

山形県におけるスルホニルウレア系除草剤抵抗性オモダカの発生と対策

山形県最上総合支庁
農業技術普及課産地研究室
松田 晃

1. はじめに

スルホニルウレア系除草剤 (SU 剤) は、アセト乳酸合成酵素 (ALS) を標的とする ALS 阻害剤の一種で、国内の水田雑草防除に広く用いられている。ALS 阻害剤に対する抵抗性は世界中で 130 種以上の雑草種で報告されており (Heap *et al.* 2019), 中でも SU 剤に対する抵抗性の発生は、国内ではオモダカ (*Sagittaria trifolia* L.) を含め、ミズアオイ、アゼトウガラシ、アゼナ類、イヌホタルイ、コナギ、ウリカワ等 20 種の水田雑草で確認されている (Itoh *et al.* 1999; 小荒井・森田 2002; 内野 2019)。山形県内の水田でも、SU 剤抵抗性のアゼナ類、イヌホタルイ、コナギの発生が 2003 年までに確認されていた。

2010 年頃までにオモダカは山形県内で広く問題視され、防除対策に関する要望が高まっていたが、SU 剤抵抗性の状況は不明であった。オモダカの現地における残草要因として、栄養繁殖器官からも発生し後次発生が多いため、近年主流となっている一発処理除草剤中心の防除で残草しやすいことが考えられた。しかしこのような発生生態的要因に加えて、もしも SU 剤抵抗性が関与するならば、このことも考慮して防除対策を講じる必要があった。

一般に、除草剤抵抗性の機構は標的部位 (作用点) の変異による作用点抵抗性 (Target-site resistance: TSR) と、標的部位の変異によらな

い非作用点抵抗性 (Non target-site resistance: NTSR) に分けられる (Yu *et al.* 2010)。SU 剤抵抗性の場合、TSR は ALS のアミノ酸置換によって引き起こされる (Tranel and Wright 2002)。抵抗性を引き起こす ALS のアミノ酸置換部位としては Ala₁₂₂, Pro₁₉₇, Ala₂₀₅, Asp₃₇₆, Asp₃₇₇, Trp₅₇₄, Ser₆₅₃, Gly₆₅₄ の 8 箇所があり、いずれか 1 箇所でもアミノ酸置換が起こると ALS 阻害剤に抵抗性となる。一方、NTSR は除草剤の解毒代謝機能の向上など作用点以外の変異による抵抗性で、その機構には解毒代謝酵素のシトクロム P450 が関与することが複数の雑草種で示されているが、TSR に比べて解明が進んでいない (Yu and Powles 2014)。

日本で確認されている水田雑草の SU 剤抵抗性は、そのほとんどの種が TSR による抵抗性であるが、オモダカでは TSR と NTSR の両方の抵抗性が確認されている (内野 2015)。秋田県で確認された TSR と NTSR のオモダカは除草剤反応が異なり、TSR 系統は bensulfuron-methyl (BSM) と pirazosulfuron-ethyl (PSE) の両方に交差抵抗性を示すのに対し、NTSR 系統は BSM に抵抗性を示すが PSE には感受性を示した (Iwakami *et al.* 2014)。

本稿では、山形県における 2010 年以降の調査報告 (松田 2013, 松田ら 2017) を主に引用し、SU 剤抵抗性のオモダカが広く発生していること、SU 剤抵抗性オモダカの ALS 遺伝子の

変異の有無、TSR と NTSR の割合や分布について述べる。この調査は当初、単に抵抗性か否かを明らかにする目的から着手したが、多様な抵抗性バイオタイプが見いだされ、それらの発生状況や除草剤反応を検討するに至った。TSR と NTSR は SU 剤に対する反応が異なるため、両者を区別して発生状況を明らかにすることは防除対策上重要であり、非 SU 系の各種代替成分の有効性についても両者を区別して確認する必要が生じた。近年では、BSM や PSE 等の従来から用いられてきた SU 成分に加え、新規の ALS 阻害剤としてピリミルスルファンやペノキスラム等が市販され、水田雑草防除に使われる ALS 阻害剤の種類が増加しており、これらの有効性の確認も必要と考えた。

2. 現地個体の収集

本調査では、山形県内に発生したオモダカについて ALS 遺伝子を解析し、バイオタイプ別の地理的分布を明確にした。併せて、防除対策を明確にするため、非 SU 系成分や新規 ALS 阻害剤を含む各種除草剤成分に対する反応をポット試験により調査し、バイオタイプによる違いを検討した。さらに、地上部再生法を利用したバイオタイプの判別について検討した。

