線形計画法を用いた耕畜連携システムの環境・経済性評価法の確立 —国家レベルでの水田利活用の検討—

西田俊也¹・大石風人¹・長命洋佑¹・熊谷 元¹・広岡博之¹

¹ 京都大学大学院農学研究科, 京都市左京区 606-8502

(2013. 3. 25 受付, 2013. 9. 2 受理)

要 約 国家レベルで耕畜連携による飼料生産を線形計画法モデルにより評価した。とりわけ、本研究では水田における飼料生産に焦点を当てた。家畜については、乳用種雌牛、乳用種去勢牛、黒毛和種、交雑種、ブタ、採卵鶏およびブロイラーを取り上げ、作物については、水田の利用を想定し、水田牧草、稲発酵粗飼料、飼料用米および食用米を考慮した。目的関数を日本全体における関連農家（畜産農家と水田利用農家）の総利益とし、国全体の環境影響や労働時間を抑えつつ、経済性を最大化させる最適家畜頭数および耕地面積配分の算出を行った。関連農家の総利益が最大になったのは、家畜に関しては、黒毛和種および採卵鶏の頭羽数を増加させ、それ以外の家畜の頭羽数を削減した場合、また耕作地に関しては、食用米の代わりに稲発酵粗飼料を作付けした場合であった。さらに代替条件として、余剰窒素および温室効果ガス排出量の削減目標、水田利用に関する補助金、濃厚飼料価格、畜種ごとの飼料用米生産費の違いが最適配分に与える影響を評価した。

日本畜産学会報 84 (4), 475-486, 2013

元来、畜産は作物生産からの副産物や残渣を飼料として利用し、糞尿を堆肥として農地還元するなど作物生産と深く結びつきながら資源循環の点で重要な役割を果たしてきた。しかし 20 世紀半ばから、多くの先進国では人口増加による食料需要の増加に対応するため、生産効率を重視した規模拡大と専門化が進んだ結果、作物生産と家畜生産は分離して営まれるようになり (Naylor ら 2005 ; Ruselle ら 2007)、大量の飼料が畜産経営体の外部から購入されるようになった。一方、家畜からの糞尿は農地に還元されず、しばしば環境汚染源として深刻な環境問題を引き起こしている。さらに近年では、飼料として利用されていた作物が、新たにバイオエタノール生産に利用されるようになり、飼料作物をめぐる人間と家畜の競合問題も生じている。このような畜産由来の環境問題および飼料作物をめぐる人間と家畜との競合問題を同時に解決する方法として、分離され専門化されてきた作物生産と家畜生産を再び結びつける新しい耕畜連携生産システムの構築が、先進国を中心に模索され始めている (Schiere ら 2002 ; Naylor ら 2005 ; Russelle ら 2007 ; Herrero ら 2010)。このような耕畜連携生産システムを構築するためには、(1) システム内部の栄養素循環を最大限利用する、(2) システム外から購入する飼料や化学肥料を減少させる、(3) 余剰栄養素や環境に排せられる温室効果ガスを低減する、(4) 経営的にも持続可能である、ことが求められる。

近年、わが国においては、飼料自給率の向上と水田の有効利用の手段として飼料イネの栽培が注目されている (千田と荻野 2012)。飼料イネは利用方法によって稲発酵粗飼料 (WCS) および飼料用米に大別される。WCS は、飼料用のイネを黄熟期前期に籾茎葉ごと収穫し、一般的にラップサイレージの形で調整・保存され、主にウシの粗飼料として利用されている。一方、飼料用米は、飼料イネの子実部のみを利用した飼料のことで、トウモロコシなどの輸入穀物の代わりに濃厚飼料としてウシ、ブタ、ニワトリに利用されている。近年、飼料イネ (WCS と飼料用米) 生産は農業者戸別所得補償制度における補助金 (2012 年現在 80,000 円/10a) によって作付面積が急速に増加し、2011 年には WCS の作付面積は全国で 23,123 ha、飼料用米の面積は 33,939 ha となっている (千田と荻野 2012)。しかしながら、補助金の多寡は一過性で、社会情勢によって変化する可能性があるため、飼料イネの生産がメリットを生む補助金分岐点を明らかにする必要がある (Kikuhara と Hirooka 2009 ; 広岡と大石 2010)。これまで、WCS や飼料用米に関する研究は、主に家畜への給与試験による消化性を調べた研究が多く (小林と柳川 1984 ; 古賀ら 2003 ; 因野ら 2007 ; 勝俣ら 2009 など)、経済性や環境負荷の評価にまで踏み込んだ研究の数は限られている (藤本と恒川 2007 ; Kikuhara と Hirooka 2009 ; 千田と荻野 2012)。

連絡者：広岡博之 (fax : 075-753-6363, e-mail : hirooka@kais.kyoto-u.ac.jp)

そこで本研究では、水田における飼料イネ生産を対象に、線形計画法を用いて飼料別耕作地面積と家畜頭羽数の最適配分を検討し、さらに余剰窒素排出や温室効果ガスの削減目標、補助金の価格、飼料用米を給与する畜種別販売価格および濃厚飼料の価格の違いが、飼料別耕作地作付面積と家畜頭羽数の最適配分にどのように影響するかを調べることを目的とした。

材料および方法

1. システム境界の設定

本研究においては、水田における飼料イネ生産（ここでは専用種を想定）を中心に、飼料の供給面での作物生産と需要面での家畜生産を想定し、最適な耕畜連携生産システムの在り方を検討した。すなわち、水田利用では従来の主食用米生産に加えて WCS と飼料用米および水田牧草（ここではイタリアンライグラスを想定）の生産を想定し（いずれも自然条件の制約要因は無視して、単作と仮定）、家畜については、乳用種雌牛（泌乳牛，乾乳牛，更新雌子牛）、乳用種去勢育成牛，乳用種去勢肥育牛，黒毛和種繁殖牛，黒毛和種肥育牛，交雑種肥育牛（F₁），ブタ，採卵鶏およびブロイラーを想定した。また，本研究では家畜の飼料摂取量と給与飼料生産の需給バランスの維持を想定しているために，過不足が生じないように水田による飼料生産以外に国産飼料作物（作物統計（農林水産省 2012a）に記載されているイタリアンライグラス，青刈りトウモロコシ，ソルゴーを想定）と購入粗飼料および購入濃厚飼料（購入

飼料とは輸入・国産にかかわらずシステム外からの購入した飼料を指す)を考慮した(図1). さらに, 飼料用米に関しては, 家畜種別生産価格の違いを検討するため, ウシ用飼料用米, ブタ用飼料用米, ニワトリ用飼料用米と区分した. なお, 本研究では, 水田の利用と耕畜連携の推進に焦点を当てているため, 水田での主食用作物(麦類や大豆)の生産や水田以外の畑作に関してはシステム境界の外と考えて, 分析からは除外した.

