

米麦二毛作体系における麦わらの水田雑草抑制機構に関する研究

誌名	佐賀県農業試験研究センター研究報告
ISSN	13405241
著者名	秀島,好知 有馬,進 鈴木,章弘 清田,梨華 牧山,繁生 森,敬亮 浅川,将暁 広田,雄二 大塚,紀夫 稲田,稔
発行元	佐賀県農業試験研究センター
巻/号	41号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1-34
発行年月	2021年2月

米麦二毛作体系における麦わらの水田雑草抑制機構に関する研究

秀島好知¹⁾・有馬進²⁾・鈴木章弘²⁾・清田梨華³⁾・牧山繁生⁴⁾・森敬亮⁵⁾・浅川将暁⁶⁾・広田雄二¹⁾・
大塚紀夫¹⁾・稲田稔¹⁾
(作物栽培研究担当)

受理年月日：令和3年1月5日

キーワード：雑草，焼却，水田，すき込み，麦わら

Study on the mechanism of paddy field weed control by straw
in rice and wheat or barley double cropping system.

Yoshitomo HIDEHIMA¹⁾, Susumu ARIMA¹⁾, Akihiro SUZUKI¹⁾, Rika KIYOTA²⁾, Shigeo MAKIYAMA³⁾, Kei-
suke MORI⁴⁾, Masaaki ASAKAWA⁵⁾, Yuji HIROTA¹⁾, Norio OTSUKA¹⁾, Minoru INADA⁷⁾

(Laboratory of Crop Cultivate)

Received: Jan. 5, 2020

Key words: Incineration, Plow-in, Paddy, Straw, Weed.

目 次

研究の背景と目的	3
第1章 現地圃場でのコムギ(<i>Triticum aestivum</i>)わらの焼却およびすき込みが水田の雑草発生と水稻の生育収量に及ぼす影響	5
材料と方法	5
結果と考察	6
第2章 オオムギ (<i>H. vulgare</i> f. <i>distichon</i>) ならびにコムギ (<i>Triticum aestivum</i>) のわらの処理方法の違いが後作以降の雑草発生に及ぼす影響	9
材料と方法	9
結果と考察	10
第3章 麦わらのすき込み量が雑草発生に及ぼす影響	14
材料と方法	14
結果と考察	14
第4章 麦の生わらおよびその焼却灰の浸漬水がコマツナの出芽に及ぼす影響	15
材料と方法	16
結果と考察	16

第5章 オオムギの生わらおよびその焼却灰の浸漬水中に含まれるフェノール性物質の同定および定量	18
材料と方法	18
結果と考察	18
第6章 (±)-2-フェニルプロピオン酸が検定植物の発芽に及ぼす影響	21
材料と方法	21
結果と考察	21
第7章 麦わら焼却時に発生する熱の評価について	23
材料と方法	23
結果と考察	23
総合考察	25
要約	28
引用文献	29

脚注 1) 佐賀県農業試験研究センター

- 2) 国立大学法人佐賀大学
- 3) 大分県農林水産研究指導センター
- 4) 佐賀県唐津農林事務所東松浦農業改良普及センター
- 5) 佐賀県産業労働部流通・貿易課
- 6) 佐賀県杵藤農林事務所藤津農業改良普及センター

注) 本研究報告は、2018年12月に鹿児島大学大学院連合農学科に博士論文として提出したものを編集したものである。

研究の背景と目的

北部九州の米麦二毛作地帯においては、麦収穫直後に水稻移植を行うことから、麦わら(ここでは麦稈に穂軸や葉身、葉鞘の一部分を含んだ残渣物全体を麦わらと称す)は、焼却処理されてきた歴史がある。米麦農家の圃場においては、耕うん、代かきの作業効率を高めるためや、「麦わらを焼かないと雑草が減らない」、「すき込みは水稻へ悪影響がある」などの理由から、長い期間、麦わらが農家によって焼却されてきた(写真1)。麦わらは、園芸作物(60)や畜産に利用されることもあるが、次作付けまでの時間的な余裕がないこともあり、その活用は十分であるとは言えない(図1)。農家にとって、水稻作付前の麦わらの存在はトラクターでの耕うん作業性を悪くすることから、農家は農繁期の作業能率を重視するあまり、作業速度を速くし、耕深10 cm以下(県推奨の理想値は13 cm以上)と浅くしてしまう傾向が強い(18)。こうなると、さらにこの浅耕によって、麦わら等のすき込み性が悪くなり、その後の代かき時に多くの麦わらが水面に浮き上がり、あるいは風によって吹き寄せられ(写真2)、水稻苗の植え付け精度が低下したり、浮き麦わらによる苗の押し倒しが発生することから、農家はなるべく麦わらを焼却しようとするのである。しかし、別の角度から麦わらすき込みを評価してみると、このような浅耕や麦わら焼却等の行為は、作物の根の伸長を抑制し、有機物が供給されない等の問題を含んでおり、地球温暖化につながる二酸化炭素の排出と煙害をもたらすため、環境保全上の大きな問題である。以前は、佐賀県においても平坦部の“風物詩”とも言われていたこの“わら焼き”であるが、近年は、農村地域において農家と非農家との混住化が進み、特に平成に入ってから、麦わらを焼く煙が交通や住民の生活に支障を来すほどの“煙害”として問題になってきていた。佐賀県の麦わら焼却データ(図1)によれば、行政や農協組織等の積極的な取り組みにより焼却率は年々減少傾向にあるものの、2018年現在でも依然として麦わら発生量の約7.5%程度が焼却されており、わら焼却問題が完全に解消されたとは言い難い状況にある(44)。

ここで現在、麦わらの焼却行為が、社会的にどのような扱いになっているかを確認すると、法律的には農業の野焼きのほとんどが廃棄物の野焼きであり、廃棄物の処理及び清掃に関する法律(昭和45年法律第137号。以下「廃棄物処理法」という。)が適応され、原則として産業系の廃棄物については野焼きが禁止されている。このことから、農業者は自らの責任で農業生産に係る副産物や雑草等の廃棄物を適正に処理しなければならず、違反者には罰則が設けられているところである。それでも、どうしても燃やさなくてはならない場合もあるかと思われる、それが次に記す焼却禁止の例外規定である。

・法第16条2(焼却禁止)

何人も、次に掲げる方法による場合を除き、廃棄物を焼却してはならない。

三 公益上若しくは社会の慣習上やむを得ない廃棄物の焼却又は周辺地域の生活環境に与える影響が軽微である廃棄物の焼却として政令で定めるもの

・令第14条(焼却禁止の例外となる廃棄物の焼却)

四 農業、林業又は漁業を営むためにやむを得ないものとして行われる廃棄物の焼却

となっている。この場合やむを得ないとは、多くの自治体において「他に方法が無いもの」と定義されている。具体的な事例をあげれば「ウンカ・ニカメイチュウ等の特定の病害虫の大発生などで、農薬散布など他の方法よりも公益上有効な場合」などが想定されるが、実は多くの自治体においては農業者への配慮から(稲作や麦作の生産振興の観点から)、正に稲わらや麦わらの焼却処理を“やむを得ない”事例として位置付けており、社会マナーの問題として処理されているのが現状である。

しかし、麦わらの焼却は、時として通行者や農業者自身の生命にかかわる事件を引き起こすこともある。過去には焼却の煙で走行中の自動車が視界不良となり死亡事故に繋がったケースも数例報告されており、また農業者自身も、焼却処理中に家屋などに火が燃え移ったり、自らも火にまかれて重篤な火傷を負ったり、もっと重大

な事態としては死亡に至るなどの事件がしばしば報告されている。群馬県では、県内で発生した麦わら焼却の煙が関係する交通死亡事故の発生を受け「群馬県的生活環境を保全する条例（2000年10月1日施行）」が制定され、このことにより廃棄物処理法による野焼きの原則禁止がさらに強化されることとなった（<http://www.pref.gunma.jp/06/f0900030.html> 2018.12.24 確認）。佐賀県においては、2004年9月3日に県とJAグループ（中央会および旧経済農業協同組合）の職員を構成員とする「佐賀県稲わら・麦わら適正処理対策会議」が設立され、生産者・地域住民の意見交換会の開催、共同乾燥調製施設への焼却防止のぼり旗の掲示、焼却防止のステッカーやチラシの配布、セスナや街宣車による焼却防止の呼びかけ、新聞・テレビ・ラジオ等のマスメディアを活用した焼却防止の広報がなされるとともに、県の補助事業における採択要件として「稲わら・麦わらの適正処理に関する実施計画」の策定と実践を義務付けるなどの施策が仕組まれてきた。また、わら適正処理を推進するための農業機械として、逆転ロータリーやロールベレー等補助事業の対象とするとともに、米の生産調整に係る市町村地域協議会への交付金の算出基礎として、麦わらや稲わらの適正処理に係る面積当たりの助成措置を講ずるなどの網羅的な細かい施策が展開されてきた。一方で、同じ九州北部の米麦二毛作地帯である隣県の福岡県ではわら焼却はどのように対応されてきたのかと言えば、佐賀県とはやや状況が異なるようである。福岡県における麦作の中心である筑後平野や糸島半島においては、県内の主要都市である福岡市や北九州市などに人口が流出することによって、農村部と都市部との機能がすみ分けられ、以前からわら焼却を行ってきたこれらの地域では、住民にとって焼却処理は当然のことと認識されており、異議を唱える者の数が相対的に少なかったのではないかと推測している。しかし、ここ数年、福岡県においても佐賀県と同様に、離農などで農業との関りが少なくなった者や、都市部や他県などから移入してきた者との混住化が進み、幹線道路の整備に伴う交通量が増加するにつれ、年々、わら焼却に対する苦情が顕在化してきていると聞いている。また、福岡県においては、わら焼きばかりでなく、植木や果樹などの伐採木の焼却処分や野外キャンプなどで燃やされるごみの焼却なども問題視されており、昨今では一般市民のPM10やPM2.5などの浮遊微粒子に対する意識の高まりなどから4, 25, 37, 38, 48)、稲わらや麦わらの焼却処理のみならず野焼き全般への対策に本格的に取り組む計画であると聞き及んでいる。また、国においてもPM2.5と野焼き行為との関連を認め、これまで以上に野焼き行為を減らす取り組みが強化されたところである17)。

麦わらのすき込みの効果については、金ら19, 20, 21, 22)や大塚ら40)による水稻の生育への影響や、松尾ら29)による雑草発生に及ぼす影響などの報告事例はあるが、佐賀県のような水稻、麦類、大豆の2年3作（あるいは2年4作）体系でのこれらの効果については明確でないことから、一部の生産者からは焼却を是認する意見が根強い。

近藤ら24)や栃木ら55)は、麦わらをすき込んだ場合に、水稻の生育初期に生育抑制が生じることを指摘している。この生育抑制については、田中ら53, 54)が、土壌代謝産物による根の窒素吸収阻害と密接に関係していることを示唆しているものの、麦わらを焼却した場合との比較検討はなされていない。また、麦わらのすき込みが後作の水田雑草の発生に及ぼす影響については、松尾ら29)は、すき込みによって広葉雑草が増加することを報告している一方で、宮内33)は移植後に麦わらを施用した場合には雑草の発生が抑制されることを報告している。しかし、麦わらをすき込んだ場合と焼却した場合との処理の違いが、雑草発生消長に及ぼす影響について解析した報告はない。

以上のことから本研究では、麦わらのすき込み処理と焼却処理の違いや麦わらの処理方法と雑草発生との関係を明らかにし、北部九州における今後の麦わら適正処理技術を確立するための基礎知見を得ることを目的に研究を行った。

第1章 現地圃場でのコムギ (*Triticum aestivum*) わらの焼却およびすき込みが水田の雑草発生と水稻の生育収量に及ぼす影響

米麦二毛作生産者からの意見として「麦わらを焼かないと雑草が増える」、「麦わらをすき込むとガスが発生して水稻の生育が悪くなる」などの声が聞かれるが、これらの意見に対して科学的に証明した報告は十分とは言えず、今日においてもその焼却処理やすき込み処理に伴うメリットやデメリットについては様々な見解が示され、その解釈についても賛否両論が存在している。もちろん、麦や米を生産する農家の立場と、ほとんど生産に関わらない消費者の立場では、その評価も変わってくるのが当然であるが、現在は科学的な議論ではなく、どちらかと言えば感情論に偏り、麦わらを焼く、焼かないはあくまでも公衆マナーの問題となっている。しかし、恒久的に我が国の麦作振興を図り、もって食料自給率の向上に寄与していくためには、科学的な知見をもって適切な水田輪作栽培技術の確立を図ることが求められている。そこで、この章においては、現場圃場において、麦わらの焼却処理とすき込み処理の違いが後作における水田雑草の消長や水稻生育への影響を明らかにしようと試みた。

材料と方法

佐賀市内の60aの農家水田において試験を実施した。2011年5月30日にコンバインでコムギ(品種「シロガネコムギ」)を収穫し、ワラカッターの設定値15cmで切断、排出された乾燥麦わら列(ウインドロウ:写真3)状態(平均排出わら幅102cm)を作った。6月9日に圃場の2分の1を焼却処理とし、残りの2分の1をすき込み区としてロータリ耕ですき込んだ。このとき、圃場の一部から麦わらを回収し、全体の麦わら量を推定したところ72kg/aであった。その後の圃場管理は、6月14日に耕起、6月15日に入水、荒代、6月17日に代かきを行い、6月19日に水稻中生うるち品種「さがびより」を1株4本植えで稚苗機械移植した。除草剤は、6月22日にイマズスルフロン、ピラクロニル、ブロモブチド粒剤を背負式動力散布機で圃場全面に処理した。雑草調査は、7月22日に50cm×50cm枠で両区とも3地点ずつ調査した。また、土壌の酸化還元電位を測定するために、それぞれの区に白金電極7本ずつを地下5cmに埋設し、Ehメーターで7月7日から1週間おきに計5回の土壌の酸化還元電位を測定した。土壌の化学性の変化については、6月9日の麦わら処理前および水稻収穫後の11月3日に土壌を採取し、水抽出ガラス電極法でpHとEC、NCアナライザー(株式会社住化分析センター、大阪府中央区)で腐食含量、ケルダール法で全窒素とCEC、ICP分光分析装置(サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社、神奈川県横浜市)でCa、Mg、K含有率を測定した。水稻の生育調査として、焼却区、すき込み区のそれぞれに調査区を3地点ずつ設け、1地点あたり10株ずつ調査した。分けつ最盛期(7月22日)と幼穂形成期(8月10日)に草丈、茎数、葉色(SPAD-502PLUS最上位完全展開葉の直下位葉の測定値、ユニカミノルタ株式会社、東京都千代田区)を測定し、同日に両区から調査株以外の株を3株ずつ抜き取り、地上部乾物重を測定した。なお、分けつ最盛期(7月22日)の葉色については、調査株以外の20株を各試験区から無作為に抽出し、最上位完全展開葉の直下位葉を測定した平均値を試験区の値とした。さらに、出穂期以降に稈長、穂長、穂数の調査を行った。水稻の収量および品質については、各区3地点から80株を坪刈りして調査した。玄米のタンパク質含有率については穀物近赤外分析機(Grain Analyser Infratec1241、フォス・ジャパン、東京都江東区)を用いて測定した。

