

I はじめに

金沢市において生産されている金箔は日本全国の 99%を占めており、重要な伝統産業である。金箔の製造工程は延金、澄打ち、箔打ちに大別される。このうち澄打ち工程において使用される澄打紙には、原料として稲ワラの茎の「ニゴ」と呼ばれる部分が大量に必要とされる。図 1 に稲ワラの葉身と葉鞘を取り除いた茎の模式図を示す。ニゴとは図 1 に示す第 1 節間のことで、穂首節と穂首節下の止葉の葉鞘が着生する節（以下、止葉節と呼ぶ）の硬い部分を取り除いた部分である。

ニゴの採取は、現在は人手により行われている。稲わらを 1 本ずつ穂首節側と止葉節側を切断した後、ニゴを覆っている葉鞘から引抜いて採取しており、採取能率は極めて悪い。そのため、製箔業界からは、取り扱いとメンテナンスが容易で、しかも安価なニゴ採取機械の開発が強く望まれている。

本研究の目的はニゴの採取に必要とされる労力や時間を削減して澄打紙の原料調達を容易にし、澄打紙の生産が安定することに寄与することである。昨年度はニゴ抜き作業の機械化に向けて基礎研究を行ったが、引抜きに用いた実験機の引抜速度が 5mm/s と大変遅く、開発予定の機械に用いるには実用的なものではなかった。今年度の研究では実用的な引抜速度を持つ引抜き機に改良し、ニゴ抜き作業の自動化に向けた実験を行った。そしてニゴの切出し・引抜きの作業を自動で行うニゴ採取機を試作し、性能の調査を行った。

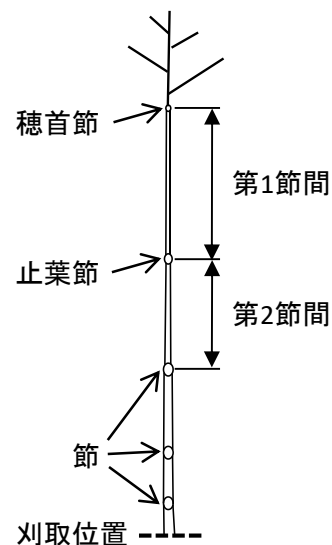


図1 水稻茎の模式図

II 引抜き速度の影響調査

1. 概要

昨年の実験で用いた機械は引抜き速度が 5 mm/s と大変遅く、ニゴ抜きを行う実用的な速度ではなかった。そのため今年度は実際の機械化に必要なとされる引抜き速度をもった装置を製作した。そして引抜き速度を変え、ニゴを葉鞘から引抜く際の速度の影響を調査した。

2. 実験装置

実験に使用した装置の全体を図 2 に示す。昨年度の実験装置と同様にニゴの穂首節側部分をローレットカム式チャック（図 3）で挟み、葉鞘はネジを利用して把持力測定機を上から押さえつけ把持している（図 4）。葉鞘の把持部分は、40mm×40mmのアルミ板に日本工業規格で規定された細目（粒度 #320）の布ヤスリを貼り付け、滑りを防止した。図 2 の引抜き装置にはステップモータとボールネジから構成された単軸の直動ロボットを使用した。これを右向きに動作させるとニゴだけが引っ張られて、ニゴが水平に引抜ける仕組みになっている。動作速度や動作加速度はロボットコントローラに接続したパーソナルコンピュータから設定する。

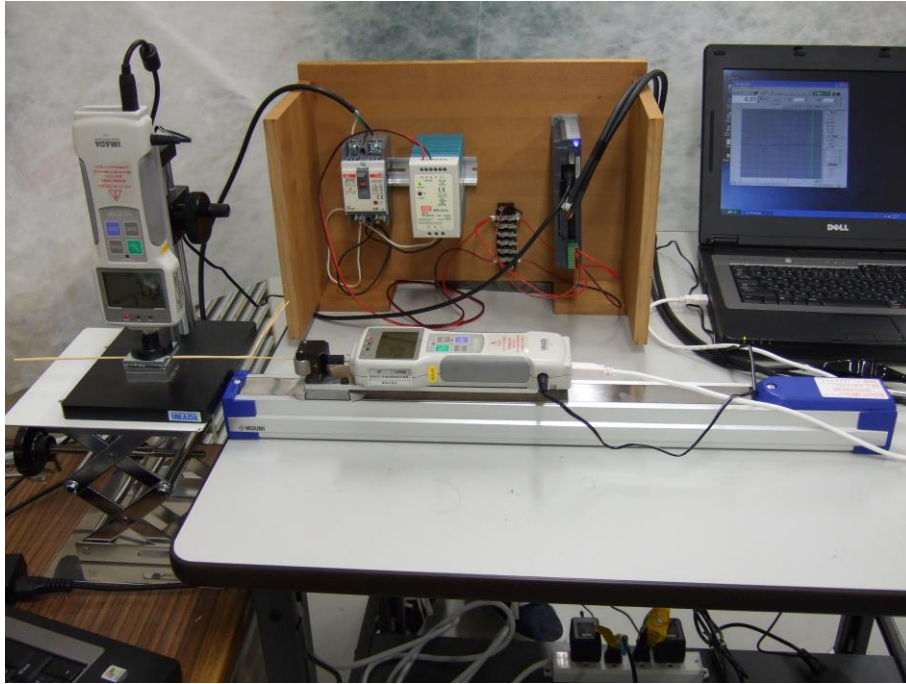


図 2 ニゴ引き抜き実験装置



図 3 ニゴ把持部

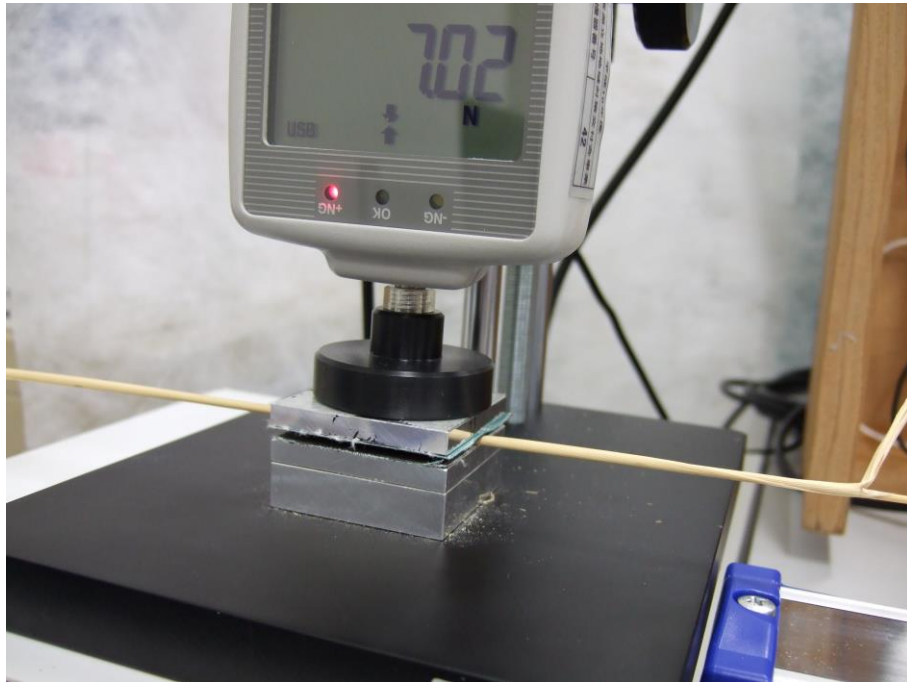


図 4 葉鞘把持部

3. 実験方法

図 2 の実験装置を用いてニゴの引抜き実験を行った。試料は石川県立大学附属実験農場で収穫され十分乾燥させた稲ワラを用い、手作業で穂首節から 300mm の長さに切出した。把持力は昨年度と同様に 5N、10N、20N、30N、40N に設定し、各 20 本ずつ計 100 本の引抜力を 3 種類の引抜き速度で測定した。引抜き速度はコンピュータのスタートボタンを押してから単軸ロボットが移動・停止するまでの所要時間が約 1 秒、約 2 秒、約 3.5 秒になるように速度、加速度を調節した。設定値は次のとおりである。

