

同軸同時正・逆転ロータリ耕うん方式の開発

Development of Coaxial Counterrotating Rotary Tilling System

國 領 喬* 竹 内 正 志*
Takashi Kokuryo Masashi Takeuchi

永 岡 政 敏* 小 林 秀 明*
Masatoshi Nagaoka Hideaki Kobayashi

要 旨

動力耕うん機の耕うん中の機体の安定化を目的とした、同時に正転及び逆転する2つの耕うん軸を同軸上に配置するロータリ耕うん方式を開発するに際し、耕うん反力のシミュレーション手法の開発が不可欠であった。

シミュレーションによれば、新しい耕うん方式に一般的な爪配列を施した場合、従来の耕うん方式に対し、耕うん反力の変動が大きいこと、また新しい耕うん方式に適した爪配列を施した場合は、耕うん反力の変動が改善されることがわかった。

この結果は実際に耕うん機に適用され、耕うん軸最大出力までの安定した耕うん作業が可能となった。

ABSTRACT

Computer simulation of tilling force was first established. This was very helpful to develop the new rotary tilling system of a walking tractor which uses a coaxial simultaneously counter-rotating blades to stabilize the tractor while tilling.

The simulation revealed that the fluctuation of the tilling force generated by the new tilling system retaining a conventional arrangement of blades is great compared with the conventional tilling system, and that the system with an appropriate arrangement of blades improves the said fluctuation.

The walking tractor developed with this simulated results demonstrates the capability of being operated stably up to its maximum output of tilling shafts.

1. ま え が き

動力耕うん機に用いるロータリ耕うん方式の中で最も一般的なのは、正転耕うんである。この方式は、機体を前方斜め上に押し出す方向に耕うん反力が発生するため、耕深や土壌硬度の増加に伴い耕うん反力が急激に増加すると、機体まわりの力の平衡がくずれ、機体の跳び出し現象が発生する場合がある。

このような現象を回避するには、尾ソリを適切な長さに設定し耕深調整を行ったり、ハンドル操作荷重を下方に作用させ、尾ソリの牽引抵抗を増加させる必要がある。

また、逆転耕うん方式では、機体を後方斜め下に引き戻す方向に耕うん反力が発生するため、駆動車輪の接地荷重が不足すると駆動力を十分に発生させることができないので、駆動車輪が空転する場合がある。このとき、正転耕うんの場合と同様に、尾ソリの長さ調整やハンド

ル操作荷重を上方に作用させる等の操作が必要になる。

最近の動力耕うん機は、前述の不具合を回避するために、耕深や土壌硬度に応じて、予め耕うん軸の回転方向を正転／逆転に切り換える方式を装備したのもも実用化されているが、正転耕うんと逆転耕うんの持つ欠点そのものの解消には至っていない。

一方、正転耕うんと逆転耕うんを組み合わせ、耕うん反力を低減させる方式に関しては、従来より研究がなされている¹⁾。しかし、それは正・逆転の耕うん軸を別々に配置した異軸構造であり、それぞれの発生する耕うん反力は偶力として機体に作用するため、機体の安定化には至らず、耕うん機構自体の重量が増加するという欠点もある。

そこで、同軸同時正・逆転耕うん方式を装備した動力耕うん機「FU450/650」を新たに開発し、1993年10月

* 朝霞東研究所

に発売した。この方式は、正転耕うんと逆転耕うんを同軸上で同時に行うことにより、互いの耕うん反力 F_d 、 F_u が耕うん軸上で相殺されることを特徴としている (Fig. 1)。そのため耕深や土壌硬度が増加しても、機体まわりの力の平衡は保持され、常に安定した耕うんが可能となる。また機構自体も、異軸構造に比較して小型化が可能であり、機構の重量増加を抑制できる。

2. 耕うん反力に関する諸問題

機体の安定化を目的として耕うん反力を低減するには、耕うん爪の形状を切削抵抗が少なくなるように設定することが効果的である。しかし、そのような形状では、耕うん爪本来の機能である土壌の切削、反転、放てき、碎土といった耕うん性能が損なわれるため、それら諸性能を総合的に満足する「なた爪」が、一般に採用されている。

同軸同時正・逆転耕うん方式においても、基本的な耕うん性能を確保するために、この「なた爪」を採用することが有効と考えられる。しかし、正・逆転耕うんのそれぞれについて、同一の耕うん爪及び回転速度で耕うんしたとしても、すくい面の法線方向の違いや、機体の前進速度成分による爪先の軌跡の違いにより、互いの爪が発生する耕うん反力は完全には相殺されないと推定される (Fig. 2)。

また、機体の低振動化を目的として、耕うん反力の合成力の変動を低減するには、どのような爪配列を採用するかが問題となる。この問題は、正転耕うん方式に限れば、柴田・坂井の「四角形モデル」²⁾や、橋口らの「三角

形モデル」³⁾のような耕うんトルクの推定法により、振動低減を狙った爪配列を机上で検討することが可能である。しかし逆転耕うん方式に関しては、このような推定法が報告されていないため、2つの耕うん方式を組み合わせた同軸同時正・逆転耕うん方式について爪配列の検討を行うには、新たに推定法の開発が必要である。