統計解析

試験によって得られたデータは、統計ソフトRver. 2.13.2を用いて解析した。以下、本論文で用いた統計

解析は、すべてこの方法を用いた。

結果と考察

水田雑草の発生本数は、焼却区でタカサブロウやアゼナが多くなり、雑草の総本数はすき込み区の3倍以上であった(第1-1図)。また、雑草の乾物重では、特に焼却区でタカサブロウが大型化し、本数同様にすき込み区の3倍以上であった(第1-2図)。

水稻生育期間中の酸化還元電位の推移を第1-3図に示す。焼却区に比べてすき込み区の値は、移植約1ヶ月後(7月21日)ではやや低く、8月21日では逆に高い傾向を示したものの、全体的に麦わら処理の違いによる酸化還元電位の差は認められなかった。また、水稻作付後の土壌化学性の変化を両区で比較してみると、焼却区ではpHがやや高く、腐植含量はやや低くなる傾向がみられたが、その他の化学成分には差がなかった(第1-1表)。

水稻の生育と収量、品質を第1-2表と第1-3表に示した。すき込み区は焼却区に比べて、草丈は低く、茎数は少なく推移し、稈長や穂長はほぼ同じ、穂数は少なかったが、出穂、成熟期は同程度であった(第1-2表)。倒伏はいずれの区もなかった。精玄米重は、焼却区とすき込み区で同程度であった(第1-3表)。すき込み区は焼却区と比較すると、玄米千粒重や1穂粒数がほぼ同じで、 m^2 当たり籾数が少なく、登熟歩合が高かった。玄米タンパク含有率や検査等級は同じであったが、すき込み区では粒厚2.1 mm以上の玄米割合が高かった(第1-3表)。

この結果から、すき込み区に比べて焼却区でタカサブロウとアゼナが多く発生し、雑草の乾物重も重かったことから、麦わらを焼却する理由の一つとして挙げられている「焼却しないと雑草が増える」ということは、本章の結果から必ずしも起こらないことが示唆された。この結果は実際の圃場における事例の一つであり、各処理間の地点誤差がないとは言えないが、少なくとも本試験における圃場観察の結果からは、麦わらすき込みで雑草が多くなるとは言いがたかった。ただし、現地試験では除草剤が使用されていることから、この結果の解釈については注意が必要である。結果として、すき込み区での雑草量が少なくなっていたが、焼却区における除草剤の効果が低減したとも解釈できるし、すき込み区の除草剤の効果が高くなったとも考えられる。

また、麦わらすき込みによる水稻の生育抑制に関しては、これまでに報告された事例(15, 20, 24, 34, 54)と同様に穂数の減少が確認されたが、結果として収量は、焼却区に比べてすき込み区が上回っており、必ずしも減収するとはいえなかった。



写真1 麦わらの焼却風景(2011年6月9日)。

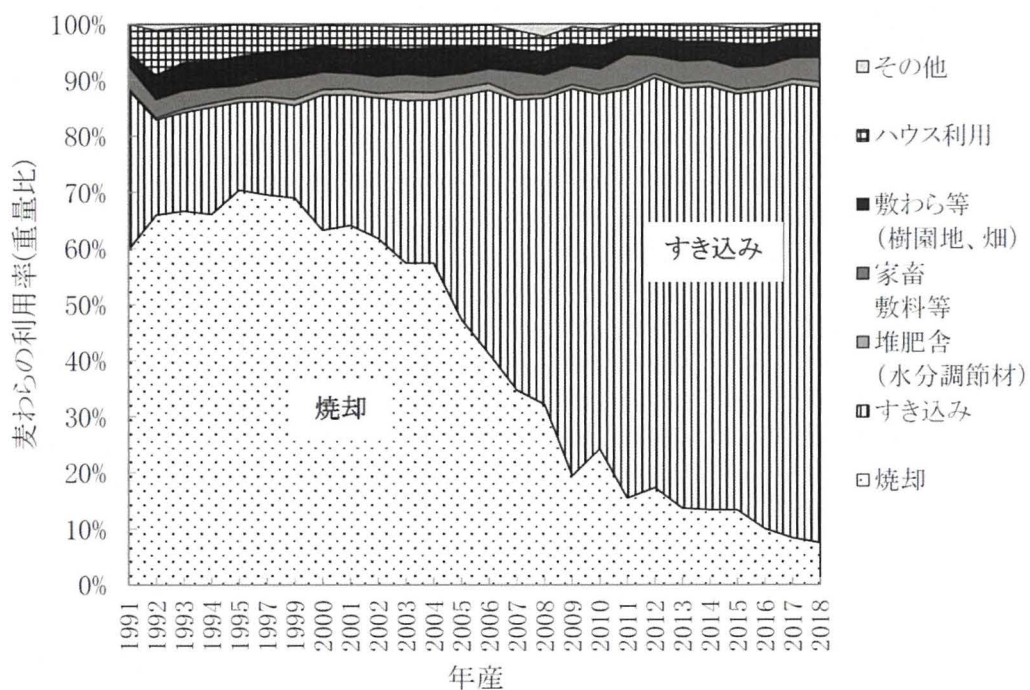


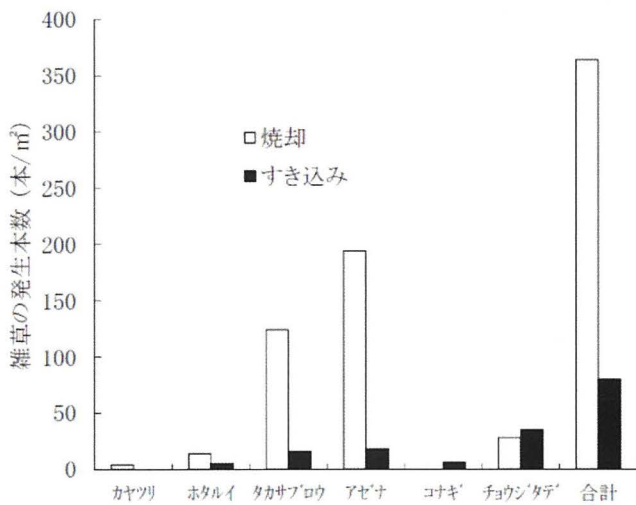
図1 佐賀県における麦わらの利用状況の推移.
(佐賀県農政部園芸課による市町村聞き取り調査結果).



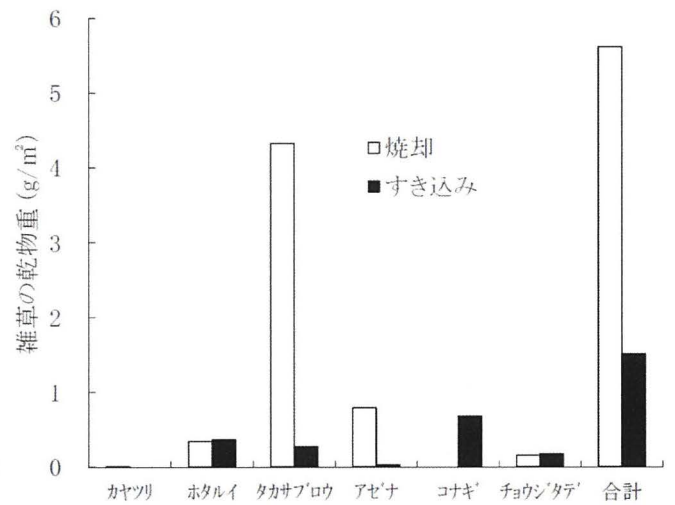
写真2 吹き寄せられた麦わら残渣 (佐賀平野・筑後地方では“アズ”と呼称,
2016年6月16日).



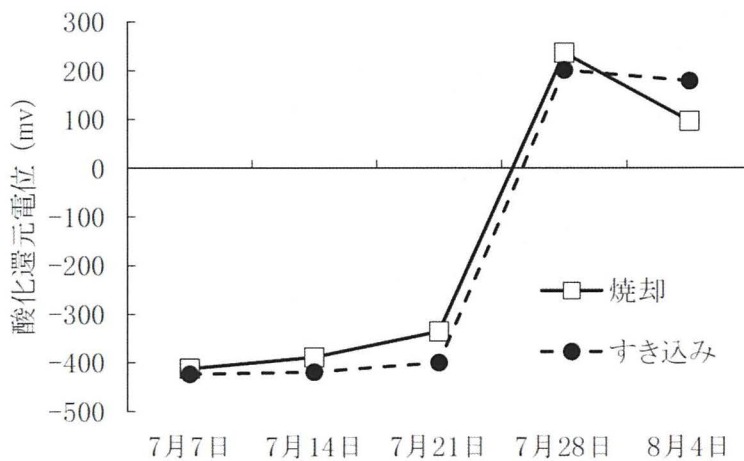
写真3 ウインドロウ (windrow) の様子 (2011年6月9日).



第1-1図 麦わらの処理方法の違いが水田雑草の発生本数に及ぼす影響。
合計の処理間には検定でP<0.01の有意差あり。



第1-2図 麦わらの処理方法の違いが水田雑草の乾物重に及ぼす影響。
合計の処理間には検定でP<0.05の有意差あり。



第1-3図 麦わら処理に伴う水田土壌の酸化還元電位の推移。
数値は白金電極7本の測定平均値。

第1-1表 麦わら処理に伴う土壌化学性の変化.

処理	pH (H ₂ O)	EC (mS/cm)	腐植 (%)	全窒素 (%)	CEC (me)	交換性塩基(me/100g)		
						Ca	Mg	K
処理前	6.2	0.10	4.0	0.20	35.8	8.9	0.6	0.8
焼却	6.5	0.05	3.5	0.21	32.4	20.9	3.4	0.7
すき込み	6.3	0.06	3.7	0.22	30.9	20.3	3.1	0.8

注) 試料は各試験区内の5地点から採取した土壌の混和物を用いた.

第1-2表 コムギわらの処理の違いが移植水稻の生育に及ぼす影響.

処理	草丈(cm)		莖数(/m ²)		葉色(SPAD)		乾物重(g/m ²)		稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (/m ²)	出穂期 (月日)	成熟期 (月日)	倒伏 程度
	7/22	8/10	7/22	8/10	7/22	8/10	7/22	8/10						
焼却	49.2	71.2	640	581	45.5	37.8	147	613	73.4	18.5	374	9/1	10/9	0.0
すき込み	44.1	68.4	538	508	42.8	38.0	133	460	72.0	18.1	332	9/1	10/8	0.0
差	**	NS	*	*	(※)	NS	NS	*	NS	NS	*	-	-	NS

**、*は1%および5%水準で有意であることを示し、NSは有意差がないことを示す(t検定).

※7/22の葉色は反復なし.

第1-3表 コムギわらの処理の違いが水稻の収量・品質・収量構成要素に及ぼす影響.

処理	精玄米重 (kg/10a)		タンパク 検査 等級	粒厚分布(%)					玄米 千粒重	1穂 粒数	籾数/m ² (×100)	登熟歩 合(%)	
	7/22	8/10		2.2	2.1	2.0	1.9	1.8					1.7
焼却	483	6.0	3.0	1.9	17.8	46.3	22.7	7.1	2.2	23.0	69.1	259	76.5
すき込み	510	6.0	3.0	2.4	20.4	44.4	21.9	6.4	2.2	23.2	66.2	220	90.5
差	NS	NS	NS	-	-	-	-	-	-	NS	NS	**	*

**、*は1%および5%水準で有意であることを示し、NSは有意差がないことを示す(t検定).

精玄米重、タンパク、玄米千粒重は水分14.5%、篩目1.8 mm上の値.

第2章 オオムギ (*H. vulgare* f. *distichon*) ならびにコムギ (*Triticum aestivum*) のわらの処理方法の違いが後作以降の雑草発生に及ぼす影響

第1章において、実際の現地圃場でコムギわらの焼却処理ならびにすき込み処理の違いによる雑草の発生量を確認したところ、これまでに言われているように“麦わらを焼却しないと雑草が増える”とは必ずしも言えないのではないかと知見を得ることができた。しかし、実際の圃場では、田面の高低差による水位差やもとの雑草埋土種子量の違い、スクミリンゴガイ等の生息密度の違いなどが影響していることが想定される。そこで、この章では、現地圃場での試験結果の再現性を高めるために、ポットを用いて実験を行った。

材料と方法

試験は陶器製の1/2000 a ワグネルポットで行なった。佐賀県農業試験研究センター（佐賀市川副町；以下、佐賀農セ）で栽培し、2013年5月27日に坪刈りしたオオムギ（品種「サチホゴールドン」）と6月3日に坪刈りしたコムギ（品種「シロガネコムギ」）の試料を屋外網室で風乾させ、脱穀したものを麦わらとして供試した。2013年6月25日に試験区を設置した。試験区の構成は、オオムギとコムギわらをそれぞれすき込んだ区および焼却した区と、わら無施用区の5水準を設け、1ポットを1反復として、4反復とした。ポットに風乾した佐賀農セの土壌（細粒灰色低地土）を7 kg ずつ詰め、5 cm 程度に切断したオオムギとコムギのわらを土壌表面に散布した。麦わらの散布量は佐賀県が麦わら処理現地実態調査に用いている40 kg/a 相当量とした。すき込み区はわらを深さ10 cm 程度までの土壌と混ぜ、焼却区はわらをガストーチバーナーで焼き残しが残らないよう完全に焼き、その灰を深さ10 cm 程度までの土壌と混和した。土壌混和後は、全区とも水道水を満たし、スコッ

プで代かきをして湛水管理を行った。ポットの設置場所は、佐賀農セの雨除けハウス（鉄製パイプに塩化ビニル樹脂フィルムを貼った、長さ20 m、幅8 m、高さ4.5 m）内で、両サイド（片側約17 m×0.6 m）を常時開放した状態で管理した。夏期調査として、処理後34日目（7月29日）に雑草の発生草種、発生本数、地上部乾物重を調査した。また、米麦二毛作における麦わら処理の経時的な影響を確認するために、調査を継続した。ただし、陶器製ポットではアオミドロ等の藻類の発生が多くなったことから、夏期調査終了後にプラスチック製の方形ポット（31×20.5×11 cm）に深さ9 cmになるまで陶器製ポットの上面から土壌を採取して詰め直し、代かきした後に再び常時湛水管理した。その後、秋期調査として、処理後99日目（2013年10月2日）に雑草発生状況を調査し、以降は落水状態で管理した。さらに、11月15日にポット内土壌全体を耕起して畑状態で管理し、春期調査として、処理後267日目（2014年3月19日）に夏期調査と同様の調査を行なった。なお、畑状態の間は、土壌の過乾燥を防ぐためにハンドスプレーで水道水を適宜霧吹きした。施肥条件については、実験期間中を通じて、全区とも無施肥とした。

結果と考察

夏期調査（処理後34日目）におけるポットあたりの雑草の発生本数は、無施用区で70本程度あったのに対し、コムギ焼却区では11本程度、オオムギ焼却区では3本程度と、それぞれ7分の1、20分の1まで有意に抑制され、すき込み区ではコムギ、オオムギいずれの区においても発生は全くみられなかった（第2-1図）。また、ポットあたりの雑草の乾物重についても、発生本数と同様の傾向であった（第2-2図）。雑草の発生草種は、コナギ、ヒメミソハギ類、アゼナ、カヤツリグサ類であった（写真4）。

