

北海道草地研究会賞受賞論文

乳牛ふん尿処理物の肥効評価に基づくチモシー草地の施肥法に関する研究

松本 武彦

Studies on the fertility management of timothy sward based on
use of dairy cattle manures evaluated as available nutrients

Takehiko Matsumoto

はじめに

北海道東部に位置する根釧地方は、国内有数の酪農地帯として発展してきた。根釧地方では、広大な土地を有効に利用した草地型酪農が展開されており、基幹となるチモシー草地の施肥管理については、栄養生理的な特性に基づいた効率的な施肥量・施肥時期・施肥配分などの施肥法が体系化された(松中 1987)。また、チモシーとアカクローバやシロクローバ等の混播草地では、その生産性に大きな影響を与えるマメ科牧草の混生割合に応じて窒素(N)施肥量を増減させる施肥法が開発されている(木曾・菊地 1988)。土壌の肥沃度に対応した施肥管理という観点では、地域別に設定された目標収量と良好な草種構成を安定的に維持するための土壌診断基準が明らかにされ、N、リン(P)およびカリウム(K)の肥沃度に基づく施肥量が明らかにされている(三枝 1996)。

一方、乳価が低迷するなか、収益拡大と生産コスト低減のために進められた飼養頭数の多頭化、1頭当たり乳量の向上を支えた濃厚飼料給与量の増大は、経営内における余剰Nの発生を促し、河川水質の汚濁など環境負荷を招くことが危惧されている。

本研究では、北海道酪農が環境汚染を避けながら持続的に発展するため、その飼料生産基盤となるチモシー草地を対象に、乳牛のふん尿処理物に由来する肥料成分量を正確に評価し、その主体的な利用を前提とした条件で、目標とする牧草収量の生産を可能とする施肥法の確立を目的とした。

1. ふん尿処理物における肥料成分含有率の簡易推定法

北海道内の主要な酪農地帯(根釧、天北、十勝、網走)において乳牛のふん尿処理物を採取した。これらを、乳牛の飼養方式やふん尿処理方式などの違いに基づき、道立農畜試が編集した手引き書(道立農畜試 1999)に従い、堆肥(採取試料数 128、採取地域: 天北 105、根釧 23)、スラリー(同 183、同: 根釧 171、十勝 12)、尿液肥(同

129、同: 根釧 91、十勝 12、網走 19)に分類した。EC(25℃補正值, 単位: $S\ m^{-1}$)は、堆肥では採取試料と脱塩水を重量比 1:5 で混合し、振とう器で 30 分間振とうした後の懸濁液を、スラリーでは同じく重量比 1:1 で混合し、ガラス棒で十分攪拌した後の懸濁液を、尿液肥では採取試料をそのまま測定した。乾物含有率(DM, 単位: $kg\ kg^{-1}$)は、採取試料を 105℃で 24 時間乾燥した後の重量とした。

供試試料の全窒素(T-N)、 P_2O_5 、 K_2O およびアンモニウム態窒素(NH_4-N)含有率について、定量法による分析値を目的変数、EC 単独または EC と DM の双方を説明変数として回帰分析を行った。

ふん尿処理物中の肥料成分含有率を推定する簡易法として、堆肥の T-N および P_2O_5 含有率は EC および DM、 NH_4-N および K_2O 含有率は EC を、スラリー中の T-N、 NH_4-N および K_2O 含有率は EC、 P_2O_5 含有率は EC および DM を、尿液肥中の T-N、 NH_4-N および K_2O 含有率は EC、 P_2O_5 含有率は DM を測定することを提案した(松本ら 2002、表 1)。

