

第4章 サトウキビ組織培養苗の ロボットによる自動株分け

第1節 本章の目的

本章の目的は、発根したステージIV(Murashige, 1974) (Debergh and Zimmerman, 1991)のサトウキビの幼植物体を、根を残したまま1本ずつ個別に分離することである。幼植物体は、根部においてはその根が絡み合い、また苗条は分げつし密生しているため、分離にはあえてマシンビジョンを用いず、シンプルなメカ機構を用いる。これによりロバスト性の向上を図る事とする。まずサトウキビの苗について述べ、次いでサトウキビ幼植物体分離システムの概要について、その後システムの各要素機構について述べる。最後にシステムの評価方法及び実験結果について述べる。

第1章でも述べたが、Wang et al. (1999)はステージIIのサトウキビの組織培養苗を株分けするロボットシステムを開発した。Schaufler and Walker(1994)の開発した、新しい培養方法によって培養された発根前の苗を、画像処理によってその位置を検出し、株分けした。図1に平行プレートの中で増殖するサトウキビの苗を示す。外側の培養容器は一般的に使われているものである。その中に、図で示すような複数枚の平行板を並べ、その間にサトウキビの苗を挟む。平行プレートによってその生長が横方向のみに制限されるため、その後の分離や機械化が容易になる可能性を持っている。

一方、本研究においては、現在南西糖業株式会社において行われている育苗工程にスムーズに導入可能な機械化の方法を考え、システムを設計、試作した。これまでに岡本ら(1998)は、やはりステージIIのサトウキビサトウキビ組織培養苗の自動移植システムの開発を行っているが、その研究では増殖中の苗条は複数本の固まりに分割さ

れた後に、移植された。本研究の位置付けは、岡本ら(1998)の研究の後の工程の自動化である。

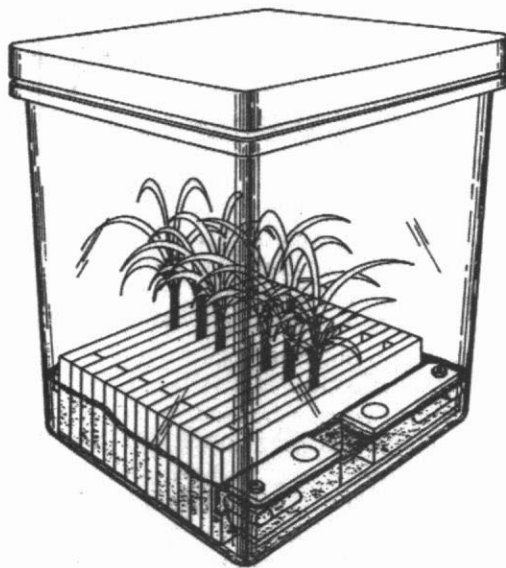


図 1 パラレルプレートの間で増殖するサトウキビの苗

第2節 実験材料および装置

第1項 サトウキビの苗

今回使用したサトウキビは NiF8 という品種である。これは鹿児島県と沖縄県において現在、最も多く使用されている品種である。今回、サンプルの提供を受けた製糖会社では、1つの生長点から切り出した組織を、継代培養を繰り返すことで、2000～2500本の幼植物体を得る。発根培地に入れ、発根させた後、複数の苗が茂った状態で50穴のセルトレイに移植し、育苗する。この段階ですでに幼植物体は温室に移されている。1～2ヶ月の順化の後、さらに1株ずつ株分けしセルトレイに移植する。その後、1～2ヶ月間育苗し、圃場に定植する。本研究においてはこの株分け作業を自動化する(図2)。図3は実際に使用した苗であり、株分け前のものである。セルトレイで育苗されているため、根が土に絡まり根鉢を形成していることがわかる。この状態では、株分けを行うことが不可能なため図中で **Cutting line** と示してある箇所ですでに根鉢を切断する。その後、培養土と切断された根を水で洗い流し1本ずつに株分けする。図4は株分け後の典型的な苗を示している。茎と根の境目から、最も高い位置にある展開葉の分岐点(肥厚帯)までの長さを茎の長さとする。また、茎と根の境目から10ミリの茎の太さを茎の太さとした。これは、茎と根の境目が膨らんでおり、茎の太さとは言いがたいと判断されたためである。サトウキビ苗の形状の詳細については、第6章に述べる。

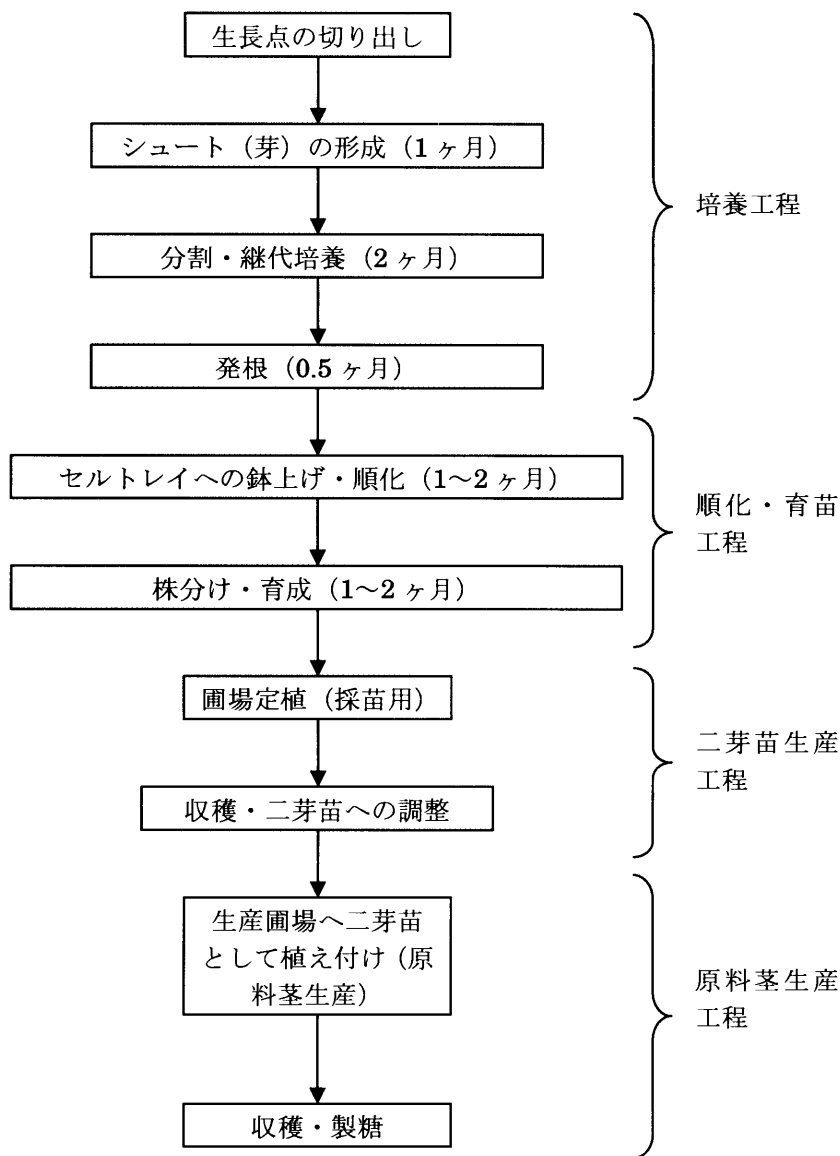


図 2 サトウキビ培養苗の生産及び利用

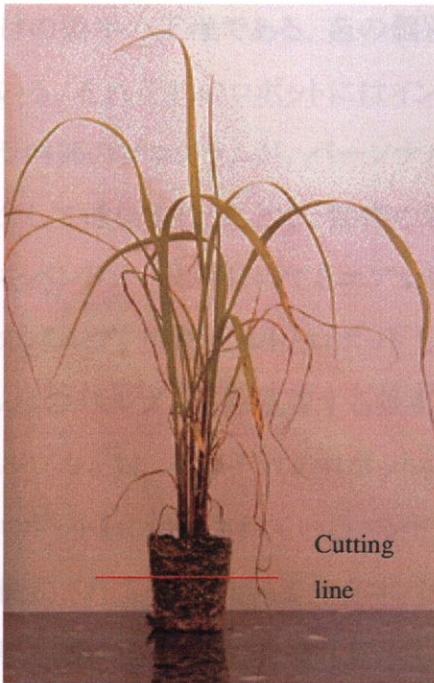


図 3 1 セル分の苗

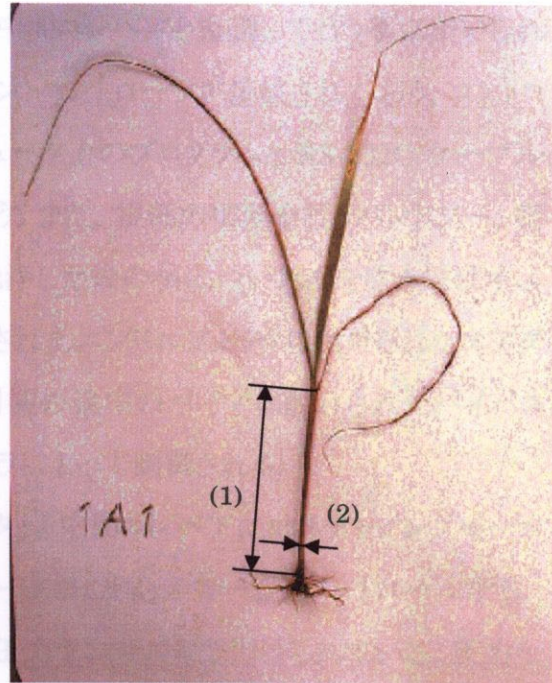


図 4 分離後の典型的な苗

第2項 サトウキビ株分けシステム(SCSS)