速度Ⅰ 約 1 秒 (コントローラ設定値：速度 600 mm/s、加速度 4.76m/s²)

速度Ⅱ 約 2 秒 (コントローラ設定値：速度 200 mm/s、加速度 1.19m/s²)

速度Ⅲ 約 3.5 秒 (コントローラ設定値：速度 200 mm/s、加速度 0.12m/s²)

また実験装置に稲ワラを設置する前に、葉鞘の最大・最小直径、ニゴの最大・最小直径、露出したニゴの長さを測定した。これらの結果についてはIV章に示す。引抜き後、把持力最大値・最小値、引抜き力最大値、把持部分の滑り量を測定した。

4. 実験結果

どの引抜き速度の場合でも把持部分で滑ることなく完全にニゴの引抜きが行えた。引抜き力と把持力に関するグラフを図 5 から図 7 に示す。

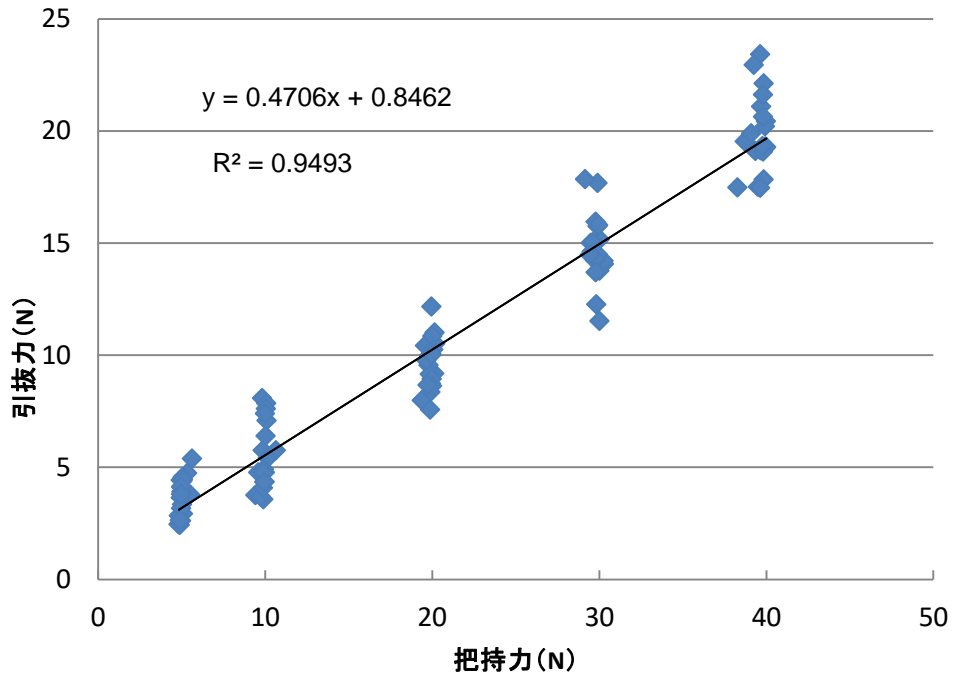


図 5 把持力と引抜き力の関係 (速度 I)

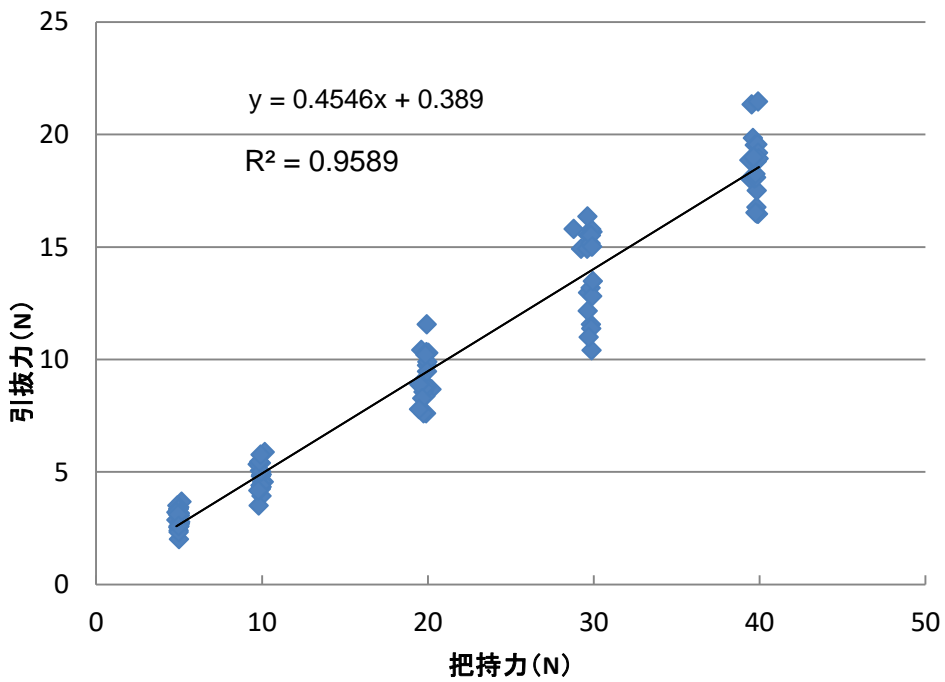


図 6 把持力と引抜き力の関係 (速度 II)

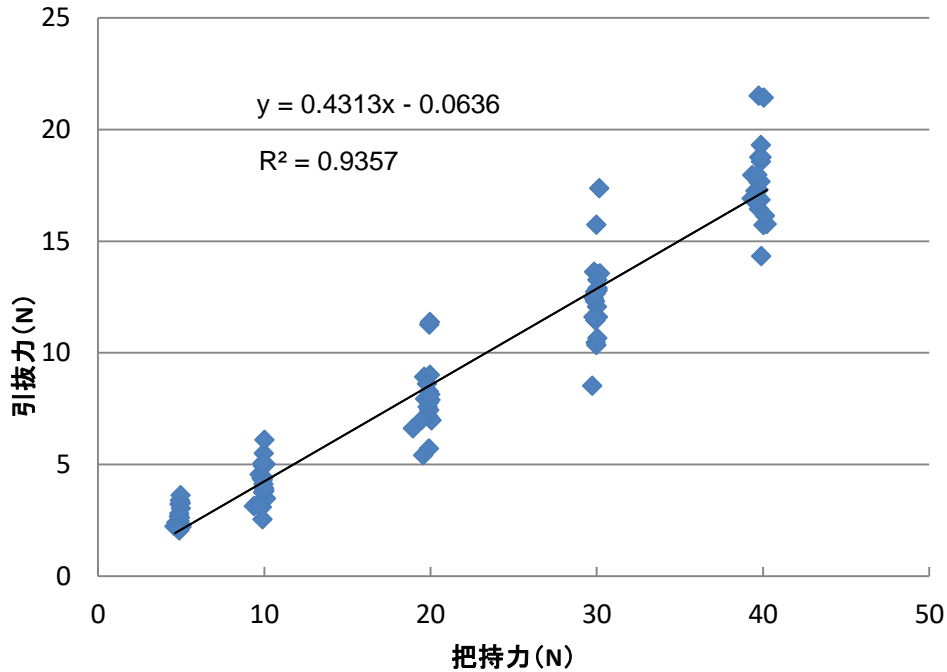


図 7 把持力と引抜き力の関係 (速度Ⅲ)