2010 年から 2013 年にかけて山形県内の現地水田 31 地点 (地点 1 ~ 31) から矢尻葉抽出期のオモダカを採取した (表 -1)。採取は 6 月末から

表-1 地上部再生法における再生葉数, ALS 遺伝子におけるアミノ酸部位の DNA 塩基配列と推定アミノ酸, 判定されたバイオタイプ

地点	地上部再生法						圃場内の混在	遺伝子解析				バイオタイプ		
	再生葉数							アミノ酸部位						
	無処理		BSM		PSE			Pro ₁₉₇		Trp ₅₇₄				
	平均	± SE	平均	± SE	平均	± SE		DNA 配列	アミノ酸	DNA 配列	アミノ酸			
0	5.0	± 0.0	0.0	± 0.0	0.0	± 0.0		CCC	Pro	TGG	Trp	感受性		
1	5.7	± 0.7	0.5	± 0.5	**	0.0	± 0.0	**	-	-	-	-	感受性	
2	4.8	± 1.1	4.7	± 0.3	NS	4.3	± 0.8	NS	CAC	His	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
3	5.0	± 0.4	4.3	± 0.5	NS	2.0	± 1.2	*	混在	CAC	His	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇
4	5.0	± 1.0	5.0	± 0.0	NS	4.5	± 0.5	NS	CCC	Pro	TTG	Leu	TSR-Trp ₅₇₄	
5	5.0	± 0.6	4.0	± 0.0	NS	4.0	± 0.0	NS	CCC	Pro	TTG	Leu	TSR-Trp ₅₇₄	
6	4.3	± 0.7	4.0	± 0.0	NS	0.3	± 0.3	**	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR	
7	4.3	± 0.3	5.0	± 0.6	NS	4.7	± 0.3	NS	-	-	-	-	TSR(未分析)	
8	5.8	± 0.7	0.0	± 0.0	***	0.0	± 0.0	***	CCC	Pro	TGG	Trp	感受性	
9	7.0	± 0.0	0.3	± 0.3	***	0.0	± 0.0	***	CCC	Pro	TGG	Trp	感受性	
10	6.0	± 0.4	4.0	± 1.0	NS	5.5	± 0.3	NS	-	-	-	-	TSR(未分析)	
11	4.3	± 0.3	5.5	± 0.3	*	5.0	± 0.4	NS	-	-	-	-	TSR(未分析)	
12	5.8	± 0.6	5.5	± 0.3	NS	3.0	± 1.2	NS	混在	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR
13	3.7	± 0.3	3.3	± 0.3	NS	0.0	± 0.0	**	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR	
14	5.3	± 0.3	4.0	± 0.6	NS	0.3	± 0.3	***	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR	
15	4.5	± 0.3	4.5	± 0.3	NS	0.5	± 0.3	***	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR	
16	5.0	± 0.4	5.3	± 0.5	NS	0.0	± 0.0	***	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR	
17	4.8	± 0.4	2.8	± 1.2	NS	1.2	± 0.7	*	混在	CCC/CTC	Pro/Leu	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇
18	5.3	± 0.3	3.3	± 1.1	NS	2.8	± 1.6	NS	混在	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR
19	5.3	± 0.6	0.8	± 0.8	***	0.3	± 0.2	***	CCC	Pro	TGG	Trp	感受性	
20	4.0	± 0.0	5.0	± 0.4	NS	4.5	± 0.5	NS	ACC	Thr	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
21	5.3	± 0.3	5.0	± 0.0	NS	0.3	± 0.3	***	CCC	Pro	TGG	Trp	NTSR	
22	6.8	± 0.6	6.8	± 0.3	NS	7.0	± 0.0	NS	CAC	His	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
23	6.8	± 0.3	6.8	± 0.5	NS	1.3	± 0.7	***	CCC/TCC	Pro/Ser	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
24	5.8	± 0.3	5.5	± 0.3	NS	3.0	± 3.0	NS	CCC/GCC	Pro/Ala	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
25	5.3	± 0.3	4.0	± 1.0	NS	3.5	± 0.5	NS	TCC	Ser	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
26	4.5	± 0.3	5.0	± 0.0	NS	4.0	± 2.0	NS	CCC/ACC	Pro/Thr	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
27	4.0	± 0.0	4.5	± 0.5	NS	4.0	± 0.0	NS	GCC	Ala	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
28	4.5	± 0.5	5.0	± 0.0	NS	5.0	± 0.0	NS	-	-	-	-	TSR(未分析)	
29	4.5	± 0.5	4.0	± 1.0	NS	5.0	± 0.0	NS	CCC	Pro	TTG	Leu	TSR-Trp ₅₇₄	
30	6.0	± 0.0	4.8	± 0.3	NS	3.3	± 0.3	**	TCC	Ser	TGG	Trp	TSR-Pro ₁₉₇	
31	5.0	± 0.0	3.5	± 0.5	NS	4.5	± 0.5	NS	CCC	Pro	TTG	Leu	TSR-Trp ₅₇₄	

