HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	直播テンサイ用自動間引き・除草機の開発に関する研究
Author(s)	寺脇, 正樹; TERAWAKI, Masaki
Description	北海道大学博士論文 (2004) Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2004)
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 26(2), 255-316
Issue Date	2004-12-27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/5634
Type	departmental bulletin paper
File Information	26(2)_275-282.pdf

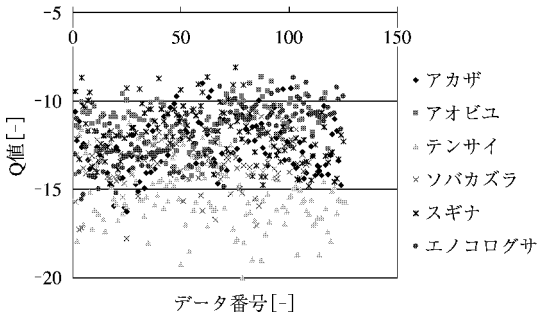
Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

$$\begin{bmatrix} S_{beet} \\ S_{weed} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -13.7886 & 12.5832 & 6.4925 & 0.4341 & 2.0261 & 75.1104 & -0.01637 & 0.07348 & -94.0376 \\ -12.4633 & 11.7082 & 8.6090 & 1.5221 & 2.9986 & 80.9749 & -0.01892 & 0.07824 & -87.4338 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ M \\ F \\ LP \\ H \\ C \\ Wl \\ Ws \\ l \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

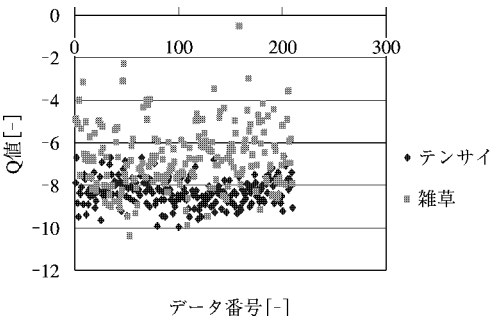
Ⅰ．結果および考察

a．*YIQ* 値の取得結果

図 2.17 に Q 値の算出結果を示す。図 2.17 (a) はデジタルカメラで撮影したテンサイおよびアオビユ，アカザ，ソバカズラ，エノコログサ，スギナの Q 値を示しており，図 2.17 (b) は CCD ビデオカメラ画像のもので，デジタルカメラと CCD ビデオカメラは同様の雑草を含んでいる。なお，デジタルカメラ，動画ともに，Q 値は晴天時の昼間に遮光をして撮影したものである。なお，Q 値は算出対象植物内の Q 値を平均したものである



(a)　デジタルカメラ画像



(b)　CCD ビデオカメラ画像

図 2.17　Q 値の分布

デジタルカメラ画像から算出した Q 値の分布を見ると，スギナおよびアオビユの Q 値は比較的テンサイより大きい。アカザ，ソバカズラおよびエノコログサについては，Q 値がテンサイと重なる部分もあるが，平均するとテンサイより大きい傾向がある。CCD ビデオ画像についてはテンサイ，雑草の 2 つのクラスに分類し，プロットしたものである。デジタルカメラ画像と比較すると Q 値の絶対値が異なるが，これは使用したカメラの特性によるものであると考えられる。テンサイと雑草の Q 値の分布はデジタルカメラのそれとほぼ同じである。CCD ビデオカメラ画像の Q 値に注目すると，テンサイの Q 値は−8 を中心に，−6〜−10 前後まで分布している。雑草の Q 値は−6 を中心に，−2〜−10 前後までテンサイと比較すると幅広く分布している。テンサイにおいて Q 値が−6 以上になるものは存在しなかった。Q 値のしきい値を−6 に設定し，−6 より小さいものをテンサイの可能性があるグループ，−6 以上のものを雑草と判断することで，約半数の雑草の識別が可能となる。

このように，*RGB* 輝度値から算出した Q 値はテンサイと雑草の識別において有効なパラメータになり得ることが明らかとなった。

b．天候による Q 値の変動

本識別の判別分析で用いた Q 値は全て晴天時に遮光を行って撮影したテンサイおよび雑草から算出したものである。曇天時には遮光を必要としないため，晴天時に遮光を行って撮影した画像と曇天時に遮光を行わないで撮影画像では Q 値が変動することが予想される。そこで，同一のテンサイを用い，天候の違いによる Q 値の変動を調べた。図 2.18 にテンサイの天候と Q 値の関係を示す。

