

牛ふん尿スラリーの管路輸送に関する基礎的実験

Basic Experiment on the Pipeline Transport of Dairy Slurry

中村 和正* 宮崎 健次** 門間 修***

Kazumasa NAKAMURA, Kenji MIYAZAKI, Osamu MONMA

牛ふん尿スラリーを輸送するパイプラインの設計のための基礎的データを得るために、北海道天塩町の牧場のパイプラインにおいて、スラリー輸送中の損失水頭を測定するとともに、このスラリーの室内での粘度試験を行った。その結果、パイプラインでの損失水頭は、スラリーの粘度試験結果から計算できることが確認できた。また、スラリー濃度 T_s が4%ないし5%の範囲を超えると、損失水頭の増大が顕著になるとともに、乱流状態での輸送が困難となることがわかった。

《牛ふん尿スラリー、管路輸送、損失水頭、粘度試験》

We conducted the following tests in order to obtain basic data for the design of a pipeline to transport dairy waste slurry: measurement of the head loss during the transport of dairy waste slurry via pipeline on actual pipeline of a dairy farm in Teshio, Hokkaido; and a laboratory viscosity test of the same slurry. As a result, it was confirmed that the head loss of the slurry during pipeline transport can be calculated from the viscosity measured by the laboratory test. When the concentration of the slurry exceeds 4-5%, we find a remarkable increase in the head loss and it becomes extremely difficult to maintain the turbulent flow during transport.

Keywords: dairy waste slurry, pipeline transport, head loss, viscosity test.

1. はじめに

近年、酪農経営規模の拡大に伴い、家畜ふん尿の適切な処理が強く求められるようになってきている。家畜ふん尿は、可能な限り排出源近傍の農地へ肥料として還元することが望ましい。北海道では、府県に比べて大規模な酪農が営まれていることから、ふん尿の農地還元の可能性が高く、排出から施用まで一貫した処理方法の開発が求められている。

家畜ふん尿の処理方法の1つに、固液分離ののち固形分は堆肥化し、液分（スラリー）は曝気処理によって調整し、これらを農地へ還元するものがある。このようなシステムでは、畜舎から曝気調整施設までのスラリー輸送には管路を用いることが多い。また、曝気調整施設から農地への還元時にも管路が用いられることがある。

ふん尿スラリーは非ニュートン性流体のうち擬塑性流体と呼ばれるものである。容易に想像されるように濃度によって粘度が変化し、また液温も粘度に影響を及ぼす。管路の水理設計の面からみれば、スラリー濃度が高すぎると圧送時に管体にかかる内圧が大きくなり、耐圧強度の大きな管種が必要となる。また高濃度のスラリー圧送にはエネルギーの損失も大きい。そのためスラリーの管路輸送のためには、必要に応じて加水による濃度調整を行わなければならない。逆に、スラリーへの加水量が多すぎると、曝気調整や貯留時に必要な施設の容量が大きくなるなど不利な点が生じる。計画基準¹⁾によれば、スラリーの希釈倍率は3～7倍とされているが、この範囲の上限と下限では希釈用水量の見積りに大きな幅がある。このような背景から、著者らは、適切な希釈倍率を示すために、スラリーの流体的特性を調査することとした。

スラリーの流体特性については、これまでも小菅ら^{2, 3)}や梅田⁴⁾の報告がある。前者では排泄直後に採取した牛ふんに加水して濃度調整したスラリーを供試している。一方、後者ではふん尿溜で2ヶ月間放置されたスラリーを用いて実験している。これに対し、著者らは、固液分離機で処理して搾り出された液分を用いて、実際の圃場配管での輸送試験と室内でのスラリー粘度試験を行った。本報告ではこれらの試験結果について述べる。

なお、パイプラインの水理計算では慣用的に管内圧力が kgf/cm^2 で示され、現場の読者に対してはこの単位の方が具体的な値を把握しやすい。そのため、本報告では必ずしもSI単位系に統一していない。

2. 調査方法

2. 1 調査施設の概要

本調査は、留萌開発建設部管内の天塩沿岸地区北川口共同施設を利用しているN牧場において実施した。N牧場では、スタンション牛舎で57頭の搾乳牛を飼育している。N牧場におけるふん尿の処理のフローを図-1に、また主要な施設の仕様を表-1に示す。牛舎からバークリーナによって排出されたふん尿は、ピストンプレス式の固液分離機で処理される。分離後の固形分は堆肥盤に押し出され、堆肥化後に農地に還元される。一方、液分であるスラリーは畜舎に隣接する貯留槽へ流下し、ここで加水による濃度調整がなされたのち、約650mの管路を經由して、曝気・調整を行う共同施設へ圧送される。共同施設で処理されたスラリーは、ここで適宜貯留され、適期に草地に還元される。

