

重粘土地下水位制御圃場へのネギ・ブロッコリーの適応性

細野達夫*¹・池田順一*¹・大野智史*¹・鈴木克拓*¹
谷本 岳*²・片山勝之*³・関口哲生*⁴・関 正裕*¹

目 次

I. はじめに	1	3. ネギとブロッコリーの生育および	
II. 材料と方法	2	収量に及ぼす施肥法の影響 (2011年)	11
1. 圃場と地下水水位制御の設定	2	4. ブロッコリー定植後の	
2. ネギとブロッコリーの栽培	3	灌漑の効果 (2012年)	12
3. 水分環境・給排水量の計測	4	5. 根の分布	13
4. 施肥量および施肥法	4	6. 総合考察	16
5. ブロッコリー定植後の		1) 地下水水位と生育・収量	16
灌漑試験 (2012年)	4	2) 一時的な給水機能の利用	17
6. 根系調査	5	3) ネギ・ブロッコリーの適応性	17
III. 結果と考察	5	IV. 摘要	17
1. 地下水水位および根域土壌水分の推移	5	引用文献	18
2. ネギとブロッコリーの生育および		Summary	21
収量に及ぼす地下水水位制御の影響	7		

I. はじめに

輸入野菜の安全性や長期的な安定供給に関する懸念、地産地消の推進等により、国産野菜の生産拡大が求められている。北陸地域では野菜の地域内自給率が概して低いが、農地に占める水田の比率が高いため、野菜の生産拡大のためには水田を活用した野菜生産が必要となる。また、地域農業の担い手である主穀作を中心とした大規模経営の経営安定の目的でも野菜導入に対する期待は大きい。しかし、北陸地域の水田に広く分布する重粘土圃場では、湿・干害が起きやすく、作付け期間や生産量の拡大を阻害する要因になっている。また、近年の肥料等の資材費高騰により、主穀作に比べて大量の肥料を必要とする野菜では化学肥料のコスト面での対策が急務で

ある。

地下水水位制御システム、FOEAS (Farm Oriented Enhanced Aquatic System; 藤森, 2007) は、弾丸暗渠を密に施工して排水性を高めるとともに、地下水水位制御機能 (地下灌漑機能) を持つ。したがって、重粘土転換畑においても、FOEASの導入は湿・干害の防止、肥効向上などを通じて野菜の生育・収量の安定化および低コスト化、さらには栽培品目の拡大などにつながることを期待される。しかし、これまでに、重粘土FOEAS圃場への各種野菜の適応性や地下水水位制御の指針などに関する情報は少ない。そこで、本研究では葉茎菜類の中から、主要野菜の一つだが重粘土圃場ではこれまで作付けが少なく、

平成 26 年 5 月 27 日受付 平成 26 年 10 月 30 日受理

*1 農研機構中央農業総合研究センター水田利用研究領域

*2 現 農研機構農村工学研究所

*3 現 農研機構東北農業研究センター

*4 現 農研機構中央農業総合研究センター土壌肥料研究領域

FOEASにより栽培しやすくなることが期待されるネギ（春植え夏どり作型の短葉性根深ネギ）と、すでに北陸地域の水田転換畑でも一定程度導入されていて、さらなる生産拡大が期待されるブロッコリー（夏植え秋どり作型）を対象とし、重粘土FOEAS圃場における適応性の評価と安定栽培法の開発を目標として試験を実施した。

適切な設定地下水位条件を解明するため、重粘土FOEAS圃場において、地下水位制御の条件の異なる試験区を設定してネギ、ブロッコリーを栽培し、土壌水分や地下水位の状況を把握しつつ、生育・収

量を調査した。また、効率的な施肥法の確立のため、施肥法を変えた試験区を設けて、地下水位および施肥法が根の分布や作物体中の窒素量などに及ぼす影響を調査した。さらに、ブロッコリー定植直後に灌漑が必要な場合において、FOEASの地下灌漑機能を活用できるかどうか検討した。

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発」3系「土壌養水分制御技術を活用した水田高度化技術の開発」により行われた。

II. 材料と方法

1. 圃場と地下水位制御の設定

試験に用いた圃場は、北陸研究センター（新潟県上越市）内のFOEASが施工（2010年11月）された重粘土圃場である。この圃場は、遮水シート（地下1mまで）を施工した中畦で2つの区画（面積約4a/区画）に隔てられており、区画ごとに独立して地下水位制御が可能である。圃場周囲にも地下1mまで遮水シートが施工されている。本暗渠とそれに直交する弾丸暗渠（補助孔）は図1のように配置されている。試験圃場は各区画の短辺長が約9mしかないため、本暗渠は各区画の一方の短辺（水口側）とその対辺（水尻側）それぞれの中点付近を結ぶ1本のみで支線はない。また、2011年の9月下旬以降、積雪期間を通して、一方の区画で暗渠排水機能の低下が見られた（詳細は結果参照）ので、機能回復のため、2012年4月に2つの区画とも、当初の施工時にもみ殻なしの補助孔であった位置にもみ殻入り弾丸暗渠の施工を行った。

試験期間全体を通じて、2つの区画のうち片方は地下水位制御を行う区（以下、制御区）とし、もう一方は給水なしで水位制御器の内筒を非設置すなわち暗渠開放する区（以下、開放区）に設定した。なお、本報においては、地下水位は各作物の植え付け位置（定植時の畝上面）からの深さで示すこととする。制御区の設定地下水位は、2011年が-30cm、2012年は排水性を重視して-40cm（耕うん前の田面から-30cm、FOEASの最低制御水位に相当）とした。制御区における排水側の水位制御器内筒の位置（以下、「排水水位」）は、自動給水を行う場合、

すなわち、給水元栓を開けておいて水位管理器で給水・止水を自動制御する場合には設定地下水位よりも10cm程度高くした。水位管理器内の水位が設定

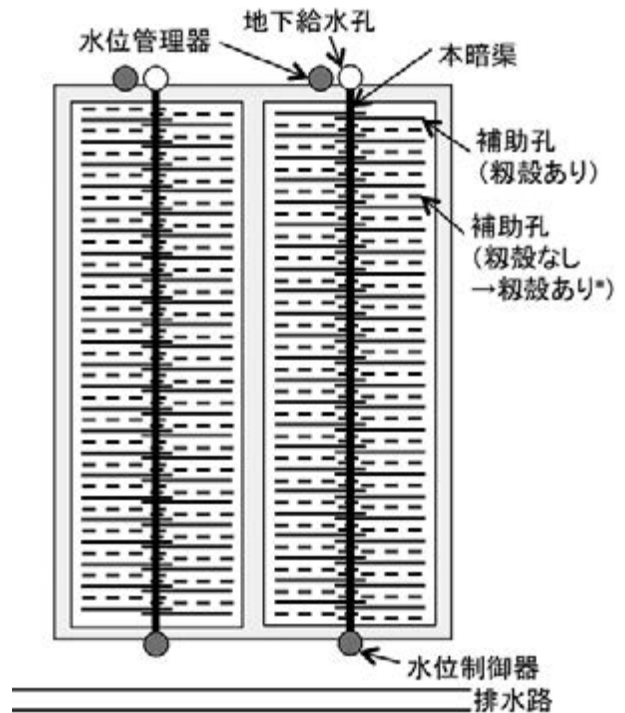


図1 試験に用いたFOEAS圃場の概略図

周囲および中畦には深さ1mまで遮水シートが施工されている。FOEASは2010年11月の施工で、本暗渠に直交して1m間隔で配置される補助孔は、孔の直上のスリットに籾殻が入っているもの（実線）と入っていないもの（点線）が交互に施工された。

*籾殻なしの補助孔の位置には、2012年の栽培試験開始前の4月に、籾殻入り弾丸暗渠を施工した。

水位付近になると給水は停止する機構であるが、給水圧の変動により、停止する水位は若干上下する。排水水位を設定地下水水位よりも10 cmも高くしたのは、給水された水が排水側の水位制御器内筒上端からオーバーフローしてそのまま排水されるのを確実に防ぐためである。2011年は、全期間にわたってこの自動給水を行う場合の設定とした。しかし、この設定では、地下水水位が設定水位付近にある状況で多量の降雨があるような場合には、地下水水位が設定水位よりも高まる傾向が見られた。そこで、2012年においては、梅雨期や秋雨時期など、降雨が多く排水が定常的に生じる状況、あるいは日雨量が概ね20 mmを超えるような場合には給水元栓を閉じ、排水水位は設定地下水水位と同じか10 cm程度低くして暗渠排水を促すようにした。

2. ネギとブロッコリーの栽培

制御区および開放区の各圃場を、本暗渠位置を境に2つの栽培区域（仮に、A区域とB区域とする）にわけ、ネギ、ブロッコリーおよびエダマメ（本報では扱わない）をいずれかの区域内に作付けした。2011年春から2012年秋にかけて、ブロッコリーの連作障害の危険性をできるだけ小さくするために、以下のように作付けした。2011年は、A区域でネギ→ブロッコリーの2毛作、B区域ではエダマメ単作、2012年は、A区域でネギ単作、B区域でエダマメ→ブロッコリーの2毛作とした。ネギ、ブロッコリーとも、栽培区域内に、2畝×40 mを作付けした。

ネギは、品種‘ホワイトツリー’（タキイ種苗）を短葉性ネギ（北田，2007；若生ら，2010）の栽培マニュアル（富山県，2008）に準じて栽培した。2011年は、2月28日に播種してガラス温室で育苗したセル苗（200穴セルトレイ）を4月27日に定植（手植え）した。圃場は極度の湿潤条件で碎土率も悪かったため、機械定植は不可能であった。6月1日と7月19日の2回土寄せを実施し、8月11日に収穫した。2012年は、3月1日播種、温室育苗のペーパーポット苗を5月8日に定植した。その際、最初に簡易定植機（ニッテン、ひっぱりくんHP-6）を用いて作業をしたが、覆土が不十分であったため、全面的に手作業による覆土を必要とした。6月13日と8月10日の2回土寄せを実施し、8月27日に収穫した。両年とも、畝間200 cm、株間5 cm、

条間90 cmの2条植え（栽植密度20株/m²）とし、土寄せ作業は主としてレーキ等を用いて人力で行った。

ブロッコリーは、品種‘ピクセル’（サカタのタネ）を、地域の慣行（新潟県，2003）に準じて栽培した。温室育苗のセル苗（128穴セルトレイ）を、半自動定植機（ISEKI、ナウエルナナPVH1）を用いて定植した。播種日は、2011年が8月5日、2012年が7月24日、定植日は、2011年が8月25日、2012年が8月9日であった。畝間180 cm、株間30 cm、条間50 cmの2条植え（栽植密度3.7株/m²）とした。いずれの場合も欠株が生じた場合は適宜補植を行い、欠株が特に多く生じた2012年のブロッコリー（詳細は結果と考察を参照）を含め、補植により概ね欠株を解消できた。

