

研究報文

乗算優占度を用いたロボット除草の作業能率評価

鈴木大翔*・帖佐 直**・東城清秀**・藤井義晴**

* 東京農工大学農学部 (現所属: 井関農機株式会社), ** 東京農工大学大学院農学研究院

Evaluation of Work Efficiency of Robot Weeding using Multiplied Dominance Ratio

Hiroto SUZUKI*, Tadashi CHOSA**, Seishu TOJO** and Yoshiharu FUJII**

*Tokyo University of Agriculture and Technology, Faculty of Agriculture

(Present affiliation: ISEKI & Co., Ltd.)

**Tokyo University of Agriculture and Technology, Institute of Agriculture

自動走行する芝刈り用ロボットと手刈りによる除草について、東京農工大学農学部構内において2019年7月から11月にわたり4ヵ月間の植生および作業時間の調査を行った。雑草量の評価手法として、被度 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) と草高 (m) を乗じて算出する乗算優占度 ($\text{m}^3 \text{m}^{-2}$) (MDR: Multiplied Dominance Ratio) を用いた。雑草は、直立型、分枝型、匍匐型、叢生型、ロゼット型、つる型の6つに分類される生育型毎に乗算優占度で比較し、除草後の雑草の植生や作業時間を評価した。多様な植生が認められる雑草地において、乗算優占度により区画全体の雑草のバイオマス、夏から秋にかけての生長量の違い、植生の遷移を定量化した。除草方法により植生や生育量が変化し、ロボットによる除草が、分枝型の雑草よりも直立型の雑草により有効となる傾向や、雑草の生育が抑えられたことなどを例示した。また、乗算優占度の試験区毎の合計値とロボット除草の作業時間との間に正の相関があることを明らかにした。さらに、生育型毎の乗算優占度を説明変数とすることで、雑草の量のみならず植生がロボット除草の作業時間に及ぼす影響の度合いを表現できた。これらの結果から乗算優占度が多様な植生の雑草地でのロボット除草の評価に活用できることを示した。

キーワード: 雑草, 乗算優占度, 除草作業, 生育型, ロボット芝刈機

1. 緒言

除草作業は負担の大きい農作業の1つで、高齢者や中山間地域の農業者にとっては特に過酷な作業になっている。除草作業には危険も伴い、回転刃のキックバックや小石の飛散などは重篤な事故を引き越し (消費者庁 2017)、動力刈払機による死亡事故も報告されている (農林水産省 2019)。

除草作業の負担軽減や作業者の安全性向上のため、

新たな視点での除草機械も数多く開発されている。近年では遠隔操作が可能な除草機や自律的な除草作業ロボットが開発されている (菊地 2019a)。加藤ら (2016) は、芝刈り用に市販されている小型ロボットで雑草地の管理が行えることを示した。同種のロボットの果樹園の下草刈りへの適用も試みられ、その有用性と実際の現場に導入した時の課題について検討されるとともに (金井ら 2019)、ロボットの導入が樹園管理の労力軽減に寄与することも示されている (Hoissain et al. 2019)。また、車両自体が自律的に移動するのではなく、2支点からの牽引による誘導で急傾斜法面での草刈りを可能としたシステムも報告されている (菊地ら 2019b)。

様々な除草機械やロボットの開発と併せて、そ

2022年4月1日受付

2022年8月9日受理

Corresponding author

帖佐 直 Tadashi CHOSA

〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8

3-5-8 Saiwai-cho Fuchu, Tokyo, 183-8509, Japan

E-mail: chosa@cc.tuat.ac.jp

これらの農業現場への導入も進展していくと考えられる。しかし、その適用効果や作業能率を定量的に評価するのは容易ではない。草刈りを行おうとする圃場やその周辺の植生は、地域によって異なり、区画内でも一様ではない。作業環境の再現性が得られにくいなかで、開発機など新技術についての適切な評価が求められている。加藤ら(2016)は、対象とした区域内に生育する個々の草種を明らかにしたのち、草刈りの頻度によって植生が変化することを示したが、大きな面積を対象とした調査において全ての雑草種を同定することは極めて大きな労力を要する作業となる。特に生育初期においては、雑草の判別は容易ではないことも適切な調査の妨げとなる。さらに、車両型の機械による作業では、耕耘時の往復耕やコンバイン収穫による回り刈りのように走行経路に重複が無いように作業をするのが一般的だが、草刈り作業においては、雑草発生空間的ばらつきや雑草種によってはその限りではない。現在のロボットによる草刈りでは、作業済の範囲を繰り返し走行することも多い。そのため、農作業の評価で一般的に用いられる作業量(単位時間あたりの作業面積)だけでは作業能率の評価としては不充分である。

