

第6章 温暖化緩和策としての家畜ふん尿の液肥利用の多角的評価

－中国江蘇省金壇市を事例として－⁽¹⁾

國井大輔

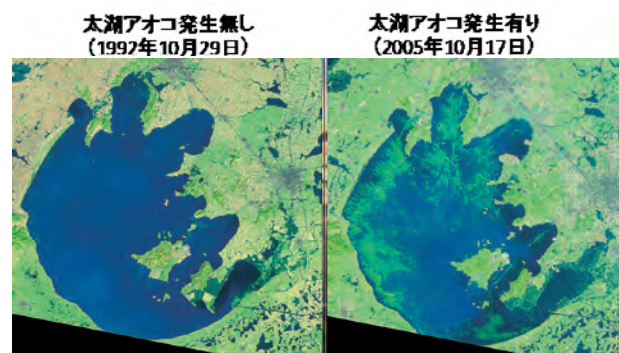
高橋義文（中央水産研究所）

林 岳

田中宗浩（佐賀大学農学部）

1. はじめに

中国では近年の急速な経済発展に伴い水質汚染が拡大している。例えば，中国第3の湖である太湖では，2007年に大規模なアオコの発生に伴い，太湖の水が飲用水源として利用できなくなる社会問題まで発生している（第1図）。太湖の流域は江蘇省，浙江省，上海におよんでおり，太湖への工業および生活排水の排出量の77%が江蘇省由来とされている（水落（2009））。さらに，COD，全窒素（T-N），全リン（T-P）の負荷量は農村面源由来の割合が高く，農村域から水系に排出されるこれらの汚染物質を減少させることは太湖流域全体にとって極めて重要である。



第1図 太湖におけるアオコ発生の様子

太湖流域内に含まれる金壇市では，現在市内でおおよそ100万頭もの豚が飼育されており，養豚由来の家畜ふん尿の発生量も膨大である。このようなことから，近年中国政府は，農家の生活改善および環境保全の側面から畜産経営体に対してメタン発酵装置の導入を積極的に行っている。メタン発酵装置は家畜ふん尿を原材料にメタン発酵させ，そこから発

生するメタンガスで発電を行うものである。メタン発酵装置によって温室効果ガス（GHG）の削減効果もあるとされるが、これらの取組はその主目的が温暖化緩和ではなく水質汚濁の改善にあるため、本研究での広義の温暖化緩和策に該当する。さらに、メタン発酵後の消化液は液肥として利用されるため、メタン発酵装置を適切に利用すれば農業生産において化学肥料の投入量も削減されるなど経済と環境の両面でさまざまな効果を発揮することが知られている。このようなメタン発酵施設の導入は日本でも各地で取り組まれており、クリーン開発メカニズム（CDM）の制度を利用して中国におけるこれらの取組を日本が支援することにより、GHG 削減分を日本の削減分として計上することができ、我が国の温暖化緩和策の 1 手段となりうる。

しかしながら、このような広義の温暖化緩和策を継続的に実施するためには、メタン発酵及び液肥の原料となる家畜ふん尿の供給量がどのくらいあり、それによってどの程度の化学肥料を代替できるのかを明確にする必要がある。さらには、メタン発酵と液肥利用の取組主体である養豚業者と耕種農家との間で経済的に十分なインセンティブが与えられていなければ、これらの取組も持続的なものとはならず、温暖化緩和策としても十分な効果を発揮することができない。

そこで本研究では、広義の温暖化緩和策として、中国金壇市における養豚業から発生する家畜ふん尿に着目し、以下の 3 つの視点から多角的な評価を行うことを目的とする。

- (1) 温暖化緩和策としての GHG 削減効果の計測
- (2) 消化液供給量から見た液肥の供給可能面積の推計
- (3) 液肥供給の経済的持続可能性の評価

具体的には、金壇市の大規模養豚業の 1 つである金谷牧業を事例として、メタン発酵装置導入とそこから発生する消化液の液肥利用による GHG 削減効果と液肥散布可能面積を評価し、さらに養豚業者による液肥供給が経済的に持続可能なものとなるための条件抽出を行う。

2. 中国江蘇省金壇市と金谷牧業の概要

（1）金壇市とその周辺の概要

江蘇省常州市金壇市は、上海市から約 250km 西側にある人口約 54.9 万人（2006 年）の県級市である（第 2 図）。金壇市の属する江蘇省は比較的上海に近く、北京－上海間の高速

鉄道が通ることから、他の省に比べると経済的に裕福な地域（1人当たり GDP は中国国内で 5 位，人間開発指数（HDI）は 7 位）である。上海市と金壇市の間には中国国内で 3 番目の面積を誇る淡水湖，太湖がある。しかし，近年の中国の著しい経済発展と人口増加によって，都市排水，工業排水，農業排水などが太湖に流入し，藻類の発生や悪臭などの環境問題を引き起こしている。特に金壇市は畜産の盛んな地域でもあり，2010 年における出荷数では豚が 23.4 万頭，家禽が 2,820 万羽と，生産量はここ 10 年で急速に拡大し，生産額も 3 倍以上に増加した。年間 1,000 頭以上の豚を出荷する養豚場数は 2008 年で 40 か所となっており，急速な生産拡大のため，家畜ふん尿による周辺水域の水質汚濁問題が深刻化している。また，金壇市周辺の水域ではカニやエビなどの養殖も盛んで，水産業へ与える影響も懸念されている。水落（2009）によると，太湖の水質環境悪化の主要成分は全窒素であり，窒素の発生負荷の 70% が江蘇省からのものである。さらに，湖水へ流入してくる窒素の内訳をみると，都市排水は 19%，工業排水は 29%，農業排水は 52% と農業排水からのものが圧倒的に多いと指摘している。そのため，太湖の水質改善には，農業由来の窒素を適正な水準で施肥・管理することが重要なポイントの 1 つになっている。



第 2 図 中国江蘇省常州市金壇市と養豚業者の所在地

資料：左地図著者が現地購入したもの，右地図は Google map より。

（2）金壇市金谷牧業のメタン発酵装置とその生産過程

このような問題へ対応するため，中国政府は養豚業者に家畜飼養頭数の削減を指示しているほか，ふん尿を処理するため農村地域ではメタン発酵の事業が推進されており，すべての養豚業ではメタン発酵事業が導入され，2011 年現在メタンガス利用数は 2800 戸にも

達している（呉（2012））。メタン発酵によるメタンガスを利用した発電を行い、発酵に伴う消化液を農地利用することにより、家畜ふん尿の有効利用が可能となる。しかし養豚業の規模拡大とメタン発酵事業の進展に伴い、消化液の発生量も増加しその処理・有効利用が課題となっている。消化液の河川への放出による水系の水質汚濁が懸念されており、また上流域の養豚場による水質汚染は、金壇市の主要産物であるカニやエビなどの水産養殖業へ影響を与える可能性もある。このようなことから、結局は消化液の有効利用を図らなければメタン発酵をせずに家畜ふん尿を水系に放出することと変わらず、水質汚濁問題は解決しない。このような背景から、金壇市薛埠鎮では 2010 年より消化液の水田利用プロジェクトを行っており、消化液の液肥利用による水系への環境負荷軽減と、化学肥料使用量の軽減の効果が期待される。運搬にかかるコストや環境負荷を考慮すると、地域で生産された資源は地域の中で利用されることが望ましいことから、本研究では養豚場で生産された消化液を養豚場のある地域の水田で液肥として利用することを検討する。

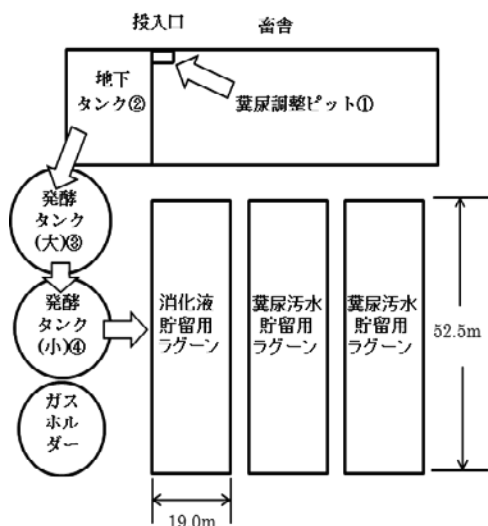
次に、金壇市の養豚金谷牧業の概要について聞き取り調査をもとに述べることにするが、聞き取り調査の制約によりデータを入手することができなかった項目が数点ある。その項目については、可能な限り妥当な係数の採用ないしは計測方法で推計して対応しており、以下では、聞き取りをもとにした概要と聞き取り調査で得られなかったデータについては推計方法について解説する。

金谷牧業は、養豚施設（畜舎と肥料庫）とメタン発酵施設（攪拌・発酵タンク、液貯めタンク、浄化房施設、ガスホルダーなど）を所有しており、その設備は比較的近代的である（第 3 図、第 4 図）。畜舎内で排泄されたふん尿は、畜舎隅の投入口から地下タンクへ送り込まれ、そこから発酵タンクへと移動し、発酵後は消化液貯留用ラグーンへと流れていくことになる。2010 年の聞き取り調査によると、金谷牧業の飼養頭数は 17,000 頭であり、年間 34,000 頭を出荷していた。翌 2011 年の調査では、母豚の飼養頭数が 2,500 頭であることを聞き取ることができた。しかし、母豚の一般的な出生サイクルや 1 日あたりの家畜ふん尿の排出量と年間の出荷頭数を検証するとそれらの間には整合性がなく、いずれかのデータに不備のある結果となった。そこで本研究では、飼養頭数の元となる母豚 2,500 頭の聞き取り結果を金谷牧業のベースとして年間飼養頭数を 52,500 頭と推計し、この値を採用することにした⁽²⁾。

また、金谷牧業の養豚場から排出される家畜ふん尿量についても同様に、一般的な母豚と子豚の体重別の排出係数を用いて一日当たりの排出量を 116t と推計した⁽³⁾。排出された

ふん尿の約半分は外部の堆肥業者が有料（200 元/t）で運び出し、残りの半分はメタン発酵タンクに運ばれ処理されることになる。メタン発酵タンク内で発生する CH_4 ガスは季節の寒暖によってふん尿の発酵速度が異なるため（春秋 9h/日，夏 10h/日，冬 6～8h/日），安定的なガス供給が可能というわけではない。発生した全てのメタンガスは電力生産に利用されており，1 日当たり 900 度（1 度=1,000W，年間 32 万 8,500kW）の発電が可能であり，金谷牧業内の消費電力の 80%を賄っている。発電した電力の用途は AM9～11 時の家畜飼料の加工と PM6～9 時の夜間照明などに利用されている。

なお，メタン発酵後の消化液は液肥として周辺農家の水田約 4ha に利用されており，基肥と追肥で複数回に分けて 1 作期で 2 回散布し，農家からも良い評価を受けている。2012 年の聞き取り調査では，液肥の利用を希望する周辺農家の戸数が増加傾向にあることがわかった。