2. ベース条件における線形計画法の目的関数と制約関数

現状での生産を想定した制約条件を設定し、それらの制約条件下において家畜および耕作地から得られる利益を最大とする飼養頭羽数および耕作地面積に対する最適解を線形計画法により求め、本研究におけるベース条件と設定した。

家畜種別頭羽数，作物種別耕作地面積，国産飼料作物量
および輸入濃厚飼料量に関するベクトル X を式(1)のよう
に定義する.

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_{21}) \quad (1)$$

式(1)において $\mathbf{x}$ ベクトル要素は表 1 の各項目番号の家畜頭羽数, 耕作地面積, 購入飼料量を示している。また各部門からの利益に関するベクトルを $\mathbf{c}$ ベクトル (表 1 に示す Benefits) と定義し, この総利益を求める目的関数 (Z) を最大化することを考えた。

$$Z = \sum_{i=1}^{21} c_i x_i \rightarrow \text{最大化} \quad (2)$$

Figure 1 Crop and animal production in this study. The arrows in the figure indicate TDN or ME flows.

制約条件 $AX \leq \text{or} = \text{or} \geq b$
 $x \geq 0$

ここで、**A** は技術係数行列、**b** は制約条件のベクトルである。主要な技術係数行列は表 1 の左辺に示し、またその推定の根拠は補足説明で述べることとした。制約条件としては、畜種全体の TDN 要求量あるいは ME 要求量の総和

が対応する給与飼料の供給量の総和と等しくなる（すなわちバランス量がゼロ）ように制約を付加し、また環境影響と総労働時間は現状の水準以下になるように制約を加えた（表 1）。その他の制約としては、飼料自給率を維持させるため、濃厚飼料における飼料用米の割合および粗飼料における牧草と WCS の割合を現状以上とした。また、各家畜

Table 1 Tableau representation for linear programming in this study

	1 Holstein (Milking)	2 Holstein (Fattening)	3 Holstein (Growing)	4 JB ¹ (Cow)	5 JB (Fattening)	6 F ₁ ² (Fattening)	7 F ₁ (Growing)	8 Pig
Cattle TDN (Concentrate)	-2711	-2225	-376	-602	-1880	-2085	-376	0
Cattle TDN (Roughage)	-2650	-184	-740	-1684	-179	-162	-740	0
Pig TDN production	0	0	0	0	0	0	0	-667
Poultry ME production	0	0	0	0	0	0	0	0
Nitrogen excretion	96.23	44.41	40.88	86.86	40.63	44.41	12.27	7.88
GHG emission	6986	1507	866.21	2479	1506	1506	866	140
Labor time	99.00	16.60	7.18	93.45	50.46	27.09	9.86	2.80
Energy use	7769	218	218	180	218	218	218	950
Benefits	531891	111824	50198	237189	333173	306864	108482	32792
Unit	head	head	head	head	head	head	head	head

	9 Layer	10 Broilers	11 Feed crops	12 Pasture in paddy fields	13 WCS	14 Feed rice (For cattle)	15 Feed rice (For pig)	16 Feed rice (For poultry)
Cattle TDN (Concentrate)	0	0	0	0	0	4439	0	0
Cattle TDN (Roughage)	0	0	4010	3799	5890	0	0	0
Pig TDN production	0	0	0	0	0	0	4505	0
Poultry ME production	-203	-273	0	0	0	0	0	75184
Nitrogen excretion	0.67	0.54	-164	-160	-150	-150	-150	-150
GHG emission	5.12	3.86	1806	1866	11354	11354	11354	11354
Labor time	0.45	0.14	137.03	137	203	182	182	182
Energy use	48	51	6535	6761	6387	6397	6397	6397
Benefits	2573	1963	-301079	63149	225000	257640	257640	257640
Unit	head	head	ha	ha	ha	ha	ha	ha

	17 Food rice	18 Purchased concentrate	19 Purchased roughage	20 Purchased feed (Pig)	21 Purchased feed (Poultry)	Type	Constraints
Cattle TDN (Concentrate)	0	0.75	0	0	0	=	0
Cattle TDN (Roughage)	0	0	0.52	0	0	=	0
Pig TDN production	0	0	0	0.79	0	=	0
Poultry ME production	0	0	0	0	11.63	=	0
Nitrogen excretion	-6.31	0	0	0	0	≤	Current ³
GHG emission	11354	0.39	0.24	0.4	0.37	≤	Current
Labor time	260	0	0	0	0	≤	Current
Energy use	9138	5.8	3.5	5.9	5.6	≤	Current
Benefits	398900	-40	-50	-40	-40		
Unit	ha	kg	kg	kg	kg		

¹ Japanese Black cattle

² Crossbreds of Japanese Black sire and Holstein dam

³ Current situation

頭羽数においては乳用種肥育牛および F_1 以外の家畜頭羽数の変動幅の制約値を現状の $\pm 20\%$ とし、乳用種去勢肥育牛と乳用種去勢育成牛、黒毛和種繁殖牛と黒毛和種肥育牛および F_1 肥育牛と F_1 育成牛の頭数のバランスを現状のまま維持することとした。乳用種雌牛は、次世代の乳用種去勢牛（育成牛も含む）と同数の乳用種雌牛および F_1 （雌雄の肥育牛と育成牛の和）を生産すると仮定し、乳用種雌牛頭数 = 乳用種去勢牛頭数 $\times 2 + F_1$ 頭数となるように制約を付加した。ここで、乳用種去勢牛頭数に 2 を乗じたのは乳用種雌牛が生産する乳用種牛の雌雄を 1 : 1 と想定したためである。また西田ら（2013）の F_1 生産を想定した乳牛集団の牛群モデルから、乳牛の集団を維持するためには乳牛における黒毛和種精子交配率を 33.8% 以下にする必要があると推定されたため、 F_1 の頭数は乳牛の 33.8% 以下になるようにした。以上の家畜生産からの利益や技術係数は、年単位である作物生産に合わせるために、畜種ごとの生産サイクルの相違を補正して 1 年単位で算出した。