そこで本研究では、雑草の植生量の評価指標として乗算優占度 ($m^3 m^2$) (MDR: Multiplied Dominance Ratio) に着目した。乗算優占度は各植物の被度 ($m^2 m^2$) と草高 (m) を乗じて算出する雑草種毎の優占度を表す指標の1つである。小林(2006)は不耕起畑・耕起畑の両方で乗算優占度と雑草乾重との相関が高いことを明らかにしている。類似の指標として積算優占度 (SDR: Summed Dominance Ratio) が知られているが、積算優占度は被度と草高の相対値の単純平均値であるため、本研究において経時的な変化を比較するには適さないものと考えた。定ら(1999)は、耕起畑の雑草植生において乗算優占度が積算優占度など他の指標と比較しても雑草の乾物重と高い相関があると報告している。

本報では、様々な条件のもと、乗算優占度を用いて雑草の量と植生を併せて定量化することが妥当であることを検証し、乗算優占度とロボットによる作業時間との関係について調査した。以上の試みを通して、ロボット除草の作業能率を評価するうえで、乗算優占度が有用であることを明らかにすることが本研究の目的である。



図1 供試したロボット芝刈機 (Automower105, ハスクバーナ・ゼノア)

2. 材料および方法

1) ロボット芝刈機

本研究にはロボット芝刈機 (Automower105, ハスクバーナ・ゼノア) を供試した (図1)。本来は芝刈り用に市販されている小型ロボットであるが、近年、雑草地や果樹園などの除草への適用が試みられている (加藤ら 2016, Hoissain et al. 2019 など)。供試機本体の外寸は長さ 550 mm, 幅 390 mm, 高さ 250 mm, 質量は 6.9 kg で、持ち運び可能な大きさである。ロボット稼働のシステムは、本体以外にチャージステーション、境界ワイヤー、電源供給装置で構成した。作業を行う際には、対象範囲を境界ワイヤーで囲み、ワイヤーの端点をチャージステーションに接続する。チャージステーションは、電源より単相交流 100 V が供給され、本体の充電源となるとともに、作業範囲内であることを示す信号を境界ワイヤーに送信する。本体は、この信号を検知して指定された範囲内をランダムに走行することで草刈りを行う。本体に搭載されたりチウムイオン電池の残容量が低下するとロボットは自律的にチャージステーションに戻り充電を行い、充電が完了すると作業を再開する (高橋 2015)。電源供給装置は、太陽光パネル (公称最大出力 100 W), MPPT チャージコントローラ (EPSOLR, Tracer-2210RN), 鉛蓄電池 (定格容量 115 Ah/20h) で構成され、商用電源がないところでもロボットを動作できるシステム (黒田 2017) とした。

2) 試験区と試験期間

2019年7月から11月にかけて、東京農工大学

農学部（東京都府中市）構内の雑草地で除草試験を行った。対象とした場所は農地として使用された履歴はないが、平坦で陽当たりが良く、複数種の雑草が自生している。本研究では、ロボットにより断続的に除草を行った時の植生の変化を調査し、植生に起因する乗算優占度の違いが作業時間に及ぼす影響について検討するために、手作業による除草、ロボット除草、ロボット除草後の比較の3条件（以降、それぞれ手作業区、ロボット区、対照区）について各3反復の試験区を設け、試験区内の除草を行った。各試験区は1辺が1.5 mの正方形の区画とした。同一条件の区が隣接しないようにして、各区の間隔が0.5 mになるように試験区を配した