さらに、耕うん反力の合成力を機体に作用させたときの機体の安定性の検討に際して、通常の耕うん方式であっても耕うん反力の正確な計測は困難であるため、耕うん中の機体の挙動を実際に体感するという方法を探らざるを得ないのが実状である。

従って、これらの諸問題を解決するためには、耕うん爪が発生する耕うん反力の的確な把握が不可欠であり、耕うん方式、耕うん条件の如何にかかわらず、耕うん反力が精度よく予測できる推定法の開発が望まれていた。

3. 耕うん反力予測のシミュレーション

3.1. シミュレーションの概要

土壌を耕うん爪によって高速に切削する場合、その破壊は圧縮、引張り、剪断を伴う大変形によって進行するため、耕うん反力の厳密な予測は、粒状体力学⁴⁾によるアプローチが必要となる。しかし、このような解析手法であっても、土壌を忠実に数値モデル化することはその特性上極めて困難である。

そこで、耕うん反力の推定を現実的なものとするために、耕うん中の耕うん爪表面に成立する実験に基づく簡便な式を設定した。

すなわち、耕うん爪がある速さで土壌を耕うんしながら進行するとき、爪表面の法線方向に作用する耕うん反力 $F(N)$ を、次のようにおく。

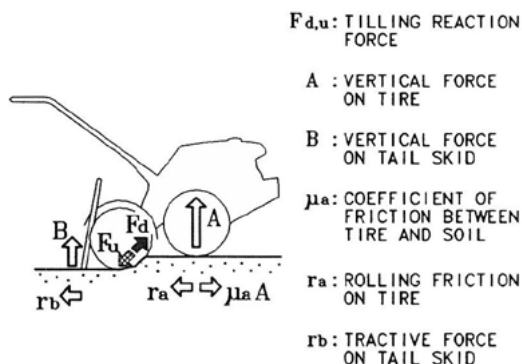


Fig. 1 Forces Imposed on a Walking Tractor with a Coaxial Counterrotating Tiller

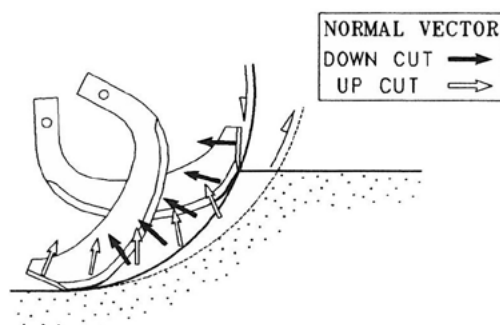


Fig. 2 Down Cut and Up Cut Blades while Tilling

$$F = ChV^2S$$

ここで、

V : 耕うん爪の土中進行速さ (m/s)

S : 爪表面の進行方向に対する前面投影面積 (m²)

Ch : 土壌条件、進行速さに依存した係数 (kg/m³)

なお、係数 Ch は、実験により計測した耕うんトルクに基づき算出した値を用いる (APPENDIX A)。

以上を前提として、シミュレーションでは、まず耕うん爪及び土壌の形状を、その表面が数百程度の多面体で近似された中実体としてモデル化する (Fig. 3)。次いで、耕うん爪を所定の前進速度、耕うん軸回転速度に従って動かしていったとき、爪表面が土壌と干渉する位置において、土壌から受ける反力を上式に基づき計算する。そして、その爪に作用する 6 分力を、爪表面すべての発生反力の合力として算出する (APPENDIX B)。

さらに、個々の爪の 6 分力の計算結果を基に、実際に複数の爪を配列した状態での耕うん反力の合成力を算出する (APPENDIX C)。

この合成力の変動によって機体振動の評価を行い、また、合成力の平均値 (時間平均) を機体に作用させたときの機体まわりの静的な力の釣り合い方程式⁵⁾を解いて、機体の跳び出し現象や駆動車輪の空転の発生を予測する。

