

化学肥料のインベントリ分析および乳牛ふん尿処理物との比較検討

三津橋浩行, 浅野 孝幸, 鎌田 樹志, 佐々木雄真, 稲葉 敦*

Inventory Analysis of Chemical Fertilizer and Study on Comparison with Treated Dairy Cattle Manure

Hiroyuki MITSUHASHI, Takayuki ASANO, Tatsuyuki KAMADA
Takema SASAKI, Atsushi INABA*

抄 録

化学肥料について原材料調達から製品に至るまでのインベントリ分析を行った。また、乳牛ふん尿のメタン発酵処理液を肥料とした場合の処理工程におけるインベントリ分析を行い、化学肥料とのCO₂排出量の比較を試みた。

その結果、化学肥料は原料製造に至る過程でのCO₂排出割合が高い傾向を示し、特に原料の硫酸製造法が全体のCO₂排出量に対して大きく影響することがわかった。また、乳牛ふん尿のメタン発酵処理では発生するメタンガス全量をエネルギー源として利用することで化学肥料よりもCO₂排出量が低減する結果となった。

キーワード：化学肥料，乳牛ふん尿，メタン発酵処理，インベントリ分析，ライフサイクルアセスメント，環境負荷，畜産廃棄物

Abstract

An inventory analysis was conducted to analyze chemical fertilizer throughout its entire process, from the mining of resources to the manufacturing of product. Another inventory analysis was carried out on dairy cattle manure in the process of a methane fermentative treatment in comparison to chemical fertilizer.

Chemical fertilizer, in its raw material production, demonstrated the tendency of having a higher CO₂ emission rate. The manufacturing method of one of its raw materials, sulfuric acid, greatly affected the total amount of CO₂ emission. Meanwhile, in the methane fermentative treatment of dairy cattle feces and urine, by recovering and reusing the total amount of generated methane as an energy source, the environmental load showed a greater decline than that of chemical fertilizer.

KEY-WORDS : Chemical Fertilizer, Dairy Cattle Manure, Methane Fermentative Treatment, Inventory Analysis, Life Cycle Assessment, Environmental Load, Animal Waste

*産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

*Research Center for Life Cycle Assessment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

事業名：経常研究

課題名：LCA手法による廃棄物資源化における環境負荷の総合評価技術に関する研究

1. はじめに

地球温暖化等の環境問題が深刻化していることから環境負荷を低減した生産活動や消費行動が求められている。ライフサイクルアセスメント(以下LCA)は製品等のライフサイク

ルにおける環境負荷物質を定量的に算出して環境への影響を評価する手法である¹⁾。インベントリ分析はLCAの重要な実施手順であり、算出した環境負荷物質を段階別に整理、分析し、その結果を基に負荷低減に向けた検討が可能となる分析方法である。

化学肥料は重要な農業用資材であるとともに化学工業製品である。化学肥料の使用は農業生産性を向上させるが、工業的に生産される段階でのエネルギーの消費により環境負荷が発生する。そのため化学肥料の製品に至るまでの段階における環境負荷状況を調査し、負荷改善に向けた検討を行うことは今後の農業にとっても重要である。

乳牛ふん尿は古来より肥料として用いられてきたが、近年では悪臭や水質汚濁等の環境汚染が深刻な問題となり、汚染物質を低減化処理することが必要となっている。しかし、処理段階ではエネルギー消費により環境負荷が発生する。一方、ふん尿には有機物を多く含むことからエネルギー源として利用することが可能である²⁾。乳牛ふん尿は畜産廃棄物であり、廃棄物処理により得られた処理物や副産物を肥料やエネルギー源とする場合の環境負荷を明らかにすることは今後の環境汚染対策にとって重要である。