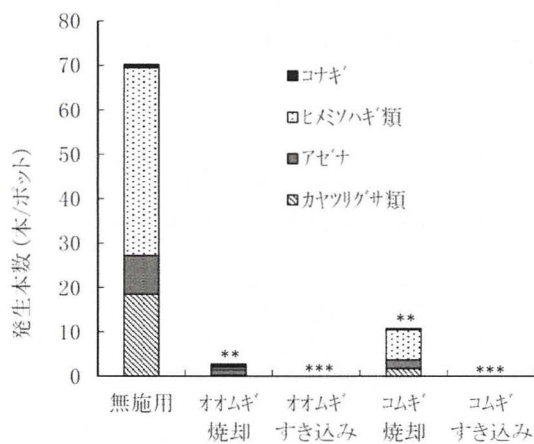
秋期調査（処理後99日目）においては、ポットあたりの雑草の発生本数は、夏期調査で発生がみられなかったすき込み区にも雑草発生が認められ、無施用区の50本程度に対し、オオムギ焼却区は8本程度、オオムギすき込み区は2本程度、コムギ焼却区は4本程度、コムギすき込み区は11本程度となり、各試験区とも無施用区と比較してDunnett法で1%水準の有意な差がみられた（第2-3図）。また、無施用区を除いた各試験区間について、Tukey法で検定した結果、試験区間には差がみられなかった（データ略）。ポットあたりの雑草の乾物重についても、発生本数と同様の傾向であり、無施用区に比べてすべての試験区で有意な抑制がみられたものの（第2-4図）、無施用区を除く各試験区には有意差は認められなかった（データ略）。雑草の種類としては、夏期調査（7月29日）の草種に加えて、キカシグサやミゾハコベなどの水田一年生雑草の発生が確認された他、無施用区やオオムギ焼却区、コムギ焼却区においてイネ科雑草が発生した（写真5）。無施用区を除いた試験区の発生本数ならびに乾物重について、分散分析を行ったところ、麦種間、処理間はいずれも有意ではなかったが（第2-1表、第2-2表）、麦種毎に焼却処理とすき込み処理をt検定で比較すると、オオムギの雑草発生本数には5%水準で差がみられた（データ略）。

春期調査（処理後267日目）結果について、雑草の発生本数を第2-5図に示した。無施用区に比べて、コムギ焼却区、オオムギ焼却区、コムギすき込み区、オオムギすき込み区の順に少なかったが、無施用区と各試験区に有意な差は認められなかった。雑草の草種としては、大部分がスズメノテッポウであったが、その他にタデ類やノミノフスマ、ヤエムグラ、カラスノエンドウ、タネツケバナがみられた（写真6）。一方、ポットあたりの乾物重は第2-6図に示したように、オオムギ焼却区およびコムギ焼却区が無施用区とほぼ同程度となり、次いでコムギすき込み区、オオムギすき込み区の順になったが、発生本数と同様に無施用区との間に有意な差はみられなかった。無施用区を除く他の4つの試験区で分散分析を行ったところ、雑草の発生本数（第2-3表）ならびに乾物重（第2-4表）ともに、麦種間（オオムギ、コムギ）の差はなく、麦わらの処理間（焼却、すき込み）に有意差が認められた。

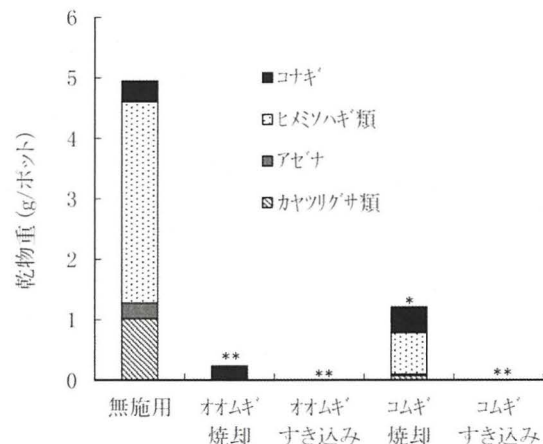
以上のことから、夏期調査において、第1章と同様にすき込み処理は水田雑草に対して強い発生抑制を示すこ

とが明らかとなった。また、焼却処理でも雑草発生を抑制したものの、その程度はすき込み処理に及ばなかった。なお、雑草の抑制程度は、麦わら量が同じ場合、コムギよりオオムギで大きかったため、今後、麦種間での抑制力の差異の要因については明らかにする必要があると思われる。

本章のポット試験においては、観察期間を通して麦わらの焼却がすき込みよりも雑草抑制効果が小さかったことから、焼却によって雑草を抑制する何らかの要因が軽減されたことが推察された。一つには、麦わら中に存在するアレロパシー活性を持つ化学物質（アレロケミカル）が関与している可能性があり^{2, 3, 5, 6, 7, 8, 9}、麦わらを焼くことでそれらが失活、または減少したということも考えられた。



第2-1図 夏期(処理34日後)における麦わら処理方法の違いによる雑草の発生本数。
図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。



第2-2図 夏期(処理34日後)における麦わら処理方法の違いによる雑草の乾物重。
図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。

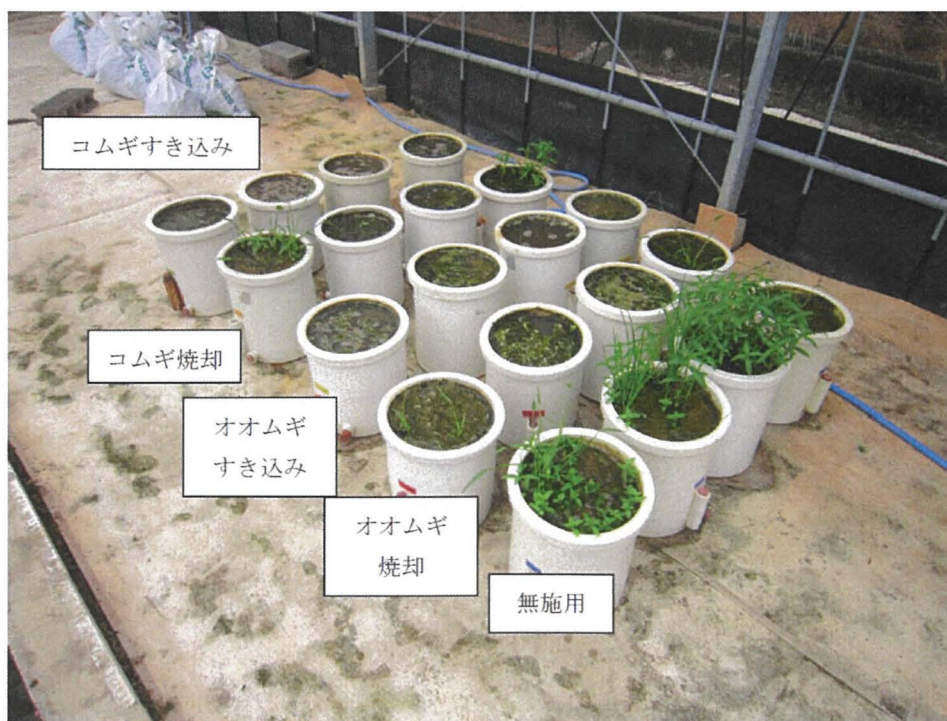
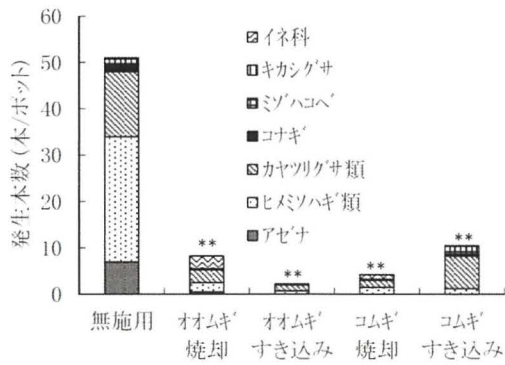
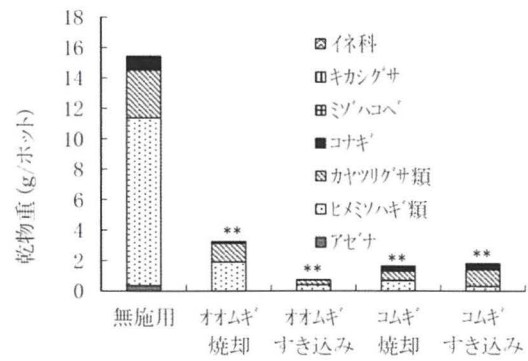


写真4 夏期調査時における雑草の発生状況 (2013年7月29日)。



第2-3図 秋期(処理99日後)における麦わら処理方法の違いによる雑草の発生本数。
図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。
**; P<0.01.



第2-4図 秋期(処理99日後)における麦わら処理方法の違いによる雑草の乾物重。
図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。



コムギすき込み コムギ焼却 オオムギすき込み オオムギ焼却 無施用

写真5 秋期調査時における雑草の発生状況 (2013年10月2日)。

第2-1表 雑草の発生本数に係る分散分析表(秋期調査)。

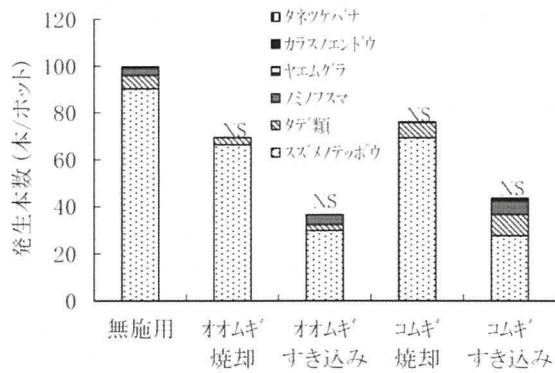
発生本数	変動	分散	観測された分散比	P-値	F 境界値
麦種	18.0625	18.063	1.046	0.327 NS	4.747
麦わら処理	0.0625	0.063	0.004	0.953 NS	4.747
麦種×麦わら処理	150.0625	150.063	8.689	0.012 *	4.747

表中のNSは有意差がないことを示す。麦種と麦わら処理に*;5%水準の交互作用がみられる。

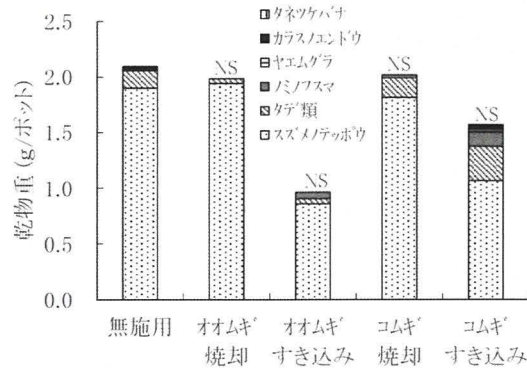
第2-2表 雑草の乾物重に係る分散分析表(秋期調査)。

乾物重	変動	分散	観測された分散比	P-値	F 境界値
麦種	0.255	0.255	0.063	0.806 NS	4.747
麦わら処理	5.411	5.411	1.330	0.271 NS	4.747
麦種×麦わら処理	7.302	7.302	1.795	0.205 NS	4.747

表中のNSは有意差または交互作用がないことを示す。



第2-5図 春期(処理267日後)における麦わら処理の違いによる雑草の発生本数。
図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。



第2-6図 春期(処理267日後)における麦わら処理の違いによる雑草の乾物重。
図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。

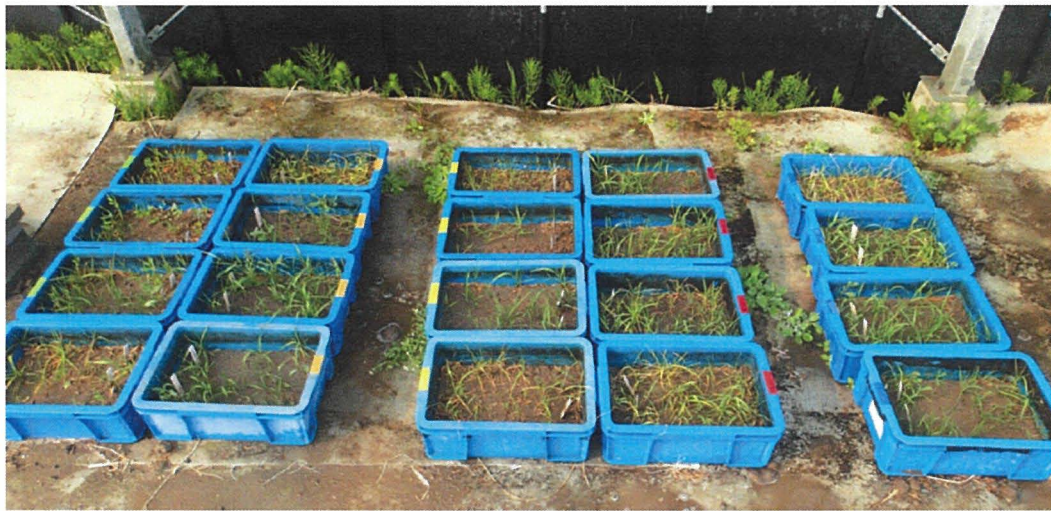


写真6 春期調査時における雑草の発生状況 (2014年3月19日)。

第2-3表 雑草の発生本数に係る分散分析表(春期調査)。

発生本数	分散	観測された分散比	P-値	F 境界値
麦種	189.063	0.228	0.641 NS	4.747
麦わら処理	4257.563	5.144	0.043 *	4.747
麦種×麦わら処理	0.063	0.000	0.993 NS	4.747

表中の*は5%水準の有意差を示し、NSは有意差または交互作用がないことを示す。

第2-4表 雑草の乾物重に係る分散分析表(春期調査)。

乾物重	分散	観測された分散比	P-値	F 境界値
麦種	0.410	1.188	0.297 NS	4.747
麦わら処理	2.146	6.223	0.028 *	4.747
麦種×麦わら処理	0.325	0.942	0.351 NS	4.747

表中の*は5%水準の有意差を示し、NSは有意差または交互作用がないことを示す。

第3章 麦わらのすき込み量が雑草発生に及ぼす影響

第1章、第2章において、麦わらのすき込み処理が雑草の発生抑制に直接的に関与している可能性が示唆された。この章では、すき込むコムギわらの施用量を変えた場合のわら施用量の量的変化が雑草発生量に及ぼす影響について明らかにした。