一方、耕作地面積に関しては、水田の利用配分に着目して、作付されている飼料作物面積（864,493 ha）と、耕作地の総面積（2,544,953 ha）は現状のまま維持するように制約した。さらに主食用米面積は 138 万 ha 以上としたが、これは日本の食用米需要を満たすうえで必要な面積であると考えたためである（農林水産省 2010）。また飼料用米の畜種ごとの供給割合は、吉田（2012）の報告を参考に、ウシ、ブタ、ニワトリそれぞれ 15%、42%、40% と想定して、その配分をウシ、ブタ、ニワトリ用の飼料用米作付面積に比例配分する制約を付加した。現実には、現在の生産および加工の技術水準と加工費用を想定すれば、飼料用米はすべてニワトリに給与されることになる予想されるが、本研究では、飼料用米の広範な畜産農家への利用を促し、吉田（2010）の報告した値をこれから飼料用米の導入を考えている畜産農家の飼料用米に対する潜在的需要量と考え、制約条件に加えることにした。なお、本来なら全農スキーム分を考慮する必要があるが、現時点ではその情報を入手することができなかったため、吉田（2010）の資料を参考に設定した。

3. ベース条件に対する代替条件の設定

本研究では、上記のベース条件に対して以下の代替条件を設定した。代替条件の第 1 と第 2 は、それぞれ余剰窒素排出量と温室効果ガス排出量に、政策的に削減目標が設定された場合を仮定して、それぞれのケースで最適な家畜頭羽数および耕作地面積を算出し、現在の制約値を 100 として環境影響削減率の計算を行った。第 3 の代替条件としては、水田利用に関する補助金の影響を調べた。現在、飼料イネの補助金は 80,000 円/10a、水田における牧草作付けの補助金は 35,000 円/10a と設定されているが、今後補助金が削減された場合の最適な家畜頭羽数および耕作地面積の配分を検討した。また、第 4 の代替条件としては、

濃厚飼料の価格が現在より高騰した時の最適な家畜頭羽数および耕作地面積を調べ、第 5 の代替条件では、畜種別に飼料用米生産費が変化した場合の影響を調べた。なお、第 5 の代替条件以外では、耕種農家は飼料用米を生産する段階でどの畜種に利用されるかは考慮していないので、ウシ、ブタおよびニワトリ用の飼料用米の生産費は等しいものと仮定しているが、第 5 の代替条件では、実際に給与する畜種によって加工コストが異なり、生産費に違いが生じることになるので、そのような畜種別の飼料用米価格の違いが最適な家畜頭羽数および耕作地面積に及ぼす影響を調べることを試みた。なお、飼料用米の流通経費や倉庫料は条件によって大きく異なる可能性があるため、本研究では考慮しなかった。

結果および考察

1. ベース条件

ベース条件における計算結果と現状の水準を表 2 に示す。ここでは家畜頭羽数に関して、乳用種の去勢肥育牛と育成牛、黒毛和種の繁殖牛と肥育牛、および F_1 肥育牛と F_1 育成牛の頭数が互いに関連性があるため、簡素化してそれぞれ乳用種去勢牛、黒毛和種、 F_1 として一つにまとめて表記した。

分析の結果、最適条件下での黒毛和種、採卵鶏およびブロイラーの頭羽数は現状と比較して増加したのに対し、その他の家畜の頭数は減少し、特に乳用種雌牛以外の家畜種では下限制約値（ -20% ）まで減少した。耕作地面積に関しては、水田牧草面積は現状維持であったのに対し、主食用米の作付面積では下限値（ -20% ）となり、WCS の作付面積が増加した。粗飼料に関しては、水田牧草ではなく WCS 生産が選択されたのは、単位面積当たりの TDN 収量および利益（補助金も含めて）が水田牧草よりも WCS の方が大きかったためと考えられた。

ベース条件における関連農家の利益の総計と環境負荷および労働時間の総計を示したのが表 3 である。ベース条件における窒素排出量、温室効果ガス排出量、エネルギー利用量は現状よりも、それぞれ 5.4%、4.5%、9.0% 減少し、その減少幅から環境影響においては温室効果ガス排出量の制約が最も強く働くことが示された。一方、労働時間の減少率は 0 で、本研究において労働時間の制約が最も大きいことが示された。またベース条件における総利益が現状の総利益よりも 10.1% 大きくなったことから、家畜頭羽数や飼料作物の作付面積の枠組みを変えることで、環境影響と労働時間を現状の水準で維持しつつ、関連農家の総利益の向上を図ることができる可能性が示唆された。なお、この総利益の増加は、水田における飼料作物生産による補助金の増加が大きく寄与したものであった。

2. 代替条件

1) 余剰窒素排出量の削減効果

現状において家畜からの排泄量と耕作地への窒素還元量

Table 2 Comparison of the number of livestock and arable land between current situation and base simulation

	Holstein (Milking cow) (head)	Holstein (Steers) (head)	JB ¹ (head)	F ₁ ² (head)	Pig (head)	Layer (head)	Broilers (head)
Current ³	1,467,000	538,500	1,490,600	631,606	8,220,430	181,664,000	102,987,000
Base	1,299,393	430,099	1,788,720	439,915	6,576,344	217,996,000	123,584,000
Change (%)	-11.4	-20.0	+20.0	-30.0	-20.0	+20.0	+20.0
	Feed crops (ha)	Pasture in paddy fields (ha)	WCS (ha)	Feed rice (For cattle) (ha)	Feed rice (For pig) (ha)	Feed rice (For poultry) (ha)	Rice (ha)
Current	864,910	0	23,123	5,091	14,254	13,576	1,624,000
Base	864,910	0	250,772	4,836	13,540	12,895	1,398,000
Change(%)	0	0	+1,084.5	-5.0	-5.0	-5.0	-14.0

¹ Japanese Black cattle

² Crossbreds of Japanese Black sire and Holstein dam

³ Current situation

Table 3 Environmental impacts, labor time, and benefit under the current situation and base simulation