3.2. シミュレーションの適用事例

耕うん反力と機体の静的釣り合いについて、シミュレーションの適用事例を述べる。

耕うん反力の 6 分力波形の予測に際して、シミュレーションに用いた耕うん爪、耕うん諸元、及び土壌条件を

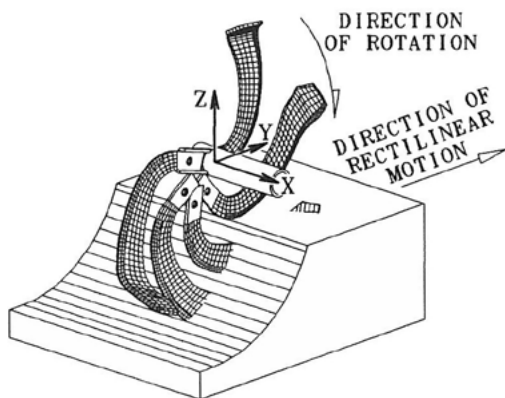


Fig. 3 Analytical Model

Table 1 Specification of Rotary Tilling

TILLING PITCH (mm)	114
ROTATION SPEED (min ⁻¹)	204
TILLING DEPTH (mm)	123

Table 2 Soil Condition

SOIL GROUP	KUROBOKU
WATER CONTENT RATIO (%)	20
SOIL HARDNESS (kPa)	345.7

Fig. 4, Table 1, Table 2 に示す。

Fig. 4 の点 P に作用する、単一爪の発生する耕うん反力の 6 分力の解析結果を Fig. 5 に示す。

正転耕うんについては、単一爪が発生する耕うん反力に関していくつかの測定例が報告されており^{3) 6)}、これらと本報の計算結果の波形は、類似した傾向を示す。

次に、耕うん方式の違いによる、耕うん反力の合成力の 6 分力の解析結果を Fig. 7-1~4 に示す。

Fig. 6 は計算に用いた爪配列であり、正転及び逆転耕うん方式では、その回転方向のみが異なるだけで、同一の爪配列 (等ピッチ配列) を採っている。また同軸同時正・逆転耕うん方式では、内側が正転方向、外側が逆転方向へ、同一回転速度で駆動され、それぞれの爪配列は等ピッチとなっている。いずれの方式も爪本数、耕幅は同一とした。

図に示すように、耕うん軸が 1 回転したときの 6 分力 (Fig. 7-1) と耕うん軸トルク (Fig. 7-2) の波形、及び波形の変動を表す標準偏差 (Fig. 7-3) と、合力、合モーメントの平均値 (Fig. 7-4) を解析結果として得ることができる。

これによると、同軸同時正・逆転耕うん方式は、他の 2 つの耕うん方式と比較して、6 分力及びトルクの変動が

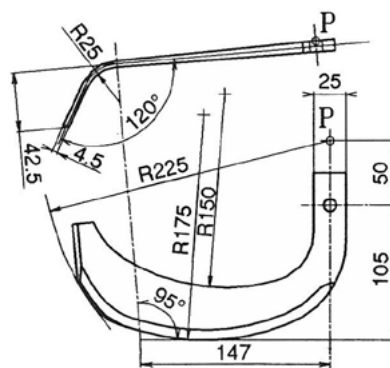
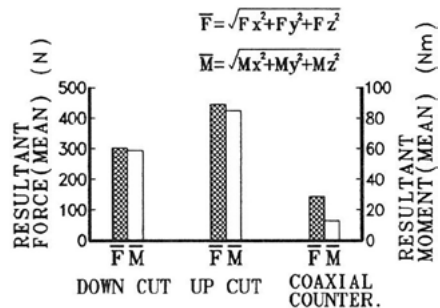
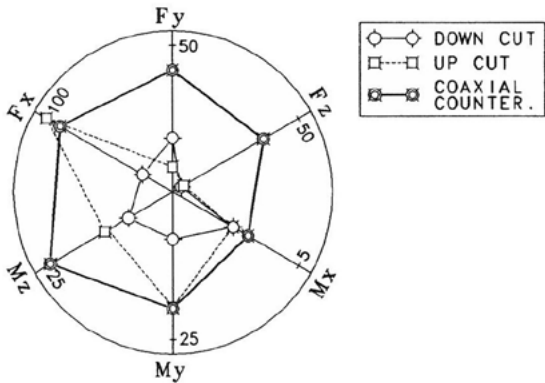
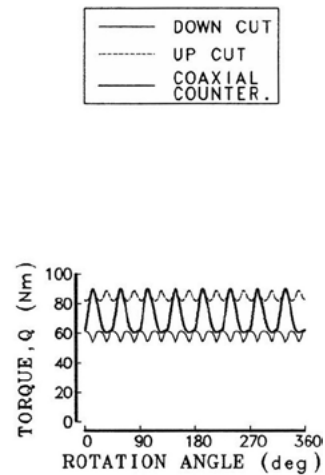
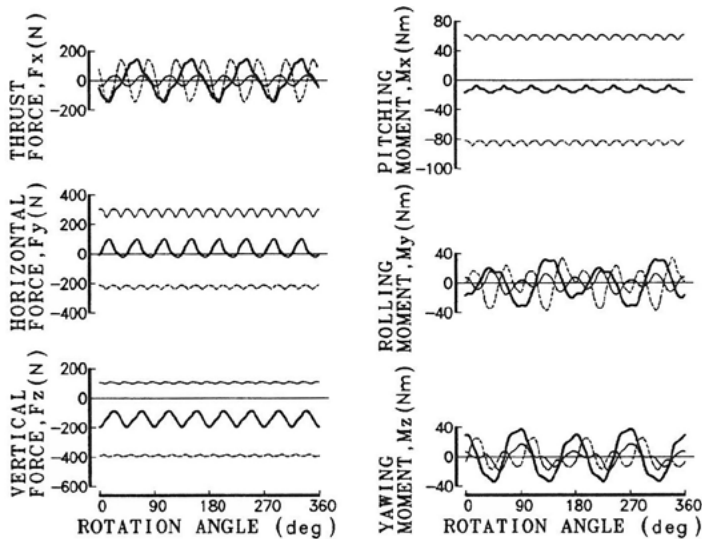
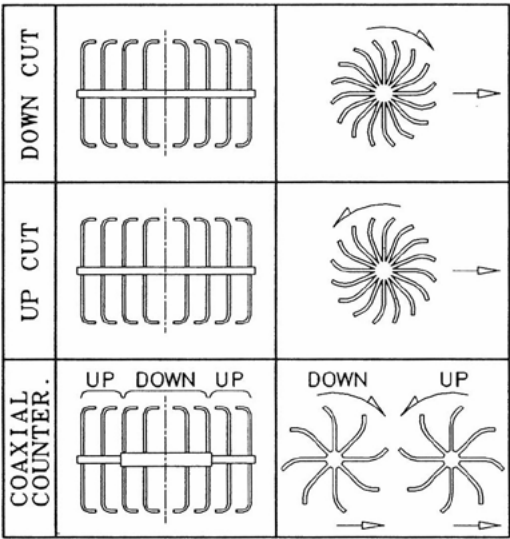
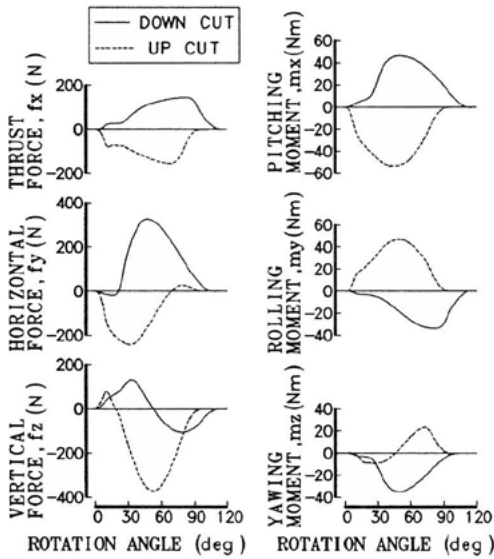


