

<原著論文>

資源循環型サニテーションにおける屎尿分離型有機肥料の価格評価 —インドネシア都市スラムとその周辺農地での検討—

牛島 健*, 出口 陽介**, Neni SINTAWARDANI***, Umi HAMIDAH***, 船水 尚行****

Marketability Evaluation of Human Excreta in Resource Oriented Sanitation System - Case of Urban Slum and Surrounded Farmland in Indonesia -

Ken USHIJIMA, Yosuke DEGUCHI, Neni SINTAWARDANI, Umi HAMIDAH and Naoyuki FUNAMIZU

*Building Research Department, Hokkaido Research Organization, 3-1-20, Midorigaoka-higashi 1, Asahikawa City, 078-8801, Japan

** Nippon Koei Co., Ltd., 5-4 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8539, Japan

*** Research Centre for Physics, Indonesian Institute of Sciences, Jl. Cisit / Sangkuring, Bandung, 40135, Indonesia

****Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita13 Nishi8, Kita-ku, Sapporo City, Hokkaido, 0608628 Japan

Abstract

This study examined the potential balance of fertilizer demand and excreta fertilizer supply, around Bandung City, Indonesia. Two scenarios were also examined to evaluate excreta fertilizer cost based on the hearing of collection and transportation cost. Result of potential assessment indicated that accumulated demand potential and accumulated supply potential will be balanced in the 32 km circle centered by Bandung City, therefore 32 km range of transportation should be discussed. Results of cost assessment indicated that cost of collection, transportation and element adjustment would be almost same as international fertilizer price, but it is almost 2 times larger than subsidized price, which is currently available for local farmers. Optimization of collection and transportation logistics seemed not so effective but volume reduction of urine seemed feasible and effective, in order to obtain sufficient marketability for human excreta fertilizer.

Key Words: Resource oriented sanitation, composting toilet, agriculture, cost, marketability

1. はじめに

人口過密都市を抱える地域における持続可能な流域管理を考える上では、し尿をはじめとするヒト系廃棄物に含まれる資源を循環利用するための静脈インフラおよび静脈産業の創造が、ひとつの重要な取り組みである。いわゆるし尿資源循環型サニテーションシステム¹⁾は、資源の有効利活用という面だけでなく、高額なインフラを必要とせず、しかも雇用創出²⁾およびし尿の財産化³⁾の可能性があることから、貧困削減にも貢献するコンセプトとして期待される。特にし尿分離型のコンポストトイレを用いた場合、コンポスト中の水分蒸発を促進するための電気等のエネルギー投入が不要となるため、電力事情が不安定でその他のエネルギーコストも比較的高価である発展途上国においても、十分に実現可能性のある技術およびコンセプトと言える。しかし、先に述べたような社会的価値も、バリューチェーンの出口、すなわち最終的なし尿の利活用先

*北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所 〒078-8801 北海道旭川市緑ヶ丘東1条3丁目1-20

**日本工営株式会社 〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4

*** Research Centre for Physics, Indonesian Institute of Sciences, Jl. Cisit / Sangkuring, Bandung, 40135, Indonesia

****北海道大学 工学研究院 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

となる農業現場において価値が認められなければ、実現しえない。農家がし尿およびその加工品である肥料を購入してくれなければ、このコンセプトの実現はあり得ない。本研究で対象とするインドネシア・バンドン市周辺では、現在、多くの農家が化成肥料を利用している。よって、こうした農家にし尿由来肥料を購入してもらうためには、価格、肥料としての性能、取り扱いやすさ、等さまざまな側面からの農家の要求をクリアし、かつ、従来の化成肥料に勝るメリットを示す必要がある。

過去に日本のし尿肥料が化成肥料に取って代わられた背景には、化成肥料の取り扱いやすさはもちろんであるが、多くの研究者が、価格の要因が大きかったと分析している^{4),5),6)}ことから、資源循環型サニテーションシステムにおけるし尿由来肥料の価格設定は、直接的な影響が大きい要素の一つと思われる。しかし、化成肥料とし尿肥料では、価格構造が大きく異なる。特に尿尿肥料については、水分を多く含んでいることから、収集輸送のコストが主要なコスト要素であることは間違いないと思われるが、現時点で肥料として市場に流通している例がほとんどないため、その価格構造を正確に見積もることは難しい。