図 5は、サトウキビ株分けシステム(Sugar cane separating system:SCSS)のブロックダイアグラムを示している。このシステムは主に、二つのロボットと、パーソナルコンピュータによって構成されている。パーソナルコンピュータ(Pentium II 450MHz, 128MB)の ISA バススロットにはシリアルコミュニケーションボード(IBX-4141, Interface Corp.)が、PCIバススロットには4軸ステッピングモータコントローラボード(PCI-7208, Interface Corp.)とA/Dコンバータボード(PCI-3133, Interface Corp.)が取り付けられている。OSはマイクロソフト Windows NT 4.0, コンピュータのプログラム言語としてマイクロソフトの Visual C++ 6.0を用いた。それぞれの拡張ボードには、ライブラリが付属しており、関数を組み合わせることで外部機器との通信や、外部機器の動作制御を容易に行うことが出来る。

このシステムでは 2 種類のロボットが使用されているが、最初のロボットは、4軸の SCARA 型(SRX-610, SONY Corp.)である。このロボットは、株分けの前半の工程である、苗の取り出し、根鉢の切断、培養土の洗浄、中間コンベアへの苗の繰り出しを担っている。二つ目のロボットは、6軸の垂直多間接型(RV-E2, Mitsubishi Corp.)であり、株

分けの後半の工程である、苗の個別分離を中間コンベアと協調して行う事に用いられている。それぞれのロボットにはインテリジェントコントローラが接続されており、コントローラ内部のプログラムが、パーソナルコンピュータ上のプログラムと RS-232C ケーブルを介して通信を行うことで、動作の制御を行う。また、根部の切断を行うバンドソー、根部をバンドソーに押し当てるエアシリンダ、洗浄した後の根についた水を吹き飛ばすエアのバルブ、中間ベルトとロボット 2 に接続されたエンドエフェクタに付けられたエアグリッパのバルブ、苗を吸着する吸引機、吸引機の途中のパイプに設けられたバイパスバルブなどは、それぞれのロボットコントローラによって制御される。

ロボット1に接続されているエンドエフェクタ1と中間コンベアにはステッピングモータが使用されている。4 軸モータコントローラボードがこれらのモータをコントロールする。

吸引機の吸引圧力をモニターするため、圧力センサが取り付けられている。圧力センサの出力は、A/D コンバータボードによってコンピュータに入力される。

図 6 にシステムの組立図を示す。また、図 7 にシステムの外観を示す。

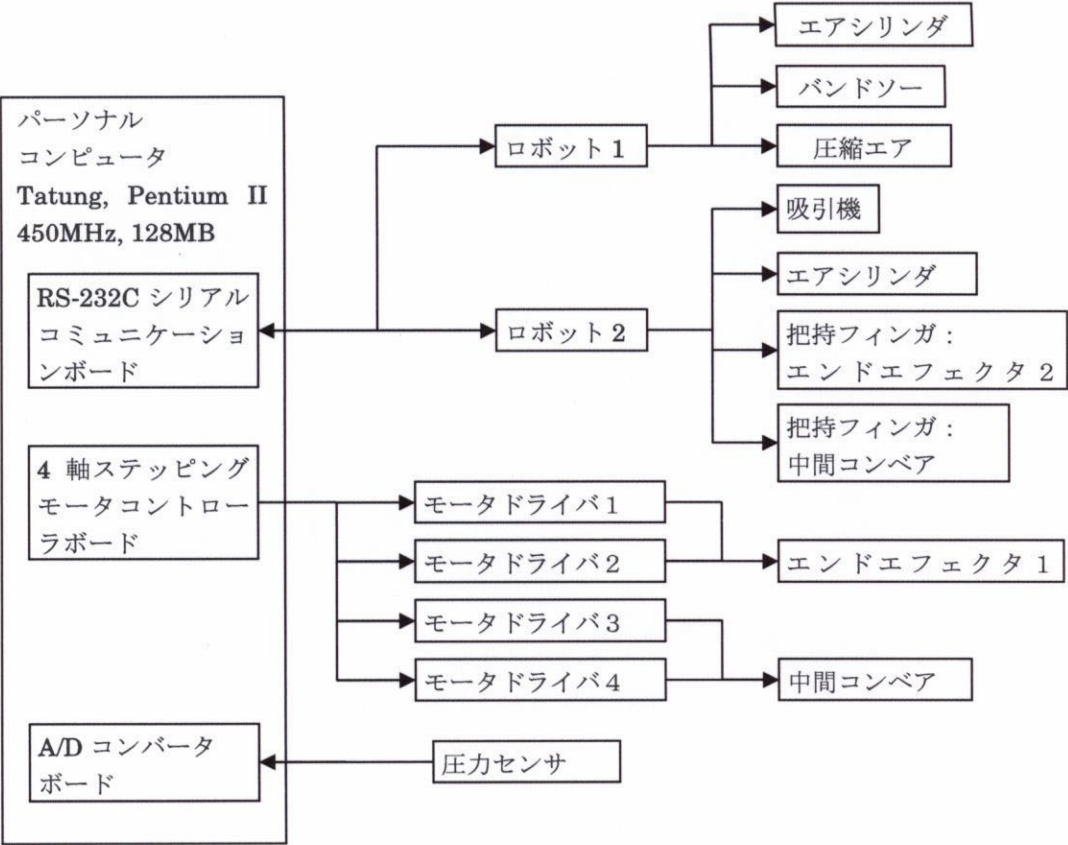


図 5 サトウキビ株分けシステムのブロックダイアグラム

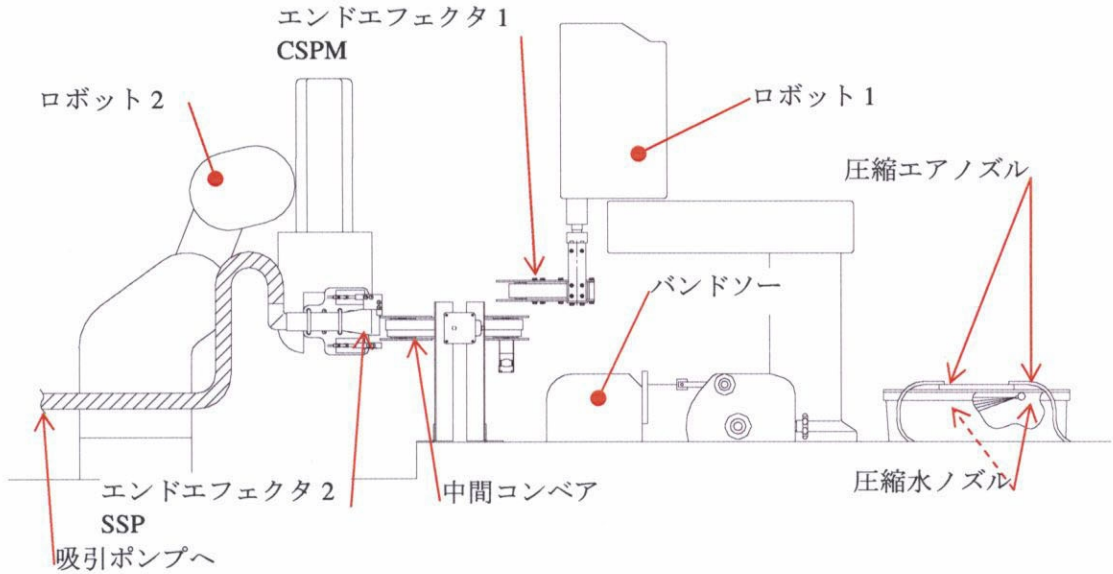


図 6 サトウキビ株分けシステム組立図

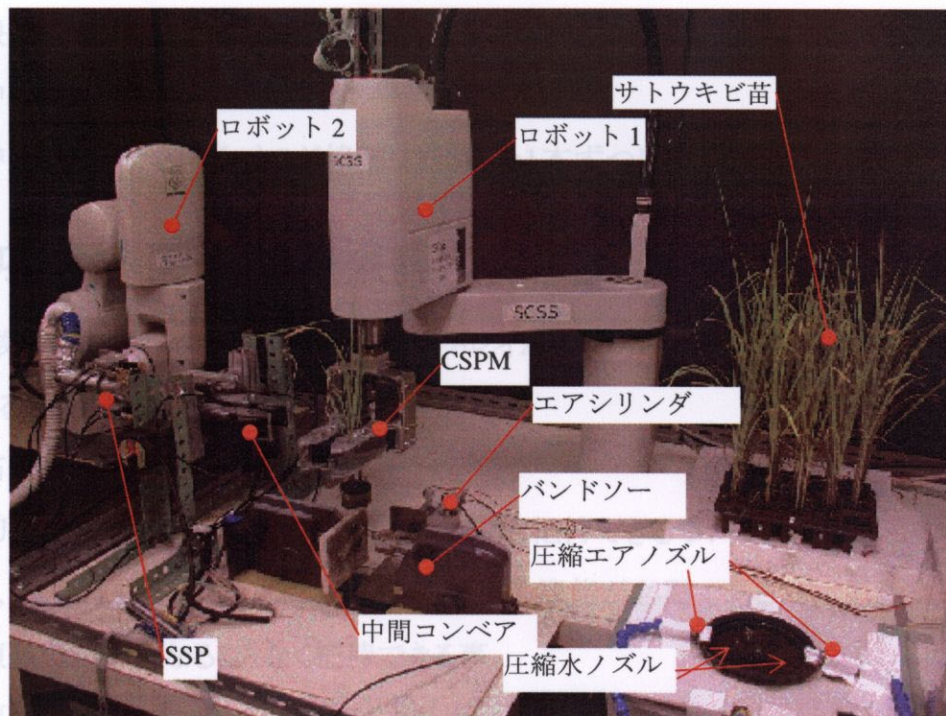


図 7 サトウキビ株分けシステムの全体図

第3項 株分けの方法

現在、実際の生産現場において手作業で行われている株分けの手順は以下の通りである。

1. セルトレイから苗を抜取る。
2. 根鉢部を約 20 mm 残し、ハサミで切断する。
3. 根鉢部を水の中で洗浄し、培養土と切断された根を除去する。
4. 根の絡みをほぐしながら、一本一本に株分けする。
5. 大きさ別に選別する。
6. 新しいトレイに移植する。

