

学位論文

スラリーインジェクタの

動力学的解析

Dynamic Analysis of
Slurry Injector

2016.3

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物環境科学専攻
(帯広畜産大学)

胡 楠

目次

第 1 章 緒 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	7
1.2.1 インジェクタに関する研究	7
1.2.2 インジェクタけん引抵抗に関する研究	8
1.3 研究目的と論文の構成	10
1.3.1 研究目的	10
1.3.2 本論文の構成	11
第 2 章 切削深さとディスク形状が けん引抵抗に及ぼす影響	13
2.1 緒言	13
2.2 実験装置と実験方法	13
2.2.1 実験装置	13
2.2.1.1 インジェクタユニット	13
2.2.1.2 軸部ロードセル	17
2.2.1.3 計測用コンピュータと インターフェース	19
2.2.2 実験方法	20
2.3 実験結果および考察	21
2.3.1 切削深さがけん引抵抗 に及ぼす影響	21

2.3.2 ディスク形状がけん引抵抗 に及ぼす影響	24
2.3.2.1 厚さの影響	24
2.3.2.2 直径の影響	26
2.4 本章のまとめ	29

第 3 章 ディスク構造が

けん引抵抗に及ぼす影響	31
3.1 緒言	31
3.2 ディスク側面部の摩擦の解析	31
3.2.1 実験装置と実験方法	31
3.2.1.1 実験装置	31
3.2.1.2 実験方法	35
3.2.2 実験結果および考察	36
3.2.2.1 3 方向力測定器の実験データ	36
3.2.2.2 合力のモデル	38
3.2.2.3 結果および考察	40
3.3 ディスク刃縁部と側面部抵抗の解析	41
3.3.1 実験装置と実験方法	41
3.3.1.1 実験装置	41
3.3.1.2 自重の補正	45
3.3.1.3 実験方法	46
3.3.2 実験結果および考察	47
3.3.2.1 測定データの補正, 変換 および合成	47

3.3.2.2	刃縁部切削抵抗と側面溝付 ディスクけん引抵抗の比較	50
3.3.2.3	刃縁部切削抵抗と平板 ディスクけん引抵抗の比較	51
3.3.2.4	結果および考察	52
3.4	本章のまとめ	53

第 4 章 側面溝付ディスクと平板ディスク

	のけん引抵抗の比較	55
4.1	緒言	55
4.2	実験装置と実験方法	55
4.2.1	実験装置	55
4.2.2	実験方法	56
4.3	実験結果および考察	56
4.4	本章のまとめ	58

第 5 章 総 括 60

5.1	切削深さとディスク形状がけん引 抵抗に及ぼす影響(第 2 章)	60
5.2	ディスク構造がけん引抵抗に 及ぼす影響(第 3 章)	61
5.3	側面溝付ディスクと平板ディスク のけん引抵抗の比較(第 4 章)	62
5.4	結語	62

謝 辞 64
参 考 文 献 66
Summary 71

第 1 章 緒 論

1.1 研究の背景

科学の発展と共に，人間の活動範囲や規模の拡大により，気候変動，環境汚染や生物多様性の損失などの地球環境問題が全世界に広がり，環境保全と資源の持続可能な利用は国際社会に共通の課題になっている。環境問題の中には農畜産分野に起因するものも少なくない。例えば，家畜排せつ物の不適切な管理による水汚染，悪臭発生やアンモニア揮散など環境負荷ガスによる大気汚染，また家畜ふん尿は圃場への過剰施用によって発生する土壌汚染などの問題がある¹⁾。

家畜排せつ物は，上記のように畜産環境問題の発生要因となる一方で，堆肥化など適切な処理を施すことにより，土壌改良資材や肥料としての有効活用が期待されるなど，農業地域における利用価値が大きい貴重なバイオマス資源とも言える。近年，家畜排せつ物の適切な管理や資源としての有効利用に関心が高まっている。西ヨーロッパでは家畜排せつ物による環境問題を解決するために，ヨーロッパ各国は自国の状況に応じて，硝酸塩，アンモニア揮散や悪臭の防止などについて規制を作った。そして，家畜ふん尿は堆肥，バイオガスやスラリーにして有効利用されている²⁾。

日本では，食生活の高度化，多様化が進む中で畜産は大きな発展を遂げてきた。しかし，畜産における一戸当

たりの飼養頭数の増加や地域における混住化の進行，環境問題への関心の高まりなどを背景として，家畜排せつ物処理の問題が顕在化している³⁾⁴⁾。「農林水産省畜産環境対策」の「畜産経営に起因する苦情発生状況」⁵⁾によると，家畜排せつ物は不適切な管理により，悪臭の発生要因となり，河川や地下水へ流出して水質汚染，害虫発生などの問題をかかえている。このため，家畜排せつ物の管理の適正化を図りつつ，家畜排せつ物の利用促進を図ることにより健全な畜産業の発展に資する目的で，「家畜排せつ物の管理の適正化および利用の促進に関する法律」⁶⁾が平成11年に制定された。家畜排せつ物の処理法には，浄化处理や焼却処理など多様な処理・利用方法が用いられているが，肥料や土壌改良資材として農地へ還元することが最良の方法と考える。家畜排せつ物法は管理の改善と家畜排せつ物の利用促進のため制定された。つまり，持続性のある循環型農畜産業への転換が求められており，図1.1に示すように，家畜排せつ物はバイオガスプラントでバイオガスやスラリーのような消化液に有効利用できる技術が注目されている。

日本における家畜の年間排せつ物量は，ここ数年間大きな増減は見られないが，農林水産省⁷⁾が約8,295万トンと試算されている。そのうち，牛が最も多く，肉用牛と乳用牛を合わせると全体の約57.9%を占めている。その中で，北海道十勝管内の搾乳農家は多頭化に合わせ，労力削減のために「フリーストール牛舎」の導入が進ん

でいる⁸⁾。フリーストールでは麦わらなどの敷き料を使用しないことが多いため水分量の多いふん尿が増え、堆肥の調整を難しくしているため、スラリー処理への関心が以前にも増して高まっている。

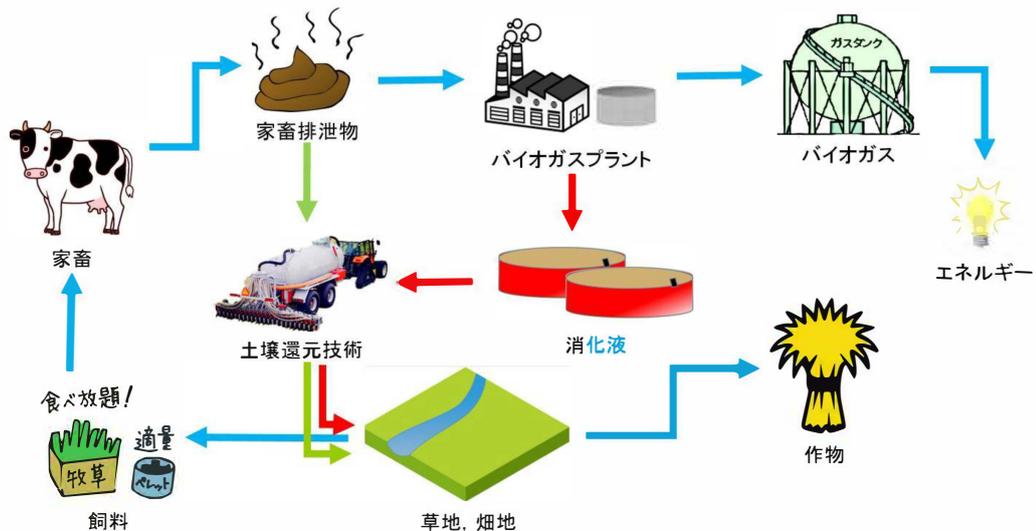


図 1.1 家畜排せつ物の有効利用

Chambers et al.⁹⁾は、スラリーには窒素などの主要成分や微量元素などの肥料成分が含まれていることを報告している。適切なスラリー散布システムが確立されれば、化学肥料の投入量の削減が可能であると考えられる。さらに、Chambers et al.¹⁰⁾は、適正量のスラリーを散布するためには適切な機械を選定することの重要性を指摘した。また、スラリーに含まれる栄養分が、各作物に適切に利用できるような処理システムと散布システムの重要性も詳細に述べている。

スラリー散布機は大別すると表面散布式と土壌注入式の2種類がある。図 1.2 に表面散布式の代表的なプロ

ードキャストスプレッダを示し，図 1.3 に土壤注入式の代表的なスラリーインジェクタを示す。「家畜ふん尿処理利用の手引き 2004」¹¹⁾に述べられているように表面散布式は省力的であるが，図 1.4a に示したように土壤注入式より散布量の均一性や土壤への浸透性などの問題がある。さらに，スラリーの土壤表面散布より土中に注入する方法が悪臭やアンモニアの揮散が低くなる¹²⁾ことから，スラリーの土中施用が注目され，インジェクタの普及が期待されている。しかし，インジェクタは作業速度が遅い，作業機にかかる初期投資が高い，スラリータンカーや散布機の重量が大きいためけん引抵抗が大きくなり大型のトラクタが必要となり，燃料消費量も多くなるという点¹³⁾や草地においては，草へダメージを与えるという問題などもあり，あまり普及していないのが現状である。インジェクタの導入は期待されるものであるが，これらの問題点の解決が求められている。

北海道におけるスラリー施用のための適切なシステムを構築する上で，スラリータンカーやインジェクタによる土-機械間の抵抗の要因を解明し，この抵抗を減少できれば燃料費の削減を可能とする技術開発が必要といわれている¹⁴⁾¹⁵⁾。インジェクタにも使用目的により様々な機種があるが，代表的なものとして土壤表面から 60 mm 程度の深さに溝を切り，そこへスラリーを注入する草地用インジェクタと深さ 150 mm 程度の畑地用インジェクタがある。従来，日本ではスラリーの多くが草地

へ表面散布により施用されてきたが，河川への流出などによる環境負荷増加，アンモニアの揮散や悪臭の拡散などを防止するために，表面散布からインジェクタによる施用への移行が望まれる。そのためには北海道で普及しているトラクタでもけん引できる北海道の営農状況に適合したインジェクタの開発設計が切望されているのが現状である。



図 1.2 ブロードキャストスプレッダ



図 1.3 スラリーインジェクタ



a. 表面散布



b. 土壌注入

図 1.4 スラリーの表面散布と土壌注入の状況

1.2 既往の研究

1.2.1 インジェクタに関する研究

スラリーの散布は，表面散布と土壌注入の2種類である。ヨーロッパ諸国はスラリー処理が多いため，家畜ふん尿による環境問題に対する規制が進み，年間施用量の規制や散布場所および時期を制限する国が多くなっている²⁾。スラリーの土壌表面散布より土中に注入する方法が悪臭やアンモニアの揮散が低くなることから (Huijsmans et al., 2003)¹²⁾，スラリーインジェクタが注目されている。Pullen et al. (2004) は草地でのスラリー散布時の悪臭やアンモニア揮散低減をするために，また，スラリーが浸透しやすく作物の損失を減らすために，草地用スラリーインジェクタの土壌切削部の形状について開発および評価を行った¹⁶⁾。

日本では，国内に適用できるスラリーインジェクタの開発に関する研究が進んで来た。1981年坂本らは作物の畦間にもスラリーを注入できるインジェクタを試作した。また，スラリー施用量を変えてオオムギやサツマイモなどを栽培した。その結果，スラリー施用量が適当であれば，基肥Nの全てと P_2O_5 ， K_2O の一部を化学肥料と代替することが可能と報告した¹⁷⁾。

また，1999年に住田らは，石礫が多い圃場ではスラリー散布する際，機械が破損したり，石礫が地表面に露出するため，石礫に対応し浅層に注入するスラリーインジェクタを開発した¹⁸⁾。さらに，2011年に住田らは爪が

15 cmまでに安定して挿入できる，土壌浅層注入式の爪型スラリーインジェクタを開発した¹⁹⁾。

2009年に飯田らはスラリーインジェクタにGPSを取付けて，圃場面積に応じて設定した量の消化液を施用するため，GPSで計測した作業速度に対して吐出弁開度を制御するシステムを開発した。また，圃場内での窒素施用量のばらつきを可視化するため，GPSと吐出弁開度の計測データを用いてクリッキング法で施肥マップを作成した²⁰⁾。

以上のことから，家畜ふん尿による環境問題を低減するために，また，家畜ふん尿は資源として利用するためにもスラリーインジェクタが期待されている。特に，日本の草地と畑地に適したインジェクタの開発と導入が必要と考えられる。

1.2.2 インジェクタけん引抵抗に関する研究

前述のようにインジェクタは作業速度が遅い，作業機にかかる初期投資が高い，スラリートンカーや散布機の重量が大きいためけん引抵抗が大きくなり，大型のトラクタが必要となり，燃料消費量も多くなるという点があるため，あまり普及していないのが現状である。これらの問題点を解決するためには，けん引抵抗を解析する必要がある。

Huijsmans et al. (1998) は，ディスク型やナイフ型など5種類の草地用インジェクタ装置のけん引抵抗を

測定し、いずれの形状の切削部でも土壌含水量が増加するとけん引抵抗が減少すること、切削深さが大きくなるとけん引抵抗が大きくなり、その増加量はインジェクタの切削部によるものと報告した²¹⁾。Rodhe et al.(2004)は、平板ディスクとタインを組み合わせた装置と進行方向から7°偏向した2枚のディスクを組み合わせた装置を供試して、室内と室外で実験を行い、切削深さや速度および土壌の違いによるけん引抵抗の発生状況を報告した²²⁾。さらに実機による圃場試験から、アンモニア揮散などについて検討した(Rodhe and Etana, 2005)²³⁾。

日本では、スラリーインジェクタのけん引抵抗に関する研究も進んでいる。下名ら(1984)は、チゼル型スラリーインジェクタのけん引抵抗低減に関する研究を行った。その結果、チゼル間の間隔を狭くすることによって、大きな土壌破壊領域が得られ、けん引抵抗を10%程度減少できると報告した²⁴⁾。

また、岸本ら(2002)はディスク型スラリーインジェクタのけん引抵抗低減に関する研究を行い、ディスクのけん引抵抗はディスクの切削深さが深くなると増加すると報告した²⁵⁾。さらに2004年に草地用ディスク型インジェクタのディスクで発生するけん引抵抗の減少を目的として穴ありと穴なしのディスクを供試し、研究を行った。その結果、穴ありディスクを供試した場合のディスクに作用するけん引抵抗が減少したことが明らか

になった²⁶⁾。

さらに，住田ら（2003）はスラリーインジェクタの作業速度を0.8，1.1，1.3，1.8 m/sの4段階に設定し，速度がけん引抵抗に及ぼす影響について検討した。その結果，速度はけん引抵抗に顕著な関係がみられなかったと報告した²⁷⁾。

以上のことから，スラリーインジェクタのけん引抵抗に影響する要因は切削深さ，土壌含水量とインジェクタ切削部の構造と考えられる。本研究では，切削部はディスク構造の草地用浅層型スラリーインジェクタのけん引抵抗の発生要因，分布状況と低減方法について解析を行った。

