研究報文

傾斜草地の耕うん作業

伊吹俊彦*・天羽弘一*・渋谷岳*・喜田環樹*・住田憲俊*・井上秀彦*・阿部佳之**・

小島陽一郎*・中尾誠司*・池田俊朗***・黒田将仁***・梅村恭子*

* 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産研究部門

** 農林水産省 農林水産技術会議事務局

*** 松山株式会社

Tillage on Sloping Pastures

Toshihiko IBUKI*, Koichi AMAHA*, Takeshi SHIBUYA*, Tamaki KIDA*, Noritoshi SUMIDA*,

Hidehiko INOUE*, Yoshiyuki ABE*, Yoichiro KOJIMA*, Seiji NAKAO*, Toshiro IKEDA***,

Masahito KURODA*** and Yasuko TOGAMURA*

* National Agriculture and Food Research Organization Institute of Livestock and Grassland Science,

** Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council's Secretariat

*** Matsuyama Plow Mfg Co., Ltd

草地更新が牧草への放射性物質吸収を抑制することが知られているが、傾斜草地では草地更新に必要な機械耕うんが困難である。そこで傾斜地耕うん作業を可能にするため、傾斜地での高い牽引性能および転倒に対する安定性・安全性が期待できる無線操縦のエンジン出力 49.3 kW 履帯トラクタを選定して、これに装着できる作業幅 1.6 m のロータリを開発した。傾斜 15° および 25° の傾斜草地で開発機を用いた上り、等高線、下り方向の耕うん作業を行い、トラクタ履帯の滑り率、エンジン回転数、作業後の碎土程度の調査を行ってロータリ耕うんの適応性を検討した。その結果、15° および 25° の草地での作業速度約 0.45 m/s、耕深 6~9 cm の耕うん条件で、作業方向に関わらずエンジン出力の不足やクローラの滑りによる走行の不安定性は認められず、放射性物質の吸収を抑制する目的の草地更新として必要な、碎土程度が高い耕うん作業を行えることが明らかとなった。

キーワード：傾斜草地、草地更新、放射性セシウム、ロータリ耕うん機

1. 緒言

東日本大震災において放射性セシウム（以下、放射性 Cs）に汚染された農地では、その影響を少なくするための対策が必要であり、作物への放

射性 Cs の移行や農作業者の被曝を抑制する対策が行われている。方法としては取り除く、作物の吸収を抑制する、作業から遠ざけるなどがあり、汚染状況により適切な方法が採られている。取り除くことで空間線量率や作物の種類に関係なく放射性 Cs 濃度の低減に効果があり、水田や畑地に適用されている。農地に降下した放射性 Cs は、地表 5 cm 程度までに大部分が存在している（農林水産省 2013a）ので、取り除く方法としては表層の土壌を除去することが主に行われる。圃場から取り除くことはしないが、土壌の耕う

2015 年 10 月 14 日受付

2016 年 8 月 6 日受理

Corresponding author

伊吹俊彦 Toshihiko IBUKI

〒 329-2793 栃木県那須塩原市千本松 768

768 Senbonmatsu, Nasushiobara-shi, Tochigi, Japan

E-mail : ibu@affrc.go.jp

ん、カリ施肥などにより作物の吸収を抑制する方法があり、土壌の放射性Cs濃度が5000~10000 Bq/kg未満の場合に適用するとしている（農林水産省2013a）。このうち耕うんの方法は、放射性Csが土壌に固定されて脱着されない状態となること（中尾2012）を利用しようとするものである。放射性Csと土との接触機会を増やして固定促進を狙っており、耕うんによる移行低減対策は多くの作物に適用されている。

なお、永年生作物である果樹においては、吸収根が深い位置にあり、根からの放射性Csの吸収は僅かであるので、耕うんによって表層にある放射性Csが下層へ拡散する危険を避けるために、耕うんを行わない方針が示されている（福島県農林水産部2014）。