そこで本研究では、し尿肥料の価格を推定するための方法として、し尿以外のものを収集輸送している既存の仕組みに着目して、諸費用込の収集輸送総額を算出して積み上げていくことで、ある程度現実に近い価格構造が推定できると考えた。また、輸送距離については、バンドン市内および周辺で資源循環型サニテーションが最大限普及していった場合を想定し、マスマランス的に、すなわち人口に応じて定まる供給ポテンシャルと農地での肥料使用量によって定まる需要ポテンシャルのバランスの面で、釣り合うポイントを把握したうえでシステム設計を行う必要がある。そして、上記の収集輸送コストは、少なくともこのバランスする距離を超えて輸送しても、化成肥料と競合できる範囲でなければならない。

以上をふまえて、本研究では、バンドン市内最大の都市スラムとして知られるキアラチョンドン地区（Kecamatan Kiaracandong）を中心として、バンドン市周辺の肥料受給ポテンシャルを明らかにし、それに基づいてし尿肥料のコストを推定し、資源循環型サニテーションシステム導入に当たって必要な方策について検討した。

2. 材料と方法

2.1 し尿肥料の受給ポテンシャル推定

インドネシア統計局（BPS）のバンドン支所において、バンドン市(Kota Bandung)⁷⁾およびバンドン市周辺の1市7県(Fig.1, バンドン県(Kabupaten Bandung)^{8),9),10)}、西バンドン県(Kabupaten Bandung Barat)¹¹⁾、チマヒ市(Kota Cimahi)¹²⁾、チアンジュール県(Kabupaten Cianjur)¹³⁾、ガルー県(Kabupaten Garut)¹⁴⁾、プルワカルタ(Kabupaten Purwakarta)県¹⁵⁾、スメダン(Kabupaten Sumedang)県¹⁶⁾、スバン県(Kabupaten Subang)¹⁷⁾について、地区（Kecamatan）単位の人口、品目別農地面積の統計データを収集し、GIS（ESRI社、ArcGIS）上で整理した。なお、インドネシアでは市（Kota）と県（Kabupaten）は同格の行政区分であり、バンドン市とバンドン県および西バンドン県は、互い独立した別の行政区域である。

これらのデータを用いて、バンドン市およびバンドン市周辺の1市7県の現在の農業形態について、農作物を稲作、野菜、果物、プランテーション、その他に分類し、地区（Kecamatan）単位で整理した。続いて、農産物ごとの施肥基準値¹⁸⁾を参考に、地区ごとの窒素・リン要求量を推定し比較した。

以上のデータをもとに、し尿としての窒素およびリンの発生量（Table 1）を供給ポテンシャル、農地での窒素およびリンの消費量推定値を需要ポテンシャルとそれぞれみなし、需要ポテンシャルと供給ポテンシャルのバランスを地区単位で調べた。ただし、バンドン市については、下水道整備計画（普及率 30%¹⁹⁾）があるため、その分は供給ポテンシャルから差し引いた。つづいて、キアラチョンドン地区から各地区の直線距離（GIS 上で求めた各地区の重心までの距離とした）を調べ、キアラチョンドン地区に近い地区から順に需要ポテンシャルと供給ポテンシャルをそれぞれ積み上げて曲線を描き、両者がバランスする点を調べた。