- 再生葉数は各処理 2 ~ 6 個体の平均 ± 標準誤差。記号は無処理区との有意差 (Dunnett 検定), * : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, NS : 有意差無し。
- 地上部再生法で SU 剤処理区の再生葉数の個体間差が大きい場合に, 異なるバイオタイプの個体が混在と推定。
- 「/」は解析結果のクロマトグラムにおいて 2 種類のピークがあったことを示す。「-」は未分析。
- Pro₁₉₇ および Trp₅₇₄ を分析したすべての系統は, Ala₁₂₂, Ala₂₀₅, Asp₃₇₆, Arg₃₇₇, Ser₆₅₃, Gly₆₅₄ の塩基置換は検出されなかった。
- TSR : 作用点抵抗性, NTSR : 非作用点抵抗性

7月中旬に行い、地上部再生法による抵抗性検定に供試した。残りの個体もポットに移植して生育させ、土中に生産された塊茎を供試してALS遺伝子の解析を行い、その後、各バイオタイプから数系統を代表としてポット試験に供試し、防除試験および地上部再生法によるバイオタイプ判別の検討を行った。なお、感受性対照として山形県農業総合研究センター（山形市）場内産のオモダカを用いた（地点0）。

3. SU 剤抵抗性オモダカのバイオタイプの種類と地理的分布

現地で採取した個体のSU剤感受性を短期間で判定するため、地上部再生法（大野ら 2004）による抵抗性検定を行った。水田土壌を1/10,000 aポットに充填し、代かき後、現地水田で採取したオモダカを移植した。検定に用いた成分はBSMおよびPSEとした。薬剤はそれぞれ0.25% BSM・4.0%メフェナセット混合3キロ粒剤、0.07% PSE 3キロ粒剤を用いた。処理量は標準薬量（BSM 7.5 mg a.i. m⁻², PSE 2.1 mg a.i. m⁻²）とした。原則として、ポットは各処理区2反復、ポット当たり個体数を2または3としたが、採取個体数が不足した一部の地点では反復数を減らした。ポットに移植して2日後に3 cmの高さで地上部を切除し、湛水して薬剤を処理した。ポットは湛水を保ち、3ないし4週間後に再生葉数を記録した。抵抗性の判定は、除草剤処理区において新葉の再

生がない場合は感受性と判定し、無処理区と同等の旺盛な生育を示した場合や、抑制されながらも数枚の葉の再生を示した場合は、抵抗性と判定した。

表-1の左側は地上部再生法における各地点のオモダカの再生葉数を示す。多くの地点でいずれかのSU成分の効果が劣り、特にBSMに対しては現地31地点中27地点が強い抵抗性を示した。BSM感受性であった5地点（0, 1, 8, 9, 19）のオモダカはすべてPSEにも感受性であった。BSMに対して抵抗性を示した27地点のうち、PSEに対しては6地点（6, 13, 14, 15, 16, 21）が感受性、6地点（3, 12, 17, 18, 23, 30）が弱い抵抗性、残る15地点が強い抵抗性を示した。以上より、山形県内にはBSMとPSEに対して異なる反応を示すオモダカが発生しており、多様な除草剤感受性を有するオモダカが広い範囲に分布していた。

地点17におけるBSM処理および地点3, 12, 17, 18におけるPSE処理では、再生葉数の個体間差（標準誤差）が大きく、検定に供試した複数の個体に、新葉の再生を示す個体と示さない個体が混じっていた。結果の異なる個体が存在したこれらの地点では、圃場内に異なるバイオタイプが混在した可能性が高い。現場から個体を持ち帰り地上部再生法を行う際の注意点として、複数の個体を供試し、混在の可能性を含めて結果を考察する必要がある。