速度Ⅰ、速度Ⅱ、速度Ⅲのいずれの速度の場合でも同様の結果となり、 R^2 の値は大きかった。したがって把持力と引抜き力は比例関係であると言える。

4. 考察

引抜き速度がどの場合でもニゴの引抜きは問題なく行えていることから、今回の実験の範囲ではニゴの引抜きには速度による影響はなかった。また葉鞘の把持力については、どの把持力でも引抜きは問題なく行えたことから、5N以上の把持力ならば引抜きに問題はないことがわかった。把持力と引抜き力は比例の関係であったことから把持力が小さいほど引抜きに必要なエネルギーは小さくなる。機械のコストを低減するためにはエネルギー消費がより少ない装置を用いることが望ましいため、5N程度の把持力をもった装置を使用すれば良いと考えられる。

Ⅲ 把持装置の検討

1. 概要

開発予定のニゴ抜き機では葉鞘とニゴを自動で把持するようにならなければならない。そこで、ソレノイドという装置を使用して自動で把持ができる実験装置を試作した。これを用いてニゴ抜きを行い、性能の調査を行った。

2. 実験装置

実験に使用した装置の全体を図 8 に、各部を図 9 から図 11 に示す。装置の基本は前章の図 2 に示す実験装置と同じ単軸直動ロボットである。ニゴ側と葉鞘側の把持装置としてソレノイドを使用した。ソレノイドとは電流を流すことで磁力発生し、その力を利用して可動部分を動かす装置

である。電気配線によりスイッチ1つで葉鞘とニゴを同時に把持することが可能である。今回使用したものはプッシュタイプであり、可動部分が押し出される作用を利用して葉鞘やニゴを押さえている。ニゴ側を把持して引抜くため、ニゴ側のソレノイドは葉鞘側より大きく、つまり把持力が大きくなるようになっている。また、把持部には葉鞘側だけではなくニゴ側の把持部にも細目（粒度#320）の布ヤスリが貼り付けられている。