曇り，晴れ時に遮光を行わなかった場合の Q 値はほぼ一定であった。遮光しなかった場合に Q 値がほぼ変動しないという結果は登坂ら[56]によって明らかにされている。しかしながら，晴天時に遮光した場合の Q 値と遮光しなかった場合を比較すると約 1.1 の明確な差が現れた。

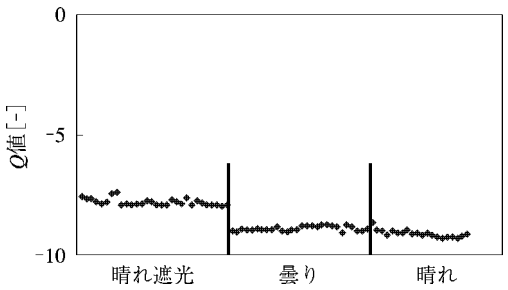


図2.18　テンサイの天候による Q 値の変化

YIQ 表色系においては，輝度成分は Y 成分により表現される。また，本実験で用いたCCDビデオカメラはオートアイリス機能を備えているため，理論的には Q 値は屋外環境に影響されないことになる。本識別では植物体のみを識別対象としているため，Q 値の範囲がおよそ−2〜−12であり，このスケールの場合，1.1という差は本研究の識別手法においては無視できないものとなると考えられる。線形判別関数を算出する際に用いた Q 値は全て晴天時に遮光して撮影した値を用いた。従って，曇天時に撮影した植物体を識別する際に用いることは不適切となる。異なるほ場で晴天時に遮光を行って撮影したテンサイと曇天時に遮光を行わず撮影したテンサイの Q 値の比較を表2.10に示す。この結果は，それぞれの条件でのテンサイ30個の平均値である。

表2.10より，晴天遮光時の平均 Q 値は−8.29であり，曇天非遮光時の平均 Q 値は−9.28となり，−1.0の差があった。標準偏差はほぼ同じになった。この結果から曇天時に遮光を行わなかった場合，Q 値は晴天時遮光した場合と比較して全体的に1.0マイナス側にシフトしているとすることができる。よって，本研究では，曇天時に遮光しないで識別する際には，算出した Q 値に1を足した値を補正 Q 値として用いることにした。実用的な識別システムを考える場合は，遮光板の装着を検出するスイッチを設け，そのスイッチの状態を検出することにより，自動的に Q 値を補正するシステムとする必要がある。

表2.10　晴天時と曇天時の Q 値の比較

	晴天時遮光	曇天時非遮光
平均 Q 値	−8.29	−9.28
標準偏差	0.69	0.67

c．形状特徴量と色情報を組み合わせた識別結果

線形判別関数の検証用サンプルとしてテンサイ348個，雑草698個を使用した。これらのサンプルは線形判別関数を作成するために用いたサンプルとは異なる時期(6月)に異なるほ場で播種されたテンサイとそのテンサイほ場周辺に生育していた雑草である。線形判別関数を作成したデータから，面積が650以下の識別対象サンプルは2値化の際に土壌でありながら植物と判断されたものが含まれること，テンサイの面積の最小値が800以上であったことにより，面積が650以上のサンプルを識別対象とした。表2.11に Q 値のみによる識別結果を示す。テンサイの全てが−6以下となり，テンサイの可能性があると判断された。雑草については，51.7%の雑草の Q 値が−6以上となり，雑草であると識別され，49.3%の雑草がテンサイの可能性があると判断された。このように，Q 値のみの識別では雑草の約半数がテンサイの可能性があると判断されたが，テンサイに関しては全てテンサイの可能性があると判断されており，この段階で誤識別したサンプルはなかった。

Q 値が−6より小さくなったサンプルについて前節で述べた線形判別関数による識別を行った。線形判別関数による識別結果を表2.12に示す。対象となったサンプル数はテンサイ348個，

表2.11　Q 値のみによる識別結果

	サンプル数	Q 値−6以上(%)	Q 値−6以下(%)
テンサイ	348	0.0	100.0
雑草	698	51.7	49.3

表2.12　判別分析のみによる識別結果

	サンプル数(個)	識別結果（%） テンサイ	雑草
テンサイ	348	89.7	10.3
雑草	337	18.7	81.3

雑草 337 個であった。識別の結果，テンサイの識別正答率は 89.7%であり，雑草の識別正答率は 81.7%であった。Q 値での識別と線形判別関数での識別を総合した結果を表 2.13 に示す。テンサイの識別正答率は 89.7%であり，雑草の識別正答率は 91.0%となった。