ALS遺伝子の解析には、31現地系

統のうち27系統を供試した。オモダカ植物体のALS遺伝子は、Iwakami *et al.* (2014) に従い、塊茎由来の個体の緑葉からDNAを抽出し、PCRによってALS遺伝子を増幅した後、アミノ酸置換がALS阻害剤抵抗性を引き起こす部位（Ala₁₂₂, Pro₁₉₇, Ala₂₀₅, Asp₃₇₆, Asp₃₇₇, Trp₅₇₄, Ser₆₅₃, Gly₆₅₄）の塩基配列をダイレクトシーケンスにより決定した。

表-1の右側に、オモダカのALS遺伝子の解析結果を示す。遺伝子解析を行った27系統のうち、11系統のALSにおいてPro₁₉₇のHisまたはThr, Leu, Ser, Alaへのアミノ酸置換が認められ、4系統のALSにおいてTrp₅₇₄のLeuへのアミノ酸置換が認められた。Pro₁₉₇およびTrp₅₇₄の他にも、Ala₁₂₂, Ala₂₀₅, Asp₃₇₆, Asp₃₇₇, Ser₆₅₃, Gly₆₅₄の塩基配列も決定したが、これらの部位に塩基置換は検出されなかった。なお、地点17, 23, 24, 26ではPro₁₉₇部位をコードするコドンに2通りの塩基配列が検出されるヘテロ接合型であった。またBSMに対する反応が混在と判断された系統17については、複数の個体を解析したところアミノ酸置換が認められない個体もあったので、感受性個体が混在していた可能性が高い。遺伝子解析の結果をもとに、BSM抵抗性を示した系統のうち、上記のアミノ酸置換が認められた系統をTSR、アミノ酸置換がない系統をNTSRとし、表-1の最右列に示した。遺伝子解析ができなかったBSM抵抗性系統は、い

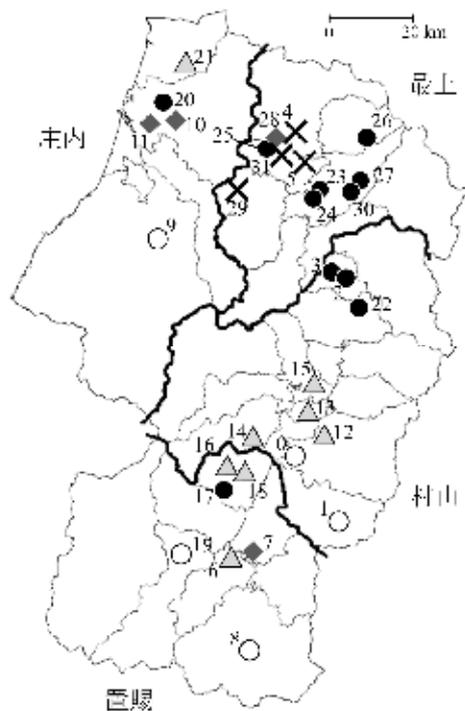


図-1 山形県におけるSU剤抵抗性オモダカの発生状況

- 1) 現地からのオモダカの採取年次は2010～2013年
- 2) ○ 感受性, ▲ NTSR, ● TSR (Pro₁₉₇変異), × TSR (Trp₅₇₄変異), ◆ TSR (未分析)
- 3) NTSRには、遺伝子解析の結果変異が検出されなかった場合と、遺伝子解析を行わずポット試験結果から推定した場合を含む

ずれもPSEに強い抵抗性を示したことから、Iwakami *et al.* (2014)の結果をもとにTSRと推定し、「TSR(未分析)」とした。

図-1は、判定された各バイオタイプの地理的分布を示す(混在と判定された地点は、防除対策の観点から、交差抵抗性の広いバイオタイプに分類)。感受性、NTSR、Pro₁₉₇変異型TSRはいずれも山形県の全4地域(村山、置賜、最上、庄内)のうち3地域以上で広く発生が確認されたのに対し、Trp₅₇₄変異型のTSRは最上1地域でのみ発生が確認された。感受性、NTSR、TSR(未分析を含む)の調査地点数に占める割合はそれぞれ13%、26%、61%であった(表-2)。

ALS阻害剤抵抗性雑草における

表-2 各抵抗性タイプの地点数と割合

		ALS遺伝子変異	地点数	割合 (%)
感受性	検出せず		4	13
	NTSR	検出せず	8	26
TSR	Pro ₁₉₇		11	35
	Trp ₅₇₄		4	13
	未分析		4	13
	(TSR計)		19	61
合計			31	100

