インドの UASB 処理方式下水処理場から発生する余剰汚泥及びバイオガスの実態調査

東北大学○木村快輔（学）、木更津高専　大久保努（正）、東北大学　井口晃徳（正）、李玉友（正）、原田秀樹（正）

1. 背景および目的

2008 年のデータではインド国は世界の GDP の約 2.1%を占めており、近年においても急速に経済が成長している。しかし一方で、年々増加する生活排水や工業廃水が未処理のまま河川や湖沼に流れ込み深刻な水質悪化を招いている。こうした背景から、インド政府環境森林省河川局は 1985 年より河川浄化事業を推進している。本事業により総数 313 ヶ所にも昇る下水処理場がヤムナー川、ガンジス川流域に建設された（総処理水量: 12,640,000 m^3/d）。本事業において中核を成す処理技術が UASB 法であり、本手法を導入した処理場によって総処理水量の 29%（3,670,000 m^3/d）が処理されている。

UASB 法は嫌気性処理法の一種であり、活性汚泥法などの好気性処理法に比べ、低コスト、省エネルギー、省スペースであるという利点を有する。加えて UASB 法から生成される物質、余剰汚泥とバイオガスは共に有効利用が可能とされている。余剰汚泥とはリアクター内の汚泥ウォシュアウトの防止や沈殿物除去のため、人為的に引き抜いた汚泥のことである。これはスラッジベッドにて乾燥後、肥料としての利用が可能とされている。バイオガスは主成分であるメタンを多く含んでおり、ボイラー燃料、ガスジェネレーターによるガス発電などに利用可能とされている。

しかしながら、インドを始めとする発展途上国ではこれらを有効利用するシステムが確立されていないと聞く。そしてその原因として、そもそも余剰汚泥およびバイオガスの価値が明らかにされていないという点が考えられる。本研究ではまずインド国にてヒアリングを行い、余剰汚泥およびバイオガスの有効利用の現状を調査した。次いで余剰汚泥の成分分析を行い、その市場価値を明らかにした。バイオガスについてはランニングコストと発電によって得られる利益を算出、比較し、その経済性を評価した。

2. 実験方法

2.1. 調査対象

本研究ではインド国ハリアナ州カルナール市の下水処理場において、余剰汚泥およびバイオガスの実態を調査した。カルナール下水処理場の UASB リアクターの条件を以下に示す。

（設計処理水量: 40,000 m^3/d, 平均流量: 23,000 m^3/d, 平均 HRT：15 h 、COD 負荷：約 0.6 kgCOD/m^3/d、全 COD 除去率：50~60%、全 BOD 除去率：50~60%）

2.2. 余剰汚泥の価値（汚泥採取・成分測定・価格計算）

余剰汚泥の価値を成分および面積あたりの使用量から算出した。処理場周辺の農家・市内の肥料店で市場価格および利用状況などのヒアリングを行った。

成分分析のサンプルとしてカルナール下水処理場の 6 つのスラッジベッドから十分に鍬で耕した余剰汚泥（500 mL x6）、周辺の農家から牛糞堆肥、マーケットにて購入した化学肥料の二リン酸アンモニウム（Di-Ammonium Phosphate：DAP）系肥料と尿素（Urea）系肥料を入手した。各測定項目は表 1 に示したとおり、pH、含水率、肥料成分濃度、重金属濃度を測定した。総炭素量、多量必須元素、微量必須元素は、乾燥重量あたりの濃度とした。また、測定項目別の測定方法を、表 1 に示す。

余剰汚泥の価値は以下の式から算出した（Rs.はルピーである）。

ha あたりの価格（Rs./ha = t あたりの価格（Rs./t）× ha あたりの窒素消費量 [1]（kg-N/ha） / 湿潤肥料中の窒素濃度（ppm = mg-N/L）・・・(式 1

本計算では肥料の代表成分として窒素を選択した。これは窒素がインド稲の生育に最も大きく影響するためである [2]。またトローリー（2 t）,トラック（10 t）による輸送コストを現地でのヒアリング結果から算出した。化学肥料はカルナールのマーケット価格より算出した。

