

B-60 リン供給源および燃料としての 家畜糞尿の資源的価値に関する調査研究

○孫 秀翠¹・高岡 昌輝^{1*}・大下 和徹¹・松川 和嗣²・藤原 拓³

¹京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 Cクラスター）

²高知大学教育研究部総合科学系生命環境医学部門（〒783-8502 南国市物部乙200）

³高知大学教育研究部自然科学系農学部（〒783-8502 南国市物部乙200）

* E-mail: takaoka@environ.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

日本において、畜産廃棄物の大部分を占める家畜糞尿は産業廃棄物であり、その発生量は年間約 9,000 万トンに達していると推定され、産業廃棄物全体の 20%を占めている¹⁾。家畜糞尿は、窒素、リンなどの肥料成分を豊富に含むため、その多くが、主に肥料として再利用されているが、農畜産の盛んな地域では、過剰の農地還元により、特に窒素による地下水汚染が問題になっている。一方、リンは枯渇資源とされており、日本においてはその全量を輸入に依存しているため、国内でのリン資源の確保やその循環利用が求められている²⁾。したがって、家畜糞尿に由来する窒素の過剰な農地への供給を防ぎ、リン資源を確保できるような家畜糞尿からの資源回収システムが、今後必要となってくると考えられる。

具体的な手段として、関戸らは、焼却により主に鶏糞中の窒素を大気還元する一方、焼却灰に濃縮されたリンを湿式回収する方法を検討しており重要な取り組みであるといえる³⁾。しかし、全国的にも量の多い牛糞尿については、同様の方法を試みた報告はされていない。家畜糞尿からリンを回収するためには、まず、回収量の把握が重要である上、焼却処理を通じて、灰からリンを回収する場合、家畜糞の元素組成や、燃料としての性質を把握しておくことも必要となる。

そこで本研究は、家畜糞尿を対象にそのリン供給源としての回収量や元素組成の把握、および燃料としての性質を調査することを目的とした。具体的には、家畜糞尿のリン濃度を調査した上、2007 年の日本におけるリンの物質フローをまとめ、家畜糞尿からのリン回収ポテンシャルを見積もった。またリン以外の化学的要素組成や、含水率、強熱減量、および発熱量を調査し、それらの化学的な特性や、燃料としての性質を明らかにした。

2. 実験方法

(1) 分析試料

本研究では、様々な家畜糞尿を調査対象として性状調査を行った。肉牛糞は高知大学農学部において、褐毛和種高知系の育成牛や月齢24ヶ月、および26ヶ月の肥育牛より計3種類を採取した。牛尿は月齢24ヶ月の肥育牛からサンプリングした。また敷料(おがくず等)を含む糞尿が、牛舎より排出され、一時的に野積みされた試料も対象とした。乳牛糞尿はホルスタイン一頭体から、豚糞尿、および鶏糞(採卵鶏由来)は、異個体の混合物として高知県立高知農業高等学校において採取した。

(2) 分析項目と分析方法

分析項目と分析方法をまとめて表-1に示した。

分析項目は、含水率、有機分として、VTS(強熱減量)、TOC(全有機炭素)、CHN組成、無機分としてFTS(強熱残留物)、リンなどの元素成分を測定した。また、高位発熱量も測定した。各分析は、1試料につき2〜3回行った。

表-1 分析項目と分析試料

分析項目	分析対象		分析方法	
	糞	尿	前処理、測定対象など	分析装置
含水率	●	—	110℃、24時間乾燥	電子天秤による重量測定
VTS, FTS	●	—	110℃、24時間乾燥後、600℃で3時間強熱	電子天秤による重量測定
TOC	●	—	110℃、24時間乾燥後、1N塩酸による前処理その後風乾	TOC-V _{CSH} SSM-5000A :島津製作所製
CHN組成	●	—	110℃、24時間乾燥	CHNコーダMT-2 :ジェイサイエンス製
元素組成1	●	—	110℃、24時間乾燥 S, Cl, Si, Br	蛍光X線分析装置ZSX PrimusII :リガク製
元素組成2	●	●	塩酸・硝酸による酸分解 Ca, Mg, P, K, Na, Fe, Al, Sn, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Ti, Cd	ICP発光分析装置 IRIS Intrepid Duo :サーモサイエンティフィック製
高位発熱量	●	—	110℃、24時間乾燥	ボンブ熱量計1013H :吉田製作所製

