原著論文

トラクタ用ロータリの耕うん刃配列設計プログラムの開発

野口良造*¹⁾・三角光弘²⁾¹⁾ 宇都宮大学農学部 〒321-8505 宇都宮市峰町 350²⁾ 宇都宮大学大学院農学研究科 〒321-8505 宇都宮市峰町 350

要旨

ロータリのホールダ式配列とフランジ式配列の両方の配列に対して、性能評価、改良設計、新規設計を行うトラクタ用ロータリ耕うん刃の配列設計プログラムの開発を WindowsPC 上で行った。性能評価は、耕うん後の土の状態、振動の大きさ、および耕うんのための所要動力の観点から、7つの項目にまとめた。シミュレーションによるフランジ式配列のトルク平均値は、ホールダ式配列の約80%となり、過去の研究仮説や実験結果に沿う結果を示した。また、構築されたデータベースの利用によって、市販ロータリの性能向上が可能になった。

キーワード

性能評価、耕うん刃配列、ロータリ耕うん、シミュレーション

はじめに

トラクタ用耕うん作業機の一つであるロータリ(Rotary)は、耕起と砕土を同時に行い、代かきに優れた性能を発揮するため、日本や東南アジアの機械化された水田稲作地帯において、主要な耕うん用作業機の役割を担っている。機械化が進む東南アジア諸国では、現地企業によるロータリの研究開発が行われ、生産台数も増加している(Salokhe and Ramalingam 2001)(Sraweshi 2001)。機械化が進んでいる日本では、2001年、トラクタ用耕うん作業機が生産台数78,914台のなかで、ロータリが生産台数の割合が89%を占めた(新農林社 2003)。現在では、さらなるロータリの作業効率の向上と耕うんエネルギーの削減を目指した高速耕うんロータリ(後藤ら 2004)(大家 1999)などの研究と市販化が進められている。

ロータリの性能を大きく左右する設計要因の一つは、ロータリの耕うん軸(Rotary shaft)のどの位置にどのような角度で耕うん刃(Rotary blade)を固

<Holder-type> Kobashi rotary M143F

<Frange-type> Niplo(Matsuyama) rotary SX05

図1 ホールダ式配列とフランジ式配列(右: 耕うん模式図(大家 1999))

*Corresponding Author

E-mail: noguchi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

定するかを表す、耕うん刃の配列(以下「配列」)である(野口・竹永 2001)(野口・竹永 2000)(図1)。市販ロータリの配列には、耕うん刃を固定する部分の違いから、ホルダ(Holder)で耕うん軸に固定する配列(以下「ホルダ式配列」)(図1上)、円盤状のフランジ(Frange)で耕うん軸に固定する配列(以下「フランジ式配列」)(図1下)がある。ホルダ式配列は、耕うん刃を耕うん軸上の任意の角度と場所に決定できるため設計上の自由度は高いが、フランジ式に比べて耕うん刃の固定強度が低い。フランジ式配列は、ホルダ式に比べて耕うん刃の固定強度は高いが、耕うん刃をフランジに装着するため設計の自由度が低く、フランジの下部分に耕うんする土との抵抗が発生するという欠点がある。ホルダ式配列のロータリは、主に水田圃場で用いられているのに対して、フランジ式配列のロータリは、通常の水田圃場より固い土を持つ畑作圃場や、日本の東北以北の粘土質の水田圃場で用いられる。また、高速耕うんロータリ(大家 1999)では、耕うん所要動力の軽減が図れる理由から、フランジ式配列が採用されている。

配列の評価、改良設計、新規設計では、設計条件にもとづいた配列のモデル化と、そのモデルを利用した性能シミュレーションが重要な役割を果たす。配列のモデル化では、トラクタとロータリの主な設計データ(表1中*1の範囲)に相当する、耕うん刃本数(Rotary blade number)、耕うん刃が耕うん軸に装着される右向き、左向きを示すR、Lの組み合わせで決定されるそれぞれの耕うん刃のわん曲方向(Direction pattern of blade curve)、ホルダやフランジの間隔(Width between two holders)、耕うん刃の幅(Width of rotary blade)といった「基本設計条件」の他に、耕うん刃を耕うん軸の円周上のどの位置で装着するか(Position number)の設計データに相当する「角度設計条件」(表1中*4の範囲)を、表1のように数値や記号として表現する。これらの数値や記号を用いることによって、性能シミュレーションが可能になる。