表 1　各肥料の成分測定項目および方法

測定項目	対象試料	方法
pH	(a) 牛糞堆肥 (b) 余剰汚泥 (e) 化学肥料	比色式pH検定器
C, N		CHN計
P		ブランルーペ
K, Ca,		ICP-MS
Cu, Zn, Mn	(a) 牛糞堆肥 (b) 余剰汚泥	
Cr, Cd, Pb, As, Hg		

2.3. バイオガス発電の経済性（ランニングコスト算出）

バイオガス発電の経済性を評価するために、まずカルナール下水処理場の UASB リアクターから発生するバイオガスを設計した（実測は行われていない）。次いでカルナール処理場で実際に使用している二重燃料式発電を行った場合と、ガスフレアで燃焼させた場合のコストを比較した。ここで二重燃料式発電とはバイオガスを脱硫後、ディーゼル燃料と混合して燃焼させる方法である。

バイオガス発電・燃焼コストは以下の式にて算出した。

バイオガス発電コスト ＝ 初期コスト（ガスジェネレーター価格 ＋ 脱硫装置価格）＋ ランニングコスト（ディーゼル燃料費 ＋ 脱硫剤費 ＋ 維持管理費）－ 生産電力料（ガス発電にて生産された電力量を電気料金で示した価格）・・・(式 2

バイオガス燃焼コスト ＝ 初期コスト（ガスフレア価格）＋ 維持管理費・・・(式 3

カルナール下水処理場の UASB から発生するバイオガス中のメタン量は流入 COD 量あたりのメタン発生量 83 NL-CH4 / kgCOD added（日本国内下水 UASB リアクターの実験結果より）を用いて算出し、続いて脱硫剤費および生産電力料を算出した。

3. 結果および考察

3.1. 余剰汚泥の特性および価値

牛糞堆肥を試料（a）、カルナール市の下水 UASB 汚泥を試料（b）、インド国カンプール市の下水 UASB 汚

表 2　各肥料の特性および含有成分の濃度

対象試料	pH	含水率 (%)	C/N比	総炭素量	多量必須元素				微量必須元素(微量元素)		
				C (ppm)	N (ppm)	P (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)
(a) 牛糞堆肥	7.5	69.7	14.0	264,000	18,800	5,600	9,930	7,090	12.1	61.8	105
(b) カルナールUASB汚泥	7 (6.5-7.5)	59.4	11.5	179,000	15,600	3,900	2,570	1,340	84.9	473	140
(c) カンプールUASB汚泥 [4]	＞ 8.0		50.5	661,000	13,100	7,250	4,540		393	1180	220
(d) 下水消化汚泥 [3]	7.2	57.3	11.0	250,000	22,800	7,330	1,660	16,300			
(e) 化学肥料 （混合比 DAP :Urea =1 : 2）	7	2.55	0.4	131,000	354,000	63,400	902	708			

キーワード：インド、UASB、余剰汚泥、バイオガス

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学 環境保全工学研究室
TEL.022-795-7463　FAX.022-795-7465　e-mail：kimkai@epl1.civil.tohoku.ac.jp

泥[4]を試料（c）、日本国豊橋市下水消化汚泥[3]を試料（d）、化学肥料を試料（e）とする。

表 2 に各肥料の肥料成分測定の結果を示し他の文献値との比較を行った。各試料の pH は、試料（c）以外の試料でほぼ中性（7.0～7.5）であったが、試料（c）は pH 8.1 であった。実際の施肥においては土壌の pH が農作物にとって最適な pH になるように調整を行なっている。牛糞堆肥およびカルナール UASB 汚泥の pH はほぼ中性であり、農作物への阻害影響はないと考えられる。一方カンプール UASB 汚泥は pH 8.1 であり、土壌がアルカリ性となる可能性があるため、事前の pH 調整が必要と考えられる。