Fig. 4 Blade for Simulation



大きくなる傾向にあるものの、合力の平均値 $\bar{F}$ は、正転耕うんに対して48%、逆転耕うんに対して32%、また合モーメントの平均値 $\bar{M}$ はそれぞれに対して22%、15%となり、大幅に低減される。

次に、耕うん反力の合成力から求めた耕うん軸トルクの平均値と、いくつかの爪配列について実測した耕うん軸トルクの平均値との相関を、各耕うん方式に分類して示す (Fig. 8-1~3)。

これによると、正転耕うんでは (Fig. 8-1)、土壤硬度が高い場合、耕深に依らず計算値と実測値とは概ね一致しているが、土壤硬度が低い場合、耕深の増加に伴って実測値が計算値を上回る傾向が強くなる。この要因として、実測値にはシミュレーションで考慮している耕うん反力に加えて、一度切削された土塊の一部が再耕うんされる攪拌抵抗が含まれるためと推定される。

逆転耕うんの場合 (Fig. 8-2) は、土壤を上方に向かって切削、放てきするため、正転耕うん (Fig. 8-1) に比較して土塊重量の影響によるトルク増分が大きく、より一層、実測値が計算値を上回る傾向が強いと考えられる。

同軸同時正・逆転耕うんの場合 (Fig. 8-3) は、供試爪

Table 3 Specification of a Walking Tractor

MASS	(kg)	90
MAXIMUM OUTPUT OF ROTARY SHAFT	(kW)	2.2
TRAVEL SPEED	(m/s)	0.35

配列の正・逆転の耕幅比を4:1~2:1に設定したので、計算値と実測値の相関は正転耕うん (Fig. 8-1) に近い傾向を示す結果となった。

最後に、機体の静的釣り合いの解析結果を示す。

解析に用いた耕うん機の諸元を Table 3 に示す。

Fig. 9-1, 2 は、正転耕うん、同軸同時正・逆転耕うんの2つの方式について、土壤硬度、耕深、及び駆動車輪と土壤との摩擦係数 μ_a の三者の関係を表したものである。

Fig. 9-1 の○印は、実際に正転耕うんで作業を行い、耕深を増加していった場合に跳び出し現象が発生するポイントである。これによると、正転耕うんでは摩擦係数 $\mu_a=0.6$ 近辺で跳び出し現象が発生し、それはシミュレーションで求めた耕うん軸出力の最大値ラインLに到達する前に発生している。