畝はいずれも、改良型アップカットロータリー（細川ら，2005）を用いる耕うん同時畝立て作業機（細川，2012）によって畝高さ約10 cm、畝部分の耕うん土層厚約20 cmの平高畝を形成した。畝幅（耕うん幅）は、ネギが180 cm、ブロッコリーは160 cmである。施肥については後述する。

夏季に定植するブロッコリーでは、定植直後の灌漑が必要となることが多いが、2011年は定植直後から十分な降水量があったため、活着のための灌漑は行わなかった。一方、2012年はブロッコリー定植直後に灌漑を実施したが詳細は後述する。ネギでは、制御区の地下水水位制御による給水以外に灌漑は行わなかった。

収穫期の生育・収量調査の他、ネギでは土寄せ時期、ブロッコリーでは着蕾期に生育調査を行った。また、2012年のブロッコリーでは、各区内に設定した調査範囲（20 m×2畝の内側2条分、36 m²）の中から収穫開始以降1週間おきに計4回、花蕾径が10 cm以上となった株を全て収穫して累積の花蕾収量を調査した。

2011年のネギでは、葉色（SPAD値）を葉緑素計（ミノルタ、SPAD502）で計測した。また、生育・収量調査の各時点における作物体中全炭素および全窒素含有量を、全炭素・全窒素同時分析装置（ジェイサイエンスラボ、JM3000CN）を用いた燃焼法により計測した。

3. 水分環境・給排水量の計測

畝内土壌の水ポテンシャルおよび体積含水率を、それぞれテンシオメータおよびTDRプローブ (Campbell, CS616) で、生育期間を通じてモニタリングした。各センサは、ネギおよびブロッコリーの定植時に、畝上面から深さ 10 cm および 20 cm の位置の値を計測できるように設置した。センサの出力は、データロガー (Campbell, CR10X, CR1000 等、複数台使用) で測定・記録した。なお、ネギでは途中で土寄せを行ったが土壌水分センサの位置は変えなかったため畝上面から土壌水分センサまでの深さ (土層の厚さ) は変化した。地下水位のモニタリングは、各区の補助孔位置および補助孔と補助孔の中間位置、1カ所ずつ、計4カ所に硬質塩ビ管 (VP50) 製の地下水位測定管を設置し、管内の水位を水位センサロガー (Onset, HOBO-U20-001-01) で測定・記録した。なお、設置位置は、本暗渠からは水平方向に 3 m 程度離れている。補助孔位置では補助孔深まで、補助孔と補助孔の中間位置では、本暗渠深より深い 80 cm ~ 120 cm まで、地下水位測定管の外径よりやや太い穴をエンジンオーガーにより掘削して管を設置した。管の下部 10 cm 程度の範囲には多数の小孔 (直径 7 mm) があいており、周囲との水の移動を容易にしている。管の周囲の隙間は、空隙ができるだけ少なくなるように、掘削した土を埋め戻したが、管下部の小孔のあいた部分の周囲だけは、小孔の目詰まりを防ぐために直径 1 cm 程度の礫を充填した。

各区の暗渠排水量および表面排水量、制御区における給水量をモニタリングした。暗渠排水量は、電磁流量計 (愛知時計、電磁式積算体積計、SW050GM)、表面排水量と給水量は水道メータ (アズビル金門、接線流羽根車式電子式水道メータ、EKDA40) を用いて計測した。電磁流量計のパルス出力は、小型ロガー (Onset, HOBO-UA-003-64)、水道メータのパルス出力は土壌水分計測に用いたデータロガーで、それぞれ検知・記録した。

4. 施肥量および施肥法

慣行の全層基肥・追肥体系と局所一発施肥体系の比較試験を 2011 年に行った。制御区および開放区それぞれの中に、副処理として、慣行施肥区と局所一発施肥区を設定した。追肥を省略する局所

一発施肥では、ブロッコリーのマルチ栽培での方法 (片山ら, 2011) を参考に、肥料を条に沿って深さ約 10 cm の位置に施用した。地下水位制御の有無×施肥法で、計4処理区、4反復で試験区を設定した (計16区画)。制御区と開放区、各圃場内の2畝×40 m の栽培エリアを、2畝×5 m の区画に8等分し、慣行施肥区と局所一発施肥区を交互に配置した。ブロッコリー栽培時は、施肥の前歴 (ネギ栽培時の施肥方式) が区画によって異なるため、施肥の前歴を条件に加え計8処理区2反復で試験区を設定した。

施肥量は、ネギの慣行施肥区では、いずれも速効性肥料で $N-P_2O_5-K_2O$ を、基肥として 5.2-5.2-5.2 kg/10 a を全層施用、1回目土寄せ時に 4.5-4.5-4.5 kg/10 a、2回目土寄せ時に 4.5-4.2-3.0 kg/10 a を、それぞれ畝表面に条施用した。ブロッコリーの慣行施肥区では、いずれも速効性肥料で基肥として $N-P_2O_5-K_2O$ 、22.6-21.0-20.6 kg/10 a を全層施用、追肥として $N-K_2O = 3.6-3.6$ kg/10 a を 9月29日 (定植後35日) および 10月13日 (着蕾期) にそれぞれ土壌表面に条施用した。局所一発施肥の施肥量は、NPK施肥量が慣行の20%減となるように、ネギでは、速効性肥料で $N-P_2O_5-K_2O = 4.16-11.1-10.2$ kg/10 a、追肥代替の被覆尿素 LP30 と LPS60 を N で 3.6 kg/10 a ずつ、ブロッコリーでは、速効性肥料で $N-P_2O_5-K_2O = 18.1-16.8-22.2$ kg/10 a、被覆尿素 LP30 と LPS60 を N で 2.9 kg/10 a ずつとした。20% という施肥量の削減率は、場内の別の重粘土転換畑圃場で実施された局所施肥に関する試験結果 (未発表) から、慣行施肥と同等以上の生育が得られる可能性が高いと判断して決定したものである。

2012 年は全て局所一発施肥とし、施肥量は 2011 年と同じとした。

5. ブロッコリー定植後の灌漑試験 (2012年)

夏季に定植するブロッコリーについて、定植直後に灌漑を行う試験を 2012 年に実施した。灌漑方式は、制御区では地下灌漑、開放区では散水灌漑とした。制御区では、畝表層付近まで水が供給されるように、設定地下水位を一時的に田面より上にして給水した。開放区では、土壌表層が十分に湿ったと目視で判断される程度に散水チューブ (三菱樹脂アグ

リドリーム、エバフロー A型)を用いて畝面に散水した。散水チューブは、地下給水配管の途中で分岐させた配管に接続し、給水圧を利用して散水した。ただし、開放区の一部には、無灌漑の区域を設けた。したがって、灌漑条件は、地下灌漑、散水灌漑、無灌漑の3水準となる。また、灌漑の効果を明らかにするため、各灌漑条件下の畝の一部にPOフィルム(みかど化工、ユーラック)のトンネル(幅1.8m、天頂部高さ約1m、奥行き5m、妻面開放)をかけて自然降雨を遮断した。すなわち、灌漑条件と降雨遮断の有無を組み合わせた6通りの条件を設定し、各条件下における定植後の苗のストレス状況および生存率(活着率)の推移を調査した。トンネル被覆は定植から2週間後に撤去したが、トンネル被覆

した場所、および開放区は無灌漑の場所は前述の生育・収量調査の対象外とした。

6. 根系調査

根系調査のために、鉄棒を圃場に打ち込み、幅30cm厚さ5cm深さ30cmの土壌の鉛直断面を不攪乱で取り出した。2012年のブロッコリーでは株が中心になるように、それ以外では株が端から5cmの所になるように取り出した(図2)。取り出した不攪乱土壌を、幅10cmごと、深さ10cmごとに9つのブロックに分割し、それぞれのブロックに含まれる根を洗い出して、70℃で48時間乾燥し、乾物重を測定した。

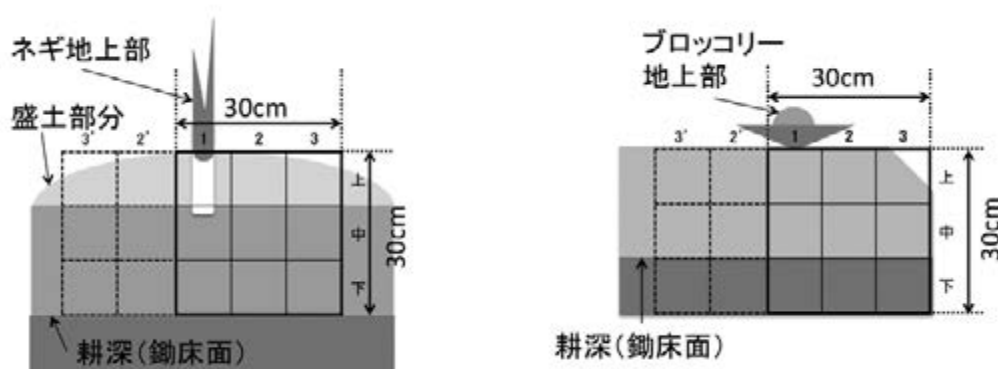


図2 根量分布調査の模式図(左:ネギ, 右:ブロッコリー)

畝方向(条方向)と直交する、太棒で示した30cm四方の範囲の不攪乱鉛直断面を採取。断面の厚さ(奥行き)は5cmである。採取した断面を9等分した格子内の根量(乾物重)を調査。棒の左端の格子(第1列)の中央に植物体が位置する。ただし、2012年のブロッコリーのみ、株が中央の格子(第2列)になるように採取。

III. 結果と考察

1. 地下水位および根域土壌水分の推移

ネギ・ブロッコリー生育期間中の降水量、地下給水量、畝内土壌水分、地下水位の推移を図3および図4に示す。2011年は、補助孔位置の水位はほぼ設定水位に維持されており、2012年も、給水孔水位は設定地下水位に保たれていたことから、水位制御器は正常に給水制御動作を行っていたと考えられる。しかし、いずれの年も、降水量が小さく地下水位が低下していく時期には、補助孔と補助孔の中間の地下水位を設定水位に維持することはできな