1.3 研究目的と論文の構成

1.3.1 研究目的

水分量の多いふん尿は，堆肥化が難しいためスラリー処理への関心が高まっている。特に，スラリー散布の際に環境への負荷を低減し，散布の均一性が高い土壌注入式のインジェクタの導入が期待されている。スラリータンカーや散布機の重量が大きいため，けん引抵抗が大きくなり大型のトラクタが必要となることから，北海道で普及しているトラクタでもけん引できる，北海道の営農状況に適合したインジェクタの開発設計が必要である。そこで，ディスクのけん引抵抗の発生状況を把握し，設計のため基礎データを得る目的で，ディスク型草地用イ

インジェクタを想定し，特にディスクでの抵抗発生要因を明らかにするために実験を行った。

本研究では，北海道に適したインジェクタの開発のために，草地用ディスク型インジェクタユニットを試作・供試し，ディスクに作用するけん引抵抗とゲージホイールに作用する転がり抵抗の発生状況および大きさを測定し，けん引抵抗が減少できる方法を目的として，スラリインジェクタの動学的解析を行った。

1.3.2 本論文の構成

本論文は5章で構成され，まず，第1章では研究の背景，既往の研究および研究の目的について述べた。

第2章では，切削深さの変化がディスクけん引抵抗に及ぼす影響を解析する。この結果より，ディスクの形状の違いによりディスクに作用するけん引抵抗を低減できるかを検討し，その結果について述べる。

第3章では，ディスク側面部と刃縁部の抵抗を独立して計測し，平板ディスクのけん引抵抗が側面部と刃縁部でどのように発生するのかを解析する。さらに，ディスクの構造がディスクけん引抵抗に及ぼす影響を解明し，側面部の摩擦抵抗低減によりディスクのけん引抵抗を低減できるかを検討する。

第4章では，第3章の結論を評価するために，側面部が土と接触しにくい側面溝付ディスクを供試し，けん引抵抗を低減できるかを評価する。

第 5 章は，本研究全体のまとめとしての総括である。

第 2 章 切削深さとディスク形状がけん引抵抗に及ぼす影響

2.1 緒言

スラリーインジェクタのけん引抵抗に関する既往の研究では，けん引抵抗は切削深さや土壌含水量により変化すると報告されている²¹⁾。また，切削部の形状がナイフ型やディスク型のものについては報告されているが²¹⁾，ディスクの厚さや直径などの形状の違いがけん引抵抗への影響に関する研究例はほとんど見られない。

そこで本章では，草地用ディスク型スラリーインジェクタのけん引抵抗の発生要因を把握するために，またけん引抵抗を低減するために，インジェクタユニットを試作供試し，平板ディスクの直径と厚さ，ならびに切削深さを変えて実験を行う。

2.2 実験装置と実験方法

2.2.1 実験装置

2.2.1.1 インジェクタユニット

草地用ディスク型インジェクタはスラリーを土中へ注入するための装置が 20 から 30 ユニット装備され，切削深さは一般に 60 mm まで達するように設計されている。切削深さの調整は，ディスク後方に装着された床金と油圧制御により調節する機種，油圧制御とインジェクタの自重により調節する機種，さらに，図 2.1 に示した

ユニットのような本実験で採用したゲージホイールにより調節する機種がある。図 2.1 の機種は、ゲージホイールをディスクの前に設置し、上下の動きにより切削深さを調整する機構で、ディスクで溝を切り、スラリーはディスク後方のホースから排出される。本実験はディスクのけん引抵抗低減を目的としたモデル実験であるため、作溝深さの調節が容易であるゲージホイールにより調節する機種を参考にユニットを試作した。

図 2.2 にインジェクタユニットの模式図を示す。試作したインジェクタユニットはディスク、ゲージホイールおよびロードセルから構成されている。

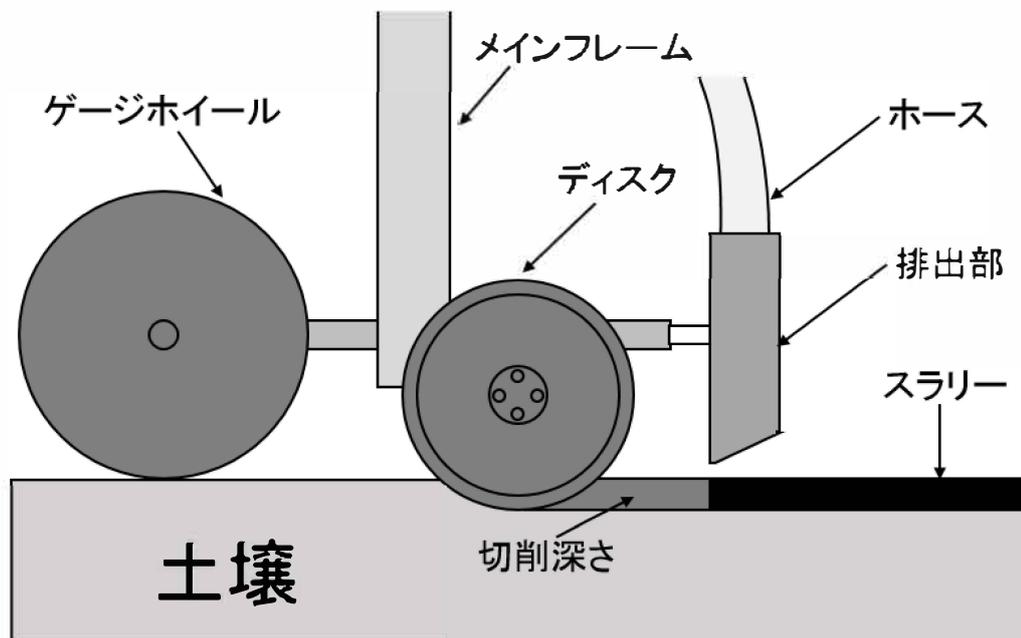


図 2.1 ディスク型スラリーインジェクタユニット

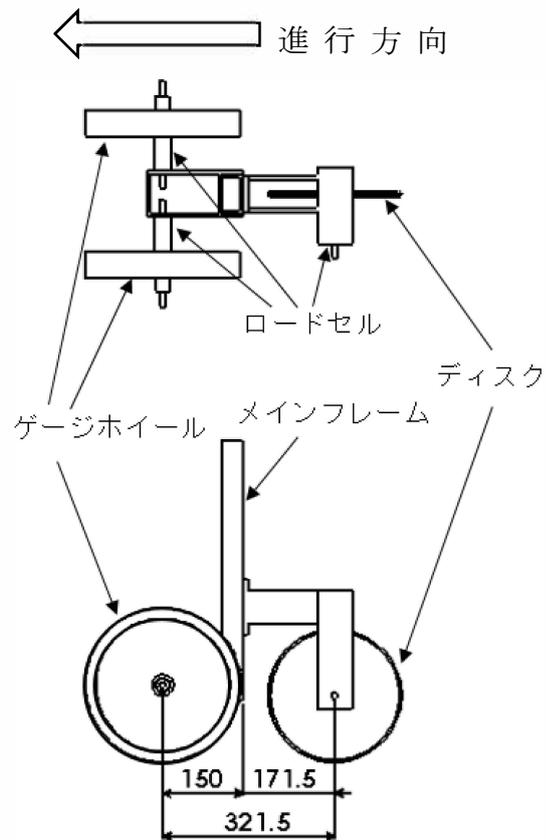


図 2.2 インジェクタユニット模式図の
上面図（上）と側面図（下）

図 2.3 に実験装置を示す。実験装置は土壌槽，台車，フレームおよびインジェクタユニットより構成されている。フレームはスライドベアリングを介して台車と連結されており，上下方向に自由に動作することができる。インジェクタユニットは，このフレームに装着されている。台車はウインチによりワイヤでけん引される構造となっており，土壌槽上のレールを走行する。

図 2.4 にディスクの形状を示す。ディスク形状がけん引抵抗に及ぼす影響を解析するために，厚さと直径を各 3 種類として計 9 種類の平板ディスクを用いた。いずれ

のディスクも刃縁部の長さは、半径方向で 10 mm とした。供試した平板ディスクの諸元を表 2.1 に示す。

ディスクに作用するけん引抵抗と垂直方向力を測定するために、ディスクとフレームの間に片持ち梁構造のロードセルを取付けた。また、ゲージホイールに作用する転がり抵抗と垂直方向力を測定するために、各ゲージホイールとフレームの間にも片持ち梁構造のロードセルを装着した。

切削深さを調節する 2 本のゲージホイールは直径 300 mm、幅 50 mm である。なお、インジェクタユニットメインフレームへのディスクとゲージホイールの取付け位置を変えることで、ディスクの切削深さを調整できる構造になっている。

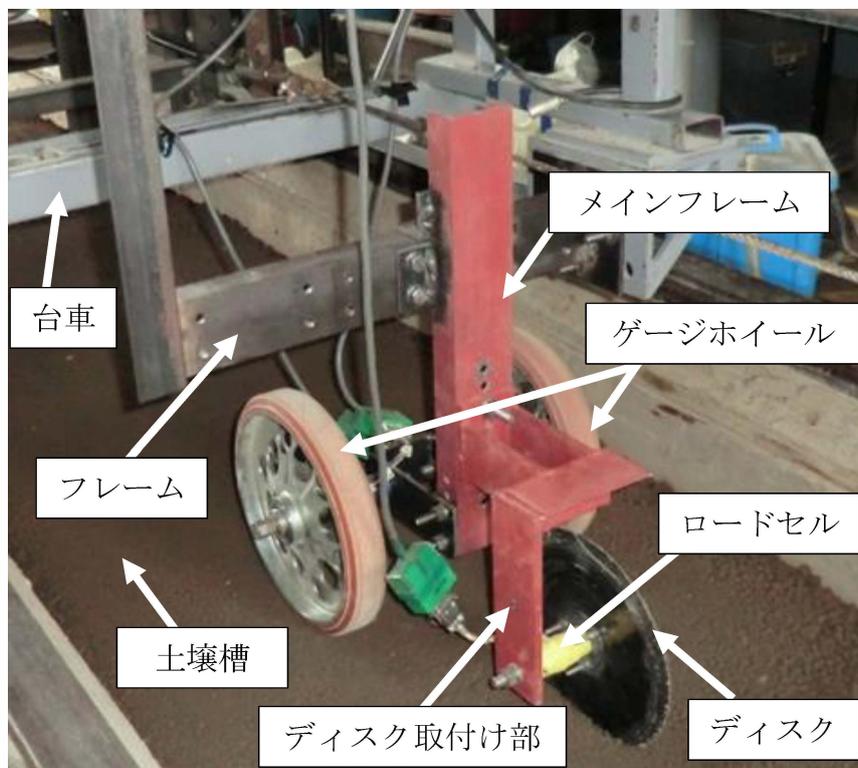


図 2.3 実験装置

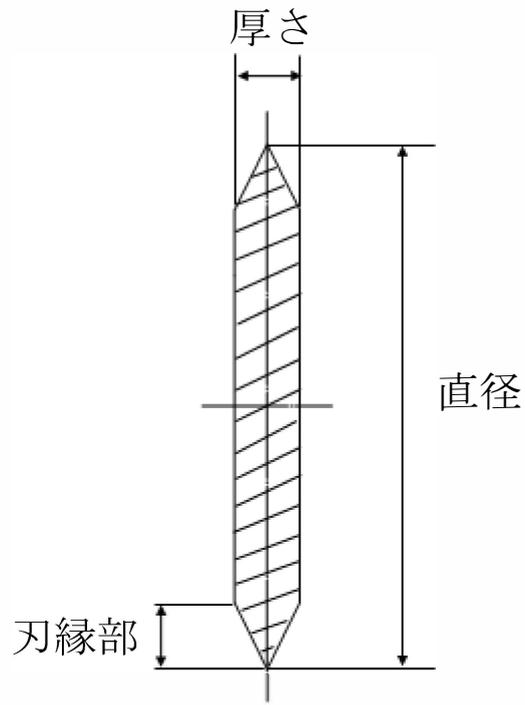


図 2.4 供試ディスク形状

表 2.1 供試ディスクの諸元

直径 (mm)	厚さ (mm)	刃縁部 (mm)
200	6	9 12 10
250	6	9 12 10
300	6	9 12 10

2.2.1.2 軸部ロードセル

けん引抵抗を測定するために、ディスクとフレームの間に片持ち梁構造により力を測定できるロードセルを装着した。図 2.5 に示すように、ロードセルの感知部に垂直方向と水平方向各 4 枚のひずみゲージを貼付し、ブリッジ回路を組み測定に用いた。ひずみゲージで 4 ヶ所

の曲げモーメントを測定し、これらの曲げモーメントとゲージの貼付位置の間隔がわかれば、外力の大きさを求めることができる。このロードセルにより、ディスクに作用する水平方向力であるけん引抵抗と垂直方向力である荷重を独立して測定できる。

ゲージホイールとフレームの間に、ディスクのけん引抵抗測定用ロードセルと同じ測定原理の片持ち梁構造のロードセルを装着し、ゲージホイールに作用する転がり抵抗である水平方向力と荷重である垂直方向力を独立して測定する。図 2.6 に試作した軸部ロードセルを示す。

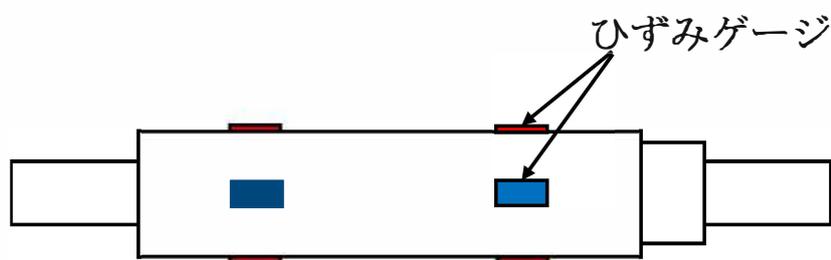
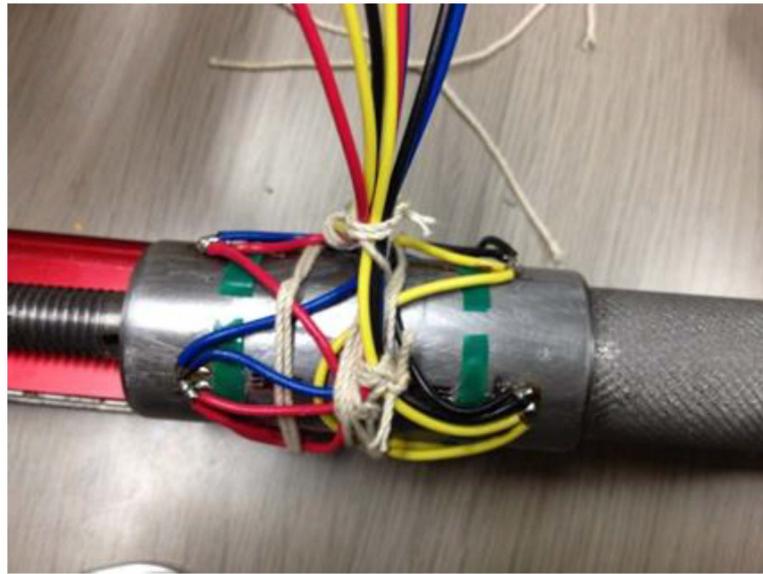