本研究では、LCA手法を用いて化学肥料の原料調達から製品製造に至る段階におけるインベントリ分析を行い、CO₂排出特性およびCO₂排出源に関して検討した。また、乳牛ふん尿のメタン発酵処理における排泄後から処理物に至るまでのインベントリ分析を行い、処理によって得られた副産物をエネルギー源とする場合のCH₄およびCO₂排出量を検討した。さらに化学肥料の代表的なデータを作成し、ふん尿処理物を肥料として利用する場合とのCO₂排出量を比較検討した。

2. 化学肥料のインベントリ分析

2.1 調査範囲および分析方法

2.1.1 調査範囲

化学肥料の大部分は窒素、リン、カリウム元素を含むものである³⁾。各元素の存在形態、含有量などの違いにより非常に多くの銘柄が存在し、各元素の基礎原料は全て輸入により供給されている。また、化学肥料の散布は各元素の含有量をN、P₂O₅、K₂O成分に換算して行われている。以上から化学肥料のインベントリ分析における調査範囲を次のように設定した。

○分析対象は窒素、リン、カリウムの1~3元素を含み、日本で流通する計20銘柄の化学肥料とした。

○対象範囲は資源の採掘、原材料の輸入、原材料の製造、製品の製造段階とした。輸入される原料および製品は輸入国別割合に応じて各国で製造されるものとした。

○機能単位はN、P₂O₅、K₂O成分の重量1kgであり、対象範囲においてエネルギー消費により排出される機能単位当た

りのCO₂量を算出した。多成分系である複合肥料では成分の重量によりCO₂排出量を各成分に配分した。元素の存在形態により肥効性が異なるが、今回は考慮していない。

表1 分析対象の化学肥料

	銘柄	成分含有率 %			年間消費量 t	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
窒素単肥	回収硫安	21.1			992,359	
	塩安	25.0			85,688	
	硝安	36.0			6,937	
	尿素	46.0			337,927	
	石灰窒素	22.6			122,044	
リン単肥	過リン酸石灰		17.5		151,329	
	重過リン酸石灰		43.5		44,002	
	重焼リン		35.0		95,322	
	熔成リン肥		20.1		195,114	
カリ単肥	塩加			63.2	177,704	
	硫加			54.1	212,010	
複合肥料	リン安	16.3	47.1		391,020	
	NPK化成	NPK化成1	22.0	11.0	11.0	148,848
		NPK化成2	17.0	17.0	17.0	
		NPK化成3	20.0	30.0		
	他複合肥料	硫リン安	19.0	42.0		1,874,428
		塩加リン安	14.0	14.0	14.0	
		リン硝安カリ	15.0	15.0	12.0	
硫加リン安		14.0	12.0	9.0		
	配合化成	15.0	15.0	11.0		

2.1.2 分析方法

各銘柄および原材料の製造データ、輸入データは文献³⁻⁹⁾をもとに作成した。電力やエネルギー等のバックグラウンドデータおよびインベントリ分析には資源環境技術総合研究所（現産業技術総合研究所）で開発されたNIRE-LCA Ver.3を用いた。ここでは製造における電力データは製造地(国)の電力構成に基づいて作成されている。

インベントリ分析ではNIRE-LCA Ver.3を用いて機能単位におけるCO₂排出量を算出し、原料製造、製品製造、公海上に分けて整理した。原材料と製品との境界は図1の鎖線で示すように製品の直接原料より上流の工程を原材料の製造とした。

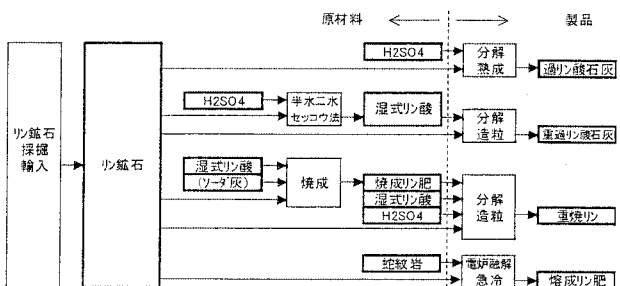


図1 分析に用いた製造フロー（リン単肥）

2.2 分析結果と考察

2.2.1 化学肥料のCO₂排出

元素含有率を考慮した化学肥料の機能単位あたりの排出量は図2に示すように各元素や銘柄の違いにより大きく異なる。塩加で最も低く0.4kg程度であるが、石灰窒素では12kg以上のCO₂を排出する計算結果となった。石灰窒素では低い窒素