改良設計や新規設計を行うには、角度設計条件における膨大な配列の組み合わせのパタン(以下「配列パタン」)から、優秀な配列パタンを効率良く決定するプログラムが必要となる。この配列パ

タンを具体的に説明するとつぎのようになる。まず、ロータリの後部から耕うん軸を見たときに、耕うん軸の左端の耕うん刃から順番に1から番号を付け、右端の耕うん刃番号をNとする。このとき、回転時のバランスをとるために、耕うん軸の円周上において等間隔の角度で刃を固定する。たとえば、図4に示された耕うん刃本数34のホルダ式配列は、耕うん軸が1回転すると、耕うん刃番号1→34→13→22→…→25という順番で土を耕す。本論文では、この土を耕す順序のパタンを、角度設計条件における配列の組み合わせのパタン、いわゆる配列パタンとした。この配列パタンを耕うん軸円周上の順列組み合わせの観点から考えると、ホルダ式配列の場合、一つの基本設計条件に対して角度設計条件では $(N-1)!$ の配列パタンが存在する。また、一枚のフランジに4本の耕うん刃を装着するフランジ式配列の場合、 $(N/4-1)! \times 4^{(N/4)}$ の配列パタンが存在する(野口・竹永 2001)。

本研究では、耕うん刃が耕土に対して下向きに回転切削するダウンカットロータリのホルダ式

表1 耕うん刃本数34の設計データファイルの一例(*.datの一部)

*1	Rotary blade number	34
	Direction pattern of blade curve [LorR]	RRRRLLLLRRRRLLLLRR RRLLLLRRRRLLLL
	Width between two holders [m]	0.05
	Width of rotary blade [m]	0.045
	Rotation radius of rotary blade [m]	0.25
	Velocity of the tractor [m/s]	0.45
	Rotational speed of rotary shaft [rpm]	250
	Depth of tillage [m]	13.7
	Width between holder and center of gravity of the blade [m]	0.01
*2	Sd [-]	0.125
	K [-]	0.040
	Q [-]	0.511
	D [-]	15
	Td [-]	0.354
	Tld [N·m]	378.471
	Ta [N·m]	963.170
*3	Torque model parameter1	0.36
	Torque model parameter2	0.47
	:	:
	:	:
	Torque model parameter9	62
*4	Torque model parameter10	72
	Position number 1	0
	Position number 2	24
	:	:
	:	:
	Position number 33	12
	Position number 34	28

*1: Design condition of the tractor & rotary

*2: Performance evaluation

*3: Torque model parameter

*4: Design condition of the rotary blade arrangement

配列とフランジ式配列の両方の配列に対して、ロータリ性能向上を目指した汎用的な配列設計シミュレーションプログラム(以下「配列設計プログラム」)の開発を目的とした。

配列設計プログラムの構成

配列設計プログラム(Arrangement design program)は、配列計算プログラム(Arrangement calculation program)と配列データベース(Arrangement database)を用いて、1.性能評価(Performace evaluation), 2.改良設計(Improvement), 3.新規設計(New design), 4.新規配列データベースの作成(Construction for new arrangement database), 5.配列データベースからの配列パターン選択(Selection from arrangement database), 6.トルク波形を予測するパラメータの同定(Parameter identification), 7.設計データの提示(Design data), の機能を持つように構成した(図2)。なお、配列設計プログラムは、比較的計算速度の遅いWindowsPC環境での使用を前提として、OS: Microsoft Windows98 SE, 開発言語: Microsoft VisualBasic 6.0, CPU: Intel Pentium III 800 MHz, RAM:128 MB, HDD:40GB の環境下でシミュレーションを行った。