表1 電気伝導度^aおよび乾物含有率^bを変数としたふん尿処理物中の肥料成分含有率推定式

種類別	項目 ^c	推定式	(R ²)	(n)
堆肥	T-N	4.592 EC + 12.42 DM + 1.249	0.510** ^d	128
	P_2O_5	2.383 EC + 9.191 DM + 9.185	0.433**	128
	K_2O	14.37 EC + 1.629	0.610**	128
	NH_4-N	2.551 EC - 0.1537	0.562**	128
スラリー	T-N	4.448 EC - 0.4383	0.792**	183
	P_2O_5	0.6836 EC + 11.93 DM + 0.0938	0.518**	183
	K_2O	3.867 EC + 0.2675	0.684**	183
	NH_4-N	0.8770 EC ² + 0.9135 EC + 0.0800	0.800**	183
尿液肥	T-N	1.484 EC - 0.3657	0.909**	129
	P_2O_5	355.0 DM ² - 2.471 DM + 0.1378	0.670**	70
	K_2O	2.351 EC - 0.2676	0.914**	129
	NH_4-N	0.8636 EC - 0.0308	0.858**	37

^a EC ($S\ m^{-1}$) .

^b DM ($kg\ kg^{-1}$) .

^c 肥料成分含有率は現物中 ($g\ kg^{-1}$) .

^d **危険率1%水準で有意.

2. 草地に施用したふん尿処理物の肥効評価法

1) 草地に施用したふん尿処理物の肥料換算係数

ふん尿処理物に含まれる肥料成分のうち、化学肥料の代替として牧草に利用される成分量 (以下、肥料換算量) を評価する方法を明らかにするため、北海道内の気象および土壌条件を異にする複数の場所 (道立根釧農試、畜試、天北農試) で試験を行った。

ふん尿処理物の肥効評価に際し、肥料換算係数 (R) の考え方を以下のように整理した。ここで、ふん尿処理物の肥効評価に関する変数と係数を表2のように定義すると、以下の関係式が成り立つ。

表2 ふん尿の肥効評価に関する変数と係数

区分	記号	単位	意味
施用量に関する変数	A_F	kg ha ⁻¹	化学肥料による肥料成分施用量
	A_M	kg ha ⁻¹	ふん尿処理物の施用に伴って投入される肥料成分量
収穫量に関する変数	U_F	kg ha ⁻¹	化学肥料施用区の地上部肥料成分吸収量
	U_M	kg ha ⁻¹	ふん尿処理物施用区の地上部肥料成分吸収量
	U_0	kg ha ⁻¹	無施用区の地上部肥料成分吸収量
利用割合を示す係数	F_{ab}	kg kg ⁻¹	化学肥料で施用された肥料成分の見かけの利用割合
	R		ふん尿処理物中の肥料成分のうち、化学肥料と見なせる部分の割合
	M_{ab}	kg kg ⁻¹	ふん尿処理物で施用された肥料成分の見かけの利用割合

$$F_{ab} = (U_F - U_0) / A_F \quad (\text{式1})$$

$$M_{ab} = (U_M - U_0) / A_M \quad (\text{式2})$$

さらに、ふん尿処理物の肥料成分のうち化学肥料と見なせる部分の割合を肥料換算係数 (R) と定義すると、式3が成立する。

$$M_{ab} = R \times F_{ab} \quad (\text{式3})$$

Rは F_{ab} 値と M_{ab} 値を各試験地における圃場試験で測定し、式3から導かれる式4に代入して求めた。

$$R = M_{ab} / F_{ab} \quad (\text{式4})$$

肥料換算係数 (R) をふん尿処理物中の肥料成分含有率 (C, kg Mg⁻¹) に乗ずることにより、ふん尿処理物 1 Mg の施用に伴う肥料換算量 (S, kg Mg⁻¹) が求められる (式5)。

$$S = C \times R \quad (\text{式5})$$

各場所を実施した4年の圃場試験で得られた結果から、堆肥中肥料成分の肥料換算係数 (R) は施用当年ではN 0.2、P 0.2、K 0.7、施用2年目はいずれの肥料成分も0.1、施用3年目はN 0.03、PとKは0.1とした (表3)。スラリーの肥料換算係数 (R) は施用当年のみ設定することとしN 0.4、P 0.4およびK 0.8とした (表4)。尿液肥の肥料換算係数 (R) についてもスラリーと同様に施用当年

のみ設定し、NおよびKとも0.8とした (表4)。

表3 チモシー草地に表面施用した堆肥の肥料換算係数 (R)