表 2.13　Q 値と判別分析を組み合わせた識別結果

	サンプル数（個）	識別結果（%） テンサイ	雑草
テンサイ	348	89.7	10.3
雑草	337	9.0	91.0

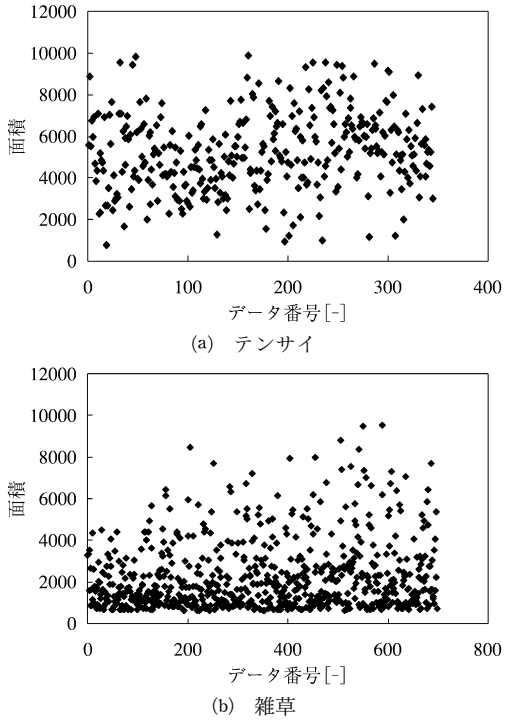


図 2.21　テンサイおよび雑草の面積分布

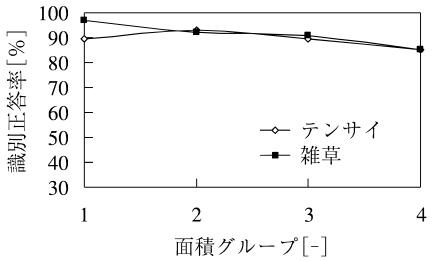


図 2.22　面積と識別正答率の関係

テンサイを雑草と誤識別したものでは，風の影響等により形状が大きくが変化したものが多い。図 2.19 および図 2.20 には風の影響等により形状が変化したものを示す。本手法では形状特徴量のみだけではなく色情報も使用しているため，ある程度の形状の変化には対応できる。図 2.19 の場合では風の影響等により形状が変化しているが正しくテンサイと識別された。しかしながら，図 2.20 の場合では，雑草と誤識別されている。このような違いは形状の変化のみだけではなく，Q 値の変化が大きく影響しているものと考えられる。図に示したように，風の影響等により葉が裏返ると，裏返った部分は白くなって Q 値が高くなるため，テンサイの平均 Q 値も高くなる。本手法では Q 値の識別に対する寄与率が最も高いため，誤識別が起きる。供試したほ場は防風林がなく風が強いこと，トラクタに装着した CCD ビデオカメラにより撮影しているため，風の影響を完全に避けることが不可能であったことがテンサイのテンサイの誤識別に大きく影響しているものと考えられる。雑草で誤識別したものは主に，Q 値が低く，かつ形状がテンサイと似て細長い例が多かった。また，晴天時と曇天時において，識別正答率の違いは認められなかった。

デジタルカメラ画像で考案した識別手法ではパラメータに面積を用いていたので，面積のばらつきに対応できなかった。CCD ビデオカメラ画像での識別に供したテンサイ，雑草サンプルの面積の分布を図 2.21 に示す。テンサイの面積は平均 5000 で，最小値が 767，最大値が 9902 であった。雑草の平均は 2200 であり，最小値が 651，最大値が 9544 であった。テンサイと雑草の面積を比較すると，雑草は面積が 2000 以下のサンプルが約 58%を占めており，テンサイより小さいものが多かったと言える。しかしながら，テンサイ，雑草ともに面積の最小値と最大値は約 13 倍の差があり，同一時期の同一ほ場であっても面積のばらつきは大きかった。