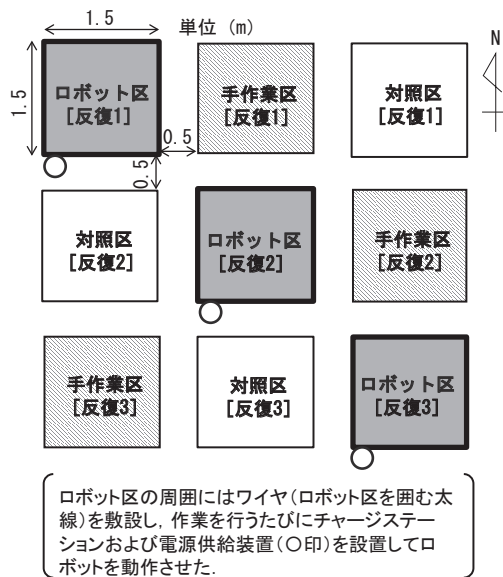


図2 試験区設定の配置図

(図2)。ロボット除草を行う際には、試験区の外周に沿って境界ワイヤを這わせ、自律作業が行えるようにした。ただし、複数の試験区の処理を行うために本来の仕様に基づいたロボット常駐による作業とはせず、設定した時期のみにチャージステーションを移動させながら作業を行った。

手作業区は7月末と9月末の2回、手で雑草を根から引き抜き、引き抜いた雑草は区画内に残さず回収した。そのため、手作業区で観察される草は、種子から生育したもの、もしくは地中深くに残存したものとみなされる。ロボット区では、手作業区と同時期に芝刈りロボットで除草を行った。対照区では、1回目はロボット区と同時期に芝刈りロボットで除草を行ったが、その後の管理は行わなかった（表1）。ロボット除草は、刈り高さ20 mmの設定で雑草を刈り取り、刈り取られた雑草の残渣は区画の中に残した。

3) 植生調査

1回目の除草直前から4か月間にわたり植生の調査を行った。雑草群落の調査に広く用いられるコドラード法（方形区法）に準じて、除草前およびその後の経過について区画内の雑草の種類、生育型、被度、草高を調査した。またこれらの結果を用いて雑草種ごとに乗算優占度を算出した。

最初に、沼田・吉沢（1968）を参照し、区画内に生育している雑草種を判別し、地上部の形態をもとに、直立型、分枝型、匍匐型、叢生型、ロゼット型、つる型の6つの生育型（沼田1987）に分類した（図3）。次に、区画内の雑草種ごとに被度と草高を計測した。被度は、試験区地表面に対して雑草投影面積が占める割合を目測により記録

表1 作業および調査日（2019年）

	ロボット区	手作業区	対照区
調査1		7月22日・23日	
除草1回目	7月24日-8月1日	7月24日-7月25日	8月1日-8月6日
調査2		8月16日	
調査3		8月30日・31日	
調査4	9月16日	9月12日	9月21日
除草2回目	9月21日・22日	-	
調査5		10月7日	
調査6		10月21日	
調査7		11月12日	
除草3回目	11月21日	11月18日・19日	-

した。草高は地際から自然の状態での最高高さを実測した。

4) 除草時間の測定

各試験区で除草作業を行った際の作業時間を測定した。手作業での除草については、区画内の全ての雑草を引き抜いた時間とした。ロボットでの除草については、試験区内の雑草が全て刈り取ら

れるまでの時間とし、境界ワイヤーの敷設、機械設定などの準備にかかった時間や充電時間は除草時間に含めなかった。また、全ての調査が終了した後、手作業区と対照区を含む全ての試験区でロボットによる除草を行い、植生とロボット除草による作業時間との関係についての解析対象とした。

3. 結果および考察

1) 植生および生育量の変化

試験期間中を通じて観察された雑草種とその生育型の分類結果を表2に示す。生育型の分類は、沼田・吉沢(1968)に従い、複数の生育型の特徴をもつ雑草は、雑草種毎の乗算優占度を生育型毎に等分した。ヘクソカズラは直立型とつる型に、カラスノエンドウは直立型と分枝型に、キツネノマゴとコニシキソウは直立型と匍匐型に、イスタデは分枝型と匍匐型に、ヒメムカシヨモギ、ヒメジオン、ギシギシ、ハルジオンはそれぞれ分枝型とロゼット型に分類した。他の雑草と併せて生育型、試験区毎に合算した乗算優占度を算出した(表3)。季節によって繁殖力が異なる雑草もあり、試験期間を通じて観察される雑草種も変化した。試験前は、匍匐型に分類される雑草は確認されなかつ

