

水田地帯における物質循環に関する畜産学的シミュレーション —家畜糞尿を多肥して栽培した水稻の飼料化をモデルケースとして—

高橋 敏能*・谷口美和子*¹⁾・萱場 猛夫*

*山形大学農学部農業生産学講座
(平成6年9月1日受理)

A Zootechnical Simulation on Circulation of Substance in Paddy Region
—As a Model Case on Feed Making of Rice Plant Cultivated
with High Fertilization of Livestock Waste—

Toshiyoshi TAKAHASHI*, Miwako TANIGUCHI*¹⁾ and Takeo KAYABA*

*Section of Agricultural Production, Faculty of Agriculture,
Yamagata University, Tsuruoka 997, Japan
(Received September 1, 1994)

Summary

This work was conducted to examine the utilization rate of nitrogen in case of cultivation of rice plant with high fertilization of animal wastes and to simulate the circulation on substances of nutrient yield, animal products and wastes excreted through the medium of animal. Rice crop was cultivated with one and half, and thrice of conventional amount (8 kg/10 a) of nitrogen; i. e., slurry of dairy cows was fertilized in only basal, and basal plus additional fertilizers. The whole crop of rice plant was harvested at stages of milk, dough, yellow and full, and was ensiled. The utilization rate of nitrogen ranged from 3.0 to 24.8%, and high rate was obtained in cultivating with additional fertilizer. In the case of cultivating only by basal fertilizer, the digestible nutritient yield (TDN) per 10 a at the yellow stage was 623 kg and 682 kg in one and half, and in thrice, respectively. Nutritional yield was simulated to deserve the animal products of 2,238 kg milk and 64 kg beef in the plot of thrice amount of nitrogen fertilizer, and 2% urea supplement to rice plant silage on dry matter basis increased by 10% in animal products. When the feces and urine excreted are fertilized in the following year, the deficiency of nitrogen was estimated to be 4 kg and 16 kg per 10 a in one and half, and thrice of nitrogen, respectively.

key words : Circulation of substance, Livestock waste, Nitrogen fertilizer, Nutritional yield, Whole crop silage of rice plant

緒 言

近年、地球の環境保全に対する関心が高まってきている。畜産界でも農家戸数の減少と家畜の飼養頭数の増大

¹⁾ 現在：長崎県世知原町役場 (Sechibaru Town Office, Sechibaru 859-64, Nagasaki Prefecture, Japan)

キーワード：物質循環、窒素肥料、栄養収量、家畜糞尿、
水稻ホールクロップサイレージ

に伴い排泄物の処理が深刻な社会問題になっている。1993年にこの問題に対処すべく畜産環境研究会（会長：扇元敬司氏）が発足した。1994年のフォーラムの「物質循環に基づく畜産環境保全対策の方向」²⁾において、我が国は食飼料として年間92万tの窒素を輸入する世界第一の窒素輸入国であり、我が国へ蓄積される窒素による環境汚染を抑制するために国内での窒素のリサイクルの重要性が強調された。

家畜糞尿をトウモロコシや牧草などの飼料作物に対し

て多量に利用することは、増収効果が認められる反面、家畜に有害な硝酸態窒素の蓄積が問題となっている。水稲は湛水条件のため、硝酸態窒素と連作障害が少ない作物として永年栽培されてきた。水稲を栽培することは食糧を確保するための基本的な目的の他に、飼料利用として、そのホールクローブサイレージ（WCSRP）はバランスのとれた高エネルギー粗飼料として評価されている^{3,5,12,13,14}。しかし、他の飼料作物と比較して乾物収量と粗蛋白質含量が少ないのが主な欠点であることを指摘した^{3,12,13,14}。一方では、水田に水を灌漑して水稲を栽培することにより、土壌の浸食を防止するなどの国土保全に貢献してきたことが見直されている。取り分け、日本海沿岸に位置する穀倉地帯は、冬季の積雪による豊富な水資源と夏季の高温多湿な気候が水稲の栽培には格好の条件であることは論をまたないところである。従って、我が国の農業において、水稲作の栽培は将来とも基幹作物として揺がないであろう。

以上の諸状況を総合的に考察すると、我が国の家畜を保有する水田地帯で、家畜と水田が有機的に結合させて水稲を栽培することは、極めて意義深いことと思われる。そこで、水田に家畜糞尿を多量に施用して水稲を栽培し、窒素の利用と家畜を媒介とする物質循環を考慮しながら、畜産物の生産をシミュレートした。