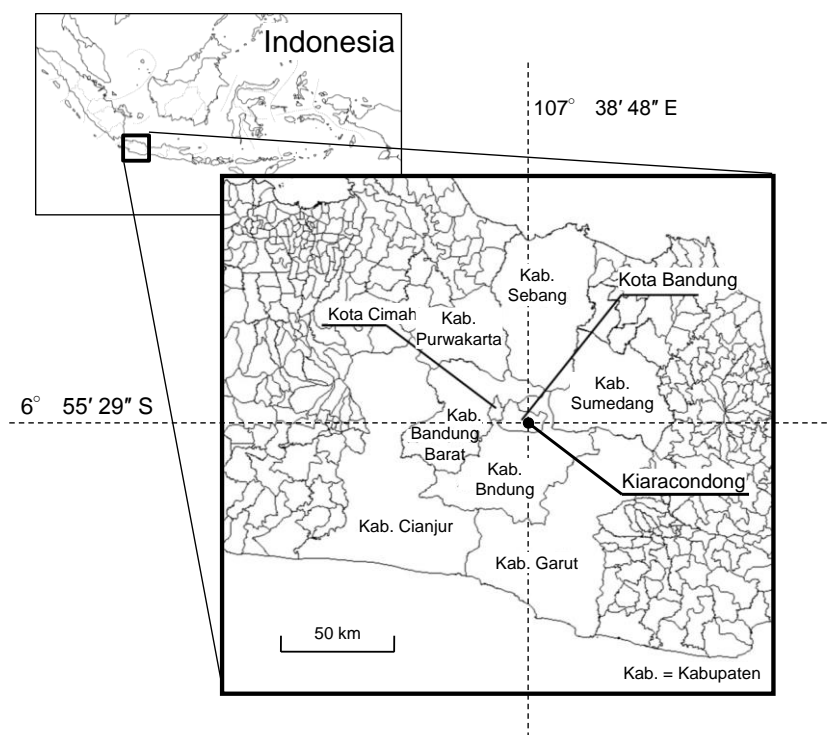


Fig.1 Location of Kiaracandong and administrative boundary around Kota Bandung

Table 1 Nitrogen and phosphorus in human urine and feces²⁰⁾

	Urine	Feces
Amount	370 kg/year/capita	33 kg/year/capita
Total nitrogen	5 kg-N/year/capita	0.9 kg-N/year/capita
Total phosphorus	0.9 kg-P/year/capita	0.3 kg-P/year/capita

2.2 し尿肥料の収集輸送コスト推定

バンドン市内は一般に路地が狭く、収集トラックが各家庭を訪問することは現実的ではない。そこで牛島²⁾および牛島ら²¹⁾は、既存のゴミ収集の仕組みに着目し、まず町内会単位で人力カートによるし尿およびコンポストの収集を行い、中継基地でトラックに積み替える収集輸送モデルを提案した(**Fig.2**)。本研究においても同様の収集輸送モデルを想定し、尿とコンポストの収集コストの算出を行った。コンポストの収集については、町内会単位で雇用しているごみ収集人の輸送能力を、尿の収集はハンドカートでポリタンクに詰めた水を売る水売りの輸送能力を、それぞれ参考にして、町内で発生する尿およびコンポストの収集に必要な人工数を算出し、ゴミ収集人の人件費(諸経費込み)²⁾をかけて収集費用を求めた。本研究では、詳しい地区の情報が得られているキアラチョンドン地区のスカプラ村・第02町内会(Kelurahan Sukapura, RW02)を検討対象とした。

中継基地からのトラック輸送については、牛島²⁾はゴミ輸送のトラックを参考にシステムを大まかに評価しているが、本研究ではより詳細な評価を行うため、現行の物流システムの中で稼働している民間のトラックに着目した。バンドン市内の卸売市場の内部もしくは周辺には民間(個人または企業)のトラックが待機する場所があり、市場で野菜や果物などを買い付けた企業とその場で契約し、輸送を行う仕組みが存在する。彼らは、野菜や果物の他に、求めに応じて家畜糞尿コンポストを輸送することもある。本研究では、バンドン市内のトラック待機場所として知られるムハマド・トーハ通り(Jalan Muhammad Toha)およびチャリンギン市場(Pasar Caringin)において、輸送を専門とするトラックドライバー、各2グループ(合計4グループ)に対して聞き取りを行い、距離と輸送費の関係を調べた。なお、現地で使用されていた料金体系は距離単価ではなく、主要な行先ごとにおおむね相場が決まっている形式であったため、ドライバーに具体的な地名(**Table 2**)を伝えて輸送料金を聞き、後から距離に変換した。

Table 2. List of destination for asking the transportation cost

Destination	Distance from Kiaracandong
	[km]
Lembang	13
Soreang	18
Ciwidey	40
Sumedang	40
Purwakarta	42
Subang	49
Garut	52
Indramayu	78
Jakarta	120
Serang	186
Yogyakarta	318
Jawa Timur	563



Fig.3 Potential balance between nitrogen supply and demand in each district.

