

水耕栽培における養液流量が植物生長
(*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* ‘Seiyou Shirokuki’)
に与える影響および養液流れ場の可視化

[Effect of Flow Rate on Plant Growth
(*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* ‘Seiyou Shirokuki’)
and Visualization of Nutrient Solution Flow Field
in Hydroponics]

BAIYIN BATEER

2022

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 先行研究	3
1.3 研究目的	6
1.4 本論文の構成	7
第2章 植物生長と養液流れ場	8
2.1 方法と材料	9
2.1.1 栽培方法	9
2.1.2 測定項目と測定方法	13
2.1.3 養液流れ場の可視化方法	14
2.1.4 統計処理	20
2.2 結果	21
2.2.1 植物生長と養分吸収	21
2.2.2 養液流れ場の平均速度・渦度分布	23
2.3 考察	30
2.4 要約	34
第3章 植物生長と根の形態形成	35
3.1 方法と材料	36
3.1.1 栽培方法	36
3.1.2 測定項目と測定方法	40
3.1.3 統計処理	41
3.2 結果	42
3.2.1 植物生長と養分吸収	42

3.2.2 根の形態とセルロース・ヘミセルロース含有量	44
3.3 考察	47
3.4 要約	49
第4章 植物生長と養分利用	50
4.1 方法と材料	51
4.1.1 栽培方法	51
4.1.2 測定項目と測定方法	52
4.1.3 統計処理	54
4.2 結果	55
4.2.1 植物生長	55
4.2.2 養分吸収	57
4.2.3 植物生長と養分吸収の相関	59
4.2.4 養分利用効率	59
4.3 考察	63
4.4 要約	65
第5章 総合考察	66
第6章 摘要	71
第7章 SUMMARY	75
引用文献	79
謝辞	86
論文目録	87

第1章 緒論

1.1 研究背景

乾燥地は世界の全陸地面積の41%を占めており、世界人口の約1/3以上の人々が生活している。また、乾燥地には多くの開発途上国が含まれており、人口増加、貧困、食料・水不足などの問題を抱えている。このような社会状況において、干ばつなどの異常気象や、土地の不適切な利用・管理、家畜の過放牧、樹木の過伐採などの人為的活動が重なることで、乾燥地の砂漠化が深刻となっている[1]。砂漠化の進行は、乾燥地の食料安全保障を崩壊させ、飢餓や貧困を拡大させるだけでなく、社会的、経済的、政治的緊張による地域紛争も新たに発生し、これらの被害が重なることで砂漠化がさらに進行するという負のスパイラルを形成する。砂漠化対処条約（UNCCD）では、砂漠化問題の解決に向けて、自然環境の回復、生活環境の改善、および土壌・水資源の保全と管理が重要であると記されている[2]。また、そこに暮らす人々へ安定的に食料を供給するための技術開発や施策導入も、乾燥地の諸問題の解決の糸口となることが指摘されている[3]。

持続的な食料生産を実現するためには、乾燥地の自然環境や社会・経済環境に応じた改善策や知恵・工夫が必要である。特に、開発途上国の農村部では、経済的余裕がなく、適度な教育を受けていない農民が多く暮らしている。このような状況にある現地農民が実現できる農業生産技術は、先進的で複雑なものではなく、安価かつ簡易で、さらには自然環境の保全にも資することが求められる[4]。このような前提のもとで、現有する資源を最大限に利用した持続可能な食料生産を実現することが期待されている。

世界的に広がりを見せている無土壌栽培（Soilless culture）は自然土壌以外の栽培基質（バーミキュライト、ロックウール、人工培養液など）を利用することで、農業に不適切な地域あるいは土地での植物生産に重要な役割を果たしている。特に、栽培基質として培養液を用いる水耕栽培（Hydroponics）では、植物の

根を培養液に浸し、生育に必要な水、養分、および酸素を根から吸収させるので、効率的な資源利用と安価で高品質な植物生産が期待でき[4-5]、資源と水が不足している乾燥地においても有用かつ革新的な植物生産技術として認められている[6]。また、温室などの農業施設や建物内における水耕栽培では、光、温度、湿度、二酸化炭素濃度などの地上部の栽培環境と、液温、pH、電気伝導率（EC）、溶存酸素濃度（DO）、組成などの養液環境を同時に管理できるので、環境制御型農業[7-8]の一種として注目されている。このような利点を生かして、生育に最適な栽培環境のもとで計画的かつ持続的に植物を生産できることから、開発・導入が進む植物工場では水耕栽培方式が主流となっている[9-12]。

水耕栽培では、栽培基質である培養液が流動する。従来の土壌栽培の場合、植物の栄養となる無機イオンは、マスフロー、拡散および接触による 3 つの過程によって、土壌粒子の表面から根の表面へ移動する[13]。土壌粒子に付着した無機イオンは毛管水に溶解したのち、主にそのマスフローによって移動するが、土壌中の毛管水の流速が小さいため、その移動量も少ない。一方、水耕栽培ではポンプによる培養液の循環と酸素供給のためのエアレーションが行われるので、培養液は常に流動しており、その流速は土壌の毛管水の約 1,000 倍に達すること[14-15]もある。このことが培養液中の無機イオンの移動促進と溶存酸素濃度の上昇[16]をもたらし、植物による吸収量と収量の増加につながる[17]ことも指摘されている。このようなことから、水耕栽培における培養液の流量を適切に設定することが、植物の生長を促進し、その収量を増大させる有用な方法の 1 つとして期待されている。

1.2 先行研究

水耕栽培における植物の生長に与える培養液特性（pH, 液温, 電気伝導度, 溶解酸素濃度, 組成および濃度）の影響について, 数多くの研究報告がなされてきた[例えば, 8-11]が, 養液流量が植物の生長や養分吸収に与える影響については, いくつかの研究報告があるのみである。

Genuncio ら[18]は, 各養液流量 (0.75, 1.0, 1.5 L/min) で, レタス 3 品種 (「ルーシーブラウン」, 「イザベラ」, 「ベネザロクサ」) を栽培し, その新鮮重を比較した結果, 培養液の濃度設定との組み合わせにもよるが, 1.5 L/min の場合に「イザベラ」と「ベネザロクサ」の新鮮重が最大となることを示した。Al-Tawaha ら[19]は, 各養液流量 (10, 20, 30 L/min) におけるレタスの生育調査を行い, 20 L/min の場合にレタスの乾物重が最大となることを報告した。また, Dalastral ら[20]は, 4 つの養液流量 (0.5, 1, 2, 4 L/min) のもと水耕栽培実験を行い, レタスの収穫量に加えて養分吸収量を測定した。その結果, 1 L/min において, レタス 1 株当たりの最大生産量が得られ, その場合に地上部での養分蓄積が大きく, 養分利用効率も高くなることを明らかにした。Soares ら[21]は, 塩水を用いて調整した培養液について, 2 つの流量 (1.5, 2.5 L/min) を設定して実験を行った結果, 1.5 L/min の条件で得られた地上部の新鮮重と乾物重, 葉面積, 葉数, 草丈, および茎の直径が有意に大きくなったことを報告している。

また, 水耕栽培と水産養殖を組み合わせたアクアポニックスについても, 植物の生長に対する養液流量の影響が検討されている。Nuwansi ら[22]は, ホウレンソウを対象にして各養液流量 (0.8, 2.4, 4 L/min) で試験した結果, 0.8 L/min の場合に草丈の増加率および収量が最大となったこと, 培養液の水質分析結果から, 養液流量の増加に伴って窒素 (N), リン (P), カリウム (K) の濃度が減少したことを報告している。Endut ら[17]はアクアポニックスにおける養液流量 (0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0) がホウレンソウの生長に及ぼす影響を調査し, 1.6 L/min の場合の草丈が最大となったことから, 養液流量が植物生長に影響を及ぼすことを指摘している。Khater ら[23]は, アクアポニックスの NFT 式水耕栽培において,

レタスの生長に対する養液流量 (1, 1.5, 2 L/min) および流路長さ (2, 3, 4 m) の影響を調査し、地上部の新鮮重と乾物重、および根の乾物重が養液流量および流路長さの増加とともに減少することを示した。また養分吸収に関しては、培養液の水質分析から、各栄養素 (N, P, K) および硝酸態窒素 (NO₃-N) 含有量が養液流量および流路長さの増加とともに減少することも報告した。ここまで述べたように、水耕栽培における植物の生長や養分吸収が養液流量の影響を受けることが明らかになりつつあるが、これらに関連する研究報告は未だ数少なく、生長要因や養分吸収メカニズムに関する知見は十分に蓄積されていない。

培養液中にある根から吸収される水分、栄養素、および酸素の量は、根表面と接触する培養液の流動状態の影響を受けると考えられる。特に、栄養素の吸収に関しては、流量の大きさによって根表面に形成される培養液の栄養境界層 (Nutrient depletion zone) の厚みが増加し、培養液の循環流による無機イオンと根表面との接触頻度も変化すること [17] が指摘されている。また、根系周囲における培養液の物理的・化学的特性は、その流動状態によっても複雑に変化する [24]。根は、培養液の流れに曝されていることから、培養液の流動性も植物生長にかかわる養液環境としてとらえることができる [25-26]。

さらに、培養液の流動状態は、根に物理的な刺激 (動圧, 摩擦抵抗など) を与えている [27] ものと考えられる。植物の根細胞は、複雑な組成の細胞外マトリックスである半硬質の細胞壁に包まれている。細胞壁は主に炭水化物とフェノール化合物で構成されているが、細胞壁に結合したさまざまなタンパク質も多数含まれている。その中で、セルロースマイクロフィブリルは、膨圧に抵抗する主要な耐荷重要素であり [28]、マイクロフィブリルの配向の変化が、細胞の形状、機械的ストレス、および組織構造の変化と相関することが報告されている。植物の細胞壁は、結晶性のセルロース微繊維が骨格となり、その合間を埋めるようにヘミセルロースやペクチン、蛋白質、リグニン、スベリンなどのマトリックス性の高分子化合物が配置され、それらの間は、水素結合やイオン結合、時には共有結合で連結され、細胞壁全体が一種の超分子のような構造になっている [29]。細胞壁のセルロースによる足場は、ペクチンやヘミセルロースなどの多糖類でできた

マトリックスに関与しており、その種類と比率は、種、組織、さらには細胞の種類によって異なる。細胞壁成分の合成およびそれらの間の相互作用の制御は、この構造に高い可塑性を与える[30]。このような機能をもつ根（すなわち細胞壁）に培養液の流れが絶えず衝突することを考えると、異なる養液流量下における根の生長状態、形態、組成などを明らかにすることも極めて重要となり[26-27]、養液流量が植物生長へ及ぼす影響を解明する基礎的知見となりうる。

以上のことをふまえると、植物の生長や養分吸収に及ぼす養液流量の影響について、植物個体に関する植物栄養学的あるいは生理学的視点に加え[31-34]、根系周りの流れ場を流体力学的な視点から検討することが必要となる[25]。栽培容器内に流入する培養液の流量が同じであっても、栽培容器の大きさや断面形状によって容器内を流れる培養液の流動状態が変化することが考えられ、それに起因する根と無機イオン間の適切な接触時間や衝突頻度の変化も生じるので、結果として植物の生長への影響がもたらされると推察される。しかしながら、前に述べた先行研究では、実験で使用された栽培容器のサイズと形状に関する情報がなく、実際の容器内の培養液の流動状態やそれらを定量的に表す速度分布などが不明瞭であり、植物生長や養分吸収と培養液の流動状態との関連性について全く検討されなかった。このことから、植物の生長や養分吸収に及ぼす養液流量の影響に関する要因を解明するうえでも、栽培容器内の培養液の流動状態と根の挙動を把握することが重要である。一般的な水耕栽培では、栽培容器外部の循環ポンプやバルブなどで調節して、栽培システムの培養液流れの全体流量を設定されており、この流量だけで栽培容器の内部、特に、根域の流れ場を定量的に表すことができない。したがって、流れ場の定量的評価を行うためには、工学的な流体可視化手法を新たに援用する必要がある。

1.3 研究目的

水耕栽培の栽培基質（培養液）は流動性があることから、植物の生長と養分吸収に及ぼす養液流量の影響について調査されているが、それらの報告事例は数少ない状況である。また、水耕栽培で栽培される植物体の器官の中で、根が最初に培養液と接触するにもかかわらず、植物の生長および養分吸収と培養液の流動状態との関連性について検討されておらず、水耕栽培における植物の生長や養分吸収に関する養液流量の影響の要因は未解明である。

本研究では、フダンソウ (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* cv. 'Seiyou Shirokuki') を供試作物として水耕栽培実験を実施し、フダンソウの生長量、根の形態、および養分吸収とその養分利用効率に及ぼす養液流量の影響を明らかにするとともに、工学的手法である粒子画像流速測定法 (PIV) を援用して、養液流れ場を可視化し、培養液の流動状態と根の挙動を定量的に評価する。これらの結果を統合して、フダンソウの生長と養分吸収に及ぼす養液流量の影響を明らかにする。

1.4 本論文の構成

本論文は、全7章から構成されている。

第1章では、水耕栽培における養液流量が植物生長に与える影響に関する研究背景、先行研究、および本研究の目的について説明した。

第2章では、ビニールハウス内の自然光のもと、フダンソウを供試作物として各養液流量の条件下で水耕栽培実験を行い、植物の生長、根の形態、養分吸収量を調査した。また、栽培容器内の養液流れ場を、粒子画像流速測定法を使用して定量的に評価した。これらの結果を用いて、フダンソウの生育および養分吸収に及ぼす養液流量の影響を検討した。

第3章では、屋内栽培室の人工照明のもと、各養液流量におけるフダンソウの水耕栽培実験を実施し、根と新梢の新鮮重と乾物重、根の長さ、表面積および体積、および根のセルロースおよびヘミセルロースの含有量について分析した。その結果から、根の形態形成に及ぼす養液流量の影響について検討した。

第4章では、屋内の人工照明の下でフダンソウの水耕栽培試験を実施し、養液流量が植物の生長と養分吸収、および養分利用効率に与える影響を調査した。各養液流量下でのフダンソウの生長量と養分吸収に関する項目間の相関関係および多量元素に関する養分利用効率の変化について検討した。

第5章では、本論文の各章で得られた結果を総合的に考察した。

第6章および第7章では、本研究で得られた結論を総括した。

第 2 章 植物生長と養液流れ場

本章では、水耕栽培における養液流量が植物の生長および養分吸収に与える影響を水耕栽培試験および養液流れ場の可視化により検討する。

まず、自然光を利用したビニールハウス内において、各養液流量（0, 2, 4, 6, 8 L/min）の条件下でフダンソウの水耕栽培実験を実施し、葉面積、新鮮重、乾物重、根の長さ、および窒素（N）吸収量を調査した。

次に、粒子画像流速測定法（PIV）を用いて、各養液流量における栽培容器内の養液流れ場および根系の挙動を可視化し、養液流れ場の平均速度・渦度分布および根の挙動について検討した。

2.1 方法と材料

2.1.1 栽培方法

水耕栽培システムを図 2-1 および図 2-2 に示す。本システムは、栽培容器 (620 mm length (L) × 375 mm width (W) × 195 mm height (H)) , ポンプ (DC40A, ZKSJ, Shenzhen, China), バルブ, 流量計 (digital flow sensor, Sea Zhongjiang, Guangdong, China) および外部配管 (管内径 18 mm) から構成されている。培養液の流入口と流出口は栽培容器の側壁中央に配置されており, その直径は 18 mm である。培養液はポンプによって栽培容器を循環し, その流量はバルブと流量計で調整することができる。本実験では, 養液流量を 0, 2, 4, 6, 8 L/min と設定した。

