

コムギ湿害対策のための肥効調節型肥料の基肥時土壌表層施用ならびに速効性窒素追肥の効果

谷俊男¹⁾・林元樹²⁾・遠藤征馬¹⁾・三屋史朗³⁾・林智仁³⁾・山内章³⁾

(¹⁾ 愛知県立農業大学校, (²⁾ 愛知県農林水産部園芸農産課, (³⁾ 名古屋大学大学院生命農学研究科)

要旨：我が国では、コムギは主として水田転換畑で栽培されるので、湿害が大きな問題となっている。本研究では、過湿条件下で根系機能が抑制され、養水分吸収量が低下することが湿害の主な原因と考え、これを軽減するための施肥法として、基肥としての肥効調節型肥料の土壌表層への施用と速効性肥料を用いた追肥の効果、窒素吸収量を指標にして評価した。4年間にわたり、農林61号をポットで栽培し、一時的な湛水によって湿害を発生させ、その水位と処理時期によって強度を調節した。その結果、表層3 cmに局所施肥した場合に、全層や深層に施肥した場合より、窒素吸収量が増え、その効果には、湿害強度による差は認められなかった。また追肥に関しては、湛水処理期間中であっても、湛水処理が終了後の湿害の症状がはっきり出たあとの追肥でも、生育回復が可能であった。またこのような追肥によって、湿害の程度には関係なく、通常の適湿条件と同等なレベルまで窒素吸収量を増加させ、生育を回復させることができた。このとき、植物体は追肥された窒素を表層に発達した根系で吸収しただけでなく、湿害によって低下していた根系の吸収機能が追肥によって回復し、肥効調節型肥料から溶出した窒素を再び吸収したと推察される場合も認められた。以上より、肥効調節型肥料の基肥としての表層施用と速効性窒素追肥は、過湿条件下においても比較的高い機能を維持できる表層の根系を利用した湿害軽減また生育回復のための施肥法であると結論した。

キーワード：コムギ、湿害、施肥位置、窒素吸収、追肥、肥効調節型肥料。

コムギは半乾燥地域（年間の降水量が600～700 mmの地域）での栽培が最適であり、湿害に弱い作物である（Belfordら1985, Setterら2009）。また、我が国においても、土壌過湿に伴うコムギの湿害が大きな問題となっている（Oyanagi 1994, 小柳2010）。また、北海道などの一部の地域を除き、水田転換畑での栽培が主流となっていることも湿害の原因の1つとなっており、その被害は、作付面積の約27%（約57000 ha）に及ぶ（小柳2010）。

これまでに、湿害を受ける生育時期によって影響を受ける形質が異なることが明らかになっており（吉田1977a, b）、播種時の湿害は発芽率（Boyer 1982, 小柳2008）に、栄養成長期の湿害は分げつ数や葉色（SPAD値）に（Sharma and Swarup 1988, Musgrave and Ding 1998）、生殖成長期の湿害は整粒比率（Hossainら2011）に影響を及ぼすことが報告されている。そこで本研究では、愛知県での湿害が最も深刻である茎立期、あるいはそれ以降（吉田ら2006, 谷ら2007, 2009）に焦点を当てた。

湿害対策に関しては、これまでに、圃場準備時に明渠や暗渠を設置したり、傾斜化水田（谷ら2005a）や地下水位を調節できる地下水位制御システム「FOEAS」（若杉・藤森2009, 島田ら2010）の導入などが提案されてきている。しかし、これらの施設は膨大な労力と資金を要するため、導入できる生産者圃場は限られている。

一方で、耐湿性に関わる形質として、小柳ら（2004）は、過湿条件下での根の伸長角度が重要であり、土壌の表層は下層よりも土壌中の酸素濃度が高いことから、根の伸長角

度が小さい品種（すなわち、根系の浅い品種）は、根の伸長角度が大きい品種（根系の深い品種）よりも、耐湿性が大きい傾向にあることを報告した。林ら（2008）は、耐湿性の大きい品種は小さい品種に比べて、過湿条件下での旺盛な根系発達を維持する能力を有していたことを明らかにした。しかし、これらの形質同定や品種間比較研究の成果が、有用な耐湿性品種育成には現在のところ結びついていない。

一方、湿害発生のメカニズムに関して、Hayashiら（2013）は、耐湿性の小さいコムギ品種は湿害によって根系発達（根の伸長・分枝）が強く抑制されること、小柳ら（2004）は、コムギは過湿条件下では根系が浅くなる傾向を示すことをそれぞれ明らかにしている。以上の結果から、著者らは、湿害の主因のひとつは根系発達・機能の抑制による養分吸収量の低下であり、コムギは窒素を多く必要とする作物であるため、窒素施肥によって湿害は軽減しうると考えた。具体的には、根系に近い位置に施肥をすると窒素利用効率が高くなることが知られている（Randall and Hoeft 1988, Shoji and Gandeza 1992）ので、表層へ窒素を施用（局所施肥）することで、湿害による養分吸収量の低下を軽減できると考えた。また、一般に窒素肥料を追肥するとSPAD値が増加し（Malikら2002）、収量も増加することがよく知られている（江口1983）。そこで、湿害によって窒素吸収量が低下し生育が抑制されることを軽減する湿害軽減と、湿害によって抑制された生育を回復させるための湿害回復の2つに効果のある施肥法を検討することとした。換言すれば、

第1表 湿害軽減のための基肥施肥位置実験の概要.