草地では、牧草の放射性Cs濃度低減のため、草地更新が実施されており、その効果が確認されている（農林水産省2014）。草地更新作業では一般に、前植生の処理（除草剤による枯殺又はモアによる刈払い）後、土壌改良材および肥料の散布、耕うん・整地、播種、鎮圧が行われる。草地更新において牧草への放射性Cs移行を低減させる方法の一つが砕土・攪拌を伴った耕うんであり、土壌を十分に砕土・攪拌することにより牧草への移行を減少できるとされている（農林水産省2014）。プラウによる反転耕は地表面から地中に放射性物質を遠ざけ、土の層が表面を覆うので、空間線量率の低下に効果があり、飼料用トウモロコシではプラウ耕後にロータリによる砕土整地を行った耕うん方法での放射性Csの吸収抑制効果が確かめられている（農研機構2012）。一方、牧草では、プラウ耕による草地更新後の暫定許容値超過が反転埋没したリターからの牧草への放射性Cs移行が原因であると推測される例があり（福島県農林水産部2015）、未更新草地においてはロータリによる表層破碎後にプラウ耕を行った効果が示されている。すなわち、草地では、攪拌による旧植生の破碎と土との混和が重要と考えられる。

平地の草地における更新作業は、車輪トラクタに作業機を取り付けて実施されている。一方、傾斜草地では機械転倒の危険性等から各種の機械作業が困難な場合が多く、草地更新は進んでいない（岩手県2012）。このため、傾斜草地更新が可能な作業体系の確立が望まれている。中でも傾斜草地の耕うんでは、機械作業が不可能な場合の代替

としての人力耕うんが、作業強度・能率の面で実施が困難なことから、機械耕うん方法が求められている。本報告では、傾斜草地での作業が安全に行え、吸収抑制効果が期待できる機械耕うん方法を選定し、必要となる耕うん作業機を開発して、実用性を検討した。

2. 選定した機械、耕うん方法および開発した作業機

1) 傾斜草地耕うん用トラクタの選定およびその特徴

傾斜地での機械作業の限界傾斜角は、登坂限界角度、横転倒角度、横滑りによる走行不能に陥る傾斜角度以内である（田辺1976）ことが必要で、また、作業精度や能率の低下も考慮して限界が示される。草地更新で必要とされる作業の施肥、耕うん、播種、鎮圧について、4輪トラクタを利用した作業では、限界傾斜角は15°程度とされている（松山ら1966b、戸荻ら1967、一戸ら1968）。このうち耕うん作業については、4輪駆動トラクタで15°、履帯トラクタで15~20°（松山ら1966b）、また、特定高性能農業機械導入に関する計画策定では、車輪式トラクタで10°程度を限度としている（農林水産省2013b）。放牧草地は傾斜が20°を超えることも珍しくなく、限界傾斜角が大きいトラクタ・作業機・作業法を選定する必要がある。このため、倒れにくいこと、登坂・降坂・等高線の3方向すべての走行性能が高いこと、転倒に対する安全性の3つの観点から、堤防法面を含む河川敷で使用されている草刈り機（クボタラジコン草刈り機AMX7）の動力供給・走行部分（以下、無線傾斜地トラクタ；図1のトラクタ部分）を利用する方法を選択した。

無線傾斜地トラクタは傾斜地作業に適した構造上の特徴を有している。すなわち、低重心で倒れにくいこと、履帯走行のためタイヤ走行の一般のトラクタと比較して接地長が長いので大きな牽引力が得られ、かつ接地面積が広いために滑りが抑制されること、無線操縦で機体から離れて操作できるので機体転倒時の人身傷害回避や作業中の表土などの飛散による粉塵等の吸引が抑制できることである。無線傾斜地トラクタの主要な諸元は表1に示すとおりであり、全高が1260 mmと低く、履帯の幅および接地長は450 mm および 1840 mm で、合計接地面積は1.66 m²と車輪トラクタと比

図1 試作ロータリ図（左，原図：松山（株））と無線傾斜地トラクタに装着しての作業風景（右）

較して大きい。また、履帯外側間の距離は1900 mmと機関出力が同クラスのトラクタ車輪外側間距離と同程度又は広いことで横方向転倒に対しての安定性が高いと考えられる。そこで、車両の前後左右の4点を荷重計で支持し、水平状態と前後方向に傾斜させた状態（ 15.2° ）における支持位置での分担荷重の測定値から静止した状態で作業機を装着しない無線傾斜地トラクタのみの重心位置を測定した。その結果、重心位置の左右方向はほぼ中央線上にあり、地上からの高さは317 mmであった。トラクタ履帯の下部ローラ外側端（トラクタ中央から左右に810 mmの位置）が横転倒の場合の回転中心と仮定すると重心位置との幾何学的関係から計算される静的横転倒角は 68.7° であり、一般的な車輪式トラクタの静的横転倒角 40° 前後と比較して、傾斜地での安定性がかなり大きいと考えられた。