性能評価と設計データの提示

配列の性能評価は、耕うん後の土の状態、振動の大きさ、耕うんのための所要動力とした。耕うん後の土の状態の評価は、それぞれの耕うん刃が1回の回転で切り取る土塊体積が全体としてどの程度ばらついているかを算出した土塊体積の均一性 $Sd[-]$ 、耕うんされた土塊で構成された土の表面の凹凸の程度を表す耕土表面の平らな度合い $K[-]$ とした。振動の大きさの評価は、耕うんを行わずに軸を回転させた時に発生する振動の程度 $Q[-]$ 、耕うん刃の向きに起因する耕うん軸の軸方向の振動の程度 $D[-]$ 、耕うん軸全体に発生するトルク振動の変動の程度 $Td[-]$ 、耕うん軸左右で発生するトルク振動の幅 $Tlr[N \cdot m]$ とした。耕うんのための所要動力の評価はトルク平均値 $Ta[N \cdot m]$ で行った(野口 2001)。

配列の性能評価と設計データの提示は、設計データファイル「*.dat」(表1)で同時に行った。配列計算プログラムは、設計者が設計データファイル「*.dat」を選択し(図3)、基本設計条件(表1中*1の範囲)、トルク波形を予測するパラメータ(表1中*3の範囲)、角度設計条件(表1中*4の範囲)を入力すると、性能評価の数値(表1中*2の範囲

図2 配列設計プログラム(Arrangement design program)の構成

)や、角度設計条件の図面データや予測トルク波形、および表1の内容に相当する設計データを画面で提示する(図4)(図5)。これによって、配列計算プログラムによって算出される評価項目の値にもとづき、市販ロータリの配列の性能評価を行うことができる。

改良設計と配列データベースからの配列選択

配列データベースは、あらかじめ、26種類の市販ロータリの基本設計条件それぞれについて、配列パターンを約1000ずつ設計データとして用意して

いる。設計者は、配列データベースの中に基本設計条件が一致する優秀な配列パターンがあれば、その優秀な配列パターンを利用して角度設計条件を変化させることにより、その配列の性能向上を図ることができる。

設計者は、基本設計条件に相当する配列データベースのファイル「*.gen」を選択し(図3)、配列の性能評価のそれぞれに対して重み付けを行うことによって(図6)、配列データベースから設計者の要求に最も適合した配列パターンを決定し、表示画面から設計データを得ることができる(表1)(図4)(図5)。

図3 配列設計プログラム画面、ファイル選択

図4 配列設計プログラム画面、性能評価

図5 配列設計プログラム画面，設計データファイル表示

図6 配列設計プログラム画面，スライドバーによる重み付け

新規配列データベースの作成

配列データベースの中に基本設計条件が一致する配列パターンがなければ，新規に，配列データベース作成のための計算を行う必要がある．設計者は，基本設計条件を配列計算プログラムへ入力するだけで，新たな配列パターンを持つ配列データベースを構築することができる．設計者は，配列データベース利用する場合と同様にファイル「*.gen」を選択し(図3)，新たな基本設計条件へ変更する．その後，配列計算プログラムは，動的計画法を応用した配列の計算(野口・竹永 2001)を実

行することによって(図7)，入力された基本設計条件にもとづく約 1000 の配列パターンを最終的に算出する．その後は，既存の配列データベースと同様な方法で利用することができる．

トルク波形を予測するパラメータの同定

表1中*3で示される10個のパラメータは，1本の耕うん刃に発生するトルク波形をモデル化する時に用いるものであり，耕うん刃が土を切る長さに対応する耕うんピッチや耕うんされた面積などを変数として，トルク波形の形状を予測する式の

図7 配列設計プログラム画面，データベース構築

図8 配列設計プログラム画面，パラメータの同定

係数に相当する。しかし，トルク波形を予測するこれらのパラメータは，ある水田圃場を一つの標準的な形状の耕うん刃で耕したときに発生する耕うんトルクから決定されたものである(柴田・坂井 1977)。ここでの，水田圃場とは，できるだけ土壌硬度が高く抵抗の大きいものを想定したシルト質ローム，含水率31%，硬度は山中式硬度計で $0.980 \times 106\text{Pa}$ の圃場である。なお，実験で使用した耕うん刃は市販品で回転半径220mmである。そのため，この条件以外の圃場条件や耕うん刃の形状の場合，シミュレーション精度を向上させるた