テンサイおよび雑草の面積と識別正答率の関係を調べるために，テンサイ，雑草のサンプルを面積順にソートし，サンプル数が一定となる

ように 4 つのグループに分割し，識別正答率を算出した。テンサイの面積グループは小さい方から① 0 ～4003,② 4003～5150,③ 5170～6493,④ 6493～9902 であり,雑草の面積グループは小さい方から① 680～1023，② 1023～1647，③ 1647～2791 および④ 2791～9544 である。面積と識別正答率の関係を図 2.22 に示す。テンサイの識別正答率は面積グループ 3 まではほぼ 90%を維持しており，面積グループ 4 になると 85.1%まで低下した。また，雑草に関しても面積グループ 3 までは識別正答率が 90%以上を維持し，面積グループ 4 になると，テンサイと同様に識別正答率は 85.1%に低下した。

テンサイのグループ 4 で誤識別した代表的な

図 2.19　形状が変化したが正しくテンサイと識別された画像例

図 2.20　形状が変化しテンサイが誤識別された画像例

図 2.23　テンサイの面積グループ 4 の画像例

図 2.24　雑草の面積グループ 4 の画像例

図 2.25　テンサイ同士が重なる画像例

図 2.26　テンサイと雑草が重なる画像例

サンプルを図 2.23 に示す。この場合，本葉が 4 枚であり，その大きさがほぼ同程度の大きさに生長している。テンサイ全体的に見た場合，誤識別の主原因は風等の影響で葉が裏返り，Q 値が低くなることであった。しかしながら，図 2.23 に示したサンプルの場合，識別に最も寄与する Q 値の値は－9.5 と低かったため，誤識別の原因は形状であると考えられる。このようなサンプルが多いテンサイグループ 4 でも識別正答率は 85.1％であり，平均識別正答率 89.7％と比較しても識別正答率の減少は 4.6％であった。

また，面積の小さいグループ 1 においては平均識別正答率とほぼ同じ結果となったこと，デジタルカメラ画像で考案した面積をパラメータに含む識別手法を用いると，識別正答率が約 60％まで減少したことを考慮すると，本識別手法は大きさのばらつきに依存しない識別手法であると考えられる。

雑草のグループ 4 で誤識別する代表的なサンプルを図 2.24 に示す。この場合は，雑草同士が重なり合っている場合が多い。雑草はその形状が丸いものが多く，重なり合うと必然的にテンサイの形状と近くなる。Q 値が高い雑草同士が重なり合った場合，本識別手法では形状より Q 値が識別に対する寄与率が高いため，Q 値が低い雑草同士が重なり合うと誤識別が増える。雑草のグループ 4 の場合，雑草個体が大きいものもあるが，雑草同士が重なり合い，面積が大きくなったものも含まれる。この場合，識別正答率は 85.1％であり，平均識別正答率 91.0％と比較すると 5.9％減少した。雑草同士の重なりについては，雑草の繁茂数，状態生育により変化するものであり，雑草の撮影に供したほ場はとりわけ，雑草の繁茂が多かったため，雑草同士での重なり合いが多かった。テンサイについても雑草との重なり合いを検討した。テンサイ同士が重なり合う例およびテンサイと雑草が重なり合う例を図 2.25，図 2.26 に示す。

これらの例は全て正しくテンサイと識別され，テンサイの場合はテンサイおよび雑草が重なってとしても識別に影響を及ぼさなかった。このように，テンサイと雑草の識別において色情報である Q 値と形状特徴量を組み合わせることにより，大きさの依存が少なく，重なり合いにもある程度適応できることが明らかとなった。

d．処理時間

リアルタイムで画像処理を行う場合，処理時間が大きな問題となるため，本識別手法の画像処理時間を計測し，リアルタイム処理が可能かどうか検討した。本研究の識別手法では，植物個体それぞれから形状特徴量を算出するため，画像処理時間は 1 画像当たりの識別対象となる植物個体数に影響されると考えられる。間引き時期のテンサイの大きさを考慮すると 1 画像当たりに識別に供されるテンサイ数は多くとも 3 個となるため，1 画像当たりの画像処理対象となる植物個体数を 1 ～ 3 個に設定し，処理時間を計測した。使用した画像は間引き時期の典型的な大きさの模擬テンサイである。計測には Intel 社製の CPU，Celeron 400 MHz と同 1.3 GHz を使用し，処理時間を比較した。処理時間計測結果を表 2.14 に示す。算出した処理時間は識別に必要な主要処理である画像の 2 値化，形状特徴量算出，輪郭線走査および葉先得点算出，ラベリング，Q 値算出および線形判別関数による識別および全体の処理時間である。ただし，計測誤差，線形判別関数による識別は処理時間短いため計測不能であるため，各部分の処理時間の合計が全体時間とはならない。