第3図 金谷牧業のメタン発酵装置



第4図 金谷牧業で発生するふん尿の利用サイクル

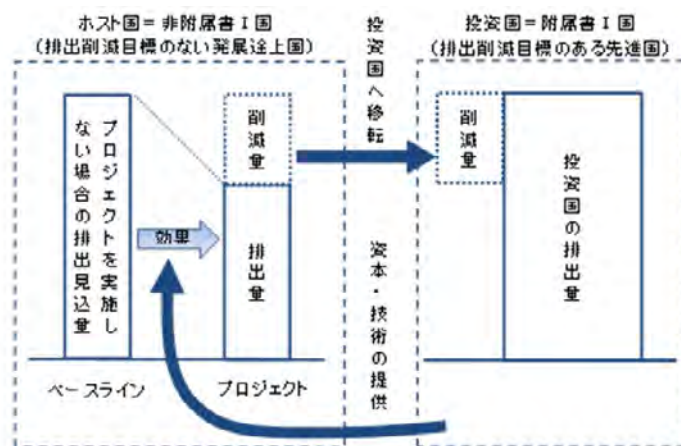
3. メタン発酵・液肥利用による温暖化緩和効果の評価

（1）クリーン開発メカニズム（CDM）の概要

1）クリーン開発メカニズムとそのプロジェクト承認プロセス

クリーン開発メカニズム（CDM）は，1997 年 12 月京都の気候変動枠組条約第 3 回締約

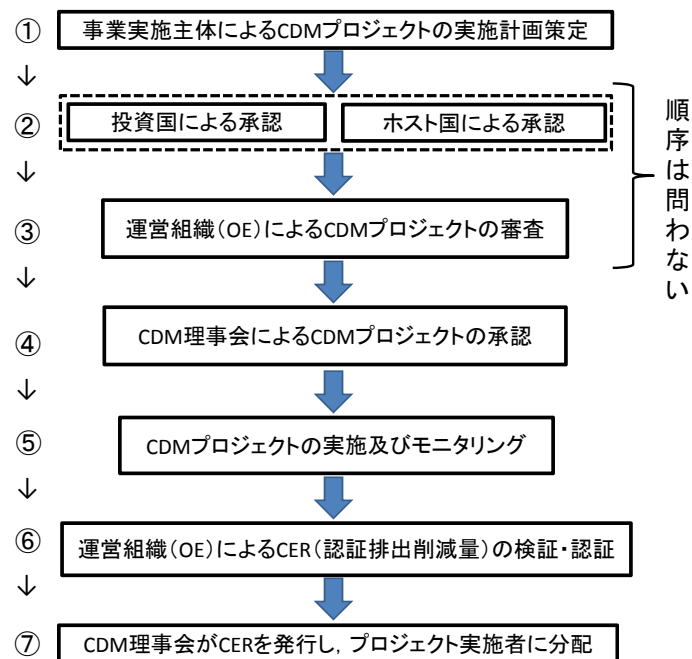
国会議（COP3）で決定された気候変動枠組条約の議定書（京都議定書）の第12条で規定された柔軟性措置の一つである。柔軟性措置には、CDM 以外にも排出量取引（ET：Emission Trading, 同第17条）や共同実施（JI：Joint Implementation, 同第6条）などがある。CDM と後者2つの違いは、CDM が GHG 削減義務を負う附属書 I 国⁽⁴⁾と削減義務を負わない非附属書 I 国⁽⁵⁾との間でやり取りが行われることである。非附属書 I 国は、自国内で附属書 I 国の技術・資源等を受けて GHG 排出量の削減または吸収量を効率的に増加させ、その成果の一定量を支援元（附属書 I 国）の GHG 排出量の削減分に充当することができる制度である（第5図）。一方、後者2つは排出義務のある附属書 I 国間でやり取りされる制度であることから、附属書 I 国の総排出量が増加しないなどのメリットがある。



第5図 CDM の仕組み

次に、実際に CDM プロジェクトを行う際の手続きを紹介する（第6図）。CDM プロジェクトの手続きは第6図に示す通り、幾つかの手順を踏まえて行われている。初めに①事業実施主体がプロジェクトの特徴と様々な条件を考慮してプロジェクト設計書（PDD：Project Design Document）を作成する。プロジェクト設計書には、ベースライン方法論やモニタリング方法論など重要な技術的・構造的な情報が記入される。②ホスト国を含む関係締約国による承認が行われ、③CDM 理事会の指定する運営組織によってプロジェクト設計書の妥当性確認が行われる。妥当性確認では、プロジェクトの実現可能性や GHG 排出削減量の計算方法が妥当であるかなどのチェックが行われる。④妥当性確認を通過したプロジェクトは、CDM 理事会を通して登録される（登録には所定の登録料が必要）。⑤

登録されたプロジェクトのモニタリングがプロジェクト設計書の計画に従って実施され、ベースラインシナリオの GHG 排出量とプロジェクトシナリオの GHG 排出量の両方を測定・計算するためのデータ収集と記録が行われる。⑥これらモニタリングの結果は、定期的に運営組織（OE）によって検証され、排出削減量が決定される。⑦以上のプロセスを得ることで、CDM 理事会は運営組織（OE）が認証した排出削減量（CER：Certificated Emissions Reduction）を発行し、当事者間同士で分配することになる。



第 6 図 CDM プロジェクトの承認と CER が配分されるまでの流れ

資料：農林水産省 (online)

注 1 運営組織（OE）は CDM 理事会が指定する第三者機関である。

2）CDM の活動規模別・活動種類別分類

CDM プロジェクトを申請する際のプロジェクト設計書の作成は、その活動種類や活動規模に適した形で作成する必要がある。まず、活動規模が通常規模なのか小規模なのかに分けられる。小規模の定義は、タイプⅠ～Ⅲに分けられており、タイプⅠは最大出力が 1.5 万 kW までの再生エネルギープロジェクト、タイプⅡはエネルギー供給または需要サイド

における年間の削減エネルギー量が 6,000 万 kW（または同量相当分）までの省エネルギープロジェクト，タイプⅢは年間の排出削減量が二酸化炭素換算で 6 万 t 未満のプロジェクトとなっている。これらタイプⅠ～Ⅲに該当する規模であれば，プロジェクトは小規模 CDM プロジェクトとなる。次に，CDM プロジェクトの活動種類が既に CDM 理事会によって承認されているプロジェクトであれば承認簡易方法論（通常規模の場合は承認方法論）ありと判断され，プロジェクト設計書の作成に取り掛かることができる。しかし，承認されていないプロジェクトであれば，新方法論提案という形で CDM 理事会による新方法論承認のプロセスを通過する必要がある。そのプロセスを踏まえないとプロジェクト設計書の作成段階に進むことができないため，新たな活動種類の CDM を実施することは時間的労力の取られる活動種類と言える。

（２）計測方法と計測結果

１）はじめに

本小節では，金谷牧業と周辺農家が液肥利用を行うことによる GHG 削減の効果を計測する。家畜ふん尿から発生するメタンを正確に計測するには長期間のモニタリング調査を必要とするが，調査対象の金谷牧業の事業規模が小規模かつ農業カテゴリー（家畜ふん尿のメタン発酵）に該当することから，既に CDM 理事会で承認されている既存プロジェクト AMS.III.D.ver.18 を採用した⁽⁶⁾。

計測の基本は，ベースラインとなるプロジェクト実施前の数値とプロジェクト実施後の数値を求め，それらの差分を求めることである。そのため，ベースラインとなる数値の計測は「メタン発酵装置が設置される前の状況であり，オープンラグーンに家畜ふん尿が蓄えられている状況」と仮定し，プロジェクト実施後の数値の計測は「メタン発酵装置が設置され，消化液が液肥として有効利用されている状況」と仮定した。これらの状況を AMS.III.D.ver18 の関係式で表すと以下のようになる。

$$ER_y = BE_y - PE_y \quad (1)$$

ER_y : y 年の GHG 排出削減量 (t-CO₂eq /yr)

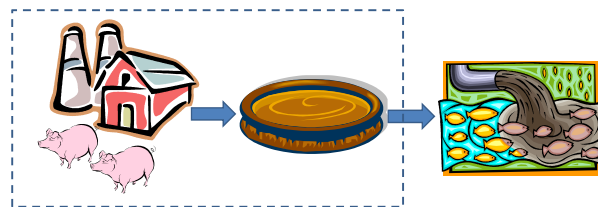
BE_y : y 年のベースライン排出量 (t-CO₂eq/yr)

PE_y : y 年のプロジェクト排出量 (t-CO₂eq/yr)

2) ベースラインの境界と BE_y の計測

メタン発酵装置が導入される前は、家畜ふん尿はオープンタイプのラグーンシステムで処理されていた（第7図）。畜舎で生産されたふん尿はラグーンに輸送され、ラグーンで滞留されている間にメタンが大気放出される。その後、家畜ふん尿は廃棄処理に出されたり用水路を経由して河川に放出するなどの処理が取られる⁽⁷⁾。

第7図の点線枠で囲まれた部分がベースラインの境界であり、上記（1）式右辺 BE_y に該当する。さらに、 BE_y は以下の（2）式の関係式で表される。第1表の変数は（2）式の変数と対応しており、それぞれの係数とその採用根拠が示されている。



第7図 ベースライン活動の境界

$$BE_y = GWP_{CH_4} \times D_{CH_4} \times UF_b \times \sum MCF_j \times B_0 \times (N_{breed,y} \times VS_{breed,y} + N_{market,y} \times VS_{market,y}) \times MS\%_{Bl,j} \quad (2)$$

第1表の係数を（1）式に投入することで、ベースライン境界内で排出される GHG 量が推計される。

$$BE_y = 21.00 \times 0.00067 \times 0.94 \times 0.74 \times 0.29 \times (2,500 \times 293.3036 + 50,000 \times 136.875) \times 1$$

$$BE_y = \underline{21505.5} \text{ (t-CO}_2\text{eq/年)}$$

その結果、メタン発酵装置が設置される前の状況では、21,505.5t-CO₂eq/年の GHG が排出されていることが明らかとなった。

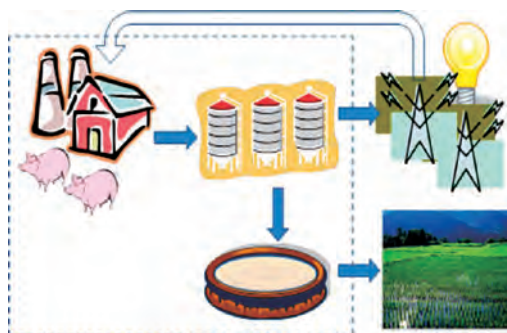
3) プロジェクトの境界と PE_y の計測

金谷牧業は、畜舎内で排出されたふん尿をメタン発酵施設へと移動させ、その施設内でメタンガスを発生させている（第8図参照）。メタン発酵処理されたふん尿（消化液）はラグーンで一時滞留され、周辺農家によって水稻の基肥や追肥の時期に液肥として散布され

る。メタン発酵後のメタンは、第7図の白抜矢印で示すように畜舎の電力として再利用される。

第1表ベースライン境界内の関係式と各係数に関する説明

変数	単位	説明	係数	資料
BE_y	t-CO ₂ eq/年	y年のベースライン排出量		
GWP_{CH_4}	t-CO ₂ eq/tCH ₄	CH ₄ の地球温暖化係数	21.00	IPCCガイドライン Dong et al.(2006)
D_{CH_4}	t/m ³	1気圧20°Cの室内でのCH ₄ 密度	0.00067	IPCCガイドライン Dong et al.(2006)
UF_b		不確実性に対するモデルの補正率	0.94	IPCCガイドライン Dong et al.(2006)
MCF_j		ベースラインシナリオにおける畜産廃棄物管理システムの年間CH ₄ 変換係数	0.74	金壇市の平均気温と Dong et al.(2006)のIPCCガイドラインから計算
B_0	m ³ CH ₄ /kg_dm	家畜から発生する揮発性固形分の最大CH ₄ 生成係数	0.29	IPCCガイドラインの アジア地域参照
$N_{breed,y}$	頭	繁殖用の養豚数	2,500	第1節2参照
$N_{market,y}$	頭	市場用の養豚数	50,000	第1節2参照
$VS_{breed,y}$	kg-dm/頭/年	畜産廃棄物管理システムに投入される養豚数(繁殖用)の年間揮発性固形分の量	293.30	IPCC(2006a)p.15の(4)式に従って算出
$VS_{market,y}$	kg-dm/頭/年	畜産廃棄物管理システムに投入される養豚数(市場用)の年間揮発性固形分の量	136.87	IPCC(2006a) p.15の(4)式に従って算出
$MS\%_{Blj}$	%	畜産廃棄物管理システムで処理される糞尿割合	100	仮定条件として100%処理を仮定