無線傾斜地トラクタは標準3点リンクヒッチ（カテゴリーⅠ）を備え、作業機の着脱が可能となっている。作業機を駆動するための動力は、一般のトラクタに装備されている機械式のPTO軸からではなく、油圧動力を取り出して作業機を駆動するため、本トラクタ専用の作業機が必要となる。牽引式の作業機についても装着できるものもあるが、作業機の取り付け位置が低く、本体に近いので、トラクタ履帯と作業機の干渉が生じることなどで、大部分の作業機は専用のものとなっている。無線傾斜地トラクタ用にはモータ、ブロードキャストなどが開発されていたが、耕うん用作業機は使用できるものが無いので、これを開発することとした。

表1 無線傾斜地トラクタの主要諸元

全長×全幅×全高	3100 × 2050 × 1260 mm
質量	2400 kg(クイックヒッチを含む)
機関	4気筒水冷副室式ディーゼルエンジン
機関出力/回転数	49.3 kW/2600 rpm
最低地上高	200 mm
履帯幅	450 mm
接地長	1840 mm
履帯中心間距離	1450 mm
作業機駆動方式	油圧駆動方式
電波到達距離	約 100 m

2) 耕うん用作業機の選定と開発機の概要

耕うん方法としては、プラウ耕後にロータリによって碎土・整地を行う方法、ロータリのみによって耕うん・整地する方法、ディスクハローによる簡易耕うんなどの方法が考えられる。プラウ利用では、作業が耕うんと碎土・整地の2工程となることや急傾斜地では等高線方向作業は山側への反転が困難（松山ら1966a）であること、また、上下方向作業の上りでは所要動力が大きいため、片道耕うん作業となる可能性が高いことで能率が低下することが懸念された。また、ディスクハローによる簡易耕では、牧草の放射性Cs濃度低減を目的とした傾斜草地の更新に必要な細かな碎土が困難であることが考えられた。これに対して、ロータリは作業機的全長が比較的短く、強制駆動方式であるため、細かな碎土にも対応可能であることや、1工程で耕うんと碎土・整地が可能なおことから本研究ではロータリ耕うん方式を採用した。

表 2 試作ロータリの主要諸元

全長	1025 mm
全幅	215 mm
全高	915 mm
質量	400 kg
作業幅	1600 mm
最大耕深	12～15 cm
取付け部位	フランジ 8 枚
耕うん爪 本数	42 本
回転直径	500 mm
切削幅	133 mm

ロータリには軸の回転方向の違いでダウンカットロータリ（以下、DN ロータリ）とアップカットロータリ（以下、UP ロータリ）の 2 種類がある。これらの性能が比較・検討されている。すなわち、UP ロータリは残桿等の埋没性能に優れ、耕うん後の表層土壌の碎土率が高い一方で、ロータリ軸回転の所要動力が大きく（森本ら 1983）、また、トラクタに対しては牽引抵抗の負荷をかける（農業機械学会 1996c）。このため、傾斜草地での駆動出力不足が懸念される。加えて草地では石礫が多い状況を考慮して、本研究では、耕うん爪の回転作用が牽引抵抗とならず、耕うん爪が石礫に衝突した場合の衝撃を作業機が上方へ逃げることで緩和しやすい DN ロータリ方式とした。耕うん爪は植物体が絡まりにくい L 字形状で、石礫による衝撃で折れにくくするため、部材幅が広い耕うん爪を採用することとした。開発機では市販されているロータリを基に無線傾斜地トラクタの油圧動力で駆動できるよう油圧モータの取り付けなどの改造を行った。また、無線傾斜地トラクタ履帯へのロータリの機体干渉がないよう、ゲージ輪をロータリ側部に移設した（図 1）。ロータリ装着による重心位置の移動は測定していないが、ロータリは質量 400 kg と無線傾斜地トラクタの 2400 kg に対して軽く、また、全高が 900 mm と高くないので、重心高さの移動は大きくないと判断した。主な諸元は表 2 に示すとおりであり、作業幅は 1600 mm、耕深は最大で 12～15 cm である。耕うん爪は 8 枚のフランジにボルトで取付ける構造であり、左右両端のフランジには 3 本が、それ以外のフランジには 6 本の耕うん爪が取り付けられて合計 42 本で耕うんする。1 本の耕うん爪の切削