	Nitrogen surplus (1000t)	GHG emission (1000t)	Labor time (million hour)	Energy use (1000 GJ)	Benefit (100 billion yen)
Current ¹	361	47,642	942	199,990	15.97
Base	341	45,479	942	181,972	17.57
Change (%)	-5.4	-4.5	0	-9.0	+10.1

¹ Current situation

のバランスは正の値であったことから、日本全体で見た場合、窒素は余剰であることが示された（表 3）。そこで余剰窒素排出量の削減目標を設定し、その削減目標が実現されたと仮定して、余剰窒素排出量を現状から段階的に減少させるシミュレーションを行った。その結果、余剰窒素排出量削減率が 5% 以下では、家畜頭羽数はベース条件と同じであった（図 2）が、余剰窒素排出量の削減率が 6% を超えると、乳用種雌牛、乳用種去勢牛、F₁、ブロイラーおよび採卵鶏の頭羽数が減少し、さらに余剰窒素排出量の削減率が 29% 以上では採卵鶏の羽数が下限値（-20%）まで減少し、その後に黒毛和種と F₁ の頭数が大幅に減少した。一方、ブタの頭数は下限値（-20%）で一定であった。

他方、耕作地面積に関しては、余剰窒素排出量の削減率が 28% 以下では変化が見られなかったが、29% 以上になると WCS の耕作地面積が減少した。これは、粗飼料 TDN 要求量の最も多い乳用種雌牛の頭数が減少し、家畜全体の粗飼料 TDN 要求量が低下したためと考えられた。

さらに関連農家の総利益は、窒素排出量の削減率の限界（41%）まで削減したと仮定した時には 1,415,213 百万円となり、現状（1,597,299 百万円）よりも小さな値となった（この限界以上の削減率では解は得られなかった）。一般に、窒素排出量の削減率が大きくなるに伴って、関連農

家全体の利益は減少するが、本研究の場合、関連農家全体の利益を維持した状態では 29% まで窒素を削減できる可能性が示唆された。

2) 温室効果ガス排出量の削減効果

温室効果ガス排出量の削減率の増加に伴う最適な家畜頭羽数と耕作地面積の推移を示したのが図 3 である。家畜頭羽数においては、温室効果ガス排出量の削減率が 4% 以下では各畜種の頭羽数に変化が見られなかったが、5% 以上では乳用種雌牛および F₁ の頭数が減少した。さらに削減率が 13% を超えると黒毛和種の頭数が急激に減少し、次いでブロイラーおよび採卵鶏の羽数が減少した。しかし、ブタの頭数は温室効果ガス削減率と関係なく下限値で一定であった。このような結果から、家畜頭羽数の増減の観点から温室効果ガスを削減するには、1 頭当たりのメタン排出量の大きい乳用種雌牛や F₁ の頭数を減らすことが推奨された。

他方、耕作地面積に関しては、温室効果ガス排出の削減率が 8% で WCS の耕作地面積が減少し、代わりに水田牧草の耕作地面積が増加した。これは単位面積当たりの温室効果ガス排出量が、水田牧草の方が、メタン排出量の多い WCS 生産より小さいためと考えられた。さらに削減率が高くなり 17% 以上になると水田牧草の耕作地面積も減少し、代わりに飼料用米の耕作地面積が増加した。このこ

Figure 2 Optimum number of livestock and arable land in various targeted reduction ratio of nitrogen excretion

とは、水田牧草生産の単位面積当たりの温室効果ガス排出量は、飼料用米生産より小さいものの、水田牧草の耕作地面積の増加によって飼養できるウシの頭数も増加し、その結果、ウシからのメタン排出量が増加したためと推察された。

温室効果ガス排出量を限界まで削減したと仮定した際（削減率 19%）の関連農家の総利益は 1,357,000 百万円で、現状（1,597,299 百万円）よりも小さな値であった。しかしながら削減率が 18% の時の総利益は 1,435,859 百万円であることから、この削減率までは国家規模で各畜種の頭羽数配分を変えることで、現状の総利益を維持しつつ、温室効果ガスを削減できる可能性のあることが示唆された。

3) 飼料イネ生産のための補助金の効果

飼料イネ生産のための補助金の効果は表 4 に示すとおりである。なおブタおよびブロイラーの頭羽数はシミュレーションを通じて変化しなかったため、この表には掲載しなかった。

飼料イネ生産のための補助金をベース条件の 80,000 円/10a から 55,000 円/10a まで減額しても、水田の利活用に変化は見られなかったが、補助金が 50,000 円/10a 以下になると WCS の耕作地面積が減少し、代わりに水田牧草の耕作地面積が増加した（表 4）。また補助金が 10,000 円/10a になると水田牧草の耕作地面積が減少し、代わりに主食用米の耕作地面積が増加した。

他方、家畜頭羽数においては、補助金が 10,000 円/10a

Figure 3 Optimum number of livestock and arable land in various targeted reduction ratio of GHG emission

になると乳用種雌牛の頭数が下限値（－20%）まで減少した。これは、補助金が低下して水田からの牧草生産が減少し、その影響を乳用種雌牛が最も大きく影響を受けたためと考えられた。

以上の結果から補助金が 55,000～50,000 円/10a 間に WCS を生産するメリットが消失する分岐点、15,000～10,000 円/10a の間に水田牧草を生産するメリットが消失する分岐点が存在していることが示された。柳沢(2003)は、WCS 生産において収支のバランスを取るために必要となる補助金価格は 46,000～57,000 円/10a と報告しているが、本研究では補助金から生産費を差し引いた値が 0 となる補助金価格は 57,500 円/10a と予測されており、

本研究の結果は、柳沢（2003）の報告と比べて少し高かったものの、妥当であると考えられた。また水田牧草から主食用米へ移行する分岐補助金価格は WCS から水田牧草への分岐補助金価格よりもさらに小さかった。このことから現在の補助金が大幅に削減されない限り、主食用米を生産するよりも WCS や水田牧草などの粗飼料を生産する方が関連農家の総利益は高くなり、農家経営には有利であることが示唆された。

