

湛水条件下で栽培したダイズにおける二次通気組織の形成と生育・収量

島村聡*・望月俊宏・名田陽一・福山正隆

(九州大学)

要旨: 湛水田におけるダイズ栽培の可能性について検討するため、二次通気組織が良く発達するダイズ品種アソアオガリを用い、湛水条件下における二次通気組織の形成経過、乾物重の推移および子実収量を調査した。ポット栽培および圃場栽培実験を行い、初生葉展開期から必要に応じて灌水する灌水条件（対照区）と水位を土壌表面上約 3 cm に保つ湛水条件（湛水区）で栽培した。両実験において、湛水区のダイズは枯死することなく収穫まで至った。対照区では、二次通気組織は胚軸、主根、不定根および根粒のいずれにもほとんど形成されなかったが、湛水区では、生育初期から形成が認められ、形成量は生育に伴って増加した。また、胚軸の空隙率は生育期間を通じて対照区に比べて高かった。ポット栽培の湛水区では、植物体は小型化し、子実収量も減少したが、圃場栽培では、密植により、対照区と同程度の面積当たり稔実莢数や稔実粒数が得られ、子実収量は 300 g/m² 以上であった。以上の結果から、本品種は湛水条件下では二次通気組織を速やかに形成し、これを生育後期まで維持することによって、常時湛水条件下においても生育を全うしたものと推察され、湛水田におけるダイズ栽培の可能性が示唆された。

キーワード: 根系、子実収量、生育、ダイズ、湛水ストレス、湛水田、通気系、二次通気組織。

水田はもともと水を貯めることを基本に整備されているため、地下水の涵養や水質の浄化、洪水防止あるいは自然湿地の代替など多面的な環境保全機能を有している。しかしながら、湛水条件下で栽培可能な主要作物がイネに限られるため、我が国では減反政策による転換畑への転用や休耕、耕作放棄などによって、その機能は十分には活かされていない。ダイズ (*Glycine max* [L.] Merr.) 栽培においても、湿害回避のための排水対策に重点が置かれ、水田の畑地化が推進されている。

ところで、湛水条件下でダイズとその野生種であるツルマメ (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.) を栽培した場合、ダイズは生育不良となり途中で枯死するのに対し、ツルマメの生育は良好で、収穫まで至ると報告されている (Arikado 1954)。湛水条件に対する両種の生育反応の差異は、湛水面下の根へ酸素を供給する通気組織の発達程度が異なるためと考えられている。ツルマメには通気組織が良く発達し、湛水面上下の茎、胚軸、主根、側根、不定根および根粒に一貫した通気系が形成されるのに対し、ダイズにはほとんど認められない (有門 1953, Arikado 1954)。ツルマメに見られるこの通気組織は、多量の空隙を持った白色スポンジ状の組織からなり、二次分裂組織（コルク形成層）から形成されるため、二次通気組織と呼ばれている (Williams and Barber 1961, 有門 1975, Jackson and Armstrong 1999)。同様の組織は、いくつかのマメ科植物 (Walker ら 1983, Loureiro ら 1994, James and Crawford 1998, James and Sprent 1999) やミソハギ科植物 (Stevens ら 1997, Lempe ら 2001) にも認められており、耐湿性や湛水耐性と密接な関係があると報告されている。

ところが、近年望月ら (2000) は、湛水条件下で胚軸や主根基部に多量の二次通気組織を発達させるダイズ品種を

見出している。しかしながら、この報告は幼植物期についてみたものであり、これらの品種が湛水下で生育を全うし、収穫まで至るのかどうか、またこのとき胚軸や主根、あるいは不定根や根粒にも通気組織が形成されているかどうかは不明である。

そこで本研究では、幼植物期において二次通気組織が良く発達することが明らかにされているダイズ品種 (島村ら 2001) を用い、湛水条件下における通気組織の形成経過を調査するとともに、乾物重の推移および子実収量を調査し、湛水田におけるダイズ栽培の可能性について検討した。

材料と方法

幼植物期において、湛水条件下で二次通気組織が良く発達するダイズ品種アソアオガリ (島村ら 2001) を供試した。

1. ポット栽培試験 (実験 1)