材料及び方法

1. 家畜糞尿多肥による水稲の栽培試験

山形大学農学部附属農場の実験田4aを2枚、計8aを用い、1993年4月から10月まで行った。本学育種学研究室で開発した耐倒伏性品種であるV字葉型水稲^{3,9,10}の系統のうちV2とV3をそれぞれ4aずつ栽培した。その際、窒素の施肥水準を無肥料区、山形県の慣行量（8kg/10a）¹⁷の1.5倍量及び3倍量の3試験区を設定し、3×3のラテン方格法にて実施した。施肥方法のうち、V2は耕耘前に全量を基肥のみにて、V3は75%を基肥で25%を幼穂形成期に追肥としてそれぞれ施肥した。施用した肥料は本学部農場の乳牛のスラリーを用いた。無機成分の分析の前処理は乾式灰化を行い、CaとMgは原子吸光法、KとNaは炎光法、Pはモリブデンブルー比色法⁴にて測定した。尚、水稲は播種後25日間ハウス内で育苗して、田植え機にて1株当たり4～5本なるように実験田に移植した。移植後の肥培管理は農場で実施している慣行法に従った。

収量調査は乳熟期、糊熟期、黄熟期及び完熟期の4期

の生育ステージに行った。晴天の日に、24（4×6）株に相当する1㎡をランダムに選び、地上部5cmで刈り取り、乾物重量と窒素含量の測定に供試した。

2. 水稲のサイレージ調製とメン羊を用いた飼養試験

4期の生育時期のうち、一般に飼料用サイレージのために刈り取り適期といわれる黄熟期¹⁶に、系統V2についてサイレージの調製を行った。即ち、3試験区の水稲を刈り取り後、ただちに3～4cmに切断し、スチール製サイロ（商品名；ミニコンサイロ）に踏圧を加えながら約90kgを詰め込んだ。3週間後開封してサイレージのpH、揮発性塩基態窒素（VBN）と有機酸の濃度を既報と同様^{3,13}に測定し、フリーク点でサイレージの品質を評価した。

栄養価を評価するための飼養試験は、平均体重42.7kgのサフォーク種去勢メン羊4頭を供試して行った。その際、飼料は3試験区のWCSRPと栄養価を改善する^{12,13,14}ために尿素を乾物当たり2%添加した合計4種とし、WCSRPを単一給与した。飼料は、翌朝の残食量が給与量の1割程度になるように1日1回午前9時に不断給与し、同時に飲水も自由飲水とした。栄養価測定のための消化試験と窒素出納試験は予備試験を7日間とし、本試験の5日間は全糞尿の採取を行った。実験は個別に代謝ケージに繋留し、18～22℃の舎内温度で飼育した。メン羊と給与飼料の組み合わせは、4×4のラテン方格法に従い実施した。消化率測定のための飼料と糞の一般成分は常法⁶により測定した。

3. 物質循環のシミュレーション

メン羊を用いた栄養価から10a当たりの栄養収量（可消化養分総量（TDN）収量）を算出した。TDN収量と日本飼養標準^{7,8}のTDN要求量を照合させて牛乳と牛肉の生産量をシミュレートした。その際、牛乳は乳脂率3.5%の牛乳を産乳するのに要するTDN量、牛肉は体重400kgの乳用種去勢牛が1日増体重1kgに要するTDN量から算出した。

一方では、飼養試験の結果から10aのWCSRPを採食した時の糞尿に排泄される窒素量と、次年度同じ畜産物を生産するために必要な窒素の不足分を算出した。

得られたデータはラテン方格法に従って分散分析を行った。その結果、F検定で5%水準の有意差が認められた場合、DUNCANの多重検定をSAS¹¹を使用して行った。

結果及び考察

実験田に施用する直前の液状厩肥（スラリー）の性状

の平均値を表1に示した。その成分のうち、総窒素は0.13%、アンモニア態窒素は0.04%と総窒素の約30%を占めていた。また、Kは61mg%であり、Na, Ca, MgおよびPは24から39mg%とほぼ同程度の濃度だった。同じ本学部附属農場のスラリーを昭和55年に測定した石川ら⁴⁾の値より乾物と窒素含量が低い傾向だった。その後、上木ら¹⁵⁾が測定した総窒素とアンモニア態窒素の値は、本実験に用いたスラリーとほぼ同じ濃度だった。この違いは給与飼料の変化とは考えにくく、おそらく漏水などが貯水槽に流入してスラリーが希釈されたのであろう。

Table 1. pH and chemical compositions¹⁾ of cow waste (slurry) used in cultivated trial of rice plant

pH	Moisture	T.N. ²⁾ (%)	NH ₄ -N	K	Na	Ca	Mg	P
				(mg%)				
7.6	97.6	0.13	0.04	61	34	39	24	27

1); Average in figures sampled at four times before fertilizing.