2.3 評価シナリオ設定

し尿肥料の価格に対し、輸送距離は重要なファクターの一つとなる。本研究では、受給ポテンシャル評価の結果をもとに、供給ポテンシャルが需要ポテンシャルを上回る範囲よりも外のエリアから、実在する茶畑および水田を選び、キアラチョンドン地区からし尿肥料を輸送した場合について輸送コストの評価を行った。なお、茶畑と水田を選んだ理由は、対象とした2市7県^{7)~17)}においてもっとも耕作面積が大きかったのが、水稻と茶であったためである。

し尿肥料と化成肥料では、肥料成分の含有量および肥料成分各要素のバランスが異なるため、単純な窒素単価およびリン単価での比較は意味をなさない。そこで本研究では、バンドン市周辺の主要な作物である米と茶葉に着目し、施肥基準¹⁸⁾または農家に対する過去の聞き取りに基づいて算出した農地1haあたりの窒素とリンの必要量を基準として評価を行った。し尿肥料を用いるシナリオでは、まず窒素およびリンのいずれかが要求量に達するまでし尿肥料を施肥し、そこで不足した分を、不足要素が窒素の場合は尿素肥料で、リンの場合はTSP肥料で補うこととした。化成肥料を用いるシナリオでは、NPK肥料(N:P₂O₅=1:1)を主として、同じく窒素およびリンのいずれかが要求量に達するまで施肥し、不足した分を、不足要素が窒素の場合は尿素肥料で、リンの場合はTSP肥料で補うこととした。化成肥料の単価は、2012年の国際価格²²⁾を使用した。

3. 結果と考察

3.1 し尿肥料の供給ポテンシャル

地区 (Kecamatan) 別の収支を見ると (Fig.3), バンドン市の南東を除く, バンドン市内およびその周辺では供給ポテンシャルが上回る結果となったのに対し, それ以外の地区では一部を除いて, 需要ポテンシャルが供給ポテンシャルを上回る結果となった。し尿肥料の受け入れ先を確保するためには, 供給優勢の地域から受容優勢の地域へ移動する必要があると思われる。一方, キアラチョンドン地区から近い順に積み上げていった供給ポテンシャル (Fig.4) のバランスを見ると, およそ 32km 離れた地区までを積み上げたところで, 需要ポテンシャルが供給ポテンシャルを上回る結果となった。すなわち, バンドン市周辺全体で資源循環型サニテーションが普及した場合, 需給バランスを取る為には, 少なくともバンドン市中心部から半径 32 km 以上のエリアを巻き込んだ物流を考える必要があることがわかる。

3.2. 収集コスト

スカブラ第 02 町内会からは 1 か月に, 尿が約 50 トン, コンポストが 2.7 トン発生する。収集人の労働条件を, 現在第 02 町内会のごみ収集を行っているごみ収集人と同じ週 3 回, 午前中のみ労働とすると, 尿とコンポストの収集には収集人がそれぞれ 8 人と 1 人必要となる。

第 02 町内会の各家庭は, ごみ収集費用として 1 か月当たり 2,000 インドネシアルピア (以下, IDR とする。1 IDR = 0.0085 円²²⁾) を支払っている。すなわち第 02 町内会では, ごみ収集人 1 人あたり 820,000 IDR/月の費用を支払っている²⁾。よって, 尿およびコンポストの 1 kg あたり収集費単価は, それぞれ 130 IDR/kg, 308 IDR/kg と推定される。