表-2 家畜糞の性状、組成分析結果

評価項目	単位	肉牛糞				乳牛糞	豚糞	鶏糞	下水汚泥	分析方法等	分析回数
		野積	育成牛糞	肥育牛糞1	肥育牛糞2						
含水率	%	80.6	81.0	77.7	79.8	86.8	72.9	77.0	80.1	乾燥機	2
TOC	%-TS	40.2	34.8	33.2	32.9	36.9	36.7	33.1	N.A	TOC計	3
C	%-TS	41.2	46.6	42.3	42.1	41.9	42.3	33.9	33.7	CHN	3
H	%-TS	9.83	8.01	6.94	7.33	7.00	7.47	4.84	9.30	CHN	3
N	%-TS	1.62	1.78	1.95	2.74	1.33	2.46	5.65	3.80	CHN	3
VTS	%-TS	82.6	92.2	89.4	84.1	89.3	83.4	72.4	82.0	電気炉	3
FTS	%-TS	17.4	7.80	10.6	15.9	10.7	17.6	27.6	18.0	電気炉	3
S	%-TS	0.46	0.24	0.28	0.35	0.24	0.46	0.50	N.A	XRF	2
Cl	%-TS	1.89	0.20	0.19	0.21	0.69	0.26	0.49	N.A	XRF	2
Ca	mg/kg-dry	7130	3810	9380	14800	6110	20100	40900	10800	ICP-AES	2
Mg	mg/kg-dry	3700	2090	2660	3920	2360	3550	3950	1700	ICP-AES	2
P	mg/kg-dry	6360	5500	10600	15800	3110	15500	15000	21200	ICP-AES	2
P in ash	mg/kg-ash	36600	71000	100000	99300	29100	88100	54200	118000	計算(推定)	—
K	mg/kg-dry	8220	2640	2720	2180	1960	3130	6600	611	ICP-AES	2
Si	mg/kg-dry	19600	12300	15600	15500	22600	5660	2290	N.A	XRF	2
Na	mg/kg-dry	8000	1440	2700	2130	3360	2910	2080	1050	ICP-AES	2
Fe	mg/kg-dry	3140	318	894	550	639	792	276	13100	ICP-AES	2
Al	mg/kg-dry	825	159	609	256	516	623	243	14400	ICP-AES	2
Sn	mg/kg-dry	1210	133	347	214	255	343	108	N.A	ICP-AES	2
Mn	mg/kg-dry	218	181	357	374	181	157	275	819	ICP-AES	2
Zn	mg/kg-dry	164	101	161	207	155	267	243	1850	ICP-AES	2
Cr	mg/kg-dry	25.3	4.87	6.82	15.3	6.34	3.35	2.90	237	ICP-AES	2
Cu	mg/kg-dry	22.9	16.8	26.7	34.9	41.7	79.0	27.9	405	ICP-AES	2
Ni	mg/kg-dry	4.40	3.21	4.32	4.29	3.44	5.93	5.22	55.7	ICP-AES	2
Pb	mg/kg-dry	6.05	2.26	2.00	1.65	1.04	2.98	1.10	32.0	ICP-AES	2
Ti	mg/kg-dry	20.4	6.13	26.5	6.51	6.72	15.9	N.D.	N.A	ICP-AES	2
Cd	mg/kg-dry	0.190	0.150	0.205	0.270	0.150	0.330	0.535	1.41	ICP-AES	2
Br	mg/kg-dry	142	39	31	40	96	27	44	N.A	XRF	2

肥育牛糞1: 月齢24ヶ月の肥育牛由来

肥育牛糞2: 月齢26ヶ月の肥育牛由来

N.D.: Not detected

N.A.: Not analyzed

表-3 家畜尿の性状、組成分析結果

評価項目	単位	肉牛尿	乳牛尿	豚尿	分析方法等	分析回数
Ca	mg/L	222	15.9	30.9	ICP-AES	2
Mg	mg/L	531	846	81.6	ICP-AES	2
K	mg/L	5150	3650	2790	ICP-AES	2
P	mg/L	121	103	527	ICP-AES	2
Na	mg/L	1000	146	434	ICP-AES	2