図 2.5 軸部ロードセルの測定原理



a. 配線



b. 外観

図 2.6 軸部ロードセル

2.2.1.3 計測用コンピュータとインターフェース

本章では，ディスクおよびゲージホイールでの水平方向力と垂直方向力を測定するために，片持ち梁構造のロードセルを供試した。各ロードセルで測定したデータは

アナログのひずみデータとなっているため、ひずみをデジタル化するために、共和電業製センサインタフェース PCD-300A を用いた。PCD-300A は動歪測定装置と A/D 変換器一体型のデータロガーであり、専用の対応制御ソフトウェア PCD-30A によりパーソナルコンピュータと接続でき、測定したひずみデータは自動的にデジタル化したものが保存される。測定されたひずみと各ロードセルの較正係数より、ディスクのけん引抵抗、ゲージホイールの転がり抵抗およびディスクとゲージホイールの垂直方向力を求めた。

2.2.2 実験方法

本実験は供試土壌の入った室内土壌槽で行った。供試ディスクは、平板ディスクで厚さおよび直径が各 3 種類のあわせて 9 種類である。切削深さは、草地用インジェクタの作溝深さを考慮して 20 mm, 40 mm, 60 mm と 3 段階に設定した。インジェクタの圃場での実用的な走行速度はトラクタの出力にもよるが、1~2 m/s とされている。しかし、本実験はディスク形状によるけん引抵抗の低減について検討するための基礎実験であるので、測定データへの外乱の影響を減らすために室内土壌槽で実験を行った。走行速度は土壌槽のウインチの設定の都合上、実験を通して 0.17 m/s とした。

供試土壌は、砂 48.0 % , シルト 37.5 % , 粘土 14.5 % で国際土壌学会法によるロームである。土壌は碎土均平

後，ローラで鎮圧した。実験中の平均含水率は 12.3 %，深さ 15 cm までの平均円錐指数は 407 kPa，また，土壌の平均乾燥密度は 1.31 g/cm^3 であった。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 切削深さがけん引抵抗に及ぼす影響

直径 250 mm，厚さ 12 mm のディスクでの，切削深さとけん引抵抗ならびに垂直方向力との関係を図 2.7 に示す。ディスクのけん引抵抗と垂直方向力は，ディスクの切削深さが深くなると増加した。直径が 200 mm と 300 mm のとき，厚さが 6 mm ならびに 9 mm の場合のいずれの実験条件でも同様の傾向であった。切削深さが深くなることにより，刃縁部での土の切断長さが長くなると同時にディスク側面と土との接触面積が増加することにより，摩擦抵抗と切削抵抗が増えるためであると考えられる。

直径 250 mm，厚さ 12 mm ディスクでの実験時の，2本のゲージホイールの転がり抵抗と垂直方向力を図 2.8 に示す。ゲージホイールの転がり抵抗および垂直方向力は，ディスクの切削深さが増加するにつれて減少した。他の実験条件でも同様の傾向であった。

垂直方向力に関しては，図 2.7 に示したように切削深さが増加するにつれて，ディスクに作用する垂直方向力が増加する。また図 2.8 に示したようにゲージホイールに作用する垂直方向力は減少する。つまり，ディスクとゲージホイールで支持していたユニット全体の垂直方

向力のうち、ディスクで分担する割合が増加することになり、ゲージホイールの垂直方向力が減少する。その結果、ゲージホイールの転がり抵抗が減少すると考えられる。

いずれの実験条件でも、切削深さが増加すると図 2.9 に示すように、ディスクのけん引抵抗とゲージホイールの転がり抵抗を合わせたインジェクタユニット全体に作用する全抵抗は増加することが明らかになった。ディスク型スラリーインジェクタのディスクユニットは、作業幅にもよるが 20～30 ユニット装着され、ゲージホイールが 2～4 本であることを考えれば、スラリーインジェクタに作用する全抵抗のうち、ディスクのけん引抵抗が大部分を占めると言える。

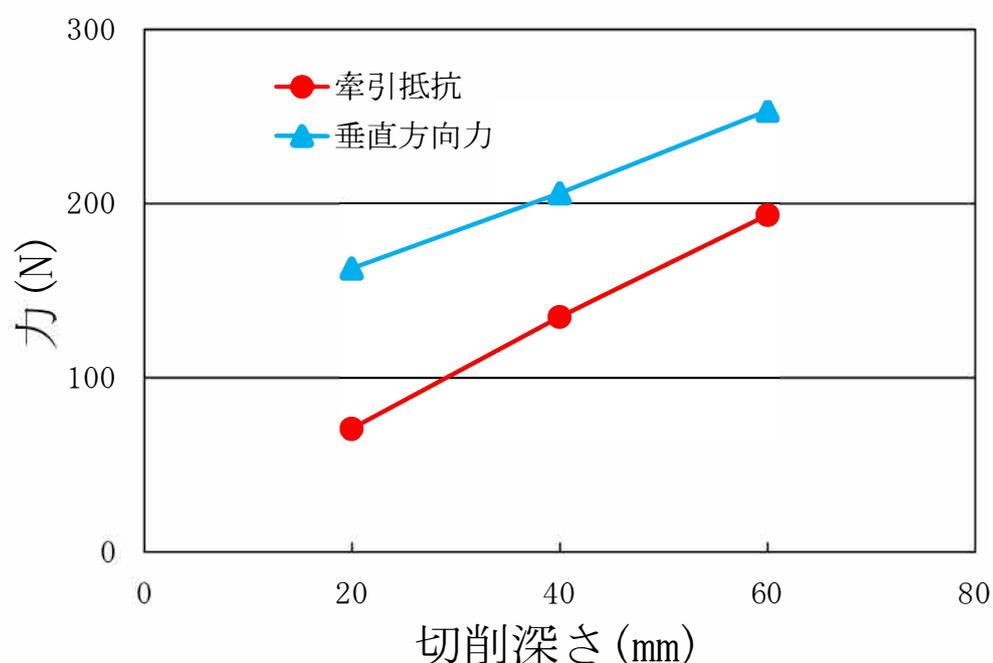


図 2.7 切削深さとディスクに作用する力の関係
(直径 250 mm, 厚さ 12 mm)

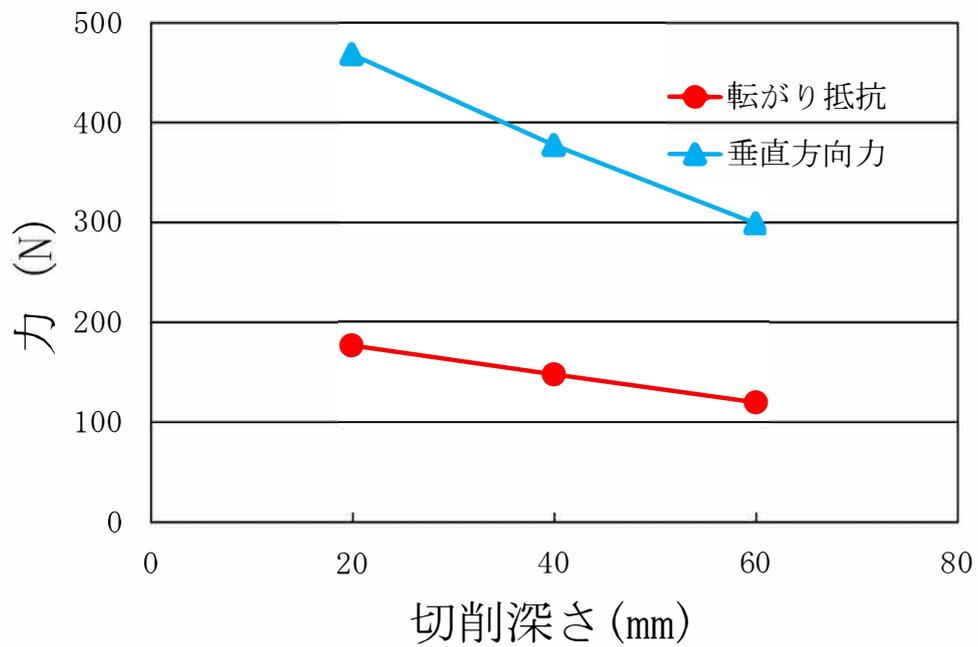


図 2.8 切削深さとゲージホイールに作用する力の関係（直径 250 mm, 厚さ 12 mm）

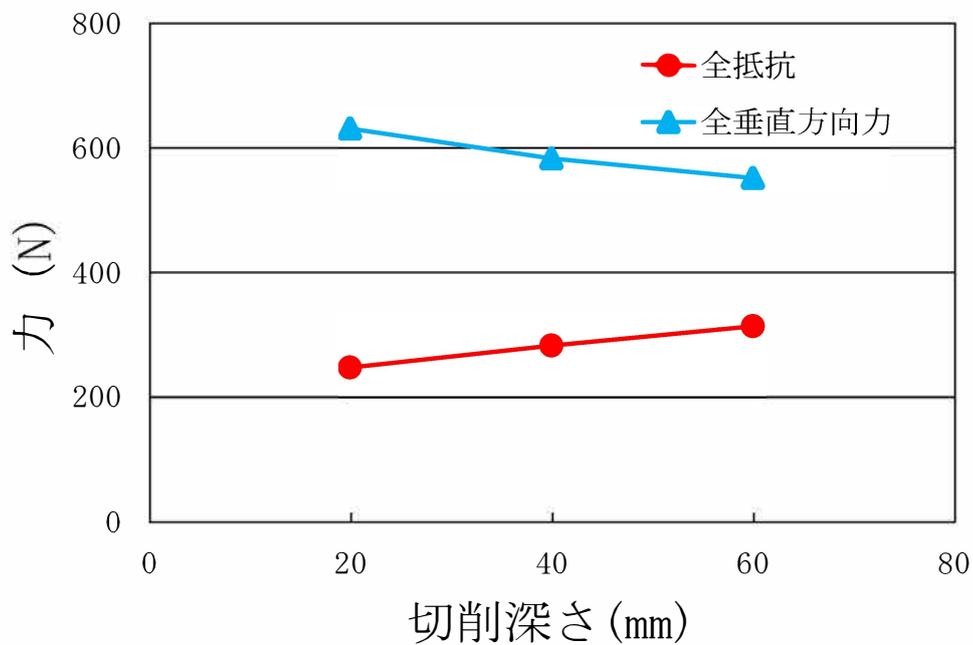


図 2.9 切削深さとユニット全体に作用する力の関係（直径 250 mm, 厚さ 12 mm）

2.3.2 ディスク形状がけん引抵抗に及ぼす影響

2.3.2.1 厚さの影響

図 2.10 に直径 250 mm ディスクでの、厚さの違いによるディスクに作用するけん引抵抗を示す。同じ切削深さに関しては、ディスクの厚さが厚いほど抵抗が大きくなった。切削深さが 60 mm のとき、厚さ 6 mm ディスクのけん引抵抗は 137 N であった。厚さ 9 mm のディスクのけん引抵抗 167 N に対して、約 18.3 % 小さくなった。また、厚さ 12 mm のディスクのけん引抵抗 193 N に対して約 29.3 % 小さくなった。表 2.2 に示すように、直径 200 mm と 300 mm のディスクに関しても同じ傾向となった。これはディスクの厚さが厚いほど作溝する際、ディスク刃縁部は土との接触面積が大きくなり、車軸直下より前方の刃縁部が土を前方へ押しながら作溝するため、けん引抵抗が増加することに起因すると考える。

表 2.2 に示した結果より、切削深さ 60 mm の場合、直径 200 mm で厚さ 6 mm の平板ディスクのけん引抵抗は 149 N であり、厚さ 12 mm の平板ディスクの 241 N より 92 N 小さくなった。作業幅にもよるがディスク型スラリーインジェクタのディスクユニットは 20~30 ユニット装着されている。つまり、30 ユニット装着されているときけん引抵抗を 2760 N 減少することができる。

厚さが減少するとけん引抵抗も減少するが、スラリーを散布する際、スラリーの性状によって、含水率が低い場合や粘性が高いもの、麦わらなどの固形物の混入など

の影響が考えられるので、これらの要因を考慮した適切な作溝幅を検討する必要がある。

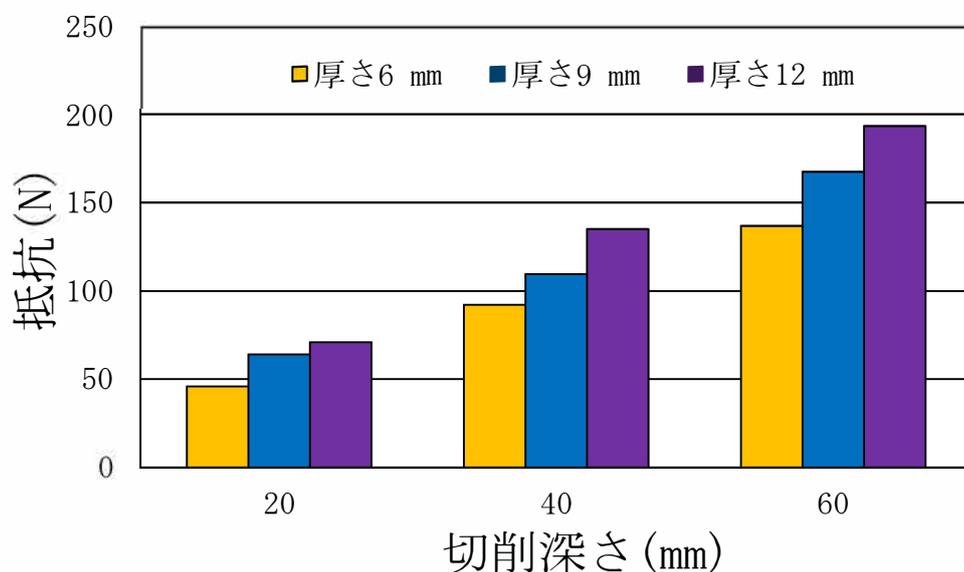


図 2.10 厚さの違いによりディスクに作用するけん引抵抗の変化（直径 250 mm）

表 2.2 厚さと切削深さによるディスクに作用するけん引抵抗の比較

ディスク直径 (mm)	ディスク厚さ (mm)	切削深さ		
		20 mm	40 mm	60 mm
200	6	50.0	104	149
	9	73.5	125	194
	12	96.4	161	241
250	6	45.8	92.1	137
	9	64.0	110	167
	12	70.8	135	193
300	6	36.3	73.4	121
	9	45.8	85.6	137
	12	52.5	106	160

(単位：N)