かった。2011年は、ネギおよびブロッコリー栽培期間中の積算地下給水量が約10mmと、非常に小さかった。2012年は、ネギ栽培開始からブロッコリー定植前までの約3ヵ月間で、無降雨日数が60日あまりあったにもかかわらず、合計地下給水量は約39mmと、小さかった。以上のことから、本暗渠および補助孔以外への灌漑水の供給量は非常に少なかったものと推察される。なお、本暗渠および補助孔の空隙の体積は、土粒子の堆積などによる閉塞がないと仮定すると、圃場1m²あたり10L程度と

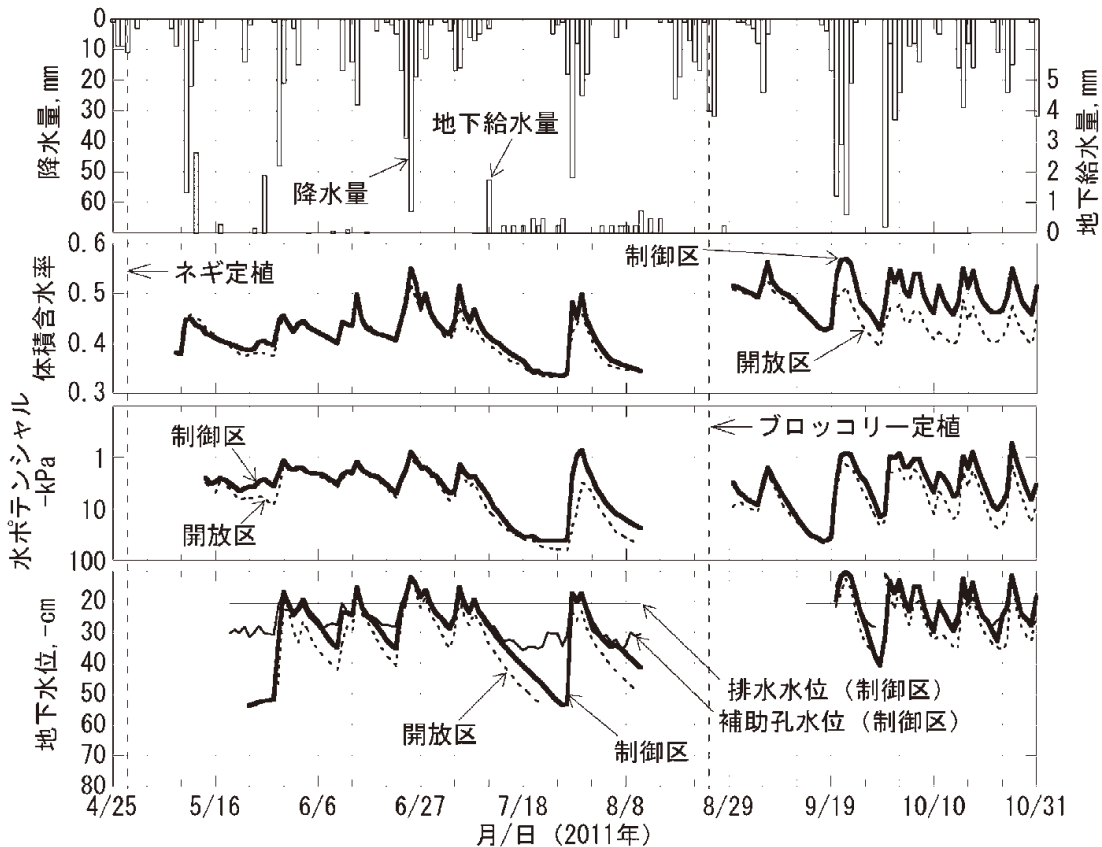


図3 ネギおよびブロッコリー生育期間中の降水量，地下給水量，畝内土壌の体積含水率と水ポテンシャル，地下水位の推移 (2011年)

体積含水率と水ポテンシャルは，畝面（定植時）から深さ10 cmの測定値。地下水位の「制御区」および「開放区」は，それぞれの区における，補助孔と補助孔の間での水位を示したものである。

見積もられた。すなわち，空隙が水で満たされている状態では本暗渠と補助孔の空隙に10 mm相当の水量を保持していることになる。

排水性に関しては，2011年には降雨により地下水位が高まると，設定地下水位（開放区の場合は定常水位）まで下がるのに数日を要し，降雨頻度の高かった梅雨期間中および9月中旬以降は設定より高い地下水位で経過する時間が長かった。一方，2012年は，9月中旬以降，降水量・頻度が増加しても排水性は良好であった。

主根域と考えられる耕うん層の土壌水分も地下水位の変動と同様のパターンで変動した。深さ10 cmの水ポテンシャルは概ね-100 kPa（約pF3.0）以上となっており（図3，図4），鋤床付近の深さ20 cmではさらに湿潤状態が維持されていた（データ略）。

したがって，土壌乾燥による植物の水ストレスが生じる状況は生じていなかったと考えられる。一方，2011年のブロッコリー栽培期間の制御区では，畝上から深さ10 cmにおける水ポテンシャルが-1 kPa（約pF1.0）前後の過湿条件で経過する期間が長かった。

2011年は，9月中旬以降，総排水量に占める表面排水の割合が高まり，特に制御区では暗渠による地下排水量が著しく低下した（図5中段）。2011年のブロッコリー栽培期間中，制御区で表層土壌が過湿となったのは，この排水性の低下によるものと考えられる。2012年は，制御区でも，秋以降の暗渠排水量の顕著な低下は見られず，表面排水量は少なかった（図6）。夏季は，いずれの年も降水量に対する排水量の割合が低い傾向があるが，その理由と

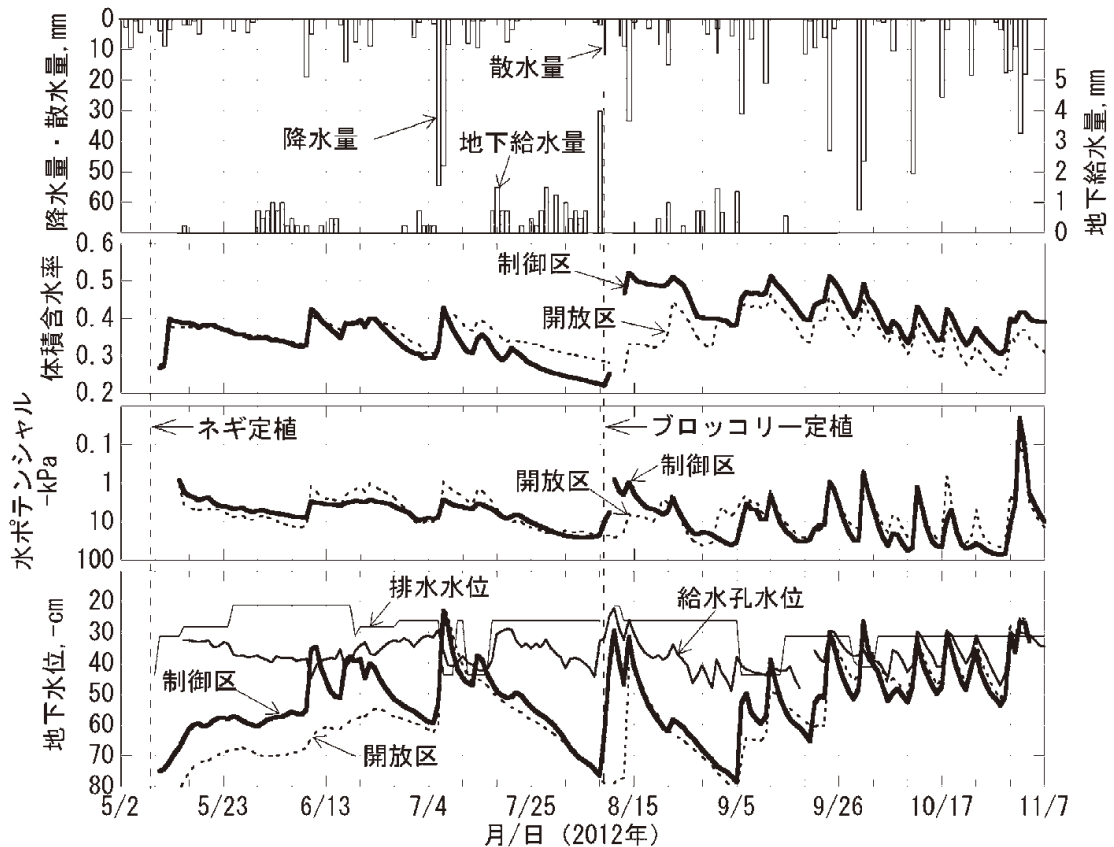


図4 ネギおよびブロッコリー生育期間中の降水量，地下給水量，畝内土壌の体積含水率と水ポテンシャル，地下水位の推移 (2012年)

開放区におけるブロッコリー栽培時の散水灌漑量も示した(散水量)。制御区の地下給水量は、ブロッコリー定植直後の給水量、43 mm (図10参照)を除く。体積含水率と水ポテンシャル、地下水位の「開放区」と「制御区」についての説明は図2と同じ。排水水位と給水孔水位(地下給水孔の水位)は制御区。

して、夏季は蒸発散量が多いことに加えて、乾燥が進んだ場合には本暗渠位置以深への降下浸透量や畦畔浸透量が大きくなる可能性も想像される。

以上のように、2011年と2012年の排水状況に差異が見られたが、その要因としては、2012年の梅雨明け後は降水量が少なく亀裂が発達しやすい条件となったこと、さらには9月中旬以降の降水量・頻度も2011年の方が大きかったことなどが考えられる。また、FOEAS施工後の環境の違いが影響した可能性も考えられる。すなわち、当初のFOEASの施工は2010年の11月であるが、圃場が乾燥する間もなく、降雨、積雪、多量の融雪水にさらされ、弾丸空隙への土粒子の堆積が生じていた可能性も推察される。それに対し、2012年は、融雪後の4月に排水機能回復技術(もみ殻入り弾丸暗渠)が施工さ

れ、その後、梅雨入りまでは乾燥条件にさらされた。このことにより、2011年と2012年とでは、初期の排水能力が異なった可能性が推察される。

なお、総排水量は2ヵ年とも制御区の方が開放区よりもやや多い傾向が見られたが、給水量の差異では説明できず、原因は不明である。

2. ネギとブロッコリーの生育および収量に及ぼす地下水位制御の影響

2011年、2012年ともに、ネギの生育には水位制御の影響は見られなかった(表1～表4)。ネギ生育期間中の制御区の灌漑量は少なく、根域の土壌水分に制御区と開放区で差異が見られなかったためと推察される。なお、土寄せが十分にできなかったため、いずれの場合も葉鞘長は出荷基準に満たなかった。

