

国際貿易に伴う世界および日本のリンフロー

松八重一代*・長坂 徹也

すべての植物は、土壌中からさまざまな養分を摂取して生長するが、いつも土壌中に十分な量の養分が含まれているとは限らない。特に窒素、カリウムとリンは、植物の生長に相対的に多く必要とされる元素であるが、それらは土壌中に存在する養分だけでは不足しがちである。そのため、農業ではこれらの元素を肥料として補い、農作物を生産している。リンは、窒素とカリウムとともに食糧の生産に欠かすことのできない肥料成分である。

近年、農業分野に限らず工業分野においてもリンの需要は高まっており、洗剤、消火剤、食物添加剤、触媒や金属の表面処理剤など、さまざまな製品にリンが使用されている。このように、リンは農業生産のほかにも、人間生活のさまざまな面で必要不可欠な元素となっている。しかし今、ほぼすべてのリン製品の原料となるリン鉱石は枯渇傾向にあり、世界中でリン資源の需給が逼迫してきている¹⁻²⁾。

リン鉱石は、主として肥料生産のための原料として世界中で取引されており、2009年には世界全体でおよそ1億5800万トンのリン鉱石が産出されている。しかし、リン鉱石の埋蔵量は遍在しており、産出量の内訳をみると、中国が約35%(5500万トン)、アメリカが約17%(2700万トン)、モロッコが約15%(2400万トン)と、この上位3か国で7割近くを占めている。一方、日本やEU諸国では、リン鉱石はまったく採掘されていない³⁾。

日本は現在、中国、南アフリカ、モロッコ、ヨルダンからリン鉱石を輸入している。しかし、高品位のリン鉱石の枯渇と産出国による資源の囲い込みなどを背景に、日本のリン鉱石の輸入量は、1993年の140万トンから2008年には77万トンまで減少しており、鉱石1トンあたりの価格も2倍以上に高騰している⁴⁾。

今後、世界人口の増加やバイオ燃料の普及などにより、さらなるリン肥料の需要増加が見込まれることから、わが国にとってリン資源を安定的に確保することは、ますます難しくなるものと思われる。リン資源を極力他国からの輸入に頼らず、日本国内での安定供給を図るためには、国内で消費されるリン資源の有効利用や再利用するための技術開発を推進する必要がある。

一方、リン鉱石の産出国においては、リン鉱石採掘時の自然破壊や、鉱山廃水による湖沼などの富栄養化、鉱石自体に随伴する天然放射性物質の問題など、さまざまな環境負荷が発生している。リン鉱石の製錬やリン製品

の製造も、エネルギー消費と環境負荷を伴うため、リン資源を再利用することは、採掘、製錬やリン製品製造などともなう、エネルギー消費や環境負荷を低減できる可能性もある。

本稿では、マテリアルフロー分析(MFA)の手法を用いて、世界のリンフローを明らかにするとともに、日本の国内経済活動を支えるリンフローと隠れたリン鉱石需要量について解説する。

世界のリンフロー

まず、国際貿易統計をもとに、世界のリンフローを推計する。対象国は、国際貿易統計BACI⁵⁾の部門分類に準拠した231か国、対象年は2005年として、リンの商品別国別物質フローを推計した。また、対象商品については、HSコードの分類から抽出し、バイオマス系256部門、非バイオマス系51部門の計307部門について推計を行った。なお紙面の都合上、本稿では食料ならびにリン鉱石の国際貿易に着目して、それに随伴するリンのフローについて述べる。

算出したリンの商品別国別物質フローの推計値をもとに、大陸・地域間ごとのリンフロー図を作成した。図1は、食料の貿易に随伴したリンのフロー図を示す。また、図2はリン鉱石の貿易に随伴するリンのフローである。食料に随伴するリンのフローの合計値は、約210万トン-Pであり、全商品の取引に随伴するリンのフロー(約1900万トン-P)の約12%を占める。図1から、南北アメリカ、オセアニアおよびヨーロッパから食料の貿易に随伴して輸出されるリン量が大きいがわかる。また図2より、モロッコ、チュニジアや南アフリカなどのリン鉱石産出国がアフリカ大陸外へリン鉱石を輸出している一方で、他のアフリカ諸国はこれを購入する経済力に乏しく、大陸内での消費が少ないことが読み取れる。