湛水处理	基肥施肥位置	供試肥料	播種日	サンプリング日	反復数
標準 対照 (湛水無)	表層 全層	ブレンド	2006 年 12 月 2 日	3 月 13 日	3
強 対照 (湛水無)	表層 深層	リニア	2008 年 1 月 8 日	5 月 2 日	3
弱 対照 (湛水無)	表層 深層	シグモイド	2009 年 1 月 9 日	4 月 17 日	4

湛水处理程度は湛水深と湛水期間で以下のように定義.

標準: 土壌表面より下 3 cm まで湛水. 処理時期は 2 月 21 日~3 月 19 日 (27 日間).

強: 土壌表面より下 3 cm まで湛水. 処理時期は 4 月 7 日~16 日 (10 日間).

弱: 土壌表面より下 7 cm まで湛水. 処理時期は 3 月 23 日~4 月 3 日 (12 日間).

湛水開始の生育ステージは茎立期の前後.

基肥施肥位置の表層区は表層 3 cm, 全層区は作土部分 10 cm に混和, 深層区は地下 10 cm に施用.

ブレンドは速効性 7 g m^{-2} ・リニア型 30 日タイプ 3 g m^{-2} ・シグモイド型 30 日タイプ 3 g m^{-2} の混合肥料.

リニアは肥効調節型肥料リニア型 30 日タイプを 3 g m^{-2} 基肥として施用し, 硫安を 2008 年 3 月 4, 18 日に各 1 g m^{-2} 施用.

シグモイドは肥効調節型肥料シグモイド型 30 日タイプを 10 g m^{-2} 基肥として施用.

本研究では, コムギの湿害対策として, 臨床的な対応, すなわち, 基肥によって湿害の発症を予防し, また, 発症した場合には追肥によって湿害からの回復を助長するような治療を可能にする, 効果的な施肥法の開発を目指した.

湿害軽減のために基肥として使用する肥料には, 持続的に窒素を供給でき, さらに, 土壌への流亡が少なく植物体への吸収率の高い肥効調節型肥料が適すると考えた. 肥効調節型肥料は, 水稻作の全量基肥肥料の成分として, すでに広く普及しており, コムギについても, 追肥作業の省力化, タンパク質含量の適正化に向け, 全国各地域でその利用技術が研究されている (土屋ら 2007, 田中ら 2008). しかし, 過湿条件下において肥効調節型肥料の効果が認められない事例が現地の転換畑栽培では多くみられ, この原因のひとつに湿害があると考えられる.

そこで本研究では, 基肥として肥効調節型肥料を表層に施用することで, 過湿条件下でのコムギの窒素吸収量を畑条件下と同等に維持し, 湿害による生育抑制を軽減できるかを明らかにしようとした. 具体的には, 施肥位置については, 土壌表層に施用する表層施肥と, 作土全体に施用する全層施肥, さらに, 作土の深い位置に施肥する深層施肥の効果とを比較した.

一方, 窒素追肥は収量増加に効果があるが, 追肥の時期により倒伏を発生させる危険性がある (江口 1983) ため, これまで生産者は湿害時の追肥に慎重であった. しかし, 近年では耐倒伏性品種が導入されており (吉田ら 2005, 2011), 追肥を制限する要因は減ってきている. そこで本研究では, 湿害が発生した場合には, 速効性窒素を追肥することによってコムギの生育を回復させられるかについて, 施用の時期も含めて検討した.

さらに, これらの基肥施用による軽減効果, ならびに追肥による回復効果が, 湿害強度に影響されるかについて,

湛水处理時期や地下水位を変えることで湿害強度を変化させて検討した.

材料と方法

1. 実験処理の概要

2007 年から 2010 年の 4 年間に, 愛知県農業総合試験場内 ($35^{\circ}16' \text{ N}$, $137^{\circ}07' \text{ E}$) にて, 第 1 表および第 2 表のとおりポット実験を行った.

(1) 基肥の施用位置による湿害軽減効果 (施肥位置実験, 第 1 表)

湿害軽減に及ぼす施用位置の影響を調べるために, 施用位置や湛水处理の条件を変え, 3 回の実験を行った. 肥料には, 肥効調節型肥料を用いた.

まず, 湛水处理としては, 一定期間湛水处理をする湛水处理区と, まったく湛水处理をしない対照区 (湛水無区) の 2 種類を設けた. 対照区では, 土壌水分を圃場要水量に維持するため, ポットにゴム栓をせず, 5 cm に湛水した大型プールで管理した. 湛水处理区では大型のプールにポットを沈め, 以下に述べる条件で湛水した. なお, 湛水处理は下位葉の枯死が確認されるまでとした.

湛水处理による生育への影響の大きさを湿害強度とし, 表層施肥の効果との関係を検討した. このため, 3 年間に繰り返した実験間に, 湿害強度に差を設けることを意図し, 湛水处理程度を標準, 強, 弱に設定し実験を行った. 湛水处理程度標準条件は, 土壌表面から 3 cm 下に水位を維持し, 気温が比較的高くない時期 (2007 年 2 月 21 日から 3 月 19 日までの 27 日間) に湛水处理を行った. 湛水处理程度強条件は, 土壌表面から 3 cm 下に水位を維持した上で, 気温が相対的に高い時期 (2008 年 4 月 7 日から 16 日までの 10 日間), また, 弱条件では, 土壌表面から 7 cm 下に水位を維持し, それよりは気温の低い期間 (2009 年 3 月 23 日

第2表 湿害回復のための追肥実験の概要.