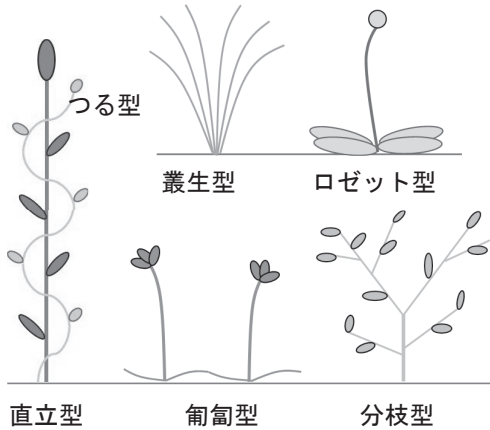


図3 生育型の模式図 (植物生態学論考(沼田 1987)を参考に作成)

表2 試験期間中を通じて観察された雑草種

生育型	除草前(調査1)		除草1回目以降(調査2~4)		除草2回目以降(調査5~7回目)	
	全試験区で観察	一部の試験区で観察	全試験区で観察	一部の試験区で観察	全試験区で観察	一部の試験区で観察
直立型	ヘクソカズラ,	カラスノエンドウ, カタバミ, メドハギ	ヘクソカズラ, コニシキソウ, ダイズ	キツネノマゴ, エゾタチカタバミ, メドハギ	カラスノエンドウ	カタバミ, ダイズ
分枝型	ドクダミ, ヒメムカシヨモギ	ワルナスビ, アカバナユウゲシヨウ, ヒメジオン, ギシギシ, カラスノエンドウ	ドクダミ, エノキグサ, ヒメムカシヨモギ	イスタデ, ワルナスビ, アカバナユウゲシヨウ, ハルジオン	ドクダミ, カラスノエンドウ, ハルジオン	ヨシ, コセンダングサ, ヒメムカシヨモギ
匍匐型	—	—	コニシキソウ	イスタデ, メヒシバ, キツネノマゴ	メヒシバ	—
叢生型	カニツリグサ, メリケンカルカヤ, ススキ	—	ススキ, エノコログサ	—	ススキ	エノコログサ, メリケンカルカヤ
ロゼット型	ヘラオオバコ, ヒメムカシヨモギ	ヒメジオン, ギシギシ	ヒメムカシヨモギ	セイヨウタンポポ, ハルジオン, ヘラオオバコ	セイヨウタンポポ, ハルジオン	ヒメムカシヨモギ
つる型	ヘクソカズラ, ヤブガラシ	—	ヤブガラシ, ヘクソカズラ	—	ヤブガラシ	—

・除草1回目, 2回目, 調査1~7の表記載は, 表1の試験日程の記載に対応する。
 ・雑草種によっては, 生育ステージや形態によって複数の生育型に分類して乗算優占度を算出した。例えば, ヘクソカズラは直立型もしくはつる型に分類した。同じく, カラスノエンドウは直立型もしくは分枝型に, キツネノマゴとコニシキソウは直立型もしくは匍匐型に, イスタデは分枝型もしくは匍匐型に, ヒメムカシヨモギ, ヒメジオン, ギシギシ, ハルジオンは分枝型もしくはロゼット型に分類した。

表3 生育型毎の乗算優占度とロボット除草の作業時間

		除草1回目			除草2回目			除草3回目		
		(植生の調査日 7/22)			(植生の調査日 9/16)			(植生の調査日 11/12)		
		反復1	反復2	反復3	反復1	反復2	反復3	反復1	反復2	反復3
乗算優占度 ($m^3 m^{-2}$)	分枝型	0.088	0.425	0.175	0.016	0.023	0.028	0.018	0.013	0.015
	直立型	0.113	—	0.090	0.040	0.030	0.146	0.012	0.004	0.014
	つる型	—	0.125	0.175	0.087	0.170	0.047	0.022	0.013	0.021
	匍匐型	—	—	—	0.303	—	0.004	0.035	0.002	—
	ロゼット型	0.280	0.035	0.108	—	0.009	0.026	0.005	0.012	0.022
	叢生型	0.240	0.080	0.115	—	0.047	0.016	0.192	0.044	0.093
	合計	0.720	0.665	0.663	0.445	0.279	0.267	0.285	0.088	0.164
作業時間 ($min m^{-2}$)		140	116	82	47	54	17	8.9	4.9	8.0