2); Total nitrogen.

V2とV3系統の生育に伴う乾物、窒素含量及び窒素収量の推移を図1～図6に示した。いずれの系統とも生育に伴い乾物収量(図1, 4)は増加したが、追肥をして栽培した系統V3がV2よりも無肥料区と肥料施用区の差が大きく出現したようだった。しかし、施肥方法により乾物収量には大きな影響は与えないと判断され、最高収量は完熟期の3倍量区であった。V2, V3の10a当たりの収量はそれぞれ1,334kg, 1,445kgだった。乾物中の窒素含量の推移(図2, 5)は、追肥の効果が現れ、肥料を施用したV3がV2より全生育ステージで高い濃度だった。また、いずれの系統とも生育に伴い減少する傾向を示し、特に、基肥だけのV2は黄熟期以降は著しく減少し無肥料区と変わらない濃度だった。窒素収量の推

移(図3, 6)は、乾物収量と同様だったが、窒素含量が高かった肥料施用区のV3がV2より高く推移した。

以上の結果から、散布した窒素施用量に対する肥料区の窒素収量と無肥料区の窒素収量の差の百分率、即ち、見掛けの窒素利用率を表2に示した。その結果、基肥のみで栽培したV2は3.0%から14.2%であり、糊熟期と黄熟期に増加した。しかし、完熟期になると、無肥料区の窒素収量が増加したため両肥料区とも黄熟期より減少した。また、1.5倍量区と3倍量区には利用率の差がなかった。一方、基肥と追肥で栽培したV3のうち1.5倍量区は24.2%から34.8%、3倍量区は16.7%から27.1%だった。即ち、施肥量が少ない時に、窒素の利用率が高く、多いときには低いが、生育の進行に伴い利用率が向上する傾向を示した。イネはアンモニア態窒素をよく吸収する作物であり¹⁸⁾、¹⁵Nを用いた吸収率でも20%～40%の範囲¹⁾であることが示されている。本試験の場合、4月の施用前におけるスラリーの総窒素に対するアンモニア態窒素が30%だったことと、基肥だけのV2の窒素の利用率が概ね10%だったことを考慮すると、アンモニア態窒素だ

Table 2. Apparent utilization rate of nitrogen¹⁾ in cultivated trial of whole crop of rice plant with high fertilization of cow waste

Strain	Level of N fertilizer ²⁾	Growth stage			
		Milk	Dough	Yellow	Full
		(%)			
V2	One and half ²⁾	3.0	13.5	14.1	4.1
	Thrice ²⁾	7.7	12.9	12.2	9.9
V3	One and half ²⁾	24.2	34.8	25.5	33.1
	Thrice ²⁾	16.7	17.7	20.9	27.1

1); Yield of nitrogen in experimental plot -
Yield of nitrogen in control plot (none) × 100
Amount of nitrogen fertilized

2); See notes to Fig.1 and Fig.2.

Table 3. Dry matter intake, apparent digestibility and N retention in whole crop silage of rice plant

Level of N fertilizer	Dry matter intake (g/BW ¹⁾ (kg) ^{0.75} /day)	Apparent digestibility (%)				N retention (g/BW ¹⁾ (kg) ^{0.75} /day)
		C. protein	C. fat	NFE ²⁾	C. fiber	
None	45.0	41.6 ^{b 3)}	66.3	70.6	44.0	-25.7
One and half	43.7	39.2 ^b	67.2	69.8	41.8	6.0
Thrice	43.9	50.8 ^b	66.0	69.4	53.3	32.8
Thrice + urea ⁴⁾	34.6	77.3 ^a	67.1	68.3	55.5	123.9

1); Bogy weight.

2); Nitrogen free extract.

3); Means with different superscripts are significantly different at the 0.05 probability level.

4); Two % urea was supplement to whole crop silage of rice plant on dry matter basis.