肉牛尿: 月齢24ヶ月の肥育牛由来

3. 家畜糞尿の分析結果、および考察

(1) 家畜糞の性状、組成分析結果

家畜糞の性状、組成分析結果を表-2に示す。なお家畜糞組成の比較対象として、森による下水汚泥(高分子凝集剤を用いた脱水汚泥)の分析値⁹⁾を同時に示した。

まず含水率は、乳牛糞で87%, 肉牛糞で約80%, 豚糞で74%, 鶏糞で77%程度であり、下水汚泥と比較して、ほぼ同程度であった。また、CHN組成分析によるC分とTOCとの比較から炭素分のほとんどが有機性であり、かつ下水汚泥よりC分の割合が高いため、下水汚泥のように乾燥、あるいは炭化させ固形燃料化できる可能性があると考えられた。Nは、鶏糞を除き3%以下であったが、鶏糞は5.7%と比較的高い値を示した。これは鶏は尿と糞と同時に排泄するため、尿中窒素の影響によると考えられた。

家畜糞中のリン濃度については下水汚泥よりもやや低い傾向にあるが、FTS、VTSの結果から灰中のリン濃度を推定すると2.9~10%程度と推定され、輸入リン鉱石中のリン濃度2~17%³⁾程度の品位を確保できることが推定された。また、Fe、Alなどリンと難溶性化合物を形成しやすい金属は、野積されたサンプル中のAlについてはやや高いが、下水汚泥に比較して少ないため、焼却灰からリンを抽出し、Ca塩等として回収する場合に有利であると考えられた。Zn、Cu、Cr、Cd、およびNiなどの重金属についても、下水汚泥に比較すると、全般的に非常に低いレベルであることが分かった。

(2) 家畜尿の元素分析結果

家畜尿の元素分析結果を表-3に示す。表に示していない元素については、0.01mg/L以下であった。尿中のリンについては、100mg/L以上の濃度であり、Ca、Mgについても比較的高い値であったが、Kが最も多く、2500mg/L以上であった。

(3) 家畜糞尿からリン回収ポテンシャルと物質フロー

家畜糞尿からのリンの最大回収量をリン回収ポテンシャルとして、本研究における組成分析結果を用いて試算した。具体的には表-2、表-3での各家畜糞尿中のリン濃度に各家畜由来の糞尿発生量を乗じることにより求めた。各家畜由来の糞尿発生量は、最新の農林水産省畜産統計にて報告されている各家畜の頭数⁵⁾に、家畜一頭あたりの糞尿発生源単位を乗じて求めた。これらの発生源単位は、家畜排せつ物法により一定規模以上の畜産農家に義務がある家畜排泄物記録シートのデータ⁶⁾から求めた。計算結果を表-4に示した。表-4より家畜糞尿のリン回収ポテンシャルとしては、家畜糞と尿の合計で 131.9×10^3 t/年であり、うち家畜糞が約9割を占め、特に肉牛糞と豚糞の回収ポテンシャルが高いことがわかった。

次に、家畜糞尿のリン回収ポテンシャルを評価するため、国内のリンの物質フローを作成した。具体的には、高岡が2000年について作成した方法⁷⁾、および鉄鋼や工

表4 家畜糞尿のリン供給ポテンシャルの試算結果

家畜種	頭数	糞発生 尿発生		家畜糞			家畜尿		
		原単位	原単位	発生量	リン濃度	リン量	発生量	リン濃度	リン量
		μ/年/頭	μ/年/頭	×10 ⁶ t/年	kg/t-wet	×10 ³ t/年	×10 ⁶ t/年	kg/t-wet	×10 ³ t/年
肉牛	2,806,000	6.9	2.4	19.4	2.3	44.5	6.7	120.8	0.8
乳牛	1,592,000	6.6	2.6	10.5	0.6	5.8	4.1	102.6	0.4
豚	9,759,000	1.0	2.0	9.6	4.3	41.1	19.3	527.0	10.2
鶏 月齢6ヶ月未満	142,765	0.022	-	3.1	3.5	10.7	-	-	-
鶏 月齢7ヶ月以上	105,287	0.050	-	5.2	3.5	18.3	-	-	-
合計				47.7		120.5	30.2		11.4