・除草1~3回目の記載は、表1の試験日程に対応し、作業時間は各除草においてロボットが稼働した時間とした。
 ・乗算優占度は、各除草直前の調査(表1)の結果により算出した。

たが、夏以降はコニシキソウやメヒシバが観察されるようになった。全ての試験区、試験期間を通じてドクダミ、ススキ、ヤブガラシが観察されたが、必ずしもこれらが主要な雑草であったわけではない。雑草種の優占の様子は、試験区や調査時期によって変化したが、生育型毎の乗算優占度により、その変遷を定量化した。図4は、生育型毎の乗算優占度の割合の初期状態が類似する試験区について、その変化を例示したものである。ロボット区および対照区では、直立型が減少しながら、分枝型が増える傾向が見られたが、手作業区では、除草によりその両方の生育型が一時的に激減した。手作業区は雑草を根から引き抜いたのに対して、他の試験区では設定した刈り高さにそろえたこととの違いが影響した可能性も考えられる。

生育型毎の乗算優占度の総和を各試験区に生育している雑草のバイオマスと捉え、それぞれの区の推移を図5に示す。夏(7月から8月にかけて)のほうが、秋(9月から10月にかけて)よりも生育が旺盛である様子が定量的に示された。統計的には有意差(5%水準でのウェルチのt検定)は認められなかったが、夏季には手作業区での生育が旺盛になる傾向がみられた。根から雑草を引き抜いたことと20mmほどの高さで草を残したことの違いの他、ロボット除草では、機械の繰り返しの踏圧や、刈り取り後の草の堆積などが抑草の効果となったことが考えられる。特段の処理を行わなかった対照区について、1回目の除草後は、他の試験区と同様に乗算優占度が上昇したが、9月以

降の生長量は異なるものとなった。他の試験区では、除草により更新された雑草の生育が旺盛となったが、対照区では当初から生育していた雑草の生育が停滞した様子が表現されたものと考察した。

2) 乗算優占度とロボット除草時間の関係

手作業区の平均除草時間は $17.9 min m^{-2}$ 、標準偏差は6minで、試験区毎の作業時間に大きな違いはなかったが、ロボットによる除草では除草時期や試験区によって作業時間は大きく変化した(表3)。供試機は芝刈り用に開発されており、車高より高く、容易に乗り越えられない草は障害物と見なすため、ロボットは、衝突を繰り返しながら、少しずつ草を押し倒し、乗り越えられる状態になってから刈り取りを行った。また、叢生型雑草の細い葉やつる型雑草のつるが刈り刃に絡まり、作業の妨げになることもあった。そのため、ロボットの作業時間は、雑草の量のみならず生育型に影響を受ける様子が観察された。

試験期間中のロボット区および、試験終了後の全区画について、乗算優占度とロボットによる作業時間との関係を図6に示す。両者の間には正の相関が認められ、1%水準で有意であった。しかし、試験区毎の乗算優占度が同等であっても、作業時間に違いが生じる場合があった。表3にロボット区全試験区の乗算優占度について、生育型の内訳と作業時間を示した。例えば、2回目の除草のロボット区2、3ではいずれも乗算優占度は $0.28 m^3 m^{-2}$ 前後であるが、除草時間は4倍以上の違いがある。