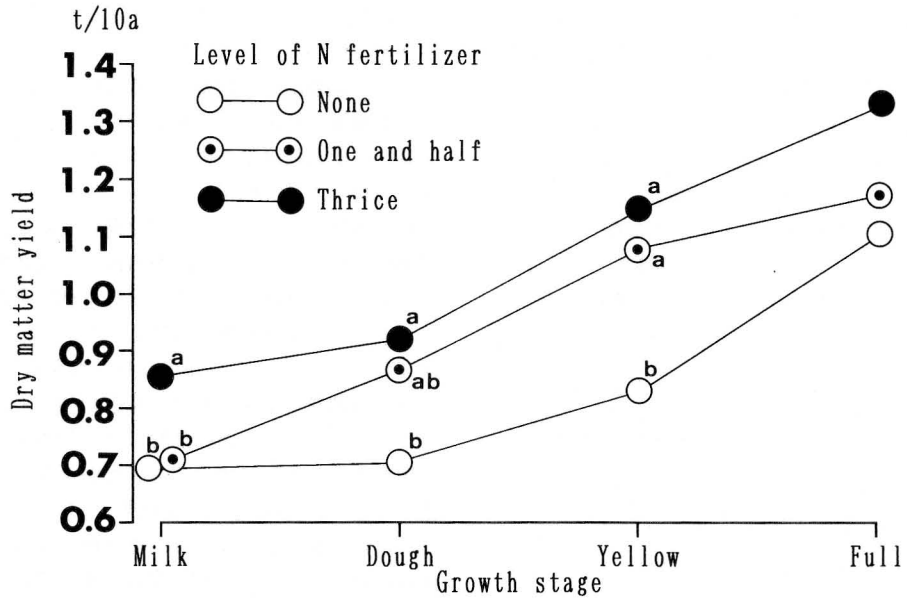


Fig. 1. Changes in dry matter yield of whole crop silage of rice plant (V2 strain) with growth stage. Cow waste (as slurry) was fertilized only on basal application at the three nitrogen levels of none, one and half, and thrice with that of the conventional amount (8kg/10a) used in Yamagata Prefecture. Means with different superscripts are significantly different at the 0.05 probability level.

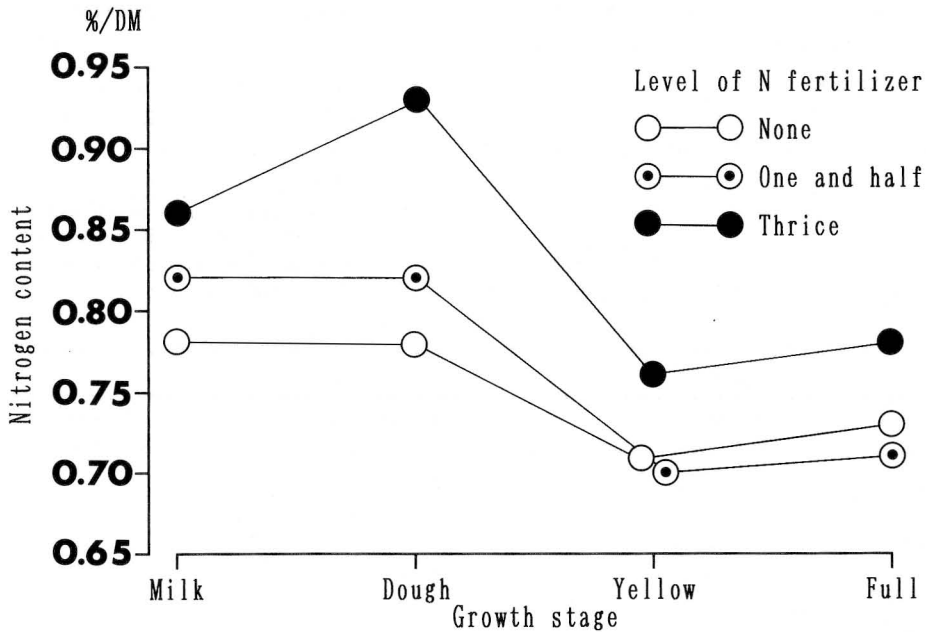


Fig. 2. Changes in nitrogen content of whole crop silage of rice plant (V2 strain) with growth stage.