実験は 2000 年に九州大学農学部附属農場内の温室内で行った。7 月 11 日に風乾して篩 (1×1 cm 目) を通した水田土壌 (埴壤土: 粗砂 13.9%, 細砂 27.2%, シルト 34.3%, 粘土 24.6%) を充填したポット (直径 15.9 cm, 高さ 19 cm) に 3 粒播種し、3 cm の覆土を行った。基肥としてポット当たり化成肥料 1.6 g (3% N, 10% P₂O₅, 10% K₂O) と消石灰 2.4 g を施用した。窒素成分はアンモニア態窒素であった。出芽後間引いて 1 株 1 本立てとし、初生葉展開時 (7 月 20 日) にポットを 2 群に分け、1 群は湛水条件 (対照区)、他の 1 群は水を張ったコンテナ (69×37×27 cm) に移し (コンテナ当たり 6 ポット)、水位を土壌表面上約 3 cm に保つ湛水条件 (湛水区) とした。処理開始後、1, 2, 3, 6, 9, 12 週間目および収穫期にそれぞれ 8 株を採取し、調査に供した。まず、胚軸

(土壌表面上 0.5~2.5 cm), 主根 (基部から 4~5 cm), 不定根 (胚軸から発根した最長の不定根の基部から 4~5 cm) および根粒 (直径 2 mm 以上) を採取し, 直ちにそれぞれの横断切片 (株当たり各部位 5 切片, 厚さ 100~200 μm) をプラントミクロトーム (MTH-1, 日本医化器械製作所製) で作成し, 実体顕微鏡下で観察した. この際, 固定や染色は行わなかった. 土壌表面上 0.5 cm から 2.5 cm 部の胚軸については Jensen ら (1969) の方法を改良したピクノメーター法 (上埜 1994) によって, 次式に基づいて空隙率を測定した.

$$\text{空隙率 (\%, v/v)} = [(A-B)/(C+D-B)] \times 100$$

ここで, A は脱気 (減圧下で空隙のガスを水で置換すること) した材料を入れて水で満たした比重ビンの重さ, B は脱気前の材料を入れて水で満たした比重ビンの重さ, C は水で満たした比重ビンの重さ, D は脱気前の材料の重さを示す. なお, 比重ビンに材料を入れて水を満たしたときに付着する気泡を超音波洗浄機により取り除く作業を行った.

また, 株ごとに処理開始後 3 週間目までは初生葉を含む全ての主茎節複葉, 6 週間目から 12 週間目までは無作為抽出した 10 枚の複葉の葉色値を葉緑素計 (SPAD-502, ミノルタ社製) で測定し, 複葉当たりの平均葉色値を算出した. その後, 80 $^{\circ}\text{C}$ で 2 日間風乾し, 器官別乾物重を測定した. 収穫期には収量および収量関連形質を調査し, さらに 1 株につき 30 粒の子実を粉碎し, ケルダール法で全窒素を測定して, その値に 5.71 を乗じて子実中のタンパク質含有率を算出した.

2. 圃場栽培試験 (実験 2)

実験は 2001 年に九州大学農学部附属農場のコンクリート枠水田圃場 (埴壤土: 粗砂 13.9%, 細砂 27.2%, シルト 34.3%, 粘土 24.6%) で行った. 7 月 4 日に 1 株 3 粒播種し, 出芽後間引いて 1 本立てとした. 栽植密度は 52 cm \times 20 cm (9.6 株/m 2 : 標準植) および 25 cm \times 14 cm (28.6 株/m 2 : 密植) の 2 水準とした. 基肥として化成肥料 80 g/m 2 (3% N, 10% P $_2$ O $_5$, 10% K $_2$ O) と消石灰 120 g/m 2 を与え, 密植区では追肥として硝安 20.1 g/m 2 を 7 月 29 日に施用した. 試験区として灌水標準植区 (対照区), 灌水標準植区および灌水密植区の 3 区を設け, 1 区 3.15~5.2 m 2 の 2 反復とした. いずれの区においても中耕, 培土を行わず, 他の管理作業は慣行に準じた. 灌水処理 (土壌表面上約 3 cm まで灌水) は 7 月 19 日から開始し, 黄葉期まで継続した. 処理開始後 1 週間おきに, 1 区当たりボーダーを除いた 10 株の草丈 (処理開始後 7 週間目まで), 草高 (処理開始後 8 週間目から) および上位 3 葉目の葉色値を測定した. 収穫期には各区 15 株の倒伏角度と茎径を測定し, 生育中庸な株 (14 株以上) をサンプリングして, 収量および収量関連形質を調査した. 茎重については 80 $^{\circ}\text{C}$ 2 日間風乾後, 測定した.

結 果

実験 1 および 2 ともに, 常時湛水条件下においてもダイズは生育途中で枯死することなく収穫まで至った.