肥料成分	当年	2年目	3年目
窒素	0.2	0.1	0.03
リン	0.2	0.1	0.1
カリウム	0.7	0.1	0.1

表4 チモシー草地に表面施用したスラリーおよび尿液肥の肥料換算係数 (R)

ふん尿処理物	肥料換算係数 (R)		
	窒素	リン	カリウム
スラリー	0.4	0.4	0.8
尿液肥	0.8	—	0.8

2) 草地に施用したふん尿処理物の施用時期に対応した窒素肥効の評価法

前述した肥料換算係数 (R) は、道内の標準的な肥料成分含有率のふん尿処理物 (堆肥、スラリー、尿液肥) を供試し、早春の最も施肥効率の高い時期に施用する条件で設定されている。しかし、ふん尿処理物の施用時期が異なる場合には、Nの肥効が変化する (松中ら 1988)。そこで、Nの肥料換算係数 (R) に対し、実際の施用時期に応じて補正係数 (T) を乗じ、これをふん尿処理物中のN含有率 (C_N , kg Mg⁻¹) に乗じることにより、ふん尿処理物の施用に伴うNの肥料成分換算量 (S_N , kg Mg⁻¹) を求めることとした (式6)。

$$S_N = C_N \times R \times T \quad (\text{式6})$$

チモシーの吸収したNが乾物生産に寄与する程度は、施用時期によって異なる (松中 1987) ため、みかけのN利用割合のみに注目して補正しても、乾物収量がそれに応じて得られない懸念がある。そこで、ここでは、Nの利用性と乾物生産性の双方について検討することとし、乾物生産性の指標として、ふん尿処理物によるN施用量 1 kg 当たりの乾物増加量 (M_e , kg kg⁻¹) を、下記の式7により算出した。

$$M_e = (Y_M - Y_{M0}) / A_M \quad (\text{式7})$$

ここで、 Y_M はふん尿処理物施用区の乾物収量 (kg ha⁻¹)、 Y_{M0} はふん尿処理物無施用区の乾物収量 (kg ha⁻¹)、 A_M はふん尿処理物によるN施用量 (kg ha⁻¹) である。

堆肥とスラリー・尿液肥では、前年秋施用時の乾物収量への反応が異なったので、それぞれに補正係数を設定することとした。なお、いずれのふん尿処理物でも、5月下旬は施用時の低収が明らかであり、11月は降雪・土壌凍結等の懸念があることから、施用時期としては不適切である。それゆえ、5月下旬と11月の補正係数は設定しなかった。

以上の整理に基づき、ふん尿に由来するNの肥料換算

係数に対する施用時期の補正係数を堆肥、スラリーおよび尿液肥の各々について設定した (表 5)。

表5 チモシー基幹採草地に対するふん尿施用時期に対応したNの補正係数 (T)

施用時期	堆肥	スラリー・尿液肥
9月上旬～10月下旬	1.0	0.8
4～5月上旬	1.0	1.0
5月中旬	0.8	0.8

1) 9～5月の補正係数は年間施肥量に換算するための肥効率を算出する。
2) 補正の対象は施用当年のみとする。

3) 草地に表面施用したふん尿処理物の性状の違いを考慮した窒素肥効の評価法

1)および2)において、チモシー草地に施用されたふん尿処理物から供給される肥料成分を化学肥料に換算するための係数(肥料換算係数)を設定する際には、標準的な性状のふん尿処理物を供試して検討された。そのため、ふん尿処理物の生産来歴の違いによってもたらされる性状の違いを考慮して、より正確に肥効を把握するための方法を明らかにするため、根室地域の酪農場で生産された来歴の異なる堆肥17点およびスラリー18点を供試し、Nを中心とした化学成分の違いが、チモシー草地に対する肥料的効果に及ぼす影響を検討した。