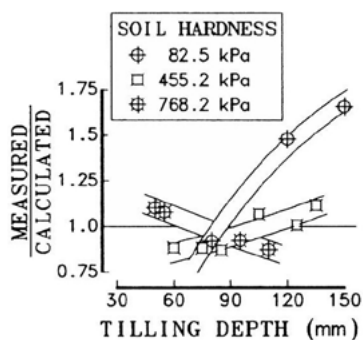


Fig. 8-1 Down Cut

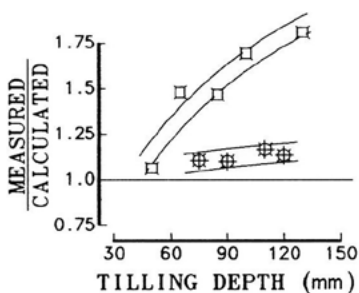


Fig. 8-2 UpCut

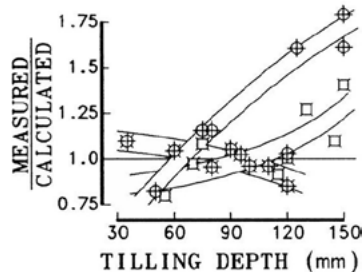


Fig. 8-3 Coaxial Counterrotating

Fig. 8 Tilling Torque Ratio versus Tilling Depth and Soil Hardness

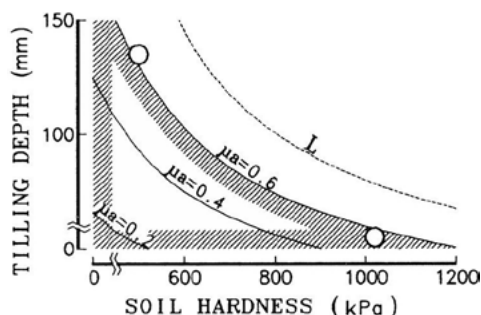


Fig. 9-1 Down Cut

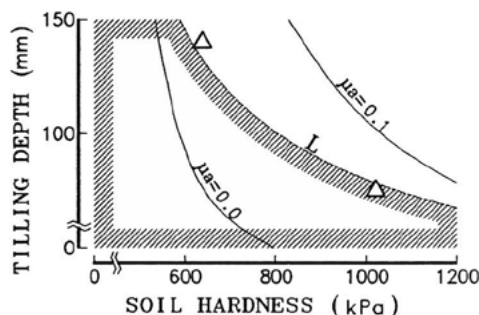


Fig. 9-2 Coaxial Counterrotating

Fig. 9 Coefficient of Friction between Tire and Soil versus Soil Hardness and Tilling Depth

また Fig. 9-2 の△印は、実際に同軸同時正・逆転耕うんで作業を行い、耕深を増加していった場合に、エンジン・ストールに到るポイントである。これはシミュレーションで求めた耕うん軸出力の最大値ライン L とよく一致しており、Fig. 9-1 の正転耕うん方式と異なって、エンジン・ストールに到るまでの全領域の耕うんが可能である。

4. 新方式の適用

4.1. 爪配列の検討

前述のシミュレーションを活用して、実際の動力耕うん機に装備するための同軸同時正・逆転ロータリ耕うん軸の爪配列を検討する。

通常の耕うん方式では、耕土表面の均平性を向上させ

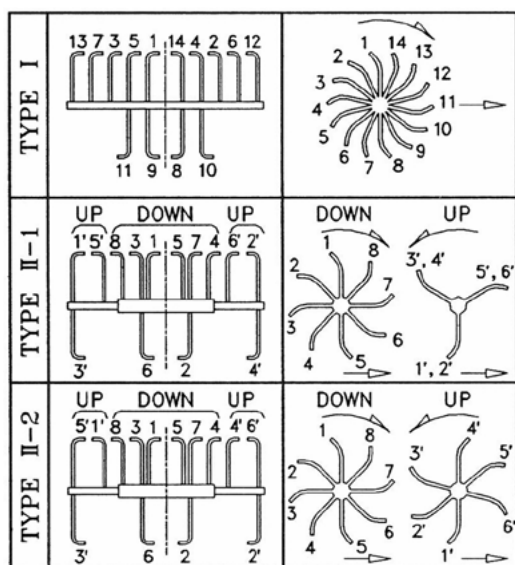


Fig. 10 Blade Arrangement for Simulation

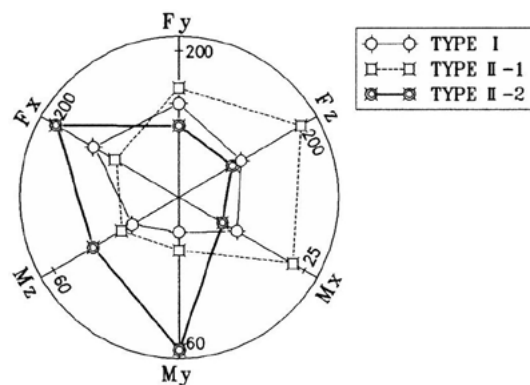


Fig. 11-1 Standard Deviation of Force Waves

たり、土塊、石等の抱え込みによる振動を防止する観点から、爪配列に関するいくつかの経験則が存在する⁷⁾。

新方式についても、正・逆転それぞれの耕うん軸について、これらの条件を考慮した爪配列を行い、Fig. 10 に示す3つの配列について検討した。

Type I は、通常の正転耕うん方式に用いられる等ピッチの爪配列である。

Type II-1, 2 は、同軸同時正・逆転耕うん方式の爪配列である。

このうち、Type II-1 の逆転耕うん軸は左右対称の同時打ち込みで、正転耕うん軸は等ピッチ配列を採用している。また、Type II-2 は、逆転耕うん軸が不等ピッチ配列、正転耕うん軸が等ピッチ配列となっている。