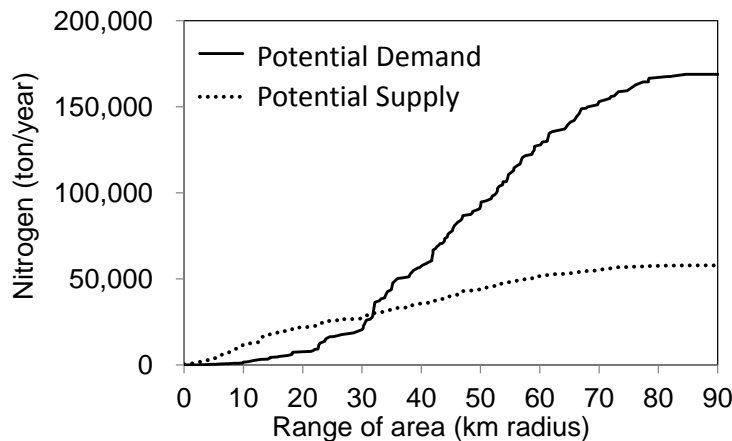


Fig.4 Nitrogen supply potential and demand potential in circle area by its diameter

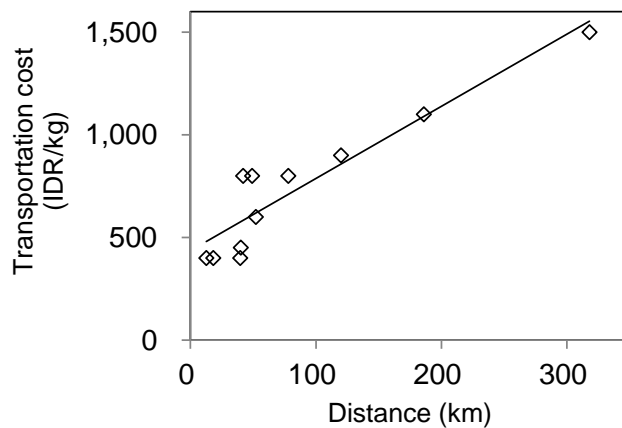


Fig.5 Cost-distance curve of truck transportation

3.3. 輸送コスト

聞き取りで得られた、輸送距離と輸送費用の間には、おおむね比例の関係が見られた (Fig.5)。なおドライバーが回答した輸送費用は、人件費、ガソリン代などの通常の経費の他に、しばしば警官から要求される違法な通行料支払いのリスクも考慮したものであり、輸送を依頼した際に依頼者が支払う総額に相当する。

3.4. コスト比較

3.4.1. 茶葉畑のケース

ここでは、具体的なケースとして、過去に著者らが現地調査を行ったランチャバリ・ティー・プランテーションの茶畑に、第02町内会から発生する尿とコンポストを運ぶというシナリオで、尿とコンポストの価格を算出した。

し尿に含まれる窒素とリンの比はおよそ5対1であったのに対し、現地調査で得られた結果から、茶の要求する窒素とリンの比は10対1であった。このときの窒素不足分を尿素で補う場合、271 kg/ha 必要であり、国際価格換算で1,088,000 IDR/ha に相当する。一方、茶畑1 ha あたりに必要な尿とコンポストの量はそれぞれ7,236 kg/ha, 381 kg/ha となる。この時の各家庭から積み替えステーションまでの回収費用はそれぞれ939,000 IDR/ha, 117,000 IDR/ha である。また、Fig.5の結果から、キアラチョンドンから47 km離れたランチャバリ・ティー・プランテーションまでの輸送単価は154 IDR/kg と考えられるので、1 ha に必要な尿とコンポストの輸送価格はそれぞれ1,115,000 IDR/ha, 59,000 IDR/ha となる。

以上の結果から、1 ha に必要な尿・コンポストの価格は、3,318,000 IDR/ha と計算された。一方、同等の施肥を全て化学肥料で行った場合の肥料価格は、3,193,000 IDR/ha であり、両者の価格は同程度となると考えられる (Fig.6)。ただし、この比較は国際肥料価格に基づくものであり、現地の農家は政府の補助金により割引された価格で化学肥料を購入している。著者らが直接農家に聞いた補助金の仕組みは、その運用に曖昧な部分が見られるものの、概ね販売価格の半額程度を助成しているケースが多かった。このことを考慮し、化学肥料の価格から補助金を差し引くと、尿およびコンポストを用いた場合の費用はその2倍に相当することになる。