乳牛のふん尿を原料とした堆肥に含まれるNのうち、速効的に作用する無機態Nの割合は低い。そのため、堆肥の施用に伴うN肥効は、有機態Nの無機化によって生じたものが主体と考えられる。Nの無機化が堆肥の生産来歴等の違いにかかわらず同程度であれば、堆肥のT-N含有率を把握することにより、おおよそのN肥効を把握できると考えられる。しかし、同量の堆肥を施用した圃場試験の結果では、堆肥のT-N含有率と堆肥の施用に伴うNの単位重量当たりの乾物生産効率 (M_e) および堆肥由来Nの牧草によるみかけの吸収利用率 (M_{ab}) との関係は判然としなかった。このことから、給与飼料の構成や堆積場所の構造、堆積期間、切返しの頻度など生産来歴の違いにより、堆肥に含まれるNの無機化に差が生じていることがうかがわれた。そこで、堆肥の化学成分のうちNの無機化に影響を及ぼすと考えられる項目(水分含有率、pH、EC、C/N、T-Nおよび無機態N含有率)とN無機化率との関係を検討した結果、N無機化率と水分含有率との間には、危険率5%水準で有意な正の相関関係が認められ(図1)、チモシー草地に施用した堆肥のN肥効を評価するためには、堆肥の水分含有率を指標としてN無機化率を推定し、これをT-N含有率に乗じてN供給可能量を把握する方法が有効であることが確認された(松本・寶示戸2006)。

スラリーの化学成分変動とN肥効の関係については、チモシーの1番草生育との関連で次のように考えた。チモシー草地において1番草収量を高めるには、幼穂形成

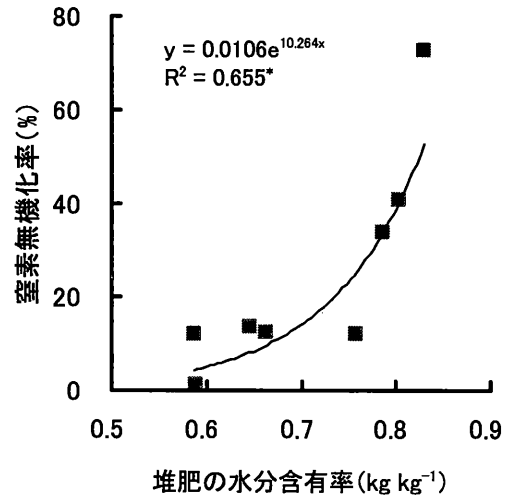


図1 堆肥の水分含有率と窒素無機化率の関係 (*危険率5%水準で有意)。

期までのN吸収量を効率良く増加させ、有穂茎数を増やすことが重要であり、幼穂形成期以降に吸収されたNは有穂茎数の増加に寄与しない(松中1987)。スラリー中のNはNH₄-Nと有機態Nによって構成されており、NH₄-Nは化学肥料のように速効的に作用するが、有機態Nは微生物による無機化作用を受けた後、牧草に吸収利用されるため緩効的に作用する。したがって、速効性のNH₄-Nが多いほど、幼穂形成期までに吸収されるN量が増え、1番草収量が増加すると考えられる。

一方、草地に表面施用されたスラリーに含まれるNの一部は、NH₃揮散によって損失し、その量は乾物含有率の高いスラリーほど多い(Sommer and Olsen 1991)。このことは、同量のNH₄-Nを含むスラリーでも、乾物含有率の低いものでは土壤への浸透が速やかに進行し、NH₃揮散によるN損失が相対的に少なくなることを意味している。したがって、早春の施用時期が同じでも乾物含有率の低いスラリーに由来するNの方が乾物含有率の高いものより、幼穂形成期までにNが多く吸収される可能性のあることを示唆する。そこで、スラリーのN肥効を高める速効性画分の指標としてNH₄-N、逆にN肥効を低下させるNH₃揮散要因の指標として乾物含有率に注目し、両者の比(NH₄-N/DM)をスラリーの性状の違いに係わる指標として設定した。乾物含有率の高いスラリーは有機態N含有率も高いので、この指標はN肥効に関与する速効性N画分と緩効性N画分の比を表すことにもなると考えられる。NH₄-N/DM比と1番草のスラリー由来Nの牧草による利用率の間には危険率1%水準で有意な正の相関関係が認められ、同比によってスラリーの性状の違いに起因するNの肥効変動を把握できることが確認された(松本・寶示戸2005)。