培養液については, OAT ハウス肥料 1 号, OAT ハウス肥料 2 号, および水道水 (pH 6.9, EC 0.09 mS/cm) により, OAT ハウス肥料 A 処方の標準培養液を調製した。表 2-1 に OAT ハウス肥料 1 号および 2 号の成分を, 表 2-2 に A 処方の標準培養液の組成と濃度を示す。

本研究の供試作物は, フダンソウ (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* cv. *Seiyou Shirokuki*) である。野菜として食用されるフダンソウは, 株の全体が無毛で, 草丈は葉を含めて 30 cm 程度, 葉幅は 10 cm 程度であり卵型あるいは長卵型の肉厚な葉をもっている。伝統的な自家消費野菜として各地で栽培され, ホウレンソウに似ているが, 比較的季節に関係なく利用できるのも, 不断草ともよばれる[35]。暑さや寒さ, あるいは乾燥といった物理的なストレスに対して強く, 栽培環境の適応性にも優れているので, 乾燥地でもフダンソウは栄養価が高い人気の葉物野菜である[36]。

本章におけるフダンソウの水耕栽培実験を, 2020 年 11 月 4 日~2020 年 11 月 23 日において鳥取大学乾燥地研究センターのビニールハウス (鳥取市浜坂 1390; 35°32' N, 134°12' E) で実施した。まず処理開始前の 2020 年 10 月 22 日において, 湿らせたバーミキュライトで満たされたメッシュベース (470 mm L×330 mm W×80 mm H) のプラスチック容器に種子を播種し, 発芽させた。発芽した 1 週

間後、すべての苗を培養液 30 L (OAT ハウス肥料 A 処方の標準培養液の 0.25 倍濃度; pH 6.5, EC 0.62 mS/cm) で満たされたプラスチック容器 (580 mm L×370mm W×150 mm H) に移植して、培養液の流動が無い状態で 7 日間生長させた。さらに 11 月 4 日にプラスチック容器に移植した苗を水耕栽培容器に定植し、培養液 40 L (OAT ハウス肥料 A 処方の標準培養液の 0.5 倍濃度の培養液; pH 6.5, EC 1.32 mS/cm) で各栽培容器を満たした。各処理 (養液流量) は 3 回の反復 (栽培容器) で行われ、4 株のフダンソウが各栽培容器に植えられた。各栽培容器内の培養液の EC と pH を維持するために、10 日間ごとに培養液を交換した。

また栽培期間中には、ビニールハウス内の日射強度と気温を、日射強度計 (PYR, METER Group, Inc. Pullman, WA, United States) および温度センサー (VP-4, METER Group, Inc. Pullman, WA, USA) を用いてそれぞれ記録した。栽培期間におけるビニールハウス内の日射強度と気温の変化を図 2-3 に示す。

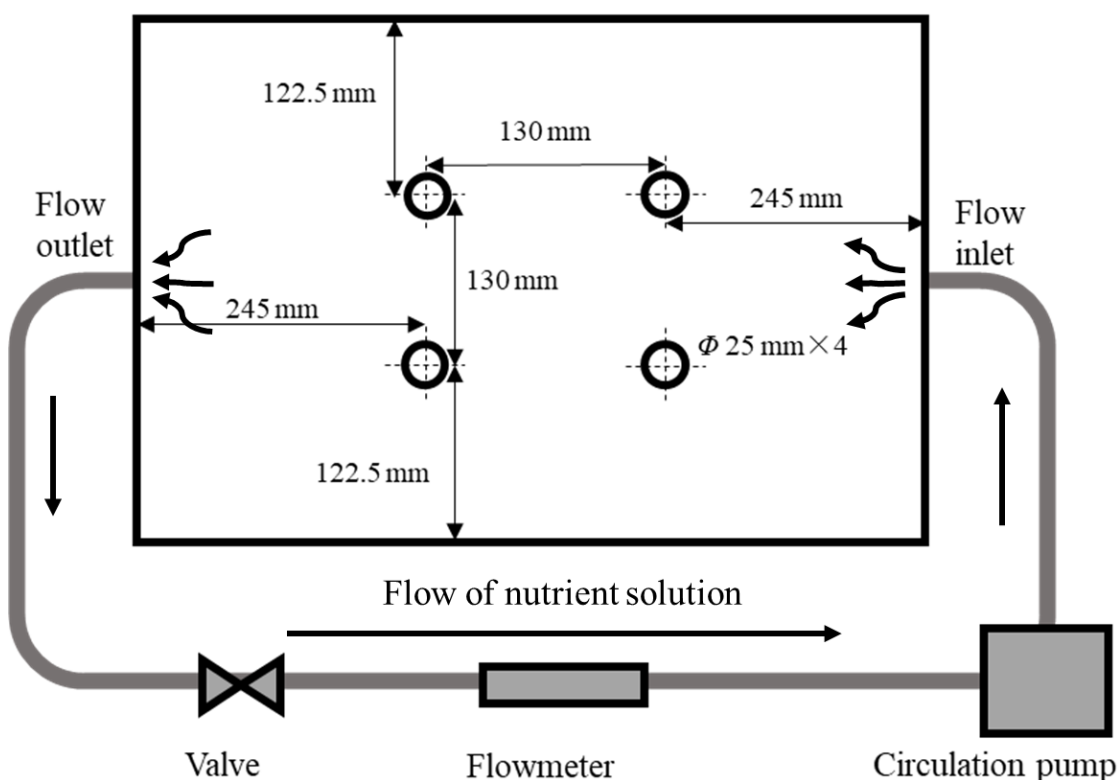


Figure 2-1. The diagram of top view of hydroponic system used in this study.



Figure 2-2. The hydroponic system used in this study. The cultivation container dimensions were 620 mm length (L) \times 375 mm width (W) \times 195 mm height (H). The flow inlet and flow outlet were located at the center of the sidewall, and the flow inlet and outlet diameters were both 18 mm.

Table 2-1. Composition and concentration of the OAT fertilizer No.1 and No.2. [37]

Fertilizer	Guaranteed composition (%)							Gradation composition (%)			
	T-N(AN/NN)	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	B ₂ O ₃	Fe	Cu	Zn	Mo
OAT fertilizer No.1	10.0(1.5/8.2)	8.0	27.0	-	4.0	0.10	0.10	0.18	0.002	0.006	0.002
OAT fertilizer No.2	11.0(NN)	-	-	16.4	-	-	-	-	-	-	-

Table 2-2. Composition and concentration of the standard nutrient solution OAT fertilizer A. [37]

Composition	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	B ₂ O ₃	Fe	Cu	Zn	Mo
Concentration (ppm)	260	120	405	230	60	1.5	1.5	2.7	0.03	0.09	0.03

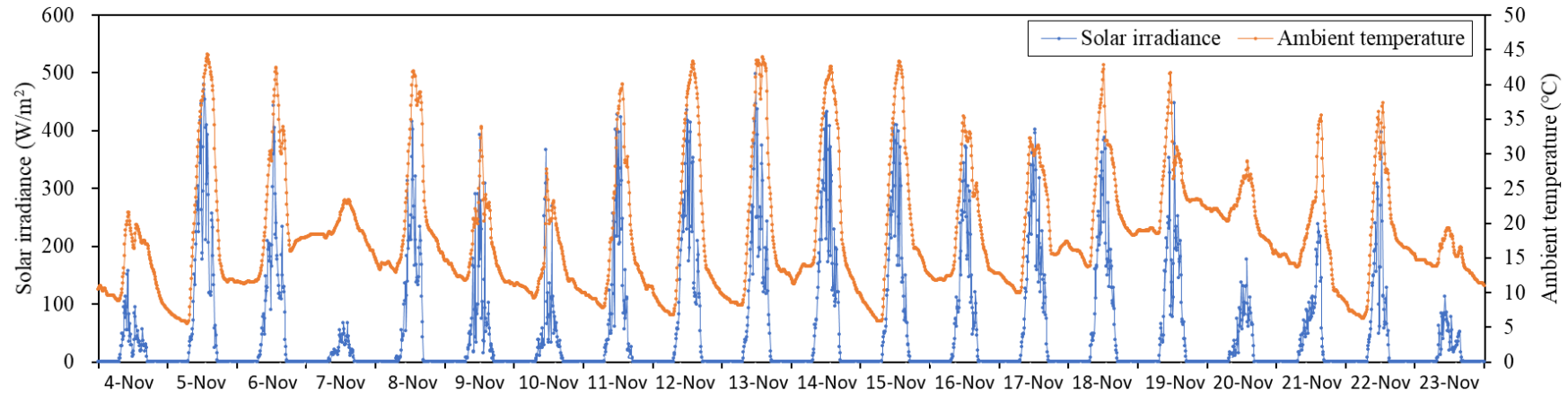


Figure 2-3. Solar irradiance and ambient temperature of the greenhouse during hydroponic cultivation.

2.1.2 測定項目と測定方法

表 2-3 に設定した測定項目を示し、以下にそれらの測定方法について述べる。

各栽培容器のフダンソウを各養液流量で 20 日間栽培し、11 月 23 日に収穫した。フダンソウを地上部（新梢）と地下部（根）に分け、それらの新鮮重を測定した。葉面積は葉面積計（LI3000A, LI-COR, Lincoln, Nebraska USA）を用いて、根の長さおよび表面積をルートスキャナーおよびソフトウェア（WinRhizo 2008a, REGENT INS, Quebec, Canada）を用いてそれぞれ測定した。次に、植物サンプルを 75°C の対流式オーブン（DKM600, Yamato, Tokyo, Japan）で 72 時間乾燥させて、乾物重を測定した。

植物体内の窒素（N）含有率（mg/g）をケルダール法[38]で測定した。試薬調製について、10 g のサリチル酸を 300 mL の濃硫酸に溶かし、サリチル硫酸を調製した。硫酸カリウムと硫酸銅を 9:1（質量）の割合で混合し、分解促進剤を調製した。蒸留水 3 L に炭酸ナトリウム約 650 g を溶かして、炭酸ナトリウムを調製した。フェノールフタレイン 0.1~1.0 g をエタノール 100 mL に溶かし、フェノールフタレインエタノール溶液を調製した。水酸化ナトリウム 400 g を 1 L の蒸留水に溶かして、10 N の水酸化ナトリウム溶液を調製した。ブロモクレゾールグリーン 0.15 g、メチルレッド 0.1 g をエタノールで 200 mL にメスアップして、ブロモクレゾールグリーン・メチルレッドエタノール溶液（pH 指示薬）を調製した。濃硫酸（36 N）を 360 倍に希釈し、ホウ酸 40 g を 1 L の蒸留水に溶かして、滴定用硫酸（0.1 N）を調製した。

分解と蒸留プロセスでは、粉碎試料約 0.2 g を精秤し、分解ビンに入れ、サリチル硫酸を 10 mL 加え 30 分間以上静置した。分解促進剤を少量、チオ硫酸ナトリウムを薬さじ大 1 杯加えたのち、蓋をして分解ビンを分解装置にセットし、380°C で約 3 時間の加熱処理を行った（サンプルの色が透明に変わることを確認し、加熱処理を終了した）。

また、蒸留装置で水蒸気蒸留を行った。200 mL の三角フラスコにホウ酸を 40 mL 加えたのち、ブロモクレゾールグリーン・メチルレッド（赤色）を 2~3 滴、サンプルに蒸留水を 20 mL 加え、NaOH を 40 mL 程度加えて、蒸留装置でサンプルを蒸留した。

さらに、0.1 N の硫酸で蒸留後のサンプルを滴定し、以下の式を用いてサンプルの全窒素の含有率を計算した。

$$\text{N 含有率(mg/g)} = 0.1(\text{N}) \times \text{硫酸の滴定量(mL)} \div 1000 \times 14.001 \times 1000 \times \frac{1}{\text{粉末試料(g)}}$$

最終的に、得られた乾物重と N 含有率の値を用いて、フダンソウ 1 株あたりの N 吸収量を算出した。

Table 2-3. Measurement objectives and instruments used.

Measurement Objective		Measurement Instrument
Plant growth	Leaf area	Leaf area meter (LI3000A, LI-COR, Lincoln, Nebraska USA)
	Fresh weight	Precision balance (UP623Y, SHIMAZU, Kyoto, Japan)
	Dry weight	
Root morphology	Length	Root scanner and software (WinRhizo 2008a, REGENT INS)
	Surface area	
Nutrient content	N	Digest system (K-437, BUCHI, Wilmington, USA), Distillation Unit (K-355, BUCHI, Wilmington, USA)

2.1.3 養液流れ場の可視化方法

一般的に、流体の速度や圧力などが不規則に変動する流れを乱流といい、乱流中にみられる不規則な変動を乱れという。これに対して、乱れを含まない流れを層流という。流れの状態を表すレイノルズ数 (Re) が低い場合 ($Re < 2,300$) には、粘性による減衰作用により乱れを含まない層流状態となるが、レイノルズ数がある臨界値以上に大きくなる ($Re > 2,300$) と、乱れが大きくなり、流れが不

安定な乱流状態に移行する。層流から乱流への遷移過程では、攪乱の線形成長に続いて非線形成長が起り、完全な乱流へと推移することが知られている。乱流の特徴はさまざまなスケールの渦運動と、それに伴う強い攪拌効果および小さなスケールの渦の粘性による運動エネルギー散逸と物質移動（乱流拡散）がある [39]。水耕栽培では、植物の栄養として吸収される無機イオンは培養液の流れによって移動するが、主に乱流輸送によって根の表面に輸送されると考えられる。この乱流輸送を支配しているのが「渦」である。乱流が発生すると流れが渦を巻くので、乱流が発生することを「渦が発生する」と言い換えることができる。したがって、水耕栽培における養液流れ場を評価するためには、流れの速度や渦の状態を定量的に明らかにすることが必要となる。

本研究では、粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry, PIV） [40]を使用して、栽培容器内に形成される養液流れ場を観察した。PIVは、流れ場の多点における瞬間速度を非接触で得ることができる流体計測法であり、流れ場の空間的な構造を把握することができるため、様々な流体の流れ場計測に応用されている。観察対象の流体中に、そのダイナミクスに従うと想定されるトレーサー粒子（流体の密度と十分に近く、サイズが小さい粒子）を注入し、流体運動に追従しているトレーサー粒子の状態をレーザーシートで照射して可視化し、これを高速度カメラで撮影する。フレーム間の微小時間 Δt におけるトレーサー粒子の変位ベクトル $\Delta \mathbf{x}$ を画像処理により求め、流体の局所速度ベクトル $\mathbf{v} \cong \Delta \mathbf{x} / \Delta t$ を算出する。

一方、流体が自転している部分を渦といい、その渦の強さは渦度で表される。流体の速度ベクトルを \mathbf{V} とするとき、渦度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ は以下の式で与えられる。

$$\boldsymbol{\omega} = \text{rot } \mathbf{V} = \nabla \mathbf{V}$$

渦度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ の大きさ $|\boldsymbol{\omega}|$ は流体の自転角速度の 2 倍であり、その方向は自転の軸の方向を与える。本研究では、渦度は反時計回りを負、時計回りを正とする。渦度は、流体の速度ベクトルの回転によっても表され、すなわち、速度

の (x, y) 成分をそれぞれ (u, v) とした時, $(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)$ がそれぞれ渦度の (x, y) 成分となる[39]。