1. 二次通気組織の形成経過 (実験 1)

対照区では, 生育期間を通じて胚軸, 主根, 不定根および根粒のいずれにおいても二次通気組織は全く形成されないうち, 形成されても極わずかであった (第 1 図). 一方, 湛水区では, 二次通気組織は処理開始後 1 週間目には胚軸, 主根基部および根粒に, 3 週間目には不定根に観察された (第 2 図). いずれの部位においても生育途中で二次通気組織の形成が停止したり, 組織が崩壊することはなく, 生育に伴って形成量は増加した (第 3 図).

胚軸における空隙率の推移をみると, 対照区では生育初期には 10% 前後であったが, 生育にともなって低下し, 処理開始後 12 週間目にはわずか 2.9% であった (第 4 図). 一方, 湛水区では処理開始後 1 週間目には約 25% で, その後生育期間を通じて 30% 前後で経過した.

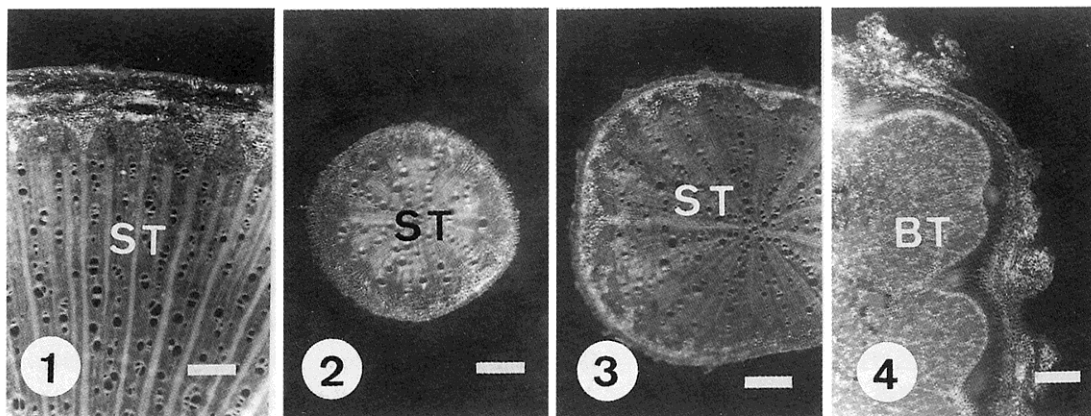
2. 湛水条件下におけるダイズの生育と収量

1) ポット栽培試験 (実験 1)

第 1 表に示すように, 器官別乾物重は処理開始後 1 週間目の茎重を除き, 常に湛水区より対照区で高かった. 地上部重は, 処理開始後 1 週間目までは処理間に大きな差はなかったが, 生育に伴って処理間の差は拡大し, 12 週間目の湛水区/対照区比は約 25% にまで低下した. 湛水の影響は地上部より根に早く認められ, 根重の湛水区/対照区比は処理開始後 1 週間目で約 50% であった. しかしながら地上部重と異なり, 生育が進んでもその差は拡大せず, 12 週間目においても約 60% であった. また, 葉色値 (SPAD 値) は, 対照区では生育期間を通じて 35 前後で推移したのに対し, 湛水区では 30 未満で, 生育後期には大きく低下した (第 1 表). 収量および収量関連形質についてみると, 主茎長と 1 英稔実粒数を除く調査した全ての形質において, 湛水区は対照区に対して 1% ないし 5% 水準で有意に小さく, 湛水区の子実収量は 9.5 g で, 対照区 44.1 g の約 20% であった (第 2 表). 収量構成要素のうち湛水区/対照区比が最も小さかったのは総節数の 45%, 次いで 1 節稔実英数 53%, 百粒重 86%, 1 英稔実粒数 105% の順で, 湛水区の低い収量は植物体の小型化による総節数と 1 節稔実英数の低下によることが明らかであった. また子実中のタンパク質含有率も対照区の約 80% であった (第 2 表).

