

国内下水道からのリサイクル・リン普及の課題

CHALLENGES IN THE DIFFUSION OF RECYCLED PHOSPHORUS FROM SEWAGE SYSTEMS IN JAPAN

佐藤 隼¹・佐藤 俊秀²・仲川 祐司³・林 志洋⁴・松本 頌⁵・城山 英明⁶・
松尾 真紀子⁷・鎗目 雅⁸

¹ 学士 (法学) 東京大学公共政策大学院修士課程 (E-mail: remi_flum@yahoo.co.jp)

² 学士 (工学) 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (E-mail: toshihide@enesys.t.u-tokyo.ac.jp)

³ 学士 (農学) 東京大学公共政策大学院修士課程 (E-mail: veni.vidi.vici.julius@gmail.com)

⁴ 学士 (教養) 東京大学公共政策大学院修士課程 (E-mail: hayasho.com@gmail.com)

⁵ 学士 (法学) 東京大学公共政策大学院修士課程 (E-mail: msmswww@gmail.com)

⁶ 学士 (法学) 東京大学大学院法学政治学研究科教授 (E-mail: siroyama@j.u-tokyo.ac.jp)

⁷ 修士 (国際協力学) 東京大学公共政策大学院

⁸ Ph.D. (Economics and Policy Studies of Technological Change and Innovation)

東京大学公共政策大学院特任准教授 (E-mail: yarimemasa@gmail.com)

リンの下水からのリサイクルは一部自治体で進められているが、まだ全国的に進んでいるとはいえない。本研究ではステークホルダーに聞き取り調査を行い、各ステークホルダー間の問題認識を分析し、普及を進めるための施策を検討した。下水からのリン回収が進まない理由として、大きく次の3つの問題が考えられる。現状ではリサイクルすれば赤字になるというコストの問題、生産量が十分に確保できないという問題、安定的な取引先が必要という販売のノウハウの問題である。他方、閉鎖海の環境保全や循環型社会の構築といった他の政策目的も重要である。今後の施策としては、コスト削減のための技術開発、環境政策目的との同床異夢や一定の量の確保を可能にするための自治体との連携の強化が重要である。

キーワード：リン、リサイクル、下水道、日本、ステークホルダー分析

1. はじめに

1.1. 研究の背景

リンは人間を含め、あらゆる生物の生命活動に必要な不可欠な元素である。例えば、リンは遺伝子情報を子孫へ伝える働きをする DNA の構成要素の一つであり、これがなければ我々の体は DNA を合成することができない。しかし、リンは排泄物を通して常に体の外に排出されるため、我々は日常生活において食事を通してリンを摂取する必要がある。

食料の中のリンは野菜や肉に含まれており、それらは元をたどれば野菜や家畜用飼料を栽培する際に使われる肥料に由来している。肥料中のリンは、堆肥等から賄われるものもあるが、大半が工業的に生産されたリン肥料という形で供給されており、更に遡るとほぼ全てがリン鉱石から抽出されたものである。また、リンは、肥料の他にも、金属の表面処理など幅広い分野で使用されており、工業的にも重要な資源となっている。

しかし、長年の人間による採掘の結果、高品質で低コストのリン鉱石は大きく減少しており、リンの供給は先行きが不透明になっている。実際、状況を危惧した中国

が高い油種関税賦課をしたため実質的な輸出停止状態となり、またその他さまざまな要因もあり、2008年には世界的にリン鉱石の価格が高騰した。リン鉱石の全てを輸入に依存している日本は大きな影響を受けた。このままリン鉱石の採掘を続ければ、いずれは私たちの生活に必要なリンの供給価格が更に上昇し、農業や産業に支障が出かねないと懸念されている。¹⁾

こうした事態を避けるためにも、海外のリン鉱石に極力依存しないリンの生産・消費の仕組みを作ることは日本にとっての急務であると言える。こうした問題意識から、日本では、肥料業界とリサイクル技術の研究者が中心となって、リン資源リサイクル推進協議会が2008年12月18日に設立された。²⁾

1.2. リンの生産・消費・散逸フロー

リンの生産・消費サイクルにおける海外産リン鉱石に対する依存度を減らすには、国内における新たなリンの供給源を確保する必要がある。その為には、今後国内で新たな鉱物資源を発掘することは現実的ではないため、使用後に排出・廃棄されるリンを如何にリサイクルするかが課題となる。このような認識を背景に、特に近年、

日本ではリンのリサイクルの試みが行われてきた。

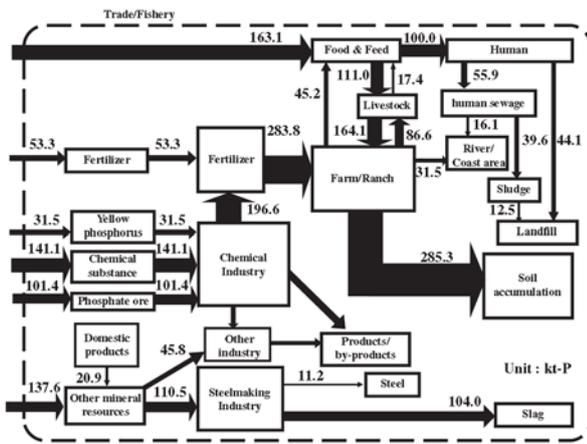


Fig.1 リンの国内マテリアル・フロー (Matsubae 2011 3))

Fig.1 は国内におけるリンのマテリアル・フローをまとめたものであるが、これによれば、国内で使用されたリンは最終的に下水を通して水域に排出されるか、下水汚泥や廃棄物として埋め立てされるか、農地に土壌蓄積されるか、工業廃棄物として環境中に拡散されるか、という4つの形態で環境中に放出される。このうち、現在国内において回収設備の技術開発や実用化が一定程度進められているのは、下水中のリンのリサイクルである。仮に下水中に含まれるリン約40,000トン全てをリサイクルできるとすると、現在輸入している肥料に含まれるリン約53,000トンの4分の3程度に相当する。ただし、現在のところ、一部自治体や企業が自主的に技術開発・運用を行っているのみに留まっており、未だ全国的に普及するには至っていない。