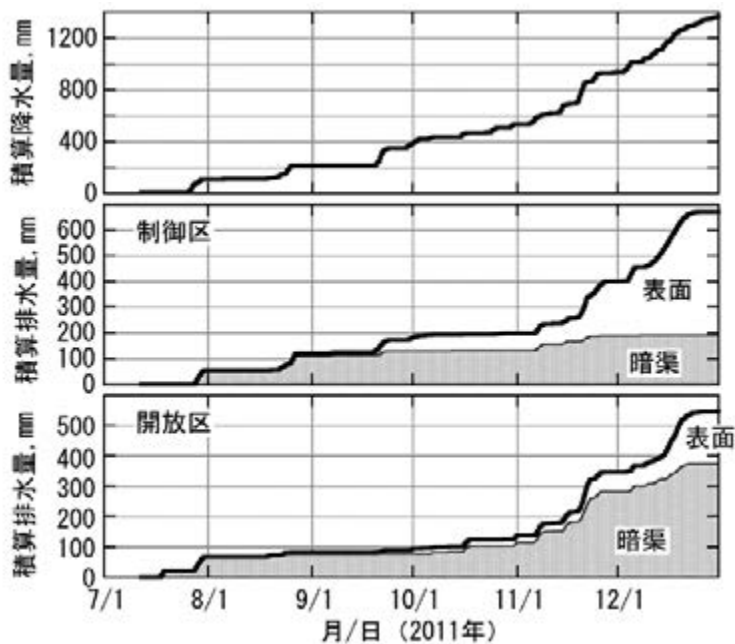


図5 積算降水量，暗渠排水量および表面排水量の推移（2011年）

暗渠排水量は5月からモニタリングしていたが，表面排水量のモニタリングを開始した7月12日以降の積算値を示した。制御区では，降水に加えて，7月12日から8月28日の間に計6mm相当が地下灌漑により圃場に供給された。

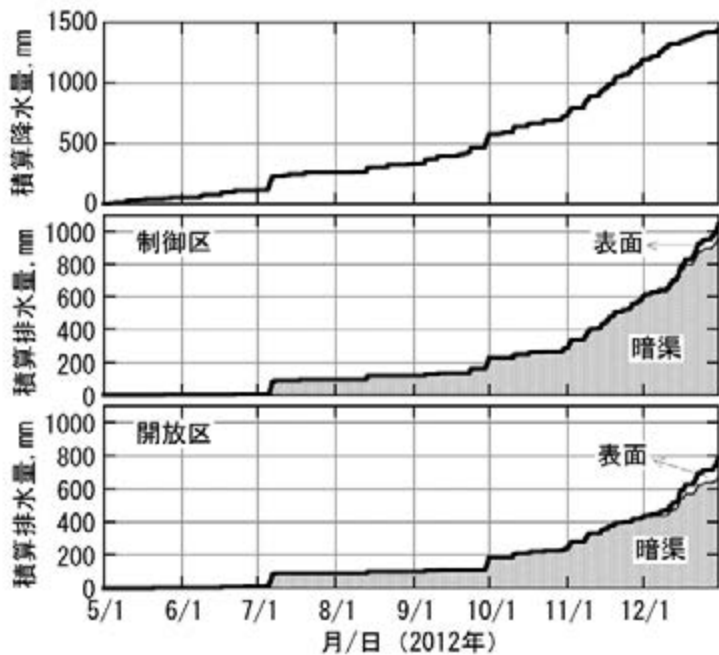


図6 積算降水量，暗渠排水量および表面排水量の推移（2012年）

ネギ定植日（5月8日）の1週間前，5月1日からの積算値を示した。この間，降水に加えて，制御区では地下灌漑により約90mm，開放区では散水灌漑により約13mm相当が圃場に供給された。

表1 ネギの地上部乾物重の推移 (2011年)

水位制御	施肥法	月/日 (播種後日数)		
		5/31 (92)	7/14 (136)	8/11 (164)
制御	慣行	13.5 ± 1.2	146.7 ± 11.8	227.9 ± 6.8
制御	局所一発	9.9 ± 1.8	152.7 ± 21.3	298.5 ± 10.0
開放	慣行	10.7 ± 1.1	120.2 ± 14.4	219.5 ± 11.9
開放	局所一発	13.5 ± 1.3	193.4 ± 5.1	320.2 ± 16.8
分散分析				
	地下水位制御	n.s.	n.s.	n.s.
	施肥法	n.s.	*	**
	交互作用	**	n.s.	n.s.

乾物重 (g m^{-2}) の数値は、4反復の平均値 ± 標準誤差。各反復の値は、5月31日は条長10cm分(2株)、その他は、条長25cm分(5株)を調査して得たもの。分散分析の結果は、n.s.は5%水準で有意ではない、*は5%水準で有意、**は1%水準で有意であることを示す。

表2 ネギの収穫期 (8月11日) の地上部重、草丈、葉鞘長、葉鞘茎および調製重 (2011年)

水位制御	施肥法	地上部重 g/m^2	草丈 cm	葉鞘長 cm	葉鞘径 mm	調製重 g/m^2
制御	慣行	1880 ± 41	55.7 ± 0.2	9.0 ± 0.2	16.0 ± 0.2	1467 ± 17
制御	局所一発	2439 ± 62	58.5 ± 0.7	10.3 ± 0.2	17.6 ± 0.3	1701 ± 30
開放	慣行	1859 ± 87	56.1 ± 1.3	8.9 ± 0.2	15.9 ± 0.2	1393 ± 43
開放	局所一発	2666 ± 131	59.4 ± 1.0	10.7 ± 0.3	18.0 ± 0.5	1808 ± 79
分散分析						
	地下水位制御	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	施肥法	**	*	**	**	**
	交互作用	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

数値は4反復の平均値 ± 標準誤差。各反復の値は、条長25cm分(5株)を調査して得たもの。地上部重および調製重はいずれも新鮮重。調製重は草丈40cm、生葉数4枚に調製した重さ。分散分析の結果は、n.s.は5%水準で有意ではない、*は5%水準で有意、**は1%水準で有意であることを示す。

表3 ネギ土寄せ時の生育量 (2012年)

月/日 (播種後日数)	試験区	草丈 mm	生葉数 g/m^2	地上部新鮮重 g/m^2	地上部乾物重 g/m^2
6/18 (109)	制御	280 ± 11	83.0 ± 1.3	176 ± 23	19.3 ± 2.1
	開放	280 ± 6	84.2 ± 2.8	171 ± 11	17.9 ± 0.6
8/7 (159)	制御	507 ± 11	93.6 ± 2.1	1499 ± 84	184.5 ± 8.1
	開放	534 ± 12	100.6 ± 1.5	1706 ± 85	210.9 ± 9.9

8月7日の生葉数のみ、試験区間で有意差あり (t検定, 5%水準)。数値は4反復の平均値 ± 標準誤差。各反復の値は、条長50cm分(9~10株)を調査して得たもの。

表4 ネギ収穫期 (8月27日) の生育量 (2012年)

試験区	草丈 mm	地上部新鮮重 g/m^2	地上部乾物重 g/m^2	調製新鮮重* g/m^2	調製乾物重* g/m^2	葉鞘長* mm	葉鞘径* mm
制御	556 ± 4	2300 ± 153	275 ± 18	1540 ± 83	173 ± 8	100 ± 5	16.4 ± 0.2
開放	550 ± 8	2256 ± 94	274 ± 12	1514 ± 45	170 ± 6	105 ± 5	16.3 ± 0.2

* 長さ40cm、葉数4に調製したものについての計測値

数値は4反復の平均値 ± 標準誤差。各反復の値は、条長50cm分(9~10株)を調査して得たもの。いずれの要素も、試験区間で有意差なし (t検定, 5%水準)。

ブロッコリーの生育は、以下に述べるように、2011年は制御区<開放区、2012年は制御区>開放区、という逆の結果になった。2011年は地上部の葉、莖、花蕾それぞれの乾物重および地上部全体の乾物重が制御区では開放区よりも有意に低下した(表5および表6)。制御区の耕うん層が過湿となったことが生育を抑制したと推察される。一方、2012年は、生育期間を通して排水性が良好で土壌水分

が過湿となることはなかったと考えられたが、制御区の方が開放区より良好な初期生育が確保され(表7)、収穫開始が早く累積収量も多かった(図7)。ただし、収穫始期の生育量には制御区と開放区で有意な差は見られなかった(表8)。2012年のブロッコリー定植直後の開放区では、散水灌漑が行われたものの、畝内の土壌水分は高まっていなかった(図4)。定植直後の灌漑量は、開放区と制御区で大きく

表5 ブロッコリー着蕾期(10月13日、播種後70日)における地上部乾物重(2011年)

水位制御	施肥法	乾物重, g/株		
		葉	莖	地上部計
制御	慣行	44.9 ± 2.1	11.5 ± 0.4	56.3 ± 2.5
制御	局所一発	38.1 ± 2.9	9.0 ± 0.8	47.1 ± 3.7
開放	慣行	44.4 ± 3.8	10.4 ± 1.1	54.8 ± 4.7
開放	局所一発	58.1 ± 2.8	15.4 ± 0.5	73.6 ± 3.3
分散分析				
	水位制御	**	**	*
	施肥法	n.s.	n.s.	n.s.
	交互作用	**	**	**

数値は、4反復の平均値±標準誤差。各反復の値は条に沿って連続する2株の平均値。分散分析の結果は、n.s.は5%水準で有意ではない、*は5%水準で有意、**は1%水準で有意。

表6 ブロッコリー収穫始期(11月1日、播種後89日)の生育量(2011年)

水位制御	施肥法	花蕾径, cm	花蕾重, g/株 (新鮮重)	乾物重, g/株			
				葉	莖	花蕾	地上部計
制御	慣行	11.2 ± 0.3	265.1 ± 4.3	47.1 ± 0.9	16.9 ± 1.5	25.5 ± 0.4	89.5 ± 1.2
制御	局所一発	9.9 ± 0.4	209.1 ± 12.0	45.7 ± 2.7	16.4 ± 1.1	23.4 ± 1.0	85.5 ± 4.1
開放	慣行	12.4 ± 0.5	321.3 ± 22.6	58.9 ± 3.5	21.4 ± 1.5	28.8 ± 2.1	109.1 ± 6.7
開放	局所一発	12.1 ± 0.1	310.9 ± 6.7	68.3 ± 2.7	28.3 ± 1.2	30.5 ± 0.6	127.1 ± 6.7
分散分析							
	水位制御	**	**	**	**	**	**
	施肥法	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	交互作用	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.