3. チモシーを基幹とする採草地におけるふん尿処理物主体施肥の実証

北海道施肥ガイド(北海道農政部 2002)では、草種構成に応じた植生区分、土壌の種類、地域ごとに目標収量を設定し、それを生産するために必要な施肥標準量を示している。これを牧草生産に必要な肥料成分量と考えた場合、草地に施用できるふん尿処理物の量は、ふん尿処理物から供給される肥料成分量(N、P、K)のいずれかが施肥標準量に達するまでの量と考えることが出来る。この時、施肥標準量に対して不足する成分を化学肥料等で補わなければ、目標とする牧草収量を確保できない可能性がある。

そこで、チモシーを基幹草種とする採草地を対象に、ふん尿処理物を主体とし、施肥標準量に対する不足分を化学肥料等で補うことにより、目標とする牧草収量の生産が可能であることを実証しようとした。

試験には1993年に造成したチモシー(品種:ノサップ)とシロクロバの混播草地を供試し、1995年から1998年までの4年間試験を行った。堆肥施用量は40 Mg ha⁻¹とし、前年秋(10月)と当年の早春(5月上~中旬)に半量づつ表面施用した。化学肥料は、堆肥無施用の施肥標準区では、実験開始時における供試草地の草種構成に基づき、北海道施肥ガイド(北海道農政部 2002)における植生区分2に対応した施肥標準量(N-P-K-Mg 施用量は60-44-183-24 kg ha⁻¹)とした。一般的な肥料成分含有率の堆肥を施用することを前提として肥料換算係数を考慮した場合、堆肥を施用した区では、施肥標準量に対してNは無施用でほぼ充足すると見込まれたが、PとKは不足すると考えられたため、施肥標準量に対する不足分(PおよびKを17および83 kg ha⁻¹)を化学肥料で補填する区(堆肥実証区)と補填しない区(堆肥区)を設けた(表6)。

表6 実証試験の各処理区における肥料成分施用量

処理区	年次	肥料成分施用量(kg ha ⁻¹)					
		化学肥料			堆肥		
		N	P	K	N	P	K
施肥標準区	1995-98	60	44	183	0	0	0
	1995	0	17	83	40	14	72
	1996	0	17	83	53	24	87
堆肥実証区	1997	0	17	83	54	29	121
	1998	0	17	83	60	26	102
	1995	0	0	0	40	14	72
堆肥区	1996	0	0	0	53	24	87
	1997	0	0	0	54	29	121
	1998	0	0	0	60	26	102

表7に試験期間における乾物収量の推移を示した。施肥標準区における年間乾物収量は8.8~11.1 Mg ha⁻¹の範囲にあり、根釧地域の混播草地における目標収量水準(乾物収量で8.5~9.0 Mg ha⁻¹程度)をやや上回るレベルで推移した。堆肥実証区の乾物収量は、堆肥から供給されるN量が施肥標準量よりもやや少なかった試験開始初年目(1995年)および2年目(1996年)では施肥標準区の収

量を1割程度下回る場合があったが、3年目(1997年)以降は施肥標準区と同等の収量で推移した。一方、化学肥料の補填を行わなかった堆肥区における乾物収量は、いずれの年も危険率5%水準で有意に施肥標準区の乾物収量を下回り、1995および1997年は8.2および8.1 Mg ha⁻¹と目標収量水準を下回る低収であった。

表7 乾物収量の推移(年間合計, Mg ha⁻¹)

処理区	1995	1996	1997	1998
施肥標準区	10.1 ^b	11.1 ^b	8.8 ^b	10.5 ^b
堆肥実証区	9.1 ^a	10.0 ^a	9.0 ^b	10.7 ^b
堆肥区	8.2 ^a	9.8 ^a	8.1 ^a	9.4 ^a