下水からのリンのリサイクルに関しては、既存の先行研究は主に技術的な側面に関するものが中心であり、社会における普及のプロセスにおいてどのような要因が課題・障害として考えられるのかというような点に関しては、特に国内に関してはまだほとんど研究が行われていない状況である。

1.3. 本論文の目的と構成

本論文では、下水中のリンのリサイクルを対象を定め、何故その普及が妨げられているのかを明らかにし、今後に向けた課題を整理する。リンのリサイクル・プロセスに対してステークホルダー分析を行い、⁴⁾その問題認識を可視化して、施策の選択肢のフィージビリティに関する評価を行う。構成としては、第2章において、上記のリンのリサイクル・プロセスに関係のあるステークホルダーを抽出し、各ステークホルダーの概要を整理した上で、それぞれの問題認識を整理する。第3章において、各ステークホルダーの問題認識を比較し、下水中のリン

のリサイクル普及に関する課題を明らかにする。その上で、第4章において将来に向けての施策を幅広い観点から提示し、それぞれの施策のフィージビリティの評価を試みる。

2. ステークホルダーの抽出と聞き取り調査

2.1. 下水道リンのリサイクル・プロセス

下水中のリンをリサイクルする場合は、以下のようなプロセスを経る。

人間等から排出されたリンの多くは、下水道を通じて各自治体の下水処理施設に流れ込む。下水中からリンを取り出すには様々な方式が存在するが、主に下水汚泥の脱水過程における抽出と、汚泥焼却後の灰からの抽出が実用化されている。

このリンの抽出過程は、各自治体の下水処理場が各自設備を設けて生産を行う場合と、抽出設備を持たない自治体から焼却灰を受け取った民間企業がリンの抽出を行う場合とがある。自治体がリンを抽出する場合も、リンが肥料会社に肥料原料として販売され、最終的に農業用肥料として加工された状態で農業現場へと出荷される場合と、自治体によっては肥料会社を経由せずに、ほぼ抽出されたままの状態のリンを農業用肥料として地元へ販売をしている場合もある。

2.2. ステークホルダーの選定と聞き取り調査

下水道からのリン・リサイクルに関係するステークホルダーとして、まず、リン・リサイクルの組織化を主導した肥料業界、リサイクルを実施している自治体、リサイクルを実施している企業、リン回収の新たな技術開発を行っている企業、リンの主要利用者である農業関係者の5つのステークホルダーを設定した。その上で、肥料業界に関しては、企業として関与していたステークホルダーと業界団体として関与していたステークホルダーの2名からヒアリングを行うこととした。自治体に関しては、異なった技術の利用、異なった流通形態の採用という点から、3つの自治体からヒアリングを行うこととした。さらに、農業関係者としては、全国レベルの農協組織、地域レベルの農協組織、個別農家の3つのレベルでヒアリングを行うこととした。

聞き取り対象の個人・団体に対しては、事前に質問事項を送付した上で、実際に現地を訪問してヒアリングを行った。特に、リンのリサイクルの普及を推進する要因は何か、またどのような課題や懸念事項が認識されているのか、各ステークホルダーに対して、大体2-3時間程度の聞き取りを行った。

肥料業界としては、リン資源リサイクル協議会の設立

を主導した日本肥料アンモニア協会及びリン資源リサイクル協議会の設立に関与した肥料メーカー関係者からヒアリングを行った。

自治体レベルでのリサイクル実施者としては、国内でも早くから下水からのリン回収技術を開発・運用しており異なる抽出方法や販売方法を持っている自治体として福岡市と岐阜市、また、岐阜市と同じ技術を利用しながらも回収リンの流通方法に関して岐阜市とは異なる方式を採用する鳥取市から、ヒアリングを行った。

一般の自治体から汚泥焼却灰を引き受けリンのリサイクル回収を行っている企業としては、A社からヒアリングを行った。また、新たなリサイクル技術開発を行っている企業として、B社からヒアリングを行った。

農業関係者としては、まず、自らも肥料の生産・流通事業主体でありながら、実際の農業現場においても肥料使用の指導等を行っているJAグループのうち、全国レベルでの方針を策定する全国農業協同組合連合会（JA全農）と、実際に農家と連絡をとりあう窓口となる地方農協として、地域におけるリン使用について適正使用という観点から関心を持っているJA地域Cからヒアリングを行った。また、農業現場において実際にリン肥料を使用する農家がリサイクル肥料に対して持つ意見としては、日本下水道協会の実施したアンケート結果⁵⁾を利用するとともに、2件の農家（農家D及び農家E）での聞き取り調査を行った。農家Dは稲作農家、農家Eは畑作農家であり、多様性を確保した。

2.3. ステークホルダーの活動

(1) 肥料業界：リン資源リサイクル推進協議会

日本肥料アンモニア協会は、2003年に、戦前から起源を有する日本アンモニア協会と日本化成肥料協会が合併することで発足した。主要な会員は、アンモニアとその関連製品、肥料の製造販売会社で、22の団体から成る（2013年4月現在）。業界全般の傾向としては、肥料の取り扱い・消費が高齢化や耕作放棄地による日本の農業の衰退とパラレルな状況で減少しており⁶⁾、さらに原料価格の高騰などで安定的かつ多様な調達先の確保が大きな課題となっている。こうした課題を背景に、リン資源リサイクル推進協会の設立に大きな役割を果たした。