第8図 メタン発酵装置導入後の液肥が
利用されるシステム

注1 白抜きの矢印は、メタンガスを畜舎
で利用する活動を意味する。

第8図の点線枠で囲まれた部分がプロジェクトの境界であり、上記(1)式右边 PE_y に該当する。また、 PE_y は以下の(3)式の関係式で表される。

$$PE_y = PE_{PL,y} + PE_{flare,y} + PE_{power,y} + PE_{transp,y} + PE_{storage,y} \quad (3)$$

上記第2表の係数を(3)式に投入することで、プロジェクト境界内で排出されるGHG量が推計される。

$$PE_y = 3,091.65 + 566.48 + 54.97 + 0 + 5,697.00$$

$$PE_y = 9,410.1 \text{ t-CO}_2\text{eq/年}$$

その結果、メタン発酵装置が設置された状況では9,410.1t-CO₂eq/年のGHGが排出されていることが明らかとなった。

最後に(1)式に BE_y と PE_y の計測結果を投入し、液肥利用によるGHG排出削減効果を求めると12,095t-CO₂eq/年で、削減率にすると56.2%という結果となった。

第2表 プロジェクト境界内の関係式と各係数に関する説明

変数	単位	説明	係数
PE_y		y年のプロジェクト排出量	
$PE_{PL,y}$		y年のバイオガスの漏出による排出量	3,091.65
$PE_{flare,y}$		y年のバイオガス燃焼による排出量	566.48
$PE_{power,y}$	t-CO ₂ eq/年	y年の導入施設の操作にかかる石油または電力の利用による排出量	54.97
$PE_{transp,y}$		y年の輸送からの排出量	0
$PE_{storage,y}$		y年のストレージからの排出量	5,697.00

(3) 小括

本節の目的は、中国金壇市の比較的規模の大きい養豚企業に対し、メタン発酵装置導入によって吸収されるメタンガスをGHGの削減効果と見なして環境評価することであった。また、環境評価するための計測手段として、京都議定書のCDMで採用されているAMS-III.D. ver.18を用いて計測した。

その結果、メタン発酵装置導入前（ベースライン排出量）では21,505.5t-CO₂eq/年となり、メタン発酵装置導入後（プロジェクト排出量）では9,410.1t-CO₂eq/年となった。すなわち、メタン発酵装置導入によって吸収されるメタンガスは、導入前後の差分であるため12,095t-CO₂eq/年、削減率にして56.2%という結果であることが明らかとなった。

本節の計測結果は、データの制約から仮定条件を設けたり、既存文献の係数を引用したりするなど改善の余地が多く残された試算値であることを留意して頂きたい。

4. 消化液発生量から見た液肥の供給可能性評価

(1) はじめに

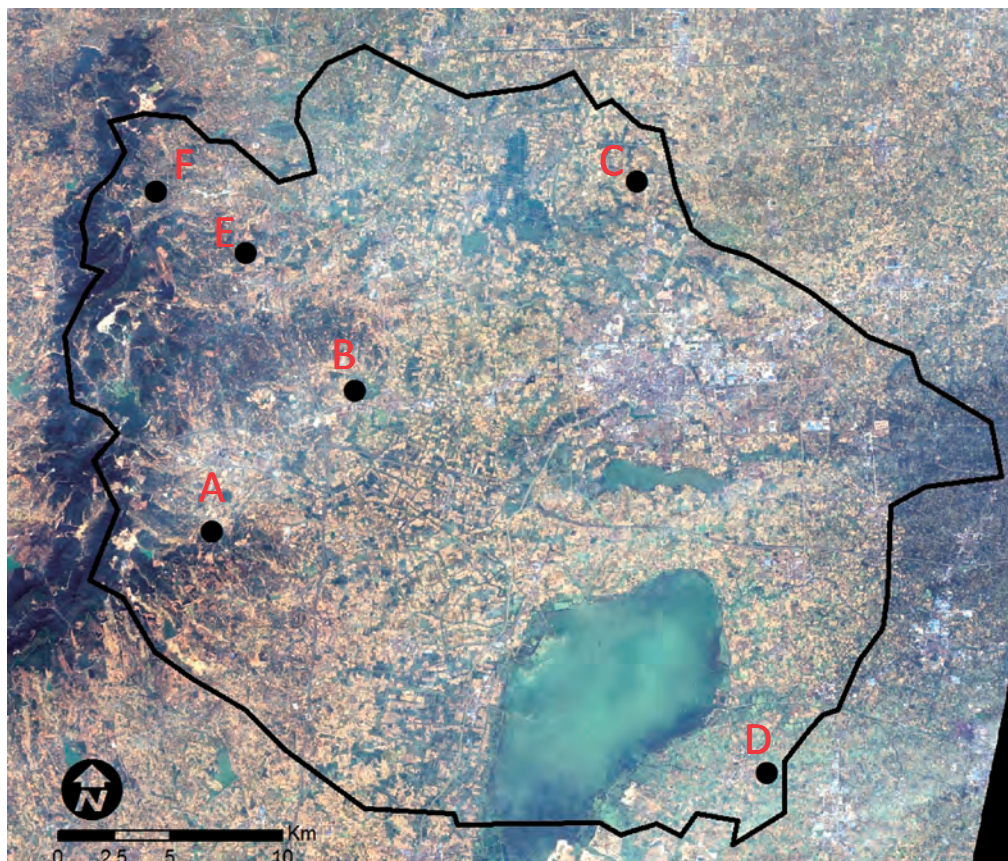
前節で明らかにしたとおり，メタン発酵を行うことにより GHG 削減効果を有し，広義の温暖化緩和策となりうることを示した。その際には，消化液を液肥として水田へ散布することが大前提として求められる。したがって，メタン発酵から発生した消化液は全て液肥として水田で利用されることが必要となる。その際に検討すべき点は，メタン発酵において発生した消化液を全て液肥として利用する場合，どのくらいの面積の水田に液肥を供給できるのかという点である。仮に発生した消化液の量が多すぎ，周辺水田で液肥として適切に利用することができなければ，水質汚濁対策ひいては地球温暖化緩和策としての有効性も失われることになる。

さて，水田での液肥の散布形態には，タンク車などを用いて液肥を圃場のそばまで運搬する方法と，パイプライン・用水路などのパイプラインで養豚場から直接輸送し，灌漑水と混合しながら圃場へ流入する方法の2つがあり，利用可能な圃場は運搬労力やコストの面などから養豚場から近い範囲に限定される。さらにパイプライン・用水路を用いる場合には養豚場よりも標高の高い水田には散布できないなどさまざまな制約条件がある。そのため，養豚場の位置と実際に液肥を散布可能な水田の分布との関係については空間的な考察が必要であり，これには地理情報システム(GIS)の利用が有用である。

そこで本報では，金壇市の金壇市内にある年間出荷頭数 5,000 頭以上の養豚場 6 か所を対象とし，これら大規模養豚場においてメタン発酵により発生した消化液は，周辺のどのくらいの範囲内にある水田で利用することができるのかを GIS を用いて解析する。さらには地理的な特性と散布可能な水田面積，液肥の運搬距離の関係を明らかにする。

調査対象の 6 養豚場からは年間およそ 13 万頭の豚が出荷されていると推定され，これは金壇市全体から出荷される豚の頭数，年間およそ 24 万頭の半分に値する。第 2 節(1)で解説したとおり，金壇市では畜産業が急速に拡大し大規模な養豚場は近年増加傾向にあり，今後さらに増加することが見込まれる。小規模な養豚場のうちは家畜ふん尿は経営内の農地での自家消費などで処理することもできるが，大規模化するにしたがって排出される家畜ふん尿（消化液）も膨大な量となり，消化液の適切な利用には周辺の農業地域も含めた地域的な循環システムの構築が必要となる。そのため，このような大規模養豚場で生

産される消化液の処理・環境負荷軽減は急務の課題である。消化液利用の環境負荷軽減効果としては、(1)用水路等を利用して液肥を水田に散布すると仮定し、用水路等で供給可能な範囲に限定する場合、(2)養豚場から排出される消化液を全て液肥利用する場合、というシナリオを設定し検討した。



注 ALOS AVNIR-2によって2009年11月5日に観測された画像である。太線は金壇市の境界(現地の地図を参考に筆者作成)。黒丸は養豚場A～Fの位置である。

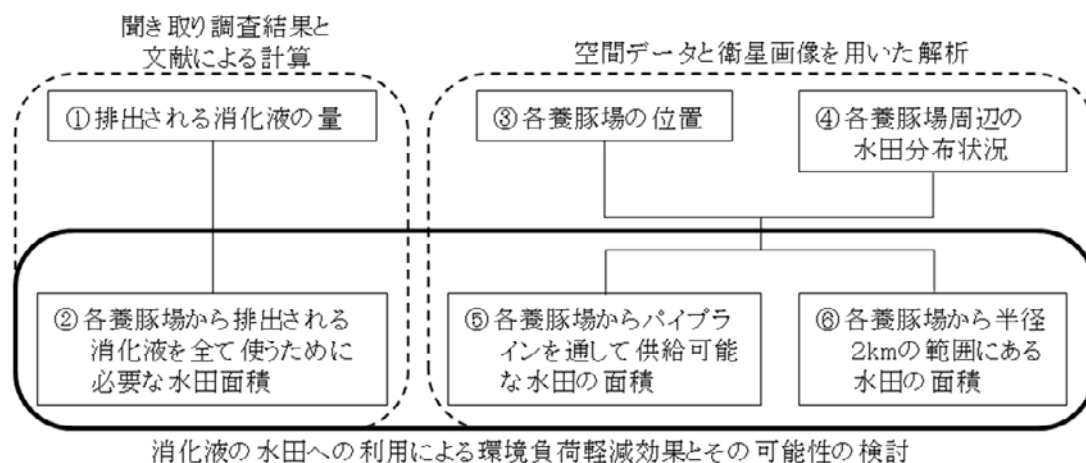
第9図 金壇市の概況と6つの養豚場の位置

(2) 調査分析方法

1) 調査地と調査対象養豚場

調査地である中国江蘇省金壇市の人工衛星の画像を第9図に示す。金壇市の総面積は975km²であり、うち陸域面積と水域面積の比は4:1である。農用地利用状況としては、水田35万ムー(23,000ha)、河蟹10万ムー(6,700ha)、青海老5万ムー(3,300ha)、お茶4.2万ムー(2,800ha)、桑1.5万ムー(1,000ha)、園芸5.2万ムー(3,500ha)であり、畜産は養豚100万頭、家禽6,000万羽である(呉(2012))⁽⁸⁾。年間出荷頭数5,000頭以上

の中規模以上の養豚場は、聞き取り調査の結果金壇市内には 6 カ所存在する。



第 10 図 分析スキーム

2) 分析方法

本報における分析方法を第 10 図に示す。まず、①聞き取り調査の結果を利用して養豚場 A～F において生産される消化液の量を計算し、②その結果を用いて、各養豚場で生産される消化液により肥料を賄うことのできる水田面積を計算した。次に、空間データと衛星画像を用いた解析をおこなった。③人工衛星の画像上で各養豚場の位置を特定し、④その養豚場周辺の水田の分布を抽出した。その後、⑤シナリオ 1 の用水路等を利用した液肥供給により賄うことのできる水田面積を計算し、⑥シナリオ 2 の養豚場から排出される消化液と養豚場からの水田分布との関係を検討するために、養豚場周辺の水田分布状況を解析した。最後にそれらの結果を踏まえて、消化液の水田利用による環境負荷軽減効果とその可能性についての検討を行った。空間データの解析には Arc GIS 10.0 を利用し、衛星画像の解析には、ERDAS IMAGINE 2010 を利用した。