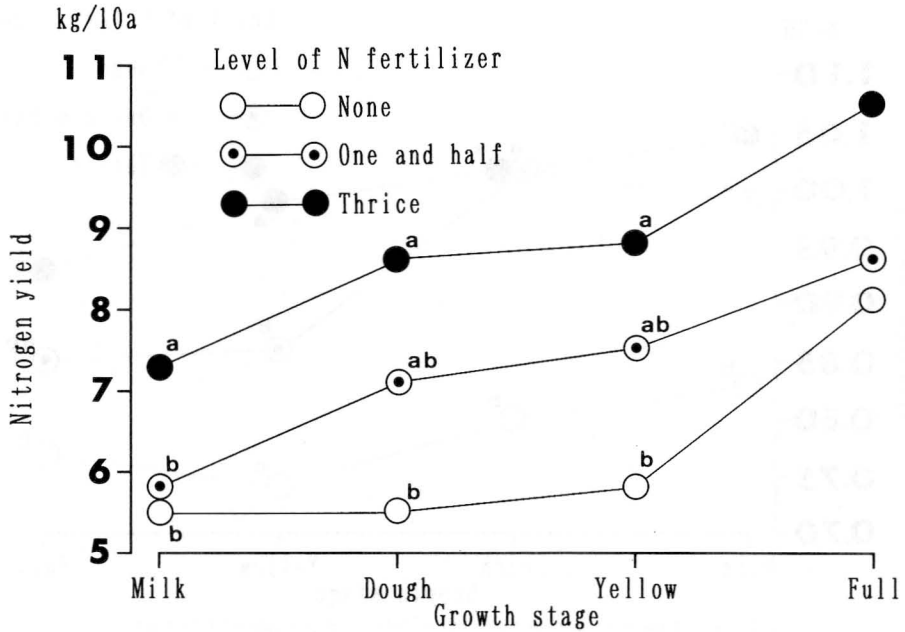


Fig. 3. Changes in nitrogen yield of whole crop silage of rice plant (V2 strain) with growth stage

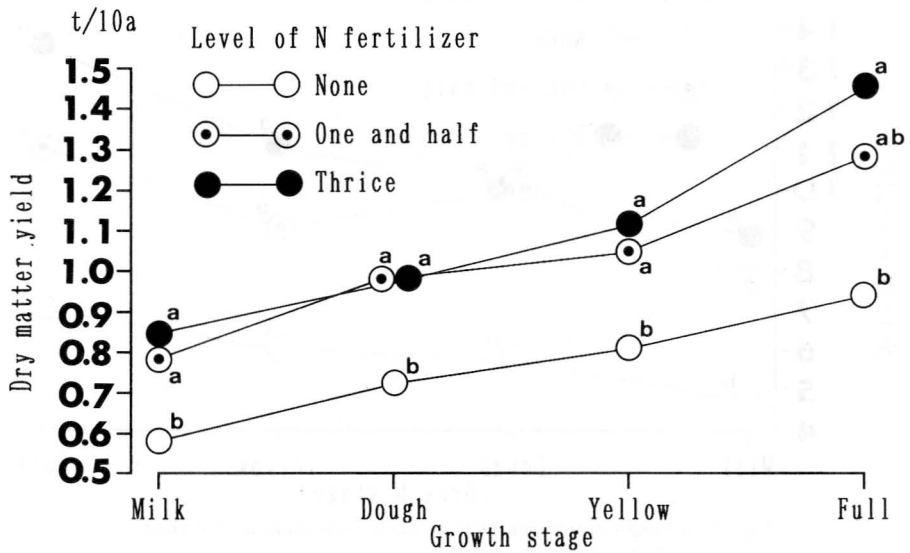


Fig. 4. Changes in dry matter yield of whole crop silage of rice plant (V3 strain) with growth stage. Cow waste (as slurry) was fertilized on 75% basal and 25% additional applications at the three nitrogen levels of none, one and half, and thrice with that of the conventional amount (8kg/10a) used in Yamagata Prefecture. Means with different superscripts are significantly different at the 0.05 probability level.