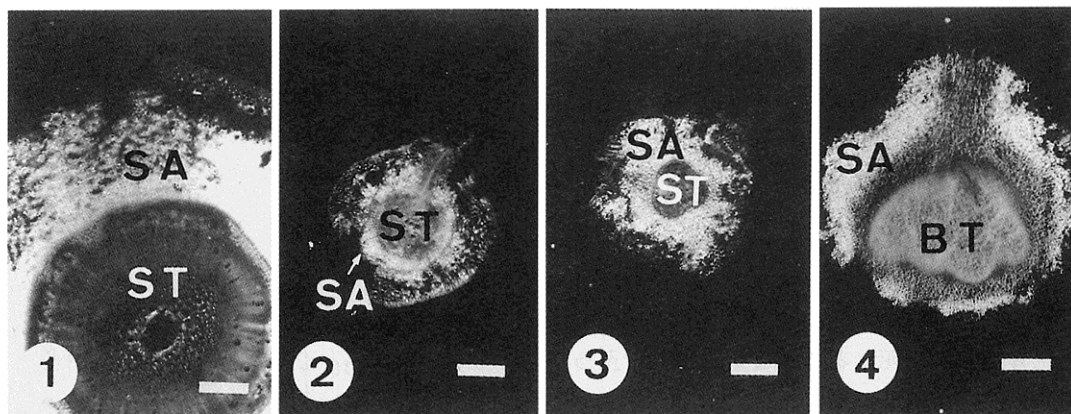
2) 圃場栽培試験 (実験 2)

圃場試験では, 葉色値に対する湛水の影響は処理開始後 2 週間目から認められ, 灌水密植区では追肥によって回復が早く, 生育中期までは灌水標準植区よりも高かったが, 両区とも対照区よりも常に低く経過した (第 5 図). また,



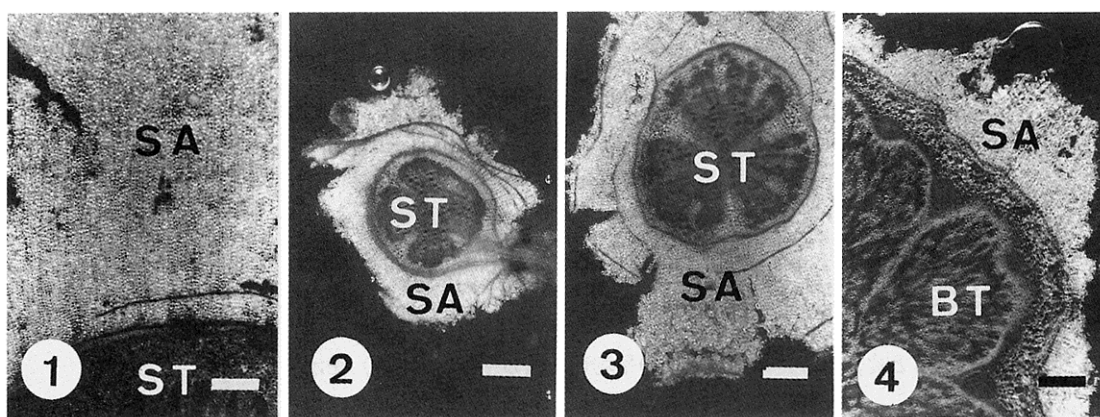
第1図 処理開始後12週間目における湛水区の胚軸，主根，不定根および根粒の横断面。

1. 胚軸，2. 主根，3. 不定根，4. 根粒。BT：バクテロイド組織，ST：中心柱。図中の横棒の長さは0.4 mmを示す。



第2図 湛水区におけるダイズ幼植物の胚軸，主根，不定根および根粒の横断面。

1. 胚軸（処理開始後1週間目），2. 主根（処理開始後1週間目），3. 不定根（処理開始後3週間目），4. 根粒（処理開始後1週間目）。BT：バクテロイド組織，SA：二次通気組織，ST：中心柱。図中の横棒の長さは0.4 mmを示す。