ここで、Type II-2 の逆転耕うん軸は、爪 No.3'、No.5' が同一の耕幅を耕うんするので、No.1' に比較して爪 1 本あたりの耕うん反力が小さくなるため、等ピッチ配列を施しても合成力の変動が低減されるとは限らない。そこで、予めシミュレーションにより、逆転耕うん軸のみの耕うん反力の解析を行い、荷重変動が低減されるような不等ピッチ配列を決定した。

但し、Type II-1, 2 の正・逆転耕うん軸の互いの位相角については考慮していない。

以上3つの爪配列について、耕うん反力の合成力の標準偏差 (Fig. 11-1)、及び合力、合モーメントの平均値 (Fig. 11-2) を示す。

Fig. 11-1 によると、Type II-1 の標準偏差のうち、左右分力 (Fx)、前後分力 (Fy)、ローリングモーメント (My)、ヨーイングモーメント (Mz) については、Type I と同等であるが、上下分力 (Fz)、ピッチングモーメント (Mx) については悪化しており、それに起因すると思われる上下方向のハンドル振動が、実用試験において顕著に現れた。

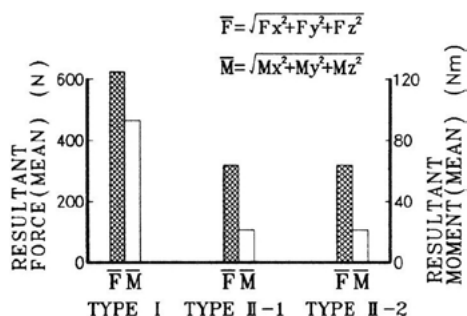


Fig. 11-2 Resultant Force and Moment

これに対して、Type II-2 の標準偏差のうち、前後分力 (F_y)、上下分力 (F_z)、ピッチングモーメント (M_x) は、Type II-1 に対して大幅に低減され、Type I と比較してもなお低減されている。しかし、左右分力 (F_x)、ローリングモーメント (M_y)、ヨーイングモーメント (M_z) は悪化しており、実用試験の振動フィーリングにおいても、全体としては Type II-1 よりは改善されるものの、左右方向のハンドル振動により、機体の直進性が損なわれることが確認された。

しかし、Fig. 11-2 に示すように、Type II-1、Type II-2 とともに合力及び合モーメントは Type I に比較して大幅に低減され、実用試験においても、Type I で見られるような土壌硬度の高い圃場における機体の跳び出し現象は皆無であった。

そこで、このような新方式の利点を維持しつつ、通常の耕うん方式と同等に、合成力の変動を低減できるような爪配列の検討を行った。その結果、正・逆転それぞれの耕うん軸の爪配列のみならず、互いの位相角によっても合成力の波形が変わることに着目し、それに関する解析を行った。

それぞれの爪配列は Fig. 10 の Type II-2 と同一とし、

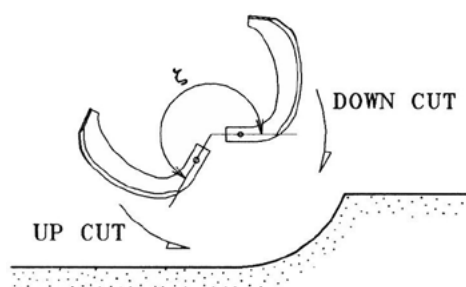


Fig. 12 Phase Angle ζ

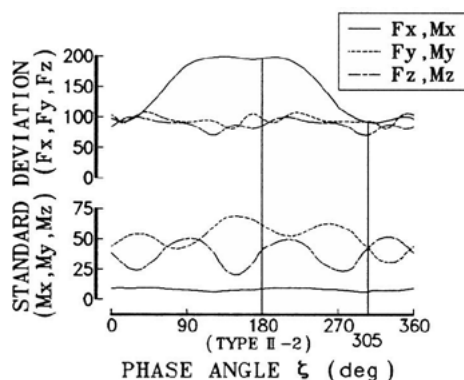


Fig. 13 Phase Angle and Standard Deviation of Force Waves

正転耕うん爪 No.1 の取付け部が耕深 120mm で水平となるようにしたとき、逆転耕うん爪 No.1' の取付け部との位相角 ζ とする (Fig. 12)。

位相角 ζ と合成力の標準偏差の関係を Fig. 13 に示す。

これによると、左右分力 (F_x)、ローリングモーメント (M_y)、ヨーイングモーメント (M_z) の標準偏差は、 ζ に大きく影響を受け、逆に前後分力 (F_y)、上下分力 (F_z)、ピッチングモーメント (M_x) は、それほどの変化がないことがわかる。すなわち、位相角 ζ を適切に設定すれば、Fig. 10 の Type II-1 で問題となったハンドルの上下振動を悪化させることなく、Type II-2 で指摘されたハンドルの左右振動を改善できる。