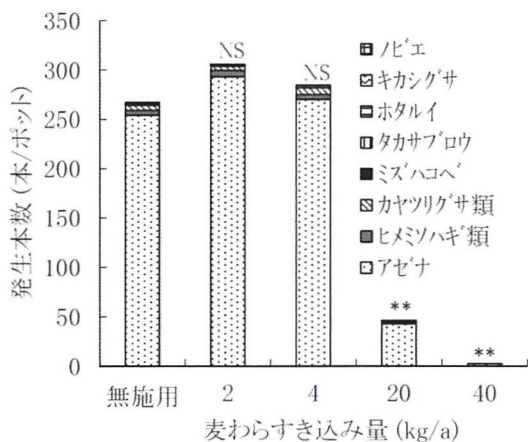
材料と方法

試験は佐賀農セで実施した。2013年8月12日にプラスチック製の方形ポット(31×20.5×11 cm)に佐賀農セの風乾した水田土壌を3 kgずつ充填後、第2章と同様のコムギわらを5 cm程度にハサミで切断し、施用量を変えて添加した。試験区の構成は、無施用、2 kg/a相当量(以下同じ)、4 kg/a、20 kg/a、40 kg/aの5水準とし、1ポットを1反復として4反復とした。佐賀県では、コムギわらの面積当たりの発生量は、収量水準とほぼ同じ40 kg/aと考えられていることから、この値を基準とし、不作年を想定した半量(20 kg/a)の区と焼却できずに残る麦わらとして4 kg/a区と2 kg/a区を設定した。麦わらを土壌全体に混和した後、水道水を満たし、スコップで代かきした。その後、水深2 cm程度の湛水管理を行い、ポットを第2章と同じ佐賀農セの雨除けハウス内で管理した。全区とも無施肥とした。ポット設置から34日後(2013年9月13日)に雑草の発生草種、発生本数、乾物重を調査した。

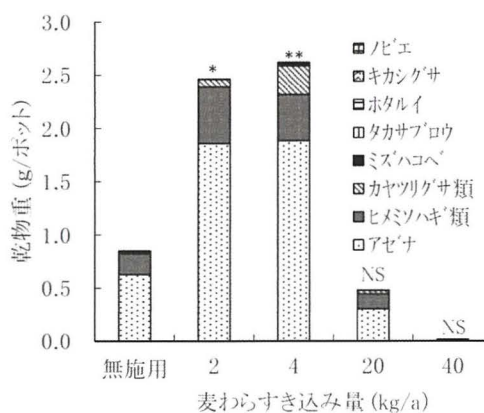
結果と考察

雑草の発生本数を第3-1図に示した。無施用区と比べて、麦わらのすき込みが少量であった2 kg/a区と4 kg/a区では同程度であったが、すき込み量が実際に想定される20 kg/a区と40 kg/a区では、著しく少なくなり、特に40 kg/a区では、雑草の発生は3本と極めて少なかった。雑草の草種としては、アゼナがほとんどを占めており、他にヒメミソハギ類やカヤツリグサ類、ミズハコベ、タカサブロウ、ホタルイ、キカシグサ、ヒエ類などがわずかに発生していた(写真7)。また、乾物重については、無施用区(0.85 g/ポット)と比較すると、2 kg/a区と4 kg/a区では2.5 g前後と3倍程度に、20 kg/a区では0.48 gと半減、40 kg/a区ではほとんどなかった(第3-2図)。

わらのすき込み量を変えた本章の試験では、乾物重と発生本数とではやや異なる傾向を示したが、これは雑草の個体当たりの生育量が違ったことによるものである。雑草発生本数は2 kg/a区と4 kg/a区で無施用区とほぼ同等であったにも関わらず、雑草乾物重は2 kg/a区、4 kg/a区とも無施用区の3倍以上になった。また、20 kg/a区では雑草発生本数は無施用区の6分の1程度だが、乾物重では無施用区の半分程度となった。40 kg/a区では無施用区に対し、雑草発生本数、乾物重とも1%程度と少なかった。2 kg/a区や4 kg/a区、20 kg/a区において雑草の発生本数の割に、乾物重が増加した原因については、麦わらの分解が進み窒素が放出されることで雑草への肥効が発現したことによるものと推察された。40 kg/a区においても同様に、麦わらが分解されて窒素が放出されたと考えられるが、田中(54)が指摘しているように、多量の麦わら施用にもなって芳香族カルボン酸類の生成量が増加し、この結果、雑草の窒素吸収阻害が促進され、無施用区に対する雑草発生本数の割に乾物重が軽くなった可能性も考えられる。麦わらの施用量を少量(2 kg/a、4 kg/a)、中量(20 kg/a)、多量(40 kg/a)の3段階としたが、雑草抑制の効果は、実際の圃場で想定される水準の中量以上で確認されたことから、麦わらの全量をすき込むことによって水田雑草の抑制効果が期待された。



第3-1図 コムギわらすき込み量の違いによる雑草の発生本数。
 図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。
 **:P<0.01, NS; 有意差なし。



第3-2図 コムギわらすき込み量の違いによる雑草の乾物重。
 図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す。
 **:P<0.01, *:P<0.05, NS; 有意差なし。



写真7 わらのすき込み量の違いによる雑草の発生状況 (2013年9月13日)。

第4章 麦の生わらおよびその焼却灰の浸漬水がコマツナの出芽に及ぼす影響

第1章ならびに第2章において、麦わらの処理方法の違いが各種水田雑草の発生に及ぼす影響について検討を行ったところ、生わらをすき込んだ場合に出芽抑制効果が見られ、わらを焼却した場合にも同様の効果が確認されたが、その程度はすき込んだ場合よりも低減されることが確認された。こうした現象は、わらの分解過程で発生するガス³⁰⁾あるいはわら中に生成される各種有機酸⁵⁴⁾の影響が考えられたが、わらの焼却灰においても雑草の出芽抑制効果が確認されたことから、麦類の生わらおよびその焼却灰には雑草発生に影響する何らかの化学物質^{23, 26, 27, 28)}が含まれている可能性が唆された。特にアレロパシー作用がコムギよりも大きいと言われるオオムギわらに含まれる生理活性物質^{14, 7, 16)}については、これまでにアレロケミカルとしてグラミンの存在が報告されている⁴¹⁾。また、河野ら¹⁶⁾あるいは藤井^{6, 7)}はオオムギに強いアレロパシー活性を認め、その活性の強弱に品種間差があると報告している。さらに、安ら^{2, 3)}はアレロケミカルとしてカテキンなどのフェノール類が麦類の各器官に含まれていることを明らかにし、それら物質によるレタス (*Lactuca*

sativa) 幼根の伸長抑制効果を報告している。これらの事例はいずれも、わら中に生理活性物質の存在を認めているが、わらの焼却灰における生理活性物質の同定に関する研究はこれまでに見られない。また、麦わらから抽出された物質との比較もなされていない。そこで、本章においてはオオムギの生わらおよびその焼却灰の浸漬水を用いて検定植物であるコマツナ (*Brassica rapa* var. *perviridis*) の発芽に対する影響を評価しようと試みた。

材料と方法

供試したオオムギわらは、2014年5月17日に佐賀農セ内圃場から採取して屋外網室で風乾させたもの(品種: サチホゴールド)とした。麦わらの形状は、生わらおよびわらの焼却灰とし、2014年5月21日に300 mlの蒸留水を入れたガラスビーカー(300 ml容量)内に生わらは約5 mmに切断したものを5 g、わら焼却灰は生わら5 gをガストーチバーナーで完全に焼却したもの(約0.8 g)をそれぞれ入れて浸漬水を作成し、さらにそれらに佐賀農セの風乾水田土壌を3 gずつ添加した土壌添加区を設けた。それらはガラス棒で均一に懸濁するまで攪拌した後に、25°Cに設定した人工気象器(LPH-200RD, 株式会社日本医化器械製作所, 大阪府大阪市, 以下同)内に1週間静置し、上澄み液を採取してろ紙(No. 5種B, アドバンテック東洋株式会社, 東京都文京区, 以下同)でろ過して得られたろ液を試験に供した。浸漬水の生物検定は、滅菌シャーレ(φ87.5mm)内に発芽試験紙シート(「たねピタ」: 富士平工業株式会社, 東京都文京区)を敷き、コマツナ(*Brassica rapa* var. *perviridis*, 品種「菜々子」, タキイ種苗, 京都府京都市)種子をシャーレ当たり50粒ずつ播種した後、浸漬水をシャーレ当たり10 mlずつ添加して、25°C一定、暗黒条件下のインキュベータ(MIR-152, 三洋電機株式会社, 大阪府大阪市)内に静置した。播種翌日から5日後まで毎日胚軸長が3 mmに達したものを「発芽」とみなして発芽数をカウントした。なお、実験にはわらを施さない無施用区を設け、反復数は4とした。

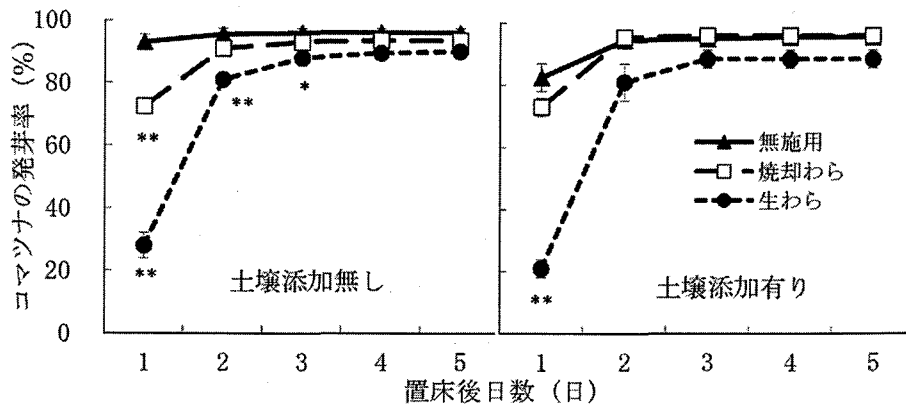
発芽試験に供した浸漬水のpHおよびECについては、2018年5月13日に、佐賀農セで収穫された2018年産オオムギ(品種: サチホゴールド)の生わらを用いて、同様の方法で浸漬水を作成し、25°Cに設定した人工気象器内に1週間静置した後にpHメーター(AUT-701, 東亜ディーケーケー株式会社, 東京都新宿区)およびECメーター(CM-25R, 東亜ディーケーケー株式会社, 東京都新宿区)をそれぞれ用いて測定した。

結果と考察

コマツナの発芽率は、土壌を添加しなかった場合、置床1日目において焼却わら区および生わら区とも無施用区に比べて有意に低下した(第4-1図)。特に、生わら区においては発芽率の低下が顕著であり、置床3日目まで同様に低かった。一方、土壌を添加した場合、置床1日目におけるコマツナの発芽率は、生わら区において無施用区に比べて有意に低下したが、2日目以降では無施用区との有意差はなく、土壌添加無しの場合とほぼ同様の傾向を示した。土壌添加の有無および異なるわらの形状との関係について二元配置分散分析を行った結果、わらの形状だけでなく、土壌添加の有無についても5%水準で有意差が認められた(第4-1表)。検定に用いた浸漬水と同様の方法で作成した水中のpHおよびECを測定したところ、無施用区と比較して生わら区では土壌添加の有無にかかわらずpHが約0.5低く、ECが約1 ms/cm高くなり、一方焼却わら区ではpHが約2~2.7、ECが生わら区同様に約1 ms/cm高かった(第4-2表)。

以上の結果から、土壌添加の有無にかかわらずオオムギ生わらの浸漬水がコマツナの発芽を抑制したことは明らかであり、また焼却したわらの浸漬水の場合にはその効果も小さくなることが分かった。すなわち、コマツナの発芽に対する抑制成分は生わらの土壌微生物による分解代謝産物ではなく、麦わらから直接浸漬水中に浸出した物質が関与している可能性が示唆される。ただし、土壌を添加したわらの無施用区においてもコマツナの

発芽抑制が若干認められたことから、麦わらだけでなく土壌自体が発芽に影響を与えている可能性も考えられたが、このときの麦わらと土壌との交互作用は確認できなかった(データ略)。なお、浸漬水のpHおよびECについては、焼却わら区では無施用区の場合に比べて明らかにpHの上昇が確認された一方で、生わら区では逆にpHが低下していた。その値はコマツナの発芽にほとんど影響を及ぼさない範囲であると思われたが、この点については別に明らかにする必要がある。しかし、生わら区での発芽抑制が明確にみられたことから、pH以外の要因が強く関与していることが示唆された。また、ECについても土壌添加の有無にかかわらず生わら区および焼却わら区ともに値が上昇したが、それら区間差がほとんどなかったことから、各処理区間での発芽率の違いが生じた直接の原因ではないものと考えられた。



第4-1図 土壌添加の有無とオオムギわらの形状の違いがコマツナの発芽率に及ぼす影響。
 図中のバーは標準誤差を示す。
 図中の記号は、Dunnett法による無施用区との有意差を示す (**: 1%, *: 5%, 無印: 有意差なし)。

第4-1表 コマツナの発芽率に対するオオムギわらの形状あるいは土壌添加の有無の関係。

変動要因	自由度	分散	観測された分散比	P-値	F 境界値
わら形状	2	8738.2	210.84	3.23E-13 **	3.55
土壌添加の有無	1	192.7	4.65	0.044852 *	4.41
交互作用	2	63.2	1.52	0.244629 -	3.55

注1) 有意水準 **: 1%, *: 5%, -: 有意差なし。

2) 統計処理には置床後1日目のデータを用いた。

第4-2表 供試浸漬水のpH及びEC。

土壌添加	わら形状	pH	EC ms/cm
無し	無施用	6.1	0.02
	生わら	5.6	1.09
	焼却わら	8.8	0.98
有り	無施用	6.1	0.05
	生わら	5.6	1.06
	焼却わら	8.1	1.01

注1) 浸漬水作成後7日目の測定値。

第5章 オオムギの生わらおよびその焼却灰の浸漬水中に含まれるフェノール性物質の 同定および定量

第1章から第4章を通じて、麦わら中には雑草の発芽抑制に係る何らかの化学物質(5, 7, 8, 42, 47)が含まれていることが示唆された。特に第4章において明らかにされたように、麦の生わら(この場合、オオムギわら)を土壌添加なしの状態に水に浸漬した場合に、その浸漬水は検定植物(コマツナ)の発芽を顕著に抑制した。

そこで、この章では、オオムギわらとその焼却灰の浸漬水中にどのようなフェノール性物質が含まれているかを明らかにするために、LC/TOF-MS(Q-TOF LC/MS 6460, Agilent Technologies, Inc., California)を用いてスクリーニングを行った(51, 52, 45)。スクリーニングによって探索した化学物質は、松尾ら(26, 27, 28)あるいは田中(54)によって報告されている既知のフェノール性化合物13種類を対象とした(第5-1表)。

材料と方法

供試したサンプル液は、2015年9月2日に、2015年5月に佐賀農セにおいて採取・風乾されたオオムギ(品種: サチホゴールデン)の生わら10gまたはその焼却灰約1.5gを300mlの三角フラスコ内に入れ、蒸留水200ccを添加して28℃で24時間振とうした後、半量の100ccを採取してろ紙でろ過したものとした。また、浸漬水中に確認されたフェノール性物質については、その含有量の経時的な変化を調べるために残りのサンプル液100ccを24℃の恒温器(MIR-253, 三洋電機株式会社, 大阪府大阪市)内に1週間静置させ、そのろ液をLC/TOF-MSにより分析した。なお、スクリーニングでピークが確認された物質の同定および定量については、第5-1表に示した各標準試薬をアセトニトリル100%:水=1:1の溶媒で0ppm, 0.1ppm, 0.5ppmおよび1.0ppmの濃度となるように作成した。LC/TOF-MSの測定条件については、第5-2表に示した。