2.3.2.2 直径の影響

図 2.11 に厚さ 12 mm の平板ディスクでの、直径の違いによるけん引抵抗を示す。同じ切削深さでは、ディスクの直径が大きいかほど抵抗が小さくなった。切削深さが 60 mm の場合、直径 250 mm の平板ディスクのけん引抵抗は 193 N で、直径 200 mm と比較して 20 % 減少した。また、直径 300 mm の平板ディスクのけん引抵抗は 160 N であり、直径 200 mm と比較するとけん引抵抗は 34 % 減少した。表 2.3 に示すように、厚さ 6 mm と 9 mm の平板ディスクに関しても同様の傾向となった。

表 2.3 に示した結果より、切削深さ 60 mm の場合、厚さ 12 mm で直径 300 mm の平板ディスクのけん引抵抗は 160 N であり、直径 200 mm の平板ディスクの 241 N より 81 N 小さくなった。作業幅にもよるがディスク型スラリーインジェクタのディスクユニットは 20~30 ユニット装着されている。つまり、30 ユニット装備されているときけん引抵抗を 2430 N 減少することができる。

同じ切削深さでディスク直径が大きくなると、土がディスク側面を垂直方向へ押す力が一定であると考えた場合、側面の接触面積が増加するため、側面での摩擦抵抗が増加すると考えられる。刃縁部での切削抵抗は、ディスク直径が大きくなると土と接触する刃縁部円弧が長くなるため、単位接地面積で分担するディスクへの法線力が小さくなり、切削抵抗が小さくなると考えられる。以上の結果より、ディスク直径が大きくなると刃縁部と

側面部とを合わせた全抵抗が小さくなるのは側面部での摩擦抵抗の増加よりも刃縁部での切削抵抗の減少が大きいためであると考える。

直径が大きくなると、けん引抵抗は減少するが、ディスクを大きくすることによるインジェクタ全体の重量の増加や材料のコストを考慮して、直径を選定する必要がある。

2.3.1でも述べたが、ディスクの切削深さが深くなると刃縁部の切削抵抗と側面部の摩擦抵抗の増加が考えられる。ディスクで作溝するためには刃で土を切削することは不可避であるため、刃縁部の切削抵抗の低減は困難であると考える。しかし、ディスク側面部の摩擦抵抗は土と側面部が接触しなければ、減少できると考える。従って、ディスクの厚さと直径を考慮した上で、側面部が土と接触しない構造のディスクはインジェクタのけん引抵抗を低減できると考える。

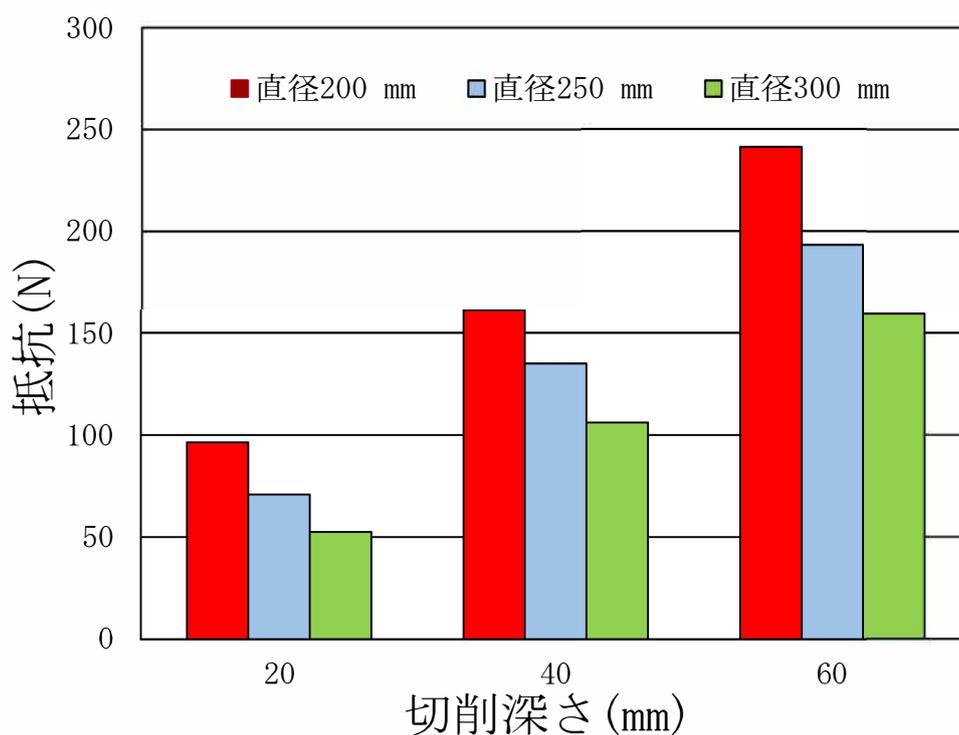


図 2.11 直径の違いによりディスクに作用するけん引抵抗の変化（厚さ 12 mm）

表 2.3 直径と切削深さによるディスクに作用するけん引抵抗の比較

ディスク 厚さ (mm)	ディスク 直径 (mm)	切削深さ		
		20 mm	40 mm	60 mm
6	200	50.0	104	149
	250	45.8	92.1	137
	300	36.3	73.4	121
9	200	73.5	125	194
	250	64.0	110	167
	300	45.8	85.6	137
12	200	96.4	161	241
	250	70.8	135	193
	300	52.5	106	160

（単位：N）

2.4 本章のまとめ

スラリーインジェクタ作業時のトラクタのけん引抵抗減少，作業の高速化，燃料費の低減，作業効率の上昇を目的として，インジェクタユニットに作用するけん引抵抗を低減するために，インジェクタユニットを試作供試し，平板ディスクの直径と厚さ，ならびに切削深さを変えて実験を行った。これより以下の知見を得た。

- 1) ディスクのけん引抵抗は，切削深さが深くなると増加した。これは切削深さが深くなるとディスクで支持する垂直力が大きくなるためである。ゲージホイールの転がり抵抗は，ディスクの切削深さの増加につれて減少した。これはゲージホイールが支持する垂直方向力がディスクに転移し，垂直方向力が減少するためである。
- 2) ディスクの厚さが薄いほどけん引抵抗が小さくなった。これはディスクの厚さが薄くなると作溝する際，刃縁部と土との接触面積が小さくなり，作溝するための切削抵抗が小さくなったためと考えられる。
- 3) ディスクの直径が大きいほど抵抗は小さくなった。これは，直径が大きくなると土と接触する面積が増加し，ディスクの側面に作用する抵抗が増加すると考えられるが，刃縁部が土を切削する長さが増加するために切削抵抗が減少し，ディスク全体

のけん引抵抗が小さくなったと考えられる。

- 4) スラリーインジェクタ使用時のディスクに作用するけん引抵抗を減少するためには、厚さが薄く、直径が大きいディスクが有効であることが明らかとなった。しかし、材料費や重量の増加、あるいはスラリーの性状を考慮した上でディスクの形状を選定することが必要である。
- 5) ディスクの厚さと直径を考慮した上で、ディスク側面が土と接触しない構造とすれば、ディスク側面部での摩擦抵抗を低減できると考える。

以上のように、本章では、切削深さとディスク形状の違いがディスクけん引抵抗へ及ぼす影響について解析した。次に第3章では、ディスクの各部がディスクけん引抵抗発生に及ぼす影響について解析する。

第 3 章 ディスク構造がけん引抵抗に及ぼす影響

3.1 緒言

前章では，草地用ディスク型スラリーインジェクタのけん引抵抗を低減するために，切削深さとディスク形状がけん引抵抗に及ぼす影響を述べた。その中で，ディスクが作溝する時に発生する抵抗は，ディスクの刃縁部と側面部で発生していることを明らかにした。本章では，ディスク型インジェクタに使用される平板ディスクに作用するけん引抵抗を側面部抵抗と刃縁部抵抗を分けて解析を行い，側面部と刃縁部に作用する抵抗の割合を求め，ディスク構造がけん引抵抗に及ぼす影響について検討する。

3.2 ディスク側面部の摩擦の解析

3.2.1 実験装置と実験方法

3.2.1.1 実験装置

実験装置は前章の図 2.3 に示した構造と同じである。ディスク側面部の摩擦抵抗を測定するために，3方向力測定器（テック技販製）を前章で供試したインジェクタユニットの平板ディスクの側面に取付けた。3方向力測定器の主要諸元を表 3.1 に示す。測定器表面の水平方向は X 軸，垂直方向は Y 軸，および横方向は Z 軸となる。3方向力測定器の感知範囲は直径 6 mm であり，感知部

に作用する水平方向力，垂直方向力および横方向力の測定ができる。図 3.1 に 3 方向力測定器の外観を示す。3 方向力測定器は，ディスク側面をフライス盤で加工し，深さ 4.5 mm の溝に埋め込んだ。感知部以外の部分は土と接触しないように，3 方向力測定器感知部の位置に合わせて鉄板に穴をあけ，感知部のみが土と接するように加工した薄い鉄板を取付けた。図 3.2 にディスクでの装着位置，ならびに図 3.3 に測定器の座標系を示す。

ディスクの刃縁部の長さは半径方向で 10 mm であるため，3 方向力測定器は刃縁部内側の側面部に取付け，感知部中心から刃縁部外側までの距離は 20 mm となった。

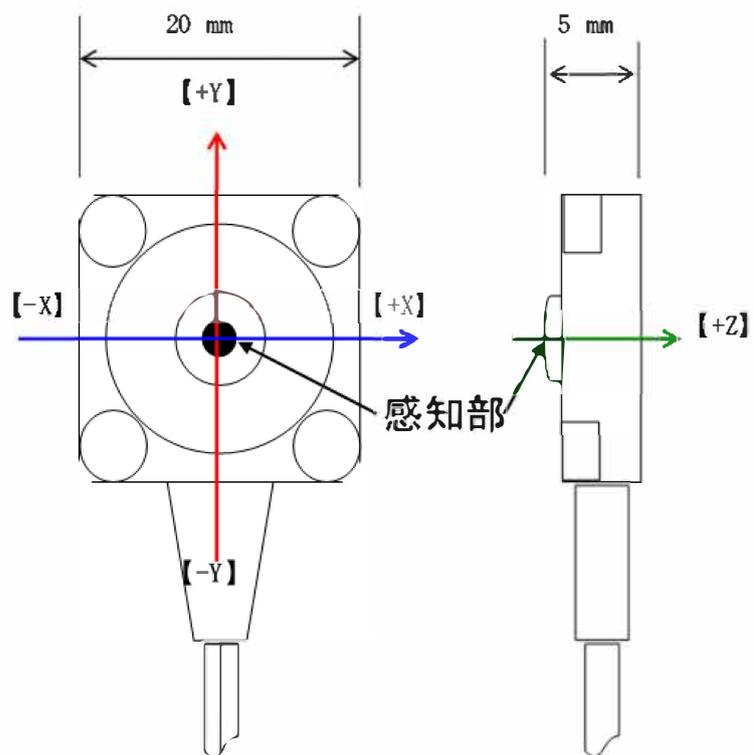
3 方向力測定器がディスク軸の直上を通過する点を 0° として回転角を設定した。なお，ディスクの回転角はパルス装置を用いて検出した。

表 3.1 3 方向力測定器の主要諸元

型式	USL-H5-500N
定格容量	$F_x \cdot F_y$: ± 250 N F_z : $+ 500$ N
許容過負荷	120%
非直線性	$\pm 1\%R0$ 以内
ヒステリシス	$\pm 1\%R0$ 以内
温度補償範囲	10～60℃
推奨印加電圧	1～3V DC
ブリッジ抵抗	$F_x \cdot F_y$: $120 \Omega \pm 5\%$ F_z : $240 \Omega \pm 5\%$



a. 3 方向力測定器外形図



b. 3 方向力測定器寸法図

図 3.1 3 方向力測定器



a. 3方向力測定器取付け位置



b. 拡大図

図 3.2 測定器とディスクの位置関係

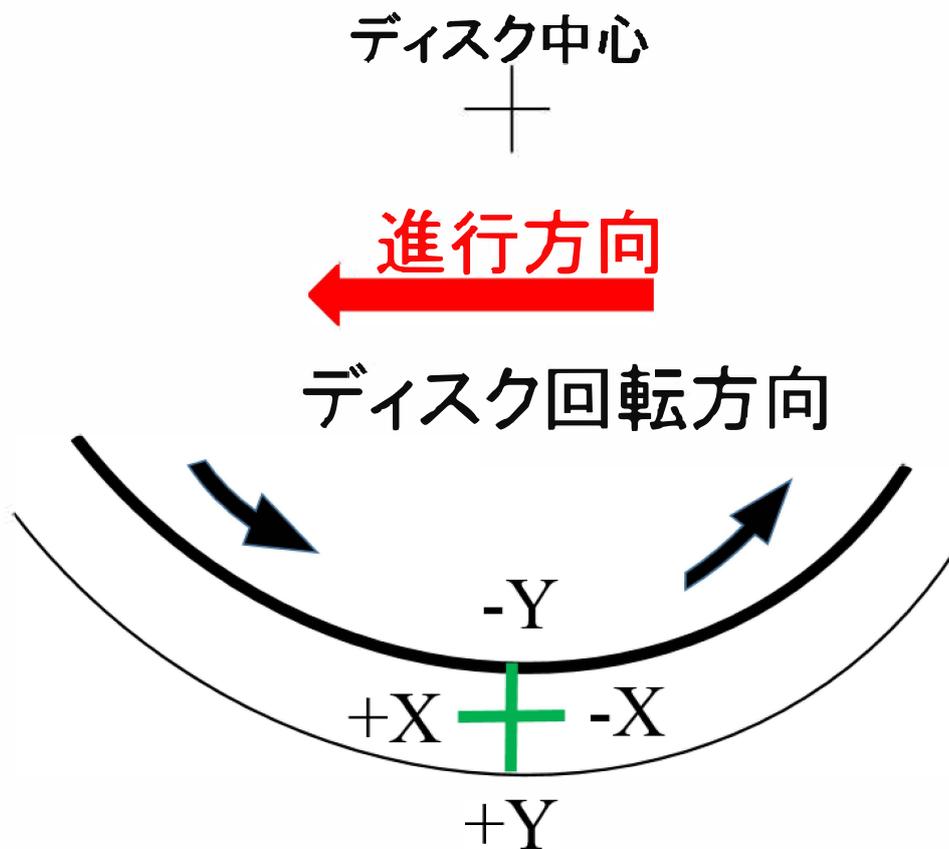


図 3.3 3 方向力測定器の座標系

3 方向力測定器で測定したデータは，テック技販製専用アンプ DSA-03A で増幅した。ひずみをデジタル化にするために，動歪測定装置と A/D 変換器一体型となる共和電業製センサインタフェースのデータロガー PCD-320A を用いた。測定したひずみデータはデジタル化し，計測用パーソナルコンピュータに保存し，解析を行った。

3.2.1.2 実験方法

本実験においてはディスク形状によるけん引抵抗の低減について検討するための基礎実験であるので，測定

データへの外乱の影響を減らすために室内土壌槽で実験を行った。供試ディスクは平板のもので直径は 250 mm , 幅は 9 mm である。切削深さは草地用インジェクタの作溝深さを考慮して 20 mm, 40 mm, 60 mm と 3 段階に設定した。走行速度は土壌槽のウインチの設定の都合上, 実験を通して 0.17 m/s とした。