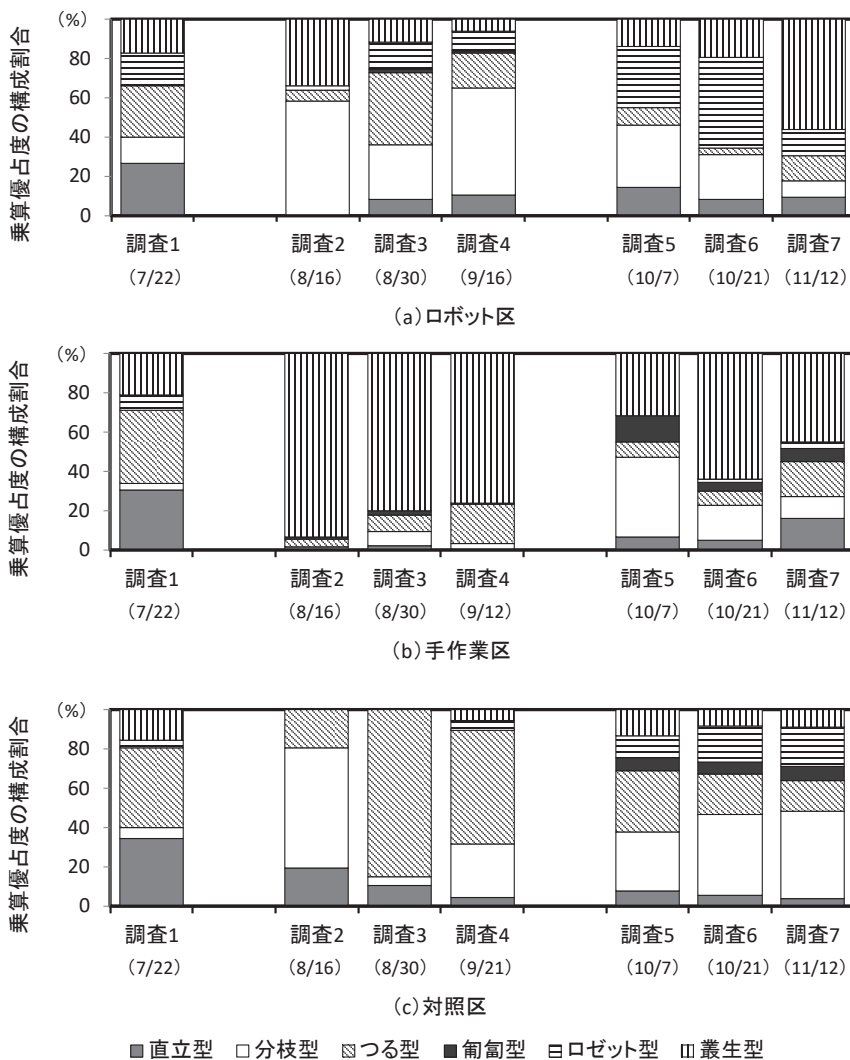


図4 試験期間中の各試験区の植生変遷の例

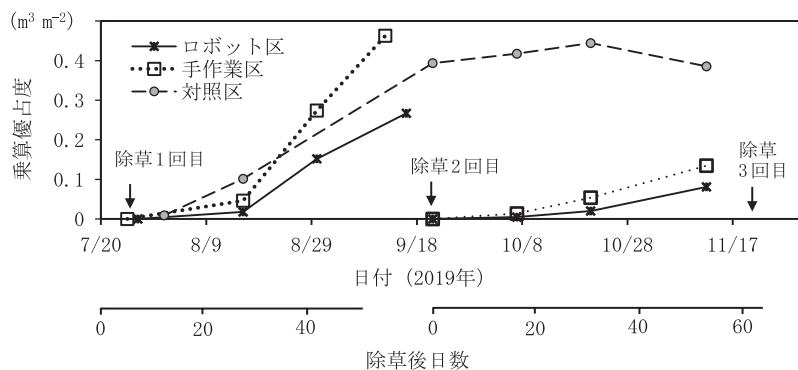


図5 除草後の各試験区の雑草の乗算優占度

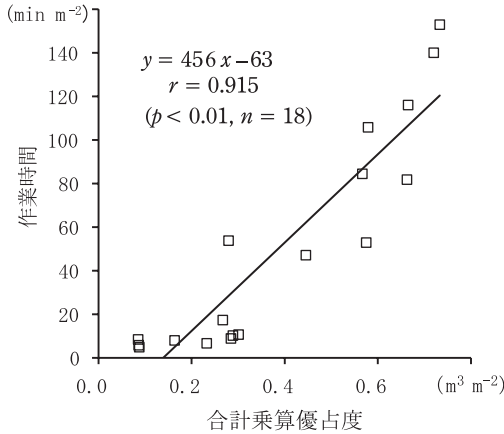


図6 ロボット除草時間と乗算優占度の関係
データ数 $n=18$ のサンプルのもと、合計乗算優占度 (x) と作業時間 (y) との間の相関係数 (r) は 0.915 となり、有意水準 1% ($p < 0.01$) で正の相関が認められた。