両 CPU とも植物個体数が多くなるにつれて処理時間は遅くなり，植物個体数が 3 個の場合，Celeron 400 MHz で 290 ms，Celeron 1.3 GHz で 121 ms であった。植物個体数により処理時間が影響を受ける処理は形状特徴量算出，ラベリングおよび Q 値算出であり，これ以外の処理は作物数に影響を受けなかった。各画像に最大数と考えられる 3 個のテンサイが含まれ，制御用ハードウェアへのアクセス時間を 40 ms と仮定すると，Celeron 400 MHz での総処理時間は 330 ms であり，Celeron 1.3 GHz では 160 ms となる。この処理時間の場合，Celeron 400 MHz では最大 3 Hz，Celeron 1.3 GHz では最大 6 Hz で画像を取得し，識別することが可能である。本研究での視野範囲は縦方向に 300

表 2.14　処理時間計測結果

処理名	Celeron 400 MHz 作物数（個） 1	2	3	Celeron 1.3 GHz 作物数（個） 1	2	3
画像の 2 値化（ms）	32	35	35	10	10	20
形状特徴量算出（ms）	71	86	94	30	40	40
輪郭線走査および葉先得点算出（ms）	9	11	13	10	10	10
ラベリングおよび Q 値算出（ms）	96	130	149	40	50	60
判別関数による識別（ms）	—	—	—	—	—	—
全体の処理時間（ms）	212	264	290	90	110	121

mm に設定しているので，少なくとも Celeron 400 MHz では 0.9 m/s，Celeron 1.3 GHz では 1.8 m/s までの走行速度に対応できることになる。柴田[57] は，市販除草機の諸元から機械除草作業の作業速度は 0.49 m/s〜1.70 m/s と推定している。Celeron 400 MHz を使用した場合でも除草機の推定最低速度には十分に達しており，Celeron 1.3 GHz においては推定最高速度以上で走行可能である。よって，本研究で考案した識別手法の処理時間は十分に実用的であると考えられる。

J．本章のまとめ

本章では，自動間引き・除草機開発のために必須となる画像処理を用いたテンサイと雑草の識別について述べた。

テンサイおよび雑草のデジタルカメラ画像を用い，識別の前処理として画像の 2 値化を行った。2 値化画像から識別に寄与すると考えられる全体の形状を表す形状特徴量を算出し，判別分析法により識別を行った。これら全体の形状を示す形状特徴量のみでは識別困難な雑草種があったため，新たに局所的な形状を表す葉先角度を導入し，識別に供した。判別分析と葉先角度のみによる識別を組み合わせることにより，テンサイの識別正答率 87.2%，雑草の識別正答率 94.4%という良好な結果を得た。

しかしながら，トラクタに装着した CCD ビデオカメラで撮影したテンサイおよび雑草画像にデジタルカメラ画像を用いて考案したアルゴリズムを適用すると，テンサイの識別正答率は約 60%程度となった。これは，デジタルカメラを用いて作成した線形判別関数にはパラメータとして面積を含んでおり，間引き時期のテンサイの大きさのばらつきに対応できないことが原因である。そこで，*YIQ* 表色系の Q 値を識別に供することにした。形状特徴量と Q 値を組み合わせた識別の結果，テンサイおよび雑草の識別正答率はそれぞれ 89.7%，91.0%となった。この結果はデジタルカメラ画像の識別正答率と比較しても遜色のないものである。面積と識別正答率の関係を調べた結果，形状特徴量と色情報を組み合わせた識別手法はテンサイおよび雑草の大きさのばらつきに対応できることが明らかとなった。また，識別の処理時間を検討した結果，使用する CPU により違いはあるが，市販されている機械除草機の速度に対応できる処理速度であることも明らかとなった。

III．シミュレーションによる識別正答率の評価

A．本章の目的

直播テンサイ用の自動間引き・除草機開発のためには，ほ場内でのテンサイと雑草の識別システムが必要不可欠となる。テンサイの間引き作業は必要なテンサイをほ場に残すために行われるので，間引かれるべきテンサイを雑草と誤認識して，除草されたとしても間引き作業の精度には影響しない。しかし，雑草をテンサイと誤認識した場合，雑草の生育を許すことになるとともに，テンサイの欠株の原因となる。このように，テンサイの認識だけではなく，雑草の正確な認識も間引き・除草作業に大きな影響を与える。例えば，Gao ら[58] によるレタスの収穫作業の場合，レタスの認識結果に基づき収穫される。装置が収穫を行うか否かという点において，レタスの認識結果が作業精度となる。一方，テンサイの間引き作業の場合，間引き作業と除