本章においては、1から4までの工程を自動化することを試みる。第5章では画像処理を用いて5の工程を自動化する。

1から4までを以下の手順でロボットにより自動化する。

1. ロボット1がセルトレイから1セル分の苗を抜取る。
2. 根鉢をバンドソーで切断する。

3. 根部を圧縮水と、圧縮エアで洗浄する。
4. 中間コンベアに苗を繰り出す。
5. 中間コンベアとロボット2が協調して、苗を1本ずつに分離する。

第4項 連続苗把持機構(CSPM)

複数の苗を含む一セル分の苗をセルトレイから取り出す際、エンドエフェクタに必要なとされる機能は以下の2点である。

1. 苗を傷つけずに把持できる事。
2. 切断や洗浄の際も落とすことなくしっかりと把持できる事。

また、株分けを行うためにはさらに以下3点の機能が必要である。

3. 複数の苗を重ねることなく把持できる事。
4. 複数の苗を1本ずつ繰り出すことが出来る事。
5. 繰り出した1本以外の苗を把持することが出来る事。

今回使用したセルトレイの一つのセルの寸法は、 45×45 mm である。苗は、それぞれのセルのほぼ中心に繁茂している。苗は、根元から放射状かつほぼ垂直に伸長する。もし、一般的にロボットのエンドエフェクタとして使用される平行リンク式や支点開閉式のフィンガを用いると、1と2の機能を実現することは可能だが、3や4、5を実現することは不可能である。2本の把持指に挟まれた複数の苗はお互いに重なり合い、最悪の場合は苗が潰れてしまう事や、損傷を受ける事がある。上記の条件を満足し、特に、苗同士が重ならないようにするため、以下のようなエンドエフェクタを考案、試作した。

円筒形状の物体を掴む時の人間の手の動きを考えると以下の3種類に分類できる。

- (1) 野球のバットのような太いものを握るとき：手のひら全体を使って握る
- (2) 鉛筆のようなものを掴むとき：指と指の間に物をはさんで掴む
- (3) サトウキビの苗のような直径 1 mm 程度の物をつまむとき：図 8のように親指と人差し指の腹をくっつけてY字型に出来る隙間に物を挿入し、指同士の接触する位置を移動させることで把持、操りを行う。図中に示した小円は、物体の断面を表している。

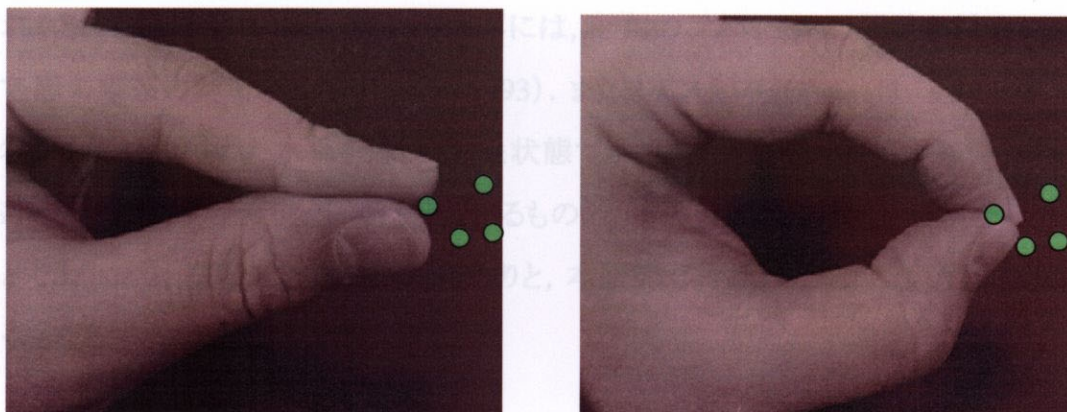


図 8 人間の手が細い物体を把持する際の動作

この動作によって複数の対象物の中から、指の間に作ったY字型の隙間に近い順に1つずつ把持することが可能である。また、あらかじめ対象物のある位置がわかっているならば、指に触れた順に掴めば良いため、視覚情報に頼らずに把持を行うことが出来る。指の動きを多間接リンク機構により模して把持及び操りを行う研究も行われているが(吉野, 2000), それでは複数の対象物を同時に連続的に把持することができない。そこで図 9のようなベルト機構を考案した。この機構を連続苗把持機構(Continuous shoot picking mechanism 以下 CSPM)と呼ぶ。CSPMは一对の、厚さ5 mmのスポンジを接着した幅20 mmのゴムベルト(バンドー化学製, ポリバンロープ), ゴムベルトを任意の速度, 方向, 位置に駆動するステッピングモータ(オリエンタルモーター製, PMU33AH-MG20)から構成されている。スポンジは、互いに接触しておりその間に苗を挟むようになっている。左右のモータは同じ速度にそれぞれ逆方向に回転し、ベルトの進む方向を同じくしている。CSPMは図 10のように、その上部でロボット1と接続されている。ロボットによって矢印で示す方向に動かすことが出来る。苗を把持するときは、ベルトと同じ速度でCSPM全体をロボットによって動かす。その際、ベルト表面と苗の相対速度は0となる。これによって左右のベルトが接する点に最も近い苗から順番に重なることなくスムーズにベルトに取り込まれる。一度ベルトの間に把持された苗の位置は容易には移動しない。そこで、根鉢の切断, 洗浄を行った後、ベルトを逆回転させることで、苗を1本ずつ繰り出すことが出来る。また、苗全体の上げ下ろしは、CSPM全体を上下させることで実現した。図 11と図 12に、CSPMがセルトレイから、1セル分の苗を取り出す工程を示す。このような平ベルトを用いた機構は、穀物の脱ぶに用い

られる機構に類似している。穀物の脱ふには、一対のゴムロールの間隙を種子が通過する際の摩擦力が用いられる(木谷, 1993)。またスアスタワら(1998)は、1 対の平ベルトの間を玄米の付いた水稻を通し、立毛状態で水稻の脱穀を行う研究を報告している(Suastawa, 1999)。機構としては似ているものの、その目的は種子から種皮を取り去ることであったり、種子を取ることであったりと、本研究で行われた把持という目的とは大きく異なる。