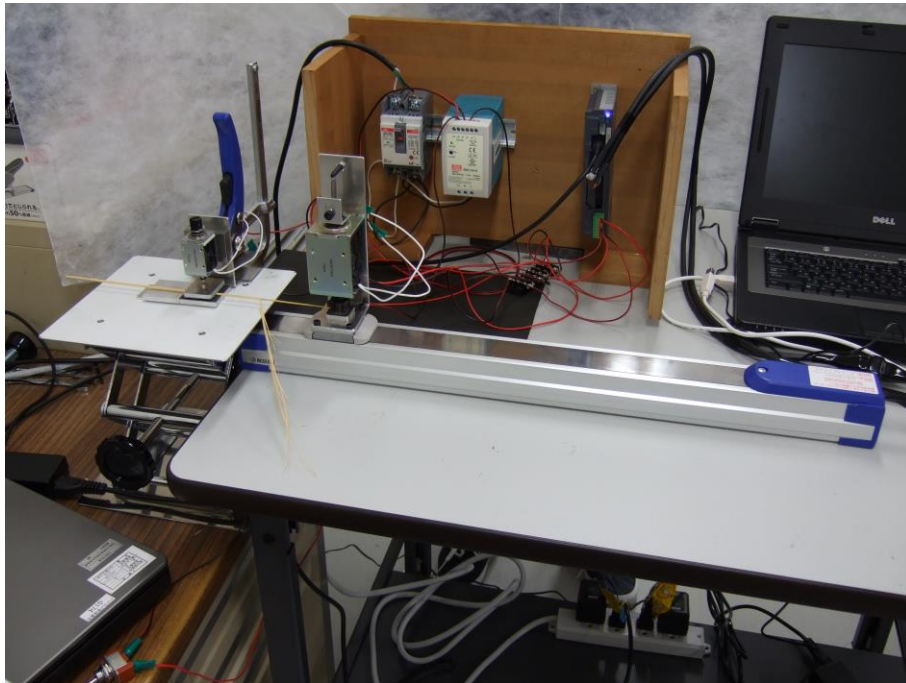


図 8 葉鞘とニゴの自動把持実験装置

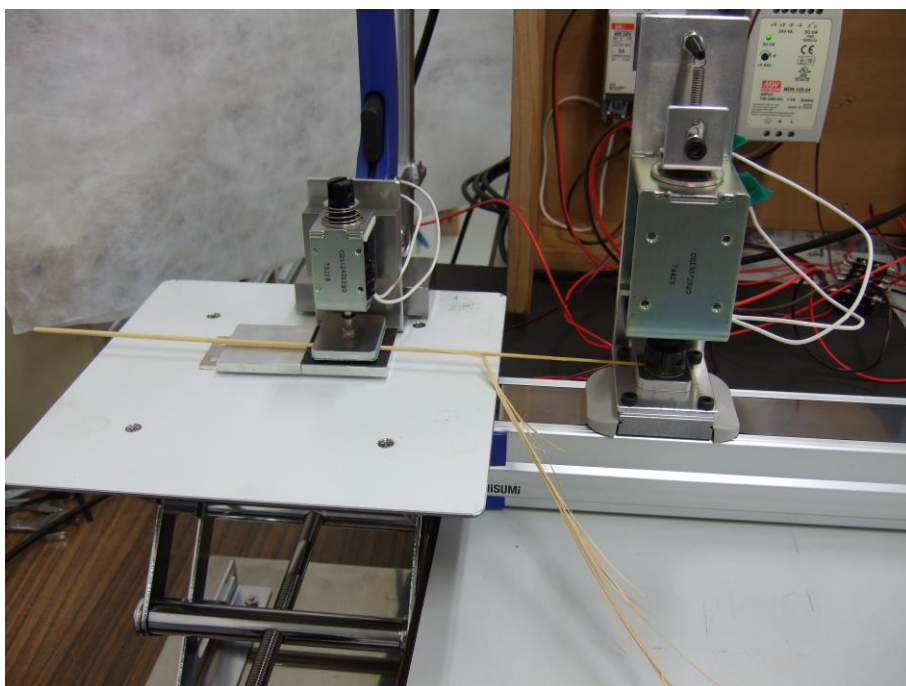


図 9 葉鞘とニゴの把持装置

図 10 に示すように、ニゴ側は先端から 5mm 程度をソレノイドの可動部で押し付け、把持している

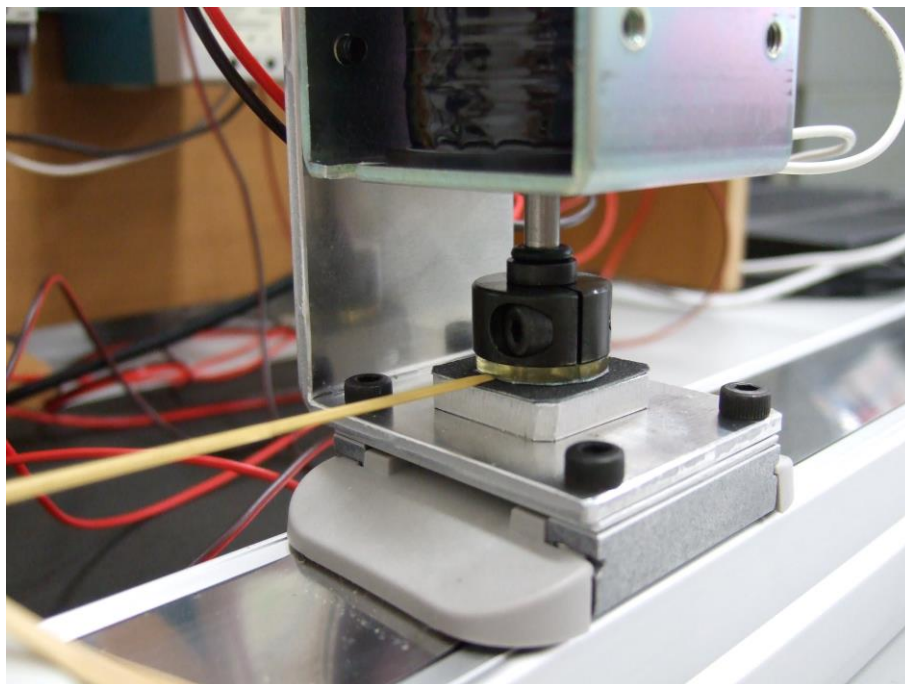


図 10 ニゴ側の自動把持装置

図 11 に示すように、葉鞘側は穂首節側から 150mm ほどの部分をニゴと同様にソレノイドで把持している。

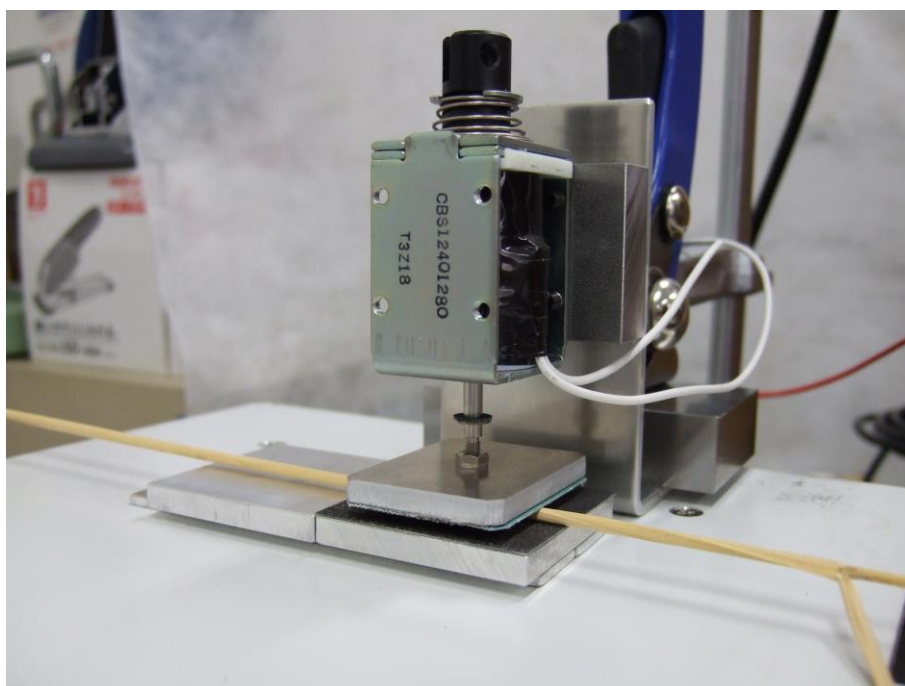


図 11 葉鞘側の自動把持装置

3. 実験方法

図 8 の実験装置を用いて、手作業で切出された稲わらのニゴを引抜いた。試料は石川県立大学で収穫された稲ワラで、十分に乾燥したものを使用した。手作業で 300mm に切り出した 100 本の試料を準備し引抜きを行った。引抜き速度は、所要時間が約 1 秒（コントローラ設定値：速度 600 mm/s、加速度 4.76m/s²）とした。

実験装置に稲ワラを設置する前に、葉鞘の最大・最小直径、ニゴの最大・最小直径、露出したニゴの長さを測定した。これらの結果についてはIV章に示す。引抜後、把持部分のずれを測定した。

4. 実験結果

引抜実験後の稲ワラの状態を表 1 に示す。

表 1 ニゴの引抜き結果

葉鞘が把持部分で滑りは発生せず抜けた(本)	42
葉鞘が把持部分で滑りが発生したが抜けた(本)	41
葉鞘が把持部分で滑りが発生し抜けなかった(本)	17

実験の結果、83%のニゴは引抜くことができ、17%のニゴは引抜くことができなかった。さらに 58%の稲ワラにおいて、葉鞘の把持部分での滑りを生じた。

5. 補足実験

ニゴが引抜けなかったもの 15 本について再度引抜きを行い、引抜けない原因を調査した。実験装置は図 2 を使用した。把持力を 5N、3N、2N に設定し、それぞれ 5 本ずつ引抜きを行った。引抜き速度条件は速度 I（引抜き所要時間：約 1 秒、コントローラ設定値：速度 600 mm/s、加速度 4.76m/s²）とした。

引抜実験後の稲わらの状態を表 2 から表 4 に示す。実験の結果 5N では全てのニゴが問題なく引抜けた。3N では把持部分で滑ったものもあったが全てのニゴが引抜けた。2N ではほとんどの稲わらが把持部分で滑り、2 本が引抜けなかった。

表 2 ニゴの引抜き結果（把持力 5N）

葉鞘が把持部分で滑りは発生せず抜けた(本)	5
葉鞘が把持部分で滑りが発生したが抜けた(本)	0
葉鞘が把持部分で滑りが発生し抜けなかった(本)	0

表 3 ニゴの引抜き結果（把持力 3N）

葉鞘が把持部分で滑りは発生せず抜けた(本)	2
葉鞘が把持部分で滑りが発生したが抜けた(本)	3
葉鞘が把持部分で滑りが発生し抜けなかった(本)	0

表 4 ニゴの引抜き結果 (把持力 2N)

葉鞘が把持部分で滑りは発生せず抜けた(本)	1
葉鞘が把持部分で滑りが発生したが抜けた(本)	2
葉鞘が把持部分で滑りが発生し抜けなかった(本)	2

6. 考察

葉鞘とニゴを自動で把持する機械では引抜きが行えた内の約 60%に把持部分の滑りが生じ、17%が引抜けなかった。これは今回使用したソレノイドの特性が原因であると考えられる。ソレノイドは磁力の吸引力を利用した装置であり挟むものの太さによって可動部の静止位置が変わるとその位置における吸引力が変化する。ニゴが引抜けなかったものには葉鞘が比較的太いものが多くみられた。そのことから把持力の低下につながったのではないかと考えられる。補足実験では 5N未滿の把持力では、把持部分で滑る確率が高いことから、引抜には 5Nの把持力が確実に必要である。ソレノイドは把持するものの太さよって吸引力が変動することを考慮し、葉鞘の太さが最大の稲ワラでも最低 5Nの力で把持できるソレノイドを用いることが望ましいことがわかった。

IV 稲わらの各部位の測定

1. 概要

II章とIII章の実験の際に、ニゴ採取機の機械設計に必要なデータを得るために稲ワラの葉鞘の最大・最小直径、ニゴの最大・最小直径、葉鞘が覆うことなく露出したニゴの長さを測定した。ここではその結果をまとめて述べる。