注：花蕾は20cm長さに調製したもの。各区4反復の平均値±標準誤差。各反復の値は、条に沿って連続する5株の平均値。分散分析の結果は、n.s.は5%水準で有意ではない、*は5%水準で有意、**は1%水準で有意。

表7 ブロッコリー着蕾期直前(10月1日、播種後69日)の生育量(2012年)

試験区	生葉数/株	分枝数/株	乾物重, g/株		
			葉	莖	地上部計
制御	17.3 ± 0.7	12.0 ± 0.0	35.4 ± 0.7	8.5 ± 0.5	43.9 ± 0.9
開放	14.5 ± 0.7	9.4 ± 1.5	23.3 ± 4.4	5.0 ± 1.2	28.3 ± 5.6

各区4反復の平均値±標準誤差。各反復の値は、条に沿って連続する5株の平均値。いずれの要素も制御区の方が有意に大きい(t検定、5%水準)。

異なっており（後述）、開放区では結果的に灌漑量が不十分であったものと推察された。

なお、作物体中の全炭素および全窒素の含有率（乾物あたりの割合）に関しては、水位制御および施肥法による特段の傾向は見られなかった（データ略）。

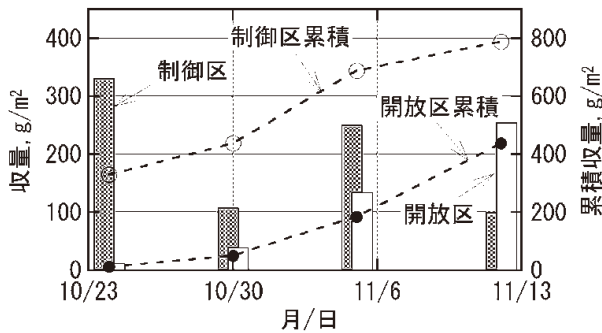


図7 ブロッコリー収量（花蕾新鮮重）の推移（2012年）

概ね、花蕾径が10cm以上のものを収穫。

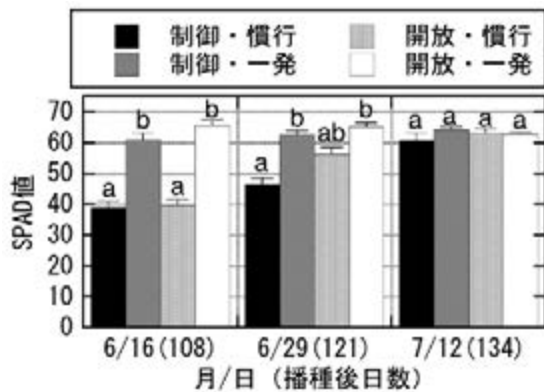


図8 ネギのSPAD値の推移（2011年）

エラーバーは標準誤差。同一英小文字間には5%水準で有意差が無い（Tukey法）

3. ネギとブロッコリーの生育および収量に及ぼす施肥法の影響（2011年）

ネギでは、NPKの施肥量を慣行比20%削減した局所一発施肥により、慣行施肥と比べて良好な生育が得られた。ネギ定植後30日を過ぎる頃（播種後約90日）から徐々に局所一発施肥で慣行施肥に比べて葉色が濃くなり（図8）、草丈も大きくなった（図9）。その後、収穫時期に近づくにつれて葉色の差は小さくなったものの、地上部乾物重は収穫時期に至るまで局所一発施肥で慣行施肥より大きかった（表1）。

ブロッコリーでは、施肥の前歴の有意な影響は見られなかったため、地下水水位制御の有無×施肥法の、計4処理区、4反復としてデータを解析した。開放区では初期生育が慣行施肥に比べ局所一発施肥で大きくなった（表5）ものの、収穫始期には施肥法による生育量の差異は小さくなった。特に制御区では局所一発施肥による生育改善効果は見られなかった（表6）。生育期間後半が多雨となったため土壌が湿潤条件で経過し、特に制御区では暗渠排水機能の低

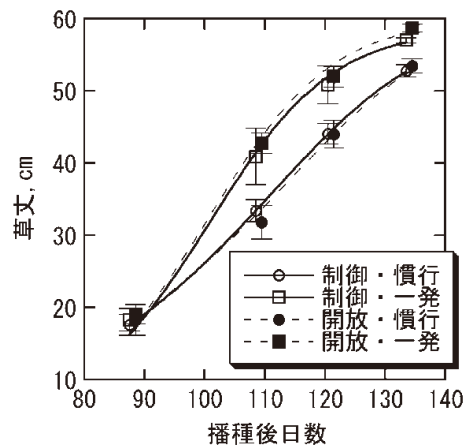


図9 ネギの草丈の推移（2011年）

エラーバーは標準誤差。

表8 ブロッコリー収穫始期（10月30日、播種後98日）の生育量（2012年）

試験区	生葉数/株	分枝数/株	花蕾径 cm	乾物重, g/株			
				葉	茎	花蕾	地上部計
制御	17.0 ± 0.2	17.6 ± 1.4	11.3 ± 0.7	67.5 ± 4.3	30.5 ± 1.1	26.7 ± 1.8	124.7 ± 5.9
開放	19.1 ± 0.9	16.0 ± 0.9	9.1 ± 1.3	79.7 ± 3.0	26.7 ± 1.8	22.4 ± 4.0	128.8 ± 7.6

各区4反復の平均値±標準誤差。各反復の値は、条に沿って連続する3株の平均値。いずれの要素も、試験区間で有意差なし（t検定、5%水準）。花らいは20cmに調製したもの。

下により表層まで過湿条件となったことが施肥法の効果の発現に影響を与えた可能性が考えられる。

4. ブロッコリー定植後の灌漑の効果 (2012年)

制御区では、ブロッコリー定植直後、計43mmの地下灌漑によって表層付近まで水を供給することができた(図10)。圃場全体の畝間に湛水が生じる程度まで給水した後、手で給水を停止した。設定水位に近づくと水位管理者のフロートが上昇して給水速度が低下するので、速い給水速度を維持するため、設定水位を畝面より上10cm程度にして給水した。給水中および給水終了後、暗渠排水および表面排水は生じなかった。給水終了後まもなく、圃場全体の地下水位は鋤床よりやや上の-20cm程度の地下水位となった(図10)。水位制御器および給水孔内の水位は、翌日には通常の設定水位まで低下したので、水位制御器の内筒および水位管理者のフロートを定常位置に戻すとともに、給水栓を開き自動給水とした。

開放区(無灌漑の区域を除く)では、土壤表層が十分に湿潤状態になったと目視で判断される程度に散水チューブにより灌漑した。その結果、定植後初めて降雨のあった8月13日までの灌漑量は17mm相当であり、制御区の地下灌漑量の40%であった。開放区では散水灌漑(9月1日まで、定植後の灌漑量を含めて合計約41mm相当を灌漑)と自然降雨により、苗の活着(生存)に問題はなかったものの、畝上から10cmの土壤水分が8月22日過ぎまでやや低めに推移した(図4)。この生育初期の土壤水分の差異が、前述の制御区と開放区との初期生育量

の差異につながった可能性が考えられる。

8月13日(定植後4日目)まで無降雨だったため、開放区の中に設けた無灌漑の区域では、降雨遮断の有無によらず土壤表面が極度に乾燥し、ブロッコリーの苗は強い水ストレスを受け(表9)、定植後1週間以内にほとんどの株が枯死状態となった。

一方、地下給水をして、全体としては初期生育が良好であった制御区の中にも、局所的にみると枯死する株が少なからず見られた(図11)。目視観察によれば、施肥条から5cm程度離して植えられた苗は良好に活着した。畝表層5cmの土壤のEC(乾土:水の重量比が1:5になるように土壤に水を加えて抽出した液の電気伝導度)を計測したところ、制御区の施肥条直上は 710 mS m^{-1} と極端に高くなって

表9 ブロッコリー定植3日後の苗の状況 (2012年)

試験区	ストレス指標*
地下灌漑・降雨遮断区	1.7 ± 1.3
地下灌漑・自然降雨区	2.7 ± 0.7
散水灌漑・降雨遮断区	1.2 ± 0.1
散水灌漑・自然降雨区	1.0 ± 0.4
無灌漑・降雨遮断区	4.6 ± 0.2
無灌漑・自然降雨区	4.4 ± 0.0

* ストレス指標は、株毎に、ストレスなしを0、概ね8割程度の葉が褐変して緑の葉も萎れているような場合を5とし、中間的な状態を達観で1~4に評価した。各区、2反復の平均±標準誤差(各反復は、2条×8株、全16株の評価値の平均値)。

なお、定植4日後までは無降雨であったため、降雨遮断と自然降雨との違いはトンネル被覆の有無に起因する環境条件の差異(未計測)のみということになる。

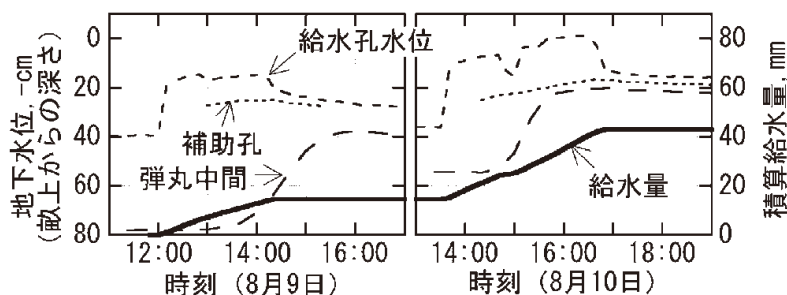


図10 ブロッコリー定植後の地下給水による地下水位の変化 (2012年)

地下水位は、畝上面からの深さ。

いたが、6 cm 離れると 70 mS m^{-1} 程度と正常な値であった。したがって、制御区では、施肥条直上に苗が定植された場合に、地下からの給水により溶出した肥料により根が強い塩ストレスを受け、枯死に至ったものと推察された。

なお、定植後4日目(8月13日)の午後から翌日(8月14日)の朝にかけて計42.5 mmの降雨があった。開放区(無灌漑および散水灌漑)では、この降雨により、降雨遮断と比較して生存株率が増加した傾向が見られる。一方、地下給水をした制御区では、自然降雨の方で降雨遮断よりも生存株率が低い傾向が見られた。降雨前の定植後3日において、すでにストレス指標が自然降雨の方で大きい傾向が見られた(表9)ことから、制御区における自然降雨と降雨遮断の生存株率の差異は、降雨条件の差異に起因するのではなく、前述の塩ストレスの場所によるバラツキによるものと推察される(すなわち、「自然降雨」の調査株の中に施肥条と苗位置とが近接する株が多かった可能性が考えられる)。