供試土壌は, 砂 48.0 % , シルト 37.5 % , 粘土 14.5 % で国際土壌学会法によるロームである。土壌は碎土均平後, ローラで鎮圧した。実験中の平均含水率は 12.6 % , 深さ 15 cm までの平均円錐指数は 349 kPa, また, 土壌の平均乾燥密度は 1.33 g/cm³ であった。

3.2.2 実験結果および考察

3.2.2.1 3 方向力測定器の実験データ

3 方向力測定器は実験データに行列係数をかけディスク側面に作用した 3 方向の圧力 P_x, P_y, P_z ならびに P_x, P_y を合成した圧力 P を求めた。図 3.4 は各切深さの 3 方向力測定器が回転軸直上にあるときを回転角 0 ° とし、回転角 90 ° から 270 ° の 3 方向の圧力 P_x, P_y, P_z ならびに P_x, P_y を合成した圧力 P を示したものである。図 3.4 から各切削深さでのディスク側面に取付けた 3 方向力測定器に作用する圧力の大きさとピークが明らかになった。また, 測定器が反応している回転角は, 切削深さの増加とともに広がっていることが分かった。これは切削深さが増加することにより, 3 方向力測定器が土

の中の感知長さが増加したと考えられる。

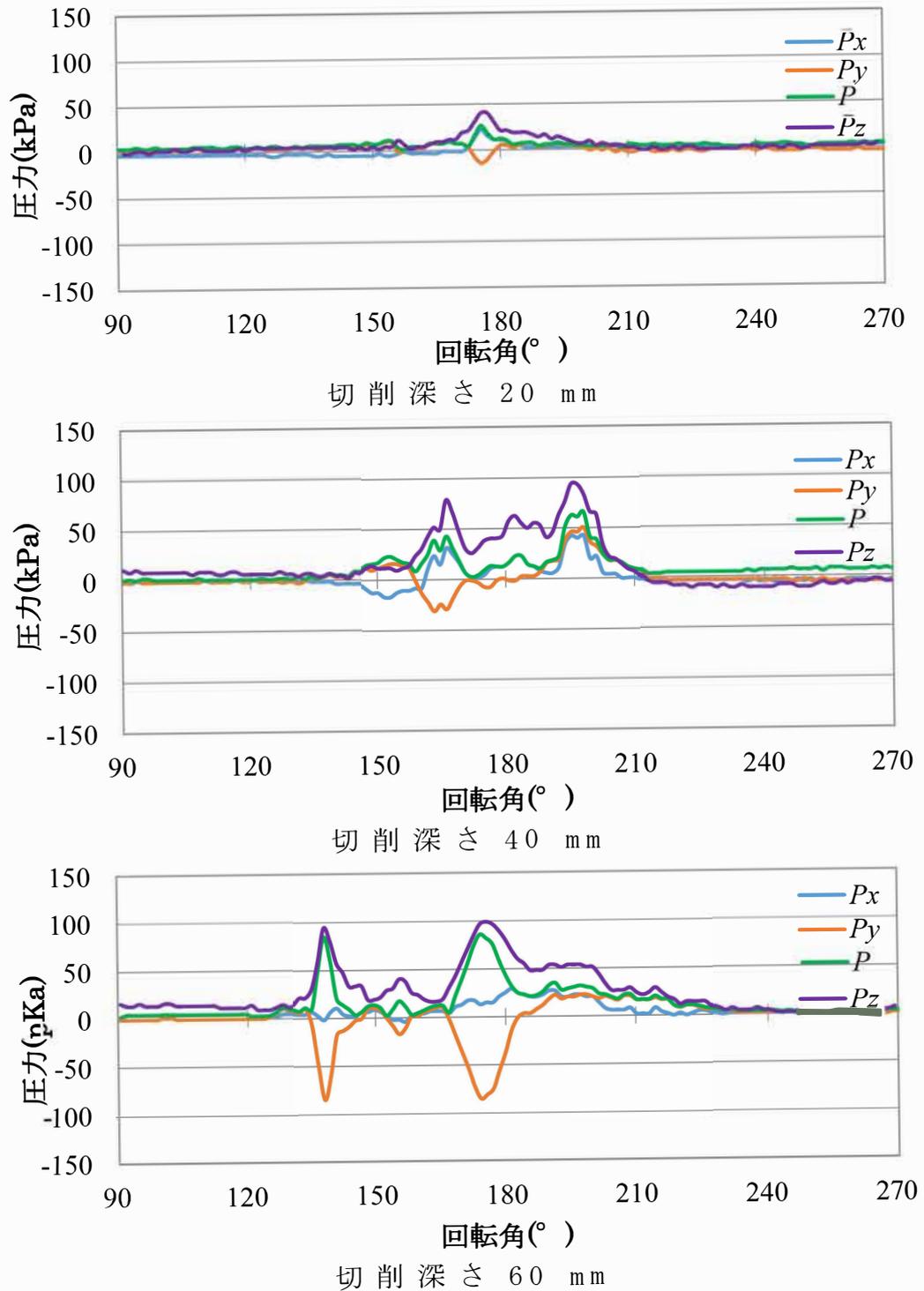


図 3.4 切削深さの増加がディスク側面の圧力に及ぼす影響

3.2.2.2 合力のモデル

3方向力測定器でディスク側面のX軸に作用した圧力は P_x 、Y軸に作用する圧力は P_y となるので、前章実験の力の方向を同じ座標で示すために水平方向圧力 P_h と垂直方向圧力 P_v に変換をした。変換式は以下のとおりである。

$$P_h = P_x \cos \theta + P_y \sin \theta \quad (1)$$

$$P_v = P_x \sin \theta - P_y \cos \theta$$

図3.5に各切削深さの3方向力測定器に作用した P_h 、 P_v および合成した圧力 P が作用した方向を示す。矢印の角度は、測定器が 180° の位置にある時のX軸を 0° の基準として示したものである。図3.5から進行方向に対して逆に大きな力が作用しているのが分かる。この力は摩擦抵抗である。また、すべての切削深さで、ディスクが土中から出るときに発生する下向きの力が確認できる。

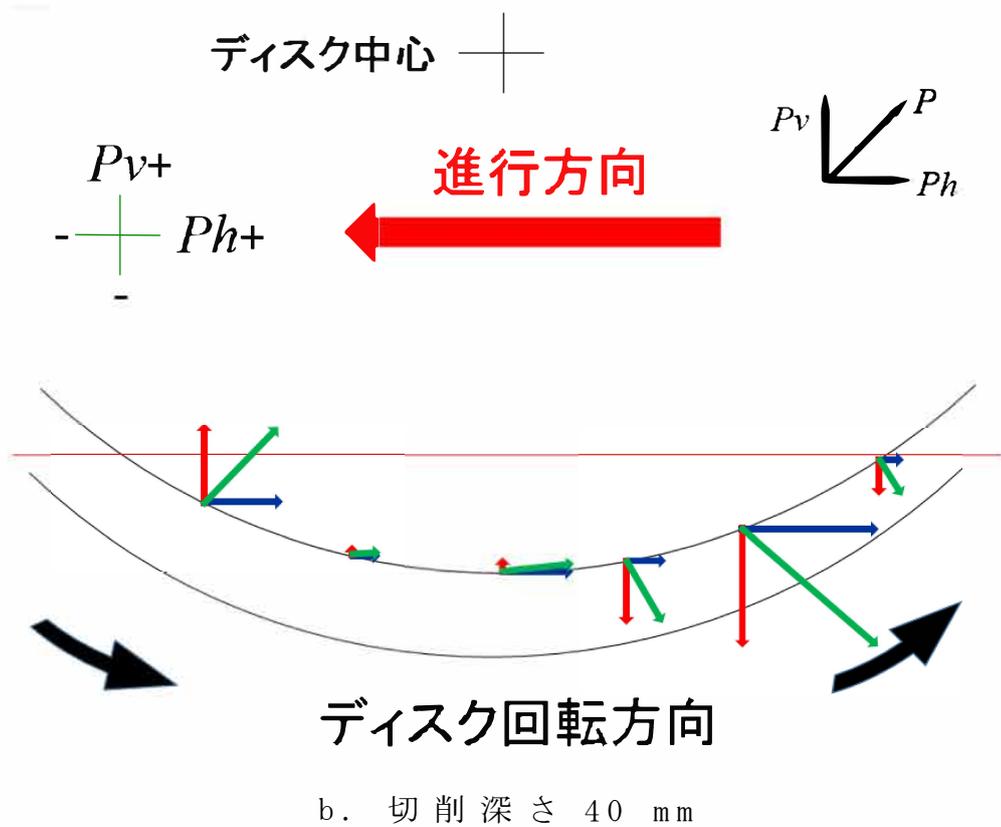
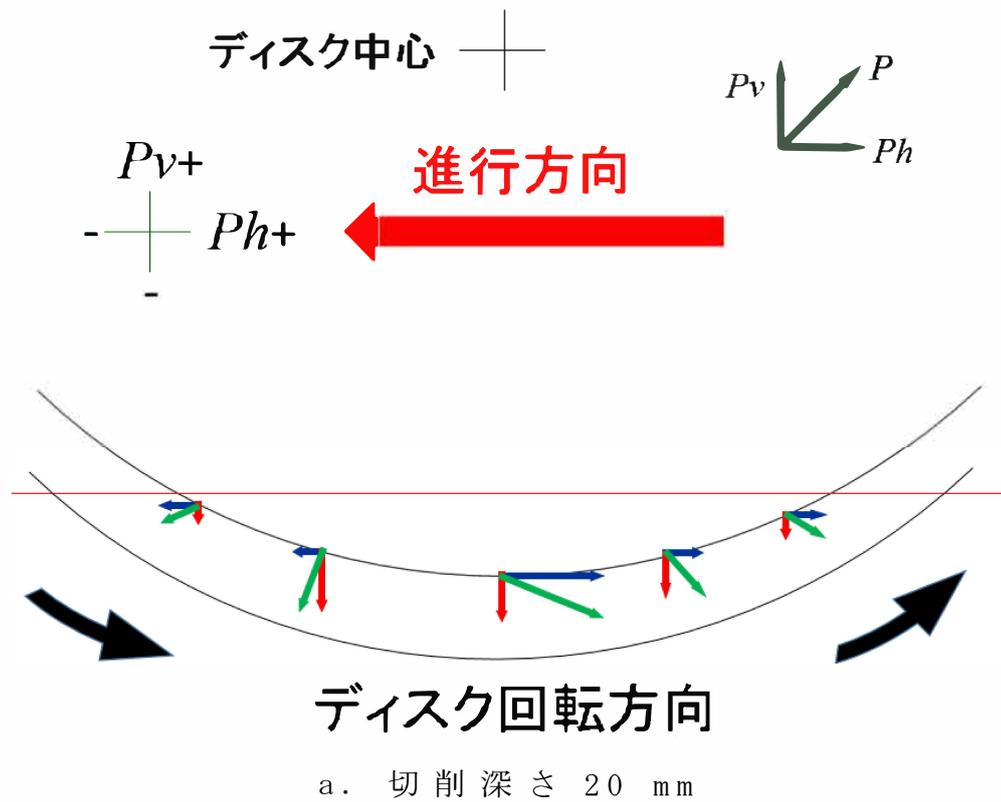
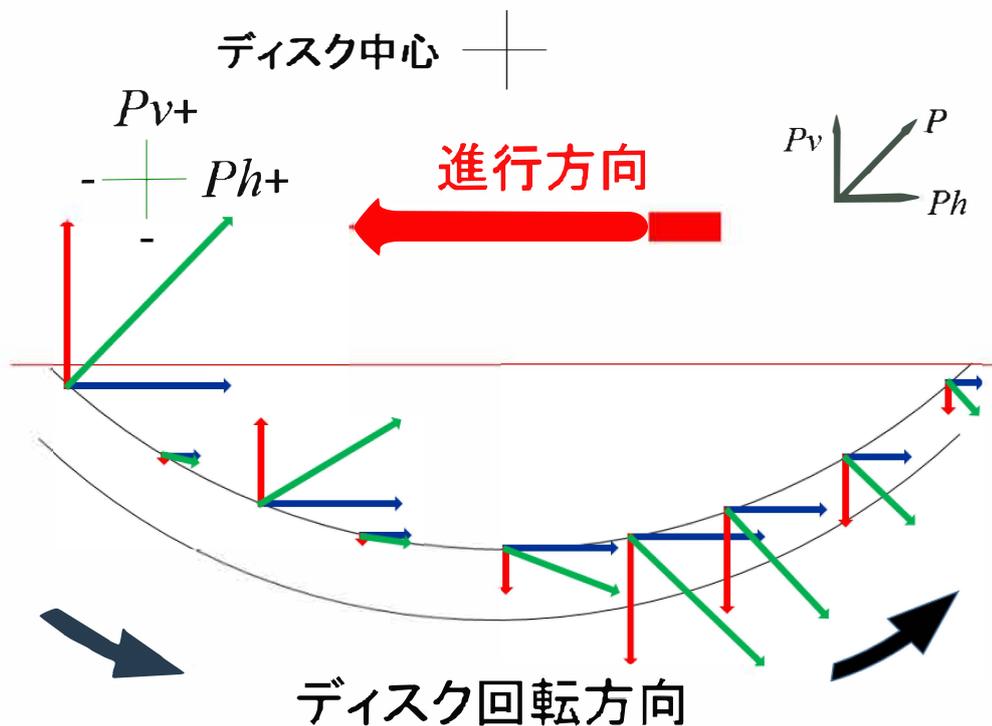


図 3.5 測定器に作用した力の方向の模式図



c. 切削深さ 60 mm

図 3.5 測定器に作用した力の方向の模式図

3.2.2.3 結果および考察

測定された圧力の最大値は，切削深さ 20 mm で約 35 kPa 程度，40 mm で約 106 kPa，60 mm で約 124 kPa となった。深さ 20 mm では，3 方向力測定器の感知部が外周より 20 mm の位置になるため，土と接触する長さが短く，力を感知しなかったと考えられる。これらの力の作用方向を求めると，側面部に作用している圧力は進行方向の逆方向となることが分かった。深さを 20 mm から 40 mm に変化させたときに圧力は増加したが，40 mm から 60 mm での増加ではほとんど変化がなかった。すなわち切

削深さが増加しても，ディスク側面部に作用する単位面積当りの摩擦抵抗の合力の最大値は，あまり変化しないと考えられる。前章の結果により切削深さが増加するとディスクに作用するけん引抵抗が増加する傾向が明らかになったため，ディスク側面に作用する摩擦抵抗の合力の最大値が増加しないことにより，ディスク部を支持している力の割合がディスク側面部よりも刃縁部で大きいと考えられる。

3方向力測定装置によるディスク側面部抵抗測定実験の実験結果で合力を図で示したが，ディスクが接地している一点の軌跡上の力のみを測定したものである。従って，3方向力測定器およびディスクの形状の関係から，側面部に作用する摩擦抵抗の分布を明確に示すことは困難である。そこで，刃縁部の切削抵抗を測定し，得られた切削抵抗を軸部で測定したディスク全体のけん引抵抗から差し引いて，側面部の摩擦抵抗を求めることにした。さらに，この結果よりディスクの側面部と刃縁部に作用する抵抗の割合を求めることが可能となる。