1)各列の異なるアルファベットを付した値の間に危険率5%水準で有意差有り。

1番草におけるチモシー割合は、いずれの処理区も50%を上回って推移し、マメ科率は施肥標準区の1996年を除くと概ね15~30%の範囲にあり、マメ科率による植生区分2程度の概ね良好な混播状態が維持された。処理区別では、堆肥実証区の1番草におけるマメ科率は、試験開始初年目および2年目に施肥標準区よりも高い割合で推移し(p<0.05)、それ以降は施肥標準区と同等かやや上回る程度で推移した。

各処理区における牧草体中の肥料成分含有率を比較すると、1番草のチモシーでは、堆肥実証区のK含有率が施肥標準区よりも高く、シロクロバでは、堆肥区のK含有率が施肥標準区および堆肥実証区を大きく下回った。この傾向は、2番草でより顕著となり、堆肥区のK含有率はいずれの草種についても施肥標準区および堆肥実証区よりも著しく低い値を示した(表8)。

表8 牧草中肥料成分含有率(g kg⁻¹)

番草	処理区	チモシー			シロクロバ		
		N	P	K	N	P	K
1	施肥標準区	12.3	2.5	18.1 ^a	35.8	4.5	27.9 ^b
	堆肥実証区	12.7	2.5	19.7 ^b	36.8	4.7	26.4 ^b
	堆肥区	12.1	2.6	17.1 ^a	36.0	4.0	18.8 ^a
2	施肥標準区	19.2 ^a	3.1 ^a	22.0 ^b	34.6 ^a	4.2	30.3 ^c
	堆肥実証区	21.0 ^{ab}	3.2 ^a	22.4 ^b	37.3 ^b	4.5	26.3 ^b
	堆肥区	21.8 ^b	3.6 ^b	17.3 ^a	37.7 ^b	4.4	16.5 ^a

1)各列の各番草について異なるアルファベットを付した値の間に危険率5%水準で有意差有り。

Kは牧草収量に対する影響が大きく、マメ科牧草の維持という観点からも重要な成分である(三枝 1996)。本道の主要な酪農地帯における実態調査の結果(松本ら 2002)では、堆肥中におけるK含有率の変動は肥料三要素の中で最も大きかった。このため、チモシーを基幹草種とする混播採草地を、堆肥から供給される肥料成分を主体として管理しようとした場合、施用する堆肥の肥料成分含有率をあらかじめ把握し、不足する肥料成分を適切に補うことが重要である。

以上のことから、本研究で提案した方法によって求めた堆肥の肥料成分換算量と化学肥料を合計した肥料成分供給量が施肥標準量(北海道農政部 2002)を概ね満たしていれば、良好な草種構成の混播草地を維持し、目標収量を生産しうることが確認された。

4. まとめ

本研究において得られた知見を総括すると、北海道のチモシーを基幹草種とする採草地を対象とした、ふん尿処理物主体の施肥法は、次のような手順によって実行することができる(図2)。

- (1) 目標収量の確保に必要な肥料成分量を設定するために、対象草地の植生区分や土壌診断結果を把握する。
- (2) 施用するふん尿処理物に含まれる肥料成分含有率を、電気伝導度と乾物含有率の測定により推定する。
- (3) ふん尿処理物の施用量および肥料換算係数や施用時期とふん尿処理物の品質による補正係数を考慮して、ふん尿処理物の肥料換算量を求める。
- (4) 目標収量の確保に必要な肥料成分量と、ふん尿処理物の施用によって見込まれる肥料換算量との差を化学肥料などで補う。

謝 辞

本賞にご推薦いただきました酪農学園大学 松中照夫教授、北海道立根釧農業試験場 三木直倫研究部長、同三枝俊哉主任研究員に厚く御礼申し上げます。本研究は主として農林水産省指定試験事業および北海道の「家畜糞尿利用技術開発事業(1994~1998年)」、「家畜ふん尿循環利用システム開発事業(1999~2004年)」の研究成果をとりまとめたものであり、研究の推進に当たり大きな支援をいただいた農林水産技術会議事務局の各位、研究を分担してとりすすめていただいた道立農畜試の研究員諸氏、研究作業の遂行にご協力いただいた根釧農業試験場管理科諸氏や草地環境科臨時農業技能員諸氏、現地試験や調査の実施に際して多くのご協力をいただいた根室、釧路農業改良普及センター関係各位に心から感謝申し上げます。