表 3 試験圃場の深さ別含水率，仮比重

傾斜 °	深さ cm	含水率 % w.b.	仮比重 g/ml
15	0～5	27.2	0.63
	5～10	23.4	0.74
	10～15	23.3	0.72
25	0～5	31.3	0.64
	5～10	29.6	0.71
	10～15	28.9	0.72

幅は 133 mm であり、耕うん爪先端の回転直径は 500 mm である。進行方向の同一作業線上では、ロータリ軸 1 回転当たりに耕うん爪が土を 3 回程度切削することから、一般的なフランジタイプのロータリの約 2 回に対して耕うんピッチを小さくできることになり、高い碎土性が期待できる。

3. 作業性能調査

開発したロータリを無線傾斜地トラクタに装着して、傾斜 15° および 25° の草地で耕うん作業を行い、その適用性を調査した。

供試圃場はどちらもオーチャードグラスとベレニアルライグラスの混播の草地であり、15° 圃場が採草地、25° 圃場が放牧草地である。15° は車輪トラクタで作業できる限界傾斜であり、開発ロータリの作業は約 15° からの草地への対応が求められる。耕うん作業性能調査時には刈取り又は放牧採食直後であり、草丈は短い状態であった。土壌の含水率、仮比重は表 3 に示すように、15° 圃場で 23～27%、0.6～0.7 g/ml であり、25° 圃場では 29～31%、0.6～0.7 g/ml であった。底面積 2 cm² の円錐貫入抵抗測定の実例を図 2 に示す。15° 圃場、25° 圃場ともに 2～5 cm 深さに貫入抵抗の極大値があった。その値は 15° 圃場で 2.3 MPa、25° 圃場で 1.6 MPa であった。草地の円錐貫入抵抗は、草地による変動が大きく、放射能汚染地域における測定例では、極大値が 2.5 MPa を越える場合や、1 MPa 未満の場合などその範囲が広いが、極大値は概ね 2～5 cm 程度にあった。

試験圃場は上下方向作業では 7 m × 7 m、等高線方向作業では 14 m × 7 m の区画を設定して耕うんを行った（図 3）。上りおよび下り作業はそれぞれ 1～2 行程を作業して機械作動に関する調査（エンジン回転数、履帯滑り率、速度、耕深）

図2 調査ほ場の円錐（底面積 2 cm^2 ）貫入抵抗

を行い、等高線作業では2～3行程作業で調査した。区画内のこれ以外の面積は同じ機械設定条件で耕うん作業を行った。傾斜 25° の草地では、3区画で反復した。 15° の草地では1区画のみを設けた。

無線傾斜地トラクタの操作は、本体および無線送信機のスイッチやレバーなどで行う。本体にはエンジンの始動・停止などに用いるキースイッチやエンジン回転を調節するアクセルレバーなどが備わり、無線送信機には車速および油圧動力取り出し用の流量を調節するダイヤル、操舵用のスティックなどがある。調査では無線傾斜地トラクタのアクセルレバーでエンジンの回転数を無負荷時に 2500 rpm となるよう設定し、原型となったロータリに推奨されている作業速度範囲 $0.28\sim 0.56\text{ m/s}$ の中間付近の 0.45 m/s を目標に送信機の車速調節ダイヤルの位置を固定した。この場合の理論作業量は約 26 a/h となる。ロータリは、無負荷時に軸回転数が約 200 rpm となるようトラクタの油圧動力取り出しの油量調節ダイヤルを設定し、耕深はおおよそ 10 cm となるようゲージホイールの深さ調節ピンの位置を調節した。なお、 $2300\sim 2500\text{ rpm}$ のエンジン回転数範囲で、無負荷時の車速およびロータリ回転数は、設定した車速調節ダイヤルおよび油圧取り出し油量調節ダイヤルの位置で、エンジン回転数に比例することを確認している。