(2) リサイクル実施者：自治体

a. 福岡

福岡市道路下水道局は、リン酸マグネシウムアンモニウム（Magnesium Ammonium Phosphate, MAP）法という方法を用いて、全国で最初に下水からのリン回収を始めた。主要目的は博多湾の富栄養化の防止であり、防止のためには窒素やリンなど栄養塩類流入の削減が必要であったため、MAP法を用いた高度処理施設の整備を1993

年度より始めた。整備は1999年度に完了している。MAPは1997年度から肥料原料販売会社に販売している。また水質汚濁防止のための排出目標値を、1998年6月に福岡県と共同で「博多湾特定水域高度処理基本計画」を策定した。

b. 岐阜

岐阜市上下水道事業部は、2003年度から下水汚泥焼却灰からのリン回収技術の研究を開始し、2010年度よりリサイクル・リンの流通販売を開始した。施設を運用するにあたって、「循環型社会の実現」を主な目的としている。岐阜市内には合計で4つの下水処理プラントがあり、各プラントで発生した下水汚泥または下水汚泥焼却灰を北部プラントに集約した上でリサイクル処理を行っている。

c. 鳥取

鳥取市秋里下水終末処理場では、2013年4月より、下水処理によって生じる汚泥からリン回収施設の本格的な稼働が開始された。これは基本的に岐阜市のプラント設計と同じ工程で設計され、同事業では日本国内での2件目となる。プラントの技術的な側面は、すでに国土交通省の下水汚泥資源化・先端技術誘導（Lead to Outstanding Technology for Utilization of Sludge, LOTUS）プロジェクトや岐阜の実用化で実証済みであることから、実施においては大きな問題はないと考えられている。⁷⁾

(3) リサイクル実施者：企業（A社）

A社はリン酸やリン安を製造し、肥料用として肥料メーカー等に卸している企業である。2012年頃から汚泥処理過程から出た焼却灰を用いたリサイクル・リンを原料に利用している。リン鉱石の価格高騰や中国の輸出制限などを受け、国内リンの活用に向けて担当者がリーダーシップを発揮し焼却灰からリサイクルを推進した。

(4) 技術開発企業：B社

B社は、地方共同法人日本下水道事業団（以下JS）と2006年度から2008年度に「新しい物理化学的リン除去法の開発」の共同研究を行った。その結果、その実用化を目指した「高速吸着剤を用いたリン除去・回収技術」の開発がなされた。この技術を茨城県の霞ヶ浦浄化センターに導入するにあたって⁸⁾、2012年3月から1年間の実証試験を実施し、この実証試験結果に基づき、2013年6月に国土交通省は当該処理方法が計画放流水質に適合した処理方法であると認定した。この技術を用いれば、現状霞ヶ浦浄化センターの0.13 mg/Lの放流水質から、リンを0.05mg/Lという極低濃度まで安定して除去できることが期待されている。この実施により、霞ヶ浦の水質改善に加えて、工業用原料としても利用できる高品質

リンが HAP (ヒドロキシアパタイト) として年間約 100 トン回収することが期待されている。

(5) 農業関係者

a. JA 全農

JA 肥料農業部は、肥料の原料を海外から輸入し肥料メーカーに卸したり、また肥料メーカーがつくった肥料を JA や農家に供給する役割を担っている。JA 全農は、リサイクル・リン肥料推進のために、鶏糞燃焼灰・下水リサイクルなど多種類の取り組みをしている。また、家畜ふん堆肥の活用を促進することで、結果としてリン・リサイクルに寄与している。現在では、未利用資源がどこにありどの程度のポテンシャルがあるかという調査研究の段階は終わり、具体的にどう製品化していくかの開発の段階に入っている。鶏糞燃焼灰を活用した肥料はすでに流通しており (エコ化成®シリーズ)、慣行の肥料よりも単価を抑制している。また、堆肥を使用した混合堆肥複合肥料についても販売が開始され、普及が進められている。

b. JA 地域 C

JA 地域 C は、農家の営農のサポート等を行なっている地域の農協で、JA 全農で決定された方針を実施する立場にある。また肥料を農家に提供する流通機能の役割を持つ。現時点ではリンのリサイクル事業は行なっていないが、この地域では省リンについての活動は進んでいる。

c. 個別農家

農家 D は 2013 年 8 月時点で営農を行なっていないが、過去に茨城県での営農の経験を持っている。作物はコメを栽培していた。リサイクル・リンに悪い印象は持っていないが、肥料として扱いやすいかどうかを重視している。

農家 E は、静岡県でセルリー栽培などの施設園芸を行っている。施肥の関係で作物に病気が発生した経験から、肥料の成分や質にも関心を持っている。

アンケートとは別に農家の聞き取り調査を行ったのは、調査主体が日本下水道協会であり、調査対象はリサイクル・リンを使用している自治体の農家に限られていたためである。追加的にヒアリングを行った農家は、どちらもリサイクルを行っていない自治体に居住している。

3. ステークホルダーの問題認識の分析

3.1. ステークホルダーの問題認識の比較

関連するステークホルダーの問題認識について、実際に聞き取り調査を通じて情報収集を行った結果、ステ

ークホルダーがリン・リサイクルの普及において重要と認識している要素として、環境、コスト、イメージ、安定取引、流通、量、質が抽出された。各ステークホルダーの問題認識を比較すると、下記の Table 1 のようになる。

Table 1 ステークホルダーの問題認識の比較分析

	環境	コスト	イメージ	安定取引	流通	量	質
肥料メーカー		○	○		○	○	○
リサイクル実施自治体	○	○	○	○	○		
リサイクル実施企業		○			○	○	○
技術開発企業	△	○			○		○
JA 全農		○			○	○	○
JA 地域農家	△	○					
農家		○					○

(1) 肥料業界 (日本肥料アンモニア協会)