4) 輸入濃厚飼料価格高騰の影響

現在、日本の畜産は輸入濃厚飼料に大きく依存しているが、輸出国の食糧戦略や他の国際情勢から将来にわたって安価な濃厚飼料を輸入し続けることができる保証はない

Table 4 Comparison of optimum rations and benefit between various simulation

	Holstein (Milking cow) (million head)	JB ¹ (million head)	Layers (million head)	Pasture in paddy fields (million ha)	WCS (million ha)	Feed rice (For cattle) (ha)	Feed rice (For pig) (ha)	Feed rice (For poultry) (ha)	Food rice (million ha)	Benefit (100 billion yen)
Current	1.47	1.49	181.66	0.00	0.02	5,091	14,187	13,677	1.624	15.97
Base	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	4,836	13,540	12,895	1.398	17.57
Subsidies for forage rice (10000 yen/10a)										
7.0	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	4,836	13,540	12,895	1.398	17.44
5.5	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	4,836	13,540	12,895	1.398	16.87
5.0	1.45	1.79	217.99	0.25	0.00	5,002	14,008	13,341	1.398	16.83
1.5	1.45	1.79	217.99	0.25	0.00	5,002	14,008	13,441	1.398	16.21
1.0	1.17	1.79	217.99	0.08	0.00	4,694	13,142	12,516	1.641	16.15
0.0	1.17	1.79	217.99	0.00	0.00	4,694	13,105	12,481	1.650	16.11
Price of concentration (yen/kg)										
50	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	4,836	13,540	12,895	1.398	15.38
88	1.17	1.79	217.99	0.00	0.23	6,631	18,567	17,683	1.398	7.2
89	1.17	1.79	217.99	0.00	0.00	43,615	122,122	116,306	1.398	7.0
100	1.17	1.79	217.99	0.00	0.00	43,615	122,122	116,306	1.398	5.0
Differences between cattle and poultry for purchases costs of feed rice (yen/kg)										
5.9	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	0	0	31,252	1.398	17.58
6.0	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	31,277	0	0	1.398	17.58
Differences between pig and poultry for purchases costs of feed rice (yen/kg)										
5.6	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	0	0	31,252	1.398	17.58
5.7	1.30	1.79	217.99	0.00	0.25	0	31,287	0	1.398	17.58

¹ Japanese Black cattle

(義平ら 2004)。輸入濃厚飼料の価格は 2007 年に大幅に高騰し、一時は 2008 年の金融危機で下落したものの、米国農務省需給見通しで、輸出需要の増加と単収の低下により期末在庫率が下方修正されたことで再び上昇に転じ、現在も期末在庫率が低水準である (JA 全農 2013) ことから、今後も価格は高水準のまま推移することが予想される。

本研究の分析の結果、濃厚飼料価格が上昇しても 88 円/kg 以下では家畜頭羽数および耕作地面積に変化はみられなかったが、89 円/kg 以上になると WCS の作付面積が減少し、代わりに飼料用米の作付面積が増加し、同時に乳用種雌牛の頭数が減少することが示された (表 4)。ここで得られた 88 円/kg の濃厚飼料価格は、現在の実勢価格と比べてかなり高い水準で、この結果は、濃厚飼料価格が 88 円/kg まで高騰したと仮定してはじめて、飼料用米が積極的に利用されることを示唆しており、飼料用米を補助金なしで普及するためには、かなりの生産コストの削減が必要であると考えられた。

5) 畜種別飼料用米生産コストの効果

飼料用米を家畜に給与する場合、畜種によっては飼料用米の加工が必要で、そのような加工コストを生産コストに加える必要がある。本研究のベース条件では飼料用米生産費は畜種に関係なく等しいと仮定していたが、より現実的には、加工コストを加えた飼料用米生産費は畜種ごとに異なることになり、飼料用米の作付面積も異なることが予想される。そこで、飼料用米生産配分に関する制約 (ウシ 15%、ブタ 42%、ニワトリ 40%) をなくし、ウシ用とブタ用のための加工コストはニワトリ用よりも高いと考え、ウシ用とブタ用の生産コストを増加させた時の最適家畜頭羽数と作付面積の変化を表 4 に示している。

生産費を等しいとしたままで、畜種ごとの飼料用米生産

配分に関する制約をなくした予備的分析の結果、飼料用米が全て採卵鶏用に生産されることとなった。これは、家畜のエネルギー要求量当たりの利益が採卵鶏で最も大きかったためと考えられる。一般に採卵鶏やブロイラー生産においては、粳米でも給与できるため加工が不要であり (農林水産省 2011)、最も低コストで利用でき、濃厚飼料との代替率を高められる期待が大きい (吉田 2010)。

次に、ウシ用とブタ用の飼料用米生産費を個別に変化させたところ、ウシ用飼料用米の生産費がニワトリ用飼料用米よりも 6.0 円/kg 以上安価であれば、ウシ用飼料用米を作付けることが選択され、ブタ用飼料用米の生産費がニワトリ用飼料用米よりも 5.7 円/kg 以上安価であれば、ブタ用飼料用米の作付けが選択された。このことから、純粋に経済性を考えた場合、ウシやブタに飼料用米を給与しようとする場合、ニワトリよりもさらに安価に提供される必要があると考えられた。この結果から、今後、ウシやブタへの飼料用米給与を実現するためには、安価に提供する分を飼料用米の作付け (戦略作物助成) や飼料用米のわら利用 (耕畜連携助成) などの補助金の投入で補填し、主食用米を生産した場合と同等の所得水準を確保するほか、飼料用米を摂取した家畜の畜産物の特性や機能を解明することで付加価値を生じさせ、消費者への需要拡大をはかることも重要であると考えられた。その一例として、ブタに飼料用米を給与することで、豚肉の脂肪酸組成においてリノール酸が減少しオレイン酸が増加することが報告されている (森山 1985)、このような脂肪酸組成の違いに付加価値をつけて販売できるのであれば、付加価値の大きさ次第では豚における利用も可能であると推察される。

3. 本手法の応用と限界

本研究では、水田における飼料生産に焦点を当てて、国

家レベルでのモデル開発と政策提言を試みたが、本研究の手法は、家畜頭数や飼料作物の作付面積に関する統計値が利用できれば、都道府県や市町村の自治体レベルでも適用が可能である。さらに、目的関数の設定や制約条件の変更によって、さまざまな条件を想定した分析が可能で、応用範囲は広いと考えられる。