調査項目は、作業速度、履帯滑り率、エンジン回転数、耕深、土塊径分布であり、以下のように

図3 作業性能調査圃場の区画、作業方向

計測・処理した。

作業速度・履帯滑り率：履帯が1回転する間の進行距離 (d) および時間 (t) を測定し、作業速度を算出した。履帯滑り率 (s) は平地の草地におけるエンジンアイドリング状態での履帯1回転の進行距離 (d_0) を基準に式 (1) で算出した。

$$s = (d_0 - d) / d_0 \times 100 \quad (1)$$

1行程作業での作業速度、履帯滑り率は左右履帯での測定を平均した。負の履帯滑り率は基準状態よりも余分に前方に進むことを表す。

エンジン回転数：エンジン出力軸に反射マークを貼付し、反射式の回転計（小野測器デジタルハンドタコメータ HT-5100）を反射光が検知できる位置に固定して回転数を測定し、測定値出力を記録計（キーエンスデータロガー NR-1000）に 10 Hz で記録した。作業区間の測定記録の中で変動が少ない $8\sim 12$ 秒間程度を平均して作業時のエンジン回転数とした。なお、無負荷時の回転数を 2500 rpm に調節して測定を開始したが、記録された無負荷時の回転数の約5秒間の平均は、 $2476\sim 2523\text{ rpm}$ の範囲にあった。エンジン回転数の低下は平均した無負荷回転数からそれぞれの作業時の回転数を差し引いた値とした。

耕深：ロータリ通過後の耕うん底までの未耕地表面からの深さをものさしで測定した。1行程で2～4か所測定して平均した。

土塊径分布： $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times$ 耕うん深さまでの土壌を採取して、ふるい目の大きさ $9.5, 19, 37.5, 63, 106\text{ mm}$ のふるいで分級し、各ふるい上に残った質量から土塊径分布を求めた。測定は各処理区内で3回行い、平均した。1回の測定で採取した土は約 $3\sim 5\text{ kg}$ であった。

4. 結果および考察

1) 履帯滑り率およびエンジン所要出力

傾斜草地のロータリ耕うん作業におけるトラク

表 4 作業方向，傾斜別の作業結果

作業方向	項目	傾斜 15°	傾斜 25°
等高線	作業速度 (m/s)	0.56	0.47
	耕深 (cm)	6.1	7.9
	履帯滑り率 (%)	0.0	-0.4
	エンジン回転数低下 (rpm)	93	111
	エンジン出力 (kW)	32.3	36.6
上り	作業速度 (m/s)	0.51	0.42
	耕深 (cm)	8.9	9.0
	履帯滑り率 (%)	0.9	1.9
	エンジン回転数低下 (rpm)	132	141
下り	エンジン出力 (kW)	41.5	43.0
	作業速度 (m/s)	0.56	0.48
	耕深 (cm)	7.1	6.2
	履帯滑り率 (%)	-5.9	-10.2
	エンジン回転数低下 (rpm)	75	76
	エンジン出力 (kW)	27.0	27.5

タの作業速度，耕深，履帯滑り率およびエンジン回転数低下の傾斜度別・作業方向別の平均は表 4 に示すとおりである。等高線，上り，下り方向のそれぞれの作業速度は，15°草地で 0.56, 0.51, 0.56 m/s, 25°草地で 0.47, 0.42, 0.48 m/s と圃場によりやや違いが出た。これは車速調節ダイヤルの位置調節誤差と考えられる。耕深は上りで深く，下りで浅い傾向が見られ，その範囲は 6.1～9.0cm であった。

履帯滑り率を横軸に，エンジン回転数低下を縦軸にとって，各行程ごとの値をプロットしたものが図 4 である。履帯滑り率は等高線方向作業では，傾斜 15°で -0.9～0.5%，傾斜 25°で -1.7～0.9% と，斜度による滑り率の差は明確ではなかった。また，上り作業では傾斜 15°で 0.6～1.2%，傾斜 25°で 0.2～7.2% であったが，1 点を除いてほぼ 0 に近い値であった。下り作業の履帯滑り率は，傾斜 15°で -5.9%（図 4 では 2 個のデータが重なっている），傾斜 25°で -8.9～-11.4% と，傾斜が大きいほど滑り率は小さかった（負の値が大きかった）。DN ロータリでは，前向き斜め上方向への推進力が働くため，駆動輪の滑りは車輪トラクタでは一般に負の値となる（農業機械学会 1996c）。履帯トラクタの場合もロータリ耕うんによる反力がトラ