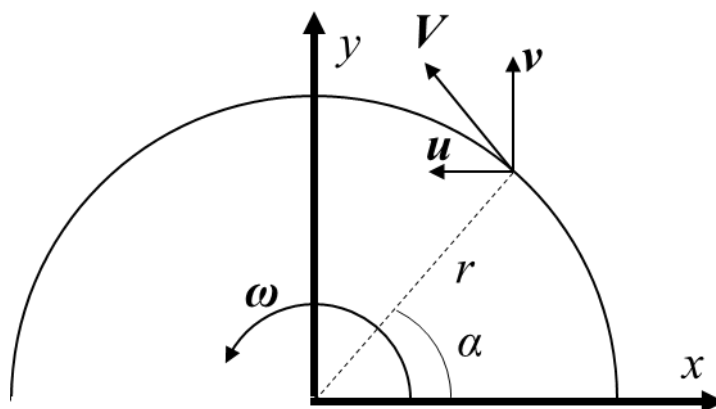


Figure 2-4. Schematic diagram of vorticity and velocity of flow

本研究では、栽培容器内の養液流れ場を可視化するために、図 2-2 に記載した水耕栽培システムと同じサイズの無色透明の亚克力水槽を作製した。使用した栽培盤も図 2-1 のものと同じ材質および形状とした。亚克力水槽内の培養液をポンプによって循環流動させ、バルブとデジタル流量計で水槽内の各流量 (0, 2, 4, 6, 8 L/min) を調整した。養液流れ場を可視化する場合には、各養液流量の条件下の実験で収穫されたフダンソウを、栽培実験と同じように亚克力水槽内に挿入した。

図 2-4 に示すように、レーザー (GPOL-5W, JAPAN LASER, Tokyo, Japan) は、亚克力製水槽の左側に配置されており、フダンソウが挿入されている位置の縦断面に向けてレーザー光シートを照射した。レンズ (Micro-NIKKOR 55 mm f/2.8, Nikon, Tokyo, Japan) を備えた高速度カメラ (FASTCAM-MAX 120KC, Photron, Tokyo, Japan) を、亚克力製水槽の側面中央部に位置するように、水槽から約 1.70 m ぐらいの位置に配置した。培養液中には、平均粒子径約 0.55 mm, 密度 1.01 g/cm³ のトレーサー粒子 (HP20, DIAION, Tokyo, Japan) を少量添加し、粒子の動きを、毎秒 60 フレームで 1024×1024 ピクセルの解像度で記録した。流

れの可視化実験は暗室で行った。フダンソウを挿入しない場合および各養液流量条件下の培養液にフダンソウを挿入した場合の養液流れ場を、それぞれ 10 秒間撮影した。

PIV 流れ場計算ソフトウェア (PIVlab 2.31, MATLAB, MathWorks, Massachusetts, USA) [41]を使用して、撮影画像をバッチ処理した。図 2-4 に示す画像領域が、本研究の関心領域 (ROI) として選択した。連続的に撮影された流れ場の瞬間画像 600 枚に基づいて、各流れ場の平均速度分布と渦度分布を算定した。

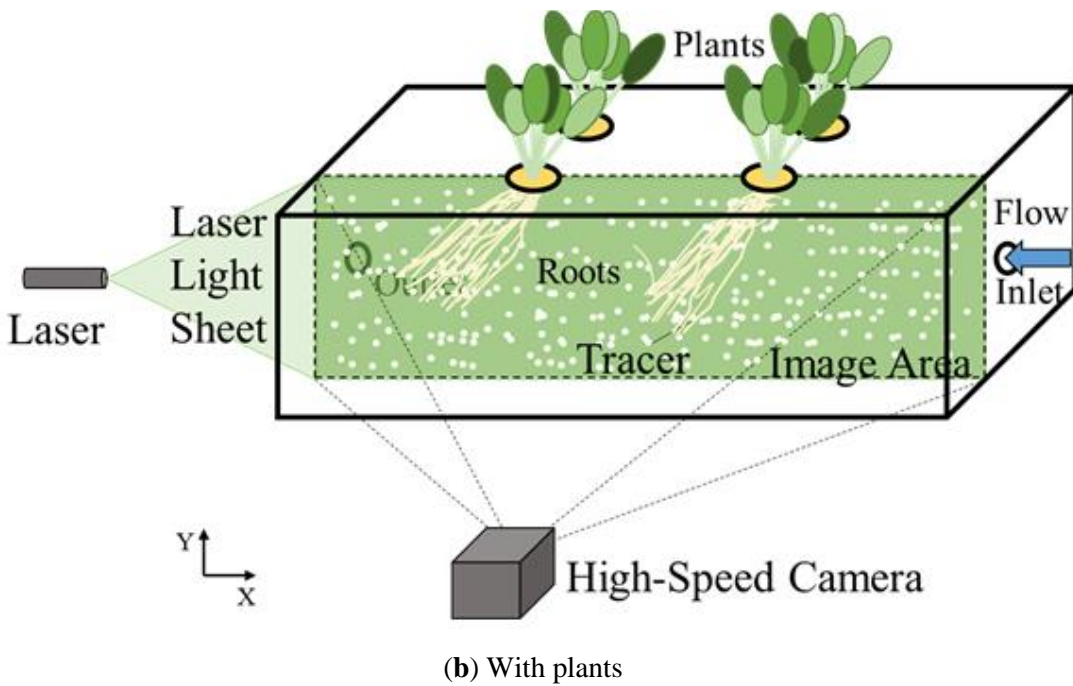
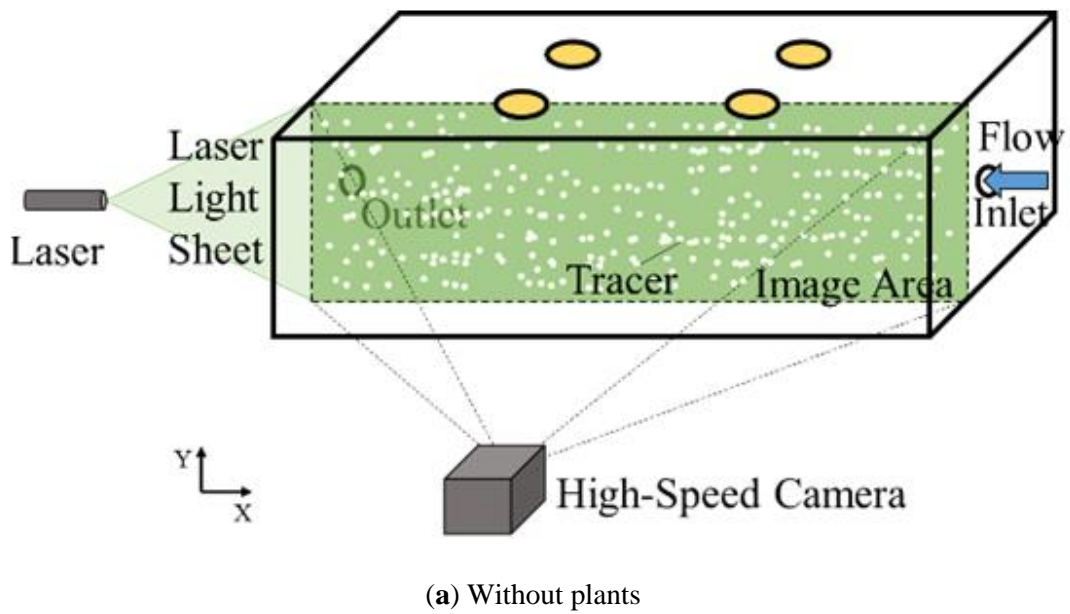
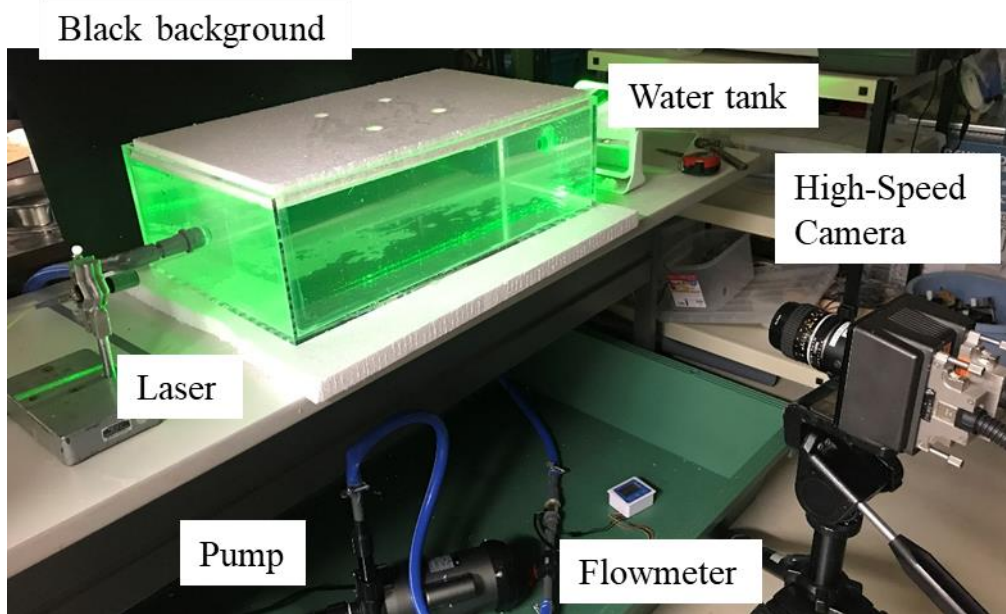
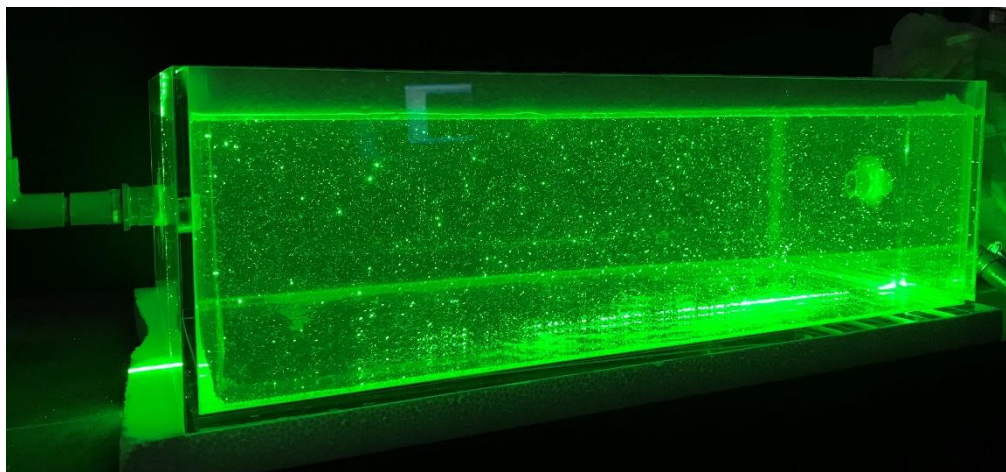


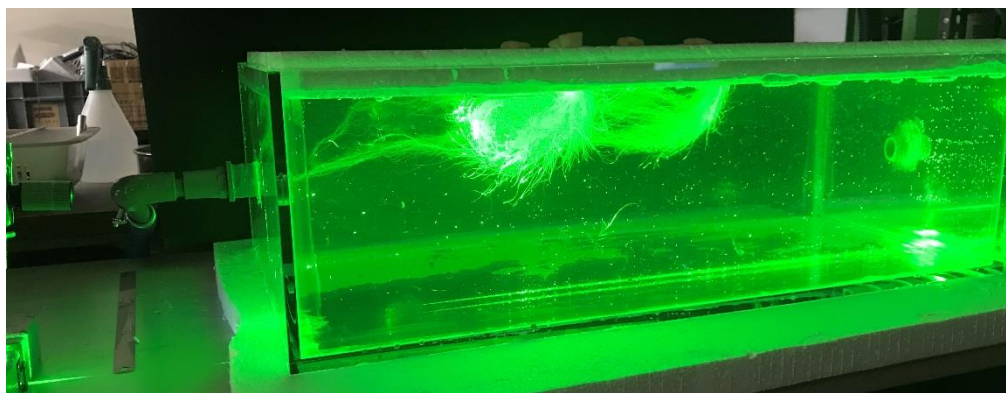
Figure 2-4. Observation method of the flow field and roots in hydroponics.



(a) Devices of PIV system



(b) The situation of the laser irradiation in the water tank without plants



(c) The situation of the laser irradiation in the water tank with plants

Figure 2-5. The scene of PIV experiment in this study.

2.1.4 統計処理

各処理（培養液流量）は3回の反復で実施し、各反復の値については、同じ栽培容器内のすべての植物の平均値を計算することによって得た。実験データの統計処理には、Statistical Package for Social Sciences software version 25（SPSS Inc, Chicago, IL, USA）を使用し、一元配置分散分析とそれに続く $p < 0.05$ でのダンカンの多重範囲検定を行った。その結果を平均値±標準偏差（ $n=3$ ）として表示した。

2.2 結果

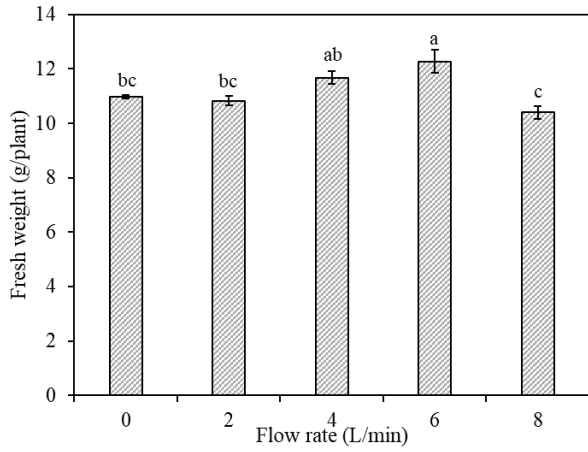
2.2.1 植物生長と養分吸収

各養液流量におけるフダンソウの生長と根の形態を図 2-6 に示す。養液流量が 0 L/min および 2 L/min の場合には、フダンソウの新鮮重と乾物重に有意な差はなかった。2 L/min から 6 L/min へ増加すると、新鮮重は増加する傾向を示し、4 L/min および 6 L/min における新鮮重は、0 L/min の場合に比べてそれぞれ 6.4% および 11.8% 増加した。乾物重は 4 L/min および 6 L/min にかけて有意に増加し、0 L/min の場合に比べてそれぞれ 8.2% および 15.2% 増加した。本実験範囲では、6 L/min における新鮮重および乾物重が最大となった。一方で、養液流量が 8 L/min に増加すると、新鮮重および乾物重は有意に低下し、6 L/min の場合と比較すると、それぞれ 7.4% および 15.3% の減少であった (図 2-6 (a), (b))。

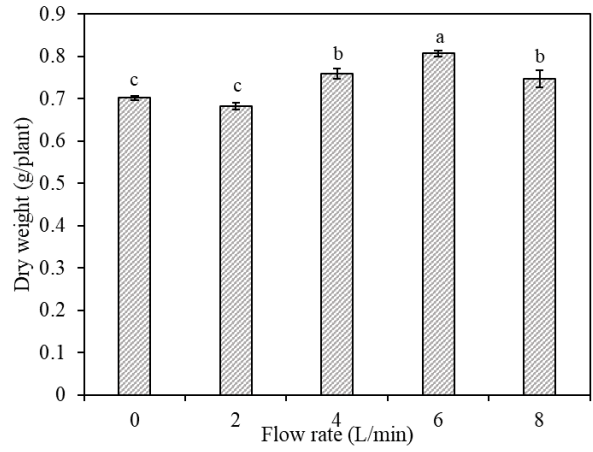
葉面積は、0 L/min から 2 L/min にかけて有意に増加した。また、2 L/min から 6 L/min にかけて葉面積は増加しており、0 L/min の場合と比較すると、それらの増加割合はそれぞれ 8.2%、10.3%、および 15.2% であった。しかし、8 L/min の葉面積は、6 L/min の場合に比べて有意に減少した (図 2-6 (c))。