ア. リサイクル活動推進の理由：供給源の多様化

肥料を取り巻く環境は、原料の価格高騰、新興国における需要の拡大や世界的な人口増加、国内における需要の低下など厳しい状況にある。こうした中、日本肥料アンモニア協会としても、現状の輸入依存体制以外のありかたを検討する必要性に迫られた。供給源の多様性の確保のセカンダリーなソースとしてリサイクル・リンが位置づけられた。

イ. 懸念事項・課題：リサイクル・リンの質・量の確保とリサイクルを前提とした体制構築の必要性

リサイクル・リンの普及においては、その質の確保が重要と考えられ、肥料取締法による適切な管理体制、公的な規格に合致する肥料の流通が重要である。普及がさらに進むためには、肥料の品質管理とともに、流通量の確保、さらには、それがどのような枠組みで扱われるかも重要である。また、下水道由来のリサイクル・リンは、汚泥由来という烙印にどう対応していくかが大きな課題であると認識している。

さらに、こうしたことが長期的な視野に立って展開されるためには、継続性が不可欠であり、国の担当者の人事異動に左右されず、関係する省庁とステークホルダーが問題共有を図る場の設置が要されると考えた。これが、日本アンモニア肥料協会がリン資源リサイクル推進協会

設立のために動いた大きな動機であった。当初は懇話会レベルで考えていたものの、折しも生じた価格高騰などのタイミングも重なり、また、大阪大学の教授による積極的な取りまとめにより、協議会となった。今後のリサイクル・リンの普及においては、省庁ごとに展開されるリン・リサイクル施策の共有化と考える。また、すでに実用化がなされている下水道においては、下水道協会などとの連携強化を深めることで、除去だけでなく、回収・リサイクルを前提とした制度設計のあり方が必要と考えている。

(2) リサイクル実施者：自治体

a. 福岡市リサイクル施設

ア. リサイクルの理由：博多湾の富栄養化対策

元々設置の経緯が博多湾の富栄養化対策であり、また1998年6月に福岡県と共同で策定した「博多湾特定水域高度処理基本計画」の目標値を達成するため、この問題への関心は大きい。目標値は0.5mg/Lであるが、現状では目標値を十分に達成し、平均0.17mg/Lを達成している。

ただし、一方で、博多湾におけるリン濃度の低下は、漁業環境にとって必ずしも望ましい状況ではないとの海苔漁業関係者からの意見もあり、リン回収の考え方について新たな検討が必要な状況も存在する。

イ. 懸念事項：MAP 製造にかかるコスト

現状、MAP 製造は、下水処理の一連のフローの中に位置付けられており、収支は赤字であることから処理に必要な分だけ MAP を製造しているといった状況である。そのため、当然コスト削減に関心がある。特に、配管の洗浄などもする必要があり、全体の費用の6割を薬剤費が占めている。現在は、赤字が増えてしまうこともあり、MAP の生産量拡大の予定はなく、また予算の問題で必要最小限の保守を行っている状態であった。

また、生産量の拡大を考えた時に、福岡市の場合には下水の処理と並行で行っているため、MAP を製造するものとなる下水を集積することは不可能であり、生産量の拡大には限界がある。

ウ. 課題：MAP 販売の安定的取引先

製造した MAP は、肥料会社に売り渡されるが、その取引先がこれからも継続して取引を続けていける取引先かという点に販売価格よりも関心がある。中国のリン輸出規制でリン価格が高騰した際にも、複数の取引先から MAP を買い取りたいという打診があったが、取引先の継続性の観点から断った。また取引先は、取引の安定性から九州内での取引を目指している。取引先の安定を重要視する理由は、リン肥料の販売を目的とする民間企業と異なり、公共事業者である行政は、採算性のみにより事

業継続を判断することはできない。それは、もし販売が停滞する事態が発生したとしても生産を停止することなく、生活環境及び自然環境保全を目的とした下水処理事業を継続するために、MAP 生産を継続させる必要があるためである。

b. 岐阜市リサイクル施設

ア. リサイクル活動の理由：「循環型社会」の実現

岐阜市では、本技術の導入以前、汚泥焼却灰から焼成れんがを生成することで下水処理から生まれる廃棄物を処理していたが、当該施設の老朽化に伴い、新しい処理方法を模索した結果、「循環型社会」という目的とも合致するリン回収の方法が実現した。

イ. 懸念事項：コスト

現状、リン回収には数千万円規模の資金が必要であり、主産物であるリン酸カルシウムと副産物である処理灰の販売額（数百万円）では採算がつかない。それにも関わらず、岐阜市が本方式を強く推進する背景は、「循環型社会の確立」という強い理念があるためである。ただし、それまでの処理方法であった焼成れんがの生成と比較すると、現在のリン回収技術に必要なコストは抑えられている。また代替案として、焼却灰を処理せずに全て埋立処分した場合にも数千万円程度のコストがかかるため、下水汚泥の処理費用として一定の赤字は仕方ないと捉えている。

ただし、現在の価格設定では供給量を増やすほど赤字が増大する上、元来市内の下水処理の一環として開始した事業であるため、岐阜市としては供給量を増やすインセンティブは強くない。また、現在の法制度においては、廃棄物に分類される下水汚泥を外部自治体から持ちこむことが難しい。その結果として、集められる焼却灰の量が限定されるという側面もある。

ウ. 課題：販路・販売ノウハウ等の欠如

生成された肥料「岐阜の大地」は地元 JA を通して農業現場に販売する（20kg 詰袋の販売量は2010年に約1000袋、2011年に約2800袋、2012年に約1300袋）ほか、肥料会社に対して肥料原料として出荷しており、現在は肥料会社からの需要が供給量を上回りつつある。