しかしその一方で、本研究では多くの仮定と単純化によってモデルが構築されているが、今後、より多くの情報を収集し、モデルの改良を行っていく必要があると推察される。どのようなモデルも、完全なモデルはなく、今後、さらなる研究の進展が不可欠である。

補 足 説 明

本研究で仮定した線形計画モデルの技術係数行列と制約ベクトルの数値は以下の方法によって求めた。

1. 利益

ウシ、ブタ、飼料作物および牧草の利益に関しては畜産物生産費（農林水産省 2012b）、ニワトリに関しては類型別営農統計（農林水産省 2012c）を参考にし、粗収益から労働費と飼料費を含まない生産費を差し引いて求めた数値を利益とした。作物生産の利益に関しては、補助金（食用米に関しては販売価格も含む）から労働費を含まない生産費を差し引いて求めた。また WCS 生産の利益は、農業・食品産業技術総合研究機構（2008）の報告、飼料用米生産の利益は農畜産業振興機構（2009）の報告、主食用米生産の利益は米及び麦類の生産費（農林水産省 2012d）を参考にした。ただし、飼料作物生産からの販売費は家畜生産の飼料費によって相殺されると仮定して、これらの費目はモデルに含めなかった。なお現在作付けしている国産飼料作物に関しては、その生産量のうちの水田の利用がどの程度行われているか不明のため、補助金は考慮しなかった。

2. 家畜の給与飼料成分と摂取量

水田牧草および飼料作物に含まれている牧草はイタリアンライグラスを想定し、輸入飼料に関しては、肉牛の濃厚飼料は Ogino ら（2004）が採用した飼料組成、乳牛と F₁ の濃厚飼料は西田ら（2013）の聞き取りから得られた飼料組成を参考にして設定し、購入粗飼料は Ogino ら（2004）の報告で設定されている乾草を参考にした。ブタの購入飼料の組成は Ogino ら（2013）の報告を参考にし、ニワトリの購入飼料の組成は脇と村野（2009）の報告を参考にして設定した。

エネルギー要求量に関して、ウシおよびブタにおいては可消化養分総量（TDN）を考慮し、ニワトリにおいては代謝エネルギー（ME）を考慮した。ウシの濃厚飼料と粗飼料別の TDN 要求量は各都道府県の乳牛、肉用牛近代化計画を参考にし、平均値を利用した。ブタの TDN 要求量は日本飼養標準豚（2005 年版）（農業・食品産業技術総合研究機構 2005）を参考に、またニワトリの ME 要求量は日本飼養標準家禽（農業・食品産業技術総合研究機構 2011）を参考にした。

3. 作物生産

現在作付している国産飼料作物に関しては、牧草（イタリアンライグラス）、青刈りトウモロコシおよびソルゴーを考慮した。飼料作物の面積当たりの技術係数行列の数値は牧草（イタリアンライグラス）、青刈りトウモロコシおよびソルゴーの技術係数行列の数値を現在のそれぞれの作物の作付面積（牧草は 755,100 ha、青刈りトウモロコシは 92,200 ha、ソルゴーは 17,600 ha）で加重平均して求めた。作物の収量に関して、牧草、青刈りトウモロコシおよびソルゴーは作物統計（農林水産省 2012a）を参考にし、それぞれ 3,500 kg/10a、5,110 kg/10a および 5,340 kg/10a とした。WCS は広岡ら（2008）の報告を参考にし、乾物収量で 1,000 kg/10a とし、飼料用米は中野（2011）を参考にし、原物収量で 546 kg/10a とした。また現状の家畜頭羽数および面積に関して、家畜頭羽数は畜産統計（農林水産省 2012e）を参考にし、飼料作物および主食用米は作物統計（農林水産省 2012a）を参考にし、飼料イネに関しては谷口（2012）を参考にした。

一方、水田牧草、WCS、飼料用米、飼料作物 1 ha 当たりのエネルギー供給量は、収量にエネルギー含有率を乗じて算出した。ただし作物当たりのエネルギー含有率は日本標準飼料成分表（農業・食品産業技術総合研究機構 2009）を参考にした。

4. 窒素収支

家畜が排出した窒素はウシで 13.7%、ブタで 24.2%、ニワトリで 51.5% 揮散すると仮定し（實示戸ら 2003）、残りの窒素は堆肥として作物生産に利用されると仮定した。家畜およびニワトリ 1 頭羽当たりの糞尿中窒素量は築城と原田（1997）の報告を参考にして設定した。また、各畜種からの堆肥はまとめて飼料作物生産のための土地に還元されると仮定し、本研究では、肥効率と化学肥料に対する代替率を家畜部門で考慮した。なお、肥効率および代替率は家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル（農業・生物系特定産業技術研究機構 2004）を参考にし、肥効率はウシで 30%、ブタで 50%、ニワトリで 70% とし、代替率はウシで 30%、ブタで 60%、ニワトリで 60% とした。

牧草、青刈りトウモロコシおよび主食用米の 1 ha 当たりの窒素必要量は家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル（農業・生物系特定産業技術研究機構 2004）、WCS は稲発酵粗飼料生産・給与技術マニュアル（農林水産省 2011）を参考にし、飼料用米の窒素必要量は WCS と同等とした。また、以上の作物生産では堆肥を最大限利用することを想定したが、食用米に関しては現実の堆肥の利用を想定した。すなわち、食用米に関しては、西尾（2003）の報告における水田に投入された総堆肥量から、1 ha 当たりの窒素必要量を算出した。ソルゴーに関してはデータが存在していなかったため、青刈りトウモロコシと同等とした。

5. 温室効果ガス排出量およびエネルギー利用量

ウシ 1 頭 1 年当たりの温室効果ガス排出量およびエネルギー利用量は Ogino ら（2004, 2007, 2008）を参考に、ブ

タは Ogino ら (2013), 採卵鶏は Dekker ら (2011), ブロイラーは Pelletier (2008) の報告をそれぞれ参考にした。ただし家畜管理および排泄物処理によって排出される温室効果ガス排出量およびエネルギー利用量のみ考慮し、飼料生産および飼料輸送によって排出される温室効果ガスは考慮しなかった。作物生産によって排出される温室効果ガス排出量およびエネルギー利用量は LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル (農業環境技術研究所 2003) を参考にした。ただし WCS および飼料用米生産に対するエネルギー消費量は農林水産省 (2010) の低コスト生産の事例を参考にし、主食用米の 30% 減とした。また購入飼料 1 kg 当たりの温室効果ガス排出量およびエネルギー利用量は Ogino ら (2008) の報告のインベントリを参考に計算した。