根の長さは 0 L/min から 6 L/min にかけて増加する傾向を示し、2 L/min、4 L/min、および 6 L/min における根の長さは、0 L/min の場合と比較してそれぞれ 10.6%、18.6%、および 29.5% 増加した。また、0 L/min から 6 L/min における根の表面積に有意差はなかったものの、養液流量の増加に伴って根の表面積は増加する傾向を示した。8 L/min における根の長さおよび表面積は、6 L/min の場合に比べて有意に減少した (図 2-6 (d), (e))。

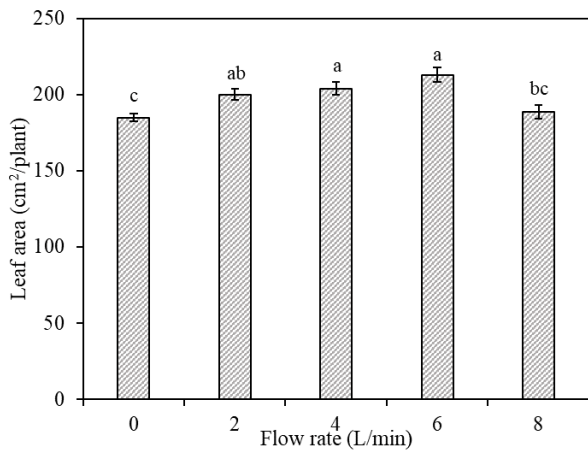
N 吸収量は、0 L/min から 2 L/min にかけて有意に増加した。2 L/min から 6 L/min にかけて増加する傾向を示したが、8 L/min における N 吸収量は、6 L/min の場合に比べて有意に減少した。N 吸収量は 6 L/min で最大となった (図 2-6 (f))。



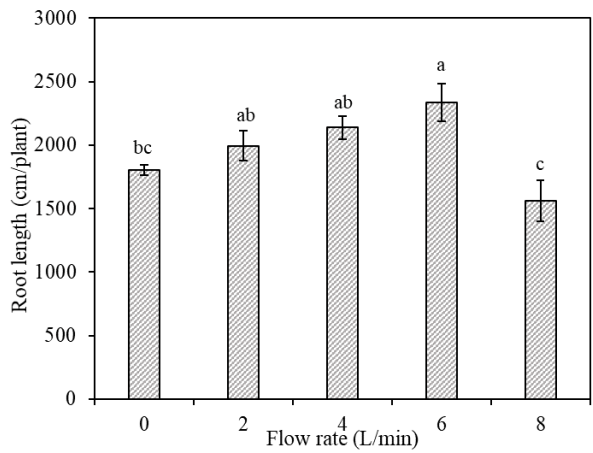
(a) Fresh weight



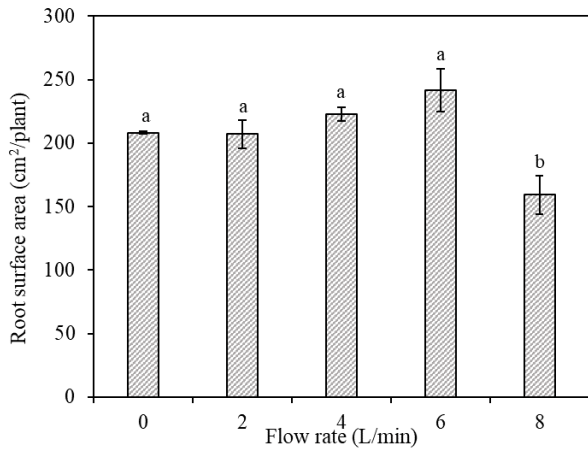
(b) Dry weight



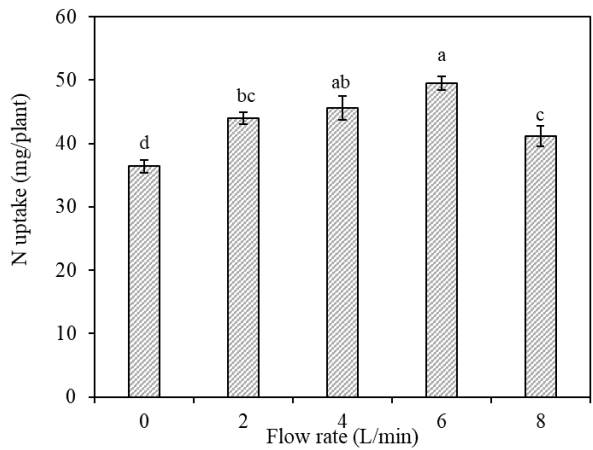
(c) Leaf area



(d) Root length



(e) Root surface area



(f) N uptake by a plant

Figure 2-6. Plant growth, root morphology, and nutrient uptake under different flow rates. Bars labelled with different letters differ significantly ($p < 0.05$), data are expressed as M.S.E ($n = 3$).

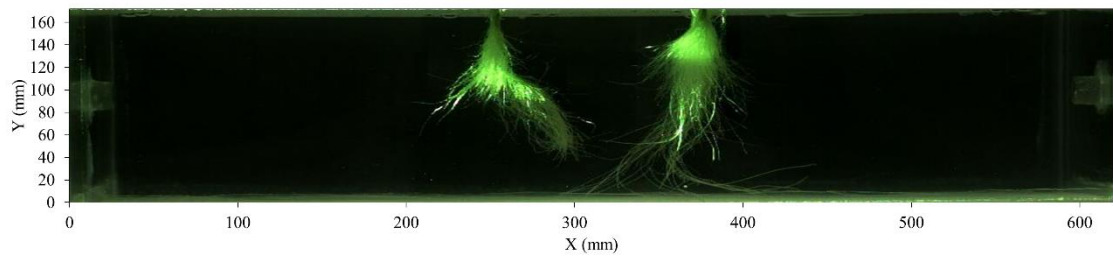
2.2.2 養液流れ場の平均速度・渦度分布

培養液の流れの中に挿入されたフダンソウの根の挙動を図 2-7 に示す。なお、培養液の流れ方向は図面右側から左側に向かっており、その流入口は $X=620\text{ mm}$ の位置に、流出口は $X=0\text{ mm}$ の位置に対応している。培養液が流れない 0 L/min の場合では、容器底面に向かって根が伸び、揺れずに静止している。 2 L/min の場合になると、上流側に位置する根の先端部分が容器底面付近の流れに沿って変形するが、後方の根の形状は底面へ向かって伸びたまま、ほぼ静止している。さらに流量が 4 L/min から 6 L/min へ増加するにしたがって、上流側および下流側の根の先端部分は培養液の流れ下流方向に大きく傾斜し変形する。 8 L/min においては、根のほとんどの部分が浮き上がって、培養液の流れ方向に沿って変形している。なお、 4 L/min から 8 L/min においては、これらの根の形状を維持したまま、大きく揺動していることを撮影時に目視にて確認した。

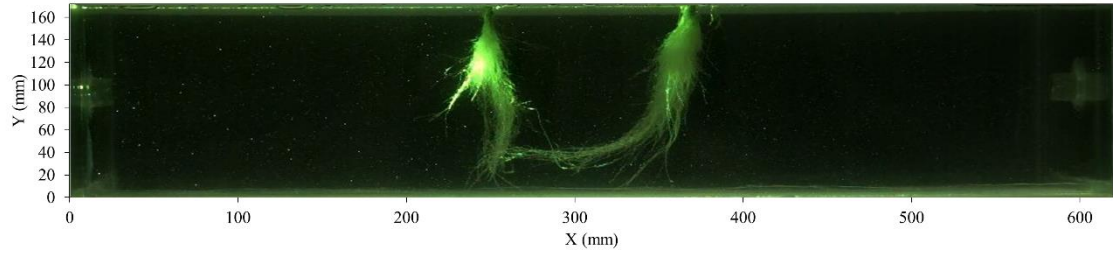
栽培容器内の養液流れ場の速度分布について、フダンソウを挿入していない場合を図 2-8(a)~(d) に、フダンソウを挿入している場合を図 2-8(e)~(h) に示す。なお、図 2-8(e)~(h) の中央部に、培養液中にある根の形状の輪郭を描いている。

フダンソウの根が無い場合、 2 L/min および 4 L/min における平均流速はおおよそ 0.01 m/s 程度と小さい (図 2-8(a), (b))。養液流量が増加するにつれ、流れ場の平均流速は増加し、その増加範囲は容器全体に広がっている (図 2-8(c), (d))。一方、フダンソウの根がある場合、 2 L/min では流れに沿って上流側の根の先端がやや変形しており、この根の前方の領域 ($X=400\sim 600\text{ mm}$, $Y=100\sim 160\text{ mm}$) における平均流速は、根の後方の領域 ($X=0\sim 200\text{ mm}$, $Y=0\sim 160\text{ mm}$) よりも若干大きくなっている (図 2-8(e))。この傾向は、 4 L/min で顕著になっている (図 2-8(f))。さらに、養液流量が 6 L/min および 8 L/min に増加すると、培養液の流れに沿って 2 つの根は上方に浮き上がり、その根の下方を流れる培養液の流速が増大している (図 2-8(g), (h))。

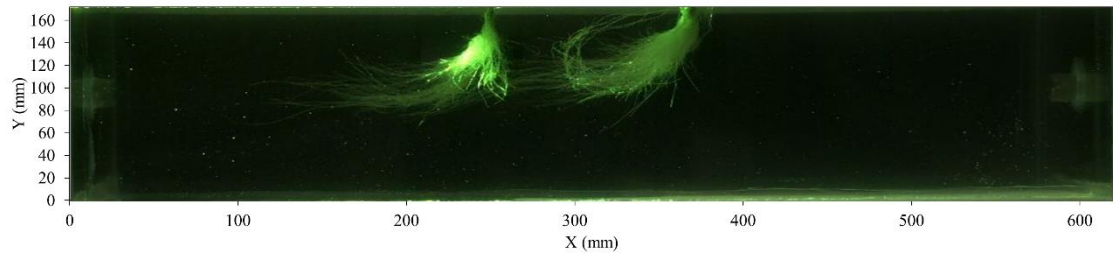
栽培容器内の養液流れ場の渦度分布について、フダンソウを挿入していない場合を図 2-9(a)~(d)に、フダンソウを挿入している場合を図 2-9(e)~(h)に示す。なお、渦度の負の値は反時計回り方向に渦が回転し、正の値は時計回り方向に渦が回転することを表す。まずフダンソウの根が無い場合、2 L/min では渦度は小さいことから、低い流動状態にある (図 2-9(a))。流量が大きくなるにつれ、渦度の値が大きくなって (負の値は小さくなって) おり、培養液の流動状態が高まっている (図 2-9(b))。特に、6 L/min および 8 L/min において、流れ場の下流域 ($X=50\sim 200$ mm) の渦度は負の値を示した。これは、培養液の流れが流出口のある側壁に衝突したのち、その一部が上流方向へ逆流している (目視確認) ことに起因している (図 2-9(c), (d))。一方、フダンソウの根がある場合、2 L/min および 4 L/min では、平均流速の場合と同様に、上流側の根の前方の領域 ($X=400\sim 600$ mm, $Y=100\sim 160$ mm) の渦度が大きくなっており、これは流れが根に衝突した後に逆流が発生しているものと考えられる。また、上流側から下流側の根の周辺部において渦度は 0 に近いことから、流れによる渦があまり発生しておらず、培養液の流動性が低いものと推察される (図 2-9(e), (f))。6 L/min の場合には、培養液は根の下方を流れるので、根の下方領域 ($X=200\sim 400$ mm, $Y=0\sim 60$ mm) の渦度が増加しており、他の流量の場合よりも流れ場全体で均一な渦度になった (図 2-9(g))。8 L/min では、さらに根の下方領域 ($X=0\sim 500$ mm, $Y=0\sim 100$ mm) における渦度が大きくなり (負の値は小さくなる)、特に出口領域 (X 軸 : $0\sim 200$ mm) および入口領域の一部 (X 軸 : $400\sim 500$ mm) では、流出口の側壁に衝突した培養液が逆流し、強い渦が発生しているものと思われる。



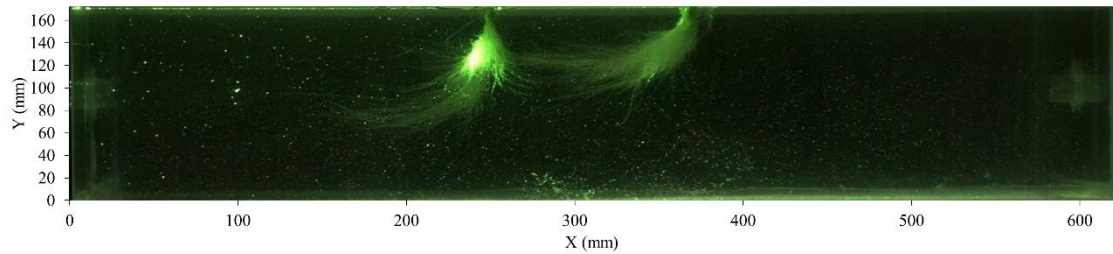
(a) 0 L/min



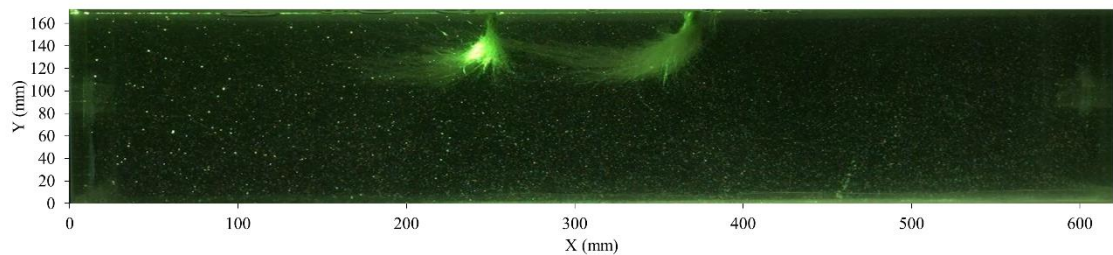
(b) 2 L/min



(c) 4 L/min



(d) 6 L/min



(e) 8 L/min

Figure 2-7. Plant roots under different flow rates.