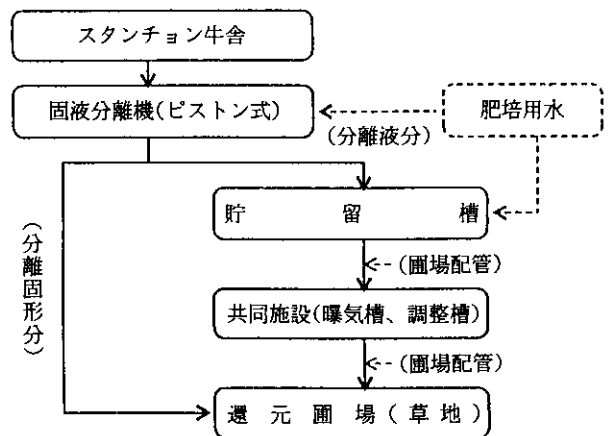


図-1 N牧場におけるふん尿処理のフロー

表-1 N牧場のふん尿処理設備

施設名	仕様等
固液分離機	ピストン式(駆動電動機7.5Kw)
貯留層	地下式120 m^3 槽(7.9 $\times$ 5.6 $\times$ 2.7m)
ポンプ	トラクタPTO式スラリーミキサー
輸送管路	トラクタPTO式ローターポンプ 圃場配管(VP125管)

2. 2 スラリーの密度と粘度

ふん尿スラリーの室内試験には、N牧場の固液分離直後のものを濃度調整して用いた。

密度試験は、スラリーを3分間減圧脱気したのち、比重浮ひょうを用いて求めた。このとき、液温は20 $^{\circ}\text{C}$ に調整した。

ふん尿スラリーの粘度は、内筒回転型粘度計（東機産業株式会社製B型粘度計）を用いて測定した。このとき予め3分間の攪拌を行ったのち粘度計指示値を読みとった。粘度試験を行った濃度と液温条件の組み合わせは表-2のとおりである。なお、スラリー濃度 T_s (%) は、(固形物重量) / (スラリーの全体重量) $\times 100$ であるが、ここでは固形物重量を蒸発残留物として測定している。

表-2 粘度試験の条件

濃度 T_s (%)	液温 t (°C)	条 件 数
2, 3, 4	5, 10	合計 45通り
5, 5.5, 6	15, 20	
6.5, 7, 8	25	
(9通り)	(5通り)	

2. 3 現地管路での輸送試験

N牧場と共同施設を結ぶ管路は、貯留槽から共同施設への圧送と、共同施設から圃場への圧送の両方に用いられる。それゆえ、この圃場配管にはスラリーの農地還元時にリールマシンを接続する散布栓が設けられている。このうち2カ所の散布栓に写真-1のように

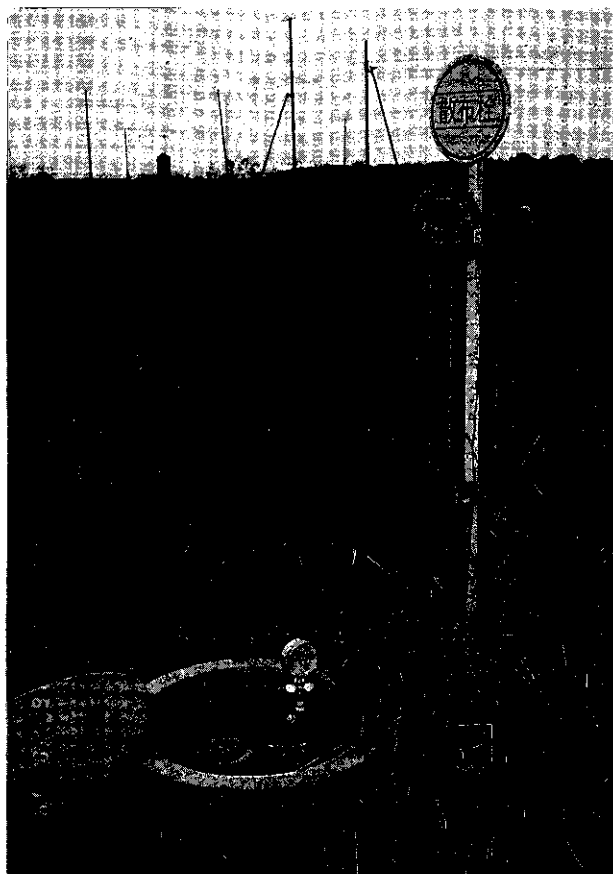


写真-1 ブルドン管式圧力計の設置状況

ブルドン管式圧力計を取り付け、共同施設へのスラリー圧送中の管内圧力を 0.05 kgf/cm^2 の精度で読みとった。測定点間の距離は631mであり、標高差は2.16mで試験時の圧送方向（共同施設側）に向かって昇っている。

貯留槽のスラリーは、水面にスカムが浮き、また底部には沈殿物が生じている。そのためN牧場の日常管理では、輸送の前に槽内の攪拌を2時間程度行っている。そこで、この実験でも同じく2時間の事前攪拌を行った。輸送にはトラクターPTO式のローターポンプを使用した（写真-2）。これは容積ポンプと呼ばれるタイプのもので、スラリーの粘度に関わらずPTO回転数と吐出量がほぼ比例する。そのためPTO回転数の調節により、試験中の吐出量を概ね制御できる。スラリーの輸送量および輸送中の管内平均流速は、N牧場の貯留槽内の液面低下速度から求めた。

輸送試験は1996年10月から1997年1月にかけて、スラリーが溜まるのにあわせ、数度にわたって行った。



写真-2 トラクターPTO式ローターポンプ
(写真手前が貯留槽。トラクターに接続されたポンプによりスラリーは写真手前側のホースを通してパイプラインに注入される)