図 4 傾斜 (25°, 15°) 草地における無線傾斜地トラクタのロータリ作業時の性能

クタを前方に押すように働くので，ロータリを牽引することを原因とする走行動力の不足は生じない。ただし，上り作業の場合は傾斜によって後ろ向きに力が働くため，前進に要する動力が大きくなる。15°および 25°の上り作業では，滑り率が正となっていて，後方向への負荷が生じていた。車輪トラクタの推進力は主に土のせん断応力から生ずるとされ，滑り率の増加に伴って増大するが，滑り率が 20% を超えると推進力の増大は緩やかとなり（農業機械学会 1996a），滑りによる速度減少で牽引効率の低下が大きくなる。履帯トラクタの場合も同様にせん断力は滑りとともに増大してある値に漸近する（農業機械学会 1996b）ので，大きな滑りでは牽引効率が低下する。本調査での上り作業の滑り率は 0.2～7.2% と大きくはなく，牽引効率を大きく低下させるものではないと考えられる。一方，下り作業での滑り率は負の値が大きくなり，最大で -11.4% である。しかし，観察では制動が不能になるほどの滑りではなく，危険な作業状態ではないと考えられた。

エンジン回転数低下は作業前の無負荷時の回転数に対して，下り作業では傾斜 15°で 75 rpm，傾斜 25°で 55～84 rpm であった。等高線作業では傾斜 15°で 88～96 rpm，傾斜 25°で 99～128 rpm の低下であった。上り作業では傾斜 15°で 129～134 rpm，傾斜 25°では 129～154 rpm となった。走行の負荷が小さい下りから，等高線，上り作業の順にエンジン回転の低下が大きくなる傾向である。エンジン回転の低下が最大となった 25°上り作業時ではエンジン回転数の平均は 2358 rpm (142 rpm の低下) であった。回転数からエンジン出力を推定するため，エンジンの性能曲線を利用した。このため，無線傾斜地トラクタに搭載されているエンジン（クボタ V3300）の回転数－出力線図の 1800 rpm から最大出力が発生する 2600 rpm

図5 エンジンの回転数－出力線図

注) ■ (6点) は傾斜・作業方向別の平均で示す。

までを200 rpm 毎に、2600 rpm から無負荷最高回転数の2783 rpm までを50 rpm 毎に読み取って(図5の黒丸)直線で結んで示した(図5の実線)。農用機関では使用の目的に応じて回転数を落として使われることがあり、この場合にはガバナ立ち上がり曲線はほぼ平行に移動した曲線となる(長広1978)ので、調査時の無負荷回転数である2500 rpm のアクセル開度における回転数－出力の線を、無負荷回転数2783 rpm のアクセル開度における出力線と平行となるよう移動した位置に記入した(図5の点線)。設定無負荷回転数2500 rpm では48.5 kW の最大出力がエンジン回転数2323 rpm で得られることになる。今回の調査で記録された最も回転数が低い作業行程の傾斜25°上り作業での2343 rpm 時には45.4 kW が必要と計算された。今回の調査ではすべての行程でエンジン性能曲線の最大出力より高速回転側、すなわち部分負荷領域での稼働であるので、開発ロータリによる15°および25°の傾斜草地での作業は、大きなエンジン回転数低下を生じることなく行えることが示された。このエンジンの最大トルクは1600 rpm 付近で得られていた。農用機関では最大トルク点の回転速度とガバナ立ち上がり曲線で囲まれた出力－回転数の範囲内で使用するよう設計されている(長広1978)ので、さらに傾斜の大きい上り作業への適用可能性も示唆された。

2) 土塊径の分布

傾斜15°および25°草地でのロータリ作業後の土塊をふるい分けにより調査した質量累積頻度分布を上り、下り、等高線の作業方向別に図6に示す。15°では反復はなく、25°では3反復の平均値である。傾斜15°での土塊径の分布は、上りお

図6 耕うん作業方向・傾斜別の土塊径の累積頻度分布

よび下り作業では9.5 mm のふるいを通過する土塊の割合が78%以上、19 mm を通過する割合は86%以上であったが、等高線作業ではそれぞれの土塊径で61%、66%と上下方向作業に比較して土塊径が大きい結果となった。一方25°圃場では、いずれの作業方向においても9.5 mm のふるいを通過する土塊の割合が75%以上あり、19 mm を通過する割合は80%を越えていた。どの程度の土塊径が放射性Csの吸収抑制に効果が高いかは明確ではないが、粗い碎土では吸収抑制効果が少なく、土塊径20 mm 以下の碎土率が高いほど牧草の放射性Cs濃度が低いことが示されている(農業・食品産業技術総合研究機構2014)。また、草地更新時の改良目標の土壤診断基準が示されており、耕うん後の土塊径20 mm 以下の碎土率が70%以上となっている(北海道農務部2010)。開発ロータリによる作業では19 mm 以下の碎土率は15°草地の等高線作業の66%以外は80%以上であったので、概ね碎土率は良好であると考えられ、放射性Csの吸収抑制に効果が期待でき、かつ、草地更新における牧草の出芽・生育に支障がない碎土・整地が可能と考えられる。