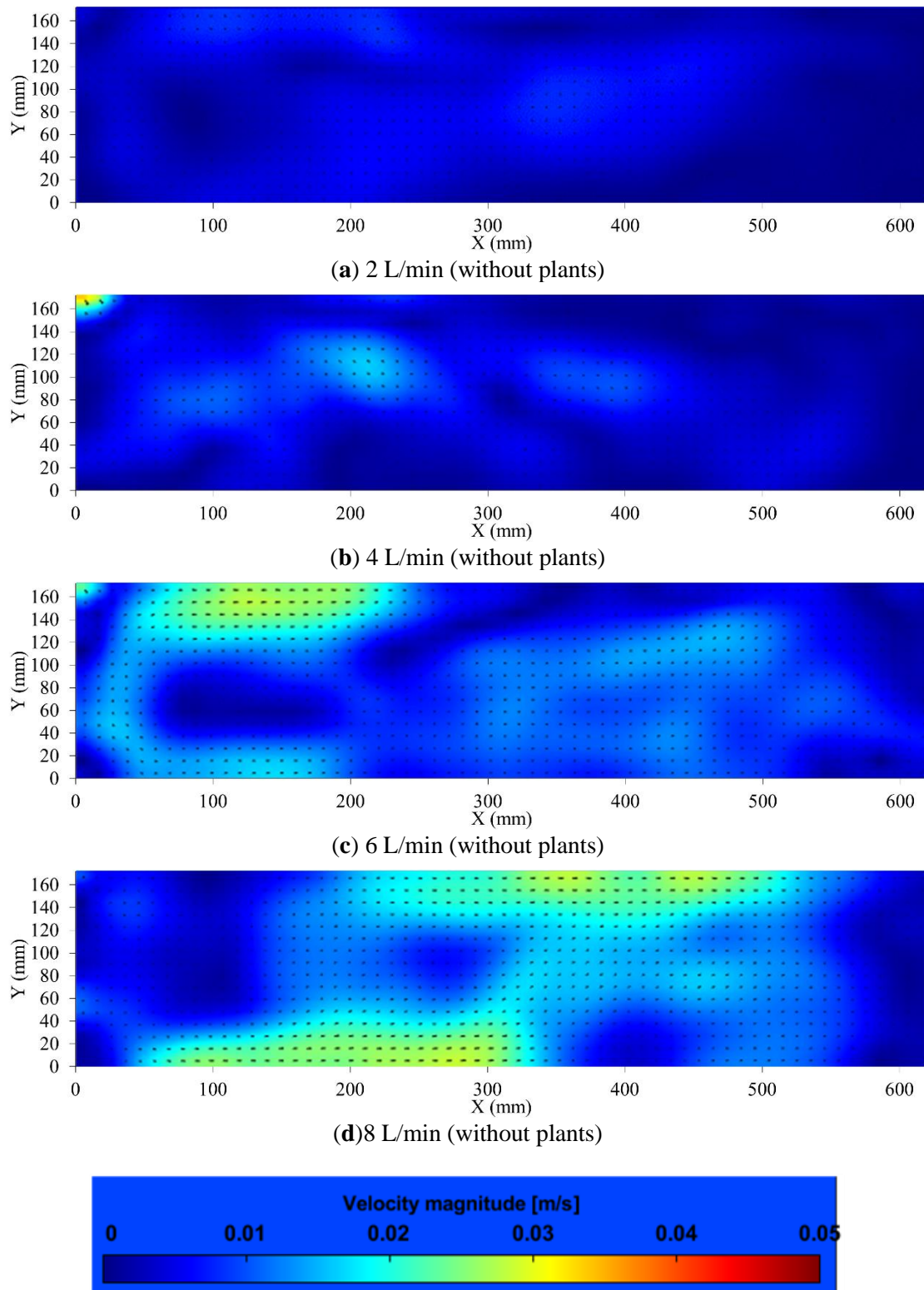
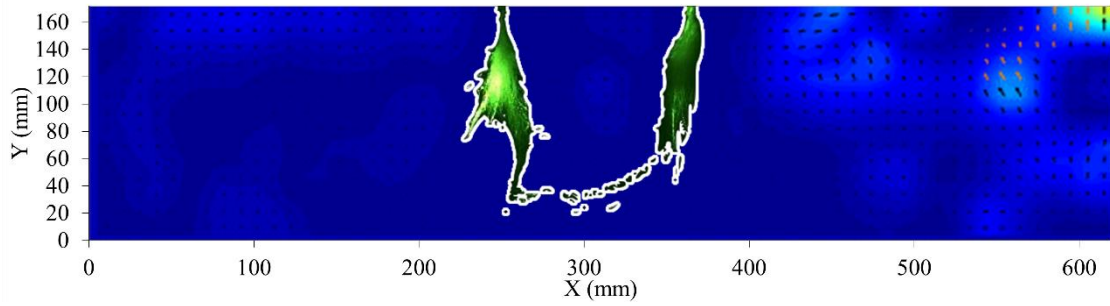
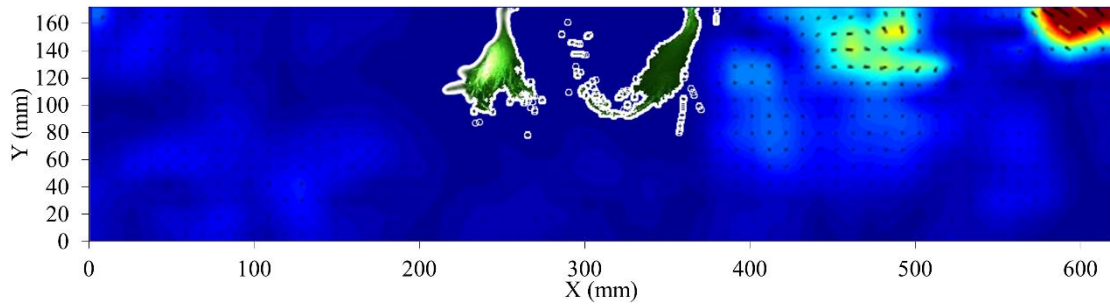


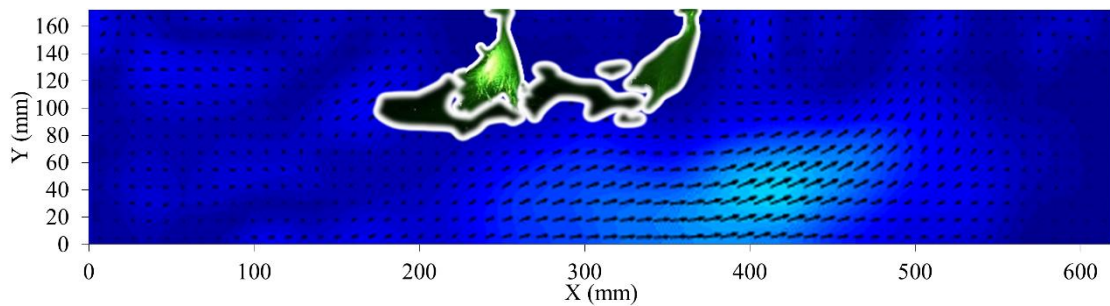
Figure 2-8. Flow velocity distribution of the flow field in hydroponics under different flow rates. The magnetic map of velocity is shown in the figure, blue indicates a velocity of 0 m/s, and red indicates the highest velocity (0.05 m/s).



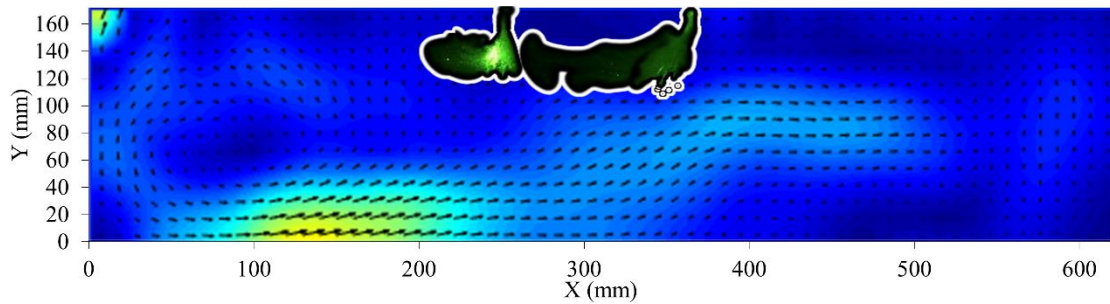
(e) 2 L/min (with plants)



(f) 4 L/min (with plants)



(g) 6 L/min (with plants)



(h) 8 L/min (with plants)

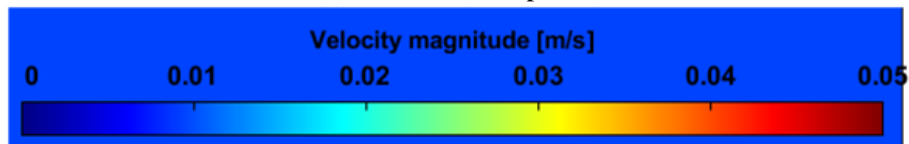


Figure 2-8 (continue). Flow velocity distribution of the flow field in hydroponics under different flow rates. The magnetic map of velocity is shown in the figure, blue indicates a velocity of 0 m/s, and red indicates the highest velocity (0.05 m/s).

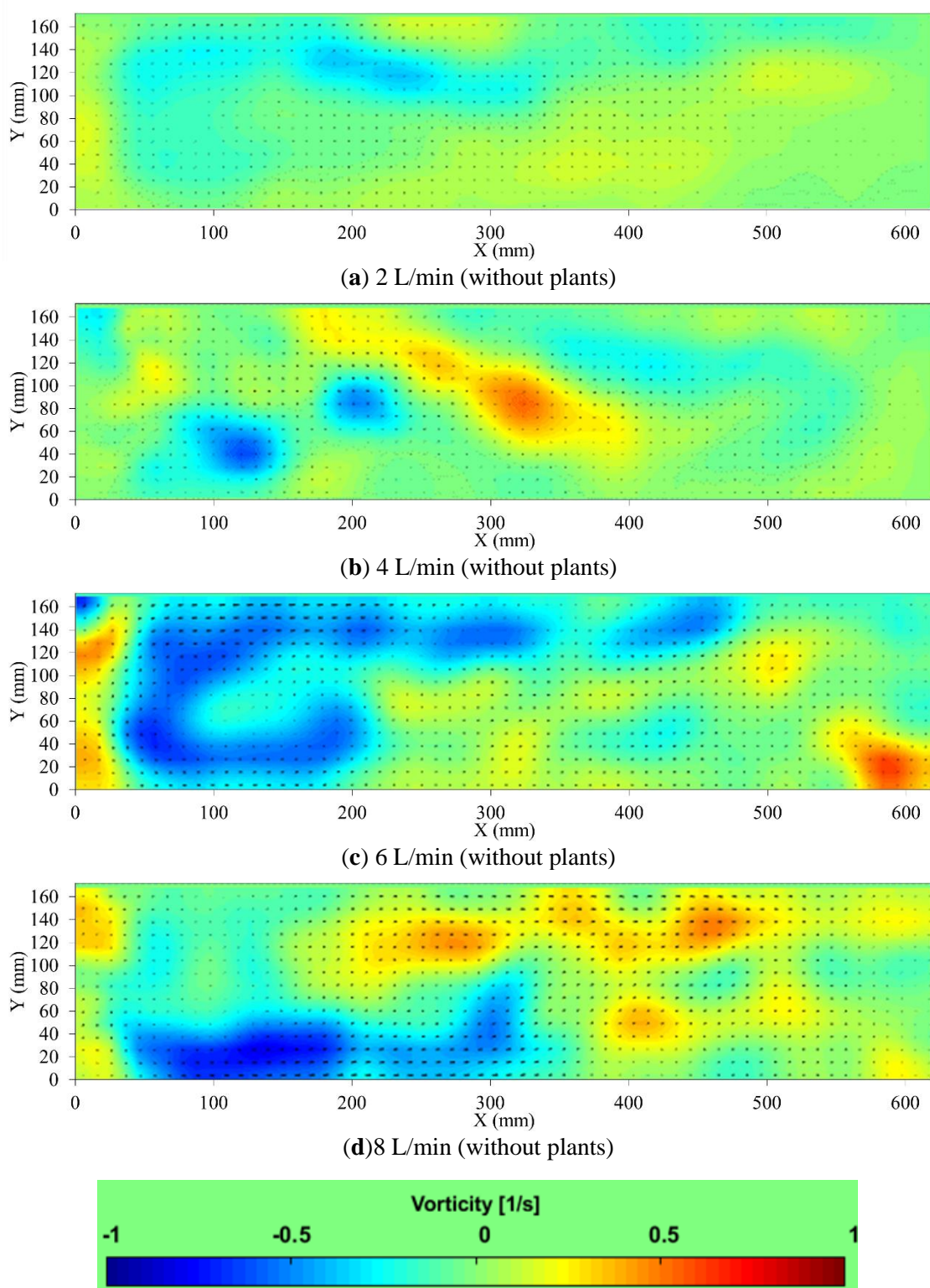


Figure 2-9. Vorticity distribution of the flow field in hydroponics in different flow rates. The magnetic map of vorticity is shown in the figure, green means no vorticity, red means clockwise vorticity, and blue means counter-clockwise vorticity.

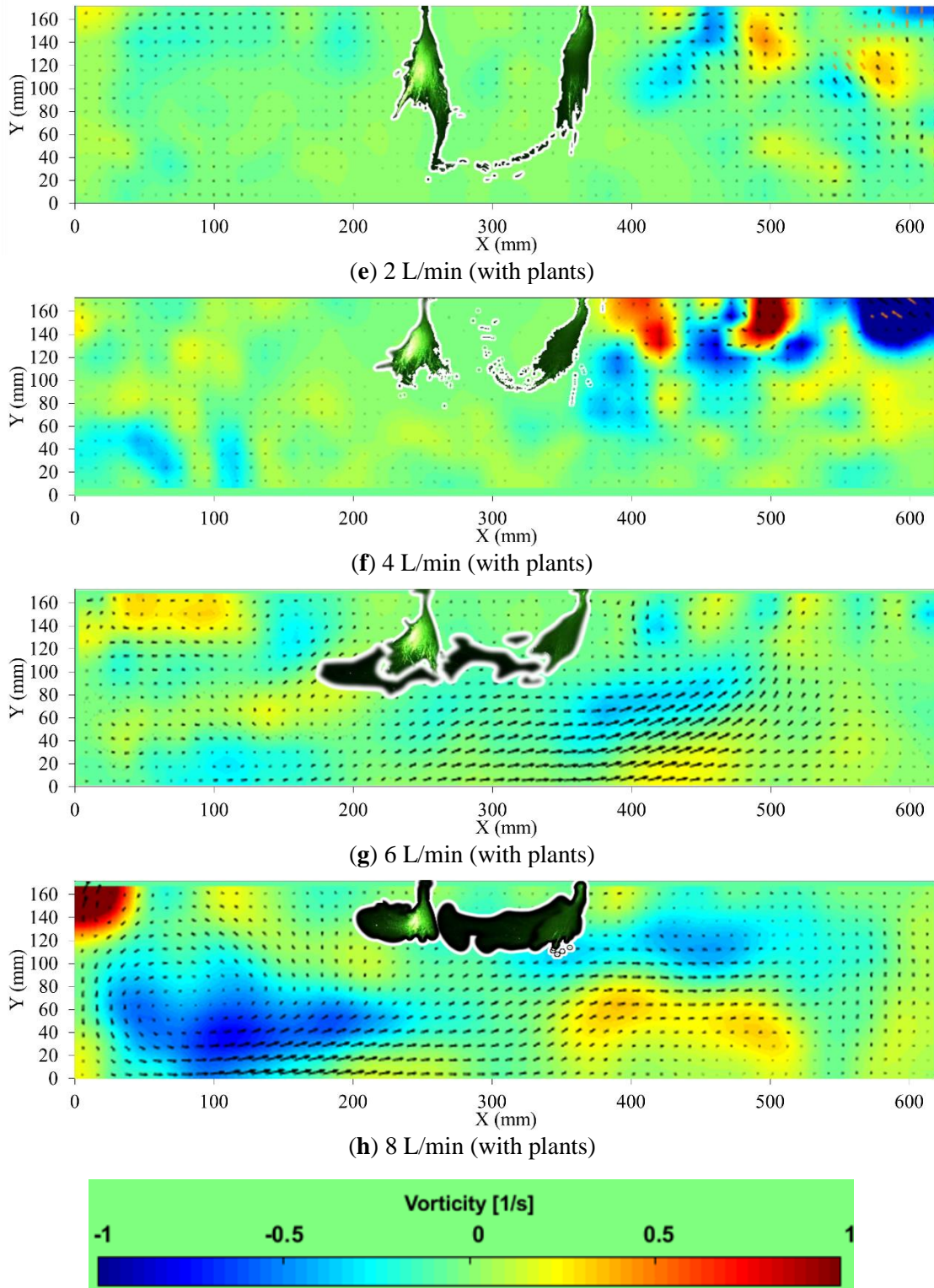


Figure 2-9 (continue). Vorticity distribution of the flow field in hydroponics in different flow rates. The magnetic map of vorticity is shown in the figure, green means no vorticity, red means clockwise vorticity, and blue means counter-clockwise vorticity.