3.3 ディスク刃縁部と側面部抵抗の解析

3.3.1 実験装置と実験方法

3.3.1.1 実験装置

ディスクのけん引抵抗は，ディスクの形状より側面部で発生する摩擦抵抗とディスクの刃縁部で発生する切削抵抗の合計と考えられる。側面部の摩擦抵抗のみを求

めることが困難であるため、刃縁部の切削抵抗を独立して測定することができれば、ディスク全体のけん引抵抗との差を求めることにより、側面部での摩擦抵抗を得ることができる。さらに、刃縁部および側面部でのそれぞれの抵抗の発生状況を明らかにできる。ディスク全体に作用するけん引抵抗は、軸部ロードセルで測定できるが、ディスク刃縁部に作用する 1 回転分の切削抵抗を直接測定することは困難である。そこで刃縁部の抵抗のみを測定するために、感知角度が 30° の扇状の刃縁部測定装置を試作し、実験を行った。

実験装置は前章の図 2.3 に示した構造と同じである。本実験は平板ディスクと側面溝付ディスクを供試した。図 3.6 にディスクの形状を示す。いずれのディスクも刃縁部の長さは半径方向で 10 mm、側面溝付ディスクは側面部を平板より 1.5 mm を薄くした。供試したディスクの直径は 250 mm、厚さ 12 mm である。

ディスク全体に作用するけん引抵抗の測定は軸部ロードセルを供試した。また、刃縁部抵抗を測定するためのロードセル（以下、刃縁部ロードセル）を試作した。図 3.7 に刃縁部測定装置を示す。ディスクの一部を扇状に切断し、ディスク中心部に刃縁部ロードセルを配置した。側面部からの抵抗がロードセルに作用しないように、刃縁部ロードセルの刃縁部以外はディスク側面部より両側を 1.5 mm を薄くしてある。この装置はディスク回転方向への力 F_t 、中心方向への力 F_n を測定できる。図

3.8 に示すように，この装置を平板ディスクの一部として組み込み，一枚の平板ディスクとする。図 3.9 に示すように切断面は測定器が土から受ける外力により，ロードセルがディスクに接触しないように隙間を設けてある。測定器を組み込んだ後に，測定装置両側面には平板ディスクの側面と同じ厚さになるようにカバーを取付けた。このカバーは測定器とは接触しないように設置してある。

測定装置はディスク回転時にロードセルに自重が作用するため，測定値に誤差が生じる。この誤差はディスク 1 回転を周期とした振動としてとらえ，離散フーリエ展開により，この振動の近似式を求め，測定データを補正する。

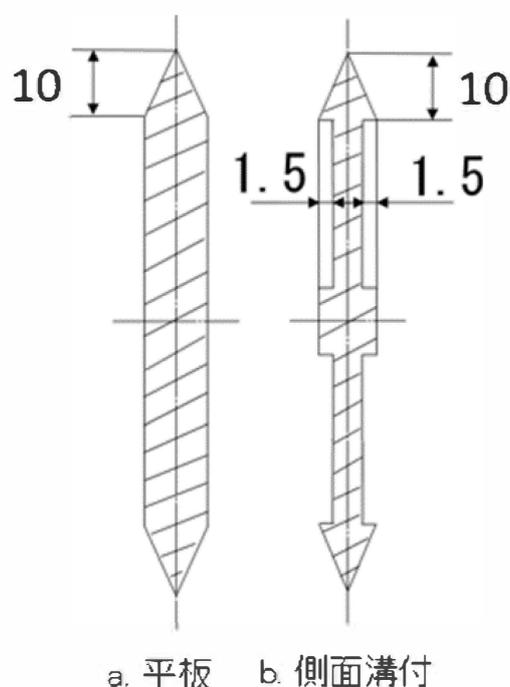


図 3.6 供試ディスク形状



图 3.7 刃缘部测定装置



图 3.8 刃缘部测定装置组立图



図 3.9 刃縁部測定装置組立図の拡大図

3.3.1.2 自重の補正

本測定器の運動は単一の回転運動であり，単一周期 ωt で示すことができる。よって一般式は，

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (2)$$

となる。以上の式から補正式を求め測定値を補正する。

補正後の回転方向力と中心方向力は水平方向力である切削抵抗と垂直方向力に変換した。刃縁部測定装置の感知角度は 30° のため，位相を 30° ずらし 1 回転分合成することにより，ディスク一周分の刃縁部での切削抵抗を求める。これをディスク全体のけん引抵抗と比較，側面部の摩擦抵抗を算出した。

30° の刃縁部測定装置の精度を求めるために，同じ

くディスク側面部より 1.5 mm を薄くした側面溝付ディスクを試作し，インジェクタユニットに取付け，軸部ロードセルを用いてけん引抵抗を測定した。側面溝付ディスクは側面部が平板ディスクより，両面をそれぞれ 1.5 mm を薄くしたので，側面部での摩擦抵抗がほとんど発生しないと考えられる。従って，軸部ロードセルで測定した抵抗は，ほぼ全てが刃縁部での切削抵抗と考えられる。この値と，側面溝付ディスクと 30 ° の刃縁部測定装置一周分合成した値の差が小さければ，30 ° の刃縁部測定装置の精度が高いと言える。

軸部ロードセルと刃縁部測定装置で測定した実験データは，第 2 章の実験に供試したインターフェース PCD-300A でデジタル値に変換し，計測用パーソナルコンピュータに保存し，解析を行った。

3.3.1.3 実験方法

本実験は供試土壌の入った室内土壌槽で行った。切削深さは 30 ° の刃縁部測定装置を考慮して 20 mm，40 mm と 2 段階に設定した。走行速度は土壌槽のウインチの設定の都合上，実験を通して 0.17 m/s とした。測定されたひずみと各ロードセルの校正係数より，刃縁部測定装置のロードセルで測定した刃縁部での回転方向力，中心方向力を求めた。さらに，これらの力から水平方向力と垂直方向力を求めた。

軸部のロードセルを用いて，刃縁部測定装置を取付け

た平板ディスク，側面溝付ディスクおよびゲージホイールに作用する水平方向力および垂直方向力を求めた。

供試土壌は，砂 48.0 %，シルト 37.5 %，粘土 14.5 % で国際土壌学会法によるロームである。土壌は砕土均平後，ローラで鎮圧した。実験中の平均含水率は 12.7 %，深さ 15 cm までの平均円錐指数は 396 kPa，また，土壌の平均乾燥密度は 1.29 g/cm³ であった。

3.3.2 実験結果および考察

3.3.2.1 測定データの補正，変換および合成

(1) フーリエ展開による補正式

自重による測定値の誤差を補正するための補正式は式 (2) の一般式より 30 ° の刃縁部測定装置の補正は，式 (3) として求められた。

$$F_n \quad f(\theta) = 0.27\sin\theta + 2.66\cos\theta - 2.58 \quad (3)$$

$$F_t \quad f(\theta) = 1.65\sin\theta - 0.08\cos\theta + 0.22$$

ここに， F_n は中心方向への力， F_t はディスク回転方向への力，また， θ は回転角である。補正後 F_t ， F_n 共に，ロードセル接地前後の回転角 100 ° ~ 300 ° で 0 点からのずれが小さくなった。

(2) 水平方向力 F_h ，垂直方向力 F_v への変換およびディスク 1 回転分の合成

30° の刃縁部測定装置で測定された力はディスク回転方向への力 F_t ，中心方向への力 F_n なので，刃縁部の切削抵抗および垂直方向力を求めるために，水平方向力 F_h ，垂直方向力 F_v へ変換する必要がある。 F_h ， F_v はディスク回転角により式 (4) として求められた。

$$\begin{aligned} F_h &= F_t \cos \theta + F_n \sin \theta \\ F_v &= F_t \sin \theta - F_n \cos \theta \end{aligned} \tag{4}$$

図 3.10 に切削深さ 40 mm の場合の水平方向力 F_h ，垂直方向力 F_v への変換例を示す。

刃縁部測定装置の感知角度は 30° であるため，測定データを 30° の位相差により，1 回転分測定値を抜き出して合成した。図 3.11 に合成した結果の一例を示す。図 3.12 に軸部ロードセルで測定した水平方向力と垂直方向力を示す。軸部ロードセルで測定した値は図 3.11 に示した合成値よりも振動が小さい。これは刃縁部ロードセルがディスクの一部を切断し，感知部とディスクの間に 1 mm の隙間があるため，データに誤差が含まれるためである。この誤差が含まれているが，360° 合成した結果より平均値を求め，刃縁部に作用する切削抵抗とした。

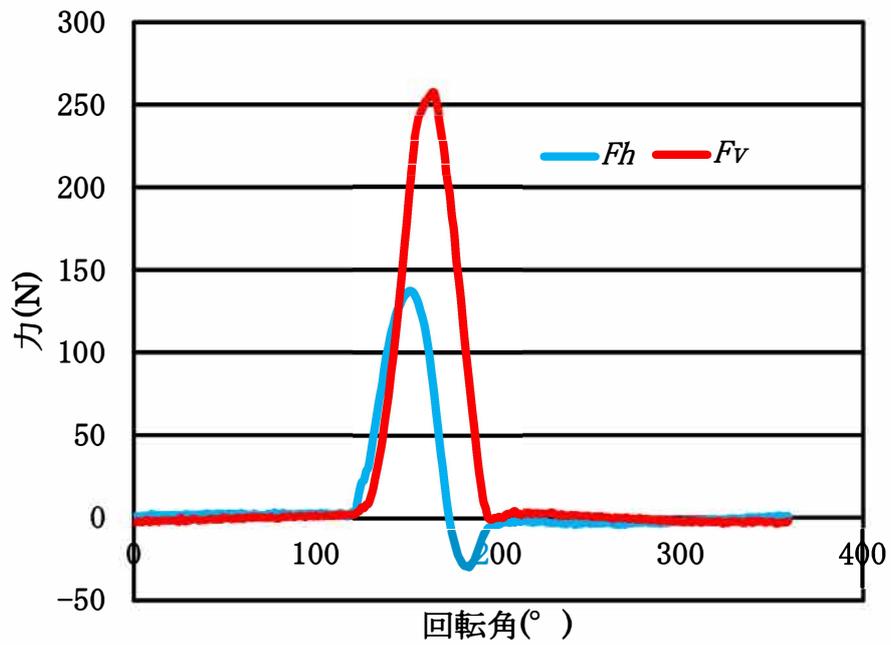


図 3.10 水平方向力と垂直方向力へ変換
(切削深さ 40 mm)

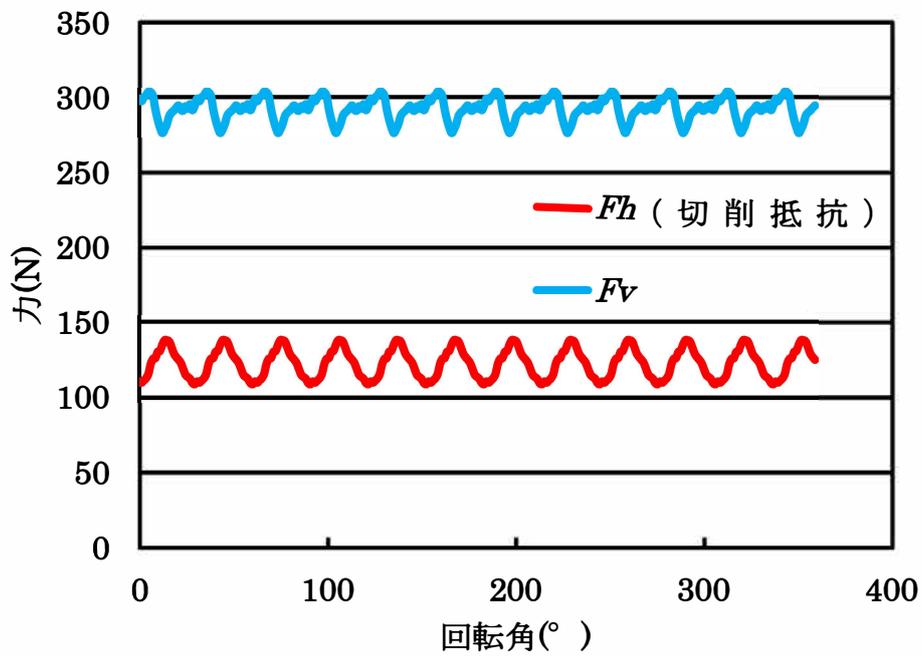


図 3.11 水平方向力と垂直方向力 1 回転分合成
(切削深さ 40 mm)

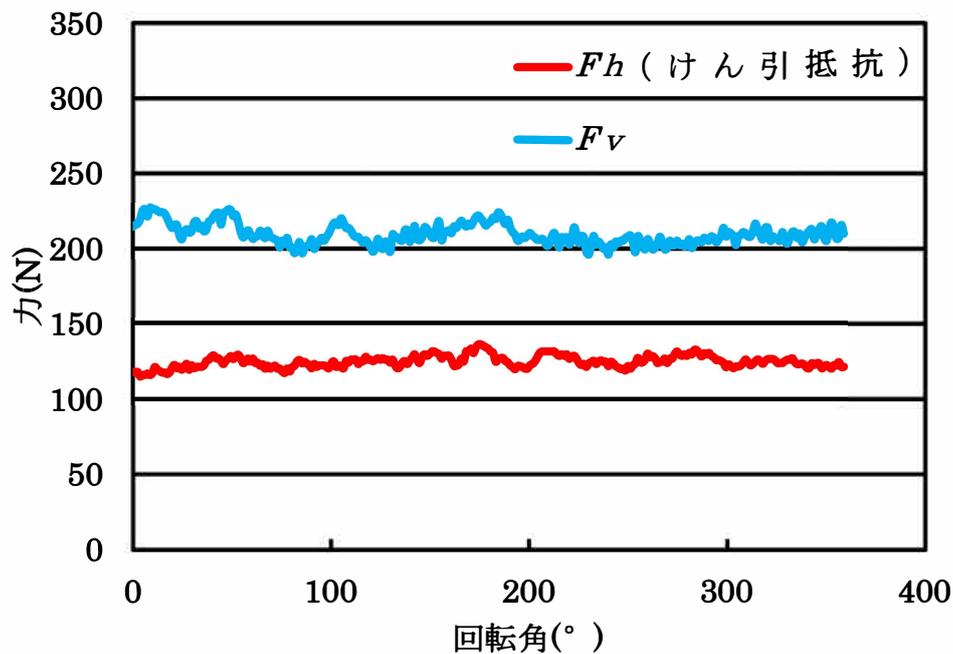


図 3.12 軸部ロードセルで測定した水平方向力と垂直方向力（切削深さ 40 mm）

3.3.2.2 刃縁部切削抵抗と側面溝付ディスクけん引抵抗の比較

刃縁部の切削抵抗を合成後， 30° の刃縁部測定装置の精度を確かめるために，刃縁部の測定値を1回転合成した切削抵抗の平均値と側面溝付ディスク軸部ロードセルで測定したけん引抵抗の平均値を図 3.13 に示す。切削深さ 20 mm では，合成値が 69 N，軸部ロードセルでの測定値は 68 N，また 40 mm では測定値がいずれも 125 N となり，刃縁部測定装置で測定し合成した切削抵抗は，側面溝付ディスク軸部ロードセルで測定したけん引抵抗とほぼ同じとなった。これは側面溝付ディスクが側面部より 1.5 mm を薄くしたため，側面部での摩擦抵