草作業が同一の作業とみなせるため，テンサイの識別正答率をそのまま作業の精度とすることはできない。よって，テンサイと雑草の双方を識別する間引きシステムを構築し，それぞれの識別率の作業の精度への影響を評価しなければならない。

本章では，ほ場内でのテンサイと雑草の識別において，目標とすべきテンサイおよび雑草の認識性能を導くため間引き・除草コンピュータシミュレーションを行った。そして，テンサイ，雑草の認識性能を識別正答率として評価し，それらの識別正答率とテンサイの損失の関係，ほ場でのそれらの識別において考慮しなければならない条件などについて明らかにした。

B．間引き・除草シミュレーションの設定条件

a．播種間隔および目標株間の設定

慣行のテンサイ直播栽培は，うね間 660 mm，中一株を間引きする栽培方法が主流となっている[59]。登坂ら[60]は，自動間引きシステムに適した間引き方法についてほ場実験により検討した。そして，株間が 200～250 mm の範囲になるように株の大小を考慮せずに間引く方法が適当であると結論づけた。

本研究では，慣行のテンサイ直播栽培に基づき，シミュレーションに用いた仮想ほ場のうね間を 660 mm，平均株間を 120 mm に設定した。平均株間のばらつきは北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場でのテンサイ播種機の性能試験データを用いた。うね方向およびうね直交方向の標準偏差はそれぞれ 30 mm，20 mm であった。この結果に基づき，乱数でテンサイの株位置を設定した。間引き後の目標株間は 240 mm に設定した。設定した平均株間と目標株間を表 3.1 に，シミュレーションに用いた仮想ほ場における作物列の座標系を図 3.1 に示す。原点はうね端とした。雑草については，ほ場内にランダムに生育しているものとした。

b．カメラの視野の範囲

識別対象の範囲は供試デジタルカメラの視野の範囲に基づき，図 3.1 の座標系の y 軸方向，すなわち，横方向において 400 mm とした。うね間中心線を中心として，左右 200 mm がカメラの視野の範囲となることを意味する。隣のうねとの間の中央部の幅 260 mm 部分は画像内に入らないが，この部分にはテンサイは無く，中耕爪により強制的に除草される。この時，うね方向である x 軸方向には 300 mm の視野がある。

表 3.1　播種間隔および目標株間

うね間	660 mm
平均株間	120 mm
播種方向標準偏差	30 mm
うね直交方向間隔	0 mm
うね直交方向標準偏差	20 mm
間引き・除草後の目標株間	240 mm

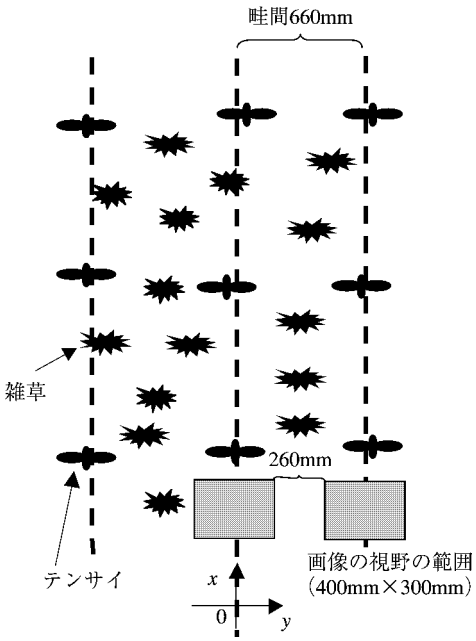


図 3.1　シミュレーションに用いた仮想ほ場

c．間引き・除草アルゴリズム

考案した間引き・除草アルゴリズムのフローチャートを図 3.2 に示す。

〝Flg〟は基準株となるテンサイを発見しているかどうかを示すフラグを表す。基準株とは，残すと判定された最新のテンサイと定義した。基準株を発見した時は $Flg=1$ であり，発見していない時は $Flg=0$ となる。〝Of〟は発見したテンサイの基準株からの x 軸方向の距離，〝l〟