(3) 消化液の水田利用による環境負荷軽減効果

1) 養豚場から排出されるふん尿量の推計

養豚場 A～F の親豚はそれぞれ 2,500 頭、2,000 頭、800 頭、600 頭、400 頭、300 頭であり、この地域では一般的に年 2 回母豚 1 頭につき 10 頭程度の子豚を出産し、半年で子豚は出荷されることが現地聞き取り調査によりわかった。そのため、対象養豚場 6 カ所で

年間 6,000～50,000 頭, 合計 132,000 頭/年の子豚が出荷されていると推測される(第 3 表)。
 松下ら(1978)によると, 配合飼料を飽和供与した場合の子豚(20-50kg)と親豚(60-90kg)の
 一日辺りの平均ふん尿排泄量は合計でそれぞれ 4.0kg と 6.5kg である。これに, 当該地域
 において一般的に, 親豚は年に 2 回 10 頭ずつ子豚を出産し, 子豚は半年で出荷されるこ
 とから, 1 日あたりのふん尿排出量は,

$$1 \text{ 日のふん尿排出量} = \text{母豚の頭数} \times 6.5 + \text{母豚の頭数} \times 10 \times 2 / 2^* \times 4.0$$

* (母豚の頭数 $\times 10 \times 2 / 2$) = 常時養豚場にいる子豚の頭数

となり, A～F の各養豚場から排出される年間のふん尿推計量はそれぞれおおよそ 5,000
 ～43,000t/年であり, 6 カ所からの合計は 112,000t/年となった (第 4 表)。

第3表 各養豚場における養豚頭数(頭)

	母豚(頭)	子豚(頭/年)
A	2,500	50,000
B	2,000	40,000
C	800	16,000
D	600	12,000
E	400	8,000
F	300	6,000
合計	6,600	132,000

第4表 各養豚場から排出される年間ふん尿量(t)

	ふん量	尿量	合計(t)
A	20,303	22,265	42,568
B	16,243	17,812	34,055
C	6,497	7,125	13,622
D	4,873	5,344	10,216
E	3,249	3,562	6,811
F	2,436	2,672	5,108
合計	53,600	58,780	112,380

2) 消化液散布可能面積

調査対象の 6 つの養豚場から排出される消化液により散布可能な水田面積の推計を行っ
 た。金壇市が推奨している稲の窒素吸収量は 200(N·kg/ha), 基肥・追肥の比率は 6:4(金壇
 市 2010), 稲による肥料の利用率は 60%(金壇市 2010)⁽⁹⁾とした。また, 養豚場から排出さ
 れるふん尿は, メタン発酵を経ても重量は変化せず, 消化液はそのまま液肥として利用で
 きると仮定した⁽¹⁰⁾。著者らが参加する科研費研究プロジェクトの分析結果から, 液肥の窒
 素濃度は A 養豚場の消化液の窒素濃度実測値が 2,495mg/L であることが示されたため,
 今回の計算では簡略化のため 2,500mg/L とし, 液肥の比重を 1 とした。

$$200 \text{ (N·kg/ha: 年間の窒素吸収量)} / 60\% \text{ (肥料の吸収率)} \times 1 \text{ (液肥の比重)}$$

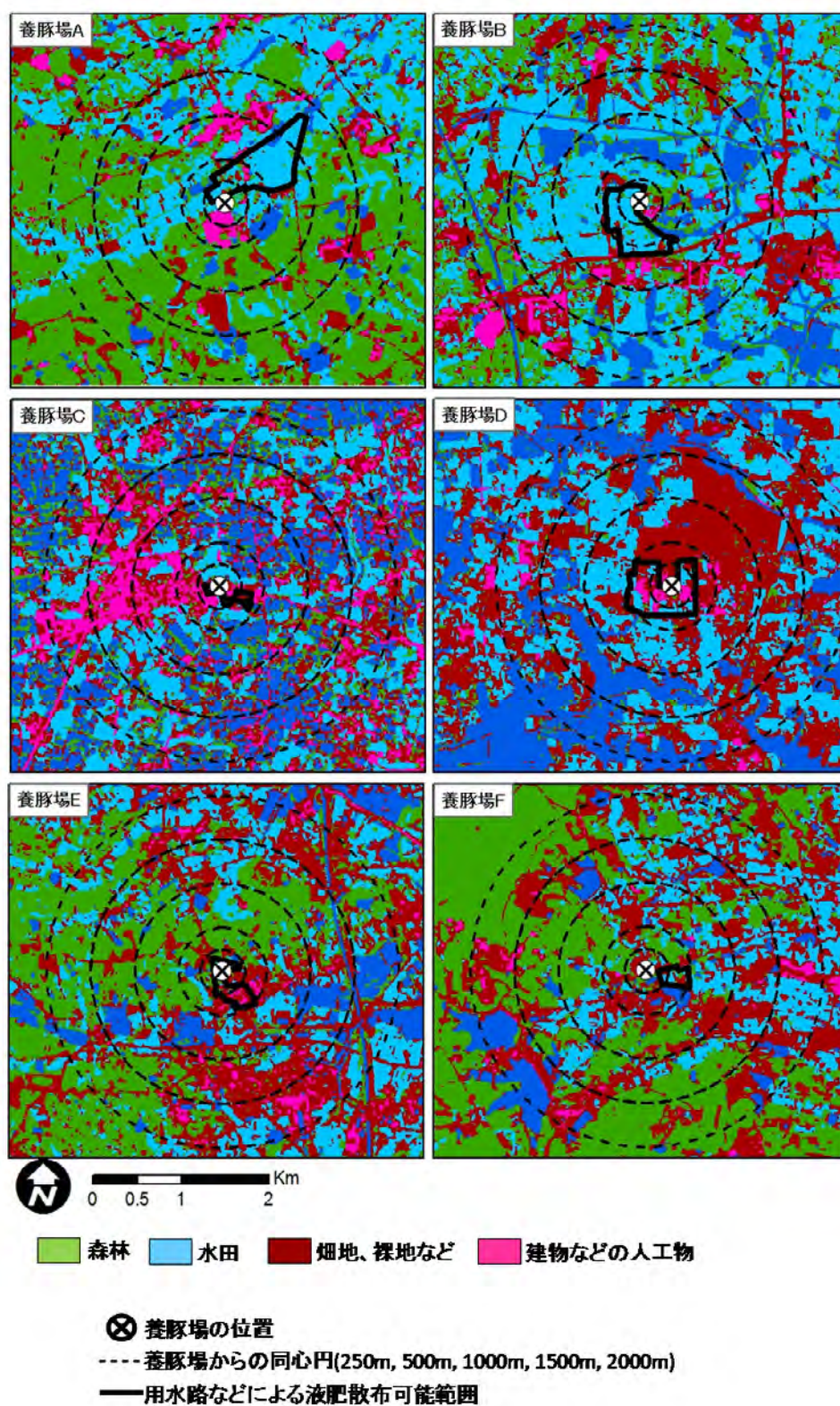
より、液肥として必要な消化液の年間投入量は 133 t/ha (基肥=80.0t/ha, 追肥=53.3t/ha) となった。(3)1)で求めた各養豚場における年間の消化液生産量を液肥の年間投入量(113 t/ha)で割り、各養豚場から排出される消化液により賄うことのできる供給可能水田面積を算出すると、38ha～319ha (合計 843ha)となった(第5表)。そして、肥料として利用された分が水系への環境負荷削減分とすると、稲による肥料吸収率が 60%なので(第6表)、養豚場から排出される消化液を全て液肥として散布することで、年間 8～64 N-t, 全養豚場の合計で 169 N-t の環境負荷削減が可能となることがわかった(第5表)。

第5表 各養豚場から排出される糞尿と、それによる液肥供給可能面積

	糞尿量(t)	供給可能 水田面積(ha)	年間環境負荷削減窒素量 (N-トン)
A	42,568	319	63.9
B	34,055	255	51.1
C	13,622	102	20.4
D	10,216	77	15.3
E	6,811	51	10.2
F	5,108	38	7.7
合計	112,380	843	168.6

第6表 各養豚場から排出される消化液と液肥の供給可能水田面積

	排出された 全消化液 (トン)	排出消化液を 用いた 供給可能水田 面積(ha)	シナリオ1	シナリオ2				
			パイプラインに よる 供給可能面積 (ha)	水田面積				
				0~250m (ha)	0~500m (ha)	0~1000m (ha)	0~1500m (ha)	0~2000m (ha)
A	42,568	319	35.8	9.1	30	107	208	334
B	34,055	255	24.8	8.7	37	151	321	523
C	13,622	102	13.3	3.5	19	110	221	380
D	10,216	77	1.5	7.8	23	70	155	303
E	6,811	51	1.8	2.6	8	52	124	239
F	5,108	38	2.5	3.1	13	74	161	250
合計	112,380	843	79.7	34.9	131	565	1,191	2,029



第 11 図 各養豚場周辺の水田分布状況

3) 衛星データの利用と GIS による空間解析

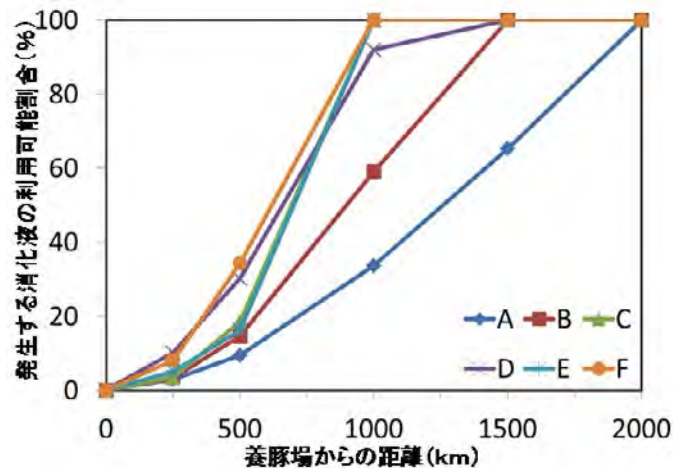
消化液の供給可能範囲を推定するために、まず人工衛星画像上で各養豚場の位置を特定し(第9図)、養豚場周辺の水田分布状況を土地被覆分類によって抽出した。その結果をもとにシナリオ1, 2に関する解析を行った。人工衛星画像はALOS AVNIR-2及びPRISMで取得された4シーン(2009年3月20日, 5月5日, 11月8日, 12月21日)を用いた。

まず、11月の画像を利用してパンシャープン画像を作成し、A～Fの養豚場の位置を目視判読により特定した⁽¹²⁾。そして、シナリオ1の範囲を、下記①～④の条件の範囲内で目視により決定し、ポリゴン⁽¹³⁾を作成した。条件は、①養豚場に隣接している、②大きな道路を越えない、③用水路を越えない、④養豚場の下流に分布する、とした。また、シナリオ2の水田面積を計算するために、各養豚場を中心に半径250m, 500m, 1000m, 1500m, 2000mの円状のバッファポリゴン⁽¹⁴⁾を作成した。次に、3月から12月までの4シーンの人工衛星画像を各養豚場から2kmの範囲が含まれる様に切り出し、それぞれを養豚場ごとに重ね合わせた1つの画像を作成した。「教師なし分類」により分類し、3×3ピクセルの近傍処理によりフィルタリングした画像を各養豚場周辺の水田分布図とした⁽¹⁵⁾。この水田分布図と上述のシナリオ1,2用のポリゴンをそれぞれ重ね合わせ、シナリオ1用のポリゴン内の水田面積と、シナリオ2用のバッファポリゴン内の水田面積を計算した。その結果を第6表に示し、養豚場A～F周辺の水田の分布状況を第11図に示した。

