資源使用量を評価する指標の1つであり、直接物質投入量や間接物質投入量だけでなく、採掘活動に伴う「ずり」などの隠れた物質フロー量を考

慮しており、採掘活動量を定量化することが可能である 5).

重さを始めとした機能単位あたりの TMR を TMR 係数と表現する。出力製品の TMR 係数と重量をそれぞれ T_y と M_y 、投入資材の TMR 係数と重量をそれぞれ T_x と M_x すると、TMR 係数は以下の式で表すことができる。

$$T_y = \frac{\sum(T_x \times M_x)}{M_y} + 1$$

評価対象

本研究ではアルミニウム合金と合成樹脂について評価を行った。アルミニウム合金の種類は、5000系から18種、6000系から12種、7000系から11種である。合成樹脂については、ポリプロピレン、塩化ビニル樹脂、低密度ポリエチレン、ポリスチレン、高密度ポリエチレン、ポリエチレンテレフタレート、ポリカーボネート、フェノール樹脂、ポリアミド系樹脂、ポリビニルアルコール、ウレタンフォーム、メタクリル樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、ポリブチレンテレフタレート、ポリアセタール、メラミン樹脂、アルキド樹脂、ユリア樹脂、ポリフェニレンサルファイド、ふっ素樹脂の 21 種類を本研究の研究対象とした。

結果および考察

アルミニウム合金

アルミニウムの TMR において 7~8 割を占めるのが電力であることが分かった。また、輸送も無視できない要因であることが分かった。特に、自国での陸上輸送の距離が長いロシアに関して特に大きな影響が出ていることが分かった。アルミニウム合金の TMR を算出するために、5ヶ国の純アルミニウムの輸入割合から TMR 係数の加重平均を取り、純アルミニウムの TMR 係数を 76.5[kg-TMR/kg] と決定した。

なお、原田らでは純アルミニウムの TMR 係数は 48(kg-TMR/kg) とされていた。この値と本研究の純アルミニウムの概算値に差が出るのは、既存研究では水力発電の TMR 係数を 0 としているからである。現代のアルミニウム製錬は、カーボンニュートラル実現に向けて水力発電の割合がより増していくことも考慮すると、これは無視できないフローであるため、本研究で得られた電源構成に関する値はより精度を高める必要があることも分かった。

5000系の算出結果を下図に示す。5000系のアルミニウム合金は、全体的に Mg の割合によって変動する。特に、Mg が 4.5% 以上含まれる、「5056」「5082」「5182」に関しては、TMR 係数の値が 78[kg-TMR/kg] を超えることが分かった。しかし、図4を見ると分かるように、今回選択した 5000系の合金18種に関しては、ほとんど TMR 係数の値が変わらないことが分かった。

6000系の算出結果を下図に示す。6000系のアルミニウム合金は、合金成分分割合のうち 98.6% 以上純アルミニウムが含まれているものがほとんどである。つまり、6000系の TMR 係数は純アルミニウムに依存していると言える。実際に、図6を見ると分かるように、今回選択した 6000系の合金12種はほとんど純アルミニウムと変わらない値を取る事がわかった。

7000系の算出結果グラフは以下の図8、拡大図が図9である。7000系のアルミニウム合金は、純

アルミニウム以外の合金成分が多く含まれている合金が多い。特に、Znが5.6%以上かつCuが1.5%以上含まれる、「7010」「7049A」「7050」「7075」「7475」「7178」はTMR係数が80[kg-TMR/kg]を超える値を取ることが分かった。7000系は他の合金に比べるとばらつきが強く見られる。この要因は銅のTMR係数が高いからだと考えられる。つまり、銅の含有量が多いほどTMR係数が高い値になるということである。

合成樹脂

21種類の合成樹脂のTMR係数は大きなばらつきがあり、熱可塑性樹脂に分類されるポリアミド系樹脂、ポリカーボネート、ふっ素樹脂のTMR係数が突出して大きいことがわかった。ここで、ポリアミド系樹脂の生産には、TMR係数が大きい芳香族化合物を多く必要とする。また、ポリカーボネートの生産には、TMR係数が大きいビスフェノールAを多く必要とする。さらにふっ素樹脂の生産には、多くの一般炭の燃焼エネルギーと石油系炭化水素ガスの燃焼エネルギーを必要とする。これらが上記の合成樹脂のTMR係数が大きい理由である。

合成樹脂の生産における温室効果ガス排出量と資源使用量の関係を分析するため、GWPとTMR係数との関係性についても調査した。その結果、GWPとTMRはやや強い正の相関（相関係数： $r = 0.763$ ）を持つことがわかった。しかし、ポリアセタールとポリフェニレンサルファイドなど、GWPは同程度でありながらTMR係数は2倍以上の差がある合成樹脂も存在した。また、フェノール樹脂とメラミン樹脂など、TMR係数は同程度でありながらGWPは2倍以上の差がある合成樹脂もあった。このGWPとTMRの明確な差は、合成樹脂の生産における温室効果ガス排出量と資源使用量の違いを示しており、資源パラドックス問題が生じる主因となっている。

全合成樹脂の国内年間生産量の約七割を占め5大汎用樹脂と呼ばれるポリプロピレン、塩化ビニル樹脂、低密度ポリエチレン、ポリスチレン、高密度ポリエチレンを始めとした国内年間生産量が多く需要が大きい合成樹脂は、温室効果ガス排出負荷と比較して資源使用の負荷の方が大きいことがわかった。これらの結果は、各種合成樹脂の生産において、GWPだけではなくTMRも評価することが重要であることを示している。