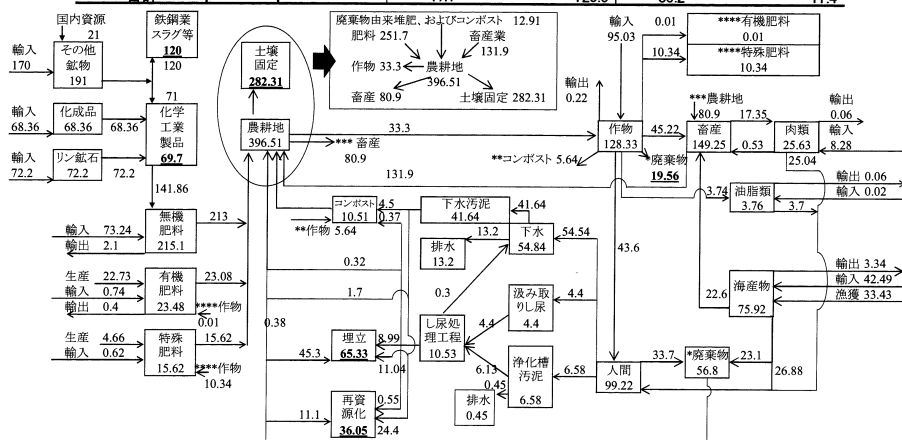


図-1 日本におけるリンの物質フロー図（2007年ベース）太字下線数字は国内蓄積分

業製品に関連しては文献⁹⁾にならない、2007年を基本として国内のリン物質フローを更新した(図-1)。ただし家畜糞尿中のリンに関しては2009年の表4の値を用いた。

図-1より、家畜糞尿中のリン量はリン輸入量+国内生産量の合計(612.8×10³t)の約1/5ではあるが、廃棄物系で性状が類似する下水汚泥(41.64×10³t)の約3倍であり、家畜糞尿のリン回収ポテンシャルは極めて大きいといえる。ただし、下水汚泥と異なり、家畜糞尿の場合は、分散して発生するため、今後、過剰な農地還元を防ぎつつ、リン回収ポテンシャルを最大限に生かせるような、最適な収集法や処理規模を考えていかなければならない。

(4) 家畜糞の発熱量測定結果

家畜糞の発熱量測定結果を表-5に示す。高位発熱量は、鶏糞以外は17.7~20.1 MJ/gであるが、下水汚泥と同様に、湿ベースでの正味の低位発熱量としては低く、-0.01~2.93 MJ/g程度であった。したがって省エネルギーの観点からは、焼却処理前に含水率を低下させておく必要があり、脱水・乾燥において、如何に省エネルギーで水分を抜くかということが重要になると考えられる。

謝辞：本研究は、科学技術振興事業団「JST」の戦略的基礎研究推進事業「CREST」における研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的技術とシステム」の研究課題「気候変動を考慮した農業地域の面的水管理・カスケード型資源循環システムの構築」の支援により行った。

表-5 家畜糞の発熱量分析、および計算結果

評価項目	単位	肉牛糞				乳牛糞	豚糞	鶏糞	下水汚泥
		野積	育成牛糞	肥育牛糞1	肥育牛糞2				
高位発熱量	MJ/kg-dry	17.7	18.7	17.8	18.1	18	20.3	13.4	19.9
低位発熱量	MJ/kg-dry	15.5	16.9	16.2	16.5	16.4	18.6	18.6	17.8
	MJ/kg-wet	0.86	1.08	1.66	1.08	-0.01	2.93	2.93	1.5

肥育牛糞1: 月齢24ヶ月の肥育牛由来、肥育牛糞2: 月齢26ヶ月の肥育牛由来

【参考文献】

- 1) 環境省・廃棄物・リサイクル対策部: 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 平成19年度, pp.13-24, 2009.
- 2) 黒田ら: リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol.4, No.2, pp.87-94, 2005.
- 3) 関戸ら: 家畜糞焼却灰からのリン回収方法の開発と回収性状, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.2, pp. 88-95, 2008.
- 4) 森: 種々の下水汚泥の熱分解特性と残渣及び生成ガスの利用に関する研究, 京都大学工学研究科都市環境工学専攻修士論文, pp.39-45, 2007.
- 5) 農林水産省: 平成21年度畜産統計, 2010.
- 6) 農林水産省生産局畜産部: 家畜排出物調査シート, 2010.
- 7) 高岡: 下水や廃棄物を中心とするリンの循環と再資源化, 第23回環境工学連合講演会講演論文集, pp.9-16, 2009.
- 8) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 鉱物資源マテリアル・フロー2007, pp.265-271, 2007.