4) 消化液の液肥利用の可能性

養豚場で生産される消化液を液肥として利用し、植物に吸収された分を水系への環境負荷削減量と考えると、各養豚場の環境負荷削減量は、養豚場A～Fそれぞれ、63.9 N-t, 51.1 N-t, 20.4 N-t, 15.3 N-t, 10.2 N-t, 7.7 N-tであった(第5表)。

シナリオ1の用水路などによる消化液の供給可能面積は、1.5ha～36haであり、そこへの消化液の散布可能量は、養豚場A～Fそれぞれ7.2 N-t, 5.0 N-t, 2.7 N-t, 0.3 N-t, 0.4 N-t, 0.5 N-tであった。これは、養豚場から排出される消化液の2%～11%であり、全養豚場から排出される消化液の9.5%である。養豚場A～Fのうち、養豚場A, B, C, Dは平地に存在し、A, B, Cはパイプラインによって総消化液排出量の10～13%の散布が可能であったが、山間部にあるE, Fはそれぞれ3.5%と6.5%であった。



第 12 図 シナリオ 2 に基づいた養豚場周辺の水田に対する
消化液の消費割合と養豚場からの距離の関係

養豚場からの水田面積と、消化液が消費できる割合について検討した。養豚場 C は年間消化液排出量が 13,600t であり、1000m 程度の輸送で散布可能な規模であったが、養豚場 A と B は大規模な養豚場であったために生産される消化液を全て使い切るには養豚場から 2000m 離れた圃場まで運搬する必要がある。また、養豚場 D は養豚場 C と同規模であるが、当該養豚場は湖の近くに位置しているために周囲に水産養殖場が多く、消化液を使い切るためには 1500m 程度の距離を運搬しなくてはならなかった(第 12 図)。養豚場 E と F は、山間部に位置しているために養豚場周辺の水田が少なく、パイプラインによる散布が難しい事がわかった。しかし、両養豚場とも 6 つの養豚場の中では小規模であり、1000m 以内の平地まで運搬する事で全ての消化液を使い切る事ができる(第 12 図)。ただし、散布想定地域内の圃場でも、パイプラインやバキュームカーによる液肥散布が行われない農地があるならば、この散布範囲はさらに広がる事となり、そのような場合、散布に要する時間やコストはさらに増大する事となる。以上のように当該地域においては、①立地と規模がマッチしており比較的消化液の利用に適している(養豚場 C)、②立地は良いが規模が大きいため散布には長距離運搬しなくてはならない(養豚場 A, B)、③平地にあり規模は大きくないが周辺環境に適していない(養豚場 D)、④山間地にありパイプラインでの散布には不適であるが短距離の運搬で利用可能(養豚場 E, F)、の 4 タイプの養豚場に分類することができる。

養豚場から排出される消化液を液肥利用するには、膨大な量の消化液を輸送する必要がある。もっとも低コストな運搬方法は、現在金壇市で試験を行っている用水路(パイプラ

イン)を使うものであるが、これには(3)3)で示した①～④の条件が必要となる。また、短距離であればバキュームカーなどによる運搬コストも比較的少なくすむと考えられる。つまり、消化液を有効利用するための養豚場の立地条件としては、平坦であり、周囲に養豚場の規模に適した面積の水田が分布していることが重要となる。

このように、金壇市において年間出荷頭数 5,000 頭以上の養豚場でメタン発酵により生産される消化液は、養豚場から半径 2000m 以内で全て使い切ることが可能であり、養豚場由来の環境負荷を、稲による吸収分である 6 割削減することが可能である。又この割合は、水管理などにより肥料の利用効率を上昇させることでさらなる削減効果が望まれる。しかし、養豚場で生産される消化液の利用には、上述の①～④のような規模と立地によるタイプが存在し、それらのタイプの違いによって適切な利用・運搬法が必要となる。

6. 経済的視点からの液肥供給可能性の検証

(1) はじめに

金壇市の養豚業によって発生するふん尿はメタン発酵に利用され、それに伴い発生する消化液の液肥利用については、現在は養豚業者が 100%費用負担し、農家は一切の対価を支払っていない。このような状態は養豚業者に一切の経済的メリットがない一方で全ての負担を負わせ、農家はフリーライドすることになり、経済学的な観点からは養豚業者による消化液の適切な処理(液肥の製造・供給)のインセンティブを阻害することから、好ましくない状況と言える。したがって、今後は農家によるフリーライドを解消し、農家が受益する経済的なメリットを養豚業者に還元する仕組みを構築することが必要となる。その 1 つの方法が、現在養豚業者が無償で提供している液肥を農家に有償販売することであるが、その際重要になるのは農家と養豚業者が双方納得する価格で合意に至れるかどうかである。農家は自らが享受する化学肥料費の節約効果を超えてまで養豚業者に液肥代を支払うことはしない。化学肥料費の節約分の範囲内で液肥への対価が養豚業者に支払われた場合、養豚業者がその収入に収まる費用において液肥を提供できるのはどの程度の量なのかを推計することで、経済的な視点からの最大飼養可能頭数が算出される。

本節では、金壇市の養豚場の 1 つである金谷牧業を取り上げ、金谷牧業が液肥を散布するための総費用及び仮に液肥代を徴収した場合の最大収入を推計し、液肥の総費用と総収入の関係から、金谷牧業と農家の双方が経済的な便益を享受できる飼養頭数範囲を特定す

る。次に、現状の飼養頭数と推計された飼養頭数を比較することで、現行の養豚業者の規模において、液肥が安定的に供給されるためにはどのような経済的な措置が必要なのかを明らかにすることを目的とする。

（２）養豚業者の液肥供給コストと農家負担

養豚から発生する消化液を液肥としての農家で利用することは、金谷牧業にとっては発生する消化液を河川に放出して環境破壊を引き起こすことを回避でき、一方の農家にとっては液肥を利用することで化学肥料費を節約できるという双方に便益がもたらされる関係が成立している。現時点では、液肥は金谷牧業から無償で農家に提供されており、農家は無償の液肥を利用することで化学肥料の投入を削減することができ、これが農家が液肥を利用する最大のインセンティブになっている。しかしながら、このような状況は農家の便益に対する費用を全ての金谷牧業に負担させていることとなり、長期的には金谷牧業が農家に一定の負担を求めることが想定される。

金谷牧業が飼養頭数を増やすとそれだけ液肥として散布しなければならない消化液の量が増える。現状では原則としてパイプラインを用いた流し込みが行われているが、パイプラインで流し込みが可能な液肥の量を超えると、コストが高くなるバキュームカーによる散布に頼らざるを得ない。その場合は当然液肥の散布費用は高くなり、その分を農家に液肥代として負担を求めても、液肥利用による農家の化学肥料費節約分を超えてしまうと、金谷牧業と農家の双方に便益がもたらされる関係の構築は不可能となる。したがって、金谷牧業と農家の双方に便益がもたらされ、継続的な事業の実施が可能なのは、液肥の散布コストが農家の化学肥料費削減効果を上回らない範囲と考えられる。

そこで本分析では、まず金谷牧業が液肥を散布するための総費用を推計する。次に、仮に農家が削減した化学肥料費を全て液肥代として金谷牧業に支払った場合の、金谷牧業の総収入を推計し、液肥の総費用と総収入の関係から、金谷牧業と農家の双方に便益がもたらされる関係が構築され、温暖化緩和策の継続的な実施が可能な飼養頭数範囲を特定する。

（３）液肥供給の総費用の推計

１）はじめに

ここでは金壇市にある６つの養豚場のうち、最大の飼養頭数を有する金谷牧業を取り上げ、液肥供給の総費用曲線を推計する。前節の分析結果によると、金谷牧業では 27,500

頭の豚を飼養しており、これらの豚から発生するふん尿をメタン発酵装置に投入した場合、消化液の量は 42,568t/年と推計されている⁽¹⁶⁾。この消化液による水田への施肥可能面積は 319.3ha と推計されている。現在、20ha 分については、ラグーンからパイプラインを通じて液肥散布が行われているが、前節の分析結果では、土地の傾斜と既存のパイプライン敷設状況から、金谷牧業からは最大で 36ha までは既設パイプラインによる散布が可能となることが明らかとなった⁽¹⁷⁾。パイプラインで供給可能な水田と金谷牧業との距離を算出した結果が第 7 表である。ここにあるとおり、パイプラインで液肥供給可能な水田は金谷牧業から半径 1500m 以内に、金谷牧業から発生するふん尿は金谷牧業から半径 2300m までの範囲に収まっている。

第7表 養豚場Aからの距離ごとの水田面積

	累積 水田面積	(ha) 距離ごとの水田面積		
		総水田面積	うち パイプライン	うち バキュームカー散
0-250m	4.8	4.8	3.1	1.7
251-500m	18.6	13.7	5.5	8.2
501-1000m	76.2	57.6	21.9	35.8
1001-1500m	151.5	75.3	5.6	69.7
1501-2000m	252.5	101.0	0.0	101.0
2001-2300m	319.3	66.8	0.0	66.8
合計	—	319.3	36.0	283.3

注) 2001-2300mの総水田面積は養鶏場Aからの液肥供給可能面積319.3haで打ち切って計算している。

まず、パイプラインの敷設に伴うコストだが、JICA 報告書によると敷設距離 1200m で 76,160 円となっている。したがって、液肥散布面積が 36ha まではこのパイプラインの敷設費用 76,160 円での液肥供給が可能となる。それ以上の面積に液肥を供給する場合には、バキュームカーを用いた散布となる。ここでは、バキュームカーによる液肥散布の総コストを算出するため、まず金谷牧業で液肥を搭載して水田に流し込み、再び金谷牧業に戻ってくるまでの所要時間を推計した。

2) バキュームカーによる液肥搭載、流し込みの所要時間

バキュームカーによる液肥流し込みの所要時間については、金谷牧業においてバキュームカーのタンクに液肥を注入し、金谷牧業から水田までの移動、液肥の流し込み、水田か

らの復路の移動に加え，ロスタイムを加えて計算する。まずタンクへの液肥注入に関しては，金壇市における計測データがないため，福岡県築上町における，液肥 3.5t の搭載に 4 分所要という実績から比例計算し，5t の搭載に 5.7 分かかると仮定とした。液肥の水田への流し込みの所要時間については，金壇市での実測データに基づき計算した。実測データは 5t 積みバキュームカーによる流し込みに 15 分かかっているもので，本研究でも 5t 積みバキュームカーでの運搬を仮定し，流し込みの所要時間を 15 分とした。さらに，作業員の車両への乗降，車両の転回等に要する時間として 5 分を上記以外のロスタイムとして加えた。

3) 液肥運搬の移動距離および所要時間

往復の移動距離については，次のように推計した。まず金谷牧業を中心とした半径 2300m 圏内にある水田面積は 334ha と算出されたので，金谷牧業から供給される液肥の施肥可能面積 319ha は半径 2300m 以内に収まることになる。したがって，ここでは金谷牧業から半径 2300m までの水田にバキュームカーで運搬すると仮定した。それでは，半径 2300m 圏内にある水田に液肥を運搬するにはどのくらいの実走距離になるのか。これを計算するため，金谷牧業から主要道路を利用して水田地帯を通過して半径 2000m 地点に到達する 8 本のルートを設定し⁽¹⁸⁾，その距離を計測した（第 8 表，第 13 図）。第 8 表の結果から直線距離の約 1.37 倍が実走距離であると仮定して移動距離の計測を行った。第 9 表にその推計結果を掲げている。移動にかかる所要時間の推計には，平均車速 30km/h として第 9 表の実走距離代表値を走行するのに要する時間を算出した。