第3図 処理開始後12週間目における湛水区の胚軸，主根，不定根および根粒の横断面。

1. 胚軸，2. 主根，3. 不定根，4. 根粒。BT：バクテロイド組織，SA：二次通気組織，ST：中心柱。図中の横棒の長さは0.4 mmを示す。

生育後期（処理開始後13週間目以降）の葉色値の低下程度も湛水の両区で大きかった。草丈および草高の推移をみると，処理開始後7週間目までの草丈は対照区が最も高

く，次いで湛水密植区，湛水標準植区の順であった。処理開始後8週間目頃から倒伏が起これ始め，草丈の測定が困難になったため草高を測定したが，対照区では倒伏程度が

最も大きかったために、草高は最も低くなった (第6図)。収穫期における倒伏角度をみると、対照区の50.9度に対し、湛水標準植区11.9度、湛水密植区35.9度であった (第3表)。株当たりの収量および収量関連形質をみると、主茎節数、1莢稔実粒数および百粒重を除いた形質には試験区間に差が認められ、子実収量は対照区の37.1 g/株に対して湛水標準植区では21.9 g/株、湛水密植区では10.7 g/株であった (第4表)。しかしながら、湛水標準植区および湛水密植区の対照区比はそれぞれ約60%および30%で、ポット栽培試験の湛水区/対照区比約20%に比べて高かった。ポット栽培試験と同様、湛水による株当たり子実収量の低下は、主に総節数と1節稔実莢数の減少によるものであった。第5表には単位面積 (m²) 当たりの収量および収量関連形質を示した。反復数が少ないこともあり、ほとんどの形質に有意差が認められなかったが、総節数は明らかに湛水密植区で大きく、対照区をも上回った。その結果、湛水密植区では対照区と同程度の稔実粒数が得られ、子実収量は300 g/m²以上 (対照区比86%) であった。

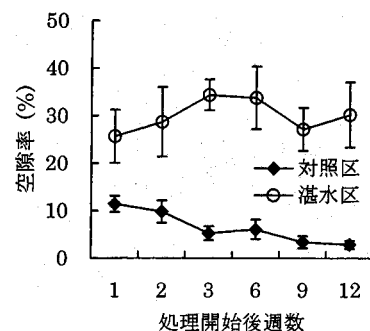
考 察

ダイズは7日間程度の一時的な湛水によっても枯死することがあり (松川ら 1983)、常時湛水条件下では収穫まで至らないとされていたが (Arikado 1954)、本実験では湛水条件下でも生育途中に枯死することなく収穫まで至った。

氾濫原に生育し、耐湿性が高い *Viminaria juncea* は、湛水条件下で二次通気組織を速やかに発達させるが、湛水後21週間目の茎、根および根粒の空隙率がそれぞれ32%、33%および12%であるのに対し、非湛水では2%、

7%および4%と極めて低い (Walkerら 1983)。このように、二次通気組織は空隙率を高めるのに有効な形態形成であるとされており (Walkerら 1983, Stevensら 1997)、本実験においても湛水区の高い空隙率は二次通気組織の形成によることが明らかであった (第4図)。

ツルマメ (有門 1953, Arikado 1954), *Sesbania rostrata* (Saraswatiら 1992), *Viminaria juncea* (Walkerら 1983), *Discolobium pulchellume* (Loureiroら 1994) および *Lotus uliginosus* (James and Crawford 1998, James and Sprent 1999) などのマメ科植物は、湛水条件下で茎、胚軸、根および根粒に多量の二次通気組織を発達させることによって耐湿性を高めているものと考えられている。また、ダイズの胚軸部位における二次通気組織の形成量は他のマメ科作物に比べて大きく、耐湿性程度と密接な関係がある (望月ら 2000)。胚軸に発達した二次通気組織は大気と直接接していることから、植物はこの組織を通じて大気を取り込み、地下部組織に供給していると考えられている (有門ら 1990)。実際にダイズの胚軸表面にワセ



第4図 胚軸における空隙率の推移。
図中の縦棒は標準偏差 (n=8)。

第1表 器官別乾物重および葉色値の推移 (ポット栽培試験)。

処理後 週数	茎 (g/株)		葉 (g/株)		莢 (g/株)		根 (g/株)		全体 (g/株)		葉色値 (SPAD値)	
	対照区	湛水区	対照区	湛水区	対照区	湛水区	対照区	湛水区	対照区	湛水区	対照区	湛水区
1	0.22	0.30	0.43	0.36	—	—	0.23	0.12	0.87	0.78	34.1	28.2
2	0.99	0.71	1.38	0.77	—	—	0.66	0.44	3.02	1.92	37.4	28.1
3	3.56	1.54	3.90	1.67	—	—	1.96	1.02	9.42	4.23	31.4	28.1
6	20.22	6.21	17.01	5.01	—	—	8.03	3.80	45.26	15.02	35.5	25.4
9	33.84	10.37	27.35	9.04	3.24	2.17	10.50	5.70	74.93	27.27	36.6	21.4
12	41.55	10.96	33.42	8.48	55.04	10.62	12.60	7.62	142.61	37.68	34.8	22.9

数値は平均値 (n=8)。

葉色値は株ごとに算出した複葉当たりの平均葉色値の平均値 (8株) を示す。

第2表 収量および収量関連形質 (ポット栽培試験)。

試験区	主茎長 (cm)	主茎節数 (節/株)	総節数 (節/株)	分枝数 (本/株)	1節稔 実莢数	1莢稔実 粒数	子実収量 (g/株)	百粒重 (g)	茎重 (g/株)	粒重比	子実中のタンパク質含有率 (%)
対照区	165.7	20.5	107.9	9.4	1.9	2.0	44.1	11.8	21.4	2.1	43.6
湛水区	176.6	18.8	48.3	4.0	1.0	2.1	9.5	10.1	5.5	1.8	34.4
t検定	ns	*	**	**	**	*	**	**	**	**	**