5. 根の分布

2011年のネギの収穫時期における根は地上部(茎基部)直下に多く分布していた(表10)。鉛直分布については、開放区では中層(深さ10~20 cm。定植時畝面から深さ0~10 cmの層に相当)に最も多く分布していたのに対し、制御区では上層(深さ

0~10 cm)、すなわち土寄せにより生じた、定植時畝面(茎基部)より上の土層に分布する比率も高かった。全体の根量は開放区の方が制御区より多い傾向であった。施肥法が根の分布に及ぼす影響については、はっきりとした傾向は見られなかった。

2011年のブロッコリー収穫時期においては、株直下およびその脇において畝上から深さ10~20 cm層への分布比率が、制御区よりも開放区の方が高かった(表11)。さらに、開放区の一発施肥においては深さ20~30 cmの根の分布比率も、他の処理区と比較して高い傾向にあった。また、慣行施肥区では株横の上層の比率が一発施肥より高くなったが、これは追肥に反応したためと考えられる。

以上のように、ネギ、ブロッコリーとも、2011年は開放区の方が制御区に比べて下層における根の分布比率が高く、これは制御区における高い地下水水位が根の下方向への伸長を抑制しているためと考えられた。

2012年のネギの根の鉛直方向の分布は、2011年とは異なり、上層から下層まで、制御区と開放区との間に有意な差がなく(表12)、下層の根の分布比率が開放区で制御区より高くなる傾向も見られなかった。また、根系の総重量も制御区と開放区とで差が見られなかった。これは、設定水位を下げたこと、また実際の地下水水位も低かったことにより下層における過湿ストレスによる根系伸長抑制の度が小さくなったためと考えられる。補助孔位置と補助

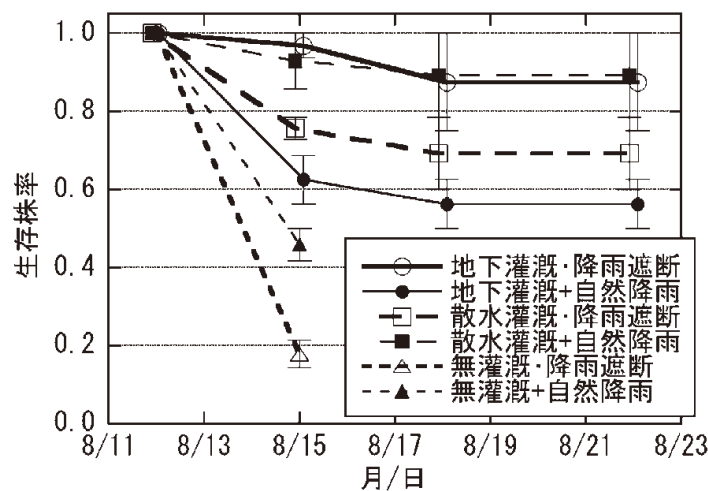


図11 ブロッコリー生存株率の推移(2012年)

各区、2反復の平均値で、エラーバーは標準誤差を示す。

孔中間では差が見られなかった。また、水平方向の分布を見ると、制御区の補助孔位置の断面では株直下の層の横の層の分布比率が他の断面よりも多くなっていた。これは、当該断面を採取した位置では、

施肥位置が株直下から少し横にずれ、肥料のある場所に根が誘導されたためと推察された。しかし、全体的には、株直下の分布比率が最も高いという傾向は2011年と同様であった。

表10 ネギ収穫期の根量分布 (2011年)

制御区・慣行施肥						
位置	補助孔位置 (全根量: 0.69 ± 0.06 mg)			補助孔中間 (全根量: 0.86 ± 0.02 mg)		
	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	31.8 ± 20.7	9.4 ± 1.4	0.7 ± 0.2	18.0 ± 1.4	13.5 ± 3.8	3.1 ± 2.1
中	33.5 ± 17.3	16.7 ± 2.0	2.5 ± 0.7	38.1 ± 6.3	16.8 ± 0.8	5.7 ± 2.3
下	1.7 ± 0.2	1.7 ± 0.1	2.0 ± 1.0	0.8 ± 0.6	1.5 ± 0.9	2.4 ± 0.7
制御区・一発施肥						
位置	補助孔位置 (全根量: 0.97 ± 0.28 mg)			補助孔中間 (全根量: 0.98 ± 0.18 mg)		
	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	39.9 ± 14.3	9.1 ± 2.4	0.5 ± 0.1	39.9 ± 2.5	18.0 ± 0.9	0.4 ± 0.1
中	24.4 ± 7.3	19.4 ± 4.6	3.6 ± 0.7	19.0 ± 0.4	15.5 ± 2.9	2.4 ± 0.5
下	0.8 ± 0.1	1.8 ± 1.0	0.6 ± 0.0	2.3 ± 0.8	1.9 ± 1.3	0.6 ± 0.1
開放区・慣行施肥						
位置	補助孔位置 (全根量: 0.95 ± 0.13 mg)			補助孔中間 (全根量: 0.92 ± 0.02 mg)		
	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	16.2 ± 7.4	8.8 ± 6.9	0.6 ± 0.1	14.9 ± 10.4	7.0 ± 3.9	0.2 ± 0.1
中	40.6 ± 10.7	19.7 ± 0.6	4.7 ± 1.5	50.8 ± 11.2	16.9 ± 2.9	1.1 ± 0.3
下	3.0 ± 1.6	4.6 ± 2.4	1.9 ± 0.7	3.3 ± 0.7	3.6 ± 0.5	2.1 ± 0.6
制御区・一発施肥						
位置	補助孔位置 (全根量: 0.98 ± 0.20 mg)			補助孔中間 (全根量: 1.34 ± 0.28 mg)		
	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	31.2 ± 21.9	3.0 ± 0.0	0.4 ± 0.4	5.0 ± 2.5	7.8 ± 5.2	0.8 ± 0.3
中	37.2 ± 9.1	15.9 ± 9.1	4.0 ± 1.9	47.2 ± 8.8	19.7 ± 5.4	5.7 ± 5.0
下	2.7 ± 0.4	4.3 ± 1.7	1.4 ± 0.7	3.0 ± 0.9	6.8 ± 4.9	4.0 ± 1.1

位置は、図2に示す格子に対応。根量分布の数値は、各格子に含まれる根量(乾物重)が全根量に占める比率(%)を示す。ただし、全根量は2'および3'列を含む15格子に含まれる根の総乾物重(各2サンプルの平均±標準誤差)であり、2'および3'列の根量は、それぞれ2および3の根量に等しいと仮定。

表11 ブロッコリー収穫期の根量分布 (2011年)

制御区・慣行施肥 (全根量: 8.56 ± 0.06 mg)			制御区・一発施肥 (全根量: 7.49 ± 0.25 mg)			
位置	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	81.2 ± 12.3	15.4 ± 12.8	0.6 ± 0.2	94.6 ± 0.8	2.5 ± 0.5	0.9 ± 0.1
中	0.8 ± 0.3	1.1 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.1
下	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.1
開放区・慣行施肥 (全根量: 9.72 ± 2.66 mg)			開放区・一発施肥 (全根量: 7.44 ± 1.53 mg)			
位置	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	88.9 ± 6.6	5.7 ± 3.4	0.5 ± 0.1	88.2 ± 2.8	3.2 ± 2.2	0.5 ± 0.1
中	2.1 ± 1.3	2.1 ± 1.7	0.4 ± 0.0	4.4 ± 3.3	2.3 ± 1.2	0.7 ± 0.3
下	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.4 ± 0.2

土壌断面は補助孔中間位置で採取。その他、説明は表10と同じ。

ブロッコリーでは、主根が他の根に比べて乾物重が著しく大きいので、2012年は主根を除いた根の分布比率も計算した(表13)。なお、2012年のブロッコリーでは、前述の通り、施肥位置が苗直下から水平方向に5 cm程度ずれている場合が多かった。

そのため、株位置の左隣と右隣の区画では分布比率が異なり、施肥位置に近い方で高くなる傾向が見られた。主根を除く根について、上、中、下層の分布比率を比較すると、畝上面から20 cm深さまでの上層と中層では、開放区と制御区とで有意な差が見ら

表12 ネギ収穫期の根量分布(2012年)

制御区						
位置	補助孔位置 (全根量: 1.15 ± 0.01 mg)			補助孔中間 (全根量: 1.19 ± 0.03 mg)		
	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	14.3 ± 4.8	12.7 ± 1.7	3.3 ± 1.2	13.3 ± 10.0	16.5 ± 1.9	1.2 ± 0.7
中	14.3 ± 1.5	25.2 ± 5.4	7.1 ± 0.8	31.2 ± 9.1	12.6 ± 7.0	7.8 ± 1.2
下	5.6 ± 0.7	11.3 ± 4.0	6.3 ± 4.8	5.2 ± 4.2	9.5 ± 6.5	2.8 ± 1.0
開放区						
位置	補助孔位置 (全根量: 0.87 ± 0.15 mg)			補助孔中間 (全根量: 1.29 ± 0.06 mg)		
	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'	1 (株位置)	2 + 2'	3 + 3'
上	13.6 ± 9.6	15.9 ± 9.9	2.3 ± 2.2	33.7 ± 18.3	16.8 ± 3.4	2.3 ± 1.7
中	34.8 ± 15.7	19.9 ± 2.1	3.9 ± 1.0	15.7 ± 3.5	14.6 ± 4.0	7.4 ± 5.6
下	1.3 ± 0.3	6.4 ± 3.3	1.8 ± 0.1	3.0 ± 0.2	2.5 ± 1.7	4.0 ± 1.7

説明は表10に同じ

表13 ブロッコリー収穫期の根量分布(2012年)