なお、価格を上げることで収益を改善することに関しては、かつて需要が低迷し販路開拓に苦勞した経験から、再度需要が無くなることを危惧しており、価格の上方修正に関しては消極的にならざるを得ない。その背景には「公務員は商売ができない」という自己意識があるかもしれない。

c. 鳥取市リサイクル施設

ア. リサイクル活動推進の理由：汚泥処理の諸問題の解決

岐阜市同様、排水におけるリンの濃度の低減が主たる目的というよりは汚泥処理工程で発生する諸問題を解決する必要があったことがリサイクル・リン事業を導入した直接の契機であった。これらの問題のうち、鳥取市では温泉地特有の成分が焼却灰中に含有されることから処分費の低減が検討されていたが、リン回収の過程でこれが解決されることもあり、2009年に導入が決定された。副次的な効果としては、焼却灰中のリン資源の有効利用が可能となり、また従来セメント剤として利用できていなかった灰もリンの含有量の減少により処分費が低減し、さらにリンを回収するので灰の総量も減少して処分費も減じる、といったことが挙げられた。なお、自ら販売までを視野に入れていた岐阜市と異なり、鳥取市では当初から、抽出されたリン酸塩はJA全農との委託契約により販売をすることとした。ただし、地産地消を促進したいので、鳥取近辺での販売を求めている。

イ. 課題：一定の品質の確保

2013年4月に稼働が開始されたばかりなので、現段階では具体的な課題が特定される段階にないが、リンの回収は、季節や気温変動によっても異なるので品質を一定に保持することが課題であると考えている。

(3) リサイクル実施者：企業（A社）

ア. 目的：地理的なリスク・マネジメントの回避

リン酸の原料として輸入するリン鉱石と、国内で焼却灰からのリサイクルするリンを混ぜ合わせて使っている。こうして作られる国産のリン酸は海外で生産されるリン酸に比して必ずしも安くないが、地理的なリスクのマネジメントやリサイクル・リンに対する顧客の理解もあり、事業が展開できている。

イ. 課題：品質の確保

原発事故以降、焼却灰中の放射性セシウムが問題となった。このため原料を近郊（関東）で調達できず、遠方から品質の良い焼却灰を船で調達している。品質の管理のため、焼却灰の検査を行っており、そのためのコストも大きい。

下水処理場により焼却灰に含有されるリンの濃度や不純物の量は異なる。このため、良質の灰をもつ処理場が時間をかけて調査された。今後の課題は、いかに高品質のリン鉱石を確保できるかと、良質の灰を確保できるかのバランスである。上記のとおり、リン酸はこの二つの混合でできている。これまで輸入されてきたリン鉱石は高品質であったが、高品質のリン鉱石の価格が上昇したり、品質が落ちたりしてくると、焼却灰の品質がますます

重要になってくる。焼却灰からのリン・リサイクルを促進するためには、良質の灰を出す処理場を見つけるか、もしくは今後そうした灰を産出できるようなシステムに切り替えるよう自治体に働きかける必要がある。また、焼却灰の不純物を取り除くための研究開発も重要で、そうした活動も行われている。

(4) 技術開発者：企業（B社）

ア. リサイクル活動推進の理由：自社の保有する技術の有効活用

B社は2000年代初頭の段階で、すでに高速吸着剤に関する技術を有しており、その応用先を探していた。リンの回収自体が目的ではなく、当初は水質改善のためのリンの除去を念頭に実用化を考えていた。しかし2008年の価格高騰などの影響もあり、この技術を用いればリン回収ができることも注目されたことから、JSとの共同研究やその後の実証実験に力を入れることとなった。

イ. 課題：コスト－高度な技術がどこまで求められるのか

同技術を用いれば、高速、高品質のリンを高い除去回収率で得ることが可能であり、また、耐久性も高く、吸着と脱着も繰り返し再利用が可能である。しかし、ここまでの高い水準の技術が多く自治体で求められるのか、というニーズの問題がある。霞ヶ浦のような閉鎖系で、放流水に対する意識の高い自治体に対する働きかけが必要である。

(5) 農業関係者

a. JA全農（肥料農薬部）

ア. 主要な関心：肥料の安定供給、肥料価格の抑制と幅広いリサイクル肥料の開発

JA全農は肥料の安定供給（国内肥料資源の活用）および肥料価格の抑制（国内の未利用・低利用資源の活用）という観点からリサイクル・リン肥料の導入には積極的な姿勢を見せている。

また、リサイクル自体についても関心はあるが、リサイクルの対象は下水からのリサイクルに限定されるものではない。JA全農自身が特に力を入れているものとして、現行では鶏糞燃焼灰の肥料化が挙げられる。また、肥料取締法の公定規格の改正により家畜ふん堆肥を普通肥料の原料として使用し、混合堆肥複合肥料として生産・販売できるようになり、当該肥料の販売・普及を進めている。肥料取締法で今まで堆肥と化学肥料の混合が禁止されていたが、2012年9月7日から施行された新しい公定規格では、成分管理を行うという条件のもとで混合が可能になったため開発が始まって、現在実験をしてデータ収集集中である。これもリサイクルの一形態である。しか

し、製造する際に堆肥を肥料工場に運んで混合するが、臭いを管理しなければならず、それができる肥料メーカーは限られている。また、混合堆肥複合肥料に使える堆肥の種類は限られている。例えば牛糞は、わらなど異物が混入して肥料への成型が難しい。現在は主に豚糞や鶏糞が用いられている。新技術の普及に関しては、栽培試験を経た上での普及が前提である。また、肥料の使い方とセットで普及させなければならないので、普及が遅くなってしまふ。