実験目的	湛水处理	追肥		供試肥料	播種日	サンプリング日	反復数
		有無	施用日				
追肥 時期	標準	有	3月13日	ブレンド	2006年 12月2日	4月23日	3
		無	3月20日				
追肥 効果	標準	有	4月3日	速効性	2010年 2月12日	5月10日	3
	対照(湛水無)	無					
	強	有	4月16日	リニア	2008年 1月8日	5月2日	3
	対照(湛水無)	無					

追肥時期の実験において、湛水处理の項目にある標準、および追肥効果実験において、湛水处理の項目にある強の定義は、それぞれ第1表の標準と強と同じ。

追肥効果実験において、湛水处理の項目にある標準の定義は、土壌表面より下3 cm まで湛水。処理時期は3月13日～30日(18日間)。

湛水開始の生育ステージは茎立期の前後。

速効性は、速効性肥料の硫酸を 6 g m^{-2} または 10 g m^{-2} を施用。

追肥処理実験での追肥は硫酸を窒素成分で 2 g m^{-2} を施用。

から4月3日までの12日間)に湛水处理を行った。なお、湛水处理開始時のコムギの生育時期は、湛水处理程度が標準条件の実験(2007年2月21日)で5.4葉期の茎立期直前、湛水处理程度が強条件の実験(2008年4月7日)で6.4葉期の茎立期後、弱条件の実験(2009年3月23日)で6葉期の茎立期であった。

以上のような湛水条件下で実施した、肥効調節型肥料を基肥として用いた施肥位置実験の概要について第1表に示した。なお、表の脚注に示した施肥量は窒素成分で表示した。湛水程度標準実験の供試肥料としては、全量基肥肥料として市販されているものを基準としたブレンド肥料(武井・池田2004)を用いた。この肥料は、速効性窒素の硫酸アンモニウム(以下、硫酸)と肥効調節型肥料リニア型30日タイプとシグモイド型30日タイプを7:3:3に混合したもので、基肥として 13 g m^{-2} を施用した。基肥施肥位置の処理区としては、表層3 cm にのみ施用した表層区と、全層に均等に施用した全層区を設定した。湛水程度強条件の実験では、肥効調節型肥料リニア型30日タイプを基肥として 3 g m^{-2} 施用し(以下、リニア)、湛水处理までの生育を確保するために、2008年3月4日と3月18日に硫酸で窒素成分 1 g m^{-2} を追肥した。湛水程度弱条件の実験では、肥効調節型肥料シグモイド型30日タイプを基肥として 10 g m^{-2} 施用した(以下、シグモイド)。湛水程度強条件および弱条件の実験における施肥位置の処理区としては、表層3 cm に施用した表層区と、地下10 cm に施用した深層区を設定した。

湛水程度標準および強条件の実験では3反復、弱条件の実験では4反復の完全無作為法とした。

(2) 追肥による湿害回復効果(追肥実験, 第2表)

湿害発生条件下での追肥による生育への効果を検討するために、3回の実験を行った。まず、湛水期間中に追肥をしなければ効果がないのか、あるいは、湿害の症状が明ら

かとなった湛水处理後に追肥しても効果があるのか、すなわち、追肥の適切な時期を明らかにするため、上述の基肥の施用位置効果を評価する、湛水程度標準条件実験において、異なる追肥時期の処理区をさらに加えた(第2表)。下位葉の葉色が淡くなり湿害症状が確認された湛水处理中の2007年3月13日に追肥した追肥区と湿害処理後の3月20日に追肥した追肥区を設け、追肥無区と比べ、追肥時期による効果について検討した。追肥には速効性肥料として硫酸を用い、 2 g m^{-2} を水に溶いて施用した。

次に、追肥時期実験の結果を受け、湛水处理が終わった後に追肥をした区を、湛水处理を行わずに追肥を行った対照区と比較した追肥実験を2回行った(第2表)。1回目は、上述の基肥の施用位置効果を評価する、湛水程度強条件実験において、2008年4月16日に追肥した。もう1回は、肥効調節型肥料の代わりに硫酸を 6 g m^{-2} と 10 g m^{-2} の割合で基肥として施用した区を設けた。湛水程度は標準とし、土壌表面から3 cm 下に水位を維持し、5.3葉期(茎立期直前)の2010年3月13日から30日までの18日間湛水处理を行った。基肥 6 g m^{-2} 区には湛水处理終了後の2010年4月3日に硫酸 2 g m^{-2} を追肥し、追肥無区の基肥量 6 g m^{-2} 区ならびに 10 g m^{-2} 区と比較した。なお、追肥実験はすべて3反復の完全無作為法で行った。

2. 栽培方法

ポットを用いて栽培した。供試したポットは、施肥位置試験のうちの湛水程度標準条件実験では1/2000a ワグネルポット、それ以外は1/5000a ワグネルポット深型(深さ30 cm)を用いた。各ポットにポット上部より1 cm 下まで黒ボク土を充填した。コムギ品種としては耐湿性が標準的であり(吉田ら2006, Hayashiら2013)、我が国で最も広く栽培されている農林61号を供試した。土壌表面を耕起した後、各ポットに3粒播種した。そして、出芽後間引きを