6. 労働時間

ウシおよびブタの生産に対する労働時間は畜産物生産費 (農林水産省 2012b) を参考にし、ニワトリに関しては類型別営農統計 (農林水産省 2012c) を参考にし、主食用米生産における労働時間は米及び麦類の生産費 (農林水産省 2012d), WCS 生産に対する労働時間は柳沢 (2003) を参考にし、また飼料用米生産における労働時間は農林水産省 (2010) の低コスト生産の事例を参考にし、主食用米の 30% 減とした。青刈りトウモロコシおよびソルゴー生産に対する労働時間は粗飼料・草地ハンドブック (高野ら 1989) を参考にし、牧草生産の労働時間は青刈りトウモロコシおよびソルゴーの平均値を用いた。

謝 辞

本研究の一部は日本生命財団環境問題個別研究助成の援助によって行われたものである。記して感謝する。

文 献

- Dekker SEM, de Boer IJM, Vermeij I, Aarnink AJA, Groot Koerkamp PWG. 2011. Ecological and economic evaluation of Dutch egg production systems. *Livestock Science* **139**, 109-121.
- 藤本高志, 恒川磯雄. 2007. 飼料用稲を機軸とする耕畜連携システム導入の費用と便益: 飼料自給・糞尿循環利用・水田保全に及ぼす影響の経済評価. *農業経営研究* **45**, 1-11.
- Herrero M, Thornton PK, Notenbaert AM, Wood S, Msangi S, Freeman HA, Bossio D, Dixon J, Peters M, van der Steeg J, Lynam J, Partharathy Rao P, MacMillan S, Gerard B, McDermott J, Sere C, Rosegrant M. 2010. Smart investments in sustainable food production: Revising mixed crop-livestock systems. *Science* **327**, 822-855.
- 広岡博之, 石川哲也, 草佳那子, 石田元彦. 2008. 飼料イネ生産と結びついた肉用繁殖生産システムの窒素の利用性と循環性に関するモデル分析. *日本畜産学会報* **80**, 17-25.
- 広岡博之, 大石風人. 2010. 稲発酵粗飼料を利用した肉用牛肥育生産に関する最適飼料設計. *日本畜産学会報* **81**, 333-343.
- 寶示戸雅之, 池口厚男, 神山和則, 島田和宏, 荻野暁史, 三島慎一郎, 賀来康一. 2003. 我が国農耕地における窒素負荷の都道府県別評価と改善シナリオ. *日本土壌肥科学雑誌* **74**, 467-474.
- 因野要一, 石塚 譲, 中西直人, 押部明德, 三津本充, 松崎正敏, 柴 伸弥, 高平寧子, 宮島恒晴, 宮原雅明, 入江正和. 2007. 飼料イネを給与した肥育牛の筋肉および脂肪中ビタミン A および E 含量. *近畿中国四国農業研究* **10**, 47-53.
- JA 全農. 2013. 配合飼料情勢. [homepage on the internet]. JA 全農, 東京; [cited 6 January 2013]. Available from URL: <http://jaccnet.zis-ja.com/d108000000/d1080100000/back-number.html>
- 勝俣昌也, 佐々木啓介, 斉藤真二, 石田藍子, 京谷隆侍, 本山三知代, 大塚 誠, 中島一喜, 三津本充. 2009. 肥育後期豚への玄米の給与が皮下脂肪の性状に及ぼす影響. *日本畜産学会報* **80**, 63-69.
- Kikuhara K, Hirooka H. 2009. Application of a simulation model for dairy cattle production systems integrated with forage crop production: the effects of whole crop rice silage utilization on nutrient balances and profitability. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* **22**, 216-224.
- 小林博史, 柳川道夫. 1984. 豚の肉質改善に関する試験 (第 5 報) 飼料用米の給与が豚肉質に及ぼす影響. *埼玉県畜産試験場研究報告* **22**, 71-77.
- 古賀照章, 大久保吉啓, 久保田和弘, 唐沢哲哉, 岸本 剛, 田中章人. 2003. 飼料イネの粉または穂を泌乳牛および乾乳牛へ給与した場合の消化率. *長野県畜産試験場研究報告* **30**, 1-5.
- 森山則男, 高橋寿道, 原島昇晃, 五十嵐真哉, 藤井孝文. 1985. 肥育豚に対するモミ米給与. *新潟県畜産試験場研究報告* **6**, 133-138.
- 中野真理. 2011. 飼料用米の現状と課題. 調査と情報—ISSUE BRIEF—**716**. [homepage on the Internet]. 国立国会図書館, 東京; [cited 6 January 2013]. Available from URL: <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/2800346/www.ndl.go.jp/jp/data/publication/issue/pdf/0716.pdf>
- Naylor R, Steinfeld H, Falcon W, Galloway J, Smil V, Bradford E, Alder J, Mooney H. 2005. Losing the links between livestock and land. *Science* **310**, 1621-1622.
- 西田俊也, 小栗道政, 大石風人, 長命洋佑, 熊谷 元, 荻野暁史, 広岡博之. 2013. 環境負荷と経済性の両面から見た交雑種 (F₂) 生産における持続可能性の評価. *日本畜産学会報* **84**, 191-201.
- 西尾道徳. 2003. 統計データに基づく家畜ふん尿窒素のフローシートと土壌負荷原単位の推定. *日本土壌肥科学雑誌* **74**, 721-730.
- 農畜産業振興機構. 2009. 飼料用米生産の現状とコストダウンの可能性. [homepage on the Internet]. 農畜産業振興機構, 東京; [cited 6 January 2013]. Available from URL: <http://lin.alic.go.jp/alic/month/domefore/2009/oct/spe-01.htm>
- 農業・食品産業技術総合研究機構. 2009. 日本標準飼料成分表. 中央畜産会, 東京.
- 農業環境技術研究所. 2003. LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル. 「環境研究」環境影響評価のためのライフサイクルアセスメントの開発. 研究成果報告書別冊. [homepage on the Internet]. 農業環境技術研究所, 東京; [cited 06 January 2013]. Available from URL: http://www.niaes.affrc.go.jp/project/lca/lca_m.pdf
- 農業・生物系特定産業技術研究機構. 2004. 家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル. 農業・生物系特定産業技術研究機構, 東京.