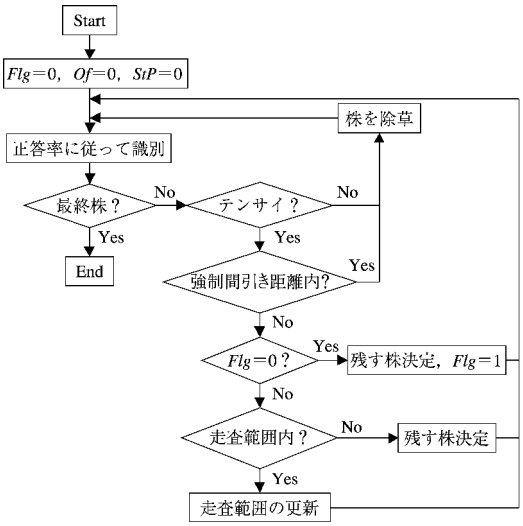


図 3.2　間引き・除草アルゴリズムのフローチャート

は発見されたテンサイの x 軸原点からの位置，〝StP〟は基準株の x 軸原点からの位置を表す。強制間引き距離〝Fd〟とは，基準株から最低限空けるべき株間距離，すなわち，この距離内に生育している植物体はテンサイを含め強制的に除草されると定義し，強制間引き距離を越えた位置から目標株間までを走査範囲としてテンサイ，雑草の有無を調べる。ここで，目標株間とは基準株位置に設定すべき株間距離（240 mm）を足した距離と定義した。

間引き•除草アルゴリズムについて説明する。まず，Flg，Of および StP の値を初期化（＝0）する。次に，植物個体の識別を行う。模擬作物列上の最終の株，つまり，作物列端の株が識別されれば間引き・除草の終了となる。最終の株でない場合，識別結果がテンサイであり，かつ，うね間中心線から y 軸方向に±100 mm 以内に存在するかを判断する。テンサイの株位置の y 軸方向距離は株間中心線から標準偏差 20 mm であるので，y 軸方向距離が 100 mm 以上あるものは雑草であると判断する。この条件を満たしていない場合，雑草とみなされ除草される。一方，この条件を満たしている場合，x 軸方向の位置を調査する。この時，強制間引き距離を越えていない場合は，全ての植物個体が間引かれる。強制間引き距離を越えた場合は，Flg 値を調べる。$Flg=0$ の場合，基準株が見つかってないので，現在見みつかっているテンサイの株位置を基準株の位置として記憶して $Flg=1$ とし，StP に現在のテンサイの位置 l を代入する。走査範囲は，強制間引き距離を越えた位置から $2\times(Stp+240-Fd)$ となる。この次のテンサイを見つける模式図を図 3.3 に示す。$Flg=1$ の場合，走査範囲，$l+240$ と現在のテンサイとの差 Of を計算する。この時，走査範囲の大きさは図 3.3 より，$2\times(Stp+240-Of)$ となる。走査範囲内でテンサイが発見されるごとに走査範囲は更新され，Of の値が小さくなることにより走査範囲は小さくなっていく。走査範囲を超えた場合，目標株間から最も近くに存在するテンサイが次の株として残される。このテンサイが次の基準株となり，StP に残されると判断されたテンサイの株の位置 l が代入される。この試行を最終株と判断されるものが出現するまで繰り返し行なう。

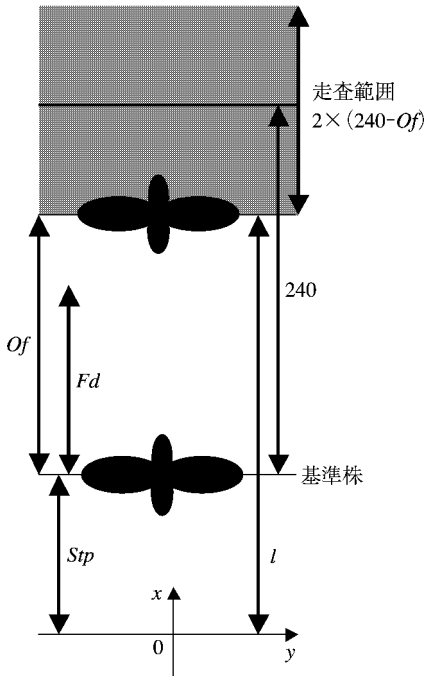


図 3.3　基準株の決定と次のテンサイ判断の模式図