

リン資源の国内におけるフローとリサイクルの可能性について

The estimation of the flow on "Phosphorus" in Japan and a study on the recycling system of Phosphorus

原圭史郎^{*} 森下裕一^{*} 新田見匡^{*} 味埜俊^{*} 佐藤弘泰^{*}

Keishiro HARA, Yuichi MORISHITA, Tadashi NITTAMI, Takashi MINO, Hiroyasu SATO

ABSTRACT: "Phosphorus", which is used in the various ways, such as chemical industries is indispensable for the human life. A small amount of Phosphorus is produced in Japan, so the fact is that we mostly rely on imported Phosphorus under present condition. Phosphorus is estimated to be exhausted in the future. Therefore, to prepare for the future, it is necessary to construct the system under which Phosphorus can be provided without import to meet the domestic demand. This paper presents the flow of Phosphorus within Japan, which was analyzed by collecting some related data and figuring out the data. A recycling system to circulate Phosphorus effectively in Japan, including the technical perspective of withdrawing Phosphorus is proposed based on the estimated flow of Phosphorus and social aspects.

Keywords: Phosphorus, Material flow, Recycle

1. 研究の背景と目的

リンは、人間の生活や活動を維持するためには欠かすことのできない資源であり、主に工業部門や農業部門において使用されている。リン鉱石の生産は、世界で年間1億3800万t（1995年）であるが、わが国においてはほとんど生産されておらず、需要のほとんどを輸入に頼っているのが現状である。このリンは枯渇性の資源であるため、将来起こるであろうリン資源の枯渇に備え、できる限り国内だけでリンの需要をまかなえるような仕組みを作っていく必要があると思われる。そこで本研究では、国内におけるリンのフローを概算し、現状を把握した上で、排水などからのリンの回収、再利用を含めたリサイクルシステムの導入を考えることによって、リン資源の国内での循環利用の可能性について検討してみた。

2. 研究の枠組み

我々は、まずリンのフロー作成に取り組んだ。リンフロー作成にあたっては、海外からのリンの輸入を含めて、対象を国内に限定し、1990年近傍で、リンの収支に関わる様々なデータを収集し解析を行った。海外から国内に持ち込まれるリンの形態としては、量の大きさから、「リン鉱石」と「肥料」が重要であると判断して、この2つを扱った。国内では、耕作や家畜の飼育に関わる「農業・畜産系」、人間生活一般に関わる「生活系」、化学工業あるいは食品工業などの生産活動に関わる「工業系」の3つの系において、それぞれの用途においてリンが消費されるものと簡略化して考え、それぞれの系でのリンの消費量および、消費後の排水中や廃棄物中のリン量を概算した。さらに、消費後にそれぞれの系から排出されるリンを、ど

^{*} 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
school of frontier science, University of Tokyo

Department of Environmental studies, Graduate

のようにリサイクルの流れに組み込み、再利用するかということについて、回収技術の側面にも言及しながら、国内におけるリン循環利用の可能性を検討してみた。本研究では、国内での大まかなリンの流れを把握して、消費後に排水などとして出てくるリンを回収して、再利用する、というリサイクルの流れに焦点をあてており、現在海外からの輸入に頼っている「リン鉱石」、「肥料」の需要を国内でまかなう方策を問題にしているため、付加的に含まれるリン、例えば農業部門に輸入される食飼料中のリン、土壌中のリンなどの細かいフローについては省略した。

3. 国内におけるリンのフロー図

2. の研究の枠組みで述べたとおり、国内におけるリンの利用および廃棄の実態を耕作や家畜の飼育に携わる『農業・畜産系』、人間生活を表す『生活系』、化学工業や食品工業の活動を表す『工業系』の三つの系に分けて把握し、図 1 のフロー図を作成した。図中の数値は 1990 年近傍の一年間に各系で使用、廃棄された物質中に含まれるリンの量を P ベースで概算したものである。

図中で国外から国内へ入る矢印のうち、工業系へのはリン鉱石中のリン、農業・畜産系へのは輸入肥料中のリンを表す。また国内における工業系から農業系への矢印は、工業系で生産された無機肥料中のリンを表す。一方廃棄の流れを表す矢印については、工業系、生活系からのものは排水中のリンの流れを、農業・畜産系からのものは固形廃棄物を含む排水中のリンの流れを表す。

図 1 の作成、検討の結果、将来リン資源が枯渇することを想定した際、現在の生活レベルを維持するためには、第一次産業（農業・畜産系）を支えるための肥料用のリンと、様々な化学製品や食料製品を生産するために、工業系で必要とされるリン酸塩としてのリンとを、国内におけるリサイクルシステムの形成によって、賄っていくことが重要であるとわかった。