引用文献

北海道農政部編(2002)北海道施肥ガイド. 1-242
 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編(1999)家畜糞尿処理・利用の手引き 1999. 1-123
 木曾誠二・菊地晃二(1988)チモシー(*Phleum pratense* L.)を基幹とする採草地におけるマメ科草混生割合に基づいた窒素施肥量. 日草誌 34: 169-177
 松本武彦・田村 忠・中辻敏朗・木曾誠二・三木直倫・實示戸雅之(2002)乳牛糞尿処理物の肥料成分含量の簡易な推定法. 土肥誌 73: 169-173
 松本武彦・實示戸雅之(2006)チモシー単播草地に表面施用した乳牛堆肥の窒素無機化率を考慮した肥効評価. 土肥誌 77: 407-412
 松本武彦・實示戸雅之(2005)チモシー単播草地に施用した乳牛スラリーの化学成分変動に対応した窒素肥効の評価. 土肥誌 76: 253-259
 松中照夫(1987)寒冷・寡照地域のチモシー草地に対する窒素施肥法に関する研究. 道立農試報告 62: 1-72
 松中照夫・小関純一・近藤 照(1988)北海道根釧地方の採草地に対する液状きゅう肥の効率的施用法. 土肥誌 59: 419-422
 松中照夫・小関純一・松代平治・赤城仰哉・西陰研治(1984)収量規制要因としての草種構成の重要性. 日草誌 30: 59-64
 三枝俊哉(1996)北海道根釧地方の火山性土における草地土壌の肥沃度に対応した施肥管理に関する研究. 道立農試報告 89: 1-76
 Sommer, S.G. and Olsen, J.E. (1991) Effects of dry matter content and temperature on ammonia loss from surface-applied cattle slurry. J. Environ. Qual. 20: 679-683

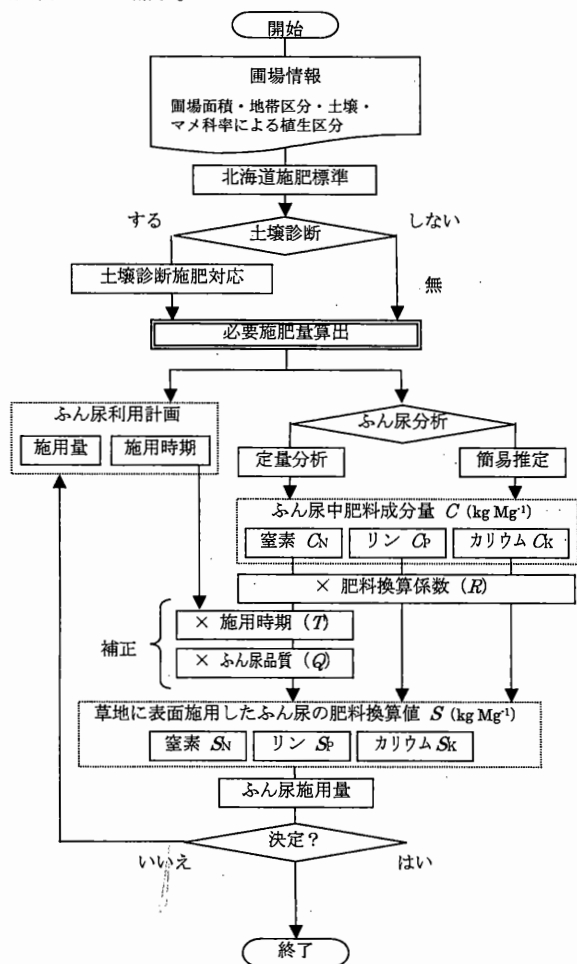


図2 ふん尿処理物の肥効評価に基づくチモシー採草地の施肥法の概略