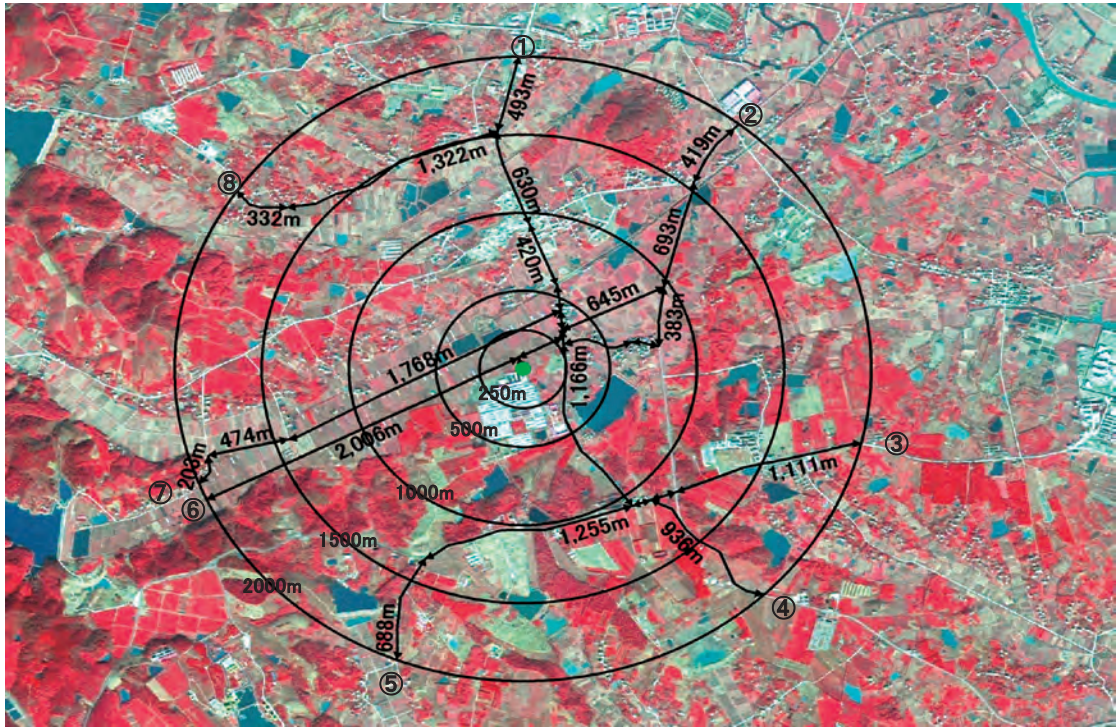
以上，液肥の流し込み作業による所要時間の推計結果は第 10 表に示したが，液肥の流し込みの所要時間は水田までの距離により 26 分から 37 分までの開きがある。

第8表 養豚場Aから半径2000m
地点までの主要道路距離

	道路距離(m)	直線・実走 距離比率
①	2,241	1.12
②	2,208	1.10
③	2,949	1.47
④	2,619	1.31
⑤	3,514	1.76
⑥	2,082	1.04
⑦	2,979	1.49
⑧	3,402	1.70
平均	2,749	1.37

第9表 養豚場Aからの距離ごとの水田面積と液肥施肥量
(m)

	直線距離 代表値	迂回率	実走距離 代表値
0-250m	125	1.37	171.8
251-500m	375	1.37	515.5
501-1000m	750	1.37	1,031.0
1001-1500m	1,250	1.37	1,718.3
1501-2000m	1,750	1.37	2,405.6
2001-2300m	2,150	1.37	2,955.5



第13図 金谷牧業からの主要道路を経由した半径2000m地点

第10表 バキュームカーによる作業の所要時間

	液肥のタンク注入	移動(養豚場→水田)	液肥流し込み	移動(水田→養豚場)	ロスタイム	(分) 合計
0-250m	5.7	0.3	15	0.3	5	26.4
251-500m	5.7	1.0	15	1.0	5	27.8
501-1000m	5.7	2.1	15	2.1	5	29.8
1001-1500m	5.7	3.4	15	3.4	5	32.6
1501-2000m	5.7	4.8	15	4.8	5	35.3
2001-2300m	5.7	5.9	15	5.9	5	37.5

注1 移動については平均車速30km/hで計算した。

2 流し込みについては5t積みバキュームカーでの散布を仮定し、実測データに基づき15分/5tを採用した。

3 ロスタイムは作業員の車両への乗降、車両の後退などの時間を想定し設定した。

第11表 バキュームカーによる一日あたり散布可能液肥量

	(分) 1回あたりの所要時	(回/日) 一日の作業可能回	(t/日/台) 散布可能液肥量
0-250m	26.4	18	90
251-500m	27.8	17	85
501-1000m	29.8	16	80
1001-1500m	32.6	14	70
1501-2000m	35.3	13	65
2001-2300m	37.5	12	60

注 一日の作業時間を8時間として設定した。

4) バキュームカーによる液肥供給量と必要車両数

まず、液肥の適正施肥量だが、基肥では 80t/ha、穂肥では 53t/ha となっている。バキュームカーで散布する面積は $319 \div 36 = 283\text{ha}$ であり、この面積には基肥で 22,640t、穂肥で 14,999t の液肥が必要となり、バキュームカーでこれらの量の液肥を運搬する必要がある（第 12 表）。第 11 表より、1 台のバキュームカーでは 1 日あたり 60～90t の液肥を運搬することができる。施肥可能期間は基肥の場合、水田を耕起した後に初めて水を流し込む 2～3 日と田植えから活着するところまでの 1 週間くらいの合計 10 日となる。この施肥期間 10 日間に全ての水田で散布を終えるために必要な車両数は 36 台となった（第 12 表）。

第12表 金谷牧業からの距離ごとの水田面積と液肥施肥量、作業に必要な車両数

	(t)				(台)	
	散布量		施肥期間(10日)内に終わらせるために必要な車両数			
	パイプライン散布		バキュームカー散布			
	元肥	穂肥	基肥	穂肥	基肥	穂肥
0-250m	248.8	165.9	138.4	92.3	1	1
251-500m	439.2	292.8	658.4	438.9	1	1
501-1000m	1748.0	1,165.3	2,860.8	1,907.2	4	3
1001-1500m	444.8	296.5	5,579.2	3,719.5	8	6
1501-2000m	0.0	0.0	8,080.8	5,387.2	13	9
2001-2300m	0.0	0.0	5,342.5	3,561.7	9	6
合計	2,880.8	1,920.5	22,660.1	15,106.7	36	26

5) 総費用曲線の推計

上記より、液肥散布面積が 36ha まではこのパイプラインの敷設費用 76,160 元での液肥供給が可能となる。パイプラインの敷設に伴う費用については、JICA 報告書によると敷設距離 1200m で 76,160 元となっている。これは既に設置された施設であるため、液肥散布面積にいわゆる固定費用として取り扱われるが、今後利用可能であろう年数の 20 年を耐用年数として、定額法で年間費用に換算した。可変費用となるバキュームカーによる散布にかかる費用に関して、バキュームカーの購入費については、バキュームカー 1 台を 46 万 1538 元⁽¹⁹⁾とし、耐用年数を 15 年として計算した⁽²⁰⁾。散布作業員の人件費はバキュームカー 1 台につき 1 名の作業員が必要と仮定し、金谷牧業の作業員と同等の賃金水準(月給 2,000 元)を日割計算し、バキュームカーの必要台数と稼働日数を乗じて算出した。ふん尿の処理にかかる人件費については、英格・矢部による現地調査で年間 81 万元となっ

ているが、これは消化液の液肥としての利用の有無にかかわらず発生する費用であるため、ここでは養豚そのものの費用として考え、液肥散布の費用から除外した。推計結果は第 13 表に示す。

第13表 液肥散布に伴う年間総費用				累計散布費用(万元/年)				
散布面積(ha)			パイプライン敷設費	パイプラインバキュームカーによる散布費用			合計	
パイプライン散布	バキュームカー散布	累積面積		車両費用	人件費	小計		
0	0	0		0.4	0	0.0		0
36	0	36	0.4	0	0.0	0		
0	2	38	0.4	3	0.0	3		
0	8	46	0.4	6	0.2	6		
0	36	82	0.4	18	0.6	19		
0	70	151	0.4	43	1.6	45		
0	101	252	0.4	83	3.1	86		
0	67	319	0.4	111	4.1	115		

注 パイプラインは耐用年数20年、バキュームカーは15年として年間の費用を算出した。

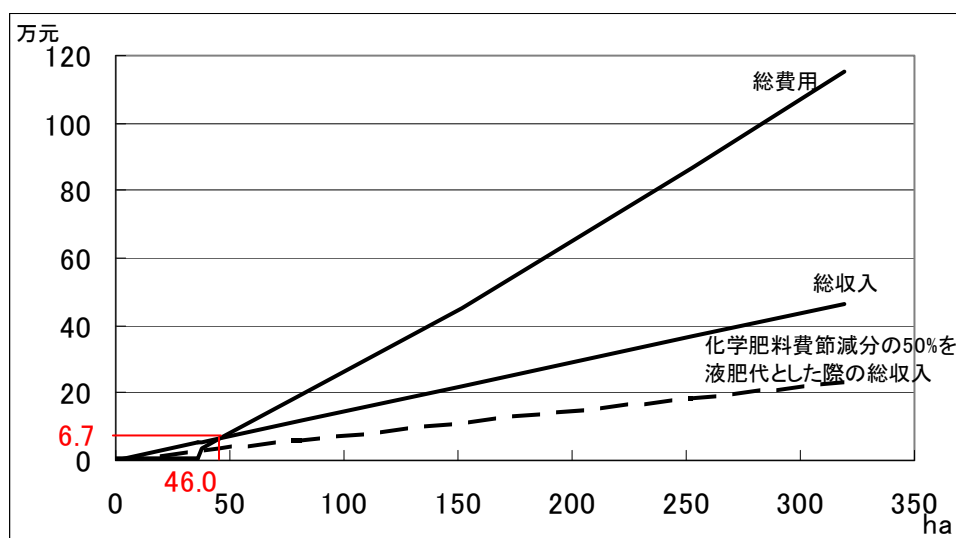
(4) 有償で液肥を販売した場合の総収入の推計

著者らが参加する科研費研究プロジェクトの分析結果から、液肥を使用することで農家は1ムあたり97元の化学肥料費を節約することができる。これを1haあたりに換算すると1,454元/haとなる。水稻の単収や販売価格は化学肥料を用いた場合と変わらないため、農家が液肥を利用することによって得られる便益はこの化学肥料費の節約分のみとなる。これを液肥散布面積に乘じることで金谷牧業の総収入が計算される。推計結果は第14表に示した。総収入は面積に完全に比例しているが、金谷牧業から発生する消化液を全て液肥として散布した場合でも総収入は46万元にとどまることが明らかになった。

第14表 液肥の販売による年間総収入	
(ha)	(万元/年)
散布面積	総収入
0	0
36	5
38	5
46	7
82	12
151	22
252	37
319	46

（５）総費用・総収入からみた液肥供給の持続可能性の検証

散布面積を横軸に取った総費用曲線は第 14 図、第 15 表に示した。第 14 図から、散布面積が小さな範囲では総収入が総費用を上回っているが、散布面積が一定の値を超えると総費用が総収入を上回り、金谷牧業は液肥散布で赤字を発生させることになる。そのため、金谷牧業が経済合理的に行動した場合、液肥の散布によって収入が得られたとしても、総費用が総収入と一致する点を限度に液肥供給を行うことになる。総費用曲線と総収入曲線が一致する点を求めると、散布面積が 46ha、その際の液肥収入（＝散布費用）は 6.7 万元と算出された。この 46ha の水田面積では年間 6,127t の液肥を投入することが可能で、これを豚の飼養頭数で換算すると、4,098 頭（うち親豚 235 頭、子豚 3,863 頭）となった。すなわち、液肥の散布による費用と収入で考えた場合、経済的に最適な飼養頭数は約 4,100 頭であり、現状の 27,500 頭の 15%程度の飼養頭数規模に縮小することが必要となることになった。