- 1) 現地31地点(地点1～31)。場内(地点0)を除く。
- 2) 混在の地点は交差抵抗性の広いバイオタイプに分類。

ALSのアミノ酸置換部位としては、複数の雑草種においてPro₁₉₇が多く報告され、ついでTrp₅₇₄が多い(Heap *et al.* 2019; Sada *et al.* 2012; 定2014)。今回のオモダカの調査においても、検出されたALSのアミノ酸置換部位はPro₁₉₇が最も多く、一部がTrp₅₇₄であったことは、他の草種の事例によく一致していた。

TSRとNTSRの割合を地域別にみると、最上地域ではTSRと判定された地点数の割合が他の地域よりも高く、村山地域ではNTSRの地点数の割合が高かった。除草剤使用履歴は一部地点しか明らかでないが、2010～2013年の現地調査時、TSRの多かった最上地域は使用される除草剤が地域で比較的統一されておらず、多様な除草剤が使用されてきた背景があり、幅広いSU剤に交差抵抗性を示すTSRが選抜されやすい条件にあったと推察される。さらに当地域は中山間地の比率が高く、冷涼な気象条件下にあることから多年生雑草の発生が長期に及び、残草と増殖が助長された可能性がある。一方、NTSRの多かった村山地域は、地域での推奨等によりBSM混合剤の連用が比較的多かった経緯があり、地域における除草剤の使用履歴がNTSRを選抜しやす条件にあったものと推察される。実際にNTSRの

発生地点14、15はBSM混合剤が連用されたほ場であった。

4. SU剤抵抗性オモダカの各種除草剤成分に対する反応

現地系統の中から感受性、NTSR、Pro₁₉₇変異型TSR、Trp₅₇₄変異型TSRの4種類の系統の塊茎を供試し、ポット試験を行った。試験には1/5,000aワグネルポットを用い、1個体/ポット、3反復とした。

2016年7月上旬に、水田土壌を充填したポットに、催芽した塊茎を移植した。薬剤の処理は2～3葉期(地上部長2～3cm)に行った。供試成分はALS阻害剤としてBSM、PSE、ピリミルスファン、非SU系除草剤の例としてピラクロニル、ピラゾレート、テフリルトリオンを用いた。使用した薬剤はすべて単剤とし、それぞれ60%BSM水和剤、0.07%PSE3キロ粒剤、0.67%ピリミルスファン1キロ粒剤、1.8%ピラクロニル1キロ粒剤、10%ピラゾレート3キロ粒剤、2%テフリルトリオン粒剤を用いた。処理薬量は市販一発処理剤の標準薬量にならない、BSM 7.5 mg a.i. m⁻²、PSE 2.1 mg a.i. m⁻²、ピリミルスファン 6.7 mg a.i. m⁻²、ピラクロニル 18 mg a.i. m⁻²、ピラゾレート 300 mg a.i. m⁻²、テフリルトリオン 30 mg a.i. m⁻²とした。除草剤処理後は湛水を保ち、各除草剤の効果は処理1ヶ月後の地上部乾物重及びその対無処理区比により比較した。

表-3 防除試験における地上部乾物重と対無処理区比

供試系統	バイオタイプ	処理時葉齢	地上部乾物重 (g/pot, 平均±SE) (対無処理比%, 有意差)								
			無処理	ピラクロニル	ピラゾレート	テフリルトリオン	BSM	PSE	ピリミスルファン		
0 感受性		2-3L	3.57 ± 0.39	0.29 ± 0.19	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.04 ± 0.03	
				(8.0 ***)	(0.4 ***)	(0.4 ***)	(1.3 ***)	(1.8 ***)	(1.0 ***)		
14 NTSR		2-3L	4.51 ± 0.38	0.20 ± 0.07	0.06 ± 0.03	0.01 ± 0.01	0.71 ± 0.41	0.03 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	
				(4.5 ***)	(1.3 ***)	(0.1 ***)	(16 ***)	(0.6 ***)	(0.3 ***)		
25 Pro ₁₉₇ 変異		2-3L	5.96 ± 1.15	0.15 ± 0.11	0.04 ± 0.01	0.00 ± 0.00	1.75 ± 0.58	0.84 ± 0.45	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	
				(2.4 ***)	(0.7 ***)	(0.0 ***)	(29 ***)	(14 ***)	(1.0 ***)		
31 Trp ₅₇₄ 変異		2-3L	6.71 ± 1.54	0.41 ± 0.14	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	5.60 ± 0.06	7.51 ± 0.44	5.94 ± 0.80	5.94 ± 0.80	
				(6.1 ***)	(0.0 ***)	(0.2 ***)	(84 NS)	(112 NS)	(89 NS)		