リン鉱石として地中から採掘され経済圏に入ったリンは、リン酸などに加工された後、肥料として農業生産のために消費される。ここで示したフローは、年間の供給量と需要量とが必ずしもバランスしているものではないが、ヨーロッパはリン鉱石においても食料においても、リンを一方向的に消費している地域であることがわかる。

図3は、食品・バイオマスの取引に随伴するリンの消費量が大きい上位5か国における、リン総消費量と人口一人あたりの消費量を示したものである。リン総消費量

*著者紹介 東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻(准教授) E-mail: matsubae@m.tohoku.ac.jp

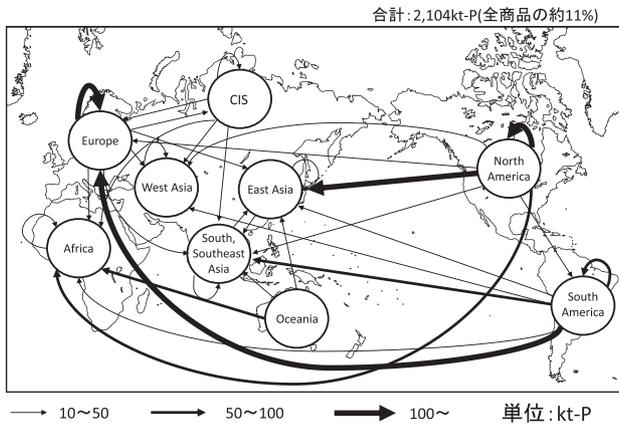


図1. 食料の貿易に伴うリンのフロー (ktは千トン)

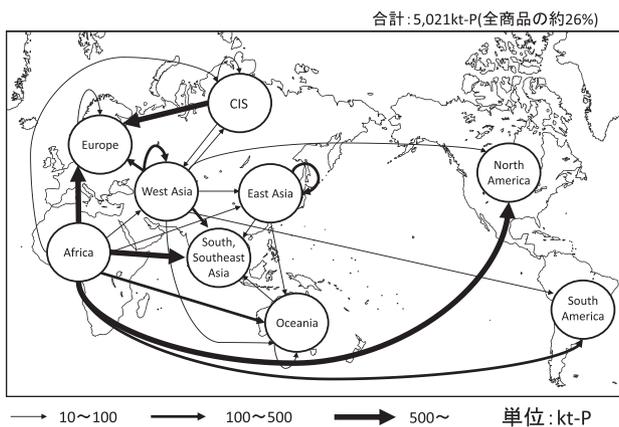


図2. リン鉱石の貿易に伴うリンのフロー (ktは千トン)

については、中国、アメリカついでインドネシアとインドが大きな数値を示しているが、人口一人あたりの消費量を見ると、中国とインドは世界の平均値よりも少なく、アメリカやインドネシアはそれよりも高いことがわかる。

今後、アジアにおける経済発展と生活水準の向上により、アジアにおける一人あたりのリン消費量が增大することが予想される。中国やインドにおける人口一人あたりのリン消費量がアメリカ並みに増大する場合、世界におけるリン資源の需給逼迫はますます深刻なものになる恐れがある。

隠れたリンのフロー

人口一人あたりのリン消費量は、その国の食生活、経済構造や貿易依存度により大きく異なる。本節では、バーチャルリン鉱石需要量 (virtual phosphorus ore requirement, VPOR) という概念を導入して、わが国の食糧消費を支えるリン鉱石の隠れた需要について考えてみよう。VPORは、農作物が生産されるまでに発生する損