第 14 図 液肥散布面積を横軸に取った液肥散布の総費用・総収入

金谷牧業では、現在江蘇省政府からふん尿の処理対策として飼養頭数の半減を命じられたが、液肥の処理に関する経済的観点からは半減よりもさらに少ない 15%程度にまで飼養頭数を削減する必要があることを示している。またこの数値は、同時に金谷牧業と農家の双方で経済的な便益が得られる最大の飼養頭数規模を示しており、農家との交渉の結果、仮に農家が化学肥料費の節約分 100%を金谷牧業に液肥代として支払った場合の、金谷牧

業の最大飼養頭数を示している。現実には液肥代は無償提供から化学肥料費の節約分全額である 1,454 元/ha の範囲で金谷牧業と農家との間の交渉によって決定するはずである。仮に、液肥代として得られる金額が農家の化学肥料費削減分の 50%，すなわち 727 元/ha と仮定すると、ベネフィットが成立する飼養頭数は 3,326 頭まで減少する。このように、現状の 27,500 頭と比べると最大で 4,100 頭という飼養頭数規模は非常に小さなものではない。そのため、金谷牧業には液肥供給に関して、金谷牧業と農家の双方で経済的な便益が得られる飼養頭数規模を拡大することが必要となる。

金谷牧業と農家の双方に経済的な便益が得られる飼養頭数規模の範囲を拡大するためには、どのような方策が考えられるだろうか。これには大きく 2 つの方法が考えられる。1 つは液肥の総費用を削減することである。この具体的方法としては、パイプラインによる流し込み可能な面積を増加させることである。第 14 図に描かれているとおり、パイプラインの総費用はバキュームカーに比べて圧倒的に低く、パイプラインで流し込みが可能な面積をいかに増加させるかが経済的にペイする散布可能面積を増やす鍵になると思われる。現状では 36ha がパイプラインでの流し込みの限界と推計されているが、ポンプを使うことで金谷牧業よりも標高の高い水田にも散布可能になるほか、管路橋を設置することで谷や窪地を越えた範囲にまで散布が可能となる。総費用を削減するもう 1 つの方法は、バキ

第15表 液肥散布の総費用と総収入からみた最適飼養頭数

	液肥価格が化学肥料節約分の100%	液肥価格が化学肥料節約分の50%	単位
	数値	数値	
散布面積	46.0	37.3	ha
液肥散布量	6,127	4,972.5	t
うち元肥	3,676	2,983.5	t
うち追肥	2,451	1,989.0	t
ふん尿発生	6,127	4,972.5	t
うち親豚	557	452.0	t
うち子豚	5,570	4,520.5	t
最適飼養頭数	4,098	3,325.9	頭
うち親豚	235	190.5	頭
うち子豚	3,863	3,135.4	頭

注 親豚と子豚の割合は現状の1:10として算出した。

ュームカーの購入費を削減することである。分析では新車のバキュームカーを購入することを想定して推計したが、これを中古車で代替することにより、費用の削減効果が生まれると思われる。ただし、中古車を購入した場合は新車で設定した耐用年数 15 年をより短

く設定し直さなければならぬため、費用削減率よりも耐用年数の短縮率が上回れば、逆に費用の増大を招くことに注意が必要である。

金谷牧業と農家の双方に便益が得られる関係成立する最大飼養頭数を増やすためのもう1つの方法は、液肥の単価を上げ、総収入を増加させることである。これには、農家により高い液肥代を支払うインセンティブを与えることが必要で、農家が液肥を利用することによる化学肥料費削減効果をより向上させることが必要である。化学肥料の節減効果を向上させるためにどのような方策があるかについては、筆者よりも詳しい共同執筆者に筆を譲るが、より施肥効果の高い液肥づくりなども考えられるだろう。

第16表 養豚収入の概算と液肥赤字額の割合

	液肥収入が化学肥料節約分の100%	液肥収入が化学肥料節約分の50%	単位
子豚出荷頭数	50,000	50,000	頭/年
生豚価格(注1)	17	17	元/kg
養豚収入(注2)	9,350	9,350	万元
液肥赤字額	68.9	92.1	万元
養豚収入に占める赤字額割合	0.74%	0.98%	

注1 生豚価格は中国農業統計年鑑の2008年4月の平均価格を用いた。

2 子豚の出荷体量を110kgとして計算した。

第14図を見ると、バキュームカーによる散布が開始される36haから急激に費用が増加し、液肥の散布面積が増えるに従って費用は若干逡増している。バキュームカーによる散布では規模の不経済が生じていることがわかる。そのため、赤字幅は散布面積の拡大に伴って増加し、現行の飼養頭数で液肥を散布可能な319haのときは69万元の赤字となっている。したがって、現状の飼養頭数を維持し、319haの水田に液肥を供給しようとする、この69万元の赤字は本業の養豚業から補填する必要がある。金谷牧業は年間50,000頭の子豚を出荷しているが、これら養豚業からの収入を概算すると、年間9,350万元と推計された(第16表)。これを年間の液肥供給の赤字額と比較すると、赤字額は養豚業収入の0.74%となった⁽²¹⁾。これは、金谷牧業が本業である養豚業の収入の0.74%を液肥供給の費用補填に充てれば、現行の飼養頭数を維持できることを意味する。ただしこの0.74%という数値は、農家が化学肥料費節約分を100%液肥代として支払った場合のもので、現実的には農家が支払う液肥代によっては、さらに補填額が増加する点に留意が必要である。仮に、液肥代として得られる収入が農家の化学肥料費削減分の50%と仮定すると、養豚業の収入の0.98%の補填が必要で、さらに現状のように、農家から液肥代が全く得られない場

合には、総費用 115 万元全てを養豚収入で補うことになり、その額は養豚収入 9,350 万元の 1.2%に相当することが明らかになった⁽²²⁾。以上により、現行の飼養頭数を維持した上で、金谷牧業と農家の双方に経済的な便益が得られる関係を構築するには、養豚収入の 0.74~1.2%の補填が必要であることが明らかになった。

（６）小括

金壇市周辺で養豚業を営む経営者にとって、最大の懸案事項はふん尿の処理問題である。これを解決するためにふん尿またはメタン発酵後の消化液を液肥として水田へ散布し、ふん尿による水質汚濁の削減と農家における化学肥料の削減、さらにメタン発酵を行った場合には電力供給というコベネフィットを得られる。しかし、本節の対象事例である金谷牧業の場合、液肥散布の費用と収入という経済的な観点で、金谷牧業と農家の双方が経済的な便益を得られる関係を構築可能なのは、飼養頭数が最大 4,100 頭までと、現行の飼養頭数の 15%程度まで規模を縮小する必要があることが判明した。金谷牧業と農家の双方が経済的な便益を得られる関係を構築できる飼養頭数を増やすには、あまり費用のかからないパイプラインで液肥を流し込むことができる水田面積をいかに増やすかという点に依るところが大きく、今後はポンプや管路橋を用いた、より広範囲の水田へのパイプライン供給を検討すべきだろう。

一方、金谷牧業が現行の飼養頭数を維持しつつ、発生する消化液を全て水田への液肥利用で処理とした場合、金谷牧業が本業の養豚収入の 0.74~1.2%を液肥供給の費用に補填すれば、金谷牧業と農家の双方が経済的な便益を得られる関係が構築できることが明らかになった。

7. おわりに

本章では、広義の温暖化緩和策として中国金壇市における金谷牧業を事例を取り上げ、養豚業から発生する家畜ふん尿をメタン発酵し、発生した消化液を水田で液肥として利用する取組について、GHG 削減効果の計測、液肥の供給可能面積の推計、液肥供給の経済的持続可能性の評価という 3 つの視点から多角的な評価を行ってきた。広義の温暖化緩和策の場合、コベネフィットは対策から付随的にもたらされる温室効果ガスの削減効果であり、そもそも温暖化緩和に効果があるのかを検証することは（広義の）温暖化緩和策とな

るのかを判断する重要な点である。さらに、仮に GHG 削減効果を有して広義の温暖化対策と位置づけられた場合でも、その効果を安定的・継続的に発揮するための条件が整っているかを検証しなければならないだろう。本研究で取り上げた中国金壇市の事例の場合、水田における液肥の安定的な受け入れが事業継続の鍵となっている。さらに、取組の継続のためには、取組主体である養豚業者と液肥を利用する農家双方に経済的な便益がもたらされることが必要である。本章での分析は以上の背景のもと、上記に掲げた3つの視点からの温暖化緩和策の評価分析を行った。

分析の結果、今回取り上げた金谷牧業におけるメタン発酵及び水田での液肥利用の事例では、メタン発酵施設を導入する前に比べ 56.2%の GHG 削減効果を有し、金壇市の6つの大規模養豚場については、液肥の受け入れも養豚場から概ね 2km と比較的近距離で可能であることが示された。さらに、金谷牧業の場合は、液肥供給の費用と収入から考えた場合、経済的に持続可能な使用規模は 15%程度であり、それ以上の飼養規模を維持する場合には、本業である養豚業収入の 1%程度を液肥供給に補填することが必要になることが示された。

本分析は、CDM を想定して中国を対象に行った分析結果であるが、同様の多角的評価は日本国内における温暖化緩和策の事例にも当てはめることが可能である。その場合も、(1)温室効果ガス削減効果の計測、(2)原料供給量、廃棄物受け入れ量といった物理的評価、そして(3)経済的な影響評価の3点は温暖化緩和策の継続的な実施に不可欠と考えられる。このような多角的視点を提案することで、我が国における温暖化緩和策の効果を事前に厳密に精査し温暖化緩和策がより持続的なものになることが期待される。

謝辞

本研究では宇宙航空研究開発機構（JAXA）と東北大学農学研究科米澤千夏准教授の間の ALOS データ利用公募型共同研究契約によって JAXA から提供されたデータの一部を用いた。データ提供をご快諾いただいた JAXA 並びに米澤准教授に感謝の意を表する。

注

- (1) 本報告は、著者らがメンバーとして参加した科研費補助金「コベネフィット政策に向けた日中共同実証研究－有機性廃棄物循環と水質汚染防止－」（平成 22～24 年度、代表者：矢部光保教授）の成果の一部を加筆修正したものである。