C / N 比については 11.0 ~ 50.5 と試料によって大きな差がみられた。これは総炭素量のばらつきが大きいことが原因と考えられる。有機肥料の C / N 比は一般的に施肥効果の即効性を示す指標とされ、小さければ施肥効果が早く現れ、大きければ窒素飢餓と呼ばれる土壌中の窒素不足を引き起こす。試料（a）、試料（b）および試料（d）の C/N 比は 10 前後であり、施肥をしてからの速効性が期待できると示唆された。一方、試料（c）の C/N 比は、50.5 と他の試料に比べ、著しく高く、窒素飢餓の原因に成り得ると考えられた。さらに、試料（c）は、Cu および重金属の環境基準を超えており、大量に施肥した場合に土壌障害を招く可能性があり、また、多量必須元素が少ないため、肥料として用いるのに適切ではないことが示された。また、試料（c）以外の試料については、成分調整を行わずに施肥が可能であることが示された。

牛糞堆肥および余剰汚泥において多量必須元素のうち N は化学肥料の 15 ~ 27 分の 1、P は 9 ~ 16 分の 1 であった。一方、K と Ca は化学肥料よりもそれぞれ 1.8 ~ 11 倍、1.9 ~ 23 倍豊富であった。多量必須元素のうち、肥料に最も必要とされるのは N であり、有機肥料では N を、化学肥料を使用するのと同等程度に補う必要がある。また化学肥料は水溶性で速効性があるが、流亡してしまう一方、試料（a） ～ （d）のような有機肥料は、遅効性であり、長期的な効果があるため、施肥回数が少なくすむことが期待できる。

微量必須元素 Cu、Zn については試料（a）、試料（b）はインドの環境基準（Cu: 270ppm, Zn: 600ppm）を満たしたが、試料（c）は Cu の基準値を超えており（1.5 倍）、土壌障害を引き起こす可能性があると考えられた。

表 3 に重金属成分の測定結果と基準値を示した。重金属については、試料（c）では基準値を大幅に超えたが、試料（a）、試料（b）では基準を満たしていた。高橋らは工場排水が含まれていない一般的な下水汚泥であっても、ある程度の重金属の含有は不可避であるとしている[3]。また、カルナール市には重金属関連の工場などはない。一方、カンプール市では化学系産業などが盛んである。つまり、インド国の下水 UASB 汚泥の重金属量濃度は流入水域の産業に依存すると考えられる。

表 4 に N, P, K の市場価格[4]より算出した各試料の価値、市場価格、ha あたりの肥料価格（式 1）を示した。試料 (a) と試料 (b) の含水率は、それぞれ、69.7、59.4%であり、含水率より各肥料の湿潤試料中の窒素成分を算出した（試料（a）：5,700,000 ppm, 試料（b）：6,330,000 ppm）。牛糞堆肥の価格は自家生産、自家消費のため Rs. 0 とした。試料 (b)（使用量が少ない場合）と化学肥料は、算出価値よりもそれぞれ Rs.36、Rs.1980 高い価格で販売されており、試料（a）とトラック運搬の場合の試料(b)はそれよりも、それぞれ Rs.201、Rs.19 安い価格で販売されていた。また、トラックで運搬した場合の試料（b）の ha あたりの価格およびハリアナ州の平均価格は化学肥料よりもそれぞれ Rs.120、Rs.4,000 安くなった。

3.2.バイオガス発電および燃焼のコスト評価

ガスジェネレーター価格はカルナール下水処理場で導入している Greaves Limited 社製ガスジェネレーターの価格 Rs. 1,700,000 × 2 台（耐用年数: 5.7 年）とした。ディーゼル燃料価格はインド国市場の平均価格 Rs. 36.33 / L を用いた。脱硫装置価格はインド国の平均的な脱硫装置価格 Rs. 5,000,000（耐用年数: 7 年）を用いた。脱硫剤費は脱硫剤に酸化鉄粉末を用いるとして、インド国内 11 社の平均価格 Rs. 33,067 / t を用いた。維持管理費は定期点検などにかかる費用とし、250 h の稼働につき Rs.34,000 とした（ヒアリング調査より）。生産電力料は 5 年分の統計から推算した 2010 年電気料金 Rs. 5.13 / kwh を元に算出した。ガスフレアの価格はインド国メーカーの標準価格 Rs. 600,000（耐用年数: 10 年）を用いて算出した。維持管理費は定期点検などにかかる費用とした。