3.4.2 米生産に利用するケース

ここでは地区内における農地での窒素消費量が、し尿からの窒素発生量を上回っていて、かつ、キアラチョンドンからもっとも近い位置にある地区の水田に、尿とコンポストを輸送した場合の価格を計算した。統計データ²³⁾から米に必要な窒素とリンはそれぞれ80.0 kg/ha, 19.6 kg/ha であり、その比は4対1であった。し尿に含まれる窒素とリンの比はおよそ5対1なので、リンの不足分をTSPで補う場合、必要量は36.9 kg/ha

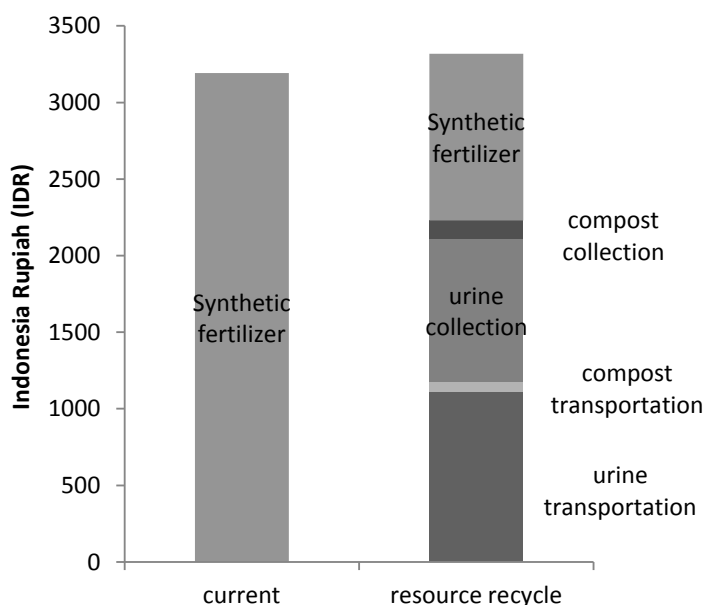


Fig.6 Cost evaluation in required amount for 1 ha of tea plantation field

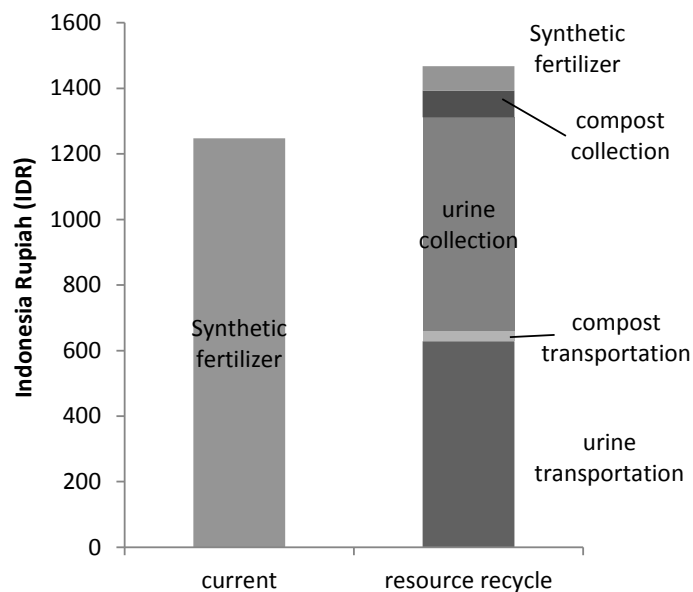


Fig.7 Cost evaluation in required amount for 1 ha of rice field

であり、その価格は国際価格換算で 158,000 IDR と考えられた。一方、水田 1 ha あたりに必要な尿とコンポスの量はそれぞれ 5017 kg/ha, 447 kg/ha であった。この時の各家庭から積み替えステーションまでの回収費用はそれぞれ 628,000 IDR/ha, 33,000 IDR/ha である。また、Fig.5 の結果から、キアラチョンドンからこの水田までの尿とコンポスの輸送価格はそれぞれ 628,000 IDR/ha, 33,000 IDR/ha となった。以上の結果から、水田 1 ha に必要な尿・コンポスの価格は、1,551,000 IDR/ha と計算された。一方、同等の施肥を全て化学肥料で行った場合の肥料価格は、1,617,000 IDR/ha であった。米の場合でも茶の場合と同じく、国際価格で比較した場合は化学肥料と尿・コンポスの価格は同程度であるものの(Fig.7)、政府による補助金を前提とする場合は、尿・コンポスの価格は化学肥料の約 2 倍程度になると考えられた。

3.4.4 推定結果の評価