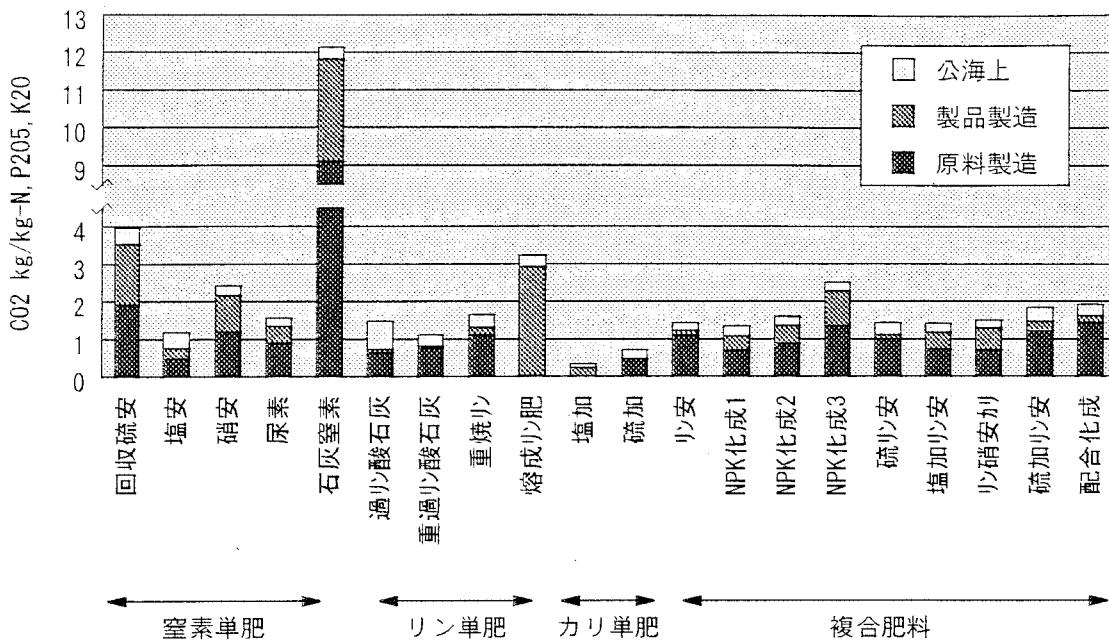


図2 化学肥料のCO₂排出量

含有率に加え、原材料のカルシウムカーバイド製造における排出が大きく影響していた。

2.2.2 化学肥料におけるCO₂の排出源

化学肥料では石灰窒素にも見られるように多くの銘柄で原材料製造におけるCO₂排出割合が大きいことが図2よりわかる。化学肥料では多種類の原材料が使用されているが、特に硫酸は肥料消費量の多い硫安や複合肥料へのリン成分の化合に用いられており、化学肥料の主要な原料として消費量が多い。このことから硫酸製造におけるCO₂排出が化学肥料全体のCO₂排出に大きく影響することが考えられる。

日本の硫酸製造は表2に示すように銅製錬工程で発生する製錬ガス(SO₂)と石油脱硫工程等で回収される硫黄を原料としたものが主流である¹⁰⁾。銅製錬時の製錬ガスおよび硫黄を原料とした硫酸製造の入出力データを図3に示す。ここで製錬ガス硫酸のデータは同時に製造される銅および金、銀との重量により入出力量を配分して作成されている。銅製錬ガスを原料とする硫酸製造では電力等のエネルギー入力にともなうCO₂排出が発生するが、硫黄を原料とした硫酸製造では硫黄の酸化燃焼時の熱回収によりエネルギーが出力されるため、全体ではCO₂排出が控除されている。