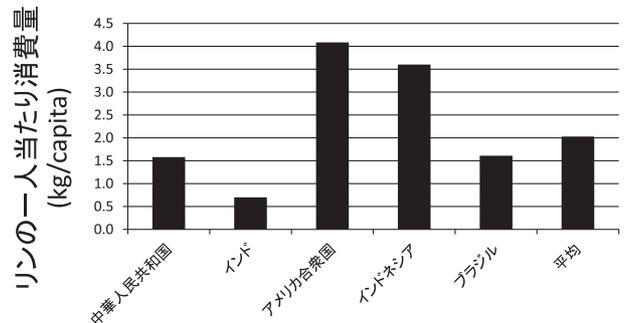
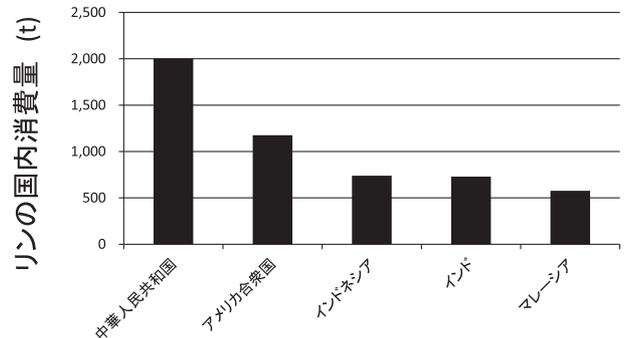


図3. リン消費量の多いトップ5ヶ国の総リン消費量と国民一人あたりのリン消費量の比較

失分も含めたリン鉱石の需要量を示すことになる⁶⁾。

農業生産において、肥料は植物の生育のために投入される。しかし、投入されたリンのすべてが農作物に移行するわけではなく、農地の土壌や周辺水域に拡散して失われる部分がある。また、農作物に利用されても、非可食部として農地に残されたり、食品加工の過程で残渣として廃棄されたりする部分もある。これまで、リンのマテリアルフロー分析では、輸入食糧を生産する際に発生するこれらの損失分はあまり考慮されず、国内に持ち込まれたリン量のみが勘定されてきた。VPORという概念を導入することにより、隠れたリン鉱石需要量を推算することができる。

隠れたリンのフローを考慮した日本のリン需要

2008年における日本の食料自給率は、熱量ベースで約40%である⁷⁾。野菜、卵、乳製品といった品目の重量ベースでの自給率は比較的高く、米の自給率はほぼ100%である。その一方で、大豆や小麦、油脂植物の自給率が低いことが、熱量ベースでの自給率を引き下げる要因となっている。

食品輸入量の増大は、VPORでみたリン鉱石の輸入量を増加させる。2005年に日本は、418万トンの大豆と1666万トンのとうもろこしを海外から輸入している。これらの農作物は、海外で土地、水や肥料を使って生産

されたものである。大豆やトウモロコシは、食料としての消費に加えて、家畜飼料としても消費されており、国内での畜産物の生産も、間接的に海外でのリン消費を誘発している。

一般に、肥料投入原単位は国により異なるが、計算を容易にするため、日本と海外における肥料投入原単位に差はないものと仮定すると、輸入農作物を生産するための隠れたリン鉱石需要量は、表1のように計算できる。2005年に日本は、270万トンの畜産物（肉類）と2694万トンの穀類を輸入している。その背後に隠れたリン鉱石需要量は、穀物生産については約12万トン、畜産物については約15万トンである。穀物の輸入量は、畜産物のほぼ10倍であるにも関わらず、隠れたリン鉱石需要量は両者で同じ程度と推算される。果物の輸入も、無視できない量の隠れたリン鉱石需要量を引き起している。

2005年の日本における食糧消費を、VPORの視点から分析した結果を図4にまとめた。VPORの視点から見ると、日本の年間リン鉱石需要総量は616万トンであり、リン鉱石の直接輸入量77万トンの約8倍もある。また、輸入食飼料生産に関わるリン鉱石需要量（366万トン）は、国内肥料生産に関わるリン鉱石需要量（374万トン）とほぼ同量であることがわかる。最終的に、「食べる」部分に含まれるリンのリン鉱石換算量は約76万トンで