3. 結果の整理と考察

3. 1 スラリーの密度

スラリーの濃度 T_s と密度 ρ の関係は図-2に示すとおりである。図中では各測定値を直線で補間している。以下の整理で、 T_s から密度を求めるときには、図-2の補間直線により ρ を求めることとした。また、温度による水の密度変化は小さいため、スラリーの密度も液温による変化は無視できるものとした。

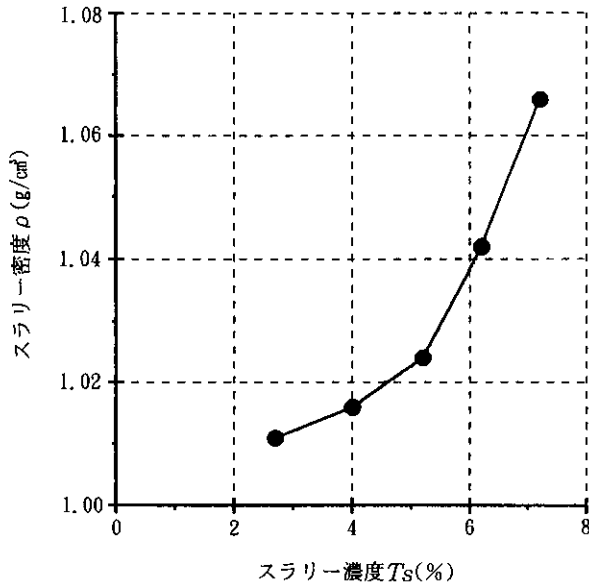


図-2 スラリー濃度 T_s と密度 ρ の関係

3. 2 スラリーの粘度⁵⁾

粘度試験結果の整理を述べる前に、まずスラリーの流体的性質について概説しておく。いま、図-3のような2枚の平行平板の間の粘性流体の動きについて考えてみる。下側の平板を固定し、上側の平板を力 F で動かすと、流体中にはズリ流動が生じる。ズリ流動が層流で、なおかつ平板とこれに接する流体の間に滑りがない場合、下側の板から高さ y の位置の流速を u とすると、流体中の速度勾配 D (s^{-1}) は(1)式のように表せる。

$$D = \frac{du}{dy} \quad (1)式$$

D を一般にズリ速度と呼ぶ。上板の面積を A として力 F を応力 s (Pa) として示すと

$$s = \frac{F}{A} \quad (2)式$$

s はズリ応力と呼ばれるものである。

図-4はズリ速度 D とズリ応力 s の関係を模式的に示したものである。水のようなニュートン性流体で

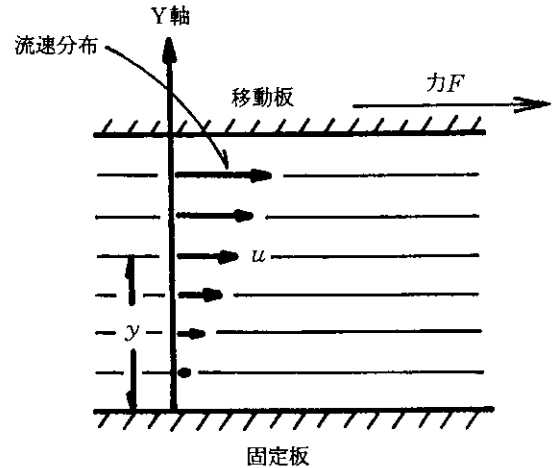


図-3 ズリ流動⁵⁾

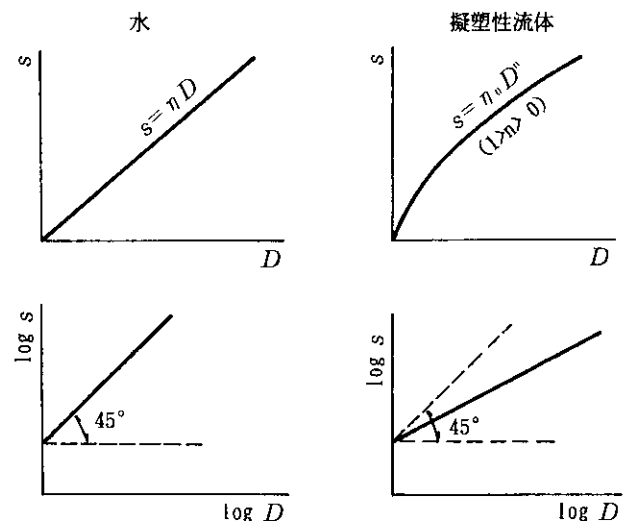


図-4 ズリ速度 D とズリ応力 s の関係 (模式図)

は、 s は D に比例し、(3)式が成り立つ。

$$s = \eta D \quad (3)式$$

ここで、 η は粘性係数 (あるいは粘度、単位は $Pa \cdot s$) である。

牛ふん尿スラリーは非ニュートン性流体のうち擬塑性流体と呼ばれるもので、 s と D には(4)式のような関係がある。

$$s = \eta_0 D^n \quad (4)式$$

ここで、 η_0 は流体粘稠度指数、 n は構造粘度指数である。

さて、今回供試したN牧場の牛ふん尿スラリーについて、液温 t が $10^\circ C$ と $20^\circ C$ の条件での s と D の関係を示したものが図-5である。図中には水に対する計算値もあわせて示している。この図から液温が低いほど η_0 が大きいこと、スラリー濃度が高いほど n が小さ