これらの入出力データをもとに日本で消費される化学肥料のCO₂総排出量を算出し、表3に示す。硫黄を原料とした硫酸を使用すると銅製錬ガスを原料とする硫酸に比べ約23%のCO₂が化学肥料全体で削減される結果となった。

以上から化学肥料のCO₂排出量は銘柄により大きく異なるが、原材料製造段階における排出割合が大きいことがわかった。さらに、原材料として化学肥料の主要原料である硫酸に着目して分析を行った結果、硫酸の製造法により化学肥料全

表2 日本における硫酸の製造

製錬ガス	4,136 千t	銅製錬	3,144 千t
硫黄	2,337 千t	鉛・亜鉛	
その他	317 千t	製錬	992 千t
計	6,790 千t		

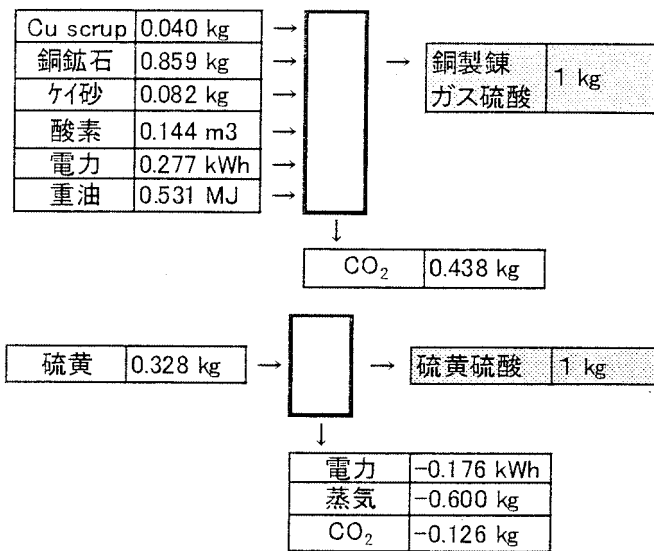


図3 銅製錬ガスおよび硫黄を原料とした硫酸製造

表3 硫酸製造法別の化学肥料におけるCO₂排出量

	銅製錬ガス CO ₂ 千t	硫黄 CO ₂ 千t
窒素単肥	1,478	1,112
リン単肥	252	165
カリ単肥	121	106
複合肥料	1,702	1,346
計	3,553	2,729

体のCO₂排出量が大きく影響されることがわかった。

3. 乳牛ふん尿のメタン発酵処理

北海道のある農家で環境汚染を防止するためにふん尿をメタン発酵処理し、肥料やエネルギー源として利用している。この農家は飼養頭数320頭(成牛換算)、飼養形態はフリーストールである。処理施設では排泄後のふん尿を貯留工程で貯留・攪拌した後、搾液工程でスクリーブレスを用いて固液分離する。固形分は堆肥化施設に送られ、液分をメタン発酵処理している。処理後の液は散布時期の調整のため調整工程で貯留・攪拌される。処理施設ではメタン発酵(35~40℃)および貯留、搾液施設の凍結防止のための加温を行っている。当初、全ての加温は灯油ボイラーを用いた温水循環により行い、発生ガス全量を放出していた。発生ガスは約60%がCH₄で残りのほとんどはCO₂である。現在は発酵工程の加温には発生CH₄の一部をガス給湯器で燃焼して得た温水を供給している。

この処理施設でのデータ¹⁾を基に乳牛ふん尿のメタン発酵処理におけるインベントリ分析を行った。

3.1 調査範囲および分析方法

3.1.1 調査範囲

乳牛ふん尿のメタン発酵処理におけるインベントリ分析の調査範囲を次のように設定した。

○分析対象はメタン発酵処理後の調整槽に貯留された処理液とした。

○対象範囲は図4に示す貯留工程から搾液工程を経て発酵工程、調整工程とし、散布及び散布後の段階については範囲外とした。

○機能単位は調整槽に貯留された処理液重量1kgとし、対象範囲におけるエネルギー消費によるCO₂排出量ならびにメタン発酵処理により発生する機能単位当たりのCH₄およびCO₂排出量を算出した。