1) 各処理 3 個体の平均 ± 標準誤差。括弧内は無処理比。記号は無処理区との有意差 (Dunnett 検定), ***: p<0.001, NS: 有意差無し。

感受性系統 (系統 0) には, BSM, PSE, ピリミスルファンの効果がいずれも高かった。NTSR 系統 (系統 14) には, BSM の効果が劣ったが (対無処理区比 16%; 抑制を受けたが生育), PSE とピリミスルファンの効果はともに高かった (同 0.3, 0.6%)。Pro₁₉₇ 変異型 TSR 系統 (系統 25) には BSM と PSE の効果が劣り (対無処理区比 29, 14%; 抑制を受けたが生育), ピリミスルファンの効果が高かった (同 1.0%)。Trp₅₇₄ 変異型 TSR 系統 (系統 31) には 3 成分とも効果が劣り (対無処理区比 84 ~ 112%), 生育抑制がみられなかった。

一方, ピラクロニル, ピラゾレート, テフリルトリオン処理区の地上部乾物重の対無処理区比は, それぞれ 2.4 ~ 8.0%, 0.0 ~ 1.3%, 0.0 ~ 0.4% であり, いずれの成分も高い除草効果を示した。従って, これらの 3 種の成分は, 感受性, NTSR, TSR, Pro₁₉₇ 変異型 TSR, Trp₅₇₄ 変異型 TSR 系統のいずれにも効果が高く, 効果的な対策成分として使用できると判断した (表-3)。

ほ場には発生する雑草の種類や消長にあわせた除草剤散布は雑草防除の原則であり, 発生消長が不齊一なオモダカ

の防除においては, 除草剤の体系処理の重要性が高い。オモダカが多発し, SU 剤抵抗性が疑われる水田においては, 今回幅広いバイオタイプに効果が確認されたピラクロニルおよびピラゾレート, テフリルトリオン等の有効成分を含む除草剤を用いることが有効であるが, オモダカが多発水田では一発処理のみによる防除だけでなく, 作用機作の異なる剤を組み合わせた体系防除を行うことが重要となる。その例として, 有効成分を含む一発処理剤に非 SU 系初期剤による前処理やベンタゾンによる後処理を組み合わせる体系が挙げられ, SU 剤抵抗性オモダカに対しては, こうした体系で効果的に防除を行う必要がある。

新規 ALS 阻害剤のピリミスルファンは, NTSR 系統および Pro₁₉₇ 変異型 TSR 系統の生育を総じて強く抑制したが, Trp₅₇₄ 変異型 TSR 系統に対しては効果が劣ることが確認された。TSR のうち Trp₅₇₄ 変異による抵抗性は, 他草種で幅広い ALS 阻害剤に抵抗性を示すことが報告されており (Heap *et al.* 2019), オモダカに関する本試験の結果もこうした知見に一致する。ピリミスルファンは Trp₅₇₄ 変異系統以外のオモダカが発生している

大半のほ場においては一定の効果が期待されるが, Trp₅₇₄ 変異系統が発生しているほ場では, 非 ALS 阻害剤を用いてオモダカを防除する必要がある。日本国内で新規 ALS 阻害剤が市販され現地水田で使用が開始されたのは 2011 年以降である。今回の調査で検出された Trp₅₇₄ 変異の 4 系統のうち系統 4, 5 は 2010 年に採取して抵抗性を確認したため, これまでの SU 剤の使用下において増殖したものと推察された。一方, 系統 29, 31 は 2013 年に採取され, 除草剤使用履歴は不明であった。新規 ALS 阻害剤の連用の影響は今後検討すべき課題である。

5. 地上部再生法によるバイオタイプの判別

抵抗性の各バイオタイプを簡易に識別する方法を検討するため, 代表とする系統について, BSM, PSE に加えてピリミスルファンを用いて地上部再生法を行い, 地上部再生法によるバイオタイプ判別の可能性について検討した。

2016 年 8 月に水田土壌を 1/10,000 a ポットに充填し, 代かき後, 塊茎からあらかじめ生育させた

表-4 地上部再生法における再生葉数

系統	バイオタイプ	無処理	BSM	PSE	ピリミスルファン
0	感受性	8.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
14	NTSR	7.7 ± 0.3	6.3 ± 0.3 *	0.0 ± 0.0 ***	0.0 ± 0.0 ***
25	Pro ₁₉₇ 変異	6.7 ± 0.3	6.7 ± 0.3 NS	5.7 ± 0.3 NS	0.0 ± 0.0 ***
31	Trp ₅₇₄ 変異	7.0 ± 0.0	7.7 ± 0.3 NS	7.3 ± 0.3 NS	7.3 ± 0.3 NS