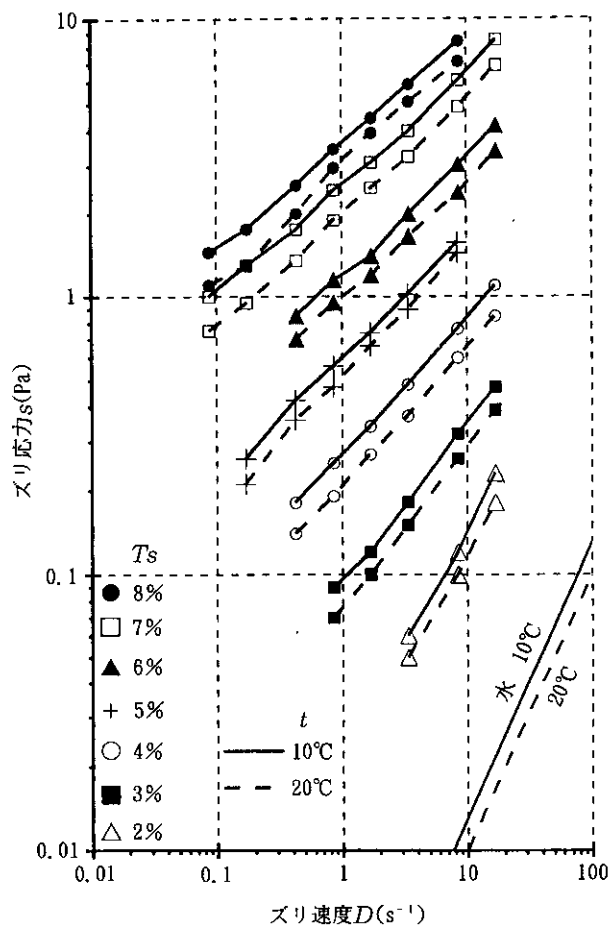


図-5 ズリ速度 D とズリ応力 s の関係

いことなどが推察される。

そこで、濃度や液温を用いて η_0 と n の実験式を求めてみる。まず濃度と液温の異なる45通りの試験条件のそれぞれに対し、 s と D の関係を両対数紙上で直線と考え最小二乗法により(5)式の係数 a と b を求めた。

$$\log s = a \cdot \log D + b \quad (5)式$$

(5)式変形すると(6)式を得る。

$$s = 10^b \cdot D^a \quad (6)式$$

すなわち、 a は構造粘度指数 n に相当する。得られた n と Ts の関係を図-6に示す。液温 t と n の関係が明確でないこと、また $Ts = 0\%$ ならば $n = 1$ であることから、 n と Ts の関係を、係数 p 、 q を用いて(7)式のように表すことにする。

$$n = \frac{p + q \cdot Ts}{p + Ts} \quad (7)式$$

最小二乗法により p 、 q を求めると

$$n = \frac{2.76 + 0.184 \cdot Ts}{2.76 + Ts} \quad (8)式$$

ところで、(4)式中の流体粘度指数 η_0 は図-7をもとに、係数 e 、 k を用いて(9)式のように求められる。

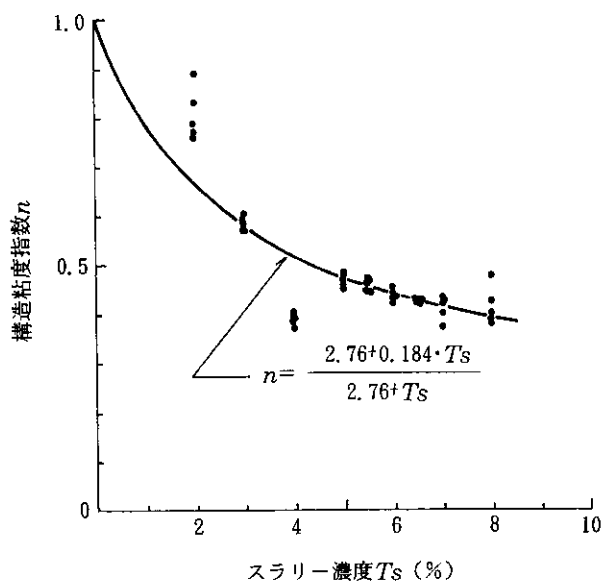


図-6 スラリー濃度 Ts と構造粘度指数 n の関係

$$\eta_0 = e \cdot Ts^k \quad (9)式$$

式中の k は5通りの温度条件に対する平均により3.67が得られた。また e は液温 t (°C)の1次式として次のように得られた。

$$e = 0.00213 - 0.000034t \quad (10)式$$

これらからN牧場のスラリーに対して(11)式が得られる。

$$s = (0.00213 - 0.000034t) \cdot Ts^{3.67} \cdot D^{\frac{2.76 + 0.184Ts}{2.76 + Ts}} \quad (11)式$$

粘度試験の全ケースで得られたズリ応力実測値と(11)式に t 、 Ts 、 D を代入して求めたズリ応力計算値を図-8に示す。この図から(11)式がN牧場のスラリーの粘度推定に十分適用できることがわかる。