3.1.2 分析方法

対象範囲における入出力データを施設での実測値および施設の計画消費量から算出し、作成した。表4に各項目のデータ作成方法を示す。発生CH₄の利用設備および利用率の異なる5条件を設定し、機能単位におけるCH₄およびCO₂排出量を分析した。各条件の利用率は処理施設の加温に必要な熱エネルギー供給を基準として設定した。各条件の概略を表5に示す。また、以下に各利用条件の特徴を示した。

(1) 未利用

施設設置当初の状況であり、処理施設の設置目的であるふん尿中の汚染物質の低減化を行い、発生ガスは大気中に放出する。処理施設の加温は灯油ボイラーを用いて得た温水の循環により行う。ボイラーの熱効率は80%である。電力は電力会社より供給される。

(2) ガス給湯器による利用

ガス給湯器は発生CH₄を利用する際にもっとも安価な利用設備である。処理施設の加温はガス給湯器を用いて発生CH₄を燃焼させて得た温水の循環により行う。給湯器の熱効率は70%である。電力は電力会社より供給される。

(3) コージェネレーションによる利用

処理施設は電力および加温のための熱エネルギーを必要とするが、コージェネレーションは発生ガスから両エネルギーを得られる利用設備である。加温に必要な熱エネルギー分をコージェネレーションで供給するものとし、発電効率および熱効率はそれぞれ30%および50%とした。同時に得られる電力は