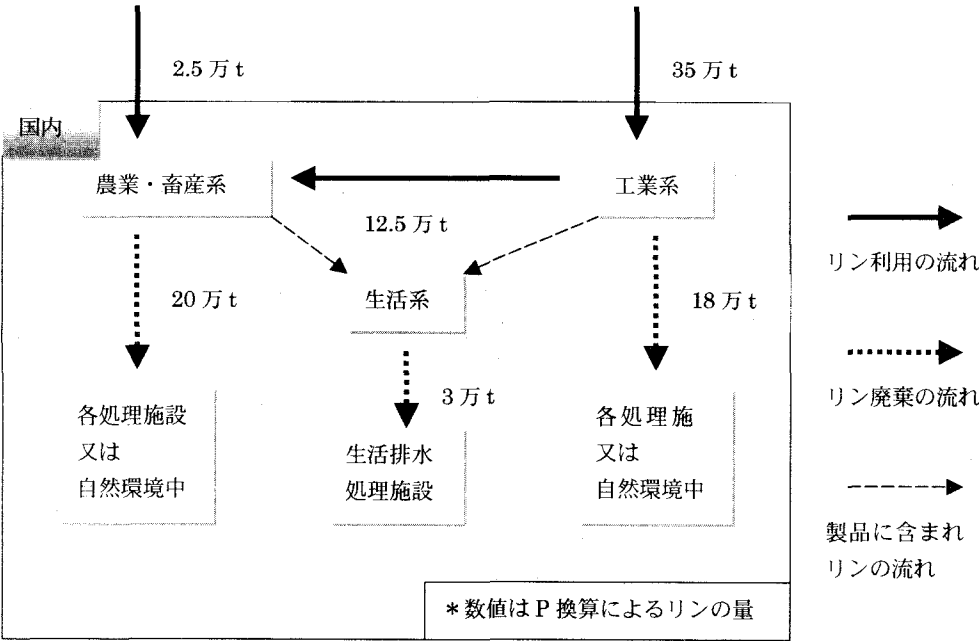


図 1 国内におけるリンのフロー図

なお4. のリン回収技術で述べるように、固形廃棄物からは有機態のリンしか回収できず、有機態リンの用途は肥料だけなので、後述する考察の結果、農業・畜産系以外の固形廃棄物は回収する価値がないとして矢印を省いた。また回収が困難と思われる浄化槽のような小規模の処理施設への排水の流れも無視した。

4 リンの回収技術について

4.1 リンの有機態での回収

リンの有機態での回収、再利用の方法としては、コンポスト化による緑農地利用が一般的に用いられる。コンポストとは汚泥にオガクズやモミガラを加えるか、あるいは汚泥のみを発酵させて堆肥化したものである。コンポストの性状としては、肥料取締法（農水省、1976 年）に基づき、幾つかのクリアしなければならない条件がある。

- ①金属等有害物質含有量が基準以下であること
- ②病原菌、寄生虫卵、雑草種子を含まないこと
- ③悪臭がなく、取り扱いが容易であること
- ④施用効果が明らかであること

生活排水に含まれるリンの量は、年間の下水处理量に対して含有するリンの比率をかけて算出した結果、年間3万t程度と推定される。今後下水道の普及に伴い、着実に増加するだろう下水汚泥からのリンの回収の方法としてコンポストは有効な方法の1つであると思われるが、現在のところ、コンポスト利用は進んでいるとはいええない状況である。平成2年度の最終処分汚泥総量は約250万tだが、そのうち脱水ケーキが約175万tで全体の7割を占める。コンポストへの転換は約3.5万tで、全体の1.4%を占めるに過ぎない。ただし、コンポスト化せず、脱水ケーキのまま緑農地に還元されている量がある。下水汚泥のコンポスト化にあたって、一番の障害は重金属（特にHg）の問題だが、発生源の特定による個別の対策と、技術的な改善が今後期待できる。法的にも、平成11年の肥料取締法の改正により、有害成分を含有するおそれのある汚泥などを原料とした肥料の利用を促進する環境が整備されつつある。性状の問題を考えると、下水汚泥は窒素、リン酸の含有率は十分だが、カリはきわめて少ない。この点は適切な副資材の添加により良好な性能のコンポストをつくることができる。近年、循環型社会の構築に向けて、リサイクルの観点から諸産業の連携が進められており、家畜糞尿や食品産業系有機廃棄物等との混合コンポストが検討されている。

4.2 リンの無機態での回収

MAP 法

MAP 法とは、嫌気好気法の水処理プロセスと組み合わせて用いる汚泥系編変流対策であり、リン酸イオン、アンモニウムイオン、及び、マグネシウムイオンを等モルにして、pH をアルカリ側に調整してMAP(リン酸アンモニウムマグネシウム)を生成する方法である。MAP の肥料としての性能は良好で、福岡市で行われた各種施用試験の結果、既存のリン酸肥料と同等の効果があり、リン酸資材として用いることが可能であると判明している。MAP 法は高濃度の排水を処理するのに適している。工業排水は高濃度のリンを含んでおり、上位5業種をみると、数百～数千mg/l のリンを含んでいるため、MAP 法の適用が期待できる。