そこで、左右分力 (F_x) が最小となり、しかもローリングモーメント (M_y)、ヨーイングモーメント (M_z) がそれぞれ極大値をとらないように、位相角 $\zeta = 305^\circ$ を選定し、実用試験を行ったところ、一般的な爪配列を持つ正転耕うん方式の Type I と同程度の、実用上全く問題のないレベルの振動フィーリングを得ることができた。

4.2. 新方式の構造

Fig. 14 に、同軸同時正・逆転ロータリ耕うん軸まわりの構造を示す。

この新方式の耕うん軸は、軸中央部に動力を伝達するセンタードライブ方式を採用している。

トランスミッションにより減速された駆動力は、チェーン①を経てカウンター軸②に伝達され、ギヤ③を介して耕うん軸⑤を正転方向へ駆動する。一方耕うん軸⑥は、チェーン④により逆転方向へ駆動される。その結果、左右とも内側に装着された耕うん爪が正転耕うんを行い、外側に装着された耕うん爪は逆転耕うんを行う。

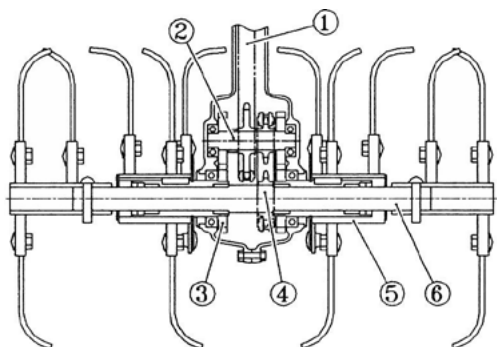


Fig. 14 Configuration of Coaxial Counter-rotating Rotary Shafts

5. まとめ

動力耕うん機の安定化を目的とする、新方式の同軸同時正・逆転ロータリ耕うん方式の開発に際し、耕うん反力のシミュレーション手法を開発した。解析結果は、新方式のみならず通常の耕うん方式に対しても、実際の耕うんとはほぼ一致した。

シミュレーションによると、新方式に一般的な爪配列を施した場合、通常の耕うん方式に対し、機体の安定性を左右する合力、合モーメントは大幅に低減されるものの、振動の要因となる反力の変動は増加した。そこで新方式に次のような爪配列を施し、一般的な爪配列を持つ正転耕うん方式と同程度の振動フィーリングを得た。

(1) 正・逆転それぞれの耕うん軸について、6分力の変動が低減される配列を行う。

(2) 2つの耕うん軸を適切な位相角で配置する。

なお、この新方式を装備した動力耕うん機は、従来の動力耕うん機に比較して、はるかに安定した耕うん状態が達成され、その結果、耕うん軸最大出力までの耕うん作業が可能となり、ユーザーに好評裡に受け入れられている。

参考文献

- (1) 朱、木谷、岡本：アップカットロータリ付きロータ耕うん機の力学的諸特性について、農業機械学会誌 50 (1) 1988
- (2) 柴田、坂井：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) 1977
- (3) 橋口、坂井、山中、岩崎：ロータリ耕うん抵抗6分力の測定用耕うん軸の試作およびトルク波形の解析、農業機械学会誌 47 (3) 1985
- (4) P. A. Cundall, O. D. L. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique 29 No.1 1979
- (5) 坂井、鄒：ロータリ耕トラクタのフィードバック動力と閉ループ的動力伝達について (第2報)、農業機械学会誌 49 (1, 2) 1987
- (6) 松尾：ロータリ耕耘に関する基礎的研究、山形大学紀要 3 (4) 1961
- (7) 坂井、柴田：トラクタ用ロータリ耕なた刃の配列設計理論、農業機械学会誌 40 (1) 1977