茶畑に用いるシナリオおよび水田に用いるシナリオでは、単位面積当たりの使用量や窒素リンバランスは異なるものの、結果的には、いずれのシナリオにおいても国際価格との比較ではほぼ同等だが、補助金を考慮すると現状の2倍程度の費用になってしまうと考えられた。よって、現状を基準に置くとすれば、農家に、化学肥料の代わりとしてコンポストを購入してもらうことは、難しいと言わざるを得ない。これに対し、補助金を尿・コンポストにも適用できるように法整備を行うことも考えられるが、現状でも補助金が国の財政を圧迫していることを鑑みると、望ましい方法ではないと思われる。

しかし、現状で農家が支払っている金額よりも安くしなければ、尿とコンポスの利用が普及していくことは難しいので、何らかの形でもっとコストを抑える必要がある。その方法は、端的には収集輸送コストを抑えることであるが、本研究の結果からそのコスト構造を考えると、尿と糞便コンポスの収集は、尿の収集費および輸送の固定費が大きい (Fig.6)。そのため、輸送距離を最適化したとしても、その収集輸送コストを半分に抑えさせることは難しいと考えられる。収集人がそのまま農地まで輸送し、作業を1本化することでコストを抑えられる可能性はあるが、過去の日本の事例を見ても、人力で輸送可能な範囲はせいぜい20 km圏内と考えられており⁹⁾、本研究で想定する半径32km以上の範囲の流通を全てカバーすることは難しい。

もう一つのコスト削減の方策は、尿とコンポスの減容化・減量化である。本研究で想定したコンポストトイレは、糞便の減容化・減量化に貢献しており、通常非攪拌式のドライトイレに比べれば有利であると考えられるが、尿については発生した量をそのまま集めるシナリオとなっている。尿をオンサイトで濃縮する方法は、いくつか提案されており、例えば、Pahore ら²⁴⁾の実験によって可能とされている尿の5倍濃縮を、各家庭で実施した場合、尿およびコンポスの費用は茶畑のケースで 1,020,000 IDR/ha まで下がり、化成肥料に対して政府による助成金が 50%程度支給されている状況でも、十分な競争力を持つことができると推測される。尿の濃縮は、肥料の利用者にとっても、貯留スペースの節約、尿の変質防止²⁴⁾といった使い勝手の向上が期待できるため、特に今後の技術開発が望まれる手法である。

4. 結論

本研究では、バンドン市周辺の肥料受給ポテンシャルを明らかにし、それに基づいてし尿肥料のコストを推定し、資源循環型サニテーションシステム導入に当たって必要な方策について検討した。その結果から以下のことがわかった。