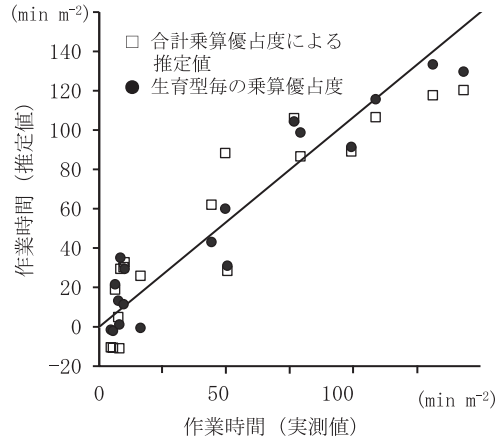


図7 単回帰と重回帰モデルの比較
(ロボット除草時間と乗算優占度の関係)

y : 作業時間 (min m⁻²)

生育型毎の乗算優占度をみると、2 回目の除草のロボット区 2 では、つる型および叢生型の乗算優占度が、2 回目の除草のロボット区 3 にくらべて 3 倍程度の値となっており、この植生の違いがロボットの作業時間に影響を及ぼしたものと考えられる。生育型の違いがロボット作業に影響を及ぼしたとする観察を定量的に裏付けた結果といえる。試験終了後の除草のロボット区 1 も同等の乗算優占度であるが、つる型の乗算優占度が小さく、作業時間は短くなっている。叢生型の生育は旺盛であったが、叢生型の雑草については季節によって及ぼす影響が変化したものと考えた。

図 6 の近似式 (式 1) は、試験区毎の合計乗算優占度を説明変数として、作業時間との関係を示した単回帰直線である。さらに、生育型毎の乗算優占度を説明変数とすることで (式 2)、有意水準 1% で相関が認められ、重回帰係数は 0.955 となった。重回帰式より得られる推定値は、合計乗算優占度を説明変数とした単回帰にもとづく推定値よりも実測値に近い値となった (図 7)。

$$y = 456x - 63 \quad (1)$$

$$y = 430x_1 - 127x_2 + 464x_3 + 328x_4 + 738x_5 + 738x_6 - 45 \quad (2)$$

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \quad (3)$$

$x_1 \sim x_6$: 分枝型, 直立型, つる型, 匍匐型, ロゼット型, 叢生型それぞれの乗算優占度 (m³ m⁻²)

x : 合計乗算優占度 (m³ m⁻²)

3) 乗算優占度の活用と今後の課題

以上の通り、雑草の植生量の評価指標である乗算優占度に着目し、複数種の雑草が生育しているなかで試験区毎の乗算優占度の合計値とロボット除草の作業時間との間に正の相関があることを明らかにした。さらに、生育型毎の乗算優占度を説明変数とすることで、植生の違いが作業時間に及ぼすことを表現できることを示した。本報では、植生の詳細を把握するために雑草種毎に乗算優占度を算出した後、生育型毎に分類して解析を行ったが、専門的知識がなく雑草種を同定できなくても、形態による生育型の判別であれば比較的容易となるため、多様な植生の試験地において、除草の効果や除草機の機能を評価するうえで広く乗算優占度が有用になると考えられる。

従来、農作業の能率は作業量 (単位時間あたりの作業面積) をもとに議論することが多かったが、植生が異なり、断続的な作業となるロボット除草においては、生育型毎の乗算優占度を検証することで、より詳細な検討が必要になることも示された。説明変数を増やすことでモデルの精度が向上することは自明であるが、今回の結果から雑草の生育型がロボット除草の作業時間に影響を及ぼす様子を説明できており、各生育型に、ロボット作業時の刈り取りへの負荷や、トラブルの発生要因などについて検討を深めるとともに、作業時期 (季節) の影響も加味することで、より詳細に