3.3 スラリー粘度と管路での損失水頭の関係

管路を用いたスラリー輸送試験の結果を表-3に示す。表中の密度は供試スラリーの濃度をもとに図-2の直線補間から計算したものである。輸送試験による摩擦損失係数 f_p は、(12)式により求めた。

$$f_p = \frac{h_f \cdot d \cdot 2g}{L \cdot V^2} \quad (12)式$$

ここで h_f : 摩擦損失係数、 d : 管径 (0.125m)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 L : 管長 (631m)、 V : 流速 (m/s)

表中の流体粘度指数と構造粘度指数は、供試スラリーの液温 t と濃度 Ts を(9)式および(8)式に代入して求

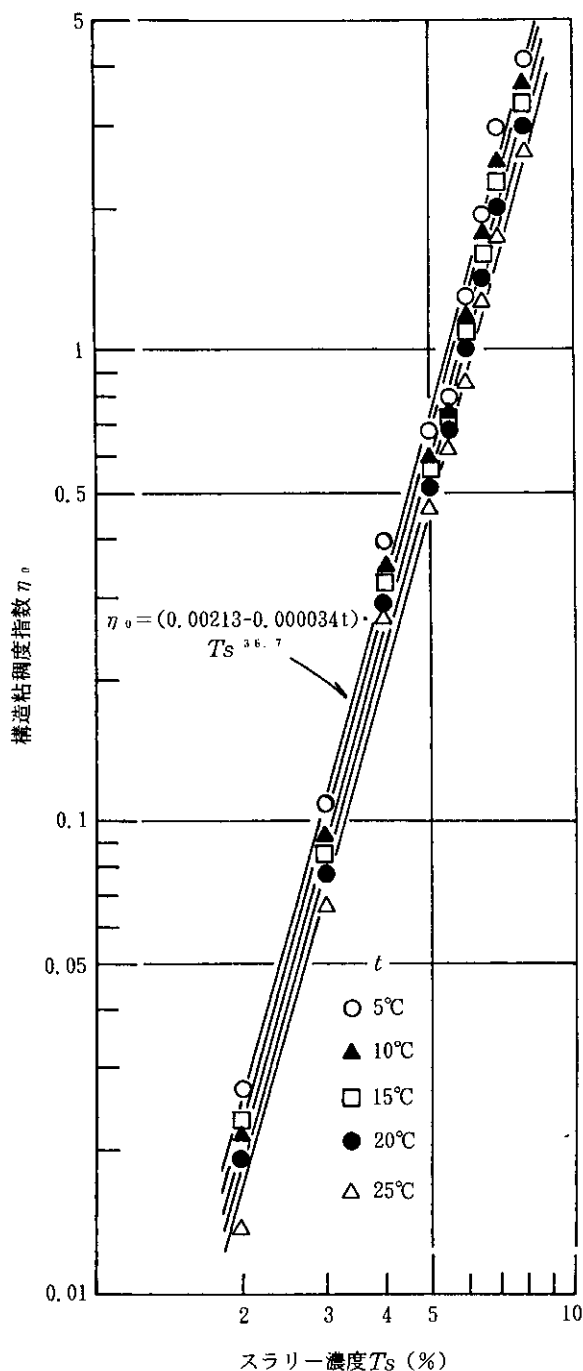


図-7 構造粘度指数 η_0 とスラリー濃度 T_s 、液温 t の関係

めたものである。また、次の(13)式⁶⁾でレイノルズ数 Re を計算し、これが2300を超えれば乱流、それ以下であれば層流として管内の流れを判別した。ただし、小菅ら⁶⁾は応力の単位を dyne/cm^2 として求めた η_0 を(13)式に代入しているの、表-3の η_0 もこれにあわせるため(9)式で求めた η_0 (応力を Pa で示している)に10を乗じている。

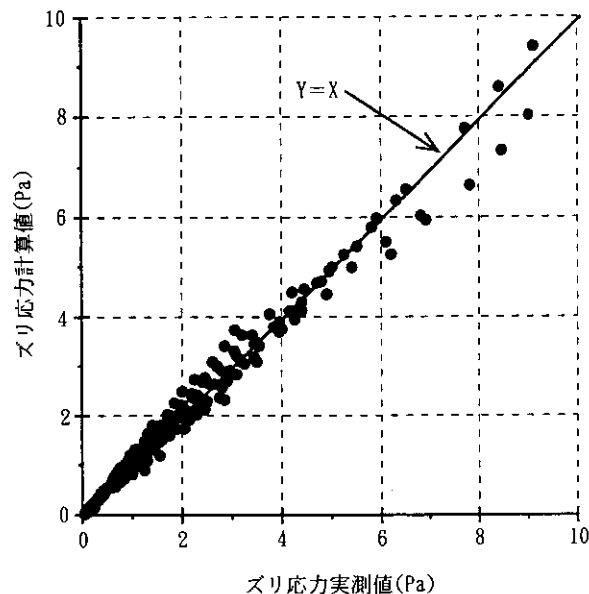


図-8 スリ応力の実測値と計算値の比較

$$Re = 8 \left(\frac{n}{6n+2} \right)^n \cdot \frac{\rho V^2}{\eta_0 \left(\frac{V}{D} \right)^n} \quad (13\text{式})$$