結果と考察

抽出液をLC/TOF-MSで分析した結果を第5-3表に示す。まず、安息香酸については、生わら区では検出されなかったが、焼却わら区では検出された。続いて、*o*-ヒドロキシ安息香酸(サリチル酸)、4-ヒドロキシ-3-メトキシ安息香酸(バニリン酸)およびシリンガ酸については反復測定による検出に対して再現性がなく、またtrans-桂皮酸、(+)-カテキンおよび4-フェニル酪酸は検出されなかった。さらに、バニリンについても生わら区での検出ピークが分割されたことによってその存在の判定が困難であったため、これら物質についてはコマツナの出芽抑制に関与していないものとしてサンプル液中の含有量測定の対象からは除外した。最終的に、生わら区および焼却わら区のいずれにも含まれている、または焼却わら区において消失してしまった可能性がある(スクリーニングで検出されなかった)フェノール性物質は、(±)-2-フェニルプロピオン酸、3-フェニルプロピオン酸、フェルラ酸、没食子酸(無水)および*p*-クマル酸の5種類であった(例: 第5-1図, (±)-2-フェニルプロピオン酸の場合)。

これらの結果から、サンプル水中に存在すると仮定される5種類の物質について、標準試薬で検量線を作成し、その物質の同定とサンプル水中に含まれる含有量を測定した。その結果、*p*-クマル酸は生わら区では0.044ppmであったものが焼却わら区では0.417ppmと増加しており、続いてフェルラ酸では生わら区で0ppmであったものが焼却わら区では0.007ppm検出された。(±)-2-フェニルプロピオン酸については、生わら区では11.661ppmであったものが、焼却わら区においては0.231ppmに減少していた。没食子酸(無水)および3-フェニルプロピオン酸については検量線による定量ができなかった(第5-4表)。なお、オオムギわら処理1週間後における

る浸漬水からは、いずれのフェノール性物質も検出されなかった。

以上、本章では13種類のフェノール性物質を対象として、オオムギわら浸漬水中にそれら物質が存在しているのかどうかを確認したところ、浸漬水作成24時間後において(±)-2-フェニルプロピオン酸、3-フェニルプロピオン酸、フェルラ酸、没食子酸(無水)およびp-クマル酸の5種類の物質が同定され、またそのうちの3種類((±)-2-フェニルプロピオン酸、フェルラ酸およびp-クマル酸)が定量できた。しかし、浸漬水作成1週間後にはいずれの物質も検出されなかった。最終的に発芽抑制への関与が疑われた物質は(±)-2-フェニルプロピオン酸の1種類のみであった。

なお、p-クマル酸およびフェルラ酸の濃度が生わら区よりも焼却わら区で高くなった要因として、①焼却処理により化学変化が発生し物質が増加した、②測定に供試したサンプルを作成する際の麦わらの添加量が十分ではなく雑草抑制に必要な量の濃度に達していなかった、③溶液中の濃度の経時変化が生わら区と焼却わら区で異なり測定した時点での濃度がたまたまそうになっていた、などが考えられたが、この点についてはさらに検討が必要であると思われる。

第5-1表 試験に供試した麦類に含まれる既知フェノール性物質.

英名	和名	化学式
1 Benzoic acid	安息香酸	$C_7H_6O_2 = 122.12$
2 Catechin	(+)-カテキン	$C_{15}H_{14}O_6 = 290.27$
3 trans-Cinnamic acid	trans-桂皮酸	$C_9H_8O_2 = 148.16$
4 p-Coumaric acid	p-クマル酸	$C_9H_8O_3 = 164.2$
5 Ferulic acid (4-Hydroxy-3-methoxycinnamic acid)	フェルラ酸 (4-ヒドロキシ-3-メトキシけい皮酸)	$HOC_6H_3(OCH_3)CH:CHCOOH = 194.18$
6 Gallic acid anhydrate	没食子酸(無水)	$C_7H_6O_5 = 170.1$
7 o-Hydroxybenzoic acid (Salicylic acid)	o-ヒドロキシ安息香酸 (サリチル酸)	$HOC_6H_4COOH = 138.12$
8 4-Phenylbutyric acid	4-フェニル酪酸	$C_6H_5CH_2CH_2CH_2COOH = 164.2$
9 (±)-2-Phenylpropionic acid	(±)-2-フェニルプロピオン酸	$C_9H_{10}O_2 = 150.17$
10 3-Phenylpropionic acid	3-フェニルプロピオン酸	$C_6H_5CH_2CH_2COOH = 150.17$
11 Syringic acid	シリング酸	$C_9H_{10}O_5 = 198.17$
12 Vanillic acid (4-Hydroxy-3-methoxybenzoic acid)	4-ヒドロキシ-3-メトキシ安息香酸	$HOC_6H_3(OCH_3)COOH = 168.15$
13 Vanillin	バニリン	$C_8H_8O_3 = 152.15$

注1) 1, 3, 7, 13: ナカライラスク株式会社, 4, 5, 8, 9, 10, 12: 和光純薬工業株式会社, 2, 11: 東京化成工業株式会社, 6: シングマアルドリッチ.

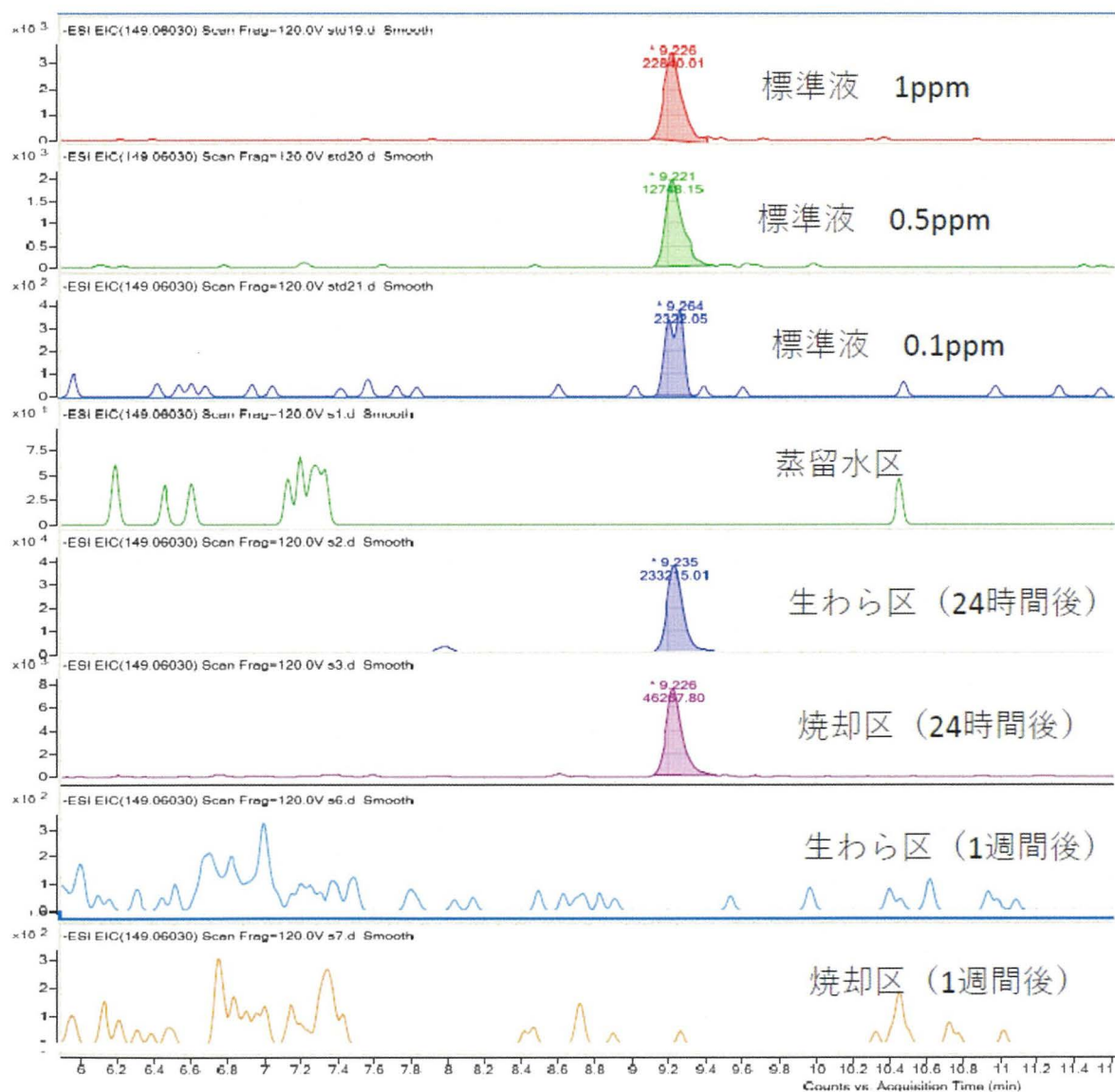
第5-2表 LC/TOF-MASの測定条件.

[LC条件]	
カラム	Zorbax Eclipse Plus C18 RRHD 2.0×100mm, 3.5 μm
移動相	A: 0.1% $HCOOH + 2.5mMCH_3COONH_4 / 15\%CH_3CN$ B: 0.1% $HCOOH + 2.5mMCH_3COONH_4 / 85\%CH_3CN$
グラジエント条件	
	1 1.00 min Solvent composition A: 100.0% B: 0.0 %
	2 15.00 min Solvent composition A: 0.0% B: 100.0 %
	3 25.00 min Solvent composition A: 0.0% B: 100.0 %
カラム温度	40.00 °C
流速	0.200 mL/min
注入量	5.00 μL
[TOF MS条件]	
イオン化法	AJS ESI, Positive/negative mode.
乾燥ガス	300°C, 10L/min
ネブライザー	N_2 40psig.
キャピラリー電圧	Value(+)3000, Value(-)2500
フラグメンター電圧	120V
リファレンスマス	121.0508739 and 922.009798(pos.), 112.985587, 119.03632 and 1033.988109(neg.)

第5-3表 LC/TOF-MSを用いたオオムギわら処理後のろ液中に存在する物質のスクリーニング結果.

	Retention time	Exact mass				
		無処理	24時間後		1週間後	
			生わら	焼却わら	生わら	焼却わら
安息香酸	6.2	-	-	3.5×10^4	-	3.5×10^4
<i>o</i> -ヒドロキシ安息香酸(サリチル酸)	5.7	-	-	0.7×10^3	△	1.8×10^3
バニリン	7.8	-	+	3.7×10^3	-	-
4-ヒドロキシ-3-メトキシ安息香酸	6.0	-	△	4.5×10^3	△	4.0×10^3
trans-桂皮酸	-	-	-	-	-	-
(+)-カテキン	-	-	-	-	-	-
(±)-2-フェニル/ 3-フェニルプロピオン酸	2.9	-	4.7×10^3	-	+	+
シリンガ酸	5.9	-	0.9×10^3	-	△	1.7×10^3
フェルラ酸	6.9	-	2.7×10^3	+	+	+
4-フェニル酪酸	-	-	-	-	-	-
没食子酸(無水)	1.3	-	5.0×10^6	6.0×10^6	5.0×10^6	5.0×10^6
<i>p</i> -クマル酸	8.1	-	3.9×10^4	8.0×10^3	△	5.3×10^3

1) +: ピークはあるが2つに分かれている, △: 反復測定 (n=3) の結果が異なり再現性が低い, -: サンプル中に含まれていない.



第5-1図 (±)-2-フェニルプロピオン酸の検出結果.

第5-4表 異なる形状のわら浸漬水から検出されたフェノール性物質の濃度 (ppm).

フェノール類	作成24時間後		作成1週間後	
	生わら	焼却わら	生わら	焼却わら
p-クマル酸	0.04	0.417	0	0
フェルラ酸	0.00	0.007	0	0
(±)-2-フェニルプロピオン酸	11.66	0.231	0	0

1) 没食子酸(無水) および3-フェニルプロピオン酸は検出されず。

第6章 (±)-2-フェニルプロピオン酸が検定植物の発芽に及ぼす影響

第1章ならびに第2章の結果から、一定量の麦わらを焼却せずに圃場にすき込んだ場合には、焼却した場合に比べて雑草が減少すること、言い換えれば、すき込みによって雑草の発生量が抑制することが確認され、その作用機作としては、第4章において明らかとなったように麦わらから水中に直接浸出した化学物質が関与していること、そしてその物質としては第5章の結果から(±)-2-フェニルプロピオン酸が大きくかかわっていることなどが示唆された。本来であれば、この(±)-2-フェニルプロピオン酸が各種雑草の発生に及ぼす影響を水田やポットなどによって直接的に検定すべきであるが、処理間や反復間の雑草の発生条件を揃えることが難しいと判断されたことから、この章では、当該物質が検定植物であるコマツナの発芽などに及ぼす影響について調査した。

材料と方法

(±)-2-フェニルプロピオン酸の溶液濃度を2 ppm, 10 ppmおよび50 ppmとなるように検定液を調製した。この場合物質に90%エタノール(C₂H₅OH) 1 mlを添加して溶解させた後に蒸留水で100 mlにメスアップした。なお、対照は蒸留水100 ml中に90%エタノール1 mlを含むものとした。発芽試験の方法は第4章と同様に、滅菌シャーレ(φ87.5mm)内に発芽試験紙シート(「たねピタ」:富士平工業株式会社,東京都文京区)を敷き、コマツナ(*Brassica rapa* var. *perviridis*, 品種「菜々子」,タキイ種苗,京都府京都市)種子をシャーレ当たり50粒ずつ播種した後、2 ppm, 10 ppmおよび50 ppm濃度の(±)-2-フェニルプロピオン酸溶液ならびに対象区の蒸留水をシャーレ当たり10 mlずつ添加して、25°C一定、暗黒条件下のインキュベータ(MIR-152,三洋電機株式会社,大阪府大阪市)内に静置し、処理24時間後におけるコマツナの発芽数(胚軸長が3 mmに達したものを「発芽」とみなしてカウント)を調査した。反復数は4とした。

また、当該物質が検定植物の発芽のみならず、胚軸長や根の伸長に及ぼす影響についても調査した。2017年7月30日に、0.1 ppm, 1 ppm, 10 ppm, 50 ppm, 100 ppmの5段階の濃度の検定液を調製し蒸留水と比較した。試薬はエタノールを使用せず蒸留水のみで定容した。試験の方法は、試験1と同様に、コマツナを検定植物として使用した。滅菌シャーレに発芽試験紙シートを敷き、コマツナ種子をシャーレ当たり50粒ずつ播種した。ここに、それぞれの検定液をシャーレ当たり10 mlずつ添加して、インキュベータ内に静置した(暗黒条件25°C)。播種4日後に出芽した個体の胚軸長ならびに根長をノギスで測定した。反復数は4とした。