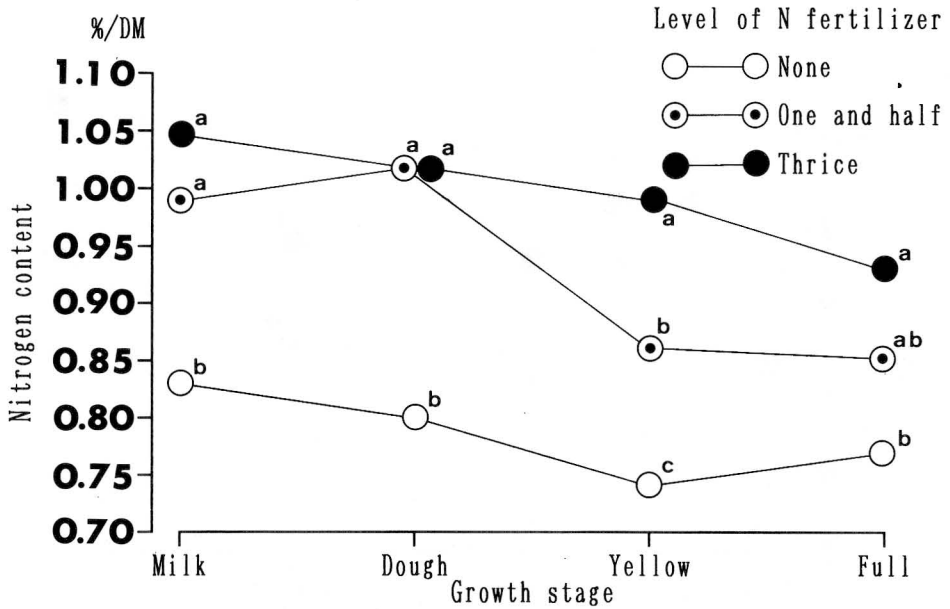


Fig. 5. Changes in nitrogen content of whole crop silage of rice plant (V3 strain) with growth stage.

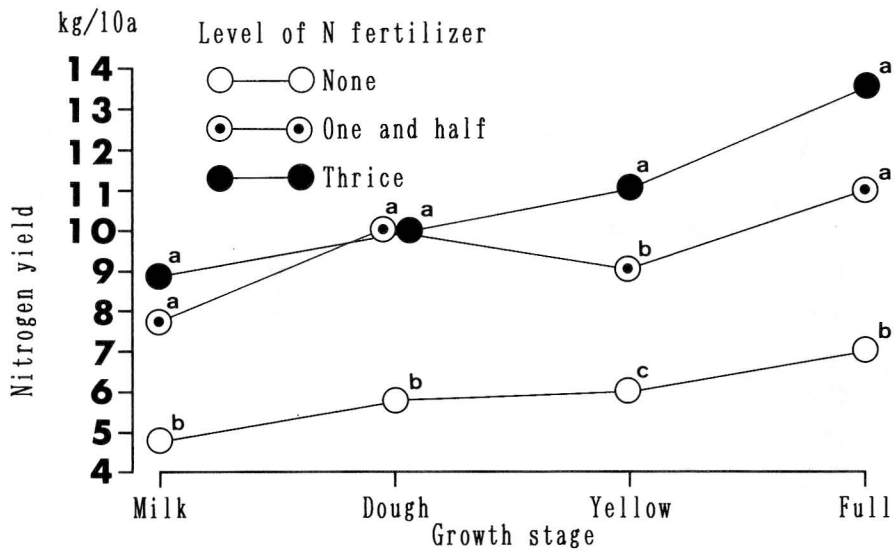


Fig. 6. Changes in nitrogen yield of whole crop silage of rice plant (V3 strain) with growth stage.

けが利用されたと仮定すると、その約30%のアンモニア態窒素が利用された計算になり、これらの報告と矛盾しないと思われた。また、追肥をして栽培したV3の利用率が高かった原因の一つに、追肥の時期が7月下旬であったことから、施用したスラリーのアンモニア態窒素の比率が高い¹⁵⁾ことが考えられる。いずれにしても、窒素の利用率を高くするには、夏季に最低一度は追肥を施すと有効であると思われた。

メン羊を用いた消化試験で給与した WCSRP(系統V2)の乾物摂取量、消化率及び窒素出納量の結果を表3に示した。ここで基肥だけで栽培したV2を供試飼料としたのは、刈り取り適期といわれている黄熟期¹⁶⁾の乾物収量において、基肥と追肥に分けて栽培したV3と殆ど差がなかったことによる。従って、省力栽培したV2を利用の方が意味があると判断した。尚、表に示さなかったが、3試験区の乾物中の一般成分とサイレージの有機酸組成、VBN及び品質には大差がなかった。即ち、乾物中の粗蛋白質は4.3%から4.8%であり、サイレージの新鮮物中の有機酸組成のうち乳酸は0.18%から0.22%、酪酸は0.33%から0.43%、フリーク評点は20点から27点の中の評価だった。乾物摂取量(g/体重(kg)0.75/day)では34.6から45.6と4試験区間に有意差がなかった。既報^{3,13)}において、窒素肥料を多肥すると粗蛋白質が増加