イ. 課題：リサイクル・リンを肥料原料として利用しやすい形態にすること

下水汚泥は汚泥肥料（普通肥料）として製造・流通・販売ができるが、基本は地域内流通であるため、JA 全農が流通に関わることは少ない。現在、大規模下水処理場の多くでは灰化処理が行われているが、汚泥灰中のリンは鉄やアルミニウムと結合し、作物が利用しにくい形態となっており、肥料に加工しにくい。しかし、リンを抽出・濃縮したり、植物が利用しやすい形態に変化させることによって、肥料または肥料原料として利用可能であると考えている。また、重金属等の有害成分は加工プロセスの中で除去されなければならない。前述の通り、国内の肥料原料を利用するメリットを農家に提供する必要があり、既存の原料よりも安価に肥料を製造・供給する必要があると考えている。

b. JA 地域 C

ア. 課題：地域差・リン回収への低い関心

農家の関心には地域差があると認識している。その農家が施設園芸を主とするかコメ農家であるかによって適正施肥に対する関心も異なり、また地形の問題で、施肥による水質汚染の問題が起りやすい地域と起りにくい地域があるなど、地域の事情に応じて利害関心は様々である。

リン回収に関しては、JA 全農肥料農薬部でのリン回収に向けた具体的な取り組み内容が、現場の方にはまだ伝わって来ていない。現場としても、本部の方である程度形になってからでないと具体的に動けない。

イ. 価格

農家はたとえリサイクルされたリン肥料であっても、他の肥料と比較してリサイクル肥料が安くならなければ、リンの枯渇を実感することもなく、問題意識を持ってない。

農家の方は、肥料の価格や改良材の価格など、それぞれの個別の資材の費用に特に着目するため、リサイクル肥料の価格が高ければメリットを感じられない。

c. 個別農家（茨城県でコメを栽培している農家 D、静岡

県でセルリーなどの野菜を栽培している農家 E)

ア. 主要な関心：価格、質・使い勝手

リサイクル肥料は高いものだと考えており、価格が安いことが普及するための一番大きな要素だと考えている。また、施肥の手間に関してはできるだけ少なくしたいと考えているため、多少価格が高くても一発型肥料のような施肥の手間が少ないものを好む。

イ. イメージ

下水からリサイクルされたリンに関しては、堆肥と同じだと考えているため、他のステークホルダーが主張するほど悪いイメージは特に持っていない。また、肥料の成分や安全性に関する情報が公表されているのであれば、情報を基に自分で判断して使用することができるため、リサイクル・リンを使うことに抵抗はない。ただし、放射性物質や重金属などが肥料に含まれていないかは、作物の安全に関わることなので関心がある。

なお、このようなリサイクル・リンのイメージについての農家の認識は、「下水由来肥料に関するアンケート」⁹⁾でも裏付けされている。

4. リンのリサイクル普及に向けた施策と評価

4.1. リンのリサイクルの普及において重要な要素

「環境」の要素を重視する主要なアクターとしては、自治体（下水道局）が挙げられる。ただし、その自治体を取り巻く環境により、どのように環境という要素が働くかは異なる。福岡の場合は、博多湾という閉鎖系の海域における富栄養化・環境問題の改善が課題として大きくあった。これに対して、岐阜や鳥取の場合は、排出基準に比してリンの放出量はそこまで大きくない。とはいえ、「循環型社会」・環境改善という要素もリサイクルを実践する理由の追加的要素として重要と思われる。

次に、「コスト」の要素はすべてのアクターが重視する要素である。このため、リンリサイクルの普及のカギを握るのは、いかにすべてのアクターがコストに見合ったベネフィットを享受できるようなデザインを構築できるかにかかっているといえる。

3 つ目の「イメージ」の要素を重要視するのは、肥料メーカーである。下水汚泥からのリサイクルリンは、汚泥という烙印があり、こうした烙印を払しょくできない限り農家が受け入れることはないと考えている。ここで興味深いのは、農家（調査のサンプル数が限定されるものの）は必ずしも、汚泥のイメージを重視していなかったという点である。安全性・質が確保されてかつコストが見合ったものであれば使うとしている。

4 つ目の「安定取引」の要素を重視するのは自治体で

ある。自治体は廃棄物処理の責任を負っており、価格よりも廃棄物が安定的に引き取られることに強い関心を持つ。

5つ目の「流通」はリン・リサイクルにかかわるほとんどのアクターが重視する要素である。リサイクルされリンの流通が確保できないと、生産しても行き場を失うからである。自治体は、公的な主体であることから利益を上げるためのノウハウには限界がある。しかし利用する側からすると、ほかの肥料と比してリサイクル・リンを用いるには、上述のコストに加えて利便性や付加価値を高めることが必要と思われる。そうすることで、リサイクル・リンの流通網の中での競争力を高めることができると考えられる。

6つ目の「量」の確保という要素も非常に重要な要素である。リサイクル・リンが全国販売されるようになるためには大量の取り扱いが必要となるが、現状では、リサイクル・リンは回収にコストがかかり、また量的に少ないため、大規模流通業者とは取引しにくい。原料量が不十分でプラントが効率よく稼働が出来ない場合や、プラントの規模がそもそも小さい時には、生産量を確保することは難しい(例えば、福岡市の排水からのリサイクルの場合は、各下水道施設で処理をする必要があるため、集積するのは困難である)。一方、焼却灰からのリサイクルの場合は、焼却灰を一カ所に集積する事が出来るため、排水からよりも効率的に回収できる可能性がある。ただし、この場合であっても、岐阜市は下水法の規制もあり、周辺の自治体から焼却灰を回収することができず、自治体内の処理場からのみ焼却灰を回収する形になっている。その結果として、集められる焼却灰の量が少なくなり、プラントもフル稼働ができない状態になってしまい、生産量が少なく採算をとることができていない。このように岐阜市においては、十分な生産量を出す上で下水法の規制が課題となっている。また、生産量を増やすにあたっては、プラント自体の規模を大きくすることも必要になってくるが、初期投資が莫大なため大規模化するインセンティブがないのが生産量不足の原因の一つといえる。他方、肥料原料メーカーの場合は、遠方の下水処理場から廃棄物扱いとなっていた焼却灰をほぼ無償で購入することで、原料の調達を一定量確保している。