結果と考察

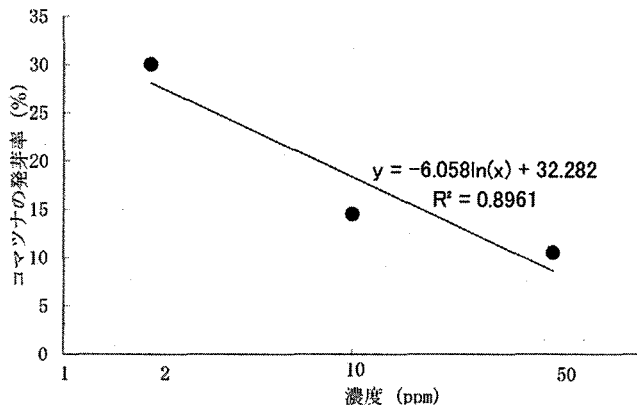
(±)-2-フェニルプロピオン酸における2 ppm, 10 ppmおよび50 ppmの濃度下でのコマツナの発芽率を比較した場合、濃度が濃くなるほどその抑制程度は有意に大きかった(第6-1図)。この場合、濃度が2ppm程度でコ

マツナの発芽率は30%程度に抑制されたが、この結果は、第4章や第5章における結果とも一致していた。

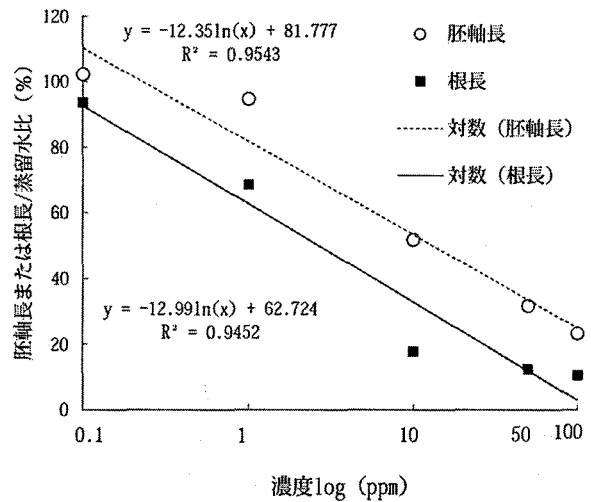
さらに(±)-2-フェニルプロピオン酸が検定植物の胚軸や根の伸長に及ぼす影響については、検定液中の(±)-2-フェニルプロピオン酸の濃度が高まるにつれ、胚軸長、根長のいずれにおいても伸長阻害は大きくなった(第6-2図)。伸長阻害の傾向は、胚軸、根部ともに変わらなかったが、同濃度で比較すると胚軸長よりも根長への影響が大きく、蒸留水の場合と比較した比活性(EC50)10)は、胚軸長に対しては13.1 ppm、根部に対しては2.7 ppmであり、根部の方がより低濃度であった。

ここで、藤井ら10)やGOLISZら11)の手法を用いて、第5章で示した第5-4表や本章の結果から、処理24時間後の抽出液中の物質の濃度(C)を比活性(EC50)で割った値を全活性と定義すると、第6-1表のように整理し直すことができる。濃度が高いほど、比活性が小さいほど活性が強いので、濃度を比活性で割ることで求められる全活性は、値が大きいほど活性が強いことを示す。全活性は、それぞれの物質の濃度を加味した値であり、どの物質が最も全体の阻害活性に寄与しているかを示す尺度と考えられることから、この場合、(±)-2-フェニルプロピオン酸の全活性は出芽阻害に関する項目が突出して高い値を示していた。これにより、表わら処理後の抽出液による植物への出芽阻害に関しては、生わら区、焼却区ともにほぼ(±)-2-フェニルプロピオン酸で説明ができ、根の伸長阻害に関しても生わら区においては、当該物質で説明することができた。

本章においては、検定植物としてコマツナを使用し、また、オオムギを供試材料としたが、今後、実際に(±)-2-フェニルプロピオン酸の濃度を変えて、各種の雑草の出芽が抑制されるのかを確認する必要があり、また、オオムギだけでなく、同様の試験をコムギにおいても確認する必要があると考えられる。



第6-1図 (±)-2-フェニルプロピオン酸の濃度とコマツナの発芽率との関係。蒸留水との比較では、t検定の結果いずれの濃度においても p<0.001。図中のバーは標準誤差を示す。



第6-2図 (±)-2-フェニルプロピオン酸の濃度の違いがコマツナの胚軸長や根長に及ぼす影響。図中の各プロットは未出芽個体を除く平均値。

第6-1表 (±)-2-フェニルプロピオン酸の全活性。

		抽出液中 の濃度(C) [ppm]	比活性 (EC ₅₀) [ppm]	全活性 (C/EC ₅₀)
発芽阻害(第6-1図)	生わら区	11.66	0.054	215.93
	焼却区	0.23	0.054	4.28
胚軸伸長阻害(第6-2図)	生わら区	11.66	13.10	0.89
	焼却区	0.23	13.10	0.02
根伸長阻害(第6-2図)	生わら区	11.66	2.66	4.38
	焼却区	0.23	2.66	0.09

1)比活性は、コマツナの出芽や胚軸・根伸長を50%阻害するのに必要な濃度で、第6-1図および第6-2図から算出した。

2)全活性は、粗抽出液中における生理活性物質濃度が比活性の何倍にあたるかを示す指標で、濃度(C)/比活性(EC₅₀)と定義し、表中の値は第5-4表の濃度から算出した。

第7章 麦わら焼却時に発生する熱の評価について

第1章から第6章においては、コムギやオオムギの生わらから浸出される他感物質が水田雑草の発生を抑制していることを明らかにし、その原因である化学物質として(±)-2-フェニルプロピオン酸が大きく関与していることを突き止めた。第5章で明らかにしたように、生わらと比較して、麦わらを焼却処理したとき雑草の抑制作用は減少し、このとき浸出液の(±)-2-フェニルプロピオン酸の含有量も低下していることが分かったが、実際の現場において水田で麦わらを焼く場合には、フェノール類の動態のみならず、当然、焼却こともなう熱や煙などが発生することとなる。

そこで、本章では、第1章から第6章までの流れとは異なり、麦わら焼却時に発生する熱に着目し、その熱による水田雑草への影響についての評価を試みた。

材料と方法

調査は第1章で使用した圃場において、コムギわらを焼却する際に測定機器を設置して行った。データロガーとして4ch デジタル温度計 (TM-947SD, 株式会社マザーツール, 長野県上田市) にK熱電対センサ TP-02A とシース熱電対 (K) 先端部: $\phi 8 \times 500$ mm 端末部仕様: TCN1 コード1 m, 4本を取り付けたものを2台用意し、麦わらを焼却する際の炎が通過する前に、センサの先端部をウインドロウの中心から水平方向 (0 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm) に4段階、垂直方向 (0 cm, 3 cm, 6 cm, 9 cm) に4段階取り付け (第7-1図)。測定は1分間隔に設定したデータロガーの記録スタートスイッチを押したのち、本体をポリエチレンの袋で包み、直接炎が当たらないように土中に埋設した。測定地点であるウインドロウを炎が通過した後、しばらくしてからデータロガーを回収した。測定は場所を変えながら3カ所で行い、その中でもっとも温度が高かったものをプロットした。

結果と考察

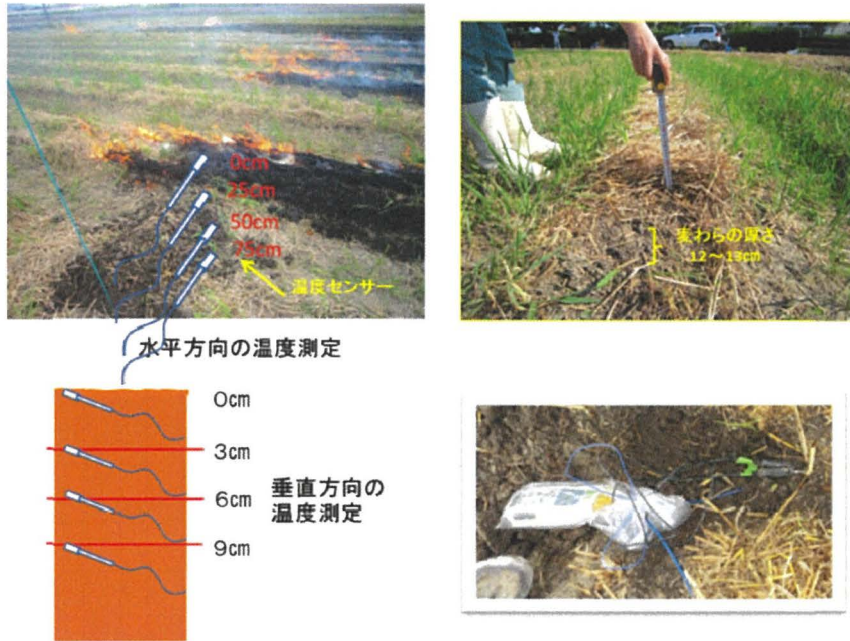
最初に、水平方向の温度分布を第7-2図に示した。ほぼウインドロウの中心である0 cmの位置については、炎が通過して約1分後に125°Cまで温度が上昇し、その後は緩やかに温度が低下していったが、60°C以下になるには約6分間を要した。次に、中心部から約25 cm離れた場所においては、0 cm地点と同様に約1分後に80°Cまで温度が上昇し、その後は5分間以内に60°C以下にまで低下した。0 cmも25 cmも10分後になっても40°C程度の温度が維持されていた。50 cmと75 cmについては、ほとんど温度が上がらず、50 cmでは約30°C、75 cmでは気温とほぼ同じ約27°Cで推移した。

続いて、垂直方向の温度分布を第7-3図に示した。ウインドロウの直下にあたる地表面の温度は、水平方向の温度分布と同じとみなしており、約1分後に125°Cまで温度が上昇し、その後緩やかに温度が低下し60°C以下になるには約6分間を要したが、地中に埋め込んだセンサでは、大きな変化はみられなかった。3 cmでは炎が通過してから約10分間をかけて約31°Cから約35°Cまでわずかに温度上昇が確認されたが、6 cmと9 cmでは温度変化はなかった。

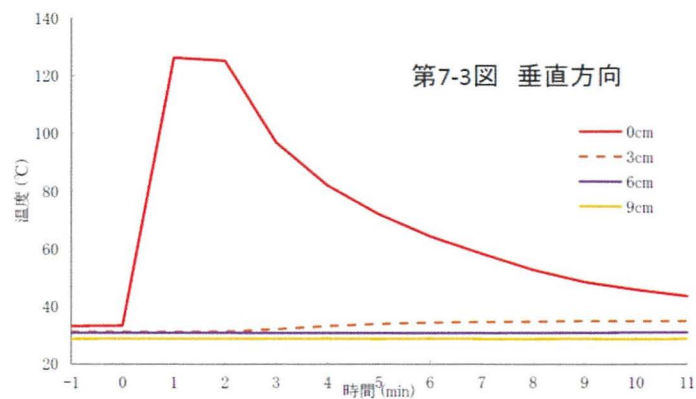
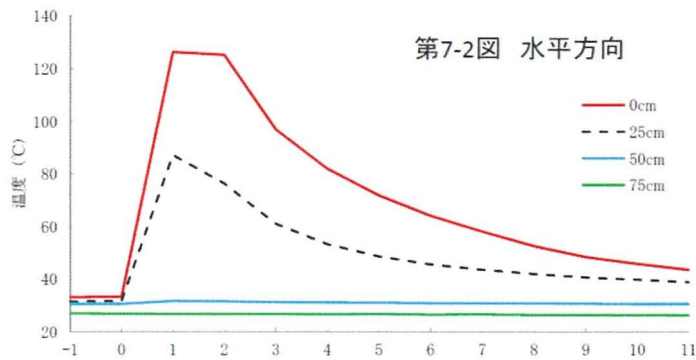
雑草の死滅温度については、これまで畑雑草において60°Cで24時間(31)、100°Cで180分(加湿種子)36)、雑草イネで100°C(46)、メヒシバでは60°Cで2~8時間、スズメノカタビラでは同1~2時間(50)、タイヌビエ、イヌホタルイ、雑草イネは熱水中で70°C30分または60°C180分(56)など様々な報告があるが、ほとんどの雑草種子を死滅させるためには、比較的低温帯である60°Cであれば少なくとも3時間以上の継続した加熱時間が必要であると思われる。本結果では、60°C以上に温度が上昇した時間も約6分間程度と短かったことから、温度が100°C

以上に上昇したウインドロウの中心付近では雑草の死滅の可能性は考えられるが、炎の中心から水平方向に約25cm以上離れた場合や土中の埋土種子への温度上昇はほとんど認められないことから、麦わら焼却による雑草抑制効果は極めて限定的で現場技術としての実現性はかなり低いと考えられた。

ただし、一方で近年、蒸気や熱水を利用した雑草防除方法の研究も行われており 32, 46, 50, 56) これらの方法は圃場全面を高温の蒸気で処理するために、一部の難防除雑草にも効果が高く、非常に良好な結果が得られており、今後の普及が期待されているところである。



第7-1図 麦わら焼却時における温度測定の様子。



第7-2図および第7-3図 コムギわら焼却時に発生する温度の分布状況

総合考察

第1章の現地圃場試験においては、すき込み区に比べて焼却区でタカサブロウとアゼナが多く発生し、雑草の乾物重も重かったことから、麦わらを焼却する理由の一つとして挙げられている「焼却しないと雑草が増える」ということは、必ずしも起こらないことが示された。この場合、各処理間の地点誤差がないとは言えないが、少なくとも圃場観察の結果からは、麦わらすき込みで雑草が多くなるとは言いがたかった。また、土壌表面の酸化還元電位や化学性からも第1章の結果の要因を検討したが、麦わら処理の違いによる差が明確でなかったことから、雑草発生との直接の因果関係は見出すことができなかった。

麦わらすき込みによる水稻の生育抑制に関しては、分けつ抑制により穂数が減少するものの、麦わら分解に伴う窒素放出などにより、後半の生育が回復し、登熟状況が改善することによって減収を回避することが報告されている(12, 15, 35, 43, 54)。第1章の現地試験においても同様な結果が得られたが、この登熟歩合について、佐賀農七内で実施した「さがびより」作況試験の平年値85と比較すると、すき込み区で91と高かった反面、焼却区では77と低かった。この原因については不明であるが、少なくともこの結果からは、麦わらをすき込むことによって必ずしも減収するとはいえない。

さらに、麦わらのすき込みと焼却処理の違いが雑草発生に及ぼす影響についてポット試験で確認した第2章では、夏期調査において、第1章と同様にすき込み処理は水田雑草に対して強い発生抑制を示すことが明らかとなった。また、焼却処理でも雑草発生を抑制したものの、その程度はすき込み処理に及ばなかった。なお、雑草の抑制程度は、麦わら量が同じ場合、コムギよりオオムギで大きかったため、今後、麦種間での抑制力の差異の要因については明らかにする必要があると考えられた。