2. 測定方法

測定部位を図 12 に示す。測定項目は以下のとおりである。

- A：葉鞘の最大・最小直径
- B：ニゴの最大・最小直径
- C：露出したニゴの長さ

A は長さ 300mm に切出された稲ワラの葉鞘の部分である。把持位置を想定して穂首節側先端から 150mm の部位をデジタルノギスを用いて測定した。B はニゴの部分である。把持位置を想定して穂首節側先端から 5mm の部位をデジタルノギスを用いて測定した。C は葉鞘から露出したニゴの部分であり、定規を用いて長さを測定した。

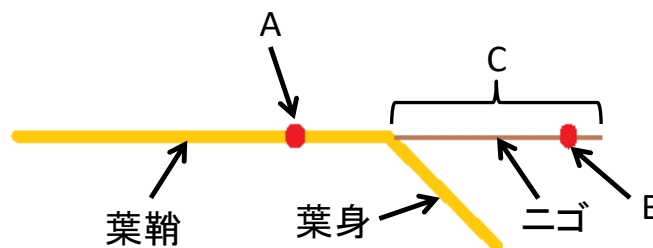


図 12 測定部位

3. 測定結果

(1) 葉鞘の最大直径・最小直径

葉鞘の最大直径のヒストグラムを図 13 に示す。最頻値は 2.1mm 以上 2.2mm 未満で、そこから±0.5mm の範囲に最大直径は入っている。平均値は 2.00mm、最大値は 2.54mm、最小値は 1.52mm であった。

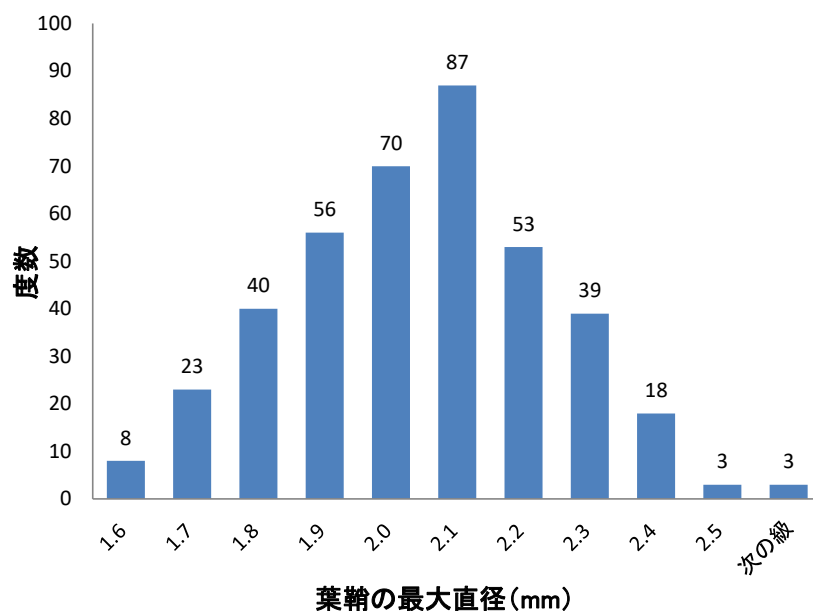


図 13 葉鞘の最大直径

葉鞘の最小直径のヒストグラムを図 14 に示す。最頻値は 1.9mm 以上 2.0mm 未満で、そこから±0.5mm の範囲に最小直径は入っている。平均値は 1.85mm、最大値は 2.37mm、最小値は 1.38mm であった。

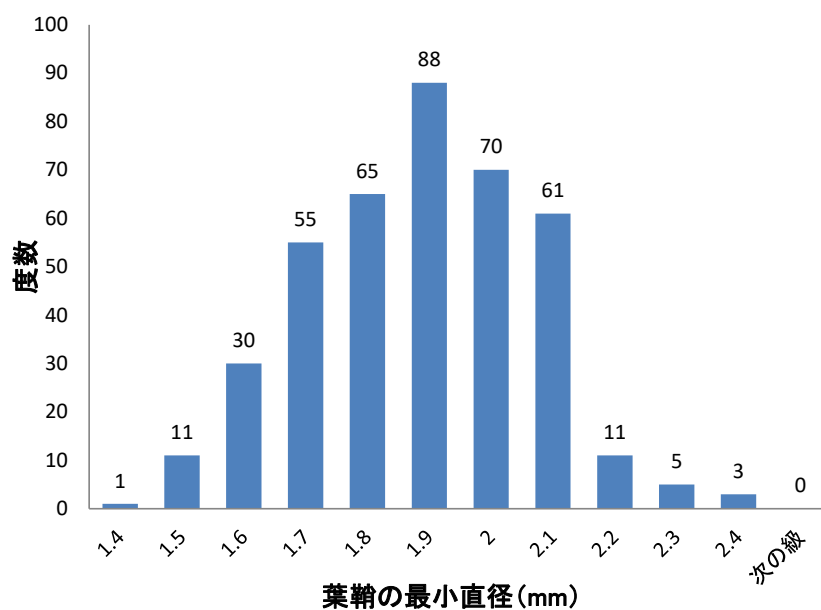


図 14 葉鞘の最小直径

(2) ニゴの最大直径・最小直径

ニゴの最大直径のヒストグラムを図 15 に示す。最頻値は 1.3mm 以上 1.4mm 未満で、そこから±0.5mm の範囲に最大直径は入っている。平均値は 1.23mm、最大値は 1.70mm、最小値は 0.86mm であった。

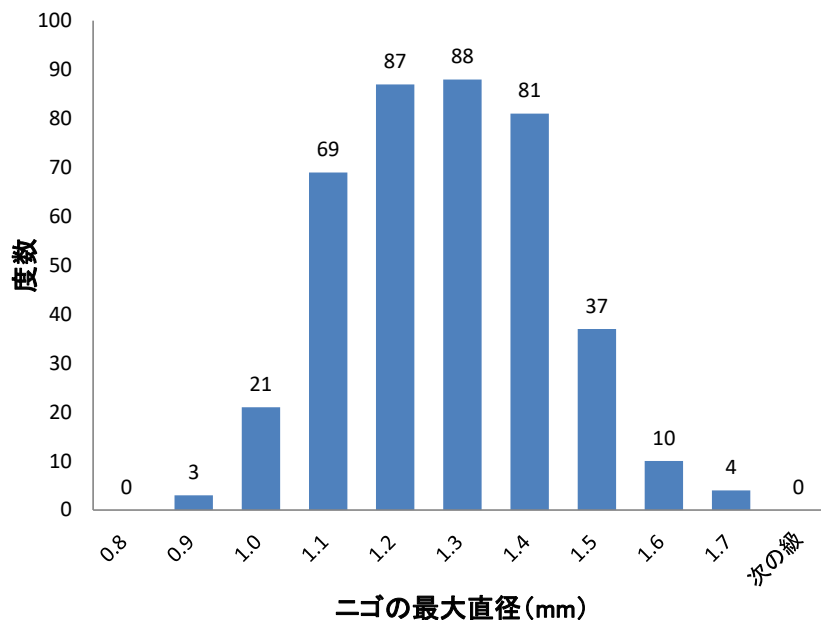


図 15 ニゴの最大直径

ニゴの最小直径のヒストグラムを図 16 に示す。最頻値は 1.2mm 以上 1.3mm 未満で、そこから±0.5mm の範囲に最大直径は入っている。平均値は 1.13mm、最大値は 1.59mm、最小値は 0.72mm であった。