2.3 考察

収量を判断するための指標として乾物重または新鮮重を用いる場合、その値が大きくなるほど良い収量となる。葉は植物が光合成によってエネルギーを生み出すための最も重要な器官であり、その葉面積と光合成能力は植物の生長にとって重要な因子である[42]。また、根は養分吸収に関与する植物の主要な器官であり、その養分吸収量は根の長さや表面積に依存する[43]。

フダンソウを対象に、異なる養液流量条件（0, 2, 4, 6, 8 L/min）にて水耕栽培実験を実施し、その生長量（新鮮重、乾物重、葉面積、根長）および養分吸収（N 吸収量）を測定した。また、各培養液流量における養液流れ場を可視化し、根の挙動および培養液の流動状態を評価した。

フダンソウの新鮮重と乾物重は、0 L/min および 2 L/min の条件においてそれぞれ有意差はなかったが、2 L/min から 6 L/min にかけて新鮮重と乾物重はそれぞれ増加した（図 2-6(a),(b)）。0 L/min および 2 L/min の場合では、根はほぼ静止した状態に近く（図 2-7(a),(b)）、根の前方の領域で平均速度および渦度の上昇がややみられるものの、根の周りの養液流れ場はほぼ類似しているため、新鮮重および乾物重はほぼ同等であったと考えられる。

一方で、4 L/min および 6 L/min の場合、流れによる根の変形と揺動があり、その周りの平均速度と渦度も大きくなって養液の流動状態が高くなっていたが、葉面積、根の長さや表面積および N 吸収量は増加する傾向を示し（図 2-6(c),(d),(e),(f)）、このことが新鮮重と乾物重の増加をもたらしたと考えられる。

さらに、本実験で設定した養液流量範囲の最大値である 8 L/min では、新鮮重、乾物重、葉面積、根の長さや表面積および N 吸収量は、6 L/min の場合に比べて有意に減少した（図 2-6(a)~(f)）。可視化実験から、8 L/min の場合には、培養液の流れ下流方向に変形・揺動した根のほとんどの部分が、流速および渦度が大きい養液流れに常にさらされている状態にあることがわかった（図 2-7(e), 図 2-8(h), 図 2-9(h)）。また、根の長さや表面積および N 吸収量が減少していることから、このときの流動状態が根の生長および養分吸収を阻害する物理的的刺激（動圧、

摩擦抵抗など) [27]を与え、新鮮重および乾物重が減少したものと考えられる。

根表面への無機イオン輸送の方式は、栽培基質によって異なる。土壌中の無機イオンは、根の伸長、マスフロー、および拡散によって根の表面に到達する [13]のに対し、水耕栽培では、無機イオンは主に分子拡散や渦拡散などの乱流拡散によって根の表面に運ばれる。乱流流体では、分子拡散と渦拡散が同時に移動に寄与し、流体粒子は多数の分子のクラスターであり、流体-粒子移動の規模と速度は単一分子よりもはるかに大きくなる。したがって、渦拡散の影響が分子拡散より大きな役割を果たす [44]。渦拡散とは、乱流流体中の物質（無機イオン）の移動を指し、これは主に流体粒子の不規則な動きに依存する。乱流の渦は、流体の激しい混合を引き起こす。培養液の組成と濃度の違いによって、無機イオンはより低い組成と濃度の方向に移動する。渦拡散は、流体粒子の渦運動によって無機イオンを移動させる。

水耕栽培の養液流量を適切に設定した場合、根の表面と無機イオンと間の適切な接触時間と衝突頻度を与えることにより、根の伸長や養分吸収を促進し、植物の生長とその収量を向上させることにつながる [17]と指摘されている。本章における水耕栽培システムとその養液流量の設定範囲では、流量増加により収量は増大し、最大収量を得る適切な流量が 6 L/min であることが明らかになったが、その範囲を超えた 8 L/min では、収量が大きく減少することも示した。

表 2-4 は、先行研究で述べられた養液流量の設定範囲と最大収量が得られる養液流量を示している。本章で得られた結果をもとに、これらの研究の位置づけを分類すると、3つのグループに分けることができる。(1) 養液流量が増加する大きくなるにつれ、植物の収量が増加する (Genuncio ら [18])。(2) 最小の養液流量で最大収量を得られ、養液流量の増加に伴って収量が減少する (Soares ら [21], Nuwansi ら [22], Khater ら [23])。(3) 養液流量の増加に伴って最大収量に到達し、そののち収量が減少する (Tawaha ら [19], Dalastrá ら [20], Endut ら [17], Hussain ら [45])。供試作物や栽培容器の形状など異なっているものの、本章の結果はグループ (3) の結果と同様な傾向を示しており、本研究結果の位置づけと再現性が明確になった。また、グループ (1) およびグループ (2) におけ

る養液流量の設定範囲は、最大収量となる適切な養液流量が含まれていない可能性があることも指摘する。

水耕栽培に適した養液流れ場を形成するためには、流れ場の中にある根の形状や挙動を把握する必要がある。根は培養液の流れから抗力を受けるが、養液流量の増加に伴って、この抗力の大きさは増加する。そうになると、根は流れ方向に沿って変形するとともに揺動するので、根の周りの流れ場も変化することが考えられる。根の変形量や挙動を表す基本的な性質として、根の弾性率などの機械的特性を明らかにする必要がある。植物種が異なれば、根の形状やその機械的性質も異なるので、同一の流量であっても根と流れの間の相互作用は異なる。したがって、流れに対する根の挙動が変化するため、流れ場の平均速度と渦度の分布も変化する可能性がある。同様に、同じ種の植物であっても、各生長段階にある植物の根の特性は異なる可能性があり、同じ流れ場に対するそれらの応答も異なる可能性がある。本章の実験結果から、水耕栽培における養液流量を調整することで植物の収量を最大化することが可能であることを示したが、流量と栽培容器のサイズだけでなく、複数の要因が水耕栽培の培養液の流れ場に影響を与えることが考えられ、例えば、植物の栽培位置、間隔および栽培密度[47]、栽培容器の幅や傾斜度[48]、および長さ[23]、培養液の深さおよび根の通気[26]などが挙げられる。今後、これらの要因を考慮して、水耕栽培における植物の生長と養液流れ場との関係を精査する必要がある。流れ場と他の培養液の物理的・化学的特性（培養液の組成と濃度[31]、温度[32]、塩分濃度[23]、光強度[49]、溶存酸素濃度[34]）との複合効果についても検討することが不可欠である。

Table 2-4. Studies regarding the effect of flow rate on plant growth in hydroponics.

Authors and Time	Flow Rate (L/min) (Optimal Flow Rate)	Plant	Measurement for Plant Growth
Genuncio et al. (2012) [18]	0.75, 1, 1.5 (1.5)	Lettuce	Fresh weight
Tawaha et al. (2018) [19]	10, 20, 30 (20)		Plant height, dry weight, fresh weight, number of leaves
Dalastra et al. (2020) [20]	0.5, 1.0, 2.0, 4.0 (1.0)		Dry weight, fresh weight, nutrient accumulation
Khater et al. (2015) [23]	1.0, 1.5, 2.0 (1.0)		Nutrient uptake, fresh weight, dry weight, N content
Nuwansi et al. (2016) [22]	0.8, 2.4, 4.0 (0.8)	Spinach	Plant height, leaf length, yield, percentage of height gain
Endut et al. (2009) [17]	0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 (1.6)		Plant height, growth rate
Hussain et al. (2015) [45]	1.0, 1.5, 3.2 (1.5)		Plant height, percentage of height gain, yield
Soares et al. (2020) [21]	1.5, 2.5 (1.5)	Cauliflower	Leaf area, number of leaves, plant height, shoot diameter
Baiyin et al. (2021) [16]	0, 2, 4, 6, 8 (6)	Swiss chard	Fresh weight, dry weight, leaf area, root length, root surface area, N uptake
Baiyin et al. (2021) [27]	2, 4, 6, 8 (2-6)		Fresh and dry weight, leaf area, N uptake, root length and surface area, root volume, hemicellulose and cellulose contents of root
Baiyin et al. (2021) [46]	2, 4, 6, 8 (6)		Fresh weight, dry weight, leaf area, root length, macro-nutrient (N, P, K, Ca, Mg, S) uptake, nutrient use efficiency

2.4 要約

本章では、水耕栽培における養液流量が植物の生長および養分吸収に与える影響を明らかにすることを目的とした。

自然光を利用したビニールハウス内において、フダンソウを供試作物とし、各養液流量（0, 2, 4, 6, 8 L/min）の下で水耕栽培実験を実施した。また、各養液流量に対して、栽培容器内の養液流れ場および根系の挙動を粒子画像流速測定法（PIV）で可視化し、それらの定量的評価を行った。

養液流量が 2 L/min から 6 L/min へ増加するにつれ、フダンソウの新鮮重と乾物重も増加した。特に、4 L/min および 6 L/min における乾物重は、0 L/min の場合に比べてそれぞれ 8.2% および 15.2% 増加し、6 L/min における乾物重が最大となった。また、養液流量が増加するにつれ、養液の流動状態が高くなり、培養液中の根の変形と揺動が大きくなったにもかかわらず、葉面積、根の長さおよび表面積および N 吸収量は増加した。このことが新鮮重と乾物重の増加をもたらしたものと考えられる。

一方で、養液流量が 8 L/min の場合には、新鮮重、乾物重、葉面積、根の長さおよび表面積および N 吸収量は 6 L/min の場合に比べて有意に減少した。培養液中の根のほとんどの部分が高い流動状態にさらされており、このことが根の生長および養分吸収を阻害する物理的的刺激（動圧、摩擦抵抗など）になったものと考えられる。

本章の実験における養液流量の範囲において、養液流量が増加するにつれ、フダンソウの乾燥重および N 吸収量が増加し、最大となったのちに減少する傾向を示した。このことから、根系からの無機イオンの吸収と根系の伸長を促進し、植物の生長を促進する適切な養液流量があることが示唆された。

第3章 植物生長と根の形態形成

水耕栽培において、根は植物個体の全ての器官の中で、培養液と接触する唯一の器官になることから、根の生長状態や形態に及ぼす養液流量の影響を調査することが、植物生長へ及ぼす養液流量の影響を解明するために必要となる。

2章では、水耕栽培試験および培養液流れ場の可視化から、根の伸長や養分吸収に与える養液流量の影響を検討した。

そこで本章では、根の形態形成に着目した。フダンソウを対象に異なる培養液流量下（2 L/min, 4 L/min, 6 L/min, および 8 L/min）での水耕栽培実験を実施し、植物の生長と養分吸収および根の形態を調査するとともに、根のセルロースとヘミセルロースの含有量について分析した。

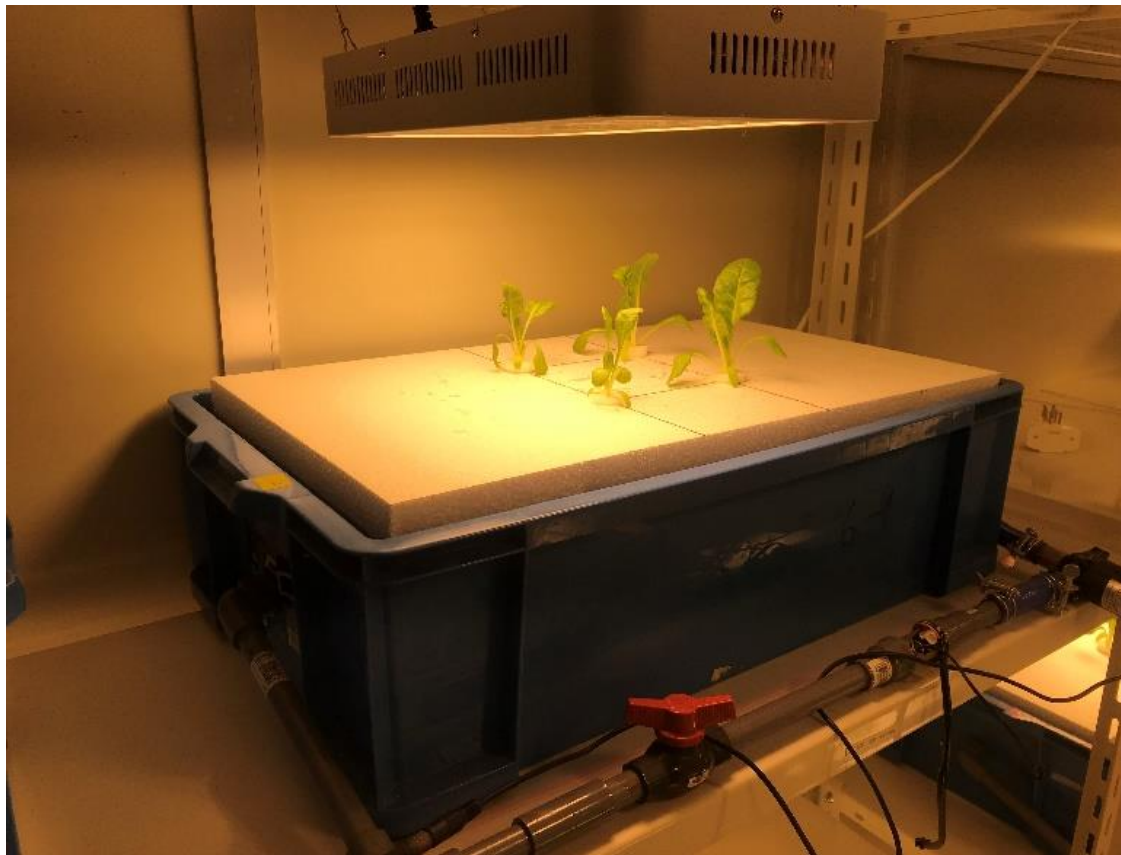
3.1 方法と材料

3.1.1 栽培方法

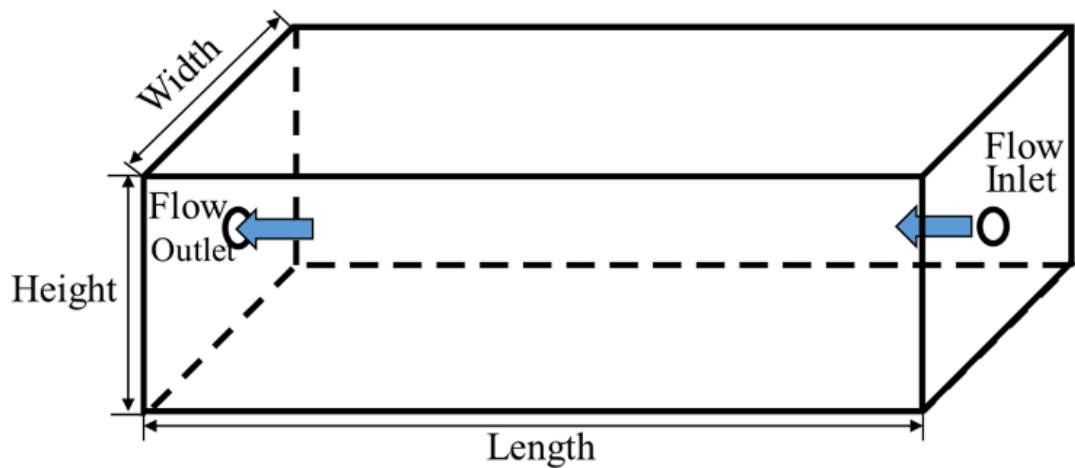
本章の栽培実験は、鳥取大学地域学部棟（鳥取市湖山町南 4-101）の人工照明を備えた屋内栽培室にて実施された。水耕栽培システムを図 3-1 に示す。栽培容器の上に LED 照明 (Derlights B07YV633CT ShenZhen Lighting Inc., Shenzhen, China) が設置されていること以外、水耕栽培システムの構成は、2 章で用いた栽培システム (図 2-1) と基本的に変わりなく、栽培容器、ポンプ、バルブ、および流量計で構成されている。培養液はポンプで連続的に容器内および外部配管を循環するように供給される。また、栽培盤面上における LED 照明による光合成光子束密度 (PPFD) を $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ に設定した。この際に、LED の 1 m 下方の位置で光ファイバー分光計 (USB2000+, Ocean Optics Inc., Ostfildern, Germany) によって LED のスペクトルを測定し、その特性を確認した (図 3-2)。