イオン交換法

イオン交換法は、イオン交換反応によりリン酸イオンを交換体内部に濃縮し、リンを選択的に除去する処理技術である。イオン交換法は余剰汚泥が発生しない、リン除去能力が高く設置面積が小さい等の優れた特徴をもち、効果的にリンを除去できる処理法であると考えられる。さらに除去したリンをイオン交換体より脱着して回収することができ、また同時にイオン交換体自体も再生して再利用できる利点がある。ただし、イオン交換法において、最も研究され実用性の高いとされる活性アルミナ系吸着剤を使用する場合、その適

用範囲は水中のリン濃度が～10mg/l であり、低濃度の排水を対象とした処理法であるといえる。

5. 考察

以上の結果を踏まえて、理想的だと思われるリンリサイクルシステムについて考察してみた。

5.1 農業・畜産系廃棄物からの回収について

図1の説明の際にも触れたとおり、農業・畜産系からの廃棄物は固形廃棄物を含んだ排水という形で回収される。これからリンを回収するとなると、4の技術で述べたとおりコンポスト（有機態リン）としての回収となる。

コンポストについては様々な問題点が指摘されており、特に重金属や輸送コストの問題は重大だが、農業・畜産系の廃棄物に含まれる重金属の量が微量であることと、農業・畜産系の回収施設は還元先の農地に近いということから、農業・畜産系内におけるコンポストの還元は理想的である。この還元の流れを図2に矢印で示した。

5.2 工業系排水からの回収について

工業排水中に含まれるリンの約75%は特定の5業種からのもので、そのリン濃度は数百～数千 mg/l である。4の技術で述べたとおり、通常この濃度の排水からは造粒脱リン法によってリンが回収され、回収されたリンの形態はMAPである。よって工業排水中に含まれる18万tのリンのうち少なくとも13.5万tはMAPとして回収することになる。MAPは肥料としての性状が良好なので、農業・畜産系に還元が適当だと思われる。残りの4.5万tについては低い濃度で排水中に存在すると考えられるため、4の技術で述べたとおり、イオン交換法でリン酸塩として回収することが適当である。こちらは工業系への還元が適当だと思われる。

また排水中からのリン回収は、5.3で述べる生活系排水についても言えることだが、無機態での回収となるため、有機態（コンポスト）の場合に比べ輸送コストが低い。よって系内でしか還元する価値がないといったことはないと考えた。よって図2に示すような流れとした。

5.3 生活系排水からの回収について

下水中に含まれるリンの濃度は数 mg/l であるため、全て4の技術よりイオン交換法によるリン酸塩としての回収が適当だと思われる。よって工業排水からのリン酸と同様、工業系への還元とした。

5.4 リサイクルのバランス

5.1～5.3より図2におけるフローの説明をした。ここでそのリサイクルにより賄えるリンの量についてだが、コンポスト、MAP、リン酸塩それぞれの形態での回収率が仮に100%だとすると、

- ・ 農業・畜産系：20万トン（コンポスト）+13.5万t（MAP）=33.5万t
- ・ 工業系：4.5万t（工業排水からのリン酸塩）+3万t（下水からのリン酸塩）=7.5万t

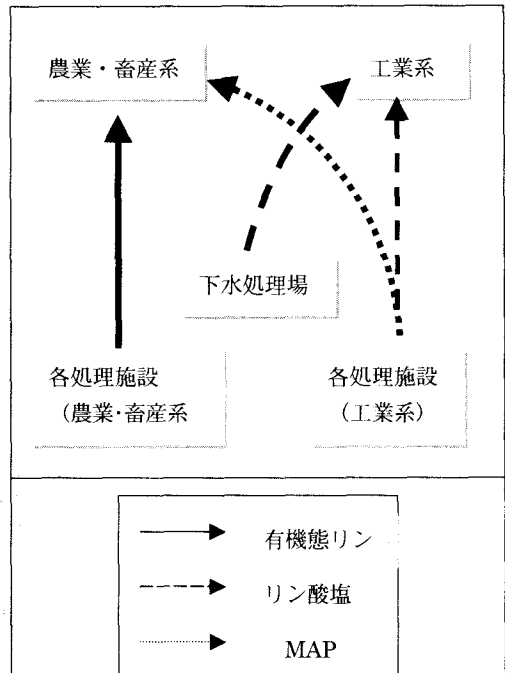


図2 理想的なリンリサイクルのフロー図

といった計算となる。この結果を図1の各系でのリン需要と比較すると、工業系で生産される肥料分を農業系の需要としても、農業系へのリン回収過多となることは明らかである。