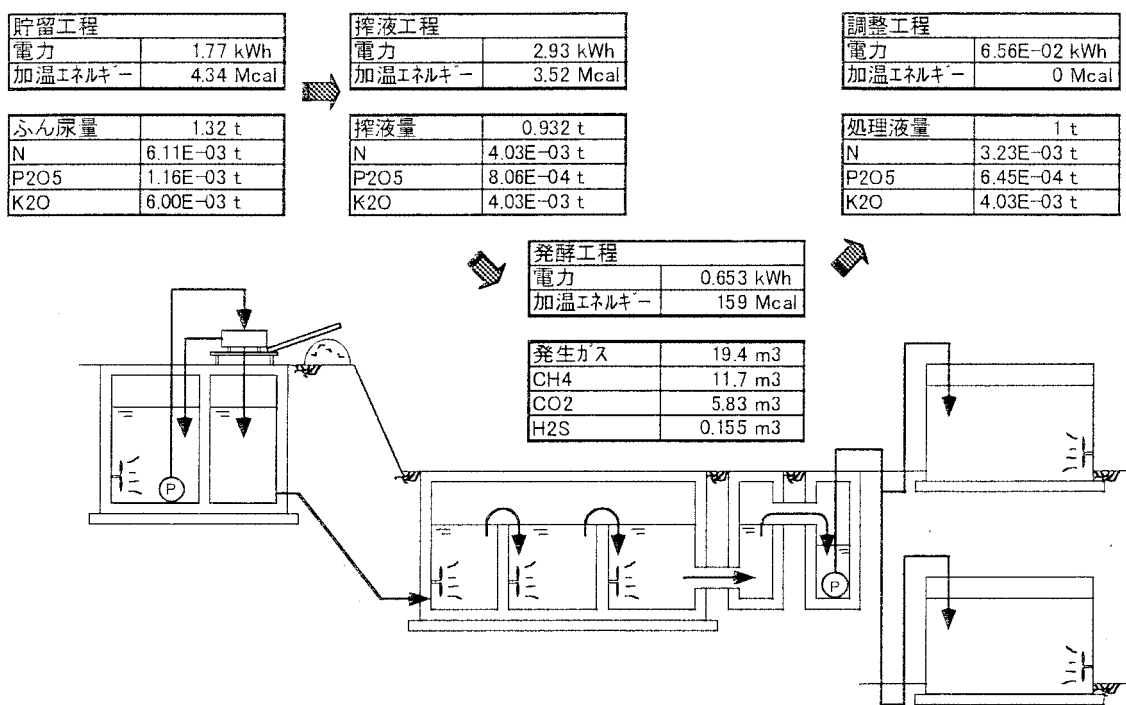


図4 メタン発酵処理フロー

表4 データ作成方法

液量	貯留工程(ふん尿量) : (排泄量 60kg/頭・日 + 洗浄水 10kg/頭・日) × 320頭 × 365日 搾液工程(搾液量) : ふん尿量 × 固液分離率 調整工程(処理液量) : 搾液と処理液のK ₂ O量一定として推算
N,P ₂ O ₅ ,K ₂ O成分量	各液量 × 実測濃度
固液分離率	分離液 / 原料ふん尿 = 0.71(wt./wt.)
ガス発生量	実測値
発生ガス成分量	ガス発生量 × 実測濃度
電力	設置装置の計画使用量(出力 × 計画日稼働時間 × 365日)
加温エネルギー量	灯油(8,900kcal/l)使用時の実測値からボイラー効率80%として算出

施設需要よりも過剰となるが余剰電力は施設外に供給するものとし、電力会社からの電力に換算して排出物を控除した。

(4) コージェネレーションおよびガス給湯器による利用

処理施設に必要な電力分をコージェネレーションにより供給し、不足する加温分の熱エネルギーをガス給湯器を用いて供給する。この設備形態は北海道内で数カ所の農家に導入されている。

(5) 全量利用

発生するガス全量をコージェネレーションを用いて電力および熱エネルギーに変換し、施設内外に全てを供給するものとした。余剰エネルギーは灯油および電力会社からの電力に換算して排出物を控除した。

表5 発生ガス利用の設定

条件No.	1	2	3	4	5
CH ₄ ガス利用設備	なし	ガス給湯器	コージェネ	コージェネ&ガス給湯器	コージェネ
工程所要電力供給	買電	買電	コージェネ	コージェネ	コージェネ
工程所要熱供給	灯油ボイラ	ガス給湯器	コージェネ	コージェネ&ガス給湯器	コージェネ
ガス利用率	0%	31%	43%	35%	100%
余剰エネルギー	なし	なし	電力	なし	電力熱

3.2 分析結果と考察

メタン発酵処理におけるインベントリ分析の結果を図5に示す。また、各条件下でのCO₂の排出を電力、熱エネルギー、CH₄燃焼によるCO₂も含めた発生ガスに分けて分析し図6に示した。

発生CH₄を利用せずに処理を行った場合、CH₄およびCO₂排出量はそれぞれ約0.008kg/kg-処理液、約0.023kg/kg-処理液であった。年間ではCH₄が約50 t、CO₂が約140 tも排出されることになる。発生CH₄の利用によりCH₄はもちろん、CO₂排出量も削減され、全量利用では約62%のCO₂が削減されることになった。図6より未利用ではCO₂排出量の約半分は施設に投入された電力および熱エネルギー消費に由来することがわかる。発生CH₄の利用によりこれらのエネルギー消費に由来する排出量が低減し、その低減量がCH₄燃焼による発生ガス由来の増加量よりも大きいため全体のCO₂排出量が削減されている。

処理施設の加温に必要なエネルギー分を基準とした場合(条件2~4)の各利用設備での発生CH₄の利用率は31~43%、CO₂削減率は8~24%であった。コージェネレーション単独が最も利用率および削減率が高いが、これは余剰電力を施