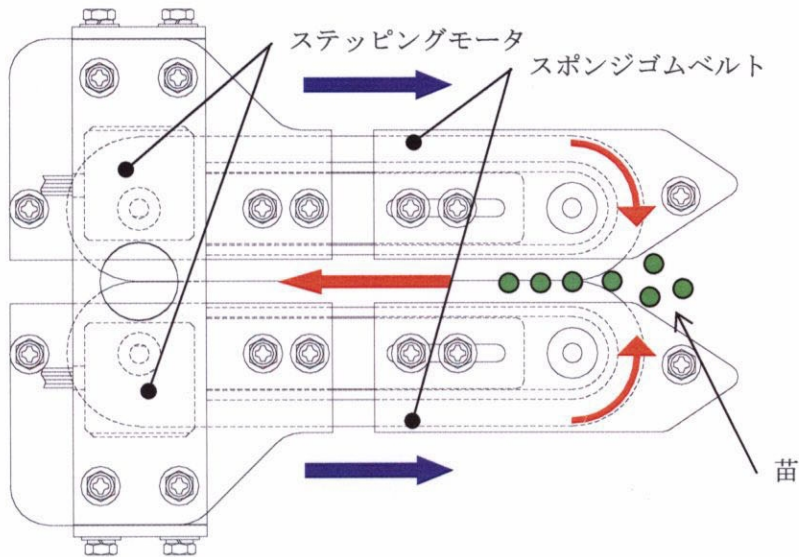


図 9 CSPM の組立図

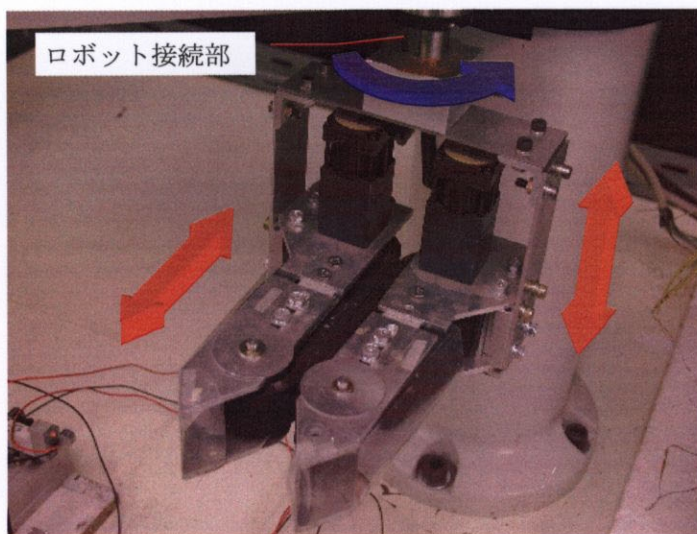


図 10 CSPM 外観

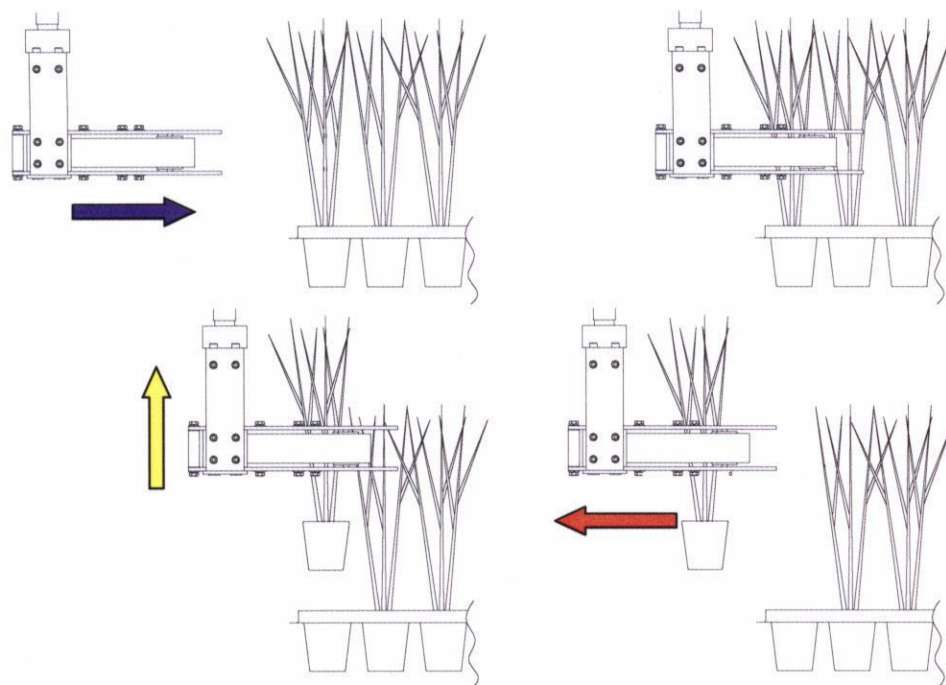


図 11 1セルの苗を取り出す動作

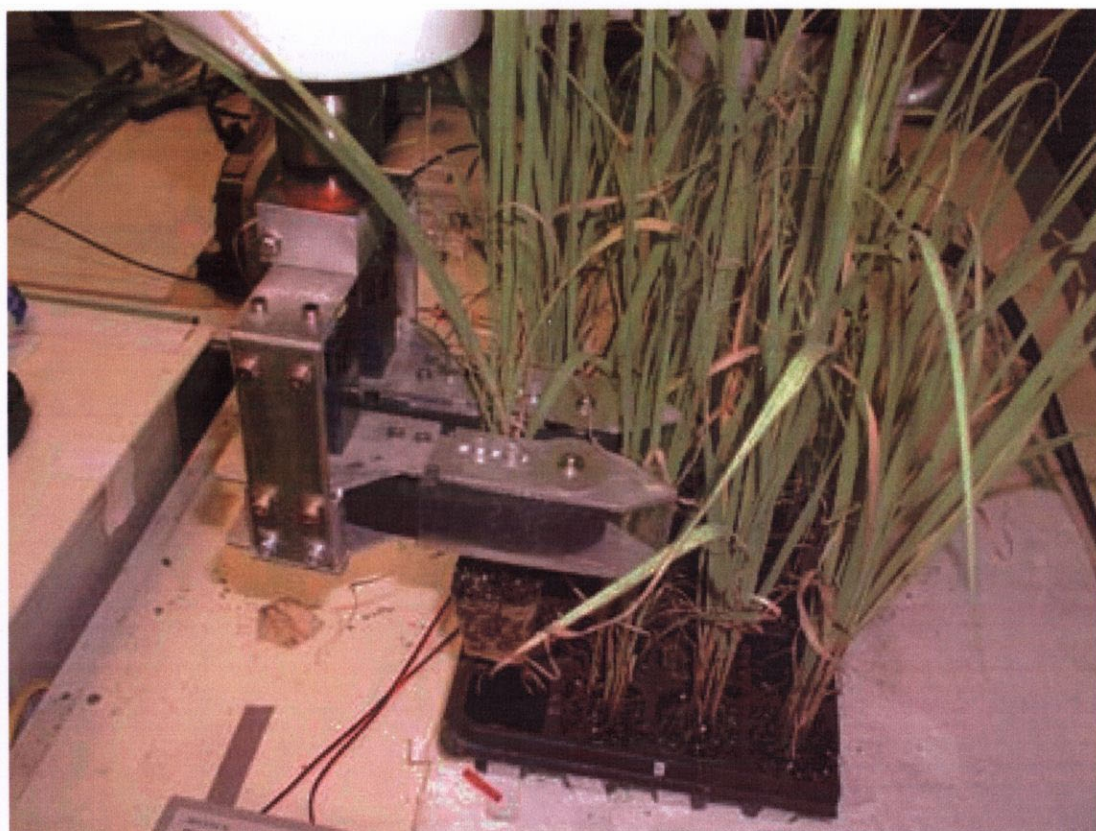


図 12 1セル分の苗を取り出している様子

第5項 根部の切断及び洗浄

サトウキビの苗は、セルの中で、まず下方向に根を伸ばし、その後、セルの壁に沿って根を伸ばして、図 3のように根鉢を形成する。根はお互いに絡み合い、土を抱え込んでいるため、この状態で株分けしようとするとうえの根元から千切れてしまい、分離を行うことが不可能である。そこで、根鉢を下から20ミリのラインで切断する。その後、不必要な細い根や、培養土を除去する。手作業の場合は、根鉢をはさみで切り、その後水の中で手洗いするが、今回のシステムでは根鉢の切断に、バンドソー(RYOBi 製、TBS-50)を用いた。このバンドソーは通常立てて使われるが、本システムにおいては、横倒しにして使用した。図 13に切断部の外観を示す。CSPM によって取り出された苗の根鉢をまず、エアシリンダ(SMC 製、MVGQM20-100)によって前後に動く苗押板と切断刃の間に挿入する。その後、CSPM と苗押板を同じ速度で動かし、図 14のように根鉢をバンドソーの切断刃に押しつけて切断を行う。バンドソーは、刃が一方方向に進むことで、切断を行うため、CSPM によって茎部を吊られた苗の不安定な根鉢部を図 13 中の向かって左方向に押し付けながら安定した切断を行うことが出来た。

また、手洗いの代わりに、ポンプによって加圧された水を4方向からビーム状に噴射し、その中を通すことで不要な根と培養土の除去を行った。ポンプは農薬散布用の動力噴霧器(共立製、MHP-060)を使用した。このポンプは最大加圧圧力が 3.5MPa、流量は 7 l/min である。ノズルは、エア用の物(テンコーポレーション製)を使用した。図 15に水を噴射している所を示す。この水噴流の中に根鉢部を挿し込み、前後に動かすことで、根の洗浄を行った。根部の洗浄を行った後、水を切るため、図 16のように持ち上げながら、横から圧縮エアを吹き付けた。エアの圧力は 1MPa であった。