した。また、この粗蛋白質が多い WCSRP や WCSRP に尿素を添加する^{12,13,14)}と乾物摂取量が増加したが、本実験ではこれらのことが認められなかった。この違いの原因については、現在不明である。粗脂肪、可溶無窒素物及び粗繊維の消化率には差がなかったが、粗蛋白質消化率では尿素的添加効果が現れた。また、5%の有意水準には達しなかったが、窒素出納量でも、無肥料区は負の出納量だったが、窒素施肥量の増加と尿素的添加に伴い改善される傾向を示した。

この消化率の結果から栄養収量を算出し、また、日本飼養標準から畜産物の生産量をシミュレートし、それぞれの WCSRP を採食して排泄された糞尿を施肥し、次年度同じ条件で水稻を栽培すると仮定したときの窒素の不足量を算出した(表4)。可消化粗蛋白質(DCP)収量では、窒素の施用量と尿素的添加により有意に増加した。特に、尿素を添加すると無肥料区の642%と著しく増大した。また、TDN収量でも、同様に窒素の施用量に伴い有意に増加した。即ち、10a当たりで無肥料区480kg、1.5倍量区623kg、3倍量区682kgであった。このTDN収量と日本飼養標準の乳牛と肉牛のTDN要求量から3倍量区の10a当たりの畜産物の生産量をシミュレートすると、牛乳2,238kg、牛肉64kgの生産量に相当した。また、3倍量区に尿素を添加すると、生産物は約10%増加

Table 4. Simulation on circulation of substance among yield of digestible nutrient, animal products and nitrogen fertilizer

Level of N fertilizer	Yield of digestible nutrients		Animal product		Nitrogen fertilizer ⁶⁾	Difference ⁷⁾
	DCP ¹⁾	TDN ²⁾	Milk ³⁾	Beef ⁴⁾		
			(kg/10a)			
None	14.9 ^c (100) ⁵⁾	480.2 ^c (100) ⁵⁾	1574	45	—	—
One and half	19.5 ^c (131)	623.4 ^b (130)	2044	60	12	4
Thrice	28.1 ^b (189)	682.6 ^{ab} (142)	2238	64	24	16
Thrice+urea	95.6 ^a (642)	762.5 ^a (159)	2500	70	24	8

1) ; Digestible crude protein. 2) ; Total digestible nutrients.

3) ; Milk yield was estimated from TDN required for milk production contained with 3.5% milk fat in Japanese Feeding Standard for Dairy Cattle.

4) ; Beef yield was estimated from TDN required for 1 kg of daily gain in 500 kg body weight of castrated beef cattle in Japanese Feeding Standard for Beef Cattle.

5) ; Figures in parentheses are index comparing with none fertilizer 100.

6) ; Calculated from conventional amount used in Yamagata Prefecture.

7) ; Calculated from the difference between nitrogen fertilizer in following year and waste (feces and urine) excreted.

した。次年度同じ条件で水稻を栽培するとしたときの10a当たりの窒素の不足量は1.5倍量区では33%に当たる4 kg, 3倍量区では67%に当たる16gが不足し, 尿素を添加すると半量の8 kgで間に合った。

以上の実験の結果から, 水田と家畜を媒介とした物質循環のシミュレーションをより現実近づけるために, 同一圃場で単年度に限らず継続して実施する必要があると思われる。V3系統を栽培した同様の実験を計画し, ポット試験と並行して実施中である。

謝 辞

本学部機能調節学講座の笹原健夫教授にはV字葉型水稻の種子を提供して戴いた。また, 農業生産学講座の安藤豊教授及び角田憲一助手には, 水稻の栽培に関する貴重な助言を得ることが出来た。附属農場遠藤正昭技官には水稻の栽培に, 協力室の五十嵐幸子氏にはメン羊の飼養試験の際の給餌に, 長谷川久美子氏には図表の作成に尽力して戴いた。