最後に、7つ目の「質」も、リン・リサイクルを安定的に推進していく上で、ほぼすべてのステークホルダーが重視する要素である。

4.2. 施策の抽出

上で議論した関心事項リスト、すなわち、コスト、安定的取引、販路、イメージ、量、品質に基づいて、各々の項目の改善に寄与する施策を抽出し、その上で、以下

の観点から各施策のフィージビリティを評価する。

観点 1: 複数のステークホルダーが重視している関心事項を改善するものは支持が多いとして抽出する。

観点 2: 特定の施策が、複数の関心事項改善に寄与する場合は、同床異夢を可能にする施策として抽出する。

観点 3: 複数のステークホルダー間でバーゲニングが成り立ちそうな施策のセットを抽出する。

これは、Kato 等による問題構造化手法¹⁰⁾を簡易型にしたものといえる。この問題構造化手法では、関心事項リスト=価値と、環境条件のマトリックスの中で施策の抽出を行っているが、本研究では、ステークホルダー自身が挙げた施策のみを対象とし、システムティックな形で環境条件を考慮していないため、関心事項リストだけに基づいて施策を抽出する。

具体的な施策に関しては、各関心事項の改善に寄与するものとして、下記のをリスト・アップすることが可能である。

a. コスト削減の技術開発

リサイクルを実施する自治体、企業にとっては、コストを削減することが主要関心事項であり、コスト削減を可能とする技術開発が求められる。

b. イメージ改善のための制度改革

肥料メーカーは、農家がリサイクル肥料に対して汚泥のイメージを持っていることが、リサイクル肥料を普及させる上での大きな課題であると考えている。

c. 環境目的との同床異夢に関する自治体との連携強化

リンリサイクルを実施する自治体にとっては、リンという資源回収自体ではなく、閉鎖海の環境保全や循環型社会の構築といった環境政策目的も重要である。従って、このような環境目的を持つ自治体との連携強化は、同床異夢によるリン・リサイクル普及の市場規模を広げることとなる。

d. 販路に関する肥料メーカーと自治体の連携

複数自治体が共同して肥料メーカーと契約することにより、自治体は安定的取引が可能になる。

e. 地産地消のイメージづくり

地産地消のイメージづくりを進めることで、自治体のリサイクルへの関与が積極的になる可能性がある。

f. 廃棄物の品質向上のための自治体下水道の努力と、品質の高い廃棄物に対する肥料メーカーによる支払いの組み合わせ

廃棄物の品質向上のために自治体下水道が努力するこ

とで、リサイクルコストを下げる事ができる。他方、品質の高い廃棄物に対する肥料メーカーによる自治体への支払いとセットにすることで、インセンティブを付与することができる。

4.3. 施策の評価

本研究では、ステークホルダーからの聞き取り調査による施策を整理・分析し、そのフィージビリティを評価した。ここでのフィージビリティの定義は、ステークホルダーによる合意形成の可能性としている。その可能性として、多数がサポートするか、同床異夢による支持が可能か、組み合わせを通じたバーゲニングが可能か、の3つのパターンを考慮した。そして、各施策の実行可能性を3パターンのどれに当てはまるかを表にして、評価を行った。

実際に各施策のフィージビリティの評価してみると、以下の表のようになる。

Table 2 施策のフィージビリティ評価の比較

施策	評価
a. 観点1	
ア. コスト削減の技術開発	○
イ. イメージ改善のための制度改革	△
b. 観点2	
ア. 環境目的との同床異夢に関する自治体連携強化	○
イ. 販路に関する肥料メーカーと自治体の連携	○
ウ. 地産地消のイメージづくり	△
c. 観点3	
ア. 廃棄物の品質向上のための自治体下水道の努力と、品質の高い廃棄物に対する肥料メーカーによる支払いの組み合わせ	○

a. 観点1

ア. コスト削減の技術開発

これは、自治体、肥料メーカー、技術開発メーカーといった多くのステークホルダーが支持する施策として評価することができる。

イ. イメージ改善のための制度改革

肥料メーカーが支持する施策である。しかし、実際は農家はイメージよりも安全性の確保などに関心があるので、それほど支持するステークホルダーの数が多いわけではない。

b. 観点2

ア. 環境目的との同床異夢に関する自治体連携強化

この施策は、環境目的を重視する自治体の利益増大と、量の拡大を期待する肥料メーカー等との同床異夢を可能にする。

イ. 販路に関する肥料メーカーと自治体の連携

安定取引を確保したい自治体と、一定の量を確保したい肥料メーカーとの同床異夢を可能にする。

ウ. 地産地消のイメージづくり

循環型社会を主張したい自治体と、地域で量を確保したい肥料メーカーの同床異夢は可能である。一般に肥料メーカーは必ずしも地域にこだわりはないが、日本の肥料メーカーの場合は比較的地域分散型なので、適合性がある。ただし、農家は必ずしも支持していない。

c. 観点3

ア. 廃棄物の品質向上のための自治体下水道の努力と、品質の高い廃棄物に対する肥料メーカーによる支払いの組み合わせ

肥料メーカーは良質な廃棄物を求めており、一方、自治体は廃棄物の品質向上を通じて一定の収入を得ることができる（あるいは処理費用を下げられる）ので、両者の組み合わせによるバーゲニングが可能となる。

5. まとめと今後の課題

リン鉱石は世界的に枯渇危機にある可能性があり、リン鉱石の全量を輸入している日本にとって、将来的にリン鉱石価格の上昇や、さらには国内の農業・産業部門への多大な影響が想定される。

そのため、日本は輸入に頼らないリンの生産・消費のプロセスを作る必要があり、その一つとしてリサイクルが大きな期待を集めている。下水からのリサイクルは一部自治体で進められているものの、まだ全国的に進んでいるとは言い難い状況である。本論文では、リン・リサイクルに関わるステークホルダー分析を行い、その普及に関わる要因を明らかにするとともに、解決に向けた施策を抽出し、それらのフィージビリティを評価した。