- 農業・食品産業技術総合研究機構. 2005. 日本飼養標準 (豚). 中央畜産会, 東京.
- 農業・食品産業技術総合研究機構. 2008. 飼料用稲導入の背景と耕種・畜産部門の経済性. [homepage on the Internet]. 農業・食品産業技術総合研究機構, 東京; [cited 6 January 2013]. Available from URL : http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/manual_paddy200804_01.pdf
- 農業・食品産業技術総合研究機構. 2011. 日本飼養標準 (家禽). 中央畜産会, 東京.
- 農林水産省. 2010. 米粉用米・飼料用米の生産をめぐる状況. [homepage on the Internet]. 農林水産省, 東京; [cited 6 January 2013]. Available from URL : <http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/info/pdf/100331mj.pdf>
- 農林水産省. 2011. 稲発酵粗飼料生産・給与技術マニュアル. 日本草地畜産種子協会, 東京.
- 農林水産省. 2012a. 平成 22 年 作物統計. 農林統計協会, 東京.
- 農林水産省. 2012b. 平成 22 年 畜産物生産費. 農林統計協会, 東京.
- 農林水産省. 2012c. 平成 22 年 類型別営農統計. 農林統計協会, 東京.
- 農林水産省. 2012d. 平成 22 年 米及び麦類の生産費. 農林統計協会, 東京.
- 農林水産省. 2012e. 平成 22 年 畜産統計. 農林統計協会, 東京.
- Ogino A, Ishida M, Ishikawa T, Ikeguchi A, Waki M, Yokoyama H, Tanaka Y, Hirooka H. 2008. Environmental impacts of a Japanese dairy farming system using whole-crop rice silage as evaluated by life cycle assessment. *Animal Science Journal* **79**, 727-736.
- Ogino A, Kaku K, Osada T, Simada K. 2004. Environmental impacts of Japanese beef-fattening system with different feeding length as evaluated by life-cycle assessment method. *Journal of Animal Science* **82**, 2115-2122.
- Ogino A, Orito H, Shimada K, Hirooka H. 2007. Evaluating environmental impacts of the Japanese beef cow—calf system by the life cycle assessment method. *Animal Science Journal* **78**, 424-432.
- Ogino A, Osada T, Takada R, Takagi T, Tsujimoto S, Tonoue T, Matsui D, Katsumata M, Yamashita T, Tanaka Y. 2013. Life cycle assessment of Japanese pig farming using low-protein diet supplemented with amino acids. *Soil Science and Plant Nutrition* **59**, 107-118.
- Pelletier N. 2008. Environmental performance in the US broiler poultry sector : Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions. *Agricultural Systems* **98**, 67-73.
- Russelle MP, Entz MH, Franzluebbers AJ. 2007. Reconsidering integrated crop-livestock systems in North America. *Agronomy Journal* **99**, 325-334.
- Schiere JB, Ibrahim MNM, van Keulen H. 2002. The role of livestock for sustainability in mixed farming : criteria and scenario studies under varying resource allocation. *Agriculture Ecosystem Environment* **90**, 139-153.
- 千田雅之, 荻野暁史. 2012. 水田飼料資源を利用した子牛生産の LCA による環境影響評価. 日本農業経済学会論文集 267-274.
- 高野信雄, 佳山良正, 川鍋祐夫. 1989. 粗飼料・草地ハンドブック. pp. 382-383. 養賢堂, 東京.
- 谷口信和. 2012. 飼料用米・WCS 用稲生産の本格的な展開へ. 畜産コンサルタント **48**, 12-16.
- 築城幹典, 原田靖生. 1997. 家畜の排泄物量プログラム. システム農学 **13**, 17-23.
- 柳沢淳二. 2003. 飼料イネの栽培実証事例における稲発酵飼料の生産と収益性. 愛知県農業総合試験場研究報告 **35**, 43-50.
- 吉田宣夫. 2010. 飼料用米の研究と普及の状況について. 日本畜産学会報 **81**, 489-493.
- 義平大樹, 荒木和哉, 中司啓二. 2004. 世界各地から収集した秋播ライコムギの北海道における生育特性第 1 報 : 有望品種と低収品種の収量関連形質の比較. 酪農学園大学紀要 **28**, 233-244.
- 脇 雅之, 村野多可子. 2009. 飼料用米の採卵鶏への給与. 千葉県畜産センター研究報告 **9**, 5-8.

Environmental and economic evaluation for integration systems between crop and animal production using linear programming —Utilization of paddy rice fields at national level—

Toshiya NISHIDA¹, Kazato OISHI¹, Yousuke CHOUMEI¹, Hajime KUMAGAI¹ and Hiroyuki HIROOKA¹

¹ Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8502, Japan

Corresponding : Hiroyuki HIROOKA (fax : +81 (0) 75-753-6363, e-mail : hirooka@kais.kyoto-u.ac.jp)

A linear programming (LP) model was used to evaluate integration between animal and crop production systems at national level. In particular, this evaluation focused on the utilization of paddy rice field. Animal categories considered were production systems for Holstein cows (milking and dry cows and replacement heifers), Holstein growing calves, dairy fattening steers, Japanese Black cow-calves, Japanese Black fattening steers, fattening F₁ steers and heifers, integrated pigs, layers and broilers, and crop categories were feed production for pasture, whole crop rice silage (WCS), feed rice for animals and food rice for human. In addition, external concentrates and roughages were considered. The objective function of the model maximizes total benefits from animal and crop production, while restricting environmental impacts (surplus nitrogen, greenhouse gas emissions, and energy use) and total labor time at national level. The result of optimization for the basic situation suggested that the total benefit may be maximized when the number of Japanese Black and layer increased and the number of other animals decreased and when forage rice for WCS was cultivated instead of food rice. The effects of alternative scenarios such as targeted reduction of surplus nitrogen and green house gas, the amount of subsidies of feed rice in paddy fields, concentrate costs and different processing costs for each animal category in feed rice production on optimization of integration between animal and crop production were also examined.

Nihon Chikusan Gakkaiho 84 (4), 475-486, 2013

Key words : benefit, environmental impact, integration between crop and animal production, linear programming, paddy field.