抗がほぼ発生せず，すなわち軸部ロードセルで測定した抵抗はすべて刃縁部での切削抵抗と考えられる。

また， 30° の刃縁部測定装置は，ディスク本体との 1 mm の隙間があり，データに誤差が含まれるものの，精度が高いと言える。従って， 30° の刃縁部測定装置により刃縁部に作用する切削抵抗を，独立して測定することが可能であると判断する。

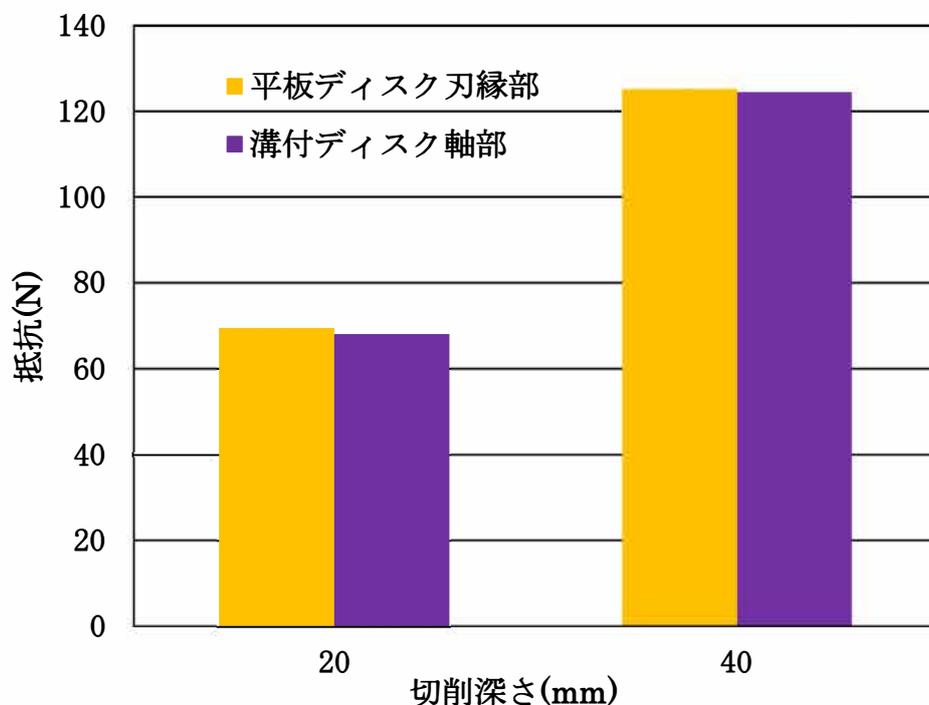


図 3.13 刃縁部切削抵抗と側面溝付ディスク牽引抵抗の比較

3.3.2.3 刃縁部切削抵抗と平板ディスクけん引抵抗の比較

図 3.14 に，刃縁部切削抵抗と軸部ロードセルで測定したディスク全体のけん引抵抗を示す。切削深さ 20 mm

の時，軸部ロードセルで測定したディスク全体に作用するけん引抵抗は 94 N であり，これに対し刃縁部の切削抵抗は 69 N であった。従って，切削抵抗はけん引抵抗の中の約 73 % である。すなわち，27 % は側面部での摩擦抵抗であることがわかる。切削深さが 40 mm の時，切削抵抗はけん引抵抗の中の約 80 % となり，側面部での摩擦抵抗は 20 % であった。

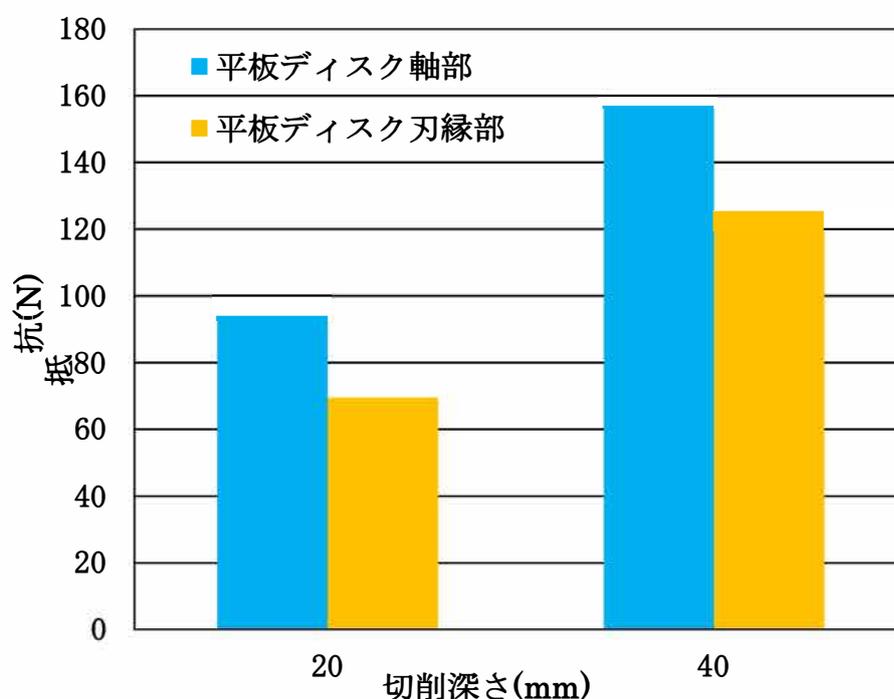


図 3.14 刃縁部切削抵抗と平板ディスク牽引抵抗の比較

3.3.2.4 結果および考察

平板ディスクのけん引抵抗は，約 80 % 以上は刃縁部での切削抵抗となり，約 20 % は側面部での摩擦抵抗である。インジェクタのけん引抵抗を削減するために，刃縁部の切削抵抗と側面部の摩擦抵抗両方減少する必要

があると考えられる。しかし、刃縁部はディスクが作溝およびインジェクタを支持するための重要な部分であるため、刃縁部の切削抵抗の低減が困難である。刃縁部の切削抵抗の低減のためには、刃縁部構造の改良や抵抗が小さい材料の開発が望まれる。刃縁部に対して側面部の摩擦抵抗の低減には、本実験で利用したような側面部を薄くした側面溝付ディスク、あるいはディスクの側面部が土と接触しにくい構造とすれば、ディスクのけん引抵抗を約 20 % 低減できる。

3.4 本章のまとめ

スラリーインジェクタのけん引抵抗の減少と作業効率の向上を目的として、インジェクタユニットを試作供試し、平板ディスクに作用するけん引抵抗を側面部摩擦抵抗と刃縁部切削抵抗を独立に計測することによって、ディスク側面部と刃縁部に作用する抵抗の割合を明らかにした。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) 3 方向力測定装置により、ディスク側面部に作用する単位面積当たりの摩擦抵抗を測定することができた。切削深さが増加しても、ディスク側面部に作用する単位面積当たりの摩擦抵抗の合力の最大値はあまり変化しない。
- 2) 本実験で試作した 30 ° の刃縁部測定装置により、平板ディスク刃縁部に作用する切削抵抗を切削深

さ 40 mm まで独立に測定することができた。

- 3) 平板ディスクのけん引抵抗のうち，刃縁部の切削抵抗が最も多く，約 80 % を占め，側面部の摩擦抵抗が約 20 % を占めた。抵抗割合は刃縁部の方が高い。
- 4) ディスク刃縁部は作溝やインジェクタ重量を支持するため不可欠な部分なので，刃縁部の切削抵抗低減が困難と考え，刃縁部構造の改良や抵抗が小さい材料の開発が望まれる。
- 5) 側面部の摩擦抵抗の低減は，側面部が土の接触しにくい構造とすれば可能であり，ディスクけん引抵抗を約 20 % 低減できる可能性がある。

以上より，平板ディスクのけん引抵抗の発生機構と分布状況が明らかになり，ディスク側面部の摩擦抵抗低減によってインジェクタのけん引抵抗低減に効果的であることを示した。

第 4 章 側面溝付ディスクと平板ディスクの けん引抵抗の比較

4.1 緒言

前章では，平板ディスクに作用するけん引抵抗の発生機構と分布状況を解析した。ディスク側面部の摩擦抵抗低減によって，インジェクタのけん引抵抗低減に効果的であることが明らかになったので，本章は側面溝付ディスクを供試してけん引抵抗を測定し，平板ディスクのけん引抵抗と比較し，けん引抵抗がどの程度低減できるのかについて検討する。

4.2 実験装置と実験方法

4.2.1 実験装置

実験装置は第 2 章の図 2.3 に示した構造と同じである。供試した平板ディスクおよび側面溝付ディスクは刃縁部切削抵抗の測定実験を基づき，直径 250 mm，厚さ 12 mm で，前章の図 3.6 に示したディスクの形状と同じものを用いた。いずれのディスクも刃縁部の長さは半径方向で 10 mm，側面溝付ディスクは，側面部両側で平板ディスクより 1.5 mm 薄くした。ディスク全体に作用するけん引抵抗の測定は，軸部ロードセルを供試した。軸部ロードセルの測定原理は第 2 章 2.2.1.2 に供試したロードセルと同じである。

軸部ロードセルで測定した実験データは，第 2 章の実

験に供試したインターフェース PCD-300A でデジタルデータに変換，計測用パーソナルコンピュータに保存し，解析を行った。

4.2.2 実験方法

本実験は，供試土壌の入った室内土壌槽で行った。切削深さは草地用インジェクタの作溝深さを考慮して 20 mm，40 mm，60 mm と 3 段階に設定した。走行速度は土壌槽のウインチの設定の都合上，実験を通して 0.17 m/s とした。

供試土壌は，砂 48.0 %，シルト 37.5 %，粘土 14.5 % で国際土壌学会法によるロームである。土壌は砕土均平後，ローラで鎮圧した。実験中の平均含水率は 11.5 %，深さ 15 cm までの平均円錐指数は 349 kPa，また，土壌の平均乾燥密度は 1.24 g/cm^3 であった。

4.3 実験結果および考察

図 4.1 に平板ディスクと側面溝付ディスクに作用するけん引抵抗を示す。側面溝付ディスクに作用するけん引抵抗は，平板ディスクと比較約 10 % 程度減少した。この減少した 10 % の抵抗は，第 3 章の結果より側面部での摩擦抵抗の水平成分である。

第 3 章の結果から，側面部に作用する摩擦抵抗はディスク全体のけん引抵抗の約 20 % となることを示したが，今回の実験結果は 10 % の差であった。この差の発生原

因としては、ディスク側面に溝があるので、土壌に入るとき側面部の土との摩擦が減少し、平板ディスクより設定切削深さ以上に沈下しやすく、実際の切削深さが平板ディスクより深くなったため、側面溝付ディスク刃縁部に作用する切削抵抗が増加したと考えられる。これにより、側面溝付ディスクに作用するけん引抵抗が平板ディスクと比較して、抵抗の減少が小さくなったと考えられる。

以上の結果より、側面溝付ディスクを供試し、同じ形状の平板ディスクと比較、けん引抵抗が約 10 % 低減できることが明らかになった。また、側面溝付ディスクは設定切削深さ以上に沈下しないことができれば、第 3 章に示した結果より、けん引抵抗を 20 % 低減することが期待できると考えられる。

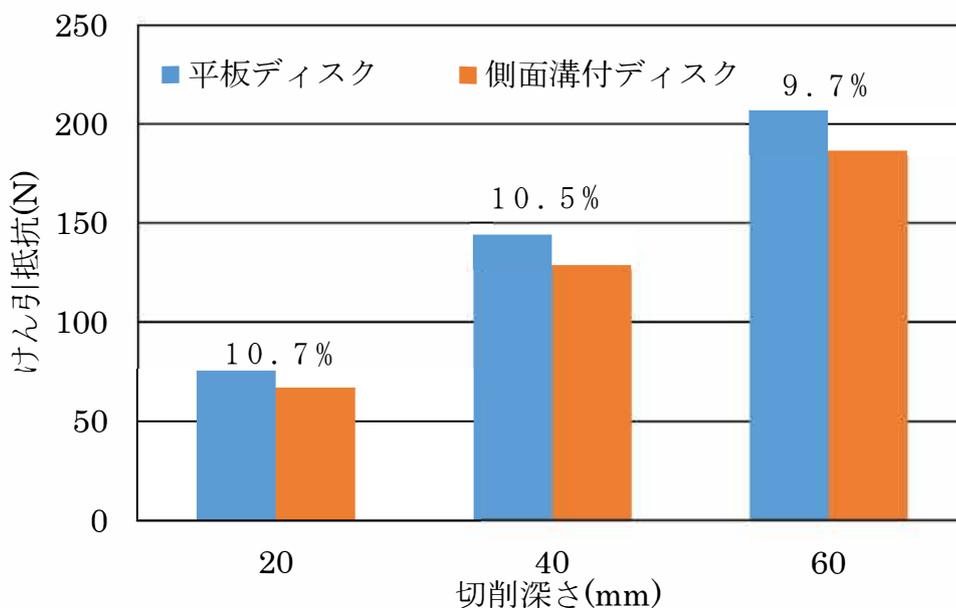


図 4.1 平板ディスクと側面溝付ディスクに作用するけん引抵抗の比較

4.4 本章のまとめ

ディスク型スラリーインジェクタのけん引抵抗を減少し，作業効率の上昇を目的として，平板ディスクと側面溝付ディスクに作用するけん引抵抗を比較することにより，供試した側面溝付ディスクのけん引抵抗を低減できるかについて検討した。その結果，以下のような知見を得た。

- 1) 供試した側面溝付ディスクは一般的に使用されている平板ディスクと比較すると，けん引抵抗を約10%低減できることができた。これは側面溝付ディスクの側面部で発生する摩擦抵抗が，平板ディスクより少なくなったためと考えられる。
- 2) 本実験は第3章で得られた20%程度低減可能であるという結果と比較すると，10%程度の低減となった。この原因は，側面溝付ディスクが側面部に溝を付けたため，設定切削深さ以上沈下しやすくなり，刃縁部に作用する切削抵抗が増加したと考えられる。
- 3) 側面溝付ディスクは設定切削深さ以上に沈下しない構造に改良できれば，けん引抵抗が20%減少することが期待できる。

以上より，ディスクの側面部に溝を付けることにより，側面部が土との接触が減少することができ，けん引抵抗

の低減に有効であることを明らかにした。

第 5 章 総 括

北海道に適したインジェクタの開発および導入のために、インジェクタに作用するけん引抵抗の低減を目的として、草地用ディスク型スラリーインジェクタユニットを試作し、ディスクに作用するけん引抵抗の発生要因、分布状況および低減方法についての動力的解析を行った。