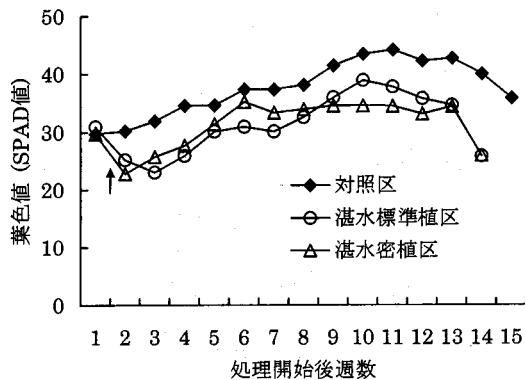
ns: 有意差なし。**, *: 1%, 5%水準でそれぞれ有意差あり。

数値は平均値 (n=17)。

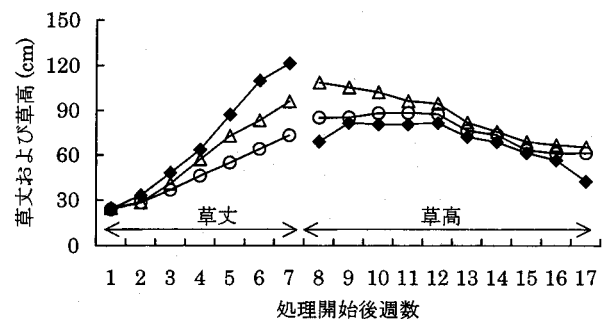
リンを塗布してこの部分からの大気を取り込みを遮断すると、根の生育量（島村ら 2000）や根粒活性（Shimamura ら 2002）は顕著に低下する。従って、本実験に供試したダイズ品種アソアオガリが常時湛水条件下においても生育を全うできたのは、本品種が二次通気組織を速やかに形成し、生育後期まで維持したためではないかと推測される（第1, 2, 3 図）。

ダイズの葉内窒素含有量は葉色値と正の相関関係があり（杉本 1994）、光合成速度および生育量と密接な関係があるとされている（Sinclair and Horie 1989）。本実験では、湛水区の葉色値は対照区より低く（第1表、第5図）、光

合成速度の低下によって、植物体が小型化したものと推測される。従って、湛水条件でダイズを栽培する場合、光合成速度を高く維持するために葉色値を生育後期まで高く維持すること、すなわち、葉内窒素含有量を向上させることが重要であると思われる。杉本（1994）は湛水処理によって低下した葉色値を回復するには、比較的速やかに吸収されて利用される尿素的葉面散布が有効であると報告している。また、畑条件下で散布すると根粒重の増加程度は無散布より相対的に小さいが、根粒重は生育に伴って増加し、根粒重当たりの活性量は無散布のものと同程度であるとしている（杉本 1994）。湛水条件下においても活性のある根粒が着生することから（Shimamura ら 2002）、尿素的葉



第5図 葉色値の推移（圃場栽培試験）。
図中の矢印は追肥時期を示す。



第6図 草丈および草高の推移（圃場栽培試験）。
図中の記号は第5図と同じ。

第3表 収穫期における倒伏角度および
茎径（圃場栽培試験）。

試験区	倒伏角度	茎径 (mm)
対照区	50.9 ± 1.4	7.9 ± 0.2
湛水標準植区	11.9 ± 5.6	6.7 ± 0.2
湛水密植区	35.9 ± 6.1	5.7 ± 0.2

数値は平均値±標準偏差（n=2）。
倒伏角度は垂直方向に対する主茎基部の角度で、値が大きいほど倒伏が著しいことを示す。
茎径は子葉節と初生葉節の茎中央部の長・短直径の相加平均。

第5表 単位面積（m²）当たりの収量および収
量関連形質（圃場栽培試験）。

試験区	総節数 (節/m ²)	稈実莢数 (莢/m ²)	稈実粒数 (粒/m ²)	子実収量 (g/m ²)
対照区	963 ±18.4	1666 ±81.5	2877 ±79.8	357 ±37.8
湛水標準植区	643 ±17.0	1069 ±48.0	1959 ±23.2	211 ±12.5
湛水密植区	1389 ±190.0	1488 ±445.5	2725 ±983.9	306 ±88.1
F検定	*	ns	ns	ns