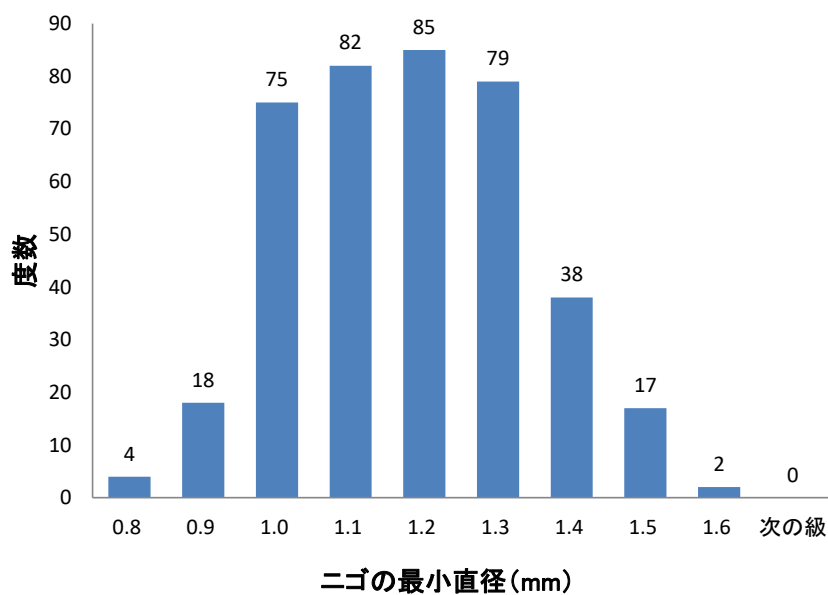


図 16 ニゴの最小直径

(3) 露出したニゴの長さ

露出したニゴの長さのヒストグラムを図 17 に示す。最頻値は 65mm 以上 70mm 未満で、そこから±30mm の範囲に入っている。平均値は 62.44mm、最大値は 97.20mm、最小値は 22.60mm であった。

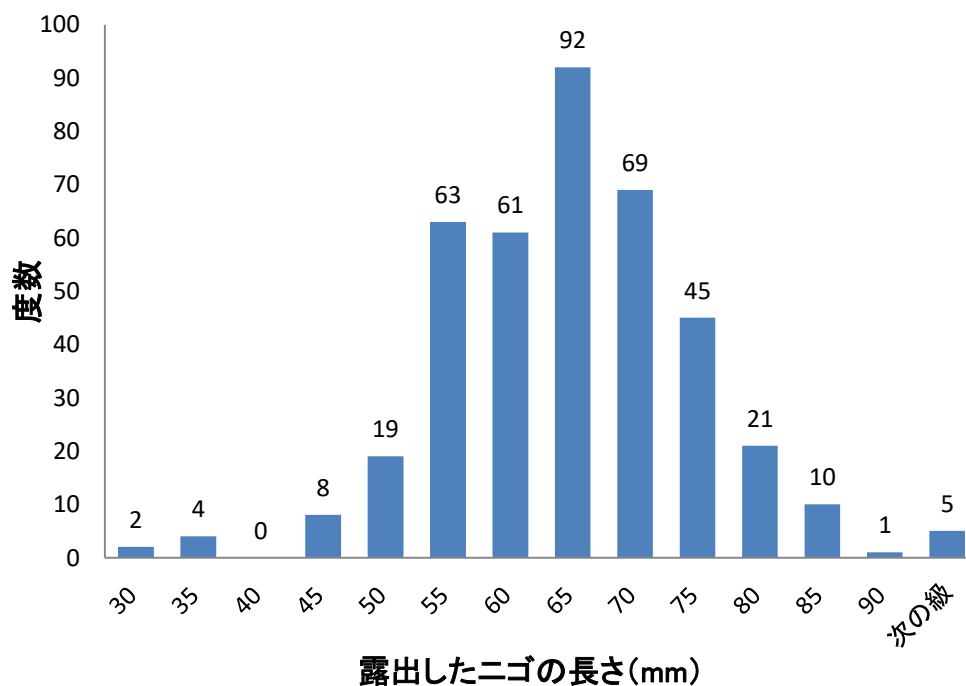


図 17 露出したニゴの長さ

4. 考察

葉鞘の最大直径と最小直径の測定結果から、平均値は 2mm 程度で±0.5mm の範囲に葉鞘の直径は入っていることがわかった。したがって、葉鞘側の把持装置はこの直径を考慮に入れてソレノイドの選定や取り付け方を設計する必要がある。

葉鞘に覆われることなく露出しているニゴの長さは最小でも 20mm 以上であった。前章の引抜き実験ではニゴの先端から 5mm までを把持すれば十分引抜きが可能であったことから、露出したニゴの長さは十分であることが判明した。

V ニゴ採取機実験機

1. 概要

前章までの実験結果を基礎にして、ニゴの切出しと引拔を行うニゴ採取機の実験機を設計し試作した。この章ではその概要を述べる。

2. 実験装置

今回試作したニゴ採取機実験機を図 18 から図 21 に示す。このニゴ採取機がニゴを切出す仕組みは平成 12 年度に試作したニゴ切出し機 2 号機²⁾と同様である。ただし、コスト低減のため稲ワ

ラ搬送ベルトの外側のベルトは幅を狭くし簡便なものに変更している。ニゴを引抜く仕組みはⅢ章の実験装置と同様である。さらにニゴを引抜いた後、搬送ベルトに残留している葉鞘を排出するためにソレノイドを利用した排出装置を組み込んでいる。採取機の全長は 1000mm、全幅は 885mm である。