表 5 より、同発電にかかる費用はディーゼル費が 3,000 Rs./m^3/year（総費用の 57%）となり最も高く、次いで脱硫剤費 2,000 Rs./m^3/year（41%）が高くなった。発生したバイオガスを発電した場合、329 kwh / m^3 / year の電力が生産されると試算された。生産された電力料金は総費用の 32%であり、コスト回収ができていない。ガス燃焼（4 Rs./m^3/year）とガス発電のコストを比較した際、圧倒的にガス発電の方が、費用が大きいことが分かった。本研究では、脱硫剤の再利用を仮定して計算を行っていないため、実際には脱硫剤費は算定値よりも安価である可能性がある。しかしながら、脱硫剤費用をいくら低減できたとしても、発電によって回収できる利益（電力料金）が、ディーゼル燃料にかかる費用には及ばないので、ガスジェネレーターによる二重燃料式発電は、採算が取れないと推察される。

4. まとめ

インド国下水処理場の UASB 法から発生する余剰汚泥を肥料として施用する場合は、流域の産業に留意する必要がある。本研究で調査したカルナール下水処理場のように一般下水のみを処理している場合では、成分調整を必要とせず施肥が可能であることがわかった（Cr < 0.5, Cd = 1, As = 5, Hg = T.R）。また、余剰汚泥の価格は運搬方法によっては化学肥料よりも Rs.120 から Rs.4,000 ほど安価である場合があることがわかった。また、本研究の対象の UASB 法から発生するバイオガスを、現状の方式の発電を行うと、採算が合わないと推察された（3,566 Rs./m^3/year の損失）。今後の予定としてインド国全域を対象に余剰汚泥とバイオガスの経済的利用価値について評価を行う必要がある。

表 3　各肥料中に含まれる重金属成分の濃度

試料および基準値	Cr (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)	Hg (ppm)
(a) 牛糞堆肥	＜0.5	T.R	4	＜0.5	N.D
(b) カルナールUASB汚泥	＜0.5	1	101	5	T.R
(c) カンプールUASB汚泥[4]	8,110	41	91		
肥料の基準値（日本）[5]	500	5	100	50	2
Indian Standard（土壌）[6]		3-6	250-500		

※ T.R＝極微量検出だが、計算値にて<0.5ppm 検量線の一番低い濃度よりもピーク面積は小さいが、たしかに目的の元素が少し含有していること

※ ＜0.5未満は機器が測定できる範囲では、ピークが全くないこと

表 4　ha あたりに使用される各肥料の価格

		肥料価値 (Rs./t)	肥料価格 (Rs./t)	ハリヤナ州のhaあたりの使用量の価格 (Rs./t)	実際の農家のhaあたりの使用量の価格 (Rs./t)
(a) 牛糞堆肥		201	0	0	0
(b) 余剰汚泥	トローリー (< 2 t)	139	175	4,090	4,380
	トラック (< 10 t)		120	2,810	3,000
(e) 化学肥料	混合肥料 (DAP :Urea =1 : 2)	5,020	7,000	2,930	7,000

※ 肥料価値：N, P, Kの成分量の市場価格より算出

※ 牛糞堆肥は自家生産および自家消費、Rs./t = 0

表 5　年間あたりのバイオガス利用コスト

ガス発電にかかる費用 (Rs./m^3/Year)					ガス燃焼
設備導入費	ディーゼル燃料費	脱硫剤 (Fe_2O_3)	維持管理費	生産電力料金	設備導入費
85	2,999	2,141	27	1,686	4

参考文献

1) Government of India, Agricultural Statistics at a Glance 2010, 2010.
2) 丸山他，日本作物学會紀事，57，692-698，1988.
3) 高橋他，日本土壌肥料學雜誌，50，273-284，1979.
4) Singh *et al.*, Chemosphere, 55, 227-255, 2004.
5) 農林水産省，汚泥肥料中の重金属管理手引書，2010.
6) Awashthi *et al.*, Prevention of Food Adulteration Act no 37 of 1954, 2000.