1) 各処理 3 個体の再生葉数の平均 ± 標準誤差。記号は無処理区との有意差 (Dunnnett 検定), * : p<0.05, *** : p<0.001, NS : 有意差無し。

矢尻葉抽出期のオモダカを移植した。検定に用いた成分は BSM, PSE, ピリミスルファンとし、薬剤はそれぞれ 60% BSM 水和剤, 0.07% PSE 3 キロ粒剤, 0.67% ピリミスルファン 1 キロ粒剤を標準薬量処理した。ポットは各処理区 3 反復, ポット当たり 1 個体とした。ポットに移植して 2 日後に 3 cm の高さで地上部を切断し、湛水し、薬剤を処理した。その後は湛水を保ち、処理 3 週間後に再生葉数を計測し、抵抗性を判定した。

感受性系統 (系統 0) では BSM, PSE, ピリミスルファンの 3 成分とも新葉の再生が認められず, NTSR 系統 (系統 14) では BSM 処理でのみ新葉が再生し, PSE とピリミスルファン処理で新葉の再生が認められなかった (表-4)。Pro₁₉₇ 変異型 TSR (系統 25) ではピリミスルファンでのみ新葉の再生が認められなかった。Trp₅₇₄ 変異型 TSR (系統 31) ではすべての処理で新葉が無処理区同様に再生した。このように各系統に対する BSM, PSE およびピリミスルファンの効果は前項の除草剤反応試験の結果と概ね一致し, 各バイオタイプ間で異なる反応を示した。

オモダカにおいては発根法の適用が困難であり (吉田ら 2008), 現状では地上部再生法が標準的な抵抗性検定法とされている。BSM, PSE およびピリミスルファンの効果は各バイオタイプ間で異なったことから, BSM, PSE およびピリミスルファンを用いた地上部再生法を行うことにより, オ

モダカの 4 つのバイオタイプ (感受性, NTSR, Pro₁₉₇ 変異型 TSR, Trp₅₇₄ 変異型 TSR) のおよその判別が可能と考えられた。すなわち, BSM, PSE, ピリミスルファンの 3 成分とも感受性の場合には感受性系統と推定される。BSM 処理のみ抵抗性で, PSE とピリミスルファンに感受性の場合には NTSR 系統と推定される。ピリミスルファンにのみ感受性であれば Pro₁₉₇ 変異型 TSR と推定され, 3 成分とも抵抗性であれば Trp₅₇₄ 変異型 TSR と推定される。これまで抵抗性の判定には BSM のみが用いられる場合が多かったが, 複数の成分で判定することにより, バイオタイプのおよその判別も可能と考えられる。

新規の ALS 阻害剤が広く普及し, 新たな Trp₅₇₄ 変異型 TSR の発生も懸念される状況においては, BSM に対して抵抗性が否か, すなわち SU 剤抵抗性が否かという点に加えて, Trp₅₇₄ 変異型 TSR か否かを判定することが防除対策上重要となる。複数成分を用いた地上部再生法は Trp₅₇₄ 変異型 TSR の有効な診断方法として活用できると期待され, 最近でもこの方法により新たな地点の調査を行っている (図-2)。

6. まとめ

山形県内に発生したオモダカの SU 剤に対する抵抗性の発生状況を, 地上部再生法による抵抗性検定と ALS 遺伝子解析により調査した。2010 ~



無処理 BSM PSE ピリミスルファン
図-2 地上部再生法によるバイオタイプ判定例

1) 2018 年に新たに現地から採集したオモダカを供試した例
A : NTSR と推定, B : TSR (Trp₅₇₄ 変異) と推定

2013 年の調査時点で, SU 剤抵抗性オモダカは県内に広く分布し, TSR と NTSR の両方のバイオタイプが確認された。感受性, NTSR, Pro₁₉₇ 変異型 TSR は広範な地域で発生が確認されたが, Trp₅₇₄ 変異型 TSR の発生が確認された地域は限られていた。バイオタイプの異なる SU 剤抵抗性オモダカを, 塊茎から発生させた個体を用いたポット試験に供試し, 代替除草剤の効果を検査した結果, 非 SU 系成分のピラクロニル, ピラゾレートおよびテフリルトリオンがいずれのバイオタイプにも高い効果を示した。さらに, 地上部再生法でベンスルフロメチル, ピラゾスルフロエチル, ピリミスルファンを供試して各バイオタイプの反応を比較したところ, 無処理区とこれら 3 剤の処理を設けることにより, 地上部再生法によって感受性系統と NTSR, TSR のおよその判別が可能と

考えられた。

引用文献

Heap, I. *et al.* 2019. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. <http://www.weedscience.org/>

Itoh, K. *et al.* 1999. Sulfonylurea resistance in *Lindernia micrantha*, an annual paddy weed in Japan. *Weed Research* 39, 413-423.