- (2) 本来聞き取り調査で得られたデータを利用することが望ましいが、企業側は企業の利益や税金に直結する質問項目に対しては曖昧に回答するケースや異なる値を回答するケースが多い。また、金谷牧業では中国政府から飼養頭数を半減するよう指示を受けており、建前上はその指示に従っていることになっているが、実際には飼養頭数を削減せずに生産を継続している。このようなことから、建前上のデータと実際のデータに不整合が生じている可能性がある。そこで本研究では、一般的な母豚の出生サイクル（2回/年）と出産頭数（10頭/回）を用いて、年間の出荷頭数を 50,000 頭（母豚 2500 頭×出産 2 回×出生頭数 10 頭）と推計した。
- (3) 母豚×母豚ふん尿係数＋子豚/出産年 2 回×子豚ふん尿係数から、家畜ふん尿の排出量は 116,625kg/日と推計した。
- (4) 気候変動枠組条約の附属書 I に記載される締約国を附属書 I 国という。加盟国は、韓国とメキシコを除く OECD 加盟国と移行経済期の旧ソ連や東欧諸国から構成されている。また、附属書 I 国は GHG 削減やプロジェクトに関する報告義務もある国である。
- (5) 非附属書 I 国とは、注 4 で述べた附属書 I 国以外の国をいう。CDM においては、簡単に非附属書 I 国を「ホスト国」「途上国」、附属書 I 国を「投資国」「先進国」と呼ぶこともある。また、附属書 I 国のように GHG 削減や様々な報告の義務を負うことはない国でもある。
- (6) 本研究では計測の方法論のみを用いて計算するに留まっている。CDM の「ベースラインシナリオ」の特定に必要な投資分析やベースラインシナリオの改定等に関しては行っていない。
- (7) UFNCCC（2012）の Booklet では、AMS-Ⅲ.D. ver.18 を適用するにあたって重要な条件があるとしている（ラグーンの水深が最低 1m、畜舎から取り除いた後のふん尿の貯蔵期間が 45 日以内、嫌気性消化システムにおけるふん尿の最低保管期間が 1 ヶ月以上、ふん尿を自然水域に排出していないなど）。本研究では複数回の聞き取り調査を行ったが、上記条件に対応した回答を明確に答えて貰うことはできなかった。そのため、AMS-Ⅲ.D. ver.18 の計測を本研究に適用するための条件は整っていないが、本研究での計測はあくまでも試算であり、厳密な結果ではないことに留意して頂きたい。
- (8) 本報の水田面積は呉国岑(2012)を元にしており、水田面積の出典年次は明らかとなっていない。
- (9) 作物は施用した肥料や有機物由来の養分の全てを利用できるわけではなく、施用した一部

は溶脱・脱窒・揮散などにより土壌から損失する。また、肥料成分の利用率は、気象や土壌の条件、施肥位置や肥料形態などによって大きく異なる(金田(2005))。今回、金壇市においては、水稻による肥料の利用率が 60%となり、残りの 40%は溶脱・脱窒・揮散などにより水稻に利用されることなく、環境中に放出されたと見なすことができ、簡単のため全てが河川に流出したとする。

- (10) 柚山他(2007)では、いくつかのメタン発酵事業の原料及び消化液の成分の変化を検証している。そこでは、消化液の炭素含有率はメタン発酵により減少するが、全窒素については原料と消化液では含有率の変化は 70%~100%であり、全窒素含有率に変化のない事例が多く見受けられた。また、農村工学研究所(2012)においては、「メタン発酵において、原料に含まれる肥料成分の窒素、リン、カリウムは、ほぼ全量が消化液に移行するため、その成分はメタン発酵の成分組成を反映します」としている。そこで本章では、メタン発酵による窒素含有率の変化は無いものとして計算を行った。
- (11) 本データは、科学研究費補助金「コベネフィット政策に向けた日中共同実証研究－有機性廃棄物循環と水質汚染防止－研究代表矢部光保」における現地調査で収集したものである。
- (12) パンシャープンとは、高分解能白黒画像と低分解能カラー画像を合成して、高分解能のカラー画像データを作成することである。これにより、スペクトルの情報と形状の情報を同時に参照できるため、個別の植生群落や自然物の詳細な識別に適している。しかし、厳密なスペクトル情報は失われているので、スペクトルを利用した解析には適さない(赤松(2007))。
- (13) ポリゴンとは、多角形からなるデータであり、各頂点が座標値で管理されているベクタデータのことである(高橋他(2005))。
- (14) バッファーポリゴンとは、あるラインやポリゴンの全周囲から、指定した距離に緩衝領域(バッファー)を発生させて作成した新しいポリゴンのことである(佐土原他(2005))。
- (15) 画像の分類とは、画像に含まれる対象物をクラスあるいはカテゴリと呼ばれる複数の種類に区別する処理のことである(島田(2007))。そして、無作為に抽出した画素データをクラスタリングなどの手法により比較的糖質と考えらえるグループに機械的に分割する教師なしトレーニング(村上(2004))によりクラス分けされた画像を、ユーザーの定義によって各土地被覆へ再分類することで、土地被覆図を作成する。
- (16) 渡部(2002)によると、メタン発酵の消化液の発生量は投入したふん尿量とほぼ同量で

ある。

- (17) パイプラインでの散布可能面積については、金谷牧業周辺の傾斜や標高、地形を考慮して推計した。ポンプやホースを用いた散布では金谷牧業よりも標高の高い水田への散布も可能となるが、本分析ではこれらの利用は想定していない。また、第2部第3章には2012年にパイプラインを用いて液肥を投入した面積が40haとあり、本分析で用いた数値とは誤差がある。
- (18) 水田で用水路に液肥を流し込むので、2300mの距離にある圃場でも最も遠い場所まで液肥を運搬する必要はない。そのため、本研究では最も遠い水田でも2000mの距離を液肥運搬すれば良いと仮定し、金谷牧業から半径2000m地点に到達するルートで実走距離を計測した。
- (19) モリタエコノスにおける3t積みバキュームカーの中国販売価格600万円を1元=13円で換算した値である。本分析では5t積みバキュームカーで設定しているが、5t積みの価格データが入手できないため、3t積みで代用した。
- (20) 日本における税法上のバキュームカーの耐用年数は4年とされているが、実際の使用年数と大きな開きがあるため本分析では実際の使用年数データとして15年を用いた。日本では通常、車両の使用年数は10年程度とされているが、15年を採用した理由は以下の2つである。第1に、分析上の推計ではバキュームカーの使用は基肥と穂肥の時期の10日、年20日程度であり、1台あたりの走行距離も最大で年間982kmと稼働日数、走行距離とも非常に少なく使用年数が長くなると考えたためであり、第2に日本のバキュームカーの中古車市場を見ても、10年落ちの車両も多数出回っており、これらの中古車でもあと5年程度は十分使用可能と考えたためである。
- (21) 中国における生豚価格は変動が大きく、2008年4月の平均価格17元/kgは比較的高水準の価格である。仮に最低価格9.6元/kgを用いた場合でも、赤字額の割合は液肥収入が化学肥料節約分の100%の場合は1.3%、50%の場合でも1.74%と、養豚収入に占める赤字額の割合はわずかとなっている。
- (22) 本来であれば、本業収入の利益に対する割合で見るべきであるが、金谷牧業の営業収入や経常利益などのデータが得られなかったため、収入を概算で求めた上で評価を行った。

〔引用文献〕

赤松幸生(2007)「空からのデータ収集, 1. 衛星リモートセンシング」長澤良太・原慶太郎・

金子正美編『自然環境解析のためのリモートセンシング・GIS ハンドブック』, 古今書院, pp.72～82。

地球環境センター (online)「気候変動緩和プロジェクト等の実現可能性調査 (FS) プログラム」<http://gec.jp/main.nsf/jp/Activities-GHGmitimecha-Top> (2013 年 2 月 19 日アクセス)

地球環境戦略研究機関 (online)「IGES CDM プロジェクトデータベース」
<http://www.iges.or.jp/en/cdm/report.html> (2013 年 2 月 19 日アクセス)

地球環境戦略研究機関 (online)「小塚一久・小柳百合子編『図解 京都メカニズム 2012 年 6 月第 17 版』」,
<http://enviroscope.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/962/attach/kyomeka.pdf> (2013 年 2 月 19 日アクセス)

地球環境戦略研究機関 (online)「IGES CDM 排出削減計算シートシリーズ」
http://www.iges.or.jp/jp/cdm/report_ers.html (2013 年 2 月 19 日アクセス)

Dong, H., Mangino, J., McAllister, T.A., Hatfield, J.L., Johnson, D.E., Lassey, K.R., Lima, M.A.de., and Romanovskaya, A., (online) “Chapter 10 Emissions from Livestock and Manure Management”, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. ed., *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 4, pp.10.1-10.87.
http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf (2013 年 2 月 19 日アクセス)

金田吉弘(2005)「第 11 章作物の生育と土壌」, 三枝正彦・木村真人編集『土壌サイエンス入門』, 文永堂出版, pp.213～238。

環境省 (2007)『CDM/JI 事業調査—事業調査マニュアル 2007—』, 環境省。

金壇市(2010)『金壇市水稻施肥設計表(中文)』, 金壇市人民政府土壌肥料機関。

楠部孝誠・稲田義久・下田充 (2010)「中国農村地域におけるメタン発酵装置の導入効果と持続可能な発展」『環境科学開始』, 23 (5), pp.351-362。

前田守弘・河野憲治・谷山一郎・上藺一郎・脇門英美・加藤邦彦・井上京・中村真人・板橋直・矢部光保 (2012)「家畜排せつ物の利活用と水質問題から考える有機物管理の次世代パラダイム」『日本土壌肥科学雑誌』, 83 (2), pp.203-209。

中村真人 (2011)「メタン発酵消化液の液肥利用とその環境評価に関する研究」『農工研報』, 50, pp.1-57。

農林水産省 (online)『クリーン開発メカニズム (CDM) プロジェクト政府承認審査の結果について』<http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kankyo/120224.html> (2013 年 2 月 18 日アクセス)

農村工学研究所(2012)『メタン発酵消化液の畑地における液肥利用－肥料効果と環境への影響－』, 農村工学研究所, p.27。

水落元之(2009)「太湖流域の水汚染問題の現状」大塚健司編『中国の水汚染問題解決に向けた流域ガバナンスの構築-太湖流域におけるコミュニティ円卓会議の実験』, アジア経済研究所, pp.1～21。

村上拓彦(2004)「画像処理(Ⅲ)分類」, 加藤正人編著『森林リモートセンシング』森林林業調査会, pp.107～117。

林野庁 (2012)『CDM 植林総合推進対策事業 (CDM 植林のプログラム化の展開可能性調査) 実施報告書』, pp.12-15。

Ruan, Y., Watanabe, T., Gao, W., (2008) “A Feasibility Study on Introduction of Clean Development Mechanism for Animal Waste Management System in China” *Journal of Architecture and Urban Design*, Kyushu University, No.13, pp.91-97.

砂土原聡・吉田聡・川崎昭如・古屋貴司(2005)『図解！ArcGIS 身近な事例で学ぼう』古今書院, 176p.

島田沢彦(2007)「リモートセンシングによる解析」, 長澤良太, 原慶太郎, 金子正美編『自然環境解析のためのリモートセンシング・GIS ハンドブック』, 古今書院, pp.8～27。

高橋重雄・井上孝・三條和博(2005)「GIS の基礎知識」高橋重雄・井上孝・三條和博・高橋朋一編『事例で学ぶ GIS と地域分析』, 古今書院, pp.1～3。

UNECCC (online) “CDM Methodology Booklet”

<http://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/methbooklet.pdf> (2013 年 2 月 19 日アクセス)

UNFCCC (online) “Project 1301 : Methane Recovery and Utilization CDM Project at Muyuan Swine Farm in Henan Province”

<http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1187865378.16/view> (2013 年 2 月 19 日アクセス)

UNFCCC (online) “Project 1891 : Animal Manure Management System (AMMS) GHG Mitigation Project , Shandong Minhe Livestock Co. Ltd., Penglai, Shandong Province,

P.R. of China”

<http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1214574673.61/view> (2013 年 2 月 19 日
アクセス)

渡部 敢 (2002) 「消化液の利用技術」, 『バイオガスシステムによる家畜ふん尿の有効活用』所
収, pp.48-53。

柚山 義人・中村 真人・山岡 賢 (2007) 「メタン発酵消化液の利用技術」, 『農業土木学会論文集』
247, pp.119～129。

呉国 芩 (2012) 「養豚場の消化液の水田利用-金壇市における JAICA プロジェクトを事例として
-」『中国における有機液肥利用による面源汚染防止と環境教育, 平成 23 年度文部科学省
科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号 22380121)「コベネフィット政策に向けた日中共同
実証研究－有機性廃棄物と水質汚染防止－報告書」研究代表者矢部光保』所収, pp.44
～45。