制御区						
位置	補助孔位置		全根量: 10.8 ± 1.8 mg (2.9 ± 0.3 mg)	補助孔中間		全根量: 10.4 ± 1.4 mg (3.8 ± 0.4 mg)
	1	2 (株位置)	3	1	2 (株位置)	3
上	2.9 ± 1.2 (11.2 ± 5.1)	93.6 ± 2.2 (75.8 ± 9.2)	0.7 ± 0.3 (2.6 ± 1.2)	1.2 ± 0.4 (3.4 ± 0.9)	83.2 ± 7.6 (54.0 ± 20.4)	0.3 ± 0.0 (0.9 ± 0.1)
中	1.5 ± 1.4 (5.9 ± 5.4)	0.3 ± 0.0 (1.2 ± 0.0)	0.4 ± 0.3 (1.6 ± 1.0)	1.9 ± 0.6 (5.2 ± 1.6)	12.3 ± 6.4 (33.7 ± 17.2)	0.6 ± 0.2 (1.7 ± 0.5)
下	0.1 ± 0.0 (0.4 ± 0.2)	0.2 ± 0.1 (0.8 ± 0.5)	0.1 ± 0.0 (0.5 ± 0.2)	0.2 ± 0.0 (0.5 ± 0.1)	0.1 ± 0.1 (0.4 ± 0.2)	0.1 ± 0.0 (0.4 ± 0.1)
開放区						
位置	補助孔位置		全根量: 9.2 ± 0.0 mg (2.9 ± 0.1 mg)	補助孔中間		全根量: 11.8 ± 1.1 mg (2.8 ± 0.1 mg)
	1	2 (株位置)	3	1	2 (株位置)	3
上	0.2 ± 0.1 (0.5 ± 0.4)	94.3 ± 0.5 (81.9 ± 1.3)	1.4 ± 0.1 (4.5 ± 0.4)	2.0 ± 1.2 (8.8 ± 5.6)	93.1 ± 2.8 (69.9 ± 13.6)	0.1 ± 0.0 (0.5 ± 0.2)
中	0.1 ± 0.1 (0.3 ± 0.2)	1.6 ± 0.1 (5.1 ± 0.2)	1.6 ± 0.6 (4.9 ± 1.7)	1.2 ± 0.3 (4.9 ± 0.9)	2.6 ± 1.6 (11.5 ± 7.4)	0.1 ± 0.1 (0.6 ± 0.4)
下	0.1 ± 0.1 (0.4 ± 0.3)	0.4 ± 0.2 (1.1 ± 0.6)	0.4 ± 0.0 (1.2 ± 0.1)	0.5 ± 0.0 (2.2 ± 0.3)	0.3 ± 0.2 (1.1 ± 0.8)	0.1 ± 0.0 (0.5 ± 0.1)

位置は、図2に示す格子に対応。ただし、断面は株が中央の格子(第2列)になるように採取。全根量は、採取断面全体に含まれる根の乾物重(mg)。根量分布の数値は、各格子に含まれる根量(乾物重)が全根量に占める比率(%)を示す。ただし、下段、括弧内の数値は、主根を除く値。各2サンプルの平均±標準誤差。

れなかったが、20cm～30cmの下層では、根量は小さいものの、開放区の方が制御区より10%危険率で有意に高かった。また、統計的に有意ではなかったものの、補助孔位置と補助孔中間では、補助孔中間の方が10～20cmの中層の比率が高い傾向が見られた。

以上の結果から、ネギ、ブロッコリーとも水位を上げると、根の分布は、過剰な水分を避けて、浅くなることが示された。これは、酸素欠乏条件において一般的に観察される挙動 (Fitter and Hay, 1981) と一致する。

6. 総合考察

1) 地下水位と生育・収量

ネギは生育中期が梅雨期にあたり、その時期の畝内土壌 (定植時畝面から深さ10cmおよび20cm) の水ポテンシャルはいずれの年も-10～-1kPa程度と湿潤状態で経過した。それにも関わらず、ネギの明らかな生育阻害は見られず、各年において試験区間の有意な生育・収量の差異はなかった。その要因として、土寄せにより畝を高めることが、湿害回避の面で有効であった可能性も考えられる。畝間に湛水するような場合でも、土寄せして高くなった畝内の土壌水分は過湿とならないことが推察されるが、根系調査によれば、茎基部より上の土層にも根が伸長していたことが確認された。

試験に用いたFOEAS圃場では、地下水位が低下する場面において、補助孔と補助孔の中間の水位を設定水位に保つことは困難と考えられた。FOEASでは、補助孔とその上のスリット部分へ供給された水が横方向へ浸透することにより圃場全体の地下水位を保つことができるが、その浸透速度は土壌の透水係数などによって異なる。重粘土転換畑の土壌は透水係数や毛管上昇速度が極めて小さい (長谷川, 1986) ため、設定水位を鋤床より下にした場合、スリットから横の未耕うん土壌中への水の浸透速度が極めて遅く、水位を維持できないものと考えられる。

Shimada et al. (2012) は、FOEAS圃場におけるダイズ栽培試験で、FOEASによる増収効果、特に少雨年における高い増収効果を確認している。海外においても、土壌乾燥による水ストレスが生じるような状況では、FOEASと同様な機能を持つ地下灌漑・排水システムを用いた地下灌漑による畑

作物の増収効果が示されている (Allred et al., 2003; Satchithanatham et al., 2012)。しかし、本研究では、2012年に梅雨明け後の夏季が高温・少雨であった (図4, 図6) にも関わらず、給水機能を使用せず水閘を開放していた開放区においても、畝内土壌水分は保たれていたため、ネギの生育阻害は見られなかった。なお、ネギでは、ダイズと比べてLAI (葉面積指数) が小さく蒸散量が小さいと考えられることや土寄せにより畝を高めたとなどが、耕うん層下層の土壌水分の維持に有効であった可能性も推察される。水位を高く維持できなくても、根域の土壌水分が好適に保たれば、作物の生育は阻害されない。重粘土圃場でのダイズ作では、高温乾燥年においても灌漑効果は小さいことが示されている (細野ら, 2014)。重粘土圃場での野菜栽培においても、FOEASの地下水位制御による地下灌漑が、好適な土壌水分を維持して生育促進をもたらすような状況は限定的であると考えられる。

排水性に関しては、2012年の夏季のように、高温・少雨が続いた場合には、地下水位を制御していても良好な排水性が保たれると考えられた (図6)。一方、2011年のように夏以降に多雨条件になると、水位制御をすることにより排水機能の低下が助長される可能性が推察された (図5)。2011年の秋どりブロッコリー作、特に制御区では根域土壌が過湿条件となって生育が阻害された。このことから、水位を常に高く設定することには湿害のリスクが伴うと考えられる。中野ら (2014) も、関東地方のグライ低地土のFOEAS圃場での秋まきキャベツの栽培試験から、少雨時における高地下水位による生育促進効果の可能性を認めつつも、栽培期間にわたって高水位に一定に設定した場合に湿害のリスクが高いことを示している。

一方、常時水閘を開放した場合、暗渠および補助孔の疎水材のもみ殻を好氣的な条件にさらすことになり、もみ殻の腐食が早まり耐用年数を短くするという懸念がある (清野ら, 1994)。千田ら (2008) は、暗渠内水位を高めることにより、もみ殻腐植化の速度が抑制されることを示している。圃場全体の地下水位を維持できなくても、本暗渠および補助孔位置への給水、水位の維持により、無給水・暗渠開放の場合と比較して疎水材のもみ殻の分解を抑制し、寿命を延ばす可能性は推察される。ただし、重粘土圃

場では畑転換が暗渠上のもみ殻の腐敗に及ぼす影響は小さいという報告もあり（吉田ら，2005），重粘土圃場での地下水位制御による疎水材のもみ殻の延命効果についてはさらに検討が必要であろう。

以上の結果と考察から，重粘土FOEAS圃場での野菜栽培において，定植後など一時的な灌漑機能利用時以外のFOEASの管理方法について提案すると，地下水位制御時の設定水位は，もみ殻の分解抑制効果の可能性を考慮して最低制御水位，すなわち田面から-30 cm（畝面から約-40 cm）付近に設定し，そして，梅雨期など地下水位が設定水位より高まりやすい状況においては，設定水位を最低制御水位以下に下げる，あるいは水閘を開放，すなわち制御器の内筒を外して排水を促進するのがよいと考えられる。例えば，北陸地域の平年的な降雨条件の場合，5月から梅雨入りまでの期間，および梅雨明け後から秋雨までの期間は地下水位制御を行い，それ以外の期間は給水機能を利用せず暗渠開放とするような管理が考えられる。

施肥法に関しては，ネギ，ブロッコリーともに局所一発施肥の有効性が確認された。本研究の局所一発施肥では，肥料は定植時畝面から深さ10 cmの株直下の位置に施用した。一般に，肥効を高めるためには，根の多く分布する場所への施肥が有効と考えられる。根の分布を調べると，水位制御の有無や施肥法に関わらず，茎基部から深さ10 cm（すなわち，定植時畝面から深さ10 cm）までの層に最も多く分布していた。また，窒素吸収量にも水位制御や施肥法の影響が見られなかった。したがって，施肥位置は茎基部下0～10 cmの層とし，水位に応じて施肥位置を変える必要はないものと考えられる。

2) 一時的な給水機能の利用

一般に，耕うん後，降雨がなければ土壌の表層は急激に乾燥し，重粘土圃場においては下層からの水分供給も望めないため，播種や定植の直後には灌漑が必要な状況が生じうる（足立ら，2005）。本研究

では，地下灌漑のみで圃場全体へ迅速に水が供給され，畝表層の土壌水分を高めることができ，乾燥時の定植でも，ブロッコリー苗の良好な活着と初期生育が得られることが確認できた。ただし，局所施肥を行った場合に，一部で塩ストレスによる苗の枯死が生じたことから，施肥位置と塩ストレスとの関係の詳細な解明や，適切な施肥・定植作業法のさらなる検討が必要である。

高圧のパイプラインが整備されている場合には，地下給水配管から散水チューブに接続することによる散水灌漑等も可能である。低圧のパイプラインの場合には，散水チューブを利用するためには何らかの方法で加圧する必要がある。しかし，散水装置の設備費に加えて，大面積になれば，装置の設置，移動・回収の労力なども大きくなるため，FOEASの地下灌漑機能を利用する方が有利と考えられる。

3) ネギ・ブロッコリーの適応性

以上のように，重粘土FOEAS圃場においても，適切な管理によってネギ，ブロッコリーに好適な土壌水分環境を維持できれば問題なく生育すると考えられるが，土地利用型の露地野菜の場合，実用的には機械作業適性も重要となる。本研究の春定植のネギでは，簡易定植機（ひっぱりくん）による定植作業はできなかった。また，根深ネギに必要な土寄せも管理機による作業は困難であった。重粘土圃場であっても，土壌の水分状態によっては定植および土寄せの機械作業が可能な状況もあると考えられるが，融雪後間もない時期の定植や梅雨期間の土寄せ作業が必要となる春定植作型の根深ネギの導入は難しいものと判断される。一方，ブロッコリーは，現在でも，秋どり作型や初夏どり作型の機械化栽培が北陸地域の水田転換畑へ一定程度普及している。FOEASの導入により，排水性の向上に加えて，定植直後等の灌漑に，散水灌漑と比べて省力的な地下灌漑が利用できるので，ブロッコリーの適応性はさらに高くなるものと考えられる。