ここに, 記して深甚の謝意を表する。

要 約

家畜糞尿を多量に施肥して水稻を栽培したときの窒素の利用率を調査し, 家畜を媒介とした栄養収量, 畜産物及び排泄糞尿から物質の循環をシミュレートした。水田に窒素量が慣行量 (8kg/10a) の1.5倍と3倍量になるように乳牛の糞尿 (スラリー) を, 基肥のみと基肥と追肥に分けて施肥して水稻を栽培した。乳熟期, 糊熟期, 黄熟期及び完熟期に収穫した水稻ホールクロップをサイレージに調製した。水稻の窒素の利用率は3%から34.8%の範囲であり, 追肥をして栽培すると高い利用率を示した。基肥のみで栽培した黄熟期の10a当たりの可消化養分収量 (TDN) は1.5倍区で623kg, 3倍区で682kgとなった。3倍区の栄養収量を畜産物にシミュレートすると, 牛乳2,238kg, 牛肉64kgの生産量に相当し, 水稻サイレージに尿素を乾物当たり2%添加して給与すると生産量が約10%増加した。排泄された糞尿を施肥し, 次年度に同じ生産量を収穫するための10a当たりの窒素の不足量は1.5倍区で4 kg, 3倍区で16kgとなった。

引用文献

- 1) GRASWELL, E. T. and P. L. G. VLEK (1979) Fate of fertilizer nitrogen applied to wetland rice. *In Nitrogen and rice*. International Rice Research Institute. Manila. pp.175-192.
- 2) 原田靖生 (1994) 物質循環に基づく畜産環境保全対策の方向. 第2回畜産環境研究会要旨集, 7-12.
- 3) 堀口健一・高橋敏能・萱場猛夫・笹原健夫 (1992) V字葉型水稻と他の飼料作物のホールクロップサイレージにおける栄養価の比較. *日草誌* **38**, 242-245.
- 4) 石川俊雄・高橋敏能・太田三郎・斎藤義男・丸山勤・長谷川信男 (1981) 液状厩肥の施用が牧草の成分に与える影響についての一考察. *山形農林学会報* **38**, 13-18.
- 5) 百瀬清昭・瀬川薫・日野毅・白田尚 (1992) 水稻ホールクロップサイレージの飼料特性と肉用牛に対する増体効果. *山形農林学会報* **49**, 43-48.
- 6) 森本宏 (1971) 動物栄養試験法. 養賢堂. 東京. pp.280-298.
- 7) 農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1987) 日本飼養標準肉用牛 (1987年版). 中央畜産会. 東京. pp.31-32.
- 8) 農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1987) 日本飼養標準乳牛 (1987年版). 中央畜産会. 東京. pp.6-9.
- 9) 笹原健夫・崔成煥・阿部利徳 (1989) イネV字葉系統に対する逆V字追肥の効果 (予報). *日作東北支部報* **32**, 49-50.
- 10) SASAHARA, T., T. TAKAHASHI, T. KAYABA and S. TSUNODA (1992) A new strategy for increasing plant productivity and yield in rice. *International Rice Commission Newsletter* **41**, 1-6.
- 11) SAS Institute Inc. (1985) SAS User's Guide : Statistics. Ver. 5 ed. SAS Institute Inc. Cary. pp.433-506.
- 12) TAKAHASHI, T., K. HORIGUCHI, T. KAYABA and H. ANDO (1993) The effect of urea supplementation on the improvement of the feeding value in whole crop silage of rice plant. *J. Japan. Grassl. Sci.* **39**, 387-390.
- 13) TAKAHASHI, T., Y. GOTO and T. KAYABA (1994)

- Effects of high fertilization of sheep waste in cultivation of rice plant and urea supplement into whole crop silage on the nutritive yield. *Bull. Yamagata Uni., Agr. Sci.* **12**, 15-22.
- 14) TAKAHASHI, T., K. HORIGUCHI and T. KAYABA (*in press*) The effect of urea supplement on the feeding value of whole crop silage of rice plant with different relative amount of concentrate. *J. Japan. Grassl. Sci.*
- 15) 上木厚子・上木勝司・五井隆芳・小島敏宏・原田浩明(1990) 畜産廃水の嫌氣的貯留槽発酵液における硫酸塩還元細菌の分布. 用水と廃水 **32**, 136-144.
- 16) 箭原信男(1984) イネのホールクロップサイレージ. 農業技術体系 畜産編 (飼料作物). 農山漁村文化協会. 東京. pp.557-565.
- 17) 山形県農林水産部農業技術課監修(1986) 農業宝典. 山形県農業技術普及課. 山形. pp.12-13.
- 18) 吉田昌一 (共訳; 村山登・吉田よし子・長谷川周一・末永一博) (1981) 稲作科学の基礎. 博友社. 東京. pp.156-160.