Iwakami S. *et al.* 2014. Occurrence of sulfonylurea resistance in *Sagittaria trifolia*, a basal monocot species, based on target-site and non-target-site resistance. *Weed Biol. Manag.* 14, 43-49.

小荒井晃・森田弘彦 2002. 秋田県および茨城県におけるスルホニルウレア系除草剤抵抗

性生物型コナギの出現. *雑草研究* 47, 20-28.

松田晃 2013. 山形県におけるスルホニルウレア系除草剤抵抗性オモダカ (*Sagittaria trifolia* L.) の発生. *東北の雑草* 12, 5-8.

松田晃ら 2017. 山形県に発生した除草剤抵抗性オモダカの遺伝子変異と各種除草剤成分に対する反応. *雑草研究* 62, 117-125.

大野修二ら 2004. スルホニルウレア系除草剤抵抗性簡易検定法としての地上部再生法の確立. *雑草研究* 49, 277-283.

Sada, Y. *et al.* 2012. Varied occurrence of diverse sulfonylurea-resistant biotypes of *Schoenoplectus juncooides* (Roxb.) Palla in Japan, as classified by an acetolactate synthase gene mutation. *Weed Biol. Manag.* 12, 168-176.

定由直 2014. スルホニルウレア抵抗性イヌホタルイの ALS における作用点変異の多

様性と交差抵抗性. *植調* 48, 186-191.

Tranel, P. J. and T. R. Wright 2002. Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides: what have we learned? *Weed Sci.* 50, 700-712.

内野彰 2015. 多年生水田雑草の除草剤抵抗性. *農業および園芸* 90, 174-180.

内野彰 2019. これまでに日本で除草剤抵抗性が報告されている雑草. <http://www.wssj.jp/~hr/weeds.html>

吉田修一ら 2008. 水田雑草のスルホニルウレア系除草剤抵抗性簡易検定キットの開発. *雑草研究* 53, 143-149.

Yu, Q. and S. B. Powles 2014. Resistance to AHAS inhibitor herbicides: current understanding. *Pest Manag. Sci.* 70, 1340-1350.

統計データから

米（援助米を除く）の輸出実績

日本食の人気は高く、日本食レストラン、寿司、おにぎり屋、外食店向けの需要が増加傾向にあり、米（援助米を除く）の2018年の輸出数量は13,794トンで、前年比16.5%の増、金額は37.6億円と同17.5%増加し、過去最高を記録した前年を上回った。2012年の輸出実績2,202トン、7.3億円から急増している。輸出先の内訳は、香港11.6億円、シンガポール6.9億円、米国4.0億円、台湾3.9億円、EU2.5億円となっている。中国に対しては2.1億円とまだ少ないが、2018年に中国向けに輸出できる精米工場（1箇所→3箇所）やくん蒸倉庫（2箇所→7箇所）の施設が追加され、今後の伸びが期待される。

しかしながら、輸出数量は2018年の主食米生産量733万トンの0.2%に過ぎない。また、穀物等（426.3億円）の内訳のうち、小麦粉の74.3億円、即席麺の62.6億円、うどん・そうめん・そばの42.7億円に及ばず、まだ、穀物分野の8.8%にしか過ぎない。

因みに、日本酒（清酒）の輸出数量は222.3億円で、アルコール飲料（618.3億円）のなかで36%を占めトップで座を占める。前年比19.0%増と年々増加傾向にある。

(K.O)

表 米（援助米除く）と日本酒（清酒）の輸出実績の推移

品目	年度	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
米	数量(トン)	2,202	3,121	4,516	7,640	9,986	11,841	13,794
	金額(億円)	7.3	10.3	14.3	22.3	27.1	32.0	37.6
日本酒	数量(kℓ)	134,131	16,202	16,314	18,180	19,737	23,482	25,757
	金額(億円)	89.5	105.2	115.1	140.1	155.8	186.8	222.3

財務省「貿易統計」から農林水産省作成