フダンソウを供試作物とした。まず、2021 年 4 月 21 日に種子をバーミキュライトに播種した。最初の葉が現れた後、苗を 40 L の流動しない希釈培養液 (OAT 肥料 A 標準培養液の 0.25 倍濃度 ; pH 6.5, EC 0.68 mS/cm) で満たされたプラスチック容器 (長さ 620 mm, 幅 375 mm, 高さ 195 mm) に移植した。LED を使用して、12 : 12 の明期 : 暗期のスケジュールで苗を照射した。5 月 10 日に、苗を 4 穴栽培盤に挿し、40 L の培養液 (OAT 肥料 A 標準培養液の 0.5 倍濃度 ; pH 6.5, EC 1.26 mS/cm) を満たした水耕栽培システムに定植した。各養液流量 (2, 4, 6, 8 L/min) を設定し、それら 4 つの流量処理に関する栽培は、4 つの反復 (栽培容器) で構成され、各栽培容器にはフダンソウ 4 株が植えられた。培養液は 14 日ごとに交換した。

実験期間 (2021 年 5 月 10 日 ~ 5 月 31 日) において、湿度/温度/大気圧センサー (VP-4, Decagon Devices, Pullman, WA, USA) と超音波風速計 (ATMOS22, METER Environment, Pullman, WA, USA) を用いて、栽培室の気象データを記録した。各気象データを図 3-3 に示す。



(a) Diagram of cultivation system



Size of cultivation container: 620 mm Length, 375 mm Width, 195 mm Height

(b) Dimension of cultivation container

Figure 3-1. Hydroponics system used to study Swiss chard growth under variable nutrient solution flow rates.

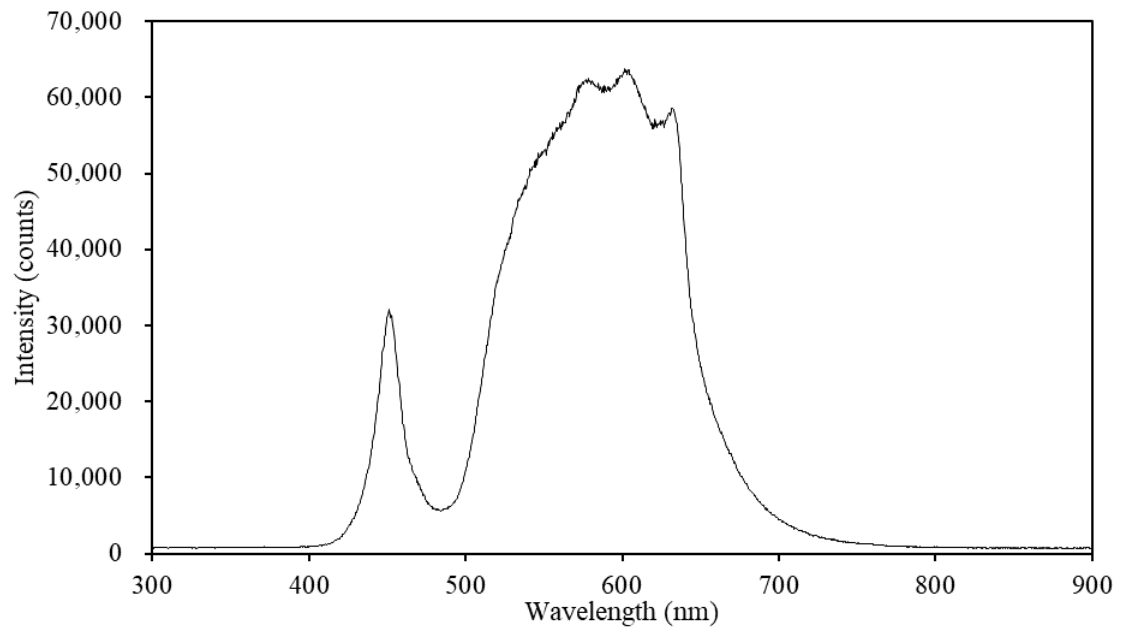
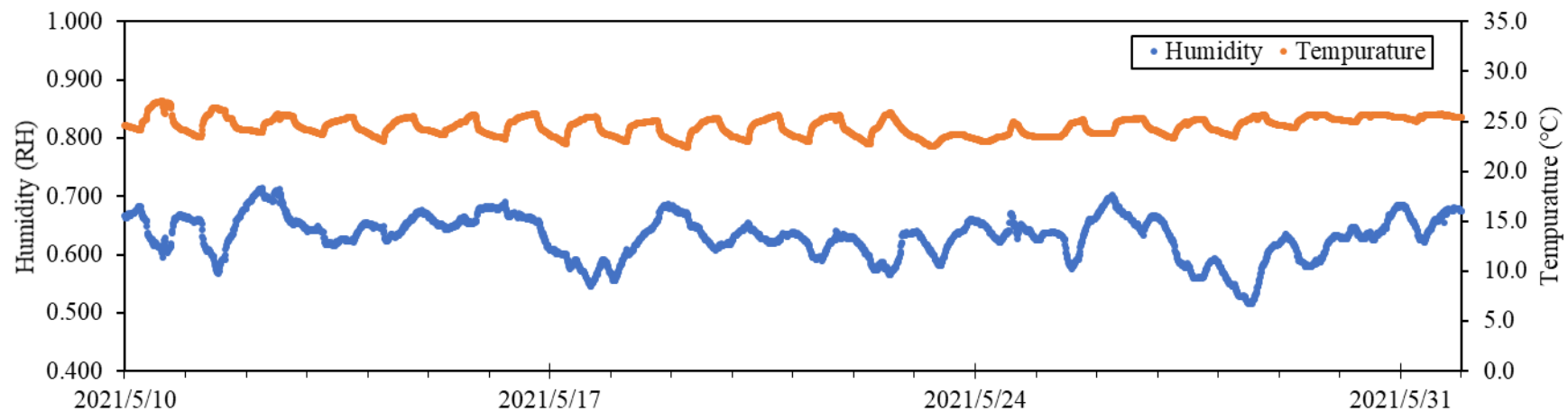
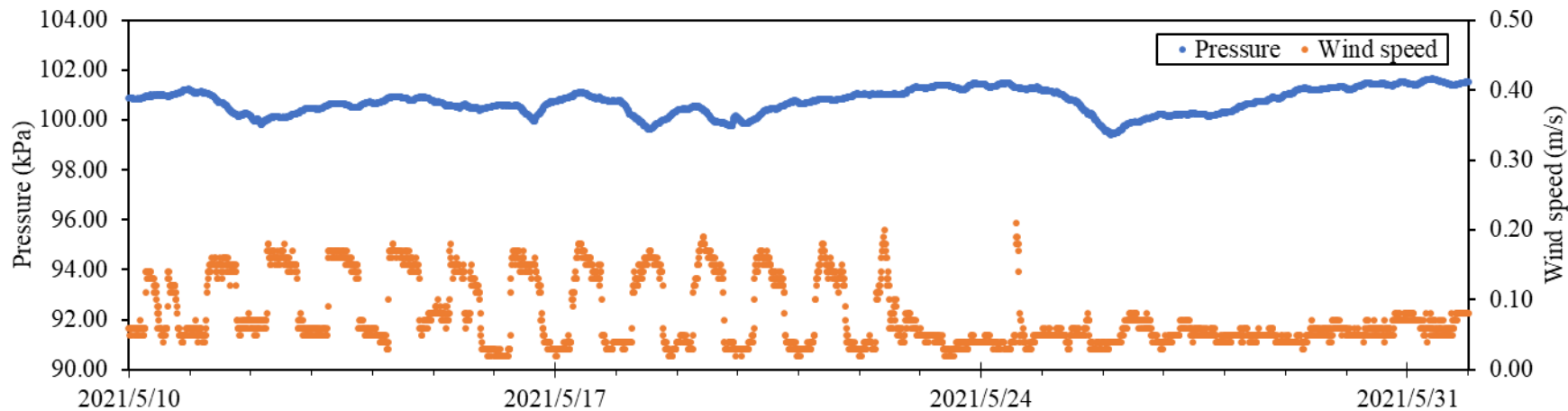


Figure 3-2. LED spectra used in this study.



(a) The humidity and temperature data of the cultivation room during hydroponic cultivation



(b) The air pressure and wind speed data of the cultivation room during hydroponic cultivation

Figure 3-3. The environmental data of the cultivation room during hydroponic cultivation.

3.1.2 測定項目と測定方法

本章では、LED による人工照明の下で水耕栽培実験を行っているため、植物の生長に関する検討において 2 章で得られた結果を参照することは難しいと考えられる。したがって、本章の栽培環境で収穫したフダンソウについても、新鮮重、乾燥重、葉面積、根の長さや表面積などを測定した。

定植 21 日後に各栽培容器内のフダンソウを収穫し、新梢と根に切り分けた。各植物の新鮮重と葉面積を、電子天びん (UP623Y, Shimadzu, Kyoto, Japan) と葉面積計 (LI-3100 AREA METER, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA) を使用して測定した。根の長さ、表面積、および体積については、ルートスキャナーで測定し、付属のソフトウェア (WinRhizo 2008a, REGENT INS, Quebec, QC, Canada) により算定した。次に、植物サンプルを 75 °C の対流式オーブン (DKM600, Yamato Scientific, Tokyo, Japan) で 72 時間乾燥させてから、乾物重を測定し、その後に乾燥した植物を粉砕し、栄養素含有率を測定した。各新梢と根のサンプルの全窒素含有率については、有機元素分析装置 (CN corder JM1000CN, J-Science Group, Tokyo, Japan) にて測定し、植物全体の N 吸収量を、乾物重と N 含有率によって計算した。

根のセルロースおよびヘミセルロース含有量の測定については、Ping An ら [50] の測定手法を参照した。まず、乾燥した根を粉砕し、約 20 mg の根の粉末を試験管に入れた。次に、ペレットを含む細胞壁を、エタノール、アセトン、およびメタノール：クロロホルム混合物 (1:1 v/v) での連続インキュベーションおよび遠心分離によって精製した。ヘミセルロース I および II を 1 M および 4 M KOH で順次抽出した。抽出操作を 8, 16, および 8 時間の間隔で 3 回繰り返した。残った不溶性沈殿物を水とエタノールで連続的に洗浄し、50 °C で乾燥させた。2 mL の 72% (v/v) 硫酸に溶解し、8 mL の水で希釈した後、残留物をセルロース画分と指定した。各画分の総糖については、フェノール-硫酸法 [51] を使用して測定した。

乾物重のヘミセルロース I および II の含有率を合計した値を用いて、根の細胞壁の総乾物重におけるヘミセルロース含有量を算出した。次に、根の新鮮重当たりのヘミセルロース含有量（以下、ヘミセルロース CFW）を、根の乾物重に乾物重のヘミセルロース含有率を乗じ、根の新鮮重で割ることによって、算出した。また、根の体積当たりのヘミセルロース含有量（以下、ヘミセルロース CV）を、根の乾物重に乾物重のヘミセルロース含有率を乗じ、根の体積で割ることによって得た。

同様に、根の単位新鮮重当たりのセルロース含有量（以下、セルロース CFW）を、乾物重に乾物重のセルロース含有率を乗じ、根の新鮮重で割ることによって求め、根の単位体積当たりのセルロース含有量（以下、セルロース CV）を、根の乾物重に乾物重のセルロース含有率を乗じ、根の体積で割ることによって算出した。

3.1.3 統計処理

データ分析には SPSS 25 (IBM, Chicago, IL, USA) を使用し、一元配置分散分析とそれに続くダンカンの複数範囲検定を実施した。その結果については、 $p < 0.05$ で統計的に有意であるとみなし、平均±標準誤差 ($n = 4$) として表した。

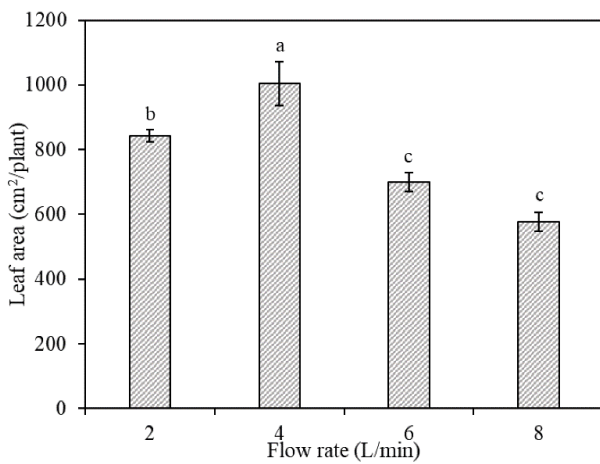
3.2 結果

3.2.1 植物生長と養分吸収

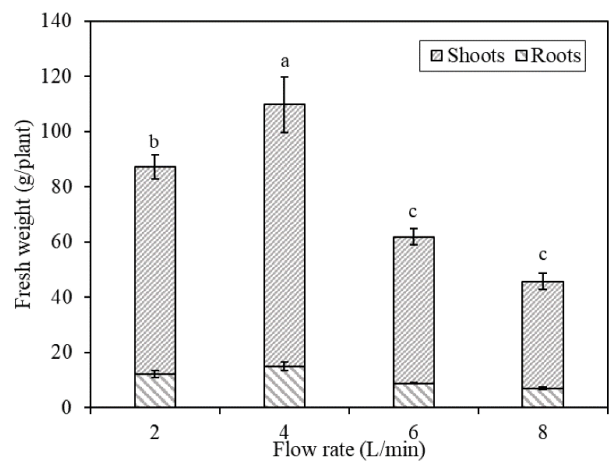
各培養液流量におけるフダンソウの生長と窒素（N）吸収量を図 3-4 に示す。養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加すると、フダンソウの葉面積は有意に増加し、その増加割合は 19.0%であった。養液流量が 4 L/min から 6 L/min および 8 L/min に増加すると、葉面積は有意に減少し、その減少割合はそれぞれ 30.3% および 42.5%であった（図 3-4 (a)）。