めに，新たにトルク波形を予測するパラメータを決定する必要がある(Noguchi and Nakano 1996)。つまり，パラメータの同定によってトルク波形の精度を向上させることができれば，配列に関する定性的な性能比較だけでなく，圃場における耕うん抵抗などの定量的な予測が可能となる。配列計算プログラムは，トルク波形を予測するパラメータを，シミュレーション波形「*.dat」と実際のトルク波形データをデジタル化した「*.wvd」の違いから同定し，同定結果をデータベース化する機能を有している(図8)。

実用性の検証

基本設計条件と角度設計条件を入力すれば、配列設計プログラムによって、配列の性能評価と設計データを数秒で表示させることができた(図4)(図5)。また、ロータリの生産を行っているメーカー等に、使用した評価項目の妥当性についての検討を依頼した結果、耕うん後の土の状態、振動の大きさ、耕うんのための所要動力を中心とした現在の性能評価は、設計上の問題点をカバーしているという回答を得た。しかし、これらの評価項目は、ロータリの工学的側面を中心としたものであり、耕うんの本来の目的である「土壌の理学的特性を改善し、土壌の状態を播種、あるいは移植作業が能率的かつ精度よく行えるように土壌を整備すること(農林水産省 1970)」であるとすれば、今後は、耕うん後の土の状態をさらに多くの角度から検討し、評価すべきであると考えられる。たとえば、耕うん刃先端部のわん曲形状(表2の Blade curve に相当)に起因する耕うんされた土の横移動、耕うん刃が一回転で土を耕す長さと耕うん軸の回転速度に起因する、耕うんされた土の上下移動(陳ら 1986)(森泉ら 1990)、などが挙げられる。

改良設計のための配列データベースについても、利用した設計者から良好な評価を得た。ただし、基本設計条件は、市販ロータリに見られるように多種多様であり、現在の配列データベースが有している26種類の範囲で当然カバーしきれものではない。したがって、さまざまな基本設計条件に対する配列パターンを含んだ配列データベースの作成が、配列設計プログラムを利用する上で不可欠となるのが実状である。配列データベース作成のための計算では、耕うん刃本数が増えるにしたがって、配列パターンが指数関数的に増加する。そこで、全ての組み合わせについての計算が、計算に用いる PC の性能から制限時間内に計算が完了しない場合は、動的計画法の分枝限界法を応用した多段階に計算過程を分ける計算方法(野口・竹永 2001)を選択できるようにした。さらに、配列データベースの計算では、一部の計算段階において、設計者の経験を反映できる計算方法を採用した。つまり、動的計画法の分枝限界法を応用した計算方法では、多段階に分けて計算を行うた

め、ある段階の計算は、その前の段階で得られた計算途中の配列パターンにもとづいて配列計算を行う。そのため、前段階での計算結果としての配列パターン数が多ければ、組み合わせの関係から現段階での配列パターン数が膨大となり、計算を終了できない可能性がある。よって、計算の各段階で計算途中の配列パターン数をどれだけ残すかは、終了させるまでの計算時間を決定づけるとともに、最終的に得られる配列の性能に大きく関与することになる。そこで、配列データベースを構築するときの計算の各段階で、どの程度の配列パターン数を残すかについて、設計者が自由に決定できる方法を採用した。

本研究で用いた WindowsPC では、20 本以下の配列の計算では、角度設計条件の全ての配列パターンを計算して配列データベースを構築するのに、数分間で計算を終了させることができた。一方で、20 本を越える耕うん刃本数では、動的計画法の分枝限界法を応用した計算方法を用いる必要が生じ、その手法を用いたとしても、40 本近くになると二日間程度の時間が必要となった。

表2は、市販ロータリ(Commercial)のホールダ式とフランジ式の性能比較、および市販ロータリのホールダ式とフランジ式のそれぞれについて、同じ基本設計条件の場合、配列データベース(Arrangement database)を利用して、配列パターンを変化させることにより、どの程度の性能向上が可能かを数値で比較したものである。示された数値が小さいほど性能が高い配列である。シミュレーションでは、耕うん幅(Tillage width)と耕うん刃本数を統一し、ホールダ式配列のホールダ間隔0.054m、耕うん刃幅0.045mとした。また、フランジ式配列のフランジ間隔0.18m、耕うん刃幅0.08mとした。