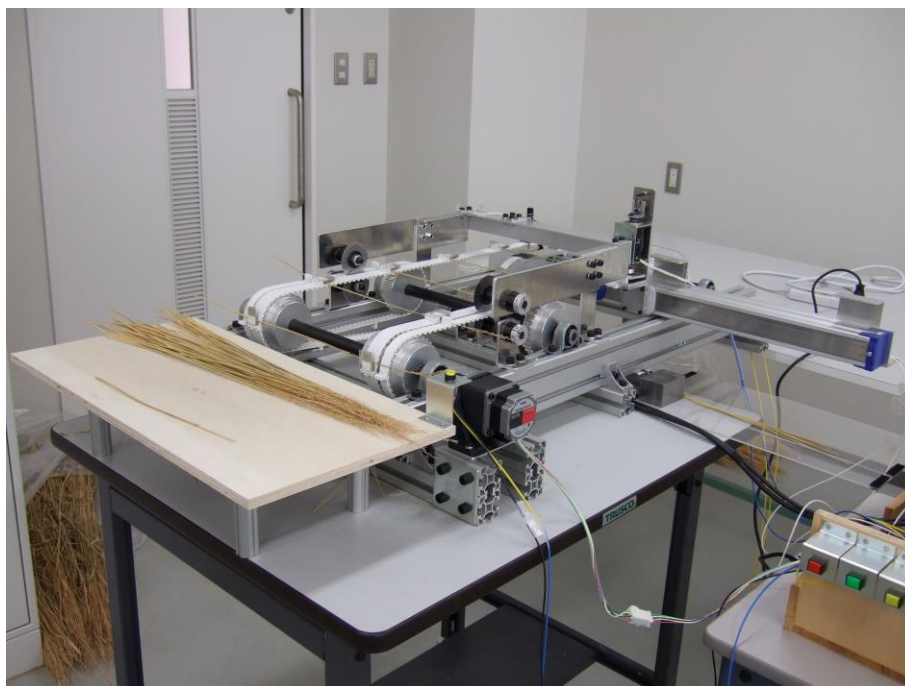


図 18 ニゴ採取機

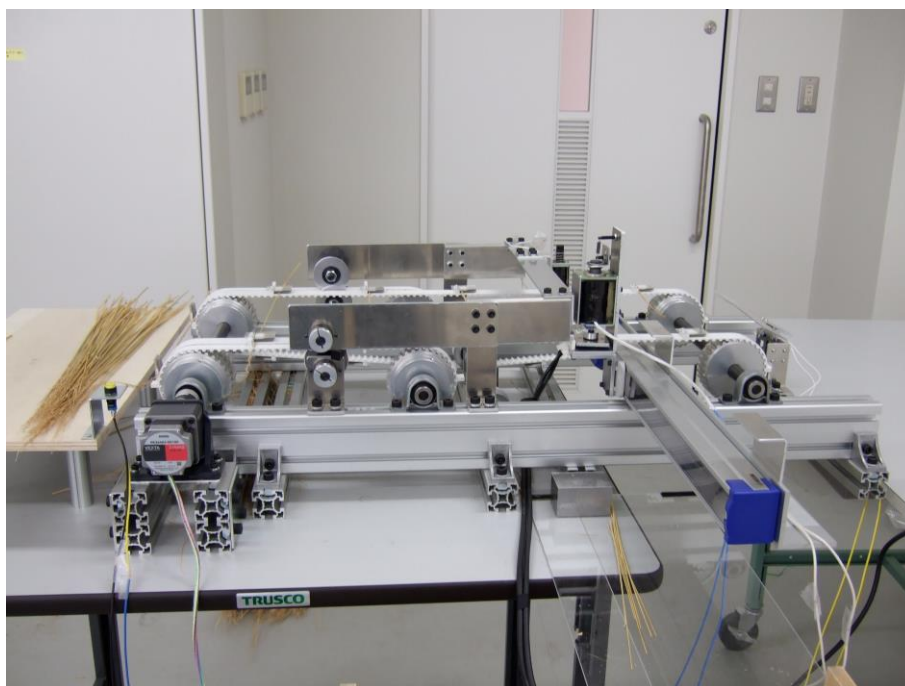


図 19 ニゴ採取機（側面）

作業者は図20に向かって右外側のベルト上に穂首節が来るように稲ワラを1本ずつ稲ワラ把持部分に設置する。右手近くにある起動ボタンを押すと搬送ベルトが移動する。移動距離は150mmである。搬送ベルト移動中に稲ワラは両側にある円形刃で長さ300mmに切断される。搬送ベルトが停止するとソレノイドが駆動し、搬送ベルト上の稲ワラの葉鞘と露出したニゴを把持する。そして単軸ロボットが右方向に移動しニゴを引抜く。単軸ロボットが右端に停止後ソレノイドが解放されニゴが自重で落下する。その後単軸ロボットは左端に移動し次の稲ワラを待つ。

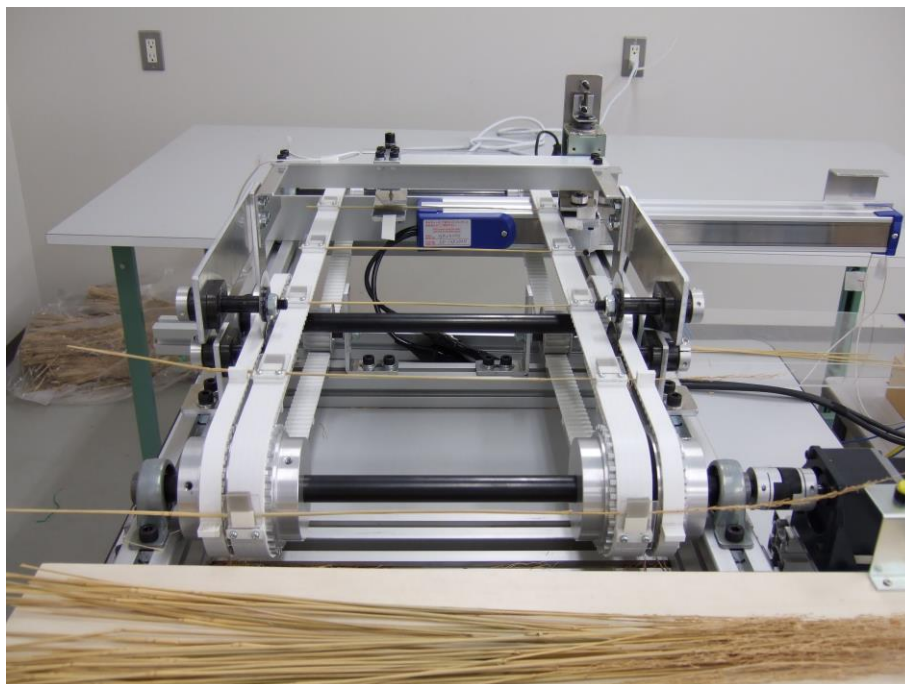


図 20 ニゴ採取機（正面）

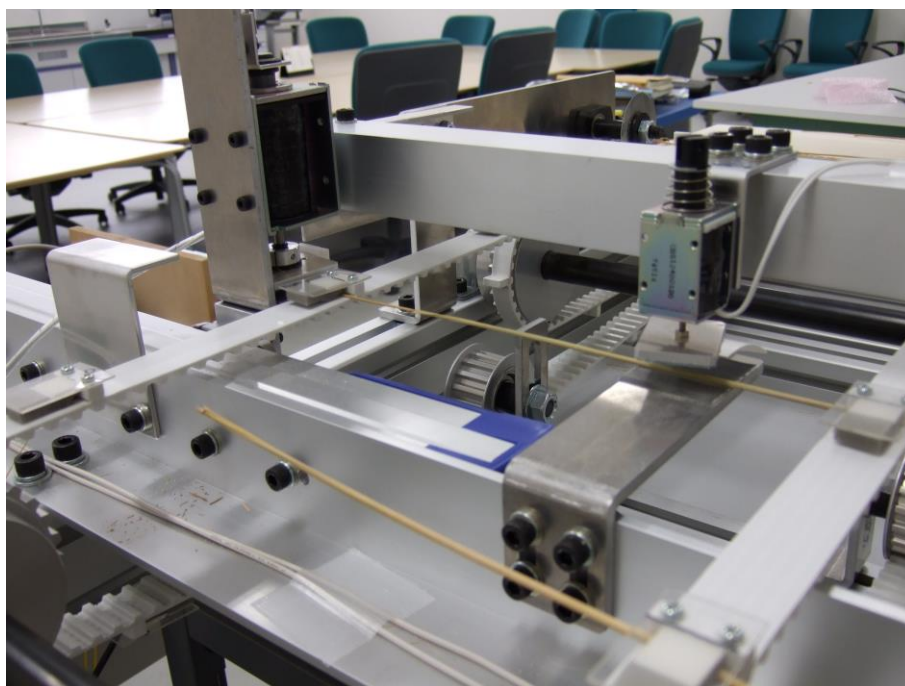


図 21 ニゴ採取機（ニゴ引抜き部）

作業者が起動ボタンを押した後、搬送ベルトの移動から単軸ロボットが左端に戻り待機するまでの一連の工程の動作タイミングはプログラマブルコントローラと呼ばれる制御装置を使用して制御している。ただしコスト低減のため各種センサーなどは使用せず、タイマーによりタイミングを調整している。