リンの回収量としては十分であるはずのこのリサイクルシステムが、農業系への回収に偏ってしまう原因はリンの回収されるリンの形態である。今回の考察では現在実用的であると思われる回収技術から判断して、それぞれの系からの廃棄物中のリンの回収形態を決定したわけだが、今後技術の進歩によりこれらがリサイクルシステムに都合のよい形態で回収されるようになれば、国内でのリンの循環も可能だといえる。

6. 論点

将来のリン資源の枯渇に備えて、国内におけるリン再利用の最適化を検討してみたい。整理すると、再利用されるリンの需要先としては、前述したように大きくわけて農業・畜産系と工業系を考えることになる。農業・畜産系に再利用する場合、肥料として緑農地に還元することが主となる。肥料の性状を考えると、リンを有機態で投与するか、無機態で投与するかという選択がある。工業系に再利用する場合、リンは無機態で供給されなければならない、リン酸塩の形でリサイクルされることになるだろう。原則的には回収リンの運搬コストを下げるためにも、需要と供給が近接していることが望ましいと考えられる。

リンを有機態で供給する場合、家畜糞尿や脱水汚泥を直接緑農地に還元するのではなく、コンポスト化して性状の安定と性能の向上が考慮される必要がある。生活排水処理汚泥のコンポストについては、従来、様々な問題点が指摘されており、特に重金属の問題は大きい。こうした問題をクリアして競争力の高いコンポストをつくることは可能である。そのための条件としては、地域ごとに諸産業から出る廃棄物をベストミックスして、複合コンポストの可能性を追求することが挙げられる。ベストミックスの戦略というのは、単独では質的、量的に肥料としての十分な条件を満たせないものを、それぞれの持つ長所を適切に組み合わせることで解決していこうという発想である。家畜糞尿を主とする畜産系廃棄物もまた同様である。

リンを無機態で供給する場合、減量化の結果、輸送にかかるコストが軽減されるため、空間的に需要先の選択の幅は広がることも考えられる。問題としては、リン回収施設が安定して稼働できるようにするための質の高いリン供給源の確保が挙げられる。リン回収の技術としてはMAP法やイオン交換法（前出）などが選択可能である。リン酸塩として回収されたリンは化学工業系へ供給されうる。しかし、化学工業系の排水からはMAPでの回収が現実的のため、当面の間、農業・畜産系に還元される方向でリサイクルを進めていくことになるだろう。

下水汚泥からのリン回収、リサイクルのシステムとしては、有機で回収する方法と、無機で回収する方法がどちらも考えられる。先に述べたように、複合コンポストによる性状向上に期待する向きは大きい。今後リンのリサイクルが進めば、農業・畜産系における必要なリンの需要は十分に満たされることが明らかとなっている。また、水谷（1998）の指摘にあるように、土壌リンの植物吸収促進を図り、リンの土壌への固定を低減すれば、投与するリンの投与量は減り、リンの有効活用を図ることができる。こうした点から、リンの供給先として緑農地と限定したシステム構築は立ち行かなくなる恐れが生じる。都市部の下水処理施設や、食品工業系排水の処理施設では、リンをイオン交換法などにより、無機態で回収するシステムの構築が検討されるべきだろう。

【参考文献】

日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説, pp171-189(1993)

日本下水道協会：下水道統計(行政) 1997年度

農林統計協会：農業白書 平成10年度

農林水産省肥料機械課：ポケット肥料要覧 1998年度, 1996年度

小田部広男：リン資源の現在と未来,Gypsum&Lime, No.210, pp49-58(1987)

板坂ら：水中低濃度リンの除去・回収用吸着剤の開発状況と課題, 水環境学会誌, Vol.41, No.3, pp1995-203(1999)

羽賀清典：家畜ふん尿の農耕地利用, 環境情報科学, pp2-6,(1998)

羽賀清典：農業関連有機性廃棄物のリサイクル, 都市清掃, 第 52 巻, 第 231 号, p12(1999)

牛久保明邦：食品産業廃棄物の処理及び再資源化の現状と課題, 食品工業, pp18-29(1999)

福岡市における MAP の肥料への利用, 下水道協会誌, vol.36 No.437, pp42-46(1999)

川本有洋ら：リン酸イオン高選択性無機層状イオン交換体を用いた排水からのリン除去, 水環境学会誌, Vol.22, No.11(1999)

広瀬祐：下水汚泥の農業利用における現状と課題, 用水と廃水, Vol.35 No.11, pp5-13(1993)

村山勝男：排水中のリン除去とリサイクリング, 資源環境対策, Vol.28 No.12(1992)

水谷潤太郎：総窒素・総リン物質循環からみた環境に調和した下水道の可能性, 下水道協会誌, Vol.35 No.424, pp81-96(1998)