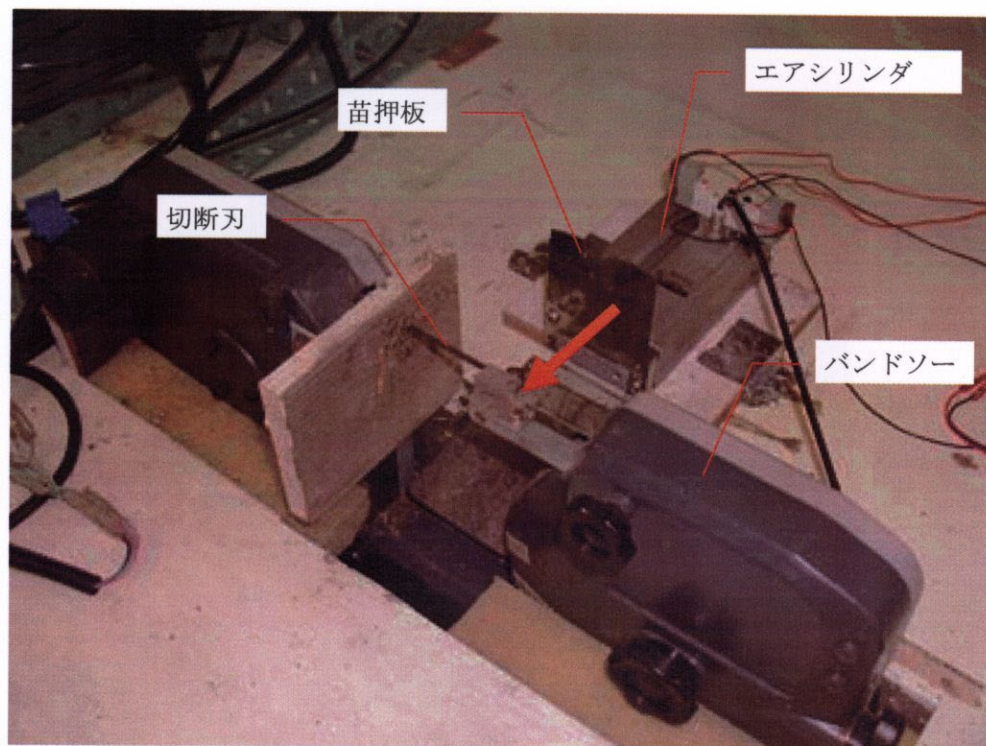


図 13 根鉢切断部の外観

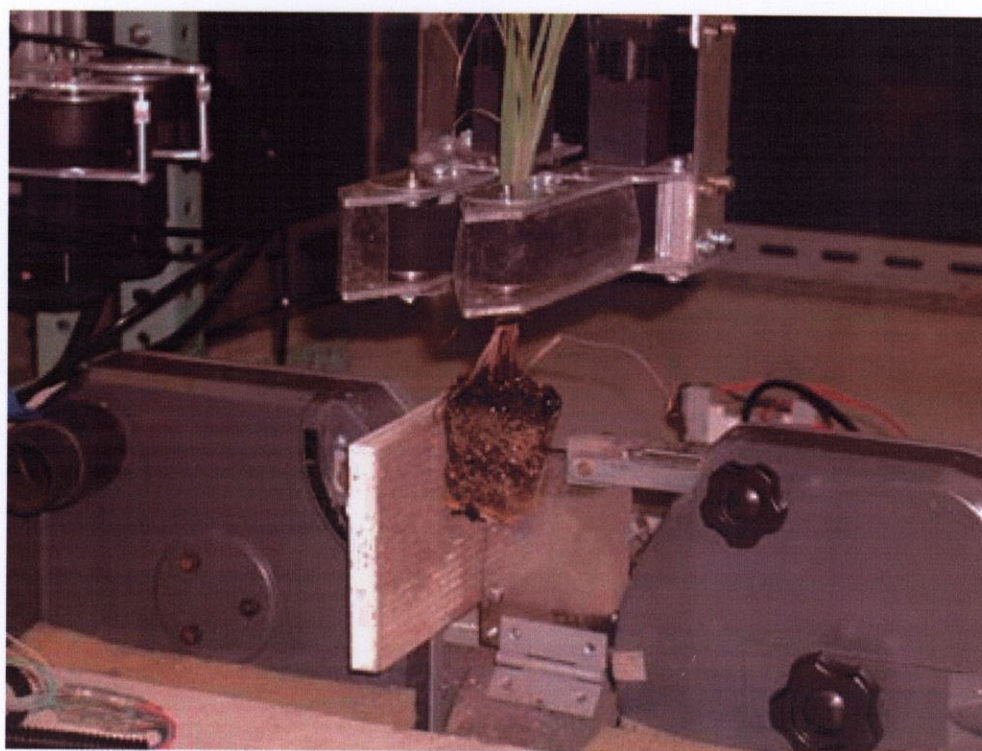


図 14 根鉢の切断

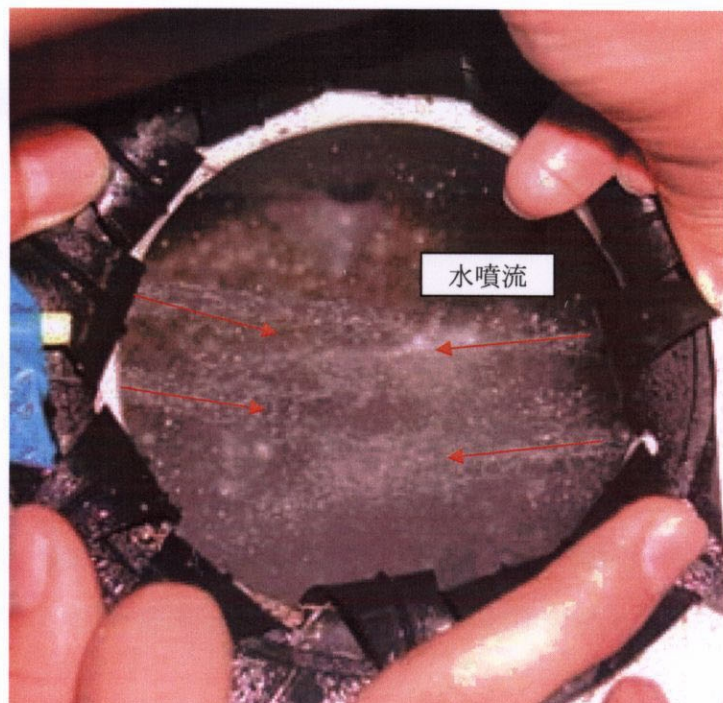


図 15 根鉢の洗浄に用いた水噴流

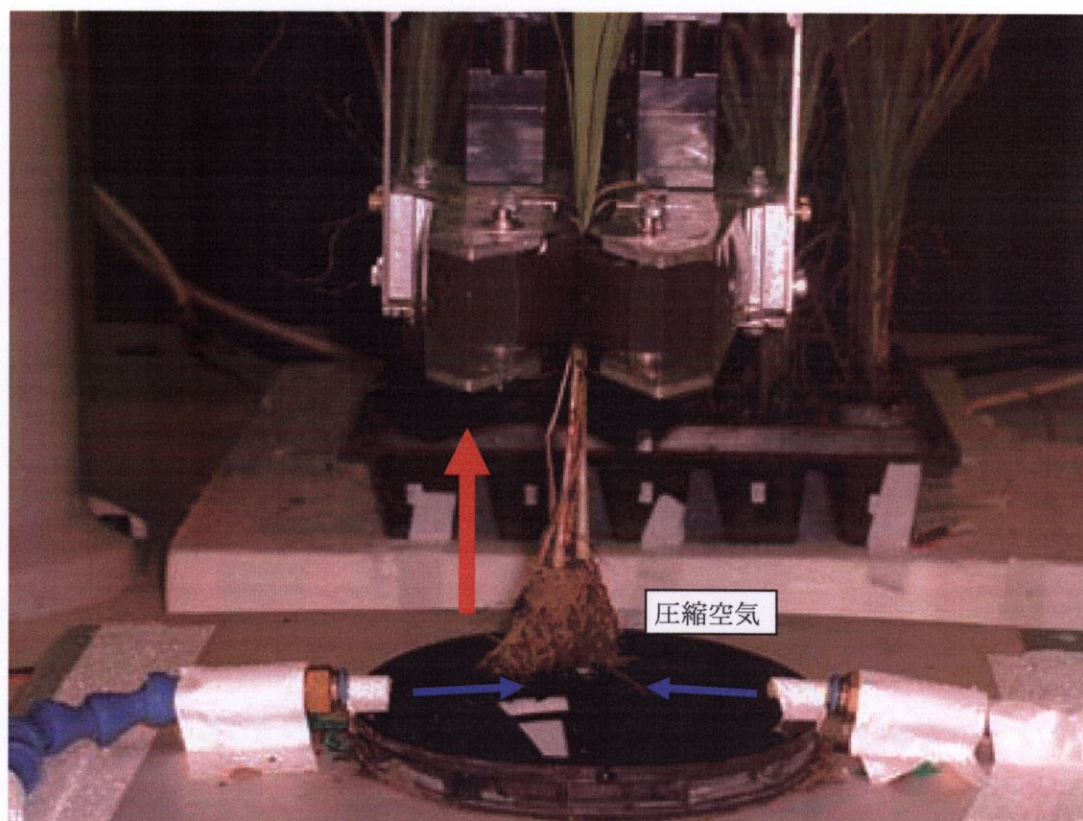


図 16 圧縮空気により水を飛ばしている所

第6項 中間コンベアと個別苗把持機構(SSP)による複数の苗の株分け

根鉢の切断、および洗浄を行った後でも、苗は根の部分でお互いが接続されている。苗を個別に分離するために、以下のような方法を考案した。

1. CSPM を、中間コンベアの上に移動させる。その時、CSPM の出口と中間コンベアの入口の水平位置が重なるようにする。
2. CSPM のベルトを駆動し、苗を繰り出す。それと同時に中間コンベアのベルトを駆動し、繰り出された苗を取り込む。
3. 複数の苗を、重ならないように中間コンベアのベルトの間に一列に並べる
4. 中間コンベアの反対側の出口で、ロボット2に取り付けられたエンドエフェクタを待機させる。
5. 苗が反対側の出口でベルトの間から繰り出されると、待機していたエンドエフェクタが先頭の苗を吸着する。
6. 苗を吸着したことを、圧力の変化から感知し、ベルトをストップさせることで苗の繰り出しを止める。
7. エンドエフェクタと中間コンベアを同時に動かし、先頭の苗と、それ以外の苗を引き離す。ある程度お互いが離れた時点で、エンドエフェクタのエアグリッパと中間コンベアのエアクランパーを閉じ、それぞれをしっかりと保持する。そして、株分けを完了させる。
8. 4 から7の工程を苗が中間コンベア内になくなるまで繰り返す。

苗は、CSPM によってセルトレイから取り出されるとき、ほぼ一列に並べられる。しかし、さらに苗同士の間隔を広げるため、中間コンベアがロボット1とロボット2の間に設置されている。ロボット1は苗を中間コンベアに送り込んだ後は、引き続き別のセルの苗の取り出し、および根鉢の処理を行う。中間コンベアは、基本的にCSPMと同じく、1対のスポンジを接着したベルトと、ステッピングモータによって構成されている。また、苗の分離を容易にするために、図17のようにステッピングモータ(オリエンタルモーター製、PK564BW-T3.6)によって全体が回転する構造となっている。そして、分離を行うときに、エンドエフェクタによって把持された苗以外の、残りの苗を保持するために、空