作業者は起動ボタンを押した後、一連の工程が終了するまでに次の稲ワラを稲ワラ把持部分に供給するとニゴ採取作業能率は向上する。

VI ニゴ採取機実験機の性能試験

1. 概要

前章において述べたニゴ採取機の実験機を使用し、ニゴ採取実験を行った。

2. 実験方法

ニゴ採取機実験機を使用してニゴ採取作業を1束ごとに行い、採取作業の様子をビデオカメラで撮影した。その際、稲わらは穂首節が円形刃の外側に位置するように設置した。また、比較するために従来のハサミを使用した手作業についても同様に撮影を行った。採取されたニゴの本数を記録し、撮影された映像から採取作業に要した時間を測定してニゴ採取能率を求めた。作業者はニゴ採取作業の経験がない男子学生1名（以下、作業者Aと呼ぶ）で、繰り返し数は5回とした。

なお、起動ボタンを押してから一連の工程の処理時間は約5sであった。

3. 実験結果

ニゴ採取能率の測定結果を図22に示す。1時間あたりの採取本数の平均値を示している。エラーバーは標準偏差である。

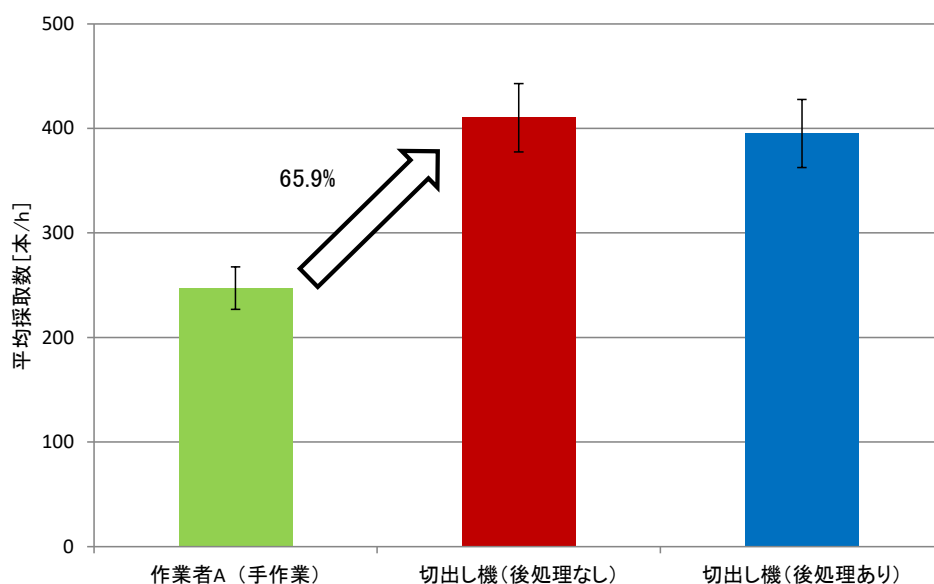


図 22 ニゴ採取作業能率

ハサミを使用した手作業では 247.2 本/h であった。ニゴ採取機を使用した場合、ニゴが引抜けなかった稲ワラを手作業で抜き直し（以後、後処理と呼ぶ）をしなかった場合は 410.1 本/h となり、作業能率は 65.9% 向上した。また後処理を行った場合は、その分採取能率が悪化し 395.1 本/h となり、作業能率は 59.8% の向上になった。

4. 考察

実験に使用したニゴ採取機は起動ボタンを押してからの一連の工程処理時間は約 5s である。したがって作業者が 5s 以内に稲ワラを設置し、採取機のニゴ採取成功率が 100% であれば計算上 720 本/h の採取能率が実現できるはずである。しかし実際には 100% の採取能率を実現できなかった。

その原因を分析すると、稲ワラ供給数は平均 473.6 本/h で採取機処理能力の 65.8% にとどまった。稲ワラ 1 本を供給するために約 7.6s 要していた。平成 12 年度に試作したニゴ切出し機の実験において稲ワラ供給数には個人差がかなりあることが明らかになっている²⁾。今回の作業者の稲ワラ供給速度が遅かった可能性もあるため、さらに作業者を増やして実験を行う必要がある。また、供給された稲ワラからニゴを引抜くことができたニゴ採取成功率は平均 88.2% であった。引抜きに失敗した稲ワラを調べると葉鞘とニゴの摩擦力がかなり大きかったり、折れ目がついているためその部分で引っかかり抜けにくいものがあり、いずれも手作業でも引抜くことが困難な稲ワラであった。

VII まとめ

葉鞘からニゴを引抜く作業の自動化を検討し、ニゴの切出しと引抜きを行うニゴ採取機を設計・試作した。下記のことが明らかとなった。

まず、引抜き速度のニゴ抜きに与える影響について調査を行った。昨年度と同様に把持力測定機と引抜き力測定機を備えた実験機を使用し、改良した引抜き機の引抜き速度を 3 種類に設定してニゴ抜きの実験を行った。実験の結果、引抜き速度がいずれの場合でも問題なくニゴが引抜けたことから、ニゴの引抜きに関して引抜き速度による影響はないと判断した。把持力と引抜き力は比例関係を示した。エネルギー消費が少ない方がコスト面で有利であるため、把持力は 5N 程度が望ましいと判断した。

次に把持装置の検討を行った。開発予定の機械では、葉鞘やニゴを自動で把持する必要があった。そこでソレノイドという装置を使用して自動で把持ができる機械を試作し、ニゴ抜きの実験を行った。実験の結果、83% のニゴが引抜くことができた。引抜くことができなかった原因を調査した結果、把持力が 5N では問題なくニゴ抜きができるが、2N 以下では葉鞘が把持部分で滑り、引抜くことができないものが多いことがわかった。葉鞘が把持部分で滑る原因はソレノイドの特性によるものと考えられ、葉鞘が太い場合の吸引力の低下が把持力の低下につながったと判断された。ソレノイドは葉鞘の太さが変動しても最低 5N の力で把持できる装置を用いることが良いと考えられた。

最後にニゴ採取試作機の性能実験を行った。1 時間当たりの手作業でのニゴ採取能率と試作機でのニゴ採取能率を比較した。作業員 1 名による実験の結果、手作業に比べニゴ採取機を使用した場合のニゴ採取能率は 65.9% の向上にとどまった。その原因を分析すると、稲ワラ供給数は平

均 473.6 本/h でニゴ採取機処理能力の 65.8%であった。ニゴ採取機は稲ワラ 1 本を処理するために約 5s を要するが、作業者が稲ワラを供給するために約 7.6s 要していた。稲ワラ供給数には個人差がかなりあることから、平均的な採取能率を求めるにはさらに作業者を増やして実験を行う必要がある。また、供給された稲ワラからニゴを引抜くことができたニゴ採取成功率は平均 88.2% であった。ニゴ採取成功率については石川県箔商工業協同組合理事から高い評価を受けた。引抜きに失敗した原因は稲ワラの性状によるところが多く、現在のソレノイドを使用した簡便な把持方法では 100%にすることは困難であろうと考えている。

なお、本研究の結果は平成 27 年 9 月、岩手大学で開催される農業環境工学関連学会 2015 年合同大会において発表を予定している。

参考文献

- 1) 大角雅晴、2014、「金沢箔における澄打紙製造に関する研究－ニゴ抜き取り工程の自動機開発のための基礎実験－」、平成 25 年度研究成果報告書、金沢箔技術振興研究所
- 2) 大角雅晴、2013、「金沢箔における澄打紙製造に関する研究－簡易ニゴ抜き機の改良とニゴ切出し機の試作－」、平成 24 年度研究成果報告書、金沢箔技術振興研究所