IV. 摘 要

重粘土FOEAS圃場への葉茎菜類の適応性を評価するため，夏どりネギ（短葉性根深ネギ）と秋どりブロッコリーの栽培試験を行い，以下の結果を得た。

1. 本研究では，地下水位制御を行わない開放区においても根域の土壌水分不足をきたすことは無く，継続的な地下水位制御の有無によるネギ，

- ブロッコリーの生育・収量の差異は概ね小さかった。
- ただし、多雨条件となった2011年の秋どりブロッコリー栽培期間中には、制御区で排水機能の低下が生じ、畝内の土壌が極端な過湿条件となり生育が抑制された。
 - また、2012年夏季の土壌乾燥時のブロッコリー定植直後、制御区では地下灌漑により圃場全体の地下水位および根域の土壌水分を高めることができ、苗の良好な活着と初期生育が得られ、結果的に定植直後の散水灌漑量が不十分となった開放区と比較して収穫期が早まり増収した。
 - 根量(乾物重)が最も多く分布したのは、施肥法に関わらず、株直下、定植時畝面から深さ10 cmの層であった。この層に近い、株直下深さ10 cmの位置に、NPKを慣行比20%削減し

た肥料を全量基肥施用した局所一発施肥(条施肥)で、慣行の全層施肥・追肥体系以上の良好な生育・収量が得られた。

以上のように、ネギ、ブロッコリーとも重粘土FOEAS圃場で概ね良好に生育することが示された。ただし、重粘土圃場への根深ネギの導入は、定植および土寄せにおける機械作業の問題により制約を受けると考えられた。また、継続的な地下水位制御による増収効果は限定的ではあるものの、FOEASの地下灌漑機能は定植後の良好な活着と初期生育をはかるために有用である可能性が示された。ブロッコリーは、現在でも北陸地域の水田転換畑での機械化栽培が普及しているが、地下灌漑機能をもつFOEASの導入により、定植時に必須となる灌漑作業を省力化できるので、適応性はさらに高まると考えられた。

引用文献

- 足立一日出・細川寿・吉田修一郎・伊藤公一・松崎守夫・高木強治(2005) 転換畑圃場における灌漑技術. ファーミングシステム研究, 7, 31-38.
- Allred, B. J., Brown, L. C., Fausey, N. R., Cooper, R. L., Clevenger, W. B., Prill, G. L., La Barge, G. A., Thornton, C., Riethman, D. T., Chester, P. W. and Czartoski, B. J. (2003) Water table management to enhance crop yields in a wetland reservoir subirrigation system. *Applied Eng. in Agric.* 19, 407-421.
- 千田智幸・岩佐郁夫・冠秀昭・千葉克己(2008) 輪換田における疎水材にもみ殻を使用した暗渠の排水機能の維持について. 宮城古川農試報, 7, 53-60.
- Fitter A. H. and Hay R. K. M. (1981) *Environmental Physiology of Plants*. Academic Press, London (太田安定ら, 共訳(1985) 第7章 1.2 滞水土壤での生育と生存を有利にしている植物の適応. 植物の環境と生理, 学会出版センター, 東京, p.261-271)
- 藤森新作(2007) 転換作物の安定多収をめざす地下水位調節システム. 農業および園芸, 82, 570-576.
- 長谷川周一(1986) 転換畑土壌中の水分移動. 土壌の物理性, 53, 31-38.
- 細川寿・足立一日出・松崎守夫・伊藤公一(2005) 碎土性を向上させる耕うん同時畝立て作業技術の開発. ファーミングシステム研究, 7, 46-53.
- 細川寿(2012) 畝立て同時作業の技術追加による高機能・省力作業技術の開発. ファーミングシステム研究, 11, 20-28.
- 細野達夫・片山勝之・野村幹雄・大野智史・中山則和・細川寿(2014) 北陸地域の重粘土転換畑でのダイズ収量に及ぼす点滴灌漑の効果. 中央農研研報, 21, 1-23.
- 片山勝之・細川寿・細野達夫・野村幹雄(2011) 耕うん同時畝立てマルチ作業機による秋どりブロッコリーの減肥栽培. 農研機構成果情報(2010年度), URL(2014年現在): <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2010/narc10-19.html>
- 北田幹夫(2007) やわらかくておいしい短葉性ネギ: 富山の「ねぎたん」. 農林水産技術研究ジャーナル, 30(1), 17-18.
- 中野有加・東野裕広・村岡賢一・中西一泰・柳井洋介・岡田邦彦(2014) 地下水位制御システ

- ム (FOEAS) 設工ほ場における設定水位が秋まきキャベツの生育に及ぼす影響. 園芸学研究, **13**, 125-133.
13. 新潟県 (2003) “ブロッコリー”. 野菜栽培のマニュアル. 新潟県農林水産部農産園芸課編, (社) 新潟県農林公社, 276-279.
 14. Satchithanatham, S., Sri Ranjan, R. and Shewfelt, B. (2012) Effect of water table management and irrigation on potato yield. *Transact. ASABE*, **55**, 2175-2184.
 15. 清野真人・土開義広・近野雅子・瀬野義昭 (1994) 暗渠排水疎水材としてのモミガラ耐久性と暗渠排水機能の維持改善. 山形農試研報, **28**, 99-114.
 16. Shimada, S., Hamaguchi, H., Kim, Y., Matsuura, K., Kato, M., Kokuryu, T., Tazawa, J. and Fujimori, S. (2012) Effects of water table control by farm-oriented enhancing aquatic system on photosynthesis, nodule nitrogen fixation, and yield of soybeans. *Plant Prod. Sci.*, **15**, 132-143.
 17. 富山県園芸振興推進協議会・富山県野菜協会 (2008) 「富山の『ねぎたん』」栽培マニュアル」.
 18. 若生忠幸・小島昭夫・山下謙一郎・塚崎光・小原隆由・坂田好輝 (2010) 短葉性ネギ品種 ‘ふゆわらべ’ の育成とその特性. 園芸学研究, **9**, 279-285.
 19. 吉田修一郎・足立一日出・関光夫 (2005) 重粘土水田における暗渠疎水材もみ殻の劣化と渠溝の空洞化. 農土論集, **235**, 25-33.

Suitability of Welsh onion and broccoli cultivation in a heavy clay field equipped with a subirrigation and drainage system

Tatsuo Hosono^{*1}, Jun-ichi Ikeda^{*1}, Satoshi Ohno^{*1}, Katsuhiko Suzuki^{*1}, Takeshi Tanimoto^{*2},
Katsuyuki Katayama^{*3}, Tetsuo Sekiguchi^{*4} and Masahiro Seki^{*1}

Summary

Incorporating vegetable cropping into a lowland crop rotation system (i.e., rotation of irrigated rice and upland crops) could be economically beneficial for farmers. However, upland crops grown in the heavy clay paddy fields typical of the Hokuriku region of Japan would suffer soil moisture stress due to both too much and too little water. The Farm-Oriented Enhancing Aquatic System (FOEAS) is a new subirrigation and subdrainage system designed to improve the suitability of converted fields for upland crops by preventing extremes of soil water. We grew Welsh onion (*Allium fistulosum* L.) and broccoli (*Brassica oleracea* L. Italica Group) in a heavy clay converted field equipped with FOEAS at the Hokuriku Research Center, and monitored crop growth, soil water content, and water table depth in 2011 and 2012 (one cultivation period for each crop per year). In one treatment plot, subirrigation was used to maintain the water table at 30 to 40 cm below the soil surface (subirrigation, SI plot). In the other, the water table depth was not controlled (no irrigation, NI plot). Each plot was divided into two fertilizer application subplots in 2011. The conventional application subplot received a basal application of fertilizer (N:P₂O₅:K₂O = 5.2:5.2:5.2 g m⁻² for Welsh onion and 22.6:21.0:20.6 g m⁻² for broccoli) which were mixed in the whole plow layer through plowing process (the depth of plowed layer was about 20 cm) before planting and followup topdressings (N:

P₂O₅:K₂O = 9.0:8.7:7.5 g m⁻² for Welsh onion and 7.2:0.0:7.2 g m⁻² for broccoli). The band application subplot received only a basal application of fertilizer (N:P₂O₅:K₂O = 11.4:11.1:10.2 g m⁻² for Welsh onion and 23.8:16.8:22.2 g m⁻² for broccoli) including controlled-release urea in a subsurface band 10 cm deep along the seedling row after plowing and before planting. In addition, we tested the effect of postplanting subirrigation on the rooting and growth of broccoli in summer in 2012.

The results are summarized as follows:

- 1) The water table depth could not be maintained by the subirrigation supply at the set value in the SI plot throughout the growing period, probably because of the low permeability of the soil and the slow capillary rise. Nevertheless, soil moisture in the root zone did not fall below -100 kPa in either plot, and both crops grew generally well except for following cases.
- 2) Deterioration of the subdrainage performance occurred in the SI plot during growing period of broccoli in 2011, probably due to trying to keep relatively high water table depth (-30 cm) under the situation of higher frequency of precipitation. As a result, soil moisture in the root zone frequently rose too high (>-1 kPa) and the growth of broccoli was inferior in the SI plot compared to the NI plot.
- 3) Subirrigation immediately after planting of broccoli in summer in 2012 raised the water table depth

*1 NARO Agricultural Research Center Lowland Farming Division

*2 Present address: National Institute for Rural Engineering

*3 Present address: NARO Tohoku Agricultural Research Center

*4 Present address: NARO Agricultural Research Center Soil Science and Plant Nutrition Division

temporarily to near the surface and provided adequate soil water in the SI plot, enabling good rooting and better initial growth than in the NI plot. Crop growth was more advanced and the total harvestable yield was higher in the SI plot. Although sprinkling irrigation via a perforated tube after planting in the NI plot also enabled good rooting, the water quantity was too small to raise the soil water content sufficiently for good initial growth comparative to SI plot.

- 4) The growth of Welsh onion and broccoli in the band application subplot was at least as good as that in the conventional application subplot, even though the band application subplot received only 80% of the fertilizer applied to the conventional

subplot.

Thus, this study demonstrated that Welsh onion and broccoli grew generally well in a heavy clay converted field equipped with FOEAS. The expansion of Welsh onion cultivation in such fields would need the development of farm machinery adapted to the heavy soils. Although yield increases by continuous subirrigation might be limited, our result suggests that postplanting subirrigation could lead to good growth and yield of broccoli. Broccoli cultivation in heavy clay converted fields could become increasingly practicable because costs and labor for postplanting irrigation could be saved by using FOEAS subirrigation.