第3表 施肥位置がコムギの SPAD 値、窒素吸収量、乾物重に及ぼす影響（施肥位置実験）。

供試肥料	湛水处理	施肥位置	SPAD 値	窒素吸収量 (g m ⁻²)	乾物重 (g m ⁻²)
ブレンド 肥料	標準	表層	46.0*	4.0*	125 ^{ns}
		全層	42.8	3.4	132
	対照 (湛水無)	表層	47.8 ^{ns}	4.5 ^{ns}	110 ^{ns}
		全層	47.2	4.5	97
リニア 肥料	強	表層	36.4*	3.6*	193 ^{ns}
		深層	33.9	3.4	190
	対照 (湛水無)	表層	46.6 ^{ns}	6.4 ^{ns}	448 ^{ns}
		深層	45.9	6.9	483
シグモイド 肥料	弱	表層	40.0 ^{ns}	6.2**	321*
		深層	39.2	5.5	279
	対照 (湛水無)	表層	41.1*	4.3*	216 ^{ns}
		深層	44.4	6.1	207

SPAD 値の調査は湛水处理終了直後に実施。

窒素吸収量および乾物重の調査は、ブレンド肥料を用いた湿害程度標準では湛水处理後半、リニア肥料を用いた強では湛水处理終了 16 日後、シグモイド肥料を用いた弱では 14 日後に実施。

**は 1%水準で、*は 5%水準で施肥位置の間に統計的に有意な差があることを示す(t検定)。

実験の概要は第 1 表のとおり。

し、1 ポットあたり 2 個体とした。播種は、湛水程度標準実験では 2006 年 12 月 2 日、湛水程度強実験では 2008 年 1 月 8 日、湛水程度弱実験では 2009 年 1 月 9 日、基肥に速効性肥料を用いた場合の追肥実験は 2010 年 2 月 12 日にそれぞれ行った。

3. 生育調査

すべての実験を通じて、草丈または稈長、茎数または穂数、SPAD 値、地上部乾物重および全窒素吸収量を測定した。測定は湛水处理開始前、湛水处理終了後および出穂期の計 3 回行った。追肥の効果を調べた実験で、湛水程度が標準で基肥に速効性肥料を用いた実験（第 2 表）において、成熟期に精麦重、千粒重、地上部乾物重を測定した。SPAD 値の測定には葉緑素計（SPAD502、コニカミノルタ製）を使用し、最上位展開葉から 2 葉目（出穂期では止葉）の表面・中央部分を測定した。地上部乾物重の測定では、地上部を地際で採取し、乾燥機内（105℃・24 時間）で乾燥させたものを使用した。その後、粉碎処理をし、NC アナライザー（住化分析センター SUMIGRAPH NC-800）と炭素窒素分析計（JM1000CN 株式会社ジェイ・サイエンス・ラボ、京都）を用いて全窒素含有率を測定した。

なお、統計処理はエクセル統計 2012 通常版（株式会社社会情報サービス（SSRI））で行った。

結 果

1. 基肥の施用位置の影響

施肥位置実験の結果を第 3 表に示した。各湛水处理程度の湛水处理のある場合とない場合のそれぞれにおいて、表

層区と、全層区または深層区との間で比較した。その結果、ブレンド肥料を用いた湛水程度標準実験の湛水处理区では、表層区の SPAD 値および窒素吸収量の値が全層区に比べ有意に高かった。リニア肥料を用いた湛水程度強実験の湛水处理区でも同様に、表層区の SPAD 値および窒素吸収量の値が深層区に比べ有意に高かった。また、シグモイド肥料を用いた湛水程度弱実験の湛水处理区では、表層区は深層区に比べ SPAD 値には有意な差はみられなかったが、窒素吸収量は有意に高かった。また、乾物重については、湛水程度弱実験においてのみ表層区が深層区に比べ有意に高かった。

一方、対照とした湛水無区については、湿害程度のいずれの場合においても、SPAD 値、窒素吸収量および乾物重の表層区の値が全層区または深層区の値に比べ同等または有意に低かった。

2. 湛水条件下における窒素追肥の影響

追肥時期実験においては、湛水处理中に追肥した場合と、湛水处理終了後に追肥した場合の追肥効果を比較し、その結果を第 4 表に示した。追肥区の SPAD 値は、処理中、処理後の追肥時期にかかわらず追肥無区に比べ有意に高かった。窒素吸収量は、追肥無区に比べて処理中の追肥区で多い傾向がみられ、処理後の追肥区では有意に多かった。乾物重については追肥の有無および時期による差異は認められなかった。

次に、湛水处理区と対照区（湛水無区）で比較した追肥実験を、速効性肥料を用いた湛水程度標準とリニア肥料を用いた湛水程度強の条件下でそれぞれ 1 回ずつ行い、追肥

第4表 湛水处理における速効性窒素肥料の追肥時期がコムギの SPAD 値、窒素吸収量、乾物重に及ぼす影響 (追肥時期実験).

追肥	追肥時期	SPAD 値	窒素吸収量 (g m^{-2})	乾物重 (g m^{-2})
有	湛水处理中	35.1 a	8.1 ab	759 a
有	湛水处理後	35.0 a	8.5 a	821 a
無	—	31.4 b	6.3 b	782 a

追肥は湛水处理中が3月13日、湛水处理後が3月20日に窒素成分で 2 g m^{-2} を施用。
異なるアルファベット間に5%水準で有意差がある (Tukey の多重比較).