第2章では観察期間を通して、麦わらの焼却がすき込みよりも雑草抑制効果が小さかったことから、焼却によって雑草を抑制する何らかの要因が軽減されたことが考えられた。一つには、麦わら中に存在するアレロパシー活性を持つ化学物質(アレロケミカル)が関与している可能性があり、麦わらを焼くことでそれらが失活、または減少したということも考えられる。田中(54)は、麦わらを施用した土壌溶液が水稻の種子根長に顕著な阻害活性を示すことを明らかにし、この原因物質として安息香酸や2-フェニルプロピオン酸、3-フェニルプロピオン酸などの芳香族カルボン酸を特定している。第2章での雑草の発生抑制においても、それらと同じまたは類似のフェノール性物質が関与している可能性が考えられた。麦収穫後の麦わら焼却が雑草種子に及ぼす影響については、大隈ら(39)が、麦わらがよく燃えた条件下では麦作雑草のスズメノテッポウ(*Alopecurus aequalis*)の麦収穫後の落下種子が半分程度に死滅したことを明らかにしているが、後作水稻での雑草発生については明らかにされておらず、今後、埋土種子の観点からの解明が必要であろう。

わらのすき込み量の違いによる雑草発生抑制程度を検討した第3章では、乾物重と発生本数とではやや異なる傾向を示したが、これは雑草の個体当たりの生育量が違ったことによるものである。雑草発生本数は2 kg/a区と4 kg/a区で無施用区とほぼ同等であったにも関わらず、雑草乾物重は2 kg/a区、4 kg/a区とも無施用区の3倍以上になった。また、20 kg/a区では雑草発生本数は無施用区の6分の1程度だが、乾物重では無施用区の半分程度となった。40 kg/a区では無施用区に対し、雑草発生本数、乾物重とも1%程度と少なかった。2 kg/a区や4 kg/a区、20 kg/a区において雑草の発生本数の割に、乾物重が増加した原因については、麦わらの分解が進み窒素が放出されることで雑草への肥効が発現したことによるものと推察された。40 kg/a区においても同様に、麦わらが分解されて窒素が放出されたと考えられるが、田中(54)が指摘しているように、多量の麦わら施用にともなって芳香族カルボン酸類の生成量が増加し、この結果、雑草の窒素吸収阻害が促進され、無施用区に対する雑草発生本数の割に乾物重が軽くなった可能性も考えられる。麦わらの施用量を少量(2 kg/a, 4 kg/a)、中量(20 kg/a)、多量(40 kg/a)の3段階としたが、雑草抑制の効果は、実際の圃場で想定される水準

の中量以上で確認されたことから、麦わらの全量をすき込むことによって水田雑草の抑制効果が期待された。

なお、第1章～第3章においては、一定量以上の麦わらすき込みにより広葉雑草の発生が抑制されたが、これは松尾ら29)の結果と異なった。この要因として、麦わらと土壤の混和割合の違いや、化学肥料添加の影響などが考えられるが、この点については、今後、明らかにする必要がある。

第4章からは、麦わらに起因する他感作用化学物質について焦点をあて、その作用性と原因物質の特定を試みた。第4章の結果から、土壤添加の有無にかかわらずオオムギ生わらの浸漬水がコマツナの発芽を抑制したことは明らかであり、また焼却したわらの浸漬水の場合にはその効果も小さくなることが分かった。すなわち、コマツナの発芽に対する抑制成分は麦わらの土壤微生物による分解代謝産物ではなく、麦わらから直接浸漬水中に浸出した物質が関与している可能性が考えられた。このため、第5章においてオオムギわら浸漬水中にそれら物質が存在しているのかどうかを確認したところ、浸漬水作成24時間後において(±)-2-フェニルプロピオン酸、3-フェニルプロピオン酸、フェルラ酸、没食子酸(無水)およびp-クマル酸の5種類の物質が同定され、またそのうちの3種類((±)-2-フェニルプロピオン酸、フェルラ酸およびp-クマル酸)が定量できた。しかし、浸漬水作成1週間後にはいずれの物質も検出されなかった。そのため、最終的に発芽抑制への関与が疑われた物質は(±)-2-フェニルプロピオン酸の1種類のみであった。作成24時間後における生わら区の浸漬水では(±)-2-フェニルプロピオン酸の濃度が11.7ppmであったが、第4章における土壤添加なしでの置床後1日目におけるコマツナの発芽率から考慮すると、その時の(±)-2-フェニルプロピオン酸の濃度は2ppmと推測される。

これは、LC/TOF-MSでの分析結果と一致する。したがって、オオムギわらの浸漬水によるコマツナの発芽抑制作用には(±)-2-フェニルプロピオン酸が大きく関わっている可能性が考えられた。

(±)-2-フェニルプロピオン酸が植物に与える影響については、これまでに水稻の種子根への伸長阻害と稲体への窒素吸収阻害が明らかにされている54)。また、麦わら施用水田において安息香酸、フェニル酢酸あるいは(±)-2-フェニルプロピオン酸などの芳香族カルボン酸が土壤中の麦わら近傍に集積し、特に(±)-2-フェニルプロピオン酸は水稻における根の伸長阻害活性が最も高かったとしている54)が、雑草生育への影響については明らかにされていない。また、Xiaoら59)はオオムギわらから単離した天然フェノール性物質であるキラルフラボノリグナンとして、その一種であるサルコリンAおよびサルコリンBを同定し、これらが藍藻の増殖に対して抑制効果を示したと報告している。サルコリンは、Syrchinaら49)によってヤマヒジキ(*Salsola collina* *Paill*)で発見されたが、それ以来エンバク(*Avena sativa*)58)あるいはセイバンモロコシ(*Sorghum halepense* (L.))13)等の植物に見いだされたアレロケミカルである。したがって、サルコリンが本報告での(±)-2-フェニルプロピオン酸以外にコマツナの発芽に影響している可能性も考えられることから、サルコリンがコマツナあるいは雑草の発芽に及ぼす影響、また焼却わら浸漬水中での存在について今後さらに調査する必要があると思われる。

なお、第5章において、浸漬水作成1週間後のサンプル水中からフェノール性物質は全く検出されなかったが、これは第4章の結果と一致する。すなわち、麦わら処理した直後ではフェノール性物質の存在および作用効果が確認できるが、時間の経過とともに発芽抑制効果は漸減している。この結果から、何らかの発芽抑制物質が関与しているとすれば、麦わらのすき込みあるいは焼却灰土壤混和後に入水することで、その物質が水中に速やかに浸出されるものの、その後は時間の経過とともに物質の化学変化あるいはそれにもなう生理活性の低下、さらに水中濃度の低下が生じているものと推察された。

本研究では、検定植物としてコマツナを使用したが、河野ら16)あるいは藤井ら6)はレタス(*Lactuca sativa*)を検定植物として用いた場合にオオムギのアレロパシー活性を認めていることから、検定植物としてのレタスおよびコマツナとの比較について今後検討する必要がある。また、(±)-2-フェニルプロピオン酸と各種雑草の発芽との関係についても確認する必要がある。

第7章では、第1章から第6章までの一連の流れとは全く異なり、麦わらを現地で焼却したときの雑草発生への影響について検討を行ってみた。この結果、ウインドロウの中心近くでは確かに温度が一時的に100℃以上にあがるが、雑草の死滅にある程度の効果が認められている60℃以上になる継続時間は6分間程度と短く、温度が高くなる箇所も限定的であることから、除草効果についてはほとんど期待できないと考えられた。実際に、第1章での残草調査においても焼却区の方で雑草が減少したとは言えなかった。もし、圃場全体を高温で長時間にわたり焼き尽くすほどの稲わらや麦わらがあれば、除草効果もある程度期待できるかも知れないが、農業者自身の安全性や近隣への飛び火のリスクなどを考えた場合、わら焼きでの雑草低減技術の実用化は困難であると考えざるを得ない。

さて、再び麦わらのアレロパシー活性に関する考察であるが、第1章から第6章を通して、麦わらに起因する雑草抑制物質の一つとして、(±)-2-フェニルプロピオン酸を特定することができた。この結果を実際の栽培現場へ応用するための提案を以下に述べる。

これまでに多くの報告があるように、麦わらや稲わらのすき込みや連用は水稻に対する影響が懸念されている(1, 12, 15, 19, 20, 21, 22, 24)。特に麦わらについては、その後の水稻の生育に大きな影響を及ぼし、総じて活着や分けつの遅れ、葉身展開の遅れ、生育中盤から後半にかけての過剰生育、倒伏等の誘発などが報告されている。一方で、わら有機物が分解されることに伴う生育後半の窒素供給量の増加により、千粒重の増加や登熟歩合の向上などのメリットも報告されていることから、わらをすき込んだ場合の土壌からの窒素供給—稲体への窒素吸収のパターンの特徴をしっかりと把握し、施肥設計に活かしていくことが重要であると考えられる。例えば、移植直後には水稻の活着と初期分けつの確保を図るため、あるいは麦わらの分解剤として、基肥の窒素施用量を多めに施し、その後は水稻の生育状況をみながら減肥するなど、前期重点型の施肥体系が良いのではないかと考えられる。この場合、麦わらすき込みによる除草効果をしっかり発揮させるためには、なるべく代かき時にも水を落とさずに移植し(近年はGPSでマーカーが見えなくても直進できる田植機が農機具メーカーから発売されている)、苗質も中苗や稚苗よりも、省力的で近年増加傾向にある乳苗や密苗を使うことによって旺盛な分けつ力を期待することができ、穂数不足を回避できる。この場合、生育後半の過繁茂を避けるために、早め・強めに中干しを行うなどすれば、生育のコントロールとあわせて次作の麦作時の乾田化にも寄与でき一層効果的である。ただし、麦作後に湛水直播栽培を行う場合には細心の注意が必要である。松尾ら(29)は、水稻湛水直播田においては、麦わらすき込みによる雑草抑制は草種によって異なり、ヒメミソハギとコナギについてはむしろ増加したと報告しているが、湛水直播栽培は、従来の慣行移植栽培と比較して全く異なる水管理が行われることから、ときには頻りに落水管理が行われる場合も多い。この時に、麦わらから浸出したアレロパシー物質も圃場外に排出されてしまう可能性がある。一方で、著者が行った湛水土中直播の発芽試験では、湛水条件下では、焼却処理に比較すると麦わらすき込みにより水稻の土中出芽や苗立ちが著しく阻害されることを確認しており、水稻乾田直播でも無施用と比較して麦稈を施すと苗立ちを著しく阻害した(57)。このため、湛水直播栽培における麦わらすき込み上の改善策として、例えば荒耕起時に逆転ロータリなどを用いて麦わらを深層にすき込み、代かきはサーフロータリやドライブハローなどで表面に近い層を丁寧に代かきすることで、麦わらの直接的な影響を回避することができる。また、播種量をやや増やすなどして発芽不足に備えたり、こまめに用水を入れ替えることで土中への酸素供給を計るなどの工夫をすることによって、麦わらすき込みと湛水直播栽培の共存は可能であると思われる。

さらに、本研究においては、ほとんどのケースで1回限りの麦わら処理の結果について論じてきたが、実際の現場では何年間も連用することにより、その効果が年々異なってくるものが十分に予想される(1, 24, 61, 62, 63)ため、水稻の生育や雑草種の経年変化や土壌の化学変化を観察することも大事である。

最後に、この九州北部米麦二毛作地帯において、このたび得られた知見を基にして、地域の貴重な有機物資源

を燃やすことなく有効活用し、生産者にも消費者にも優しい持続的な水田営農の確立が図られることを心から願う。

要約

本研究では、北部九州における今後の麦わら適正処理技術を確立するために、麦わらのすき込み処理と焼却処理の違いが雑草の発生活長および水稻生育に及ぼす影響について、現地圃場試験で検討するとともに、ポット試験や発芽試験などを通じて麦わらのすき込み処理が雑草の発生におよぼす作用機構の解明を行った。現地圃場において、麦わらの処理方法の違いが水田雑草の発生と水稻生育に及ぼす影響を調査したところ、雑草発生の抑制効果は焼却に比べてすき込みの方が高かった。また、水稻の生育はすき込みで分けつが抑制されるものの、出穂後の登熟が向上し、増収する傾向がみられた。さらに、麦わらの雑草抑制効果についてポット試験で確認したところ、オオムギ、コムギいずれの麦わらをすき込んだ場合にも、各種の水田雑草に対して強い抑制効果が認められた。雑草発生抑制効果は経時的に低下したが、水稻収穫時期の秋頃から麦作の出穂期の翌年春頃まで観察することができた。麦わらの処理量としては実際に現場で施用されるレベルの20~40kg/aで十分な雑草抑制効果が認められ、この結果から麦わらの処理は焼却よりも全量すき込みが適していると考えられた。さらに、この雑草抑制作用の機構を解明するために、アレロパシー活性が強いとされるオオムギについて、その生わらおよびその焼却灰の浸漬水を用いて検定植物（コマツナ）種子の発芽への影響を調査したところ、生わらは顕著に発芽を抑制し、わらの焼却灰ではその効果が生わらの場合と比較して劣ることが明らかとなった。この傾向は、浸漬水を作成する際の土壌添加の有無に係わらず同様に見られたことから、発芽抑制作用は土壌微生物による麦わらの分解代謝産物ではなく生わらあるいはその焼却灰から直接水中に浸出した物質の関与が考えられた。そこで、LC/TOF-MSを用いてオオムギ生わらおよびその焼却灰の浸漬水中に含まれるフェノール性物質の特定を試みたところ、5種類の物質の関与が特定でき、その中でも特に(±)-2-フェニルプロピオン酸の関与が示唆されたことから、実際にコマツナを用いて発芽試験を行ったところ、2ppmの濃度でコマツナの発芽は顕著に阻害され、これによりオオムギわらによる雑草抑制作用の多くの部分を説明することができた。