気圧を用いたエア克蘭パー（ブリヂストン製，エア克蘭パーC15-63）が装着されている。

苗を CSPM から中間コンベアに引き渡すため，それぞれのベルトを同時に同じ方向に駆動する．中間コンベアのベルトの移動速度は，CSPM のその2倍に設定されており，苗を一行に並べることと，苗同士の間隔を広げることを確実なものにする。

中間コンベアの出口には，前述のロボット2に接続されたエンドエフェクタが待機している．このエンドエフェクタを個別苗把持機構（Single shoot picker 以下 SSP）と呼ぶ．図 18に SSP の側面組立図を示す．SSP は中間コンベアから繰り出された苗を1本だけ吸着，把持することができるように設計されている．SSP は，外径 35 mm のアルミパイプや圧力センサ（キーエンス製，AP-44・AP40A），上下に取り付けられたエアグリップ（SMC 製，MHC2-20D）等から構成されている．図 19に SSP の外観を示す。

アルミパイプの一端は吸引機に接続されている．吸引機としては，家庭用の掃除機を用いた．これは予備実験の結果，苗の吸着には，圧力をどこまで下げられるかよりも，風量をどこまで増やせるかが重要であるとわかったためである．掃除機は，モータを吸引した空気によって冷却する構造となっているため，吸込む先端をこのように細くすると，短時間でモータの温度が上がり安全装置が働くことで停止してしまう．掃除機のオーバーヒートを防ぐため，掃除機本体と SSP をつなぐパイプの途中に穴を開けエアシリンダ（SMC 製，MVGQM20-100）によりその穴を開閉できる構造とした（図 20）。

苗を吸着するため，アルミパイプの先端をバイスで潰し，スリット状にした．一度に1本だけの苗を吸着するため，先端部のスリットの幅は，苗の太さに合わせて1mm とした．SSP によって1本の苗が吸着されると，パイプ内の圧力が急激に下がる．するとパイプの側面に取り付けた圧力センサがそれを検知し，信号をパーソナルコンピュータに伝える．その結果中間コンベアのベルトを停止させる．その時，吸着された苗以外の残りの苗は，依然中間コンベアのベルトの間に保持されている（図 21(a))．苗を吸着したかどうかの圧力の閾値は予備実験での数回の試行から決定した．

その後，分離を行うが，その手順は以下の通りである．

1. SSP と，中間コンベアを同時に同じ角速度で逆方向に回転させる．その際，現在 SSP が保持している苗と，中間コンベアに保持された残りの苗との接合部にあた

る, お互いの茎の根元の相対位置が変化しないようにする. また, 吸着された苗と残りの苗をより確実に分離するため中間コンベアのベルトを逆回転させる.

2. 初期位置から10度回転したところで, スリットの上部に取り付けたエアグリップを閉じ, 吸着された苗を把持する. そして, さらに 10 度回転したところで, スリットの下部に取り付けたエアグリップを閉じる. それと同時に中間コンベアに取り付けられた空気圧のアクチュエータで左右から苗を挟み, 残りの苗を保持する(図 21(b), (c)).
3. その後, SSP と中間コンベアをそれぞれ初期位置から90度まで回転させる.
4. SSP を水平手前に引き, 分離が完了する(図 21(d)).

前述の通り, ステージ4において, 個々の苗は根をセル内で伸張させ根鉢を形成する. 根鉢の下部を切断し, 培養土を完全に洗浄した後でもなお, 苗の根は絡み合っている. そのため, 単純に水平方向に引っ張って, 分離すると茎が折れてしまったり, 根が千切れてしまったりする. 経験上, このような苗の塊は, 扇形に開きながら引っ張ると, 最も小さな力で分離することができる. 植物に与えるダメージを少なくするためにこの分離方法が採用された.

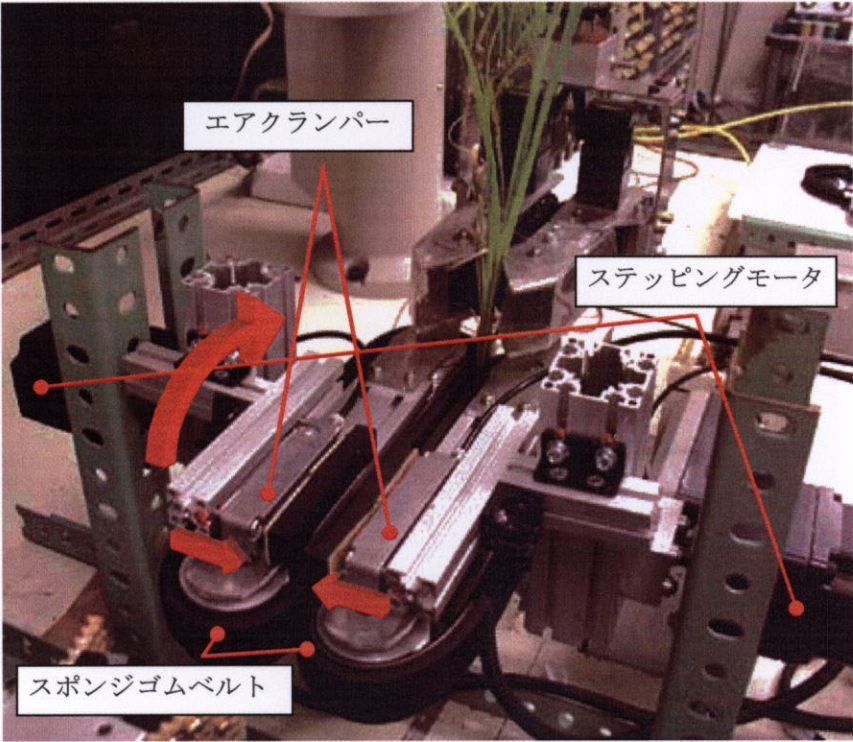


図 17 中間コンベアの外觀

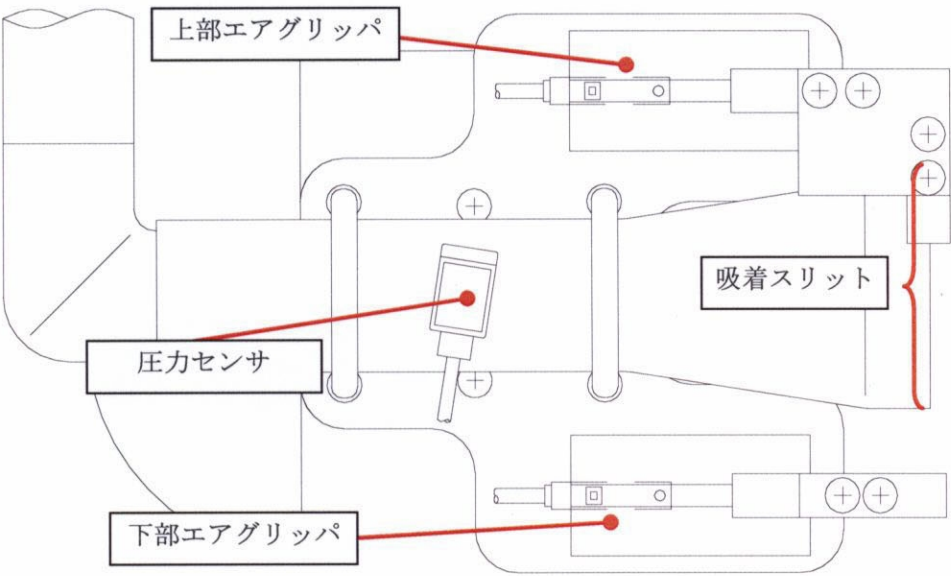


図 18 SSP の組立図

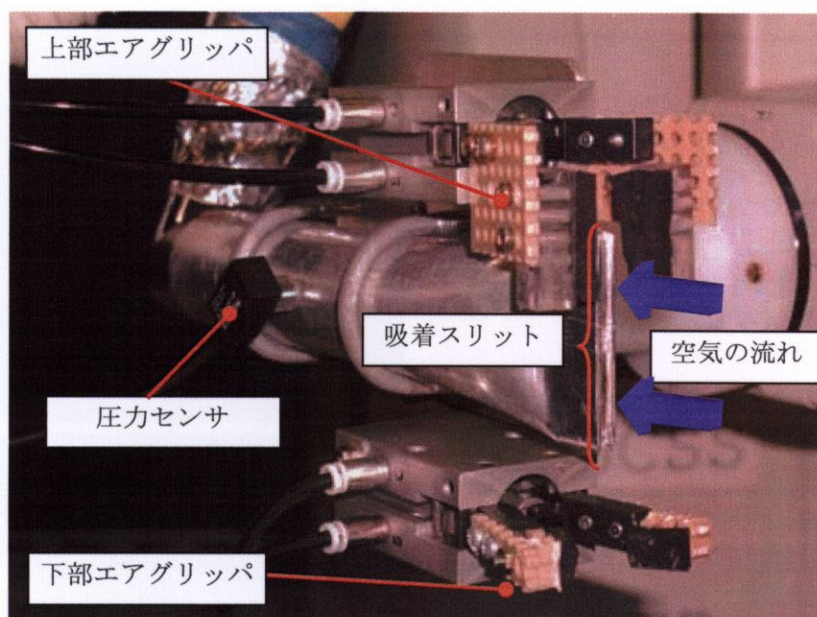
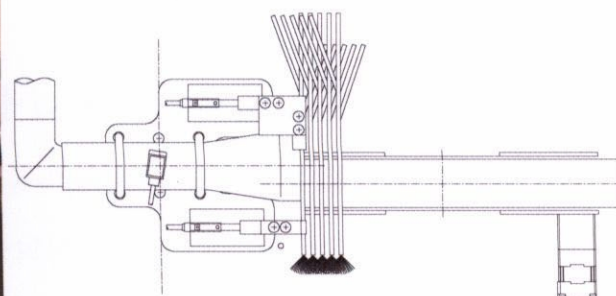
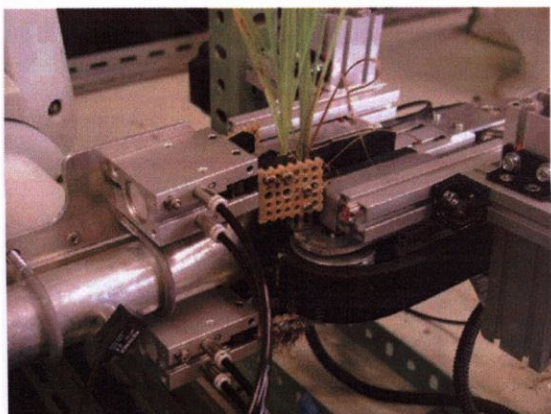