第5表 窒素追肥がコムギの SPAD 値、窒素吸収量、乾物重に及ぼす影響 (追肥効果実験).

供試肥料	湛水处理	追肥	SPAD 値	窒素吸収量 (g m^{-2})	乾物重 (g m^{-2})
速効性 肥料	標準	有	27.1 *	4.4 **	605 **
		無	24.4	3.5	480
	対照 (湛水無)	有	31.9 **	5.1 **	730 **
		無	29.0	3.7	566
リニア 肥料	強	有	39.5 *	4.8 *	228 ^{ns}
		無	37.3	3.4	173
	対照 (湛水無)	有	38.7 ^{ns}	7.2 ^{ns}	534 *
		無	36.8	6.9	471

追肥として、速効性肥料を用いた湛水处理標準実験では2010年4月3日、リニア肥料を用いた湛水处理強実験では2008年4月16日に硫酸により窒素成分で 2 g m^{-2} を施用。

調査日は、湛水处理標準実験では2010年5月10日、湛水处理強実験では2008年5月2日。

** は1%水準で、* は5%水準で追肥の有無の間に統計的に有意な差があることを、また、^{ns} はないことを示す (t検定)。

実験の概要は第2表のとおり。

区と追肥無区との間で比較した (第5表)。速効性肥料を用いた湛水程度標準実験の湛水处理区では、追肥区の SPAD 値、窒素吸収量および乾物重は追肥無区に比べて有意に増加した。その対照区でも同様であった。シグモイド肥料を用いた湛水程度強実験の湛水处理区では、追肥区の SPAD 値、窒素吸収量は追肥無区に比べ有意に増加し、乾物重は有意ではなかったが増加する傾向を示した。その対照区では、追肥区の SPAD 値および窒素吸収量は追肥無区に比べ有意ではなかったが増加する傾向を示し、乾物重は有意に増加した。

基肥に速効性肥料を施用した湛水程度標準条件の追肥実験について収量調査をした結果を第6表に示した。湛水处理区の基肥 6 g m^{-2} 追肥区の収量は追肥無区に比べ有意に多く、湛水处理区の基肥 10 g m^{-2} をも上回る傾向を示した。また、その収量は、湛水無区の追肥区とほぼ同等であった。なお、穂数、千粒重には有意な差は認められなかった。

考 察

1. 施肥法によるコムギの湿害軽減効果 (肥効調節型肥料の表層施肥効果)

本研究の結果から、過湿条件下においては、表層への局所施肥は、全層施肥または深層施肥に比べ窒素吸収量を増

第6表 コムギの窒素追肥が収量 (精麦重) ならびに収量構成要素に及ぼす影響 (追肥効果実験).

湛水处理	基肥 (g m^{-2})	追肥 処理	精麦重 (g m^{-2})	穂数 (本 m^{-2})	千粒重 (g)
標準	6	無	218 c	317 a	28.3 a
	6	有	323 ab	383 a	29.0 a
	10	無	286 bc	400 a	29.4 a
対照 (湛水無)	6	無	285 bc	317 a	30.9 a
	6	有	331 ab	417 a	30.3 a
	10	無	392 a	417 a	30.3 a

基肥は速効性肥料を用い、窒素成分量で表示。

追肥として、2010年4月3日に窒素成分で 2 g m^{-2} を施用。

異なるアルファベット間に5%水準で有意差がある (Tukey の多重比較)。

加させ、湿害が無い条件下と同等に近い生育を維持する効果を発揮することが明らかとなった (第3表)。

施肥位置試験では表層施肥が有効であるか否かを検証するため、異なる湛水条件で、湛水程度に差を設けた実験を行った。その結果、窒素吸収量については、標準、強および弱のすべての湛水程度の湛水处理区で、表層区が全層区または深層区に比べ有意に高い値を示した。すなわち、湛水条件下においては、表層施肥が全層または深層施肥に比

べ SPAD 値および窒素吸収量の増加に貢献したことが示された。一方、乾物重については、表層施肥が全層または深層施肥に比べ有意に高い値を示したのは、シグモイド肥料を用いた湛水程度弱実験の湛水处理区のみであり、窒素吸収量の増加が必ずしも調査時点における乾物重の増加に貢献していなかった。しかし、乾物重の増加については窒素が植物体内で増加したのちに現れるものであり、窒素吸収量の増加は、その後の乾物重の増加に反映するものと考えられる。

また、いずれの湛水程度においても表層施肥の優位性が示されたことから、表層施肥の効果は湿害強度にかかわらず発揮されたか否かを検証するため、湿害強度を定量化した。すなわち、湿害強度を対照区に対する湛水处理区の窒素吸収量の割合で表し、85%以上を「弱」、65%以上 85%未満を「中」、65%未満を「強」と区分した。この湿害強度の算出に施肥位置実験の対照区である全層区または深層区の値を用いると、湛水程度標準条件は 75%で「中」、強条件は 53%で「強」、弱条件は 90%で「弱」と湿害強度を評価することができる。湛水程度強条件では湿害程度「強」と判定され、窒素吸収量が半減する激しい湿害条件であったが、表層区の窒素吸収量、乾物重は深層区を上回った。この結果は根系機能が著しく低下した場合でも表層の根系は吸収機能を維持しており、表層施肥が生育維持に有効であったことを示している。また、湛水程度弱条件では湿害強度が 90%で「弱」と判定されたが、この条件下においても、処理終了直後の窒素吸収量は表層区の方が深層区に比べ有意に多くなった。これらのことから、湿害強度にかかわらず、表層施肥は湿害による窒素吸収や成長の抑制を軽減する効果を発揮することが示された。