数値は平均値±標準偏差（n=2）。
ns：有意差なし。*：5%水準で有意差あり。

第4表 株当たりの収量および収量関連形質（圃場栽培試験）。

試験区	主茎長 (cm)	主茎節数 (節/株)	総節数 (節/株)	分枝数 (本/株)	1節稈 実莢数	1莢稈 実粒数	子実収量 (g/株)	百粒重 (g)	茎重 (g/株)	粒茎比
対照区	126.1 ±7.3	21.1 ±0.0	100.2 ±1.9	7.5 ±0.4	1.7 ±0.1	1.7 ±0.1	37.1 ±3.9	12.5 ±1.7	22.7 ±1.1	1.6 ±0.1
湛水標準植区	74.0 ±2.3	18.4 ±1.1	66.8 ±1.8	3.8 ±0.0	1.7 ±0.0	1.8 ±0.1	21.9 ±1.3	11.1 ±0.5	11.5 ±0.6	1.9 ±0.0
湛水密植区	106.4 ±5.7	19.7 ±0.2	48.6 ±6.7	2.3 ±0.5	1.1 ±0.2	1.8 ±0.1	10.7 ±3.1	11.9 ±1.0	8.5 ±1.6	1.3 ±0.1
F検定	*	ns	**	**	*	ns	*	ns	**	*

数値は平均値±標準偏差（n=2）。
ns：有意差なし。*, **: 1%および5%水準でそれぞれ有意差あり。
主茎長、主茎節数および分枝数の数値は、虫害等によって茎頂に被害が認められた個体を除いて算出した。

面散布は効果的な追肥方法であると思われる。また、湛水条件下で形成される新しい根系は土壌表面に発達するため、根は土壌深層中の基肥養分を吸収することができなくなると推測される。従って、湛水条件下で生育するダイズの生理・生態に適するような肥料形態や施肥量、施肥法などを検討する必要があると考えられる。

株当たりの子実収量は、ポットおよび圃場栽培ともに湛水によって低下したが、収量構成要素の中では1 莢稔実粒数と百粒重への影響は比較的小さく、植物体が小型化して分枝数が減り、総節数が減少したこと、1 節稔実英数が減少したことが主な要因であった(第2, 4表)。しかしながら、栄養生長量の湛水区/対照区比はポット栽培の孤立条件に対し、圃場栽培の群落条件下で大きく、さらに湛水条件においても密植栽培を行うことで、単位面積当たりの総節数と稔実英数、稔実粒数が確保され、300 g/m²以上の収量が得られた(第5表)。面積当たりの収量は、総節数や英数との間に正の相関関係があることが知られていることから(Parvezら1989)、密植栽培は常時湛水条件下で収量を高めるのに有効な栽培様式であった。一方、湛水による植物体の小型化は倒伏の軽減に効果が認められ、密植は逆に倒伏を助長した(第3表)。従って単純に栽植密度を高めるだけでなく、倒伏程度が小さく、良好な受光態勢を保ち、かつ総節数を高めるような最適な栽植密度を明らかにする必要がある。

ダイズ品種間における二次通気組織の形成量と耐湿性程度との関係については未だ不明な点が多い。両者の関係を明らかにすることは今後の課題であり、このことにより耐湿性や湛水耐性が強い品種の選抜や育成が可能になるものと思われる。