等高線、上り、下りの作業方向の違いによって碎土性能に差が出る要因としては、ロータリ回転

表 5 作業時の推定耕うんピッチ

傾斜 °	作業方向	耕うんピッチ cm
15	等高線	5.0
	上り	4.6
	下り	5.0
25	等高線	4.2
	上り	3.8
	下り	4.3

数および作業速度の高低による耕うんピッチの違いが考えられる。作業時の負荷によるエンジンの回転数低下および履帯の滑りによる作業速度の増減は作業方向により異なることは前項に示した。同じ傾斜では、下り方向で相対的に作業速度が速く、上り方向で遅い。一方、エンジン回転数の低下は、下り方向で小さく、上り方向で大きい。耕うん作業時のロータリ回転数を測定していないが、無負荷時にはエンジン回転数が 2500 rpm から 2300 rpm への低下でエンジン回転数 100 rpm 当たりロータリ回転数が 7.8 rpm 低下することを確認している。エンジン回転数の変動以外の影響によるロータリ回転数の増減がないものと仮定して、作業時のエンジン回転数からロータリ回転数を計算して、耕うんピッチを推定すると表 5 に示す値となる。ロータリ 1 回転当たりの進行方向同一線上における耕うん爪の打ち込み回数は、切削幅 133 mm の耕うん爪 42 本が作業幅 1.6 m に作用する平均値 3.49 回とし、この打ち込み回数と作業速度、ロータリ回転数とから耕うんピッチを計算した。推定した耕うんピッチは 15° の傾斜草地で 4.6～5.0 cm、25° の傾斜草地で 3.8～4.3 cm であり、最大と最小の差は、15° で 0.4 cm、25° で 0.5 cm と小さく、土塊径分布に大きな差が現れないと考えられる。また、耕うん爪を一般的な 1 か所当たり 4 枚から 6 枚に増やしたことによって、通常のロータリより耕うんピッチが小さくなっていることも、試験条件の範囲では、作業方向の違いによる碎土性能への影響を小さくしているものと考えられ、土塊径 19 mm 以下の碎土率 70% 以上の良好な結果が得られたと考えられる。

なお、地表の凹凸などによって耕深が浅い、また、変動が大きい場合には、15° 草地等高線作業の測定結果のように碎土率が低くなることも考え

られる。今回の調査では耕深 10 cm を目標にゲージ輪高さを設定したが、測定耕深は浅くなる傾向が見られた。牧草の放射性 Cs 吸収抑制を目的とした草地更新では、変動が少ない一定の耕深を確保することが必要であり、碎土状態の観察を機械条件設定にフィードバックすることが重要である。

謝辞

この研究は農林水産省の平成 24 年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「傾斜草地における除染技術の開発」の中で実施した。研究の実施に当たり、農研機構御代田拠点の方々に試験圃場の提供と調査への協力をいただいた。また、株式会社クボタからはトラクタエンジンの性能線図を提供いただいた。記して関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 福島県農林水産部 (2014)：農作物の放射性セシウム対策に係わる除染及び技術対策の指針 第 3 版, pp.95-99. <http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/61241.pdf> (2016 年 4 月 25 日閲覧)。
- 福島県農林水産部 (2015)：27 年産牧草の放射性セシウム吸収抑制対策,「ふくしまからはじめよう」農業技術情報, 48, pp.1-4. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/105253.pdf> (2016 年 2 月 18 日閲覧)。
- 北海道農政部 (2010)：北海道施肥ガイド 2010, V 牧草・飼料作物 2 土壌および作物栄養診断基準, pp.190. http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/5bokusou.pdf (2015 年 6 月 1 日閲覧)。
- 一戸貞光 (1968)：傾斜地の土地利用と機械化の限界, 農作業研究 5：1-7。
- 岩手県 (2012)：耕起不能箇所取り扱い, 岩手県牧草地除染マニュアル 第 1 版, pp.10-11. http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/014/935/jokyo.pdf (2015 年 6 月 12 日閲覧)。
- 松山龍男・増田治策・川崎 健 (1966a)：傾斜地農作業の機械化 (2), 農業技術 21(3)：112-115。
- 松山龍男・増田治策・川崎 健 (1966b)：傾斜地農作業の機械化 (4), 農業技術 21(5)：206-