本研究報告は筆者が鹿児島大学大学院連合農学研究科生物生産科学専攻中の博士論文として研究成果をまとめたものである。研究にあたり直接の御指導をいただいた佐賀大学農学部生物環境科学科教授・有馬進先生に感謝する。同大学専攻教授・鈴木章弘先生には副査としてご助言をいただくとともに有益なご助言をいただいた。ここに同氏に対して感謝の意を表す。本論文をまとめるにあたり、九州大学大学院農学研究院の松江勇次教授、東京農工大学大学院農学研究院国際環境農学部門の藤井義晴教授に懇切なご指導をいただいた。ここに深く感謝する。研究の遂行に際し、佐賀県農業試験研究センターの職員の各位ならびに佐賀県衛生薬業センター中山秀幸氏には格別のご協力をいただいた。また、現地実証試験の実施にあたっては、生産者ならびに農業協同組合や佐賀市役所のご担当者各位にも多大なご協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 赤木康・河野満雄・野中仙三郎ほか9名 2000. 細粒灰色低地土における稲麦わら堆肥及び資材の連用効果. 宮崎県総農試研報 35: 1-12.
- 2) 安平・芝山秀次郎・田谷省三 2002. ムギ類のわらの器官および栽培年次によるアレロパシー活性の差異. 雑草研究 47 (別): 212-213.
- 3) 安平・芝山秀次郎・田谷省三 2002. ムギ類のわらによるアレロパシーの年次的差異. 日作紀 68: 73-76.
- 4) 茶谷聡・森川多津子・中塚誠次・松永壮 2011. 3次元大気シミュレーションによる2005年度日本三大都市圏PM_{2.5}濃度に対する国内発生源・越境輸送の感度解析. 大気環境学会誌 46 (2): 101-110.
- 5) 藤井義晴 1989. 他感物質の利用による生物的防除技術の将来. 日土肥学雑誌 60 (3): 240-245.
- 6) 藤井義晴・小野信一・伊藤昌光 1993. オオムギ(*Hordeum vulgare*)のアレロパシー: プラントボックス法によるアレロパシー活性の高いハダカムギの探索. 雑草研究 32 (別): 146-147.
- 7) 藤井義晴 2000. 自然と科学技術シリーズ「アレロパシー 他感物質の作用と利用」. 農文協. 179-189, 230.
- 8) 藤井義晴 2004. アレロパシー研究の最前線. (独)農環研 平成16年度 革新的農業技術習得研修「高度先進技術研修」テキスト. <http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/inovlec2004/1-3.pdf> (2018/4/7 閲覧).
- 9) 藤井義晴・中島江理・松山稔・牧浩之 2004. ディッシュパック法による植物体から放出される揮発性他感物質の分析・同定. 雑草研究 49: 102-103.
- 10) 藤井義晴・平舘俊太郎・古林章弘・Iqbal Zhida・Nasir Habib・Golisz Anna 2007. ソバ粗抽出液に含まれる主要な植物生長阻害成分はルチン. (独)農環研試験成果情報 23: 30-31.
- 11) Golisz A., Lata B., Gawronski S. and Fujii Y. 2007. Specific and total activities of the allelochemicals identified in buckwheat. *Weed Biology and Management* 7: 164-171.
- 12) 秀島好知・有馬進・鈴木章弘・牧山繁生・森敬亮・浅川将暁・広田雄二・大塚紀夫・稲田稔 2016. 米麦二毛作体系における麦わらの処理方法が水田雑草の発生量と水稻の生育に及ぼす影響. 日作紀 85: 122-129.
- 13) Huang, H., Liu, Y., Meng, Q., Wei, S., Cui, H. and Zhang, C., 2010. Flavonolignans and other phenolic compounds from *Sorghum halepense* (L.) Pers. *Biochemical Systematics and Ecology*. 38(4):656-658.
- 14) 猪谷富雄・加藤謙司・佐々哲二郎・藤田琢也 1998. ムギ類におけるアレロパシー活性の品種間差異. 雑草研究 43: 180-181.
- 15) 石塚明子・川村富輝・佐藤大和・小田原孝治・福島裕助 2004. 筑後重粘土地域の麦わら鋤込み田における中晩生良食味水稻の基肥施用量. (福岡農総試成果情報). <http://farc.pref.fukuoka.jp/farc/seika/h16a/01-06.pdf> (2018/11/11 閲覧).
- 16) 河野真由・続栄治・寺尾寛行・三浦元康 1999. オオムギのアレロパシーに関する研究. 日作紀 68 (別号1): 136-137.
- 17) 環境省水・大気環境局 平成30年3月27日付 環水大大発第1803273号, 微小粒子状物質 (PM_{2.5}) と野焼き行為との関連について (通知). <http://www.env.go.jp/air/osen/pm/ca/300327noyaki.html> (2018/12/24 閲覧).
- 18) 北倉芳忠 2006. 耕深確保, すき込み, 碎土性に優れたロータリの開発. 農機学会誌 68 (6): 15-19.
- 19) 金忠男・小松良行・曾我義雄 1980. 麦わら鋤込み田における水稻機械移植用苗の活着・初期生育. 日作四支紀 16: 29-32.
- 20) 金忠男・曾我義雄 1981. 麦わら鋤込み時期および量が水稻生育に及ぼす影響. 日作四支紀 17: 17-21.

- 21) 金忠男・片岡孝義 1981. 稲・麦わらすき込み田における水稻の植付け深と生育との関係. 日作四支紀 18 : 9-12.
- 22) 金忠男・小松良行・片岡孝義 1981. 稲・麦わらすき込み田における水稻の植付け深と登熟との関係. 日作四支紀 18 : 13-16.
- 23) 小林由佳・伊藤操子 1994. 各種フェノール化合物の植物生育阻害活性の比較-アレロパシーの観点から-. 雑草研究 33(別), 96-97.
- 24) 近藤晃・新井文男・太刀川洋一・飯塚国夫・金井博・阿部邑美・島田忠男 1980. 麦稈すき込みによる水稻の生育阻害とその対策. 群馬農試研報 20: 1-10.
- 25) 京谷智裕・岩附正明 2000. 大気中微小粒子と粗大粒子の質量および各種元素濃度の特徴と季節変化-甲府市での事例解析-. 大気環境学会誌 35 (5): 287-300.
- 26) 松尾光弘・安平・芝山秀次郎 1999. コムギの植物体に含まれるアレロパシー物質の抽出と同定の試み. 雑草研究 44 (別): 188-189.
- 27) 松尾光弘・福澤功一・寺尾寛行・続栄治 2003. 数種フェノール性化合物がレタスおよびコナギ幼植物の生育に及ぼす影響. 雑草研究 48 (別), 194-195.
- 28) 松尾光弘・佐々木真耶・寺尾寛行・小川紹文・住吉正 2006. コムギわらにおけるアレロパシー活性の品種間差異および雑草への影響. 日作九支報 72 : 47-50.
- 29) 松尾喜義・小松良行・上村幸正 1987. 麦跡湛水直播水稻の雑草防除について : 第1報 麦わらのすき込みが雑草の発生に及ぼす影響. 雑草研究 27(別), 87-88.
- 30) 永田修・杉戸智子・小林創平・鮫島良次 2009. 小麦残渣および肥料が施与された慣行耕起・省耕起・不耕起栽培体系における亜酸化窒素の発生. 農業気象 65: 151-159.
- 31) 宮内直利 1979. 麦わら施用による水田雑草の防除. 雑草研究 18(別), 47-48.
- 32) 西田智子・黒川俊二・柴田昇平・北原徳久 1999. 畑雑草種子の生存に及ぼす加熱時間の影響. 雑草研究 44 (1), 59-66.
- 33) 西村愛子・浅井元朗・澁谷知子・黒川俊二・中村浩也 2014. 蒸気処理機を用いた耕地雑草埋土種子の死滅技術開発. 雑草研究 59(3), 167-174.
- 34) 野上弘 1983. 稲麦二毛作体系の生産性向上 1. 麦稈すき込みが水稻の生育, 収量に及ぼす影響. 日作紀 52(別1), 1-2.
- 35) 野上弘 1983. 稲麦二毛作体系の生産性向上 2. 溝切りによる麦稈すき込み跡水稻の生産安定化. 日作紀 52(別1), 3-4.
- 36) 野口勝可・江川智男 1994. 畑雑草種子の殺種子法の開発 : (3) 熱の殺種子効果. 雑草研究 33 (別), 250-251.
- 37) 布川徹・田畑哲一・重森伸康 1979. 北九州市における大気中浮遊粒子状物質の粒度分布に関する過去3年間の動向. 大気汚染学会誌 14 : 458-463.
- 38) 布川徹 1986. 大気浮遊粒子状物質中金属元素の北九州市における分布-浮遊粒子状物質の粒度との関連において-. 大気汚染学会誌 21 : 156-164.
- 39) 大隈光善・古賀巧樹・山口晃・半田浩二 2014. 麦収穫後の麦わら焼却がスズメノテッポウ種子死滅に及ぼす影響. 日本雑草学会第53回大会講演要旨 27.
- 40) 大塚一雄・小川信太郎・江本吾勝 1982. 稲麦二毛作栽培体系における麦わら処理に関する研究. 埼玉農試研報 38: 15-38.
- 41) Overland, L. 1966. The role of allelopathic substances in the "Smother crop" barley. Amer. J. Bot.

53: 423-432.

42)李春雨・米山弘一・小笠原勝・竹内安智・近内誠登 1999. イネわらに含まれるアレロパシー物質、モミラクトンA、B. 雑草研究 44: 300-301.

43)六本木和夫・秋本俊夫・鈴木清司 1987. 稲・麦わらの連用が作物生育及び水田土壌の肥沃度に及ぼす影響. 埼玉県農試研報 42: 17-60.

44)佐賀県 2018. 平成 30 年度「佐賀麦さいこう運動」推進研修大会・大豆収穫技術研修会資料. 82-83.

45)酒井綾子・田中宏樹・小西良子・花澤良・太田利子・中原徳之・関口将二・押田絵美・滝埜昌彦・一戸正勝・古川邦衛・芳澤宅實・高鳥浩介 2005. 国産玄米の真菌調査と分離された *Penicillium islandicum* の毒素産性能. 食衛誌 46 (5): 205-212.

46)酒井長雄・青木政晴・土屋学・原田良太・中沢克明・浅井元朗・西村愛子・中村浩也・高山英行・松井良共 2012. 蒸気除草機処理による地温上昇と雑草イネ種子の発芽への影響. 北陸作物学会報 47:40-43.

47)続栄治・安藤尚登・西山浩幸 1984. 高等植物のアレロパシーに関する研究 第 2 報 根からの滲出物が同種あるいは異種植物の生育に及ぼす影響. 雑草研究 21: 25-29.

48)塩田憲司・今井玄哉・高岡昌輝・木本成・松井康人・大下和徹・水野忠雄・森澤眞輔 2011. 都市ごみ焼却施設から排出される微小粒子へのダイオキシン類除去対策強化による効果. 大気環境学会誌 46 (4): 224-232.

49)Syrchina, A., Gorshkov, A., Shcherbakov, V., Zinchenko, S., Vereshchagin, A., Zaikov, K., and Semenov, A. 1992. Flavonolignans of *Salsola collina*. Chem Nat Comp. 28: 155-158.

50)竹川昌宏・大塩哲視・小松正紀 2003. 雑草種子の熱による死滅と熱水士壌消毒の抑草効果. 雑草研究 48 (別): 20-21.

51)滝埜昌彦 2004. LC/TOF-MAS を用いた精密質量測定による環境汚染物質のスクリーニング(MS 技術研究委員会シンポジウム講演資料) http://ee-net.ne.jp/ms/sympo04/doc_pdf/06-takano.pdf (2018/12/24 閲覧).

52)滝埜昌彦 2010. スタキボトリス属カビによるマイコトキシン産生. Mycotoxins 60 (1): 27-36.

53)Tanaka, F. and Nishida, M. 1996. Inhibition of nitrogen uptake by rice after wheat straw application determined by tracer $\text{NH}_4^{+}\text{-}^{15}\text{N}$. Soil Sci. Plant Nutr. 42: 587-591.

54)田中福代 2002. 水田への麦わら施用に伴う芳香族カルボン酸の生成と水稻の生育抑制機構に関する研究. 九州沖縄農研報告 40: 33-78.

55)栃木喜八郎・吉沢崇・山口正篤・橋本俊一 1980. 水稻晩植栽培における麦わら施用に伴う水稻の生育とその対応. 栃木農試研報 26: 9-16.

56)牛木純・川名義明・森田弘彦 2008. 熱水による水田雑草種子の死滅条件および熱水士壌消毒法の水稲および水田雑草の生育におよぼす影響. 雑草研究 53 (3), 48-54.

57)和田学・長峰司 1977. 麦稈処理法と水稻の出芽. 日作中国支報 15: 29-27.

58)Wenzig, E., Kunert, O., Ferreira, D., Schmid, M., Schuhly, W., Bauer, R., and Hiermann, A., 2005. Flavonolignans from *Avena sativa*. J. Nat. Prod. 68 (2):289-292.

59)Xiao, X., Huang, H., Ge, Z., Rounge, T. B., Shi, J., Xu, X., Li, R., and Chen, Y., 2014. A pair of chiral flavonolignans as novel anti-cyanobacterial allelochemicals derived from barley straw (*Hordeum vulgare*): characterization and comparison of their anti-cyanobacterial activities. Environ Microbio. 16(5): 1238-1251.

60)保田謙太郎・住吉正 2008. 筑後および佐賀地域の野菜畑における麦ワラマルチの使用実態の調査. 雑草研究 53 (4), 204-209.

- 61) 吉沢崇・茂木惣治 1981. 稲・麦わら施用水田の土壤肥料的な研究 (3). 栃木県農試研報 27 : 11-18.
- 62) 吉沢崇・茂木惣治 1981. 稲・麦わら施用水田の土壤肥料的な研究 (4). 栃木県農試研報 27 : 19-27.
- 63) 吉沢崇・中山喜一 1983. 稲・麦わら施用水田の土壤肥料的な研究 第5報 ほ場条件下に麦わら・稲わらの分解過程と有機物施用に伴う土壤の変化. 栃木県農試研報 29 : 49-60.

Summary

In the rice crop field of northern Kyushu, incineration of straw exerts "smoke damage" which interferes with the lives of the local residents, and also loses valuable organic matter used for maintaining the soil fertility. Although the rate is decreasing in recent years, straw incineration is still being practiced because many farmers believe that "the occurrence of paddy weeds can be suppressed by straw incineration". However, this may not be the true and scientific analysis of the straw handling is required from on-site leaders. Therefore, in this study, we aimed to clarify the influence of the difference between the straw plowed-in treatment and the incinerated straw treatment on the weed development and to obtain the basic knowledge for establishing proper straw treatment technology for the future in Northern Kyushu. Analysis was focused on the allelopathy shown by the straw, ① comparative confirmation of the degree of suppression of the occurrence of weeds by incineration and plowing of the straw, ② search and identification of the allelochemical in the straw showing weed control, and ③ the verification of the suppression action of the specified substance.

First, local field trials were conducted on the difference between the treatment of plowed in straw and the treatment of the incinerated straw on the occurrence of the weeds and the influence on the growth of rice plants. As a result, the effect of controlling weeds was better than that of incineration. Regarding the growth of paddy rice, although tillering was suppressed by plow-in, the rise in ripening rate increased and the trend toward increased sales was observed. This result suggested the merit of the plowed-in straw treatment, and the reproducibility was confirmed in the pot test. The straw of either barley or wheat had a strong inhibitory effect against various paddy field weeds. In addition, although the effect of suppressing weed development due to straw rushing decreased with time, the residual effect could be confirmed from the autumn of the rice harvest season to the heading phase of the next spring. In this case, sufficient weed control effect was recognized when the amount of the straw applied was the same level as that at the actual cultivation site, 20 to 40 kg / a. From this result, it was considered that the treatment method of the straw is better than the incineration method.

Next, in order to demonstrate the existence of growth inhibiting substances leaching from the straw, a germination test was performed using mustard spinach (*Brassica rapa* var. *perviridis*) as the test plant. The effect of barley straw and incinerated ash of the straw, which are considered to have strong allelopathic activity, on germination was investigated. As a result, straw immersion water showed a marked germination suppression effect compared with straw incineration ash immersion water. This time, , the conditions where soil was added to immersion water were examined to investigate the involvement of soil and soil microorganisms, but the same tendency was observed regardless of the presence or absence of soil addition. These findings suggested that the polysemic substance quickly leaches from the straw after the paddy field flooding. Therefore, attempts were made to identify phenolic substances contained in the immersion water of barley straw and its incineration ash by LC / TOF-MS. The involvement of five kinds of substances was confirmed. Among them, (\pm)-2-phenylpropionic acid was strongly suggested to be involved. In addition, as a result

of verification using mustard spinach, germination was markedly inhibited at a low concentration of 2 ppm.

This study made it possible to explain many parts of the weed control mechanism by processing wheat or barley straw and to give a new perspective on straw treatment in the double cropping system.