引用文献

- 有門博樹 1953. 野生大豆の通気組織. 日作紀 21: 267—268.
- Arikado, H. 1954. Different responses of soybean plants to an excess of water with special reference to anatomical observations. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 23: 28—36.
- 有門博樹 1975. 通気組織系と作物の耐湿性. オリエンタル印刷, 三重. 1—149.
- 有門博樹・池田勝彦・谷山鉄郎 1990. 水稻における通気組織と通気組織系の関する解剖学的ならびに生態学的研究. 三重大生物資源紀要 3: 1—24.
- Jackson, M.B. and W. Armstrong 1999. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. Plant Biol. 1: 274—287.
- James, E.K. and R.M.M. Crawford 1998. Effect of oxygen availability on nitrogen fixation by two *Lotus* species under flooded conditions. J. Exp. Bot. 49: 599—609.
- James, E.K. and J.I. Sprent 1999. Development of N₂-fixing nodules on the wetland legume *Lotus uliginosus* exposed to conditions of flooding. New Phytol. 142: 219—213.
- Jensen, C.R., R.J. Luxmoore, S.D. Van Gundy and L.H. Stolzy 1969. Root air space measurements by a pycnometer method. Agron. J. 61: 474—475.
- Lempe, J., K.J. Stevens and R.L. Peterson 2001. Shoot responses of six Lythraceae species to flooding. Plant Biol. 3: 186—193.
- Loureiro, M.F., S.M. de Faria, E.K. James, A. Pott and A.A. Franco 1994. Nitrogen-fixing stem nodules of the legume, *Discolobium pulchellum* Benth. New Phytol. 128: 283—295.
- 松川勲・谷村吉光・寺西了・番場宏治 1983. 大豆の耐湿性に関する研究—湛水条件下における品種間差異—. 北海道立農試集報 49: 32—40.
- 望月俊宏・高橋卯雪・島村聡・福山正隆 2000. 数種夏作マメ科作物の胚軸における二次通気組織の形成. 日作紀 69: 69—73.
- Parvez, A.Q., F.P. Gardner and K.J. Boote 1989. Determinate- and indeterminate-type soybean cultivar responses to pattern, density, and planting date. Crop Sci. 29: 150—157.
- Saraswati, R., T. Matoh and J. Sekiya 1992. Nitrogen fixation of *Sesbania rostrata*: contribution of stem nodules to nitrogen acquisition. Soil Sci. Plant Nutr. 38: 775—780.
- 島村聡・望月俊宏・福山正隆 2000. 湛水条件下でダイズの胚軸に形成される二次通気組織の機能. 日作紀 69 (別1): 66—67.
- 島村聡・望月俊宏・福山正隆 2001. 湛水条件下においてダイズの胚軸に形成される二次通気組織量の品種間差異. 九大農場研究報告 10: 13—18.
- Shimamura S., T. Mochizuki, Y. Nada and M. Fukuyama 2002. Secondary aerenchyma formation and its relation to nitrogen fixation in root nodules of soybean plants (*Glycine max*) grown under flooded conditions. Plant Prod. Sci. 5: 294—300.
- Sinclair, T.R. and T. Horie 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. Crop Sci. 29: 90—98.
- Stevens, K.J., R.L. Peterson and G.R. Stephenson 1997. Morphological and anatomical responses of *Lythrum salicaria* L. (purple loosestrife) to an imposed water gradient. Int. J. Plant Sci. 158: 172—183.
- 杉本秀樹 1994. 水田転換畑におけるダイズの湿害に関する生理・生態学的研究. 愛媛大学農学部紀要 39: 75—134.
- 上埜喜八 1994. 根の通気組織形成量の測り方. 根の研究 3: 121.
- Walker, B.A., J.S. Pate and J. Kuo 1983. Nitrogen fixation by nodulated roots of *Viminaria juncea* (Schrad. & Wendl.) Hoffmans. (Fabaceae) when submerged in water. Aust. J. Plant Physiol. 10: 409—421.
- Williams, W.T. and D.A. Barber 1961. The functional significance of aerenchyma in plants. Symp. Soc. Exp. Biol. 15: 132—144.

Secondary Aerenchyma Formation, Growth and Yield of Soybean Plants Grown under Continuously Flooded Conditions : Satoshi SHIMAMURA*, Toshihiro MOCHIZUKI, Youichi NADA and Masataka FUKUYAMA (*Grad. Sch. of Bioresour. Bioenviron. Sci. Kyushu Univ., Kasuya 811-2307, Japan*)

Abstract : In order to investigate the possibility of cultivating soybeans in a flooded paddy field, we examined the secondary aerenchyma formation, growth and yield of soybean variety 'Aso aogari', which forms secondary aerenchyma well, under flooded conditions. Plants were irrigated as occasion demanded or continuously flooded up to 3 cm above the soil surface after the primary leaf expanded. The flooded plants could grow until harvest. The secondary aerenchyma was observed in the hypocotyl, tap root, adventitious roots and nodules of flooded plants in the early growth stage, and its volume increased as plants grew older, although it was rare in the irrigated plants. Hypocotyl porosity of flooded plants was higher than that of irrigated plants throughout the growth period. In the pot experiment, flooding decreased the growth and grain yield per plant. In the field experiment, however, flooded plants under dense planting had the same number of ripening pods and seeds per unit area as irrigated plants had, and grain yield was over 300 g/m². These results suggested that the variety grew until harvest under flooding forming secondary aerenchyma quickly and maintaining the ventilation system until the late growth stage. Soybean cultivation in the flooded paddy field would be feasible.

Key words : Aeration system, Flooded paddy field, Flooding stress, Grain yield, Plant growth, Root system, Secondary aerenchyma, Soybean.