209.
 森本國夫・三浦恭志郎・八木 茂・唐橋 需
 (1983)：レーキ付きアップカットロータリの
 作業性能，農業機械学会誌，45(3)：375-378.
 中尾 淳 (2012)：セシウムの土壌吸着と固定，学
 術の動向，17(10)：40-45.
 長広仁蔵 (1978)：作業機との関連における農
 用機関の基本設計，農業機械学会誌，39(4)：
 548-554.
 農業機械学会 (1996a)：生物生産機械ハンドブッ
 ク，第4編 9.車輪トラクタの力学と性能，コ
 ロナ社，東京都，pp. 340-353.
 農業機械学会 (1996b)：生物生産機械ハンドブッ
 ク，第4編10.履帯トラクタの力学と性能，コ
 ロナ社，東京都，pp. 354-359.
 農業機械学会 (1996c)：生物生産機械ハンドブッ
 ク，第5編 4.1 ロータリ耕うん装置，コ
 ロナ社，東京都，pp. 416-423.
 農業・食品産業技術総合研究機構 (2014)：2013年
 度選定 主要普及成果，草地更新による除染
 では耕深が深く，砕土率が高い耕うん法の効
 果が高い，pp.97-98. [http://www.naro.affrc.go.jp/
 project/results/files/main_results2013.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/files/main_results2013.pdf) (2015
 年6月16日閲覧).
 農業・食品産業技術総合研究機構 (2012)：農研機構
 成果情報，飼料畑の深耕による放射性セシウム
 の下層埋設と空間線量率の低減，[https://www.
 naro.affrc.go.jp/disaster/files/radioactivity_r_01.
 pdf](https://www.naro.affrc.go.jp/disaster/files/radioactivity_r_01.pdf) (2016年2月1日閲覧).
 農林水産省 (2013a)：農地除染対策の技術書（第
 1編調査・設計編）平成25年2月，pp.1-57.
[http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/
 tyousa.pdf](http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/tyousa.pdf) (2016年2月18日閲覧).
 農林水産省 (2013b)：特定高性能農業機械の導入
 に関する計画の策定及びその取扱いについて
 -ガイドライン-平成25年9月4日，pp.5-
 6. [http://www.n-nourin.jp/~nougyoukeiei/pdf/
 syuunousien/H26kikaidounyuukeikaku/130904
 gaidorain1401.pdf](http://www.n-nourin.jp/~nougyoukeiei/pdf/syuunousien/H26kikaidounyuukeikaku/130904gaidorain1401.pdf) (2015年4月1日閲覧).
 農林水産省 (2014)：牧草地における放射性物質移

行低減対策の手引き<東北～北関東地方版>，
 pp.1.

田辺 一 (1976)：傾斜地用農業機械研究の基本
 的考え方，農業機械学会誌 37(4)：635-639.

戸荏義次・一戸貞光 (1967)：土地利用と機械化・
 機械化と栽培技術に関する調査研究-とくに
 傾斜地について-，農業機械化研究所，埼玉，
 pp.10-44.

Abstract

Pasture renovation is known to be able to limit radioactive cesium absorption by grass. However, on sloping pastures, the machine tilling that is necessary for pasture renovation is often difficult. To address this problem, we selected a radio-controlled power tractor with a 49.3 kW engine that achieves high traction on sloping areas due to a crawler-type running device, and we developed an experimental rotary tiller of 1.6 m in working width that can be attached to the tractor. To determine this tractor-tiller combination's tillage performance on sloping pasture, we conducted the tilling in three directions: along the contour line, up the slope, and down the slope on 15° and 25° sloping pastures. We measured the crawler slippage, the number of engine revolutions, and the soil pulverization. The results revealed that under tilling conditions at the working speed of approximately 0.45 m/s and a tilling depth of 6-9 cm, regardless of the traveling direction, the engine output power was sufficient, and no tractor instability due to crawler slippage was observed. Our findings thus indicate that the experimental rotary tiller attached to the crawler tractor provided high pulverization and that this combination can be expected to successfully perform pasture renovation for the remediation of grass.

Key Words

pasture renovation, radioactive cesium, rotary tiller, sloping pasture