表-3の最右欄の粘度試験による摩擦損失係数 f_L は、層流に対しては(14)式を用い、また乱流に対しては(15)式²⁾を解いて求めた。

$$f_L = \frac{64}{Re} \quad (14\text{式})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_L}} = 2.0 \left(\frac{1}{n} \right)^{0.70} \log \left\{ \frac{Re}{8 \left(\frac{n}{6n+2} \right)^n} \cdot f_L^{1-\frac{n}{2}} \right\} - 0.8n \quad (15\text{式})$$

図-9は輸送試験と粘度試験のそれぞれから求めた損失係数 f_p と f_L を比較したものである。この図に示すように両者は近い値であり、室内粘度試験結果から損失係数を推定する(14)式と(15)式の妥当性が確認できる。

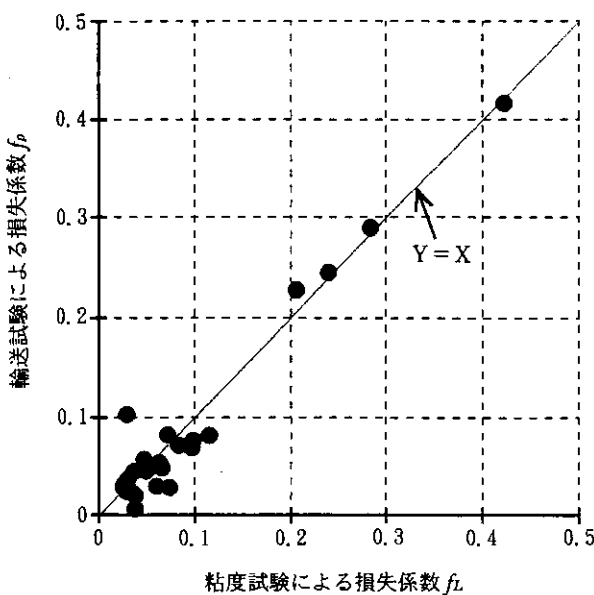
3. 4 スラリーの濃度や液温と損失水頭

管路での輸送試験では、濃度や液温条件の組み合わせは限られていた。しかし、スラリーの粘度試験結果を用いれば、摩擦損失係数を推定することができる。そこで、スラリーの濃度や液温と管路輸送時の損失水頭の関係を検討してみる。図-10は、内径0.125mの管において、 $V=1.0\text{m/s}$ で輸送した場合の損失水頭を示したものである。 T_s が4～5%を超えない範囲であれば損失水頭は比較的小さいが、この範囲を超