重回帰によるモデルの適性が検証できる。引き続き多くの事象を対象として検証を重ねていく必要があり、そのためにも、画像解析やセンシング技術などを駆使して、より効率的に乗算優占度を算出する手法を案出することが今後の課題となる。

引用文献

- ハスクバーナ・ゼノア株式会社 (2008) : ロボット 芝刈機 AUTOMOWER™ 105, <https://www.husqvarna.com/jp/products/automower/robotsutozhi-yi-ji-automower-105/967645429/> (2022年3月31日閲覧)。
- Hossain, M. Z, Komatsuzaki, M. (2019) : Determination of Robot Automower Driving Ability in Orchard Field, *Japanese Journal of Farm Work Research* 54 (Extra Issue 1) : 5-6.
- 金井源太・好野奈美子 (2019) : 農業用除草機としての市販芝刈りロボットの有効性, 2019年農食施設 CIGR VI 国際大会講演要旨集 : 40.
- 加藤亮祐・帖佐 直・東城清秀・吉川正人・持丸知宏 (2016) : ロボット芝刈り機を用いた草刈りが雑草地の植生に与える影響, *農作業研究* 51(別1) : 23-24.
- 菊地 麗 (2019a) : リモコン式草刈機の機種比較および導入前の検討事項, *農作業研究* 54(別号2) : 77-85.
- 菊地 麗・奥野林太郎・佐藤達也・亀井雅浩 (2019b) : 誘導式小型草刈りロボットの動作軌跡の解析, 2019年農食施設 CIGR VI 国際大会講演要旨集 : 36.
- 小林浩幸 (2006) : 不耕起ダイズ栽培における雑草の生態と耕種的防除, *東北農業研究センター研究報告* 105 : 97-154.
- 黒田浩明 (2017) : 独立型電源 (太陽光 + 蓄電池) による芝刈りロボットへの電源供給の検証, *農業食料工学会第 76 回年次大会講演要旨集* : 187.
- 農林水産省 (2019) : 平成 29 年に発生した農作業死亡事故の概要, <https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/attach/pdf/index-3.pdf> (2020年4月24日閲覧)
- 沼田 真・吉沢長人 (1968) : 新版・日本原色雑草図鑑, 全国農村教育協会.
- 沼田 真 (1987) : 植物生態学論考, 東海大学出版会.
- 定 由直・三浦勲一・伊藤操子 (1999) : 被度と草高に基づく雑草バイオマス量推定の可能性について, *雑草研究* 44(別) : 106-107.
- 消費者庁 国民生活センター (2017) : 刈払機(草刈機)の使用中の事故にご注意ください!, https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/release/pdf/consumer_safety_release_170720_0001.pdf (2020年4月24日閲覧)
- 高橋伸拓 (2015) : ロボット芝刈機, *農業食料工学会誌* 77(1) : 4-8.

Abstract

We compared weed vegetation and ground workability after autonomous robotic weeding and hand weeding on experimental plots at Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan, over a four-month period (July to November 2019). The index used for the volume of weeds was the multiplied dominance ratio (MDR) ($m^3 m^{-2}$), calculated as the product of the plant coverage ratio ($m^{-2} m^{-2}$) and plant height (m). Weeds were classified by growth form: erect, branched, procumbent, tussock, rosette, and liane. After weeding, weed vegetation and ground workability were evaluated, and the difference in weed biomass between before and after weeding was quantified for each plot. Furthermore, the difference in the degree of weediness between summer and fall for a plot with various types of vegetation was quantified using the MDR. The types of vegetation and their growth amounts depended on the weeding method. Observation of the autonomous robotic weeding revealed that it was more effective for erect form weeds than branched form weeds and that it suppressed the growth of weeds. There was a positive correlation between the total MDR for each plot and the duration of robotic weeding. Furthermore, the affection to the root operating time could be quantified using the MDR of each growth form as explanatory variables. These results demonstrate that the MDR is useful for evaluating robotic weeding in a field with various forms of weeds.

Key Words

growth form, multiplied dominance ratio, robotic weeding, weeding work, weeds