- バンドン市内とその周辺地域でのし尿肥料の需給バランスを考えると、最大で半径 32km の範囲内における物質輸送が必要と考えられた。
- 具体的なケースとして、キアラチョンドン地区で収集した尿およびコンポストを茶畑および水田に輸送した場合を考えると、その想定される価格は、いずれのケースも、当量の化成肥料の国際価格とほぼ同等になると予想されたが、現状では化成肥料に対して 50%に及ぶ補助金が支給されているため、実際には尿およびコンポストの費用は現状の 2 倍程度に相当している。よって、尿およびコンポスト肥料をそのまま回収輸送したのでは、価格の面で化成肥料に対する競争力は無いと思われる。
- 収集輸送費は、輸送距離に関係なくかかる費用の割合が高いため、大幅なコストダウンを行うには、輸送距離の最適化よりも、尿のオンサイト濃縮等による収集輸送量の削減が効果的と考えられる。たとえば、尿を 5 倍濃縮できれば、十分な価格競争力を持つことができると推察された。

謝辞

本研究はJST-JICA、JST-CRESTおよび科研費基盤研究Sの助成を受けて実施した。記して謝意を表す。

(原稿受付 2015年2月27日, 原稿受理 2015年9月7日)

参考・引用文献

- 1) Lopez, Zavala, M., A., Funamizu, N., Takakuwa, T. (2001): Onsite wastewater differentiable treatment system: modeling approach, *Water Science and Technology*, Vol.46, No.6-7, pp.317-324.
- 2) 牛島健: 新しいトイレシステム導入による東南アジア都市部の水環境改善, 東京工業大学博士論文(2007)
- 3) Ushijima, K., Funamizu, N., Nabeshima, T., Hijikata, N., Ito, R., Sou, M., Maiga, A. H. & Sintawardani, N. (2015). The postmodern sanitation - Agro-sanitation business mode as a new policy-, *Water Policy*. doi:10.2166/wp.2014.093 (in press)
- 4) 楠本正康(1981): こやしと便所の生活史, ドメス出版, 202p.
- 5) 渡辺善次郎(1983): 都市と農村の間, 論叢社, 388p.
- 6) 三俣延子(2008): 都市と農村がはぐくむ物質循環—近世京都における金銭的し尿取引の事例—, *経済学論叢*, vol.60, pp.259-282.
- 7) BPS-Bandung (2009): Bandung Dalam Angka
- 8) BPS-Bandung (2010): Bandung Wetan Dalam Angka
- 9) BPS-Bandung (2010): Bandung Kulon Dalam Angka
- 10) BPS-Bandung (2010): Bandung Kidul Dalam Angka
- 11) BPS-Bandung Barat (2010): Bandung Barat Dalam Angka
- 12) BPS-Cimahi (2010): Cimahi Dalam Angka
- 13) BPS-Cianjur (2010): Cianjur Dalam Angka
- 14) BPS-Galu (2010): Galu Dalam Angka
- 15) BPS-Purwakarta (2010): Purwakarta Dalam Angka
- 16) BPS-Semedang (2010): Semedang Dalam Angka
- 17) BPS-Subang (2010): Subang Dalam Angka
- 18) 金澤健二 (2009): 都道府県の施肥基準値及び堆肥の施用基準値のデータベース並びに作物の収穫物の栄養含有率のデータベースとその利用法, 中央農研研究報告, Vol.12, pp.27-50.
- 19) USAID: Environmental services program: Comparative study Centralized wastewater treatment plants in Indonesia(2006)
- 20) Ken USHIJIMA, Mituteru IRIE, Neni SINTAWARDANI, Jovita TRIASTUTI, Umi HAMIDAH, Tadaharu ISHIKAWA, Naoyuki FUNAMIZU: Sustainable design of sanitation system based on material and value flow analysis for urban slum in Indonesia. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, vol.7, Issue 1, pp 120-126 (2013)
- 21) 牛島健, 入江光輝, Neni SINTAWARDANI, Jovita TRIASTUTI, 石川忠晴: バンドン市のスラム地区における屎尿コンポスト収集輸送システムの検討. *環境工学論文集*, vol.44, p505(2007)
- 22) Thomson Reuters (2015): <http://jp.reuters.com/investing/currencies> (参照: 2015/09/04)
- 23) FAO: Fertilizer use in Inodonesia (2005)
- 24) Pahore M.M., Ito R., Funamizu N. (2010): Rational design of an onsite volume reduction system for source-separated urine, *Environmental Technology*, vol.31, No.4, 399-408.