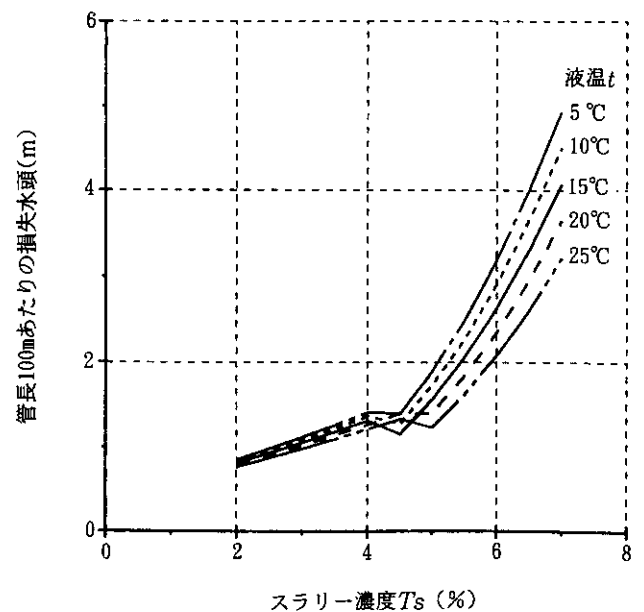
表－３ 管路での搬送試験結果整理と室内粘度試験をもとに算定した摩擦損失係数

搬送試験 実施日	濃 度 $T_s(\%)$	液 温 $t(^{\circ}\text{C})$	密度 ρ (g/cm^3)	ポンプ 回転数 (rpm)	流 速 V (m/s)	上流側圧力 計の読み (Kgf/cm^2)	下流側圧力 計の読み (Kgf/cm^2)	全損失 水 頭 $h_t(\text{m})$ 注 1	湾曲損 失水頭 $h_b(\text{m})$	摩擦損 失水頭 $h_r(\text{m})$	搬送試験による 摩擦損失係数 f_p	流体粘弾 度指数 η_s	構造粘度 指 数 n	レイノ ルズ数 Re	流れ の 状態	粘度試験による 摩擦損失係数 f_s	
H 8.12.17	2.4	8	1.010	550	0.84	1.55	0.80	5.27	0.04	5.23	0.029	0.462	0.620	9539	乱流	0.025	
				500	0.72	1.40	0.75	4.28	0.03	4.25	0.032				7712	乱流	0.026
				400	0.54	1.20	0.70	2.79	0.02	2.77	0.037				5186	乱流	0.030
H 8.11.15	2.7	9	1.011	500	0.72	1.40	0.85	3.28	0.03	3.25	0.024	0.698	0.596	5567	乱流	0.029	
				450	0.60	1.25	0.80	2.29	0.02	2.27	0.024				4310	乱流	0.031
				400	0.54	1.20	0.80	1.80	0.02	1.78	0.024				3718	乱流	0.033
				300	0.42	1.05	0.80	0.31	0.01	0.30	0.007				2613	乱流	0.037
H 8.10.15	4.0	15	1.016	500	0.72	1.50	0.95	3.25	0.03	3.22	0.024	2.62	0.517	1987	層流	0.032	
				450	0.66	1.35	0.90	2.27	0.02	2.24	0.020				1746	層流	0.037
				400	0.48	1.25	0.85	1.78	0.01	1.76	0.030				1089	層流	0.059
				300	0.42	1.15	0.80	1.28	0.01	1.27	0.028				893	層流	0.072
H 8.12.17	4.3	8	1.018	550	0.84	1.85	0.80	8.15	0.04	8.11	0.045	3.93	0.503	1766	層流	0.036	
				500	0.72	1.75	0.75	7.66	0.03	7.63	0.057				1402	層流	0.046
				450	0.54	1.60	0.75	6.19	0.02	6.17	0.082				911	層流	0.070
H 9. 1.16	4.7	6	1.021	550	0.84	1.80	0.75	8.12	0.04	8.08	0.044	5.64	0.486	1315	層流	0.049	
				500	0.72	1.70	0.75	7.14	0.03	7.11	0.053				1042	層流	0.061
				450	0.60	1.65	0.75	6.65	0.02	6.63	0.072				790	層流	0.081
				400	0.54	1.50	0.75	5.19	0.02	5.17	0.069				674	層流	0.095
H 8.11.12	5.2	13	1.024	500	0.78	1.85	0.85	7.61	0.03	7.57	0.048	7.16	0.467	997	層流	0.064	
				450	0.60	1.75	0.80	7.12	0.02	7.10	0.077				667	層流	0.096
				400	0.54	1.65	0.80	6.14	0.02	6.12	0.082				567	層流	0.113
				300	0.42	1.50	0.80	4.68	0.01	4.67	0.103				386	層流	0.029
H 8.10.14	7.2	16	1.066	500	0.66	4.35	1.40	25.51	0.02	25.49	0.227	22.2	0.410	318	層流	0.202	
				450	0.60	4.05	1.40	22.70	0.02	22.68	0.245				273	層流	0.235
				400	0.54	3.85	1.30	21.76	0.02	21.74	0.290				231	層流	0.277
				300	0.42	3.45	1.20	8.95	0.01	8.94	0.417				155	層流	0.414

注 1：上下流の圧力測定点間の距離は631mで、上流側より下流側の標高が2.16m高い。



図－９ 輸送試験と粘度試験から求めた損失係数の比較



図－10 スラリー濃度 T_s や液温 t と損失水頭の関係

えると T_s の増大に対する損失水頭の増大が顕著になる。

また、 T_s が5%を超えると液温のちがいによる損失水頭の差が大きくなることがわかる。N牧場における輸送試験での液温の最低値が6℃であったことからわかるように、実際に輸送されるスラリーの温度は広い範囲にわたる。輸送距離が長い場合、管種の選定にあたってはこのような液温の影響を考慮する必要がある。

3. 5 スラリー輸送における臨界流速

ふん尿スラリーの管路輸送は、乱流状態で行うことが望ましいとされている³⁾。牛ふん尿スラリーを層流状態で輸送した場合に生じる障害を具体的に検討しているものは少ないが、乱流状態の確保が輸送のための必要条件であるとすれば、スラリー濃度に応じて決まる臨界流速以上で圧送しなければならない。図-11は、15℃のスラリーを輸送する場合の、濃度と臨界流速の関係を示したものである。計画基準¹⁾では、管路でスラリーを輸送する場合、およそ0.5~1.5m/sの範囲内の流速が望ましいとされている。N牧場のスラリーでみると、 T_s がおよそ5%を超えると、1.5m/s以下の流速で乱流状態を得ることが困難になることがわかる。

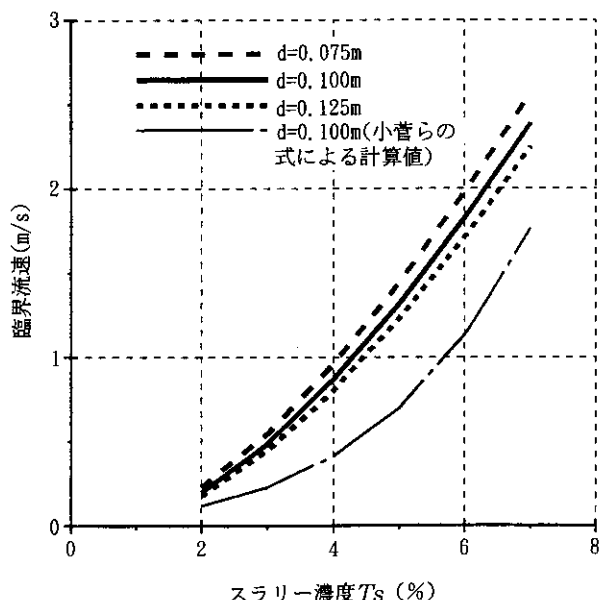


図-11 スラリー輸送時の臨界流速

臨界流速については既に小菅ら³⁾の報告がある。図には、比較のために小菅らの粘度計算式から求めた臨界流速も併せて示している。小菅らの実験では牛ふん

に加水してスラリーを調製しており、N牧場でのスラリーとは異なったものを供試している。図-11から、臨界流速が対象スラリーによって大きく異なることが推察される。飼料や固液分離機、敷料などのちがいによって、スラリーの粘度特性は異なると思われる。それゆえ各種のスラリーについて粘度試験を行うことが必要である。