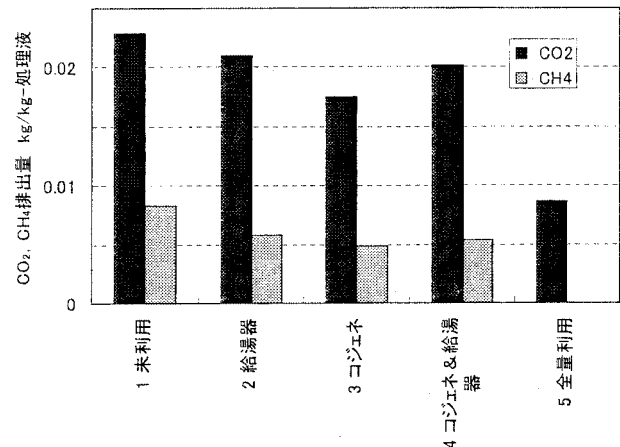


図5 メタン発酵処理におけるCH₄およびCO₂排出

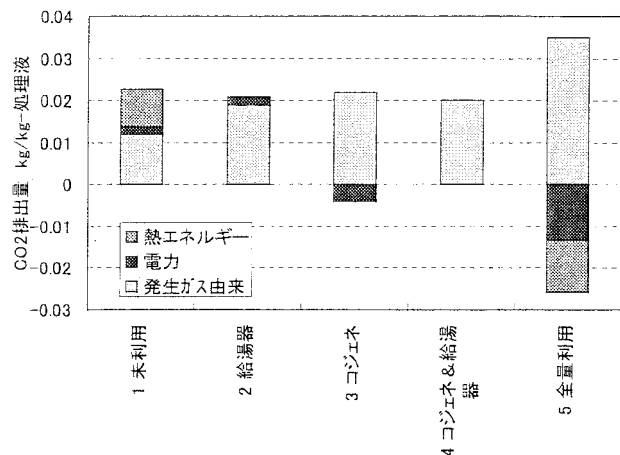


図6 メタン発酵処理におけるCO₂排出源

施設外に供給しているためである。発生CH₄の利用を処理施設内に限定した場合(条件2, 4)ではCH₄の利用率は31~35%、CO₂削減率は8~12%程度であった。

以上からメタン発酵処理では処理工程において多量のCH₄およびCO₂が排出されるが、発生CH₄の利用によりCH₄はもちろん、CO₂排出量も削減されることがわかった。しかし、発生CH₄の利用を処理施設内に限定した場合には削減率は低く、CH₄およびCO₂が温暖化ガスであることから地球温暖化を防止するためにも全量利用が望まれる。

4. ふん尿処理液と化学肥料との比較

ふん尿処理液中には肥料成分であるN、K₂Oを多く含み、

肥料として利用されている。

そこで草地に対する標準施肥量を基準として処理液と化学肥料のCO₂排出量を比較した。

4.1 調査範囲および分析方法

機能単位を草地10 a とし、標準施肥量(N:16kg, P₂O₅:8 kg, K₂O:22kg)¹²⁾を供給する処理液と化学肥料のCO₂排出量を比較した。対象範囲はこれまでと同様であり、化学肥料および処理液はそれぞれ製品製造段階までのCO₂排出量および処理工程におけるCO₂排出量の分析データを用いた。施肥にかかる輸送および散布段階は範囲に含めていない。

化学肥料は各成分での総排出量を積算し、これを成分消費量で除すことにより成分1 kgあたりの排出量データを作成した。表6に各成分の排出量データを示す。これを標準施肥量で積算して機能単位当たりのCO₂排出量を算出した。

処理液のデータは、成分量から10 a 当たりの処理液量を5.25 tとし、不足するP₂O₅を4.6kgの化学肥料で補うものとして機能単位当たりのCO₂排出量を算出した。ここで処理液の肥効性については化学肥料と同様に考慮していない。機能単位当たりのCO₂排出量を発生CH₄の未利用および全量利用について分析し、化学肥料と比較した。

表6 化学肥料の成分別CO₂排出量

	成分消費量 t	CO ₂ 総排出量 t	CO ₂ 単位排出量 kg/成分kg
N-化学肥料	735,000	1,800,000	2.44
P ₂ O ₅ -化学肥料	564,000	833,000	1.48
K ₂ O-化学肥料	483,000	540,000	1.12