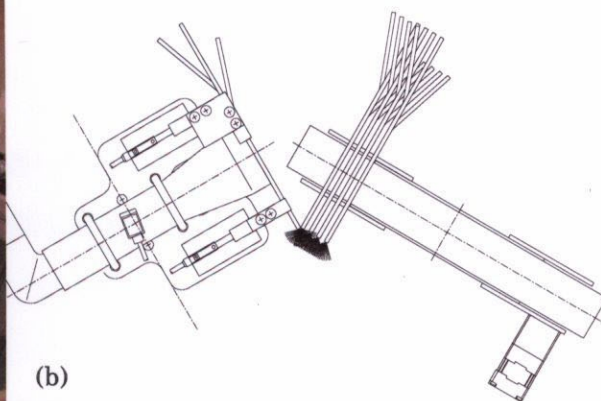
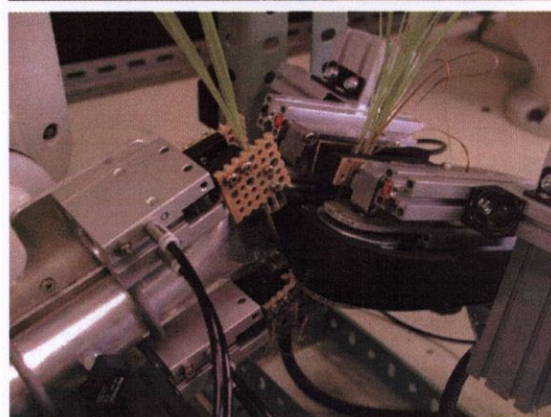
図 19 SSP の外観



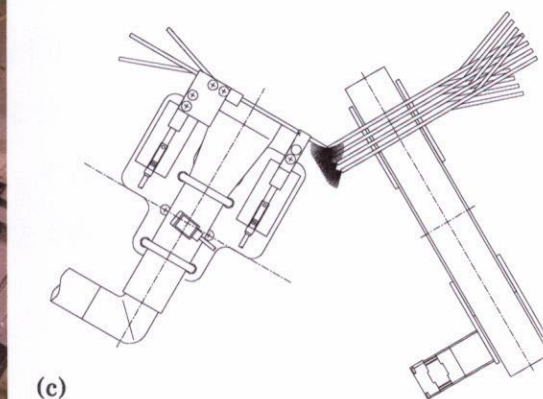
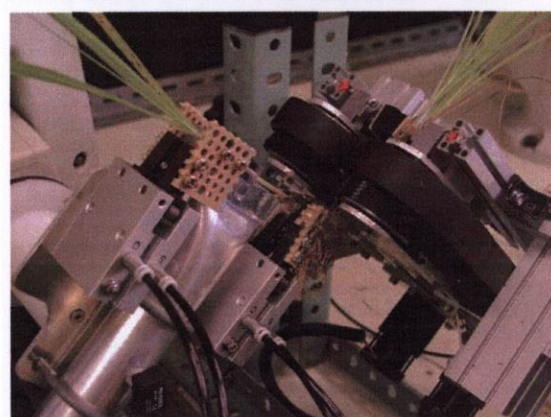
図 20 掃除機およびオーバーヒート防止機構



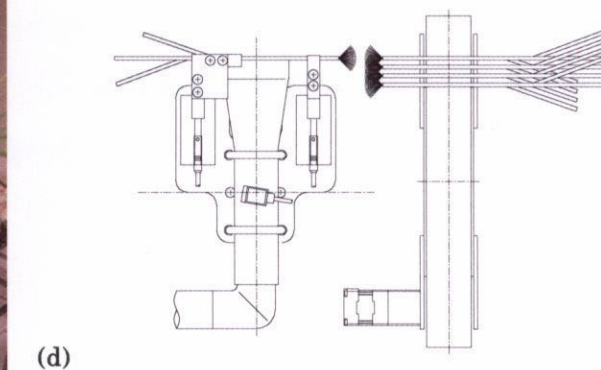
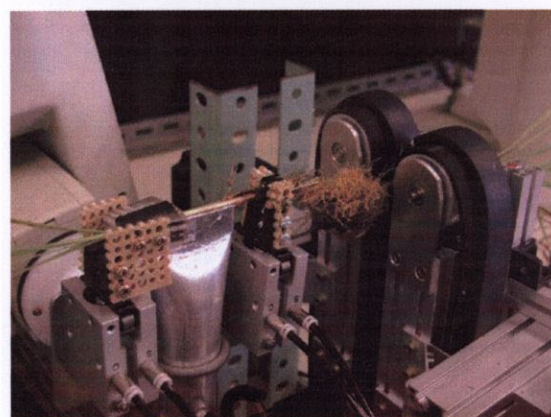
(a)



(b)



(c)



(d)

図 21 中間コンベアと SSP による株分けの様子

第3節 評価実験

第1項 CSPM によるセルトレイからの苗の取出し

ロボット 1 に取り付けられたエンドエフェクタ CSPM の評価を行うため以下のような実験を行った。まず、50 穴のセルトレイを半分に分割したセルトレイの全てのセルに、セル苗を入れる。その後、ロボット 1 に、苗を取る動作のみを行わせ、適切に 1 個のセル苗を取出すことができたか記録する。

第2項 SSS による株分け

株分けの実験では、移植後約 60 日経過した苗を用いた。実験の手順は以下の通りである。また、それぞれの工程に要した時間を計測した。

1. ロボット 1 の近くの決められた位置にセルトレイを設置し、その中にセル苗を一つだけ入れる。
2. CSPM によって苗を取り出し、続いて根部の切断、洗浄を行う。
3. 中間コンベアと SSP によって株分けを行い、正しく 1 本に分けられたもの、2 本同時に分けられたもの、3 本以上同時に分けられたもの、株分けの途中で折れたもの、それぞれの本数を記録した。また、それぞれの苗の茎の長さ、茎の太さを計測した。茎の折れた苗に対しては長さ、太さの計測を行わなかった。

第3項 苗の活着率

苗が傷ついていないかどうか調べるため、本システムによって分けられた苗の活着率を調査した。システムによって分けられた苗と、手によって分けられた苗をそれぞれ、新しいセルトレイ 10 セル分ずつ移植し、1 ヶ月屋外で育苗を行った。この実験に用いた苗は、株分け実験に用いたものとは異なる。

第4節 結果および考察

第1項 CSPM によるセルトレイからの苗の取出し

CSPM による苗の取出しの精度は表 1 のようになった。2 つのセルを同時に把持した原因は、隣り合ったセルの苗の葉が巻き込まれたためである。この問題は、苗が CSPM によって把持される前にその葉をある程度剪定することで解決できるはずである。また、失敗したものは、苗があまり成長しておらず、そのため葉を把持することが出来なかった。今回の実験の設定では、根鉢を含めた苗の全高が 115 シ以上でないと把持することができない。実用化するためには、適切な成長段階の苗を用いることが重要であろう。

表 1 苗取り出しの精度

	セルの数	パーセンテージ
1 セル	33	86.8%
2 セル	4	10.5%
失敗	1	2.6%
合計	38	100%

第2項 根部の切断および洗浄

根部の切断と洗浄は定量的に判断することができなかったが、どちらも適切に行うことができた。水噴流が直接、茎に傷を与えることは観察できなかった。しかし、次項で述べるが、水噴流が、根鉢に当たった時に、根鉢が水平方向に回転し、その捻りモーメントにより苗が根元から折れるケースが見られた。予備実験から、洗浄で根鉢の土が落ちているかどうか、その後の株分けの精度を大きく左右することが経験上分かっている。これは、土は根にとってボンドのような役割を果たしているためと考えられる。そのため今回の実験では、1 セルあたり 77 秒をかけて洗浄を行った。これは、ロボット 1 による工程のほとんどの時間を占める結果となった。今後この工程を高速化して行くためには、水噴流の流量を増やすことが必要だと考えられる。

第3項 SSP による株分け

本システムを用いて、サトウキビの組織培養苗の株分けを行ったところ、表 2のような結果となった。表 3は 1 セルあたりの苗の本数を示したものである。また、表 4は株分けされた苗の主要な寸法を示したものである。

表 2 株分けの精度

	苗の本数 (本)	成功率
1 本	91	77.1%
2 本	8	6.8%
3 本以上	9	7.6%
折損	10	8.5%
Total	118(25 セル)	100.0%