5.1 切削深さとディスク形状がけん引抵抗に及ぼす影響（第 2 章）

ディスクの形状の違いと切削深さの変化によりディスクけん引抵抗に及ぼす影響を解析するために、厚さ 6, 9, 12 mm, 直径 200, 250, 300 mm の計 9 種類の平板ディスクを用いて、切削深さを 20 mm, 40 mm, 60 mm と 3 段階に設定し、ローム土壌で実験を行った。けん引抵抗は軸部ロードセルをディスクとフレーム間に装着し、測定した。その結果、ディスクのけん引抵抗は切削深さが深くなると増加することが明らかとなった。また、ディスクの厚さが薄いほどけん引抵抗が小さくなり、切削深さ 60 mm のとき、直径 250 mm, 厚さ 6 mm のディスクのけん引抵抗は厚さ 12 mm のものに対して 29 % 小さくなった。また、ディスクの直径は大きいほど抵抗が小さくなり、切削深さ 60 mm のとき、厚さ 12 mm, 直径 300 mm のディスクのけん引抵抗は直径 200 mm のものより

34 % 減少した。

5.2 ディスク構造がけん引抵抗に及ぼす影響（第3章）

ディスクに作用するけん引抵抗は側面部で発生する摩擦抵抗と刃縁部で発生する切削抵抗と考え、ディスク側面部の摩擦抵抗の発生状況を明らかにするために、3方向力測定器をディスク側面に装着して切削深さを変えて実験を行った。その結果、ディスク側面部の一点に作用する摩擦力は切削深さが増加しても、最大値は124 kPa程度で変化は小さいため、切削深さが大きくなり、側面部の接触面積が増加するとそれに伴って大きくなると推察された。さらに、切削抵抗と摩擦抵抗の発生状況を詳細に解析するために、直径250 mm、厚さ12 mmのディスク円周の30°分の刃縁部抵抗を測定し、ディスク刃縁部のみの切削抵抗を計測可能である刃縁部測定装置を開発した。この装置より切削抵抗と摩擦抵抗を分離して計測可能となり、切削深さ20 mm、40 mmの場合には、平板ディスクのけん引抵抗は、刃縁部の切削抵抗がディスク全体の約80%、側面部の摩擦抵抗が約20%となることを明らかにした。ディスク刃縁部は作溝やインジェクタ重量を支持するため不可欠な部分なので、刃縁部の切削抵抗低減よりも側面部の摩擦抵抗20%を低減可能であることを示した。

5.3 側面溝付ディスクと平板ディスクのけん引抵抗の比較（第4章）

ディスク側面部の摩擦抵抗低減によってインジェクタのけん引抵抗低減に有効であるので、ディスク側面が土と接触しない側面溝付ディスクを試作し、平板ディスクとのけん引抵抗の比較を行った。その結果、供試した側面溝付ディスクは平板ディスクより、けん引抵抗を約10%低減できることが明らかになった。刃縁部測定装置の実験結果により側面部が土と接触しにくい構造であれば、ディスクけん引抵抗が約20%を低減できると考えたが、10%の低減となった。この原因は、側面溝付ディスクが側面部に溝が付いていたため、摩擦力が低減することで、垂直方向の支持力が減少し、設定切削深さ以上に沈下しやすくなり、刃縁部に作用する切削抵抗が増加したと考えられる。側面溝付ディスクは設定切削深さ以上に沈下しない構造に改良できれば、けん引抵抗が20%減少することが期待できる。以上の結果より、ディスクの側面部に溝を付けることにより、けん引抵抗の低減に有効であることを明らかにした。

5.4 結語

以上、北海道に最適なインジェクタを開発および導入するために、ディスク型スラリーインジェクタの動力学的解析を行い、けん引抵抗に関して、ディスクの形状については厚さを薄くし、直径を大きくすると抵抗が低減

できることを明らかにした。さらに，ディスクの抵抗は刃縁部による切削抵抗と側面部による摩擦抵抗から構成されており，その割合がおよそ 4 : 1 となることを解明した。また摩擦抵抗の発生を低減するためには，ディスク側面を溝付にすることで全抵抗の 10 % を低減することが可能であることを示し，インジェクタディスクの設計指針と基礎データを提供した。

謝 辞

本研究論文は、博士課程の学位論文として、岩手大学大学院連合農学研究科生物環境科学専攻（帯広畜産大学所属）博士課程在学中に行われたものである。

本研究の遂行と論文を作成するにあたり、帯広畜産大学地域環境学研究部門地域環境工学分野の岸本正教授には主指導教官として、研究計画から研究装置、研究方法、分析方法および本研究論文の作成まで、一から終始懇切丁寧に御指導をいただき、心より深甚な感謝を申し上げます。岸本先生には学部から今日に至るまで終始暖かい御指導と御鞭撻を賜りました。学業生活の面などでもたくさんの面倒を見ていただき、深く感謝しております。学部からの9年間、知識だけではなく、研究者としての生き方についても多くのことを学ばせていただき、私にとっての生涯の宝ものとなりました。

また、帯広畜産大学地域環境学研究部門地域環境工学分野の佐藤禎稔教授には学部から大変お世話になり、いつも暖かい御指導と御鞭撻を賜りました。心から感謝しております。

本研究の取りまとめにあたり、終始懇切丁寧に御指導と論文の御校閲をいただいた岩手大学農学部農学生命課程の武田純一教授、弘前大学農学生命科学部園芸農学科の張樹槐教授には厚くお礼を申し上げます。

本研究の実験装置の立案や製作にあたり、御協力をい

ただいた帯広畜産大学の機械実習工場で技術を担当している飯島和司氏にお礼を申し上げます。さらに，本学在学中に本研究を御協力いただいた研究室の邵明亮君，岸川沙織さん，高橋昂志君，伊藤稔嗣君，古川尋海君をはじめ研究室の後輩に対して深く感謝の意を表します。

さらに，在学中奨学金をいただいた日本政府文部科学省に深く感謝しております。

最後に，日本に留学してから，お世話になった元専修大学北海道短期大学の工藤正義教授に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 清水徹朗, 1999. 畜産環境問題の現状と課題. 農林金融, 農業再編のカギを握る持続型農業, 45-46.
- 2) 松田従三, 2001. ヨーロッパ諸国の家畜ふん尿処理. 北畜会報 43 : 11-17.
- 3) 日本農林水産省, 2012. 食料・農業・農村白書(平成23年度), 268-269.
- 4) 日本農林水産省, 2014. 畜産をめぐる情勢, 1.
http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kikaku/lin/l_hosin/pdf/m_11.pdf
Accessed Dec.9, 2014
- 5) 日本農林水産省, 2015. 畜産経営に起因する苦情発生状況
<http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/pdf/kujou2.pdf>
Accessed Oct.31, 2015.
- 6) 家畜排せつ物の管理の適正化および利用の促進に関する法律, 1999.
- 7) 日本農林水産省, 2013. 家畜排せつ物の発生と管理の状況.
http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_mondai/02_kanri/
Accessed Dec.9, 2014.
- 8) 北海道農政部, 2010. 北海道酪農・畜産関係資料

(2009年度版), 95-96.

- 9) Chambers, B., Nicholson, N., Smith, K., Pain, B., Cumby, T., Scotford, I., 2000. Managing Livestock Manures Booklet 1 Making Better use of livestock manures on arable land. Funded by the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. London, UK, 4-6.
- 10) Chambers, B., Nicholson, N., Smith, K., Pain, B., Cumby, T., Scotford, I., 2001. Managing Livestock Manures Booklet 3 Spreading systems for slurries and solid manures. Funded by the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. London, UK, 2-6.
- 11) 北海道立畜産試験場, 2004. 家畜ふん尿処理・利用の手引き 2004 HTML版,
http://www.hro.or.jp/list/agricultural/research/sintoku/Siryogu/ecolo/manual2004/manual04_chap3.htm#3-05
Accessed Oct.30, 2015.
- 12) Huijsmans, J.F.M., Hol, J.M.G., Vermeulen, G.D., 2003. Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. Atmospheric Environment 37, 3669-3680.

- 13) 田村忠, 2002. スラリーを有効活用しよう 十勝地方におけるインジェクタ利用. Dairyman 巻: 52号: 8, 74-75.
- 14) Kishimoto, T., Way, T.R., Jun, H., Nishizaki, K., 2002. Factors of soil-machine resistance and soil compaction at the operation of animal effluent application, Greenhouse Gases and Animal Agriculture (Eds: Takahashi, J., Young, B. A.), Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 323-330.
- 15) Kishimoto, T., Tani, M., Umetsu, K., Nishizaki, K., 2004. Application of Anaerobically Digested Dairy Slurry: effectiveness of perforated injector disk. Obihiro Asia and the Pacific Seminar on Education for Rural Development (OASERD), 101-106.
- 16) Pullen, D.W.M., Godwin, R.J., Grundon, P., Moseley, P.J., 2004. Injecting bio solids into grass and arable crops. Part I. Design and evaluation of a shallow injector. Biosystems Engineering, 87 (3), 285-297.
- 17) 坂本 恂, 間谷敏邦, 小坪和男, 今泉七郎, 新井澄男, 1981. スラリー・インジェクタ (マウントタイプ) の改良とスラリーの施用効果. 農作業研究, Vol. 1981(1981)No.42, 9-17.

- 18) 住田憲俊, 澤村篤, 岡戸敦史, 1999. 浅層型スラリーインジェクタの開発. 農作業研究, Vol. 61(1999)No. Supplement, 411-412.
- 19) 住田憲俊, 澤村篤, 石田三佳, 2001. スラリーインジェクタ注入爪の浅層土中挿入技術. 農業機械学会誌, Vol. 63(2001)No. Supplement, 163-164.
- 20) 飯田訓久, 大土井克明, 柳讚錫, 梅田幹雄, 2009. スラリーインジェクタを用いたメタン発酵消化液の基肥施用. 農業機械学会誌, Vol. 71(2009)No. 2, 81-87.
- 21) Huijsmans, J.F.M., Hendriks, J.G.L., Vermeulen, G.D., 1998. Draught requirement of trailing-foot and shallow injection equipment for applying slurry to grassland. Journal of Agricultural Engineering Research 71 (4), 347-356.
- 22) Rodhe, L., Rydberg, T., Gebresenbet, G., 2004. The influence of shallow injector design on ammonia emissions and draught requirement under different soil conditions. Biosystems Engineering, 89 (2), 237-251.
- 23) Rodhe, L., Etana, A., 2005. Performance of slurry injectors compared with band spreading on three Swedish soils with ley. Biosystems Engineering, 92 (1), 107-118.

- 24) 下名迫寛, 中精一, 今園支和, 1984. スラリーの土壤中施用作業法の改善. 農作業研究, Vol. 1984(1984)No. 52, 16-24.
- 25) 岸本正, 西崎邦夫, 梅津一孝, 高橋潤一, 2002. ディスク型スラリーインジェクタの作業抵抗に関する基礎研究. 農業機械学会誌, Vol. 64(2002)No. Supplement, 9-10.
- 26) 岸本正, 西崎邦夫, 梅津一孝, 高橋潤一, 2004. ディスク型スラリーインジェクタのけん引抵抗低減に関する基礎研究. 農業機械学会誌, Vol. 66(2004)No. Supplement, 163-164.
- 27) 住田憲俊, 澤村篤, 石田三佳, 2003. 浅層型スラリーインジェクタとスラリータンカに関する研究. 農業機械学会誌, Vol. 65(2003)No. Supplement, 117-118.

Summary

For the development and introduction of slurry injectors suitable for Hokkaido, the distribution condition, generating factor and the reduction method of towing resistance acting on an injector disk were analyzed. Experiments were conducted to reduce the towing resistance of a disk type slurry injector for the purpose of increasing working speed and reducing fuel consumption.

In order to analyze the effects on the disc towing resistance by a change in the different disk shape and the cutting depth, three thicknesses (6, 9, 12 mm) and three diameters (200, 250, 300 mm) of solid disks were used in the experiments. The horizontal and vertical forces acting on a disk and gauge wheels were measured at 20, 40 and 60 mm cutting depths. Experiment was conducted in loam soil. Towing resistance was measured by a load cell for disk axis which was installed between the disk and the frame. Towing resistance of the disk was found to increase with the increase of cutting depth. As the cutting depth of a disk increased, the upward vertical force applied by the soil to the disk increased, and the vertical force supported by the gauge wheels

decreased. This phenomenon is important in analyzing the generation of the resistance. The towing resistance was also reduced when the thickness of an injector disk was thinner or the diameter was larger. Towing resistance of the disk thickness of 6 mm was 29% smaller than that of 12 mm when the cutting depth was 60 mm and the disk diameter was 250 mm. Towing resistance of the disk with a diameter of 300 mm was 34% smaller than the diameter 200 mm when the cutting depth 60 mm and the disk thickness was 12 mm.

Towing resistance acting on the disk is considered to be the sum of cutting resistance by the cutting edge and the frictional resistance by the side wall. In order to clarify the generation of frictional resistance of the disk side wall, the experiment was performed with changing the cutting depth with three directional force transducer installed on the disk side wall. When the cutting depth increases, the maximum value of the frictional pressure from 40 to 60 mm acting on one point of the disk side wall was almost the same as 124 kPa. The resistance increases when the contact area of the side wall increases with the increase of the cutting depth. Furthermore, in order to analyze the generation of frictional

resistance and cutting resistance, the cutting edge resistance of 30 ° of the disk circumference (diameter 250 mm, thickness 12 mm) was measured with a newly developed transducer. The device only detects the cutting resistance of the disk edge, so that it make the towing force possible to measure the frictional resistance and the cutting resistance separately. When the cutting depth were 20 mm and 40 mm, the cutting resistance by the cutting edge of the entire disk was found to be almost 80% and the frictional resistance by the side wall was about 20%. The disk cutting edge is a part of supporting the injector weight, so that the reduction of the cutting resistance of the cutting edge is thought to be difficult. If the frictional resistance reduces, twenty percent of towing resistance could be reduced.

The reduction of the frictional resistance of disk side wall would be effective to reduce towing resistance of the injector disk. A side wall grooved disk that the disk edge only comes in contact with the soil was manufactured. The experiments were conducted to compare the towing resistance of side grooved and solid disks. Through the experiment the towing resistance of the grooved disk was reduced about 10% smaller than that of a solid disk. The side

wall of the grooved disk does not come in contact with soil, so that frictional force was reduced. However, load bearing capacity in the vertical direction was also reduced. Consequently the grooved disk easily sink into soil and the cutting resistance was thought to increase. If a disk does not sink into soil more than the setting cutting depth, towing resistance could be expected to decrease 20%. From the above results, it is effective to reduce the towing resistance by grooving the side wall of the disk.

Dynamics analysis of disk type slurry injector was conducted to develop the optimal injector for Hokkaido. The towing resistance was reduced when the thickness of an injector disk was thinner or the diameter was larger. Furthermore, towing resistance acting on the disk is considered as the sum of cutting resistance by the cutting edge and frictional resistance by the side wall, and the ratio of cutting resistance to frictional resistance was found to be 4:1. In addition, it is possible to reduce 10% of the total resistance by the reduction of the generation of frictional resistance with a side wall grooves disk.