施肥位置実験の結果から、表層に施用された肥効調節型肥料は過湿条件下においても吸収されることは明らかである。機能が低下した根系に施肥をすると、さらに機能が低下するとの報告があるが（池田ら 1957）、本実験では、施肥による生育に対する抑制効果は見られなかった。このことは、本研究で用いた肥料が、池田らが用いた速効性肥料の硫酸（1957）ではなく、肥効調節型肥料であったので障害が現れなかったのか、もしくは、他の要因によるものなのか、今後検討する必要がある。

局所施肥は全層施肥に比べ、同じ量を施用しても、植物体による窒素吸収量が高くなることが報告されており（Randall and Hoeft 1988, Shoji and Gandeza 1992）、このことが過湿条件下においても当てはまることが本研究によっても示唆された。一方で、局所施肥の中でも深層施肥は水稻やダイズで有効な施肥法との報告はあるが（李・太田 1971, 高橋 2001, 小松・高橋 2012）、これは、植物体が健全な生育をしていることを前提にしている。小柳（2010）が指摘したように、日本の水田転換畑でのコムギ栽培では湿害が問題であり、深層の根系の吸収機能が低下する湿害条件では、肥効調節型肥料は表層に施肥するのが有効であ

ると考えられる。また、シグモイド肥料を用いた湛水程度弱実験の対照区では、表層区の窒素吸収量が深層区のそれに比べ有意に低かったように（第 3 表）、肥効調節型肥料を表層施用した場合、水分不足の影響により溶出が抑えられる問題がある。しかし、湿害の発生する水田転換畑であれば、常に高い土壌水分が維持されており表層施肥であっても肥効調節型肥料の溶出に支障はないと考えられ、表層施肥が実用的であると言える。

根系の発達状態により適切な施肥位置は異なることに關しては、著者らは、不耕起栽培において硬い土壌により根系発達が制限される条件下では播種条への局所施肥が有効であることをすでに報告している（濱田ら 2008）。同様に、過湿条件下においても、根系機能が制限されているため、比較的吸収機能が低下していない表層の根系機能を利用し施肥することが有効であると結論できる。

2. 追肥によるコムギの湿害回復効果（速効性窒素肥料の追肥効果）

湿害時の速効性窒素追肥の効果を評価するため、窒素成分 2 g m^{-2} を施用し、その後の生育および窒素吸収量を調べた結果、追肥した窒素肥料は吸収され生育の回復に寄与していたことが明らかとなった（第 4 表、第 5 表）。

追肥時期実験においては、追肥時期を湿害処理中と処理後に行った結果、両処理とも、SPAD 値ならびに窒素吸収量が増加し、湿害を受けた根系であっても追肥した窒素を吸収したことが確認できた（第 4 表）。追肥時期は湿害処理後のコムギの湿害症状である下位葉の枯死を確認してからでも効果があることから、追肥を治療的に行うことが可能であることが明らかとなった。

速効性肥料を用いた湛水程度標準およびリニア型肥料を用いた湛水程度強の追肥実験では、湛水处理区と湛水無区における追肥効果を評価した。その結果、SPAD 値、窒素吸収量、乾物重は、追肥により明らかに高まった（第 5 表）。また、湛水程度標準実験では、追肥区は追肥無区に比べすべての値が有意に高まり、このとき対照区とした湛水处理を行わなかった区でも、同様に追肥によって有意に増加した。また、湛水程度強実験でも SPAD 値および窒素吸収量が追肥によって有意に増加した。すなわち、過湿条件下における追肥は停滞した生育を回復させる効果があることが明らかとなった。

追肥時期実験での追肥効果は極めて大きく、湛水处理終了後に追肥した場合の窒素吸収量は追肥無区に比べ 2 g m^{-2} 以上増加しており、その増加量は追肥した窒素成分量より多かった（第 4 表）。このことは、表層の根系が吸収した窒素は、地上部の生育の改善と併せて、根系機能の回復に寄与していることを強く示唆する。すなわち、この機能が回復した根系により、肥効調節型肥料から溶出した窒素も含め、土壌中の窒素が吸収されたため、窒素吸収量が多くなったと推察できる。

湛水程度標準条件の追肥実験では、肥効調節型肥料を用いず、基肥量として窒素成分で 6 g m^{-2} と 10 g m^{-2} を施用した区を設け、前者の基肥 6 g m^{-2} 区へのみ 2 g m^{-2} を追肥した。その結果、基肥 6 g m^{-2} に追肥した場合の収量は、湿害処理区間で比べると基肥 10 g m^{-2} 区を上回る傾向を示した(第6表)。茎立期の追肥が増収に効果であることは知られており(江口 1983)、過湿条件下においても、湿害発生以前に 4 g m^{-2} を施用するより、湿害発生後に 2 g m^{-2} を追肥する方が湿害からの回復に対して効果が大きいことが、本研究の結果から明らかとなった。また、追肥を行うことで、基肥 6 g m^{-2} 区の中では、湿害処理区と無処理区の収量がほぼ同等となり、湿害に対する追肥の効果は大きく、その施肥量は 2 g m^{-2} で十分に効果があると推察される。