4.2 分析結果

草地10 a を機能単位とした化学肥料またはふん尿処理液のCO₂排出量を図7に示す。発生CH₄を全量利用することにより処理液のCO₂排出量が約50kg/10aとなり、化学肥料の約

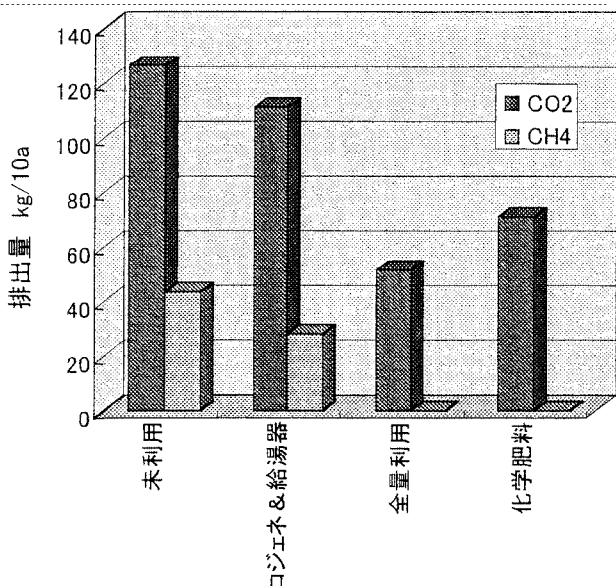


図7 ふん尿処理液と化学肥料のCO₂排出量

80kg/10 a よりも低い排出量となった。廃棄物処理であるふん尿処理によりCO₂排出量も削減される結果となった。

5. まとめ

LCA手法を用いて化学肥料の製造段階に至るまでのインベントリ分析を行い、化学肥料のCO₂排出特性および排出源を明らかにした。さらに排出源を検討し、化学肥料全体の負荷低減化の可能性を見出した。

乳牛ふん尿のメタン発酵処理では処理液の処理工程におけるインベントリ分析を行い、処理によって得られるCH₄をエネルギー源とする場合のCH₄およびCO₂排出量を明らかにした。ふん尿処理は廃棄物処理としてふん尿により引き起こされる地域的な環境汚染を防止することが最も優先する役割であるが、地球温暖化も世界規模の環境問題として対策が急務となっている。今回の検討では発生CH₄の有効利用によりCO₂排出量をも十分低減できる可能性を見出した。

謝辞

本研究を行うにあたり共同研究者である産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターの稲葉センター長ならびに旧資源環境技術総合研究所エネルギー資源部エネルギー評価研究室の皆様にはご指導、ご鞭撻を頂きました。この場を借りまして厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) LCA実務入門編集委員会：LCA実務入門，産業環境管理協会，149pp.，(1998)
- 2) 農文協：畜産環境対策大事典，農山漁村文化協会，797pp.，(1995)
- 3) 久保輝一郎・荒井康夫：新版化学肥料，大日本図書，236pp.，(1977)
- 4) 日本化学会：化学便覧応用編，丸善，1916pp.，(1973)
- 5) 日本化学会：化学便覧応用化学編1，丸善，854pp.，(1995)
- 6) 化学工学協会：化学プロセス集成，東京化学同人，1075pp.，(1970)
- 7) 13599の化学商品，化学工業日報社，1868pp.，(1999)
- 8) 通商産業大臣官房調査統計部：平成10年度化学工業統計年報，通商産業調査会，233pp.，(1999)
- 9) 日本貿易月表 '98.12，日本関税協会，(1998)
- 10) 硫酸手帳，硫酸協会，261pp.，(1999)
- 11) 北口敏弘・三津橋浩行ほか：乳牛糞尿の嫌気発酵生成メタンガスの利活用技術(第1報)，北海道立工業試験場報告，No.296，pp.77-81，(1997)
- 12) 北海道立農業・畜産試験場家畜糞尿プロジェクト研究チーム：家畜糞尿処理・利用の手引き1999，北海道立新得畜産試験場，123pp.，(1999)