表2 性能評価項目と配列データベースの性能値

Item [unit]	Holder-type* (Arrangement database)	Holder-type* (Commercial)	Frangetype** (Arrangement database)	Frangetype** (Commercial)
Sd [-]	1.2×10^{-1}	1.30×10^{-1}	2.74×10^{-15}	3.66×10^{-15}
K [-]	4.02×10^{-2}	4.09×10^{-2}	1.01×10^{-2}	1.01×10^{-2}
Q [-]	3.12×10^{-1}	3.00×10^{-1}	5.75×10^{-7}	5.75×10^{-7}
D [-]	15	16	12	12
7d [-]	0.569	0.677	0.250	0.392
7ird[N·m]	515.4	671.5	244.2	340.6
7a[N·m]	935.32	988.59	711.87	723.00

*Y-Company(R215M), Number of rotary blade: 32, Tillage width: 1.5 m

**Y-Company(RSB150R), Number of rotary blade: 32, Tillage width: 1.5 m

市販ロータリ(Commercial)におけるホールダ式配列とフランジ式配列をシミュレーションのトルク・平均値で比較すると、それぞれ $988.59\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $723.00\text{N}\cdot\text{m}$ となり、フランジ式配列はホールダ式配列に比べて26.9%の減少となった(表2)。この結果は、同一耕うん幅であれば耕うん刃一本あたりの耕うん幅を大きくすると耕うんトルクが減少する、という松尾の研究仮説(1961)に沿う結果となった。つまり、今回のフランジ式配列とホールダ式配列は共に同じ耕うん刃本数で検討したが、フランジ式配列の耕うん刃1本あたりの耕うん幅は、いずれもホールダ式に比べて広いため、耕うんトルクが減少したと考えられる。またこの結果は、高速ロータリで採用されているフランジ式配列の所要動力は、ホールダ式配列の約80%になるとする大家(1999)の実験結果と良く一致した。

配列データベースから選出した配列(Arrangement database)と市販ロータリの配列(Commercial)の性能比較を、ホールダ式配列、フランジ式配列のそれぞれで行った(表2)。ホールダ式配列では、配列データベースを用いることによって、振動の程度 Q を除いて全て数値的に向上できることが示された。なかでも、データベースから選出した配列のトルク平均値 T_a (平均値 $935.32\text{N}\cdot\text{m}$)は、市販ロータリの配列と比較すると、22.7%の減少となった。ただし、 Q に関しては、従来の実験等の結果から、表2の Q の 3.12×10^{-1} という数値は、振動を体感する上で市販ロータリの Q の 3.00×10^{-1} とはほとんど変わらないと考えられる。一方で、フランジ式配列では、 Q 、 D 、 T_d は同じ数値であったが、その他はいずれも配列データベースの結果を用いて市販ロータリの配列を改良できることが明らかとなった。これらの結果は、配列データベースの利用によって、市販ロータリの性能向上を図れることを示していると考えられる。

トルク波形を予測するパラメータの同定については、現在までに同じ耕うん刃形状による2種類の新たな圃場に対して実験を行った結果を配列データベースとして蓄積し、シミュレーションの同定精度の向上を図れることが明らかとなった。しかし、トルク波形の T_d 、 T_{lrd} 、 T_a に関する数値は良好な結果を得られたものの、トルク波形の

パラメータ同定の理論(Noguchi and Nakano 1996)に照らせば、本試験における波形の一致に関しては良好な結果が得られたとは言えず、今後の課題であると考えられる。