表 3 1 セルあたりの苗の本数

	平均	最大	最小	標準偏差
1 セルあたりの苗の本数(本/セル)	4.7	9	2	1.9

表 4 株分けされた苗の主要寸法

	平均	最大	最小	標準偏差
主茎長さ (mm)	82.9	138	25	27.6
主茎太さ (mm)	2.7	5.1	1.2	0.9

全部で 25 セル, 118 本の苗の株分けを行った。その結果, 77. 1%の苗を 1 本の苗に分離することが可能であった。2 本以上の苗が同時に分離された理由は、以下のようなものである。

- 1. 先頭の苗が細く短いと、苗が SSP に吸着されても圧力が閾値を下回らないので、苗の繰り出しが止まらず、二番目の苗が吸着されて始めてベルトが停止する。その結果, 2 本の苗が同時に分離された。

- 2. 1とは逆に二番目の苗が、細く短いと、中間コンベアのベルトがその苗を保持しきれず、先頭の苗に付いて行った。
- 3. 苗はその葉を左右に展開させているため、二番目の苗の葉が先頭の苗よりも前に出る場合がある。後の苗の葉が、先行する苗よりも先、又は同時に吸着された時に、2 本同時に分離されるケースが見られた。
- 4. 苗の茎同士がベルトの間でクロスしている場合にも同じように後ろの苗の葉が先に吸着される。その結果 2 本以上の苗が同時に把持された。苗の茎同士がクロスする現象は特に、1 セルあたりの苗の本数が多い時に生じた。

表 5と表 6は、1セルあたりの苗の本数が4 本以下の場合と5 本以上の場合の分離の割合を示したものである。

表 5 株分けの精度（1 セル当たり 4 本以下）

	苗の本数（本）	パーセンテージ
1 本	34	89.5%
2 本	0	0.0%
3 本以上	0	0.0%
折損	4	10.5%
合計	38(12 セル)	100.0%

表 6 株分けの精度（1 セル当たり 5 本以上）

	苗の本数（本）	パーセンテージ
1 本	57	71.3%
2 本	8	10.0%
3 本以上	9	11.3%
折損	6	7.5%
合計	80(13 セル)	100.0%

表 5から、1 セルあたりの苗の本数が 4 本以下の場合、2 本以上の苗が分離されることが無かったことがわかる。一方、表 6から、1セルあたりの苗の本数が5 本以上の場合、21.3%の苗が 2 本以上に分離されたことがわかる。よって、あらかじめ、メリクロン苗を 1 セルあたり 4 本以下に押さえて移植を行えば高い確率で、苗が分離出来ることがわかった。

苗が折損した理由は以下の通りである。

1. 水噴流による洗浄の時に、水流によって根鉢が回転し、捻りモーメントによって茎の根元が折れること。
2. 中間コンベアと SSP が株分けを行うときに、苗同士の固着力が、茎の曲げ強さを上回り、折れてしまったこと。

1の問題は、水噴流の当て方を改良することや、水噴流の流量を増やし、水が根鉢全体に当たるようにすることで、解決できると考えられる。2の問題は、SSP だけではなく、中間コンベアにも茎の根元を保持するアクチュエータを取り付けること、そして、苗同士を強制的に切り離すカッターの様な機構を取り付けることで改善できると考えられる。ただし、強制的に切断した場合、その後の苗の活着にどのような影響を及ぼすかは調査検討する必要がある。

第4項 株分けに要した時間

1セルの取り出しや根部の切断、洗浄に1サイクルあたり2分かかった。また、1本の苗を株分けする場合、繰り出しや把持、分離など1サイクルの動作を行うのに30秒を要した。しかし、以下の理由によりほとんどの場合、実際にかかった時間は苗の本数に30秒をかけたものよりも長くなった。

1. 次章で詳しく述べるが、苗には、主茎と活力のある緑の葉身の他に、枯れて茶色くなった葉が含まれている。SSP は、主茎を吸着することを想定して設計されている。しかし、枯れた葉を吸着すると、主茎を吸着したときと同様に圧力が低下し、苗を吸着したときと同様の株分け動作を行った。言い換えると、SSP は、苗が枯れた葉を認識することはできないのである。このような余計な動作を行うことで、実際に株分けに要した時間は長くなった。
2. 苗の茎同士がクロスしていたり、その根部の固着が強い場合、一度吸着されても、ベルトの逆転によって再び SSP から離れてしまうことがあった。この場合もロボットは同じ分離動作を再び繰り返さなければならず、その結果、余計な時間がかかった。

1の問題については、画像処理などの光学的なセンサを用いることで、枯れた葉と主茎を判断し、解決可能であろう。また、2の問題については、まず、吸着ポンプの風量を増やすことが解決策として考えられる。また、それでも無理な場合は前項でも説明したように、苗同士を強制的に分離する機構が必要であろう。

第5項 苗の活着率

表 7に、手作業で株分けを行った苗と、本システムによって株分けされた苗の一ヵ月後の活着率を示す。株分けシステムによる活着率は手作業によるものよりも低い結果となった。その原因としては、株分けシステムが苗に何らかのダメージを与えているものと考えられる。前項でも述べたように、ほとんどの苗には枯れて茶色い葉が付着している。完全に枯れている場合には、株分けの際に SSP が枯れた葉をむしりとっても、問題ないが、枯れた葉の葉鞘部(茎を包んでいる部分)がまだ枯れていない場合は、それを取り去ることで、苗の生長にダメージを与える可能性がある。手作業の場合は、無理に枯れた葉を除去することはない。この事が活着率に差をもたらしたのだと考えられる。これについては今後調査が必要であろう。

表 7 苗の株分け後の活着率

	手作業	株分けシステム
活着率	72.1%(44 本)	66.7%(36 本)
不活着率	27.9%(17 本)	33.3%(18 本)
合計	100%(61 本)	100.0%(54 本)

第5節 まとめ

サトウキビ培養苗の株分けを自動化するため、ロボットシステムの設計、試作、評価を行った。その結果を以下に示す。

1. 人間の指先がサトウキビの苗の様な細長い物体を 1 本ずつ連続的に複数本同時に把持する方法を模して、エンドエフェクタ **CSPM**(連続苗把持機構)を設計した。このエンドエフェクタは、互いに向かい合わせたスポンジ付のゴムベルトをステッピングモータによって同時に駆動させることで苗の取り込み、繰り出しを行う。エンドエフェクタ **CSPM**は **SCARA** 型ロボットに取り付けられ、**CSPM**全体をロボットによって移動させながら、ゴムベルトを駆動することで、密生したサトウキビのセル苗を、連続的に重ならないように、傷つけずにしっかりと把持し、ハンドリングすることができることが明らかとなった。また、苗を 1 本ずつ繰り出すことができることが判明した。セルトレイからの苗取り出しの成功率は 86.8%であった。失敗の原因は、隣接するセルの苗の葉を **CSPM** が巻き込むことであった。
2. 苗の根鉢は軟らかいが、根が絡み合っているため、切り難いという特性を持っている。しかし、本研究においては、刃が一定の方向に走っているバンドソーを用いて切断を行った。その結果バンドソーの中を直線的に通過させるだけで切断が可能であることが示された。さらに、切断中の根鉢をエアシリンダによって保持することでより確実に任意の高さで切断を行えることが明らかとなった。また、ポンプによって加圧された水流によって根部の洗浄を行った。根部に付着している培養土及び、不必要な根が完全に除去されない場合、その後の株分けの精度が落ちることが予備実験より判明した。この問題を解決するためには、水圧よりも水量を高めることが重要であることが明らかとなった。
3. **CSPM**によって把持されている複数の苗の間隔をさらにひろげ、株分けを確実にするためと、「根鉢の処理」と「株分け」を並行して行うため、ロボット 1 とロボット 2 の間に中間コンベアを設けた。中間コンベアは、**CSPM**と同様に、ステッピングモータによって駆動される 1 対のスポンジベルトを向かい合わせにした構造となっている。また、苗を 1 本だけ吸着、把持する構造のエンドエフェクタ **SSP**(個別苗分離機

構)を設計, 試作した. このエンドエフェクタは垂直多間接型ロボットに取り付けられ, 中間コンベアから順に繰り出される苗を 1 本だけ吸着, 検知, 把持し, 中間コンベアを同期して制御することで個別分離を行う. その結果, 画像処理等の光学的なセンサを用いることなく, 複数の苗の塊から 1 本の苗を分離することができる性能を有していることが明らかとなった. しかしながら, 1 本の株分けに要する時間は最低 30 秒と, 実用化に向けて課題が多いことが示された.

4. 評価試験の結果, 77.1%の苗が適切に 1 本に分けられた. 1 本に分けられなかった原因としては, 苗同士の固着, 苗の大きさが不揃いなこと, 中間コンベアの把持力不足などが挙げられた. また, 1 セルあたりの苗の本数が, 株分けの成功率に影響を与えることが明らかとなった. これにより, もとものの 1 セルあたりの苗の本数を減らすことで, 株分けの成功率が高まることがわかった.
5. 本システムで株分けした苗の一ヵ月後の活着率は 66.7%と, 人手によるものの 72.1%と比較して低くなった. この結果より, ロボットによる株分けが, 苗に対してダメージを与えていることが推測できた. 今後はより, 苗にダメージの少ない株分け方法を検討していく必要がある.
6. 本研究で開発した新しい株分けの方法は, 室内順化中のサトウキビ培養苗の株分けを自動化する有力な方法であることが明らかとなった. このシステムを実用化するためには, エンドエフェクタの改善や, 株分けの方法の改良, オペレーションタイムの短縮, 信頼性の向上など様々な点について今後多くの改良を加えて行く必要性が示された.