本研究から得られた新たな知見として、他の分野におけるリサイクルとの比較から、次のような点を指摘することができる。特に、工業用のマテリアルのリサイクルと比べて、リンのリサイクルにおいては、そのプロセスに関わるステークホルダーの種類の幅が非常に広いいため、その流通における各アクター間での連携を如何に構築していくことができるかが極めて重要である。特に、従来は必ずしも直接的な接点がなかった各自治体によるリンの回収と、肥料メーカーによる肥料の生産との十分な連

携が鍵となる。また、リンは食品に使われる物質として、そのイメージが非常に重要であり、また地方においては地産池消のイメージも製品の魅力を増すうえで大事な役割を果たすと考えられる。

現在のところ、リン資源リサイクル推進協議会が設立されているものの、まだ社会全体を動かすまでには至っていないと状況である。本論文で提示したような施策を推進するためには、自治体と肥料業界の連携を促し、十分なステークホルダーの包括性と参加を確保するような場を設定することが、国内全体のプロセスとして非常に重要であると考えられる。¹¹⁾

参考文献

- 1) 大竹久夫(2011)『リン枯渇危機とはなにかーリンはいのちの元素ー』大阪大学出版会。
- 2) リン資源リサイクル推進協議会 <http://jora.jp/rinji/rinsigen/>。
- 3) Matsubae, K., Kajiyama, J., Hiraki, T., and Nagasaka, T. (2011). Virtual phosphorus ore requirement of Japanese economy. *Chemosphere*, 84(6), 767-772.
- 4) ローレンス・E・サスカインド、ジェフリー・L/クルック シャンク(2008)『コンセンサス・ビルディング入門：公共政策の交渉と合意形成の進め方』(城山英明・松浦正浩訳) 有斐閣。
- 5) 公益社団法人日本下水道協会(2009)『平成21年度下水汚泥を原料とした汚泥肥料に関するアンケート調査結果～汚泥肥料製品に関する情報発信と市場拡大を目指して～』 <http://www.jswa.jp/odei/pdf/hiryuu.pdf>。
- 6) 成田義貞(2010)「化学肥料」『科学と教育』58(8), 350-355。
- 7) 下水道技術開発プロジェクト(SPIRIT21)委員会(2007)『「下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト」(LOTUS Project) スラッジ・ゼロ・ディスチャージ技術：下水汚泥焼却灰からのりん回収技術に係る技術評価書』、3月。
- 8) 日本下水道事業団(2011)『霞ヶ浦浄化センターにおける「高速吸着剤を用いたリン除去・回収技術」の適用について評価を開始しました』記者発表資料, 12月16日。
- 9) 日本下水道事業団(2012)『茨城県霞ヶ浦浄化センターにおける「高速吸着剤を用いたリン除去・回収技術」の実証試験を開始しました』記者発表資料, 3月7日。
- 10) Kato, H., Shiroyama, H., and Nakagawa, Y. (2013). Public policy structuring incorporating reciprocal expectation analysis. *European Journal of Operational Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.019>.
- 11) Shiroyama, H., Yarime, M., Matsuo, M., Schroeder, H., Scholz, R.W., and Ulrich, A.E. (2012). Governance for sustainability: knowledge integration and multi-actor dimensions in risk management. *Sustainability Science*, 7(Supplement 1), 45-55.

謝辞

本研究への助成を頂いた、日本学術振興会（異分野融合による方法的革新を目指した人文・社会科学研究推進事業「公共的コミュニケーションの可視化－複雑社会における政治的法的判断の構造」）及び三井物産株式会社環境基金に謝意を表します。

CHALLENGES IN THE DIFFUSION OF RECYCLED PHOSPHORUS FROM SEWAGE SYSTEMS IN JAPAN

Jun SATO¹, Toshihide SATO², Yuji NAKAGAWA³, Sho HAYASHI⁴, Sho MATSUMOTO⁵, Hideaki SHIROYAMA⁶, Makiko MATSUO⁷, Masaru YARIME⁸

¹B.A. (Law), Master's Program, Graduate School of Public Policy, the University of Tokyo (E-mail: remi_flum@yahoo.co.jp)

²B.S. (Engineering), Master's Program, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo (E-mail: toshihide@enesys.t.u-tokyo.ac.jp)

³B.S. (Agriculture), Master's Program, Graduate School of Public Policy, the University of Tokyo (E-mail: veni.vidi.vici.julius@gmail.com)

⁴B.A. (Liberal Arts), Master's Program, Graduate School of Public Policy, the University of Tokyo (E-mail: hayasho.com@gmail.com)

⁵B.A. (Law), Master's Program, Graduate School of Public Policy, the University of Tokyo (E-mail: msmswwwwww@gmail.com)

⁶B.A. (Law), Professor, Graduate School of Law and Political Science, University of Tokyo (E-mail: siroyama@j.u-tokyo.ac.jp)

⁷M.A. (International Studies), Graduate School of Public Policy, University of Tokyo

⁸Ph.D. (Economics and Policy Studies of Technological Change and Innovation), Project Associate Professor, Graduate School of Public Policy, the University of Tokyo (E-mail: yarimemasa@gmail.com)

The diffusion of the recycling of phosphorus from sewage system in Japan is still limited. Based on stakeholder interviews, problem perception of each stakeholder is analyzed and policy measures to promote diffusion are assessed. Three major issues for diffusion are cost issue, that is, deficit from recycling, inadequate quantity of production, and marketing need for stable transaction. Other policy objectives such as the need for environmental protection of closed sea and the promotion of eco-recycling society are also important. Technological innovation for cost reduction, Dosho-Imu with stakeholders with environmental policy objectives, and collaboration with local governments for securing quantity of production are important in the future.

Key Words: *Phosphorus, Recycling, Sewage System, Japan, Stakeholder Analysis*