3. 結論

最近、コムギの生産現場では、全量基肥もしくは肥効調節型肥料を多施用し、2月から3月に追肥を行う栽培法が導入されており、高品質多収を実現しつつある。これは本研究から得られた湿害に有効な施肥法と類似している。生産現場では肥効調節型肥料を用いた表層施肥は現状では行われていないが、多肥により土壌表層に必要量の養分が確保され、その結果、意図的ではないが湿害が軽減されている可能性がある。適切な施肥量については本研究では直接検討しなかったが、シグモイド肥料を用いた湛水程度弱実験では、多量(窒素成分で 10 g m^{-2})に施肥することで、高い窒素吸収量(5.7 g m^{-2})が示されており(第3表)、また、追肥により根系機能が回復し、土壌中に存在する既に溶出した肥効調節型肥料を吸収できる可能性も示されたことから(第4表)、肥効調節型肥料を用いた多肥栽培は湿害対策として有効であると言える。

また、本研究と同様の施肥体系である肥効調節型肥料の局所施肥および追肥を行う不耕起V溝直播機によるコムギ不耕起栽培(谷ら 2005b)では、品質が高く多収になることが報告されているが、この主要因として、湿害軽減が考えられる。

小柳ら(2004)が報告したように、湿害対策で重要な点は土壌表層で発達する根系の機能を活用することであり、本研究ではその考えに基づいた施肥法を提案した。すなわち、本研究によって提案する施肥法は、表層に点滴のような振る舞いをする肥効調節型肥料を用いて、持続的に窒素を供給して湿害の症状を軽減する予防効果を期待する施肥とともに、湿害発生後には速効性窒素肥料を用いた追肥により、刺激的な窒素供給を根系が比較的高い吸収機能を維持している表層に行うことで、湿害からの回復を図る治療的效果を期待する施肥法を組み合わせた湿害対策として極めて有効な栽培法である。

引用文献

- Belford, R.K., Cannell, R.Q. and Thomson, R.J. 1985. Effects of single and multiple waterlogging on the growth and yield of winter wheat on a clay soil. *J. Sci. Food Agr.* 36: 142-156.
- Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Sci.* 218: 443-448.
- 江口久夫 1983. 小麦の多収・良質化のための窒素施肥法. *農園* 58: 60-64.
- 濱田千裕・Graeme, D.B.・Judith, M.D.・谷俊男・井澤敏彦・釋一郎 2008. 水稲の不耕起V溝直播栽培の収量性評価－オーストラリア及び日本における収量性の比較－. *日作紀* 77: 22-32.
- 林智仁・吉田朋史・藤井潔・辻孝子・山内章 2008. 過湿条件下におけるコムギの根系機能と光合成速度ならびに収量との関係. *日作紀* 77(別2): 254-255.
- Hayashi, T., Yoshida, T., Fujii, K., Tsuji, T., Okada, Y., Hayashi, E. and Yamauchi, A. 2013. Maintained root length density contributes to the waterlogging tolerance in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res.* 152: 27-35.
- Hossain, M.A., Araki, H. and Takahashi, T. 2011. Poor grain filling induced by waterlogging is similar to that in abnormal early ripening in wheat in Western Japan. *Field Crops Res.* 123: 100-108.
- 池田利良・東駿次・河出武夫 1957. 湿害を受けた麦に対する尿素葉面噴霧の効果. *東海近畿報告* 4: 38-48.
- 小松謙一・高橋能彦 2013. 深層施肥に対する水稲の施肥反応と生育・収量. *土肥誌要旨集* 59: 266.
- 李鐘薫・太田保夫 1971. 水稲の地上部の形質によらず根の役割に関する研究－第5報 施肥位置および施肥量のちがいが根と地上部諸形質によらず影響－. *日作紀* 44: 217-222.
- Malik, A.I., Colmer, T.D., Lambers, H., Setter, T.L. and Schortemeyer, M. 2002. Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat. *New Phytol.* 153: 225-236.
- Musgrave, M.E. and Ding, N. 1998. Evaluating wheat cultivars for waterlogging tolerance. *Crop Sci.* 38: 90-97.
- Oyanagi, A. 1994. Gravitropic response growth angle and vertical distribution of roots of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Soil* 165: 323-326.
- 小柳敦史・乙部千雅子・柳澤貴司・三浦重典・小林浩幸・村中聡 2004. 根系の深さの異なるコムギ実験系統群の過湿な水田圃場における生育と収量. *日作紀* 73: 300-308.
- 小柳敦史 2008. 茨城県稲敷市の大区画水田でみられた 2007 年産コムギにおける圃場内の生育ムラと土壌の凹凸及び土壌水分との関係－湿害の発生様相－. *日作紀* 77: 511-515.
- 小柳敦史 2010. 小麦の湿害被害の実態と耐湿性研究の現状. *米麦改良* 5: 6-12.
- Randall, G.W. and Hoefft, R.G. 1988. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizer. A review. *J. Prod. Agric.* 1: 70-79.
- Setter, T.L., Waters, I., Sharma, S.K., Singh, K.N., Kulshreshtha, N., Yaduvanshi, N.P.S., Ram, P.C., Singh, B.N., Rane, J., McDonald, G., Khabaz-Saberi, H., Biddulph, T.B., Wilson, R., Barclay, I., Mclean, R. and Cakir, M. 2009. Review of wheat improvement for waterlogging tolerance in Australia and India: the importance of anaerobiosis and element toxicities associated with different soils. *Ann. Bot.* 103: 221-235.
- Sharma, D.P. and Swarup, A. 1988. Effects of short-term flooding on growth, yield and mineral composition of wheat on sodic soil under field conditions. *Plant Soil* 107: 137-143.
- 島田信二・渡邊好昭・浜口秀生・藤森新作 2010. コムギに対する地