表1. 農作物の海外からの輸入量と隠れたリン需要（単位kt）

品目	輸入量	隠れたリン鉱石需要量
穀類	26,942	124.14
芋類	892	4.66
豆類	4482	77.38
野菜	3367	24.38
果物	5437	101.72
肉類	2703	147.34

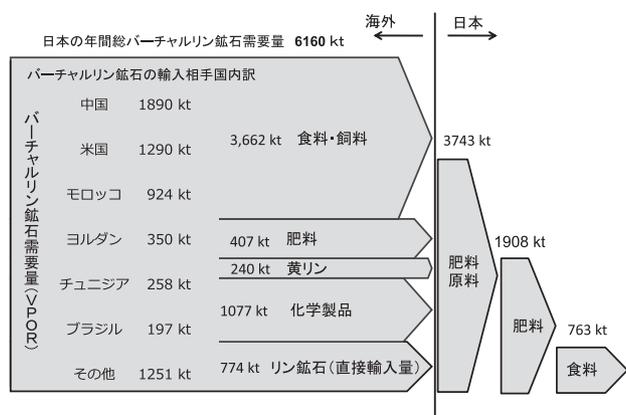


図4. わが国の隠れたリン鉱石需要量（VPOR）の内訳

あり、これはVPORの視点から見た年間リン鉱石総需要量の約12%に過ぎない。

以上のように、日本は、年間616万トンの鉱石を直接または間接的に必要としており、そのうち366万トンのリン鉱石が輸入農作物の背後で消費されている。図4の左側に、日本が直接または間接的に必要とする616万トンのリン鉱石がどこから得ているかを示した。図4から、VPORを考慮したリン鉱石の輸入量は、中国からがもっとも多く、次に米国およびモロッコからが多い。現在、米国からのリン鉱石そのものの輸入はないが、隠れたリン鉱石需要量で見ると、全体の約20%が米国から持ち込まれていることがわかる。

おわりに

人口の増加は、食糧需要を増大させ、食糧生産に必要なリン資源の消費を増加させる。また、経済成長により食生活が豊かになると、より付加価値の高い食品に嗜好が移ることも知られている。今後、アジアを中心とした人口の増加と経済の成長により、リン需要は指数的に増加する可能性もある。

エネルギー作物栽培量の増加も、リン資源の消費を増やす一因となっている。近年のエネルギー需要の増加、原油価格の高騰や地球温暖化などの対策の一環として、各国でバイオ燃料の利用促進政策がとられている。バイオ燃料は、燃焼時に発生するCO₂量が植物の生長時に吸収されたCO₂量と相殺するため、カーボンニュートラルであるという点が強調されている。しかし、その栽培には広大な農地、大量の淡水やリンをはじめとする栄養分が必要であり、森林伐採、水や肥料の大量消費などの問題も引き起こす。たとえ新たに森林を切り開いて農地を造成しても、やがては地力が衰え肥料の投入が必要になるため、化学肥料の需要は今後さらに高まることが予想される。リン資源の需給逼迫に対処するためには、社会に眠る未利用のリン資源に着目して、リサイクルを含めたリンの持続可能な利用方法を考える必要がある。

本研究は環境省研究総合推進費補助金〔課題番号：K2307, K2404〕ならびに科研費24651035で行われたものである。ここに付記して謝意を示したい。

文 献

- 1) Abelson, P. H.: *Science*, **283**, 2015 (1999).
- 2) Vaccari, D. A.: *Scientific American*, **300** (6), 54 (2009).
- 3) http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/
- 4) <http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm>
- 5) <http://www.cepii.fr/anglaisgraph/bdd/baci.htm>
- 6) Matsubae, K. et al.: *Chemosphere*, **84**, 767 (2011).
- 7) 農林水産省:ポケット肥料要覧2008, 農林統計協会 (2009).