まとめ

本研究では、ロータリのホールダ式配列とフランジ式配列の両方の配列に対して、性能評価、改良設計、新規設計に対応できる配列設計プログラムの開発をWindowsPC上で行った。性能評価は、耕うん後の土の状態、振動の大きさ、および耕うんのための所要動力の観点から、7つの性能評価項目にまとめた。また、実用性の検証として、市販ロータリの基本設計条件をもとにして配列データベースの構築を行い、データベースによる配列性能と、市販ロータリの配列性能との比較を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) トラクタとロータリの主な設計データである「基本設計条件」、耕うん刃を耕うん軸の円周上のどの位置で装着するか設計データに相当する「角度設計条件」、およびトルク波形を予測するパラメータを用いることによって、数秒で、配列の性能評価の値を、図とともに表示できた。
- 2) シミュレーション結果は、同一耕うん幅であれば耕うん刃一本あたりの耕うん幅を大きくすると耕うんトルクが減少するという松尾(1961)の研究仮説や、フランジ式配列の所要動力はホールダ式配列の約80%になるとする大家(1999)の実験結果に沿う結果を示した。
- 3) 配列データベースを利用すると、市販ロータリの性能向上に寄与できることが明らかとなった。また、本研究で用いたWindowsPCの性能では、新規データベースの構築において、配列パタンの多さから、耕うん刃本数が20本を越えると計算速度が遅くなり、40本近くになると二日間程度の時間が必要となった。

引用文献

- 陳鈞・安部悟・寺尾日出男(1986)ロータリ耕うんの反転性能向上に関する研究(第1報)ー市販刃の反転性能実験ー, 農業機械学会誌,

47(4):459-467.

後藤隆志・堀尾光広・市川友彦ら(2004)高速耕うんロータリの開発(第1報), 農業機械学会誌, 66(3):111-120.

松尾昌樹(1961)ロータリ耕うんに関する基礎的研究, 山形大学紀要(農学), 3(4), 617pp.

森泉昭次・林尚考・山森主税(1990)ロータリ耕うんにおける耕土の移動に関する研究(第三報)ー耕うんピッチと土壌の反転性との関連ー, 農作業学会, 25(2):142-147.

野口良造・竹永博(2001)ロータリ耕うん刃配列データベースの構築と評価, 農業機械学会誌, 63(4):103-109.

野口良造・竹永博(2000)WWW型農業機械設計支援CADシステムの開発, 農業情報研究, 9(2):67-76.

Noguchi, R. and K. Nakano(1996)Parameter Identification for Torque Curve of Rotary Tillage, J. JSAM, 58(6):79-88.

農林水産省(1970)耕うん整地, 農林技術研修会, 東京, 174pp.

大家輝光(1999)高能率省エネルギー型トラクタ“エコトラ”について, 農業機械学会シンポジウム'99:15-21.

Salokhe, V. M. and N. Ramalingam(2001)Effects of Direction of Rotation of a Rotary Tiller on Properties of Bangkok Clay Soil, Soil & Tillage Research, 63:65-74.

柴田安雄・坂井純(1977)ロータリ耕なた刃の耕うん抵抗特性, 農業機械学会誌, 39(4):447-457.

新農林社(2002)農業機械年鑑2003, 新農林社, 東京, 78-79.

Sraweshi, K.(2001) Status and Trend of Farm Mechanization in Thailand, Proceeding of the Conference of Agriculture and Food mechanization, 30~31 Oct., 2001, at Mutiara Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia.

受付日 2005年3月24日

受理日 2005年7月8日

担当部会 生産・経営情報部会

Development of the Design Program for Rotary Blade Arrangement

Ryozo Noguchi^{*1)} and Mitsuhiro Misumi²⁾

¹⁾ Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Mine-Machi, Utsunomiya 321-8505, Japan

²⁾ Graduate School of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Mine-Machi, Utsunomiya 321-8505, Japan

Summary

This paper describes the development of a Windows-based design program for tractor rotary blade arrangements. The program assists with the design or enhancement of holder-type arrangements or the flange-type arrangements and incorporates performance evaluation data. The performance of rotary blade arrangements is evaluated through seven measures covering soil condition after tillage, the degree of vibration of the arrangement, and the power required for tillage. The design program confirmed part of a hypothesis and experimental result of earlier research, because the torque average of flange-type arrangements

was about 80% of the torque average of holder-type arrangement in the simulation. The design program was also able to contribute to improvement in the performance of a commercial rotary blade arrangement by using the database.

Keywords

performance evaluation, rotary blade arrangement, rotary tillage, simulation

^{*}Corresponding author

E-mail: noguchi@cc.utsunomiya-u.ac.jp