- 下水位制御システム (FOEAS) の効果. 日作紀 79(別 2): 302-303.
- Shoji, S. and Gandeza, A.T. 1992. Merit of polyolefin-coated fertilizers. controlled released fertilizers with polyolefin resin coating. Konno printing Co.Ltd., Sendai, Japan. 87-91.
- 高橋能彦 2001. 水田転作大豆に対する被服尿素の深層施肥技術の開発. 土肥誌 72: 323-326.
- 武井真理・池田彰弘 2004. コムギのタンパク質含量適正化のための全量基肥施用技術. 愛知農総試研報 36: 1-6.
- 田中浩平・宮崎真行・内川修 2008. 肥効調節型肥料を利用したコムギの省力追肥法. 日作九支報 74: 36-38.
- 谷俊男・釋一郎・濱田千裕・落合幾美・鈴木博之・宮本晃・横井善久 2005a. 傾斜水田における稲・麦・大豆の不耕起輪作技術. 愛知農総試研報 37: 5-10.
- 谷俊男・林元樹・落合幾美 2005b. 肥効調節型肥料の播種同時同条施肥によるコムギ不耕起播種栽培の安定化. 日作紀 74(別 2): 70-71.
- 谷俊男・林元樹・小出直哉・遠藤征馬・野村有美 2007. コムギの茎立期における湿害に対する有効な窒素施肥法の検討. 日作紀 76(別 2): 90-91.
- 谷俊男・林元樹・遠藤征馬 2010. コムギ茎立期以前の湿害発生状況と窒素追肥による湿害軽減効果. 日作紀 79(別 2): 68-69.
- 土屋一成・原嘉隆・中野恵子・草佳那子 2007. 早生に適したコムギ「イワイノダイチ」に対する肥効調節型肥料の施用効果. 日作九支報 73: 16-20.
- 若杉晃介・藤森新作 2009. 水田の高度利用を可能とする地下水位制御システム FOEAS. 農業農村工学会誌 77: 705-708.
- 吉田朋史・辻孝子・藤井潔・谷俊男・小出俊則・澤田恭彦 2005. 加工適正の高い小麦新奨励品種「イワイノダイチ」の特性解明と高品質栽培技術. 愛知農総試農業の新技术 No.79: 3-5.
- 吉田朋史・辻孝子・藤井潔 2006. コムギの耐湿性検定における湿害症状を指標とした収量性の推定. 日作紀 75(別 2): 156-157.
- 吉田朋史・辻孝子・藤井潔・遠藤征馬 2011. 小麦新品種「きぬあかり」の特性と施肥体系. 愛知農総試農業の新技术 No.99: 1-2.
- 吉田美夫 1977a. 水田におけるムギ湿害の理論と実際 (1) 農業技術 32: 492-496.
- 吉田美夫 1977b. 水田におけるムギ湿害の理論と実際 (2) 農業技術 32: 529-534.

Effects of a Combination of Application of Controlled-Release Fertilizer to Surface Soil and Top Dressing with Quick-Acting Fertilizer on the Growth of Common Wheat under Excess Moisture Conditions: a Technique to Mitigate Excess Moisture Injury : Toshio TANI¹⁾, Motoki HAYASHI²⁾, Ikuma ENDOU¹⁾, Shiro MITSUYA³⁾, Tomohito HAYASHI³⁾ and Akira YAMAUCHI³⁾ (¹⁾Aichi College of Agriculture; ²⁾Aichi Agricultural Production Division; ³⁾Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University)

Abstract : Excess moisture injury is a serious constraint for common wheat production in Japan. We hypothesized that the excess moisture injury (EMI) is mainly caused by water and nutrient deficiency due to inhibited root function, and thus aimed to examine if the basal application of controlled-release fertilizer (CRF) to surface soil and the top-dressing with quick-acting fertilizer would mitigate EMI. We used cv. Norin 61 for pot experiments for four years. Temporal waterlogging was imposed in the pots to cause EMI whose intensity was regulated by adjusting the water tables. The application of CRF to the 3 cm surface layer increased nitrogen uptake by the plants more than that to the 10 cm depth or deeper layer, irrespective of the degree of EMI. Thus top-dressing was found to be effective even after the symptom of EMI appeared, and it enhanced nitrogen uptake to the level equivalent to that in the plants top-dressed without EMI. The top-dressing not only enhanced nitrogen uptake by roots in a shallow layer but, in some cases, also promoted the function of roots injured by excess moisture to absorb the released nitrogen from CRF. We therefore conclude that a combination of basal application of CRF to the shallow layer and top-dressing of quick-acting fertilizer is an effective technique to mitigate EMI and promote recovery from such injury by utilizing the roots in the shallow layer that tend to maintain a relatively high function under excess moisture conditions.

Key words : Controlled-release fertilizer, Excess moisture injury, Fertilization position, Nitrogen uptake, Top-dressing, Wheat.