3. 6 スラリー濃度と輸送効率

単位のエネルギーで輸送できる固形物量によって、管路によるスラリーの輸送効率を評価するならば、動水勾配を i として T_s/i をその指標とすることができる。図-12は、内径0.125mの管で15℃のスラリーを輸送する場合の輸送効率と T_s や V の関係をみたものである。この図からは濃度が等しい場合には流速が小さいほど輸送効率が高いことがわかる。また輸送効率が最も高くなるスラリー濃度は流速によってことなり、1m/s程度の流速で輸送する場合には約5%の濃度が適しているといえる。

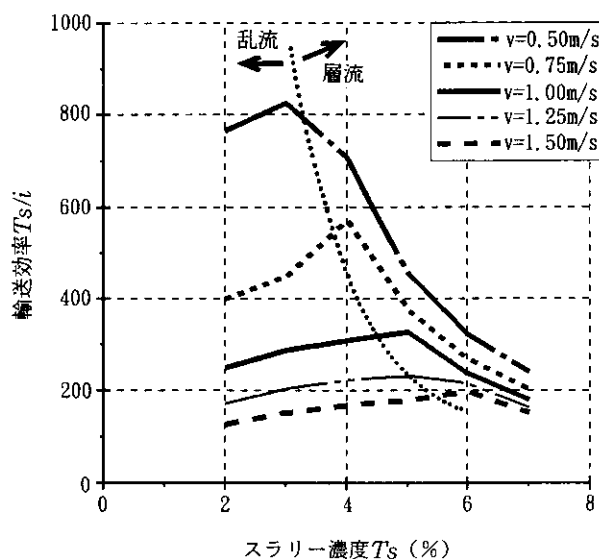


図-12 スラリーの輸送効率

図中の点線は、それぞれの流速で輸送する場合に流れの状態が変化する濃度の境界を示すものである。この点線でみると臨界濃度での輸送は比較的効率が上がることがわかる。

3. 7 輸送に適するスラリー濃度

前節までに述べたように、比較的良好に用いられる内径が0.075~0.125m程度の管路で、流速を1m/s程度として、N牧場で得られたようなスラリーを輸送す

る場合、 T_s を4～5%程度に調整することが適当であると考えられる。

4. おわりに

この報告では、牛ふん尿スラリーを輸送するパイプラインの設計のための基礎的調査の結果について述べてきた。この調査では、北海道天塩町の牧場のパイプラインで損失水頭を測定するとともに、このスラリーの室内での粘度試験を行った。これらの試験をもとに、まずパイプラインでの損失水頭がスラリーの粘度試験結果から算出できることを確認した。また、N牧場のスラリーでは濃度 T_s が4%ないし5%の範囲を超えると、損失水頭の増大が顕著になるとともに、乱流状態での輸送が困難になることがわかった。

今回の輸送試験ではN牧場のふん尿スラリーを用いているが、固液分離の方法の違いによってスラリーの粘度特性も異なると考えられる。輸送区間が長い管路で、比較的粘度の高いスラリーを輸送する場合、既往の報告からの粘度データだけで水理計算を行うと、内圧を小さく見積もってしまう場合がある。それゆえ、今後は各種のスラリーの粘度データの把握が必要である。

本調査では、株式会社ズコーシャの青木賢二氏に測定作業のご協力をいただいた。また、農林水産省農業

工学研究所集落排水システム研究室の大井節男主任研究官には貴重な文献をいただいた。さらに(株)トキメックからは室内粘度試験結果の取り扱いに関する資料をいただいた。ここに記して厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準計画畑地かんがい、pp.78～79、農業土木学会（1982）（なお、この基準は1997年6月に改訂された）
- 2) 小菅孝利、河野広、木俣勲、大井節男：牛ふんスラリーの物理性と流体特性、農林水産省農林水産技術会議事務局、農林業における環境保全の技術に関する総合的研究試験成績書第6集、pp.193～200(1979)
- 3) 小菅孝利、大井節男、原田靖生：農業土木技術者のための水質入門（その11）－家畜ふん尿の農用地利用－、農業土木学会誌53(6)、pp.53～60(1985)
- 4) 梅田安治：ふん尿かんがいにおける問題点、雄武地区牧草かんがい試験報告書2、pp.1～9(1981)
- 5) 川崎種一：回転粘度計による粘度測定の実際、NEW FOOD INDUSTRY、22(4)～22(6)、(1980)
- 6) 小菅孝利、大井節男：家畜フン尿スラリーの管路輸送－牛フン尿スラリーの流動特性－、農業土木学会誌48(1)、pp.25～31(1980)



中村和正*

開発土木研究所
農業開発部
土壌保全研究室
主任研究員
博士（農学）



宮崎健次**

北海道開発局
農業調査課
開発専門官



門間 修***

留萌開発建設部
天塩地域農業開発事業所
第1建設係長
現在
北海道開発局
農業設計課企画係長