APPENDIX A

一定の土質、含水比を持つ土壌を、単一の耕うん爪で耕うんしたときに発生する耕うん軸トルクの平均値を、耕うん軸回転速度、土壌硬度毎に実測する (Fig. 15)。

耕うん軸トルクの大部分は爪屈曲部で発生していると推定されるから、耕うん軸回転速度を、耕うん爪の最大回転半径の土中進行速さに換算する。

この結果を基に、耕うん軸トルクの実測値を土中進行速さの平方で除算し、土壌条件、進行速さに依存した係数 Ch と土中進行速さの関係を得る (Fig. 16)。

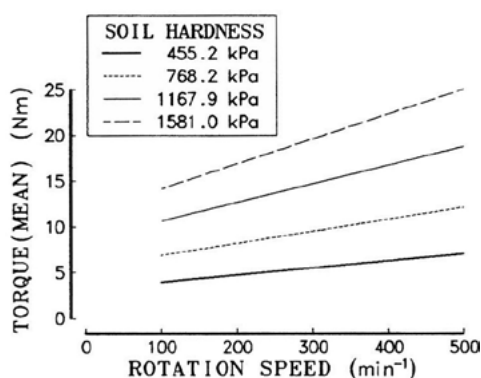


Fig. 15 Tilling Torque versus Rotation Speed and Soil Hardness

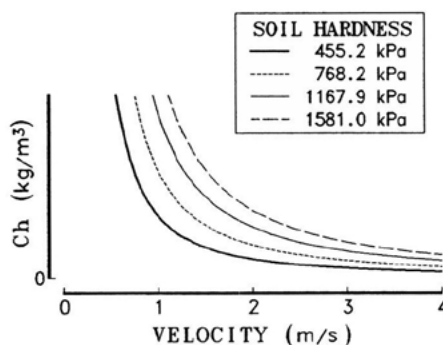


Fig. 16 Coefficient Ch versus Velocity and Soil Hardness

APPENDIX B

Fig. 17 において、土壌の破壊に関与する耕うん爪の表面を N 個の領域に分割し、 k 番目の領域 K の面積を

Ak 、時刻 t における K の進行速さを $Vk(t)$ 、 K と進行方向とのなす角を $\theta k(t)$ とすると、 K の法線方向に作用する力 $\Delta fk(t)$ は、次式ようになる。

$$\Delta fk(t) = Ch \{V_k(t)\}^2 Ak \cos \theta k(t)$$

T を直交空間座標の原点としたとき、時刻 t における K の重心座標を $(xk(t), yk(t), zk(t))$ とすると、 T に作用する 6 分力 $(fx, y, z(t), mx, y, z(t))$ は、次式で表される。

$$f_x, y, z(t) = \sum_{k=1}^N \Delta f_{xk}, yk, zk(t)$$

$$m_x(t) = \sum_{k=1}^N (y_k(t) \Delta f_{zk}(t) - z_k(t) \Delta f_{yk}(t))$$

$$m_y(t) = \sum_{k=1}^N (z_k(t) \Delta f_{xk}(t) - x_k(t) \Delta f_{zk}(t))$$

$$m_z(t) = \sum_{k=1}^N (x_k(t) \Delta f_{yk}(t) - y_k(t) \Delta f_{xk}(t))$$

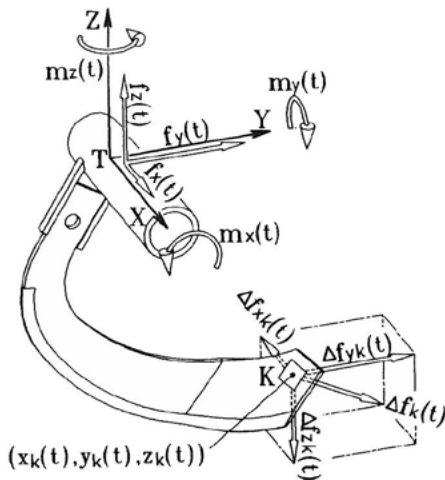


Fig. 17 Forces Imposed on a Blade

APPENDIX C

Fig. 18 において、配列された耕うん爪の本数を W 、また、 P を直交空間座標の原点としたとき、時刻 t における j 番目の爪の回転中心 T_j の座標を (X_j, Y_j, Z_j) とすると、『APPENDIX B』より T_j に作用する耕うん反力 $(fx_j, y_j, z_j(t), mx_j, y_j, z_j(t))$ が算出できる。

よって、それを基に、 P に作用する耕うん反力の合成力 $(F_x, y, z(t), M_x, y, z(t))$ は、次式で表される。

$$F_x, y, z(t) = \sum_{j=1}^W \Delta f_{xj}, yj, zj(t)$$

$$M_x(t) = \sum_{j=1}^W (m_{xj}(t) + Y_j f_{zj}(t) - Z_j f_{yj}(t))$$

$$M_y(t) = \sum_{j=1}^W (m_{yj}(t) + Z_j f_{xj}(t) - X_j f_{zj}(t))$$

$$M_z(t) = \sum_{j=1}^W (m_{zj}(t) + X_j f_{yj}(t) - Y_j f_{xj}(t))$$

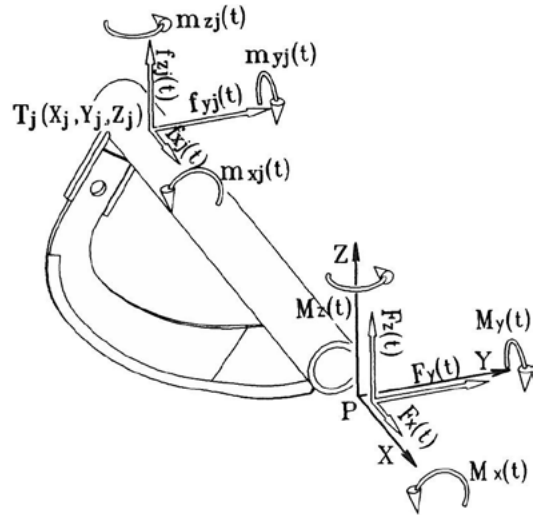


Fig. 18 Forces Imposed on Rotary Shaft

■著 者■



國領 喬



竹内 正志



永岡 政敏



小林 秀明