新鮮重においても、4 L/min における新鮮重は 2 L/min の場合に比べて有意に増加し、その増加割合は 26.0%であった。一方で、養液流量が 4 L/min から 6 L/min および 8 L/min に増加すると、新鮮重は有意に減少した。それぞれの減少割合は 43.6%および 58.3%を示した（図 3-4 (b)）。2 L/min から 6 L/min の場合の乾物重には有意な差がみられなかったが、養液流量が 4 L/min から 6 L/min に増加すると、乾物重はやや減少する傾向がみられた。また、8 L/min における乾物重は、他の養液流量と比較して有意な減少を示した（図 3-4 (b)）。

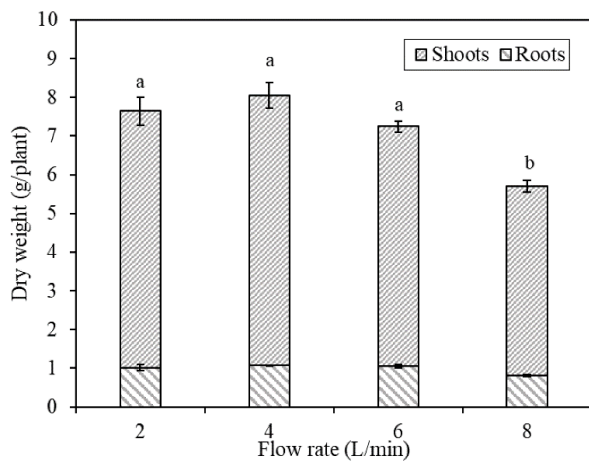
養液流量 2 L/min および 4 L/min における植物の窒素（N）吸収量には有意な差はみられなかったが、4 L/min の N 吸収量は 2 L/min の場合に比べて 7.5%の増加を示した。N 吸収量は、培養液流量が 4 L/min から 6 L/min および 8 L/min に増加すると有意に減少し、それぞれ 17.1%および 40.5%の減少割合を示した。



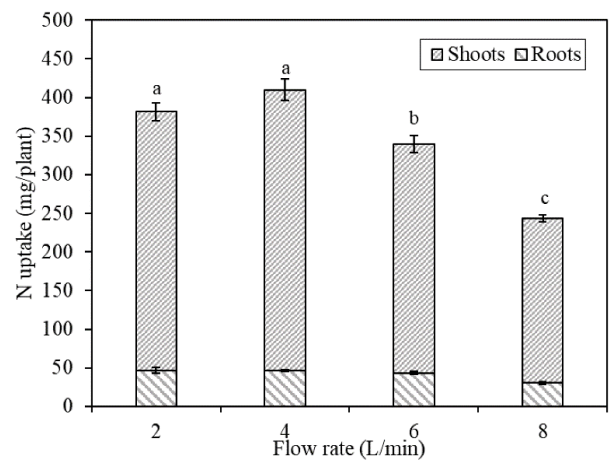
(a) Leaf area



(b) Fresh weight



(c) Dry weight



(d) N uptake

Figure 3-4. Plant growth and nutrient uptake under different flow rates. Bars labeled with different letters differ significantly ($p < 0.05$). Data are expressed as means \pm standard error ($n = 4$).

3.2.2 根の形態とセルロース・ヘミセルロース含有量

各養液流量における根の形態と細胞壁組成量についての結果を図 3-5 に示す。養液流量が 2 L/min から 6 L/min における根の長さには有意な差はみられなかったが、8 L/min における根の長さは、他の養液流量の場合に比べて有意に減少した (図 3-5 (a))。

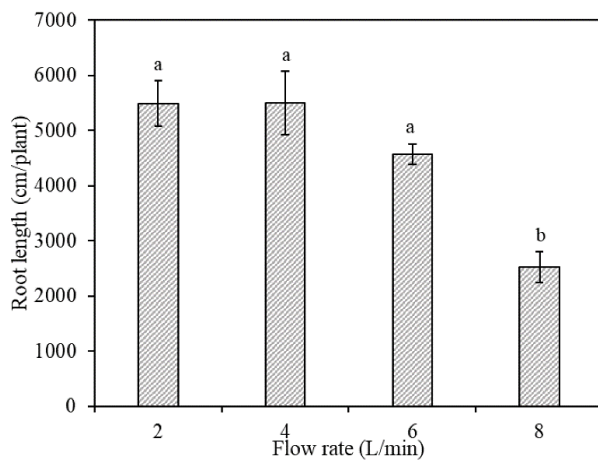
根の表面積については、養液流量が 2 L/min および 4 L/min における有意な差はなかったものの、4 L/min における表面積は 20.7%の増加を示した。また、培養液流量が 4 L/min から 6 L/min および 8 L/min に増加した場合に、根の表面積は有意に減少しており、その減少割合はそれぞれ 42.6%および 65.0%であった (図 3-5 (b))。

養液流量 4 L/min における根の体積は、2 L/min の場合に比べて有意に増加しており、その増加割合は 49.0%であった。一方で、養液流量 6 L/min および 8 L/min における根の体積は、4 L/min の場合と比較して有意に減少した。根の体積の減少割合は、それぞれ 63.0%および 74.6%であった (図 3-5 (b))。

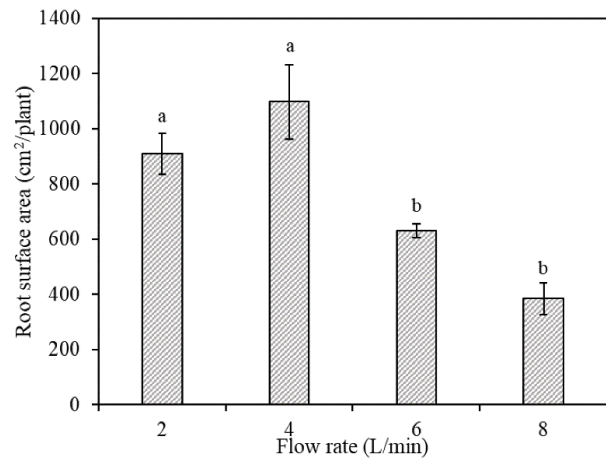
単位新鮮重あたりの根の体積 (VFW) は、養液流量 2 L/min および 4 L/min において有意な差はみられなかったが、4 L/min における VFW は 2 L/min に比べて 18.8%増加していた。養液流量 6 L/min および 8 L/min における VFW は、4 L/min の場合に比べて有意に減少した。それぞれの VFW は、36.6%および 46.3%の減少を示した (図 3-5 (d))。

単位新鮮重あたりの根の表面積 (SAFW) は、養液流量が 2 L/min から 6 L/min に増加しても有意な差はなかったが、8 L/min の場合には、他の流量に比べて有意な減少を示した (図 3-5 (e))。

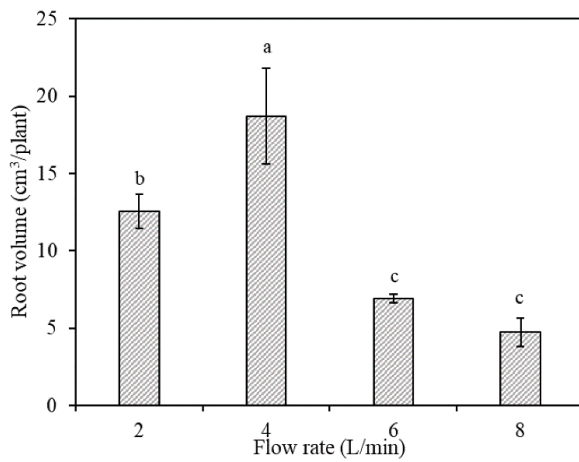
一方で、単位新鮮重 (CFW) あたりのセルロース・ヘミセルロース含有量および単位体積 (CV) あたりセルロース・ヘミセルロース含有量については、高い養液流量 (6 L/min および 8 L/min) の場合が低い養液流量 (2 L/min および 4 L/min) の場合よりも有意に増加した (図 3-5 (f), (g))。



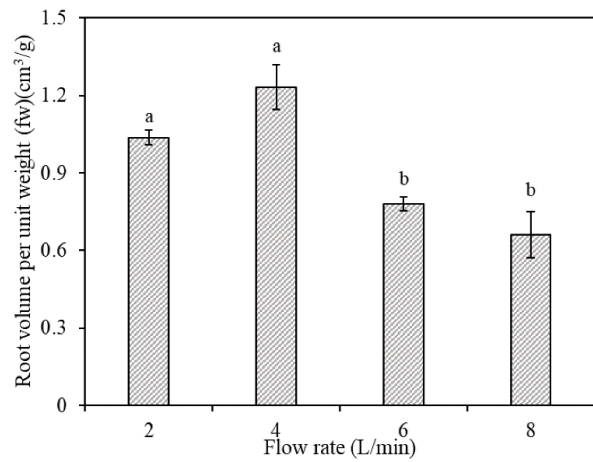
(a) Root length



(b) Root surface area

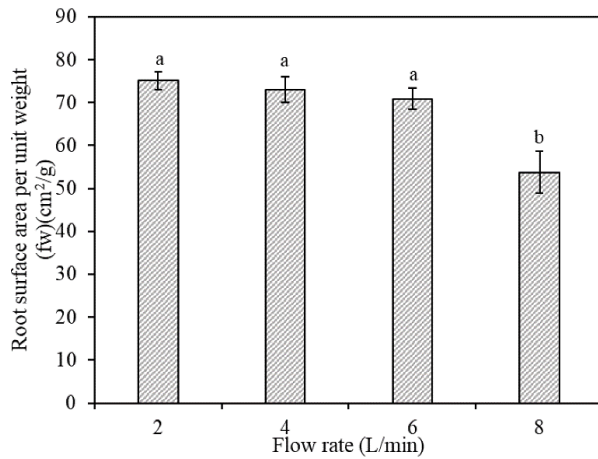


(c) Root volume

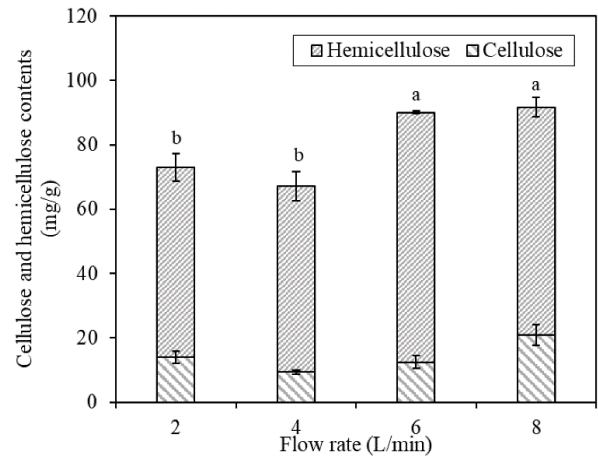


(d) Root volume per unit weight

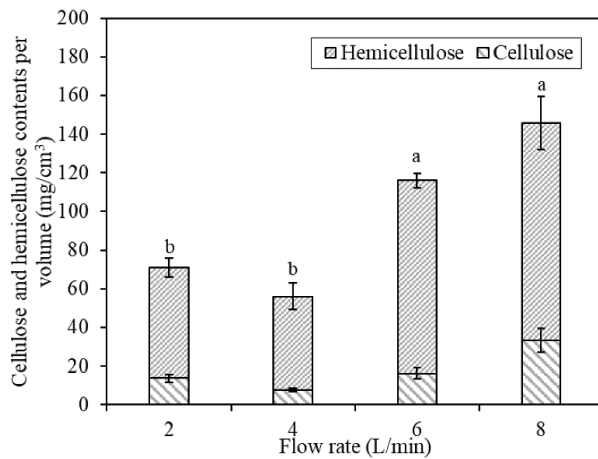
Figure 3-5. Morphology and cell wall composition of roots under different flow rates. Bars labeled with different letters differ significantly ($p < 0.05$). Data are expressed as means \pm standard error ($n = 4$).



(e) Root surface per unit weight



(f) Cellulose and hemicellulose contents per unit fresh weight



(g) Cellulose and hemicellulose contents per unit volume

Figure 3-5 (continue). Morphology and cell wall composition of roots under different flow rates. Bars labeled with different letters differ significantly ($p < 0.05$). Data are expressed as means \pm standard error ($n = 4$).

3.3 考察

異なる養液流量条件 (2, 4, 6, 8 L/min) のもとで、フダンソウの水耕栽培実験を実施し、葉面積、新鮮重、乾物重、および N 吸収量を測定するとともに、根の形態について根の長さ、表面積、および体積を調査した。

本章の実験範囲では、フダンソウの葉面積および新鮮重は 4 L/min において最大となり、6 L/min および 8 L/min と大きくなると、いずれの量も有意に減少した (図 3-4(a),(b))。乾物重は 2 L/min から 6 L/min において有意差はなかったが、8 L/min になると減少した (図 3-4(c))。また、根の長さ、表面積、および体積は 4 L/min において最大となり、6 L/min および 8 L/min と増加するにつれて、いずれの量も減少した (図 3-5(a),(b),(c))。N 吸収量は、根の生長の変化と同じ傾向を示した (図 3-4(d))。

一方、根の VFW については、低い養液流量 (2, 4 L/min) の方が高い養液流量 (6, 8 L/min) の場合よりも有意に増加した (図 3-5(d))。さらに根の SAFW は、他の養液流量と比較して 8 L/min で有意に減少した (図 3-5(e))。これらのことは、養液流量に応じた物理的刺激に適応するために、根が形態学的応答を示したと考えられる。すなわち、VFW が減少することは、根の単位体積当たりの重量を増加させ根全体のコンパクト化に寄与するもので、高い養液流量において根がよりコンパクトになり、根の SAFW が減少したことから、より高い養液流量で根の N 吸収量が小さくなった。これらの結果は水耕栽培システムに応じて、培養液の流量を適切に調整することによって、培養液中の根の生長を最大にして、N 吸収量を最大化できると考えられる。

セルロースとヘミセルロースは、根の細胞壁の骨格を維持するために不可欠な成分であり、セルロースとヘミセルロースの構造および組成の変化は、細胞壁の伸長および機械的強度に影響を与える主な要因である。本章では、CFW と CV は、高流量の方が低流量よりも増加することがわかった (図 3-5(f),(g))。根の強度はセルロース含有量と高い正の相関がある [29, 50] ので、本章の結果から、

高い養液流量で育てたフダンソウについては、強度が高くコンパクトな根を発達させたことを示している。

植物の応答は、さまざまな生物学的、化学的、および物理的的刺激を受けて引き起こされる[52-55]。植物の環境ストレス応答は、刺激の強さと持続時間に対応している。適度な大きさの刺激は植物の生長に良い影響を与える（有益ストレス）が、過剰な刺激は植物の生長を阻害する影響を与える（有害ストレス）[56]。先行研究では、生物学的、化学的、および物理的な有益ストレスを作物栽培に適用した効果が数多く報告されている[57-64]。

一般的に植物の葉や茎などは物理的的刺激を受けると、伸長生長が抑制され、肥大生長が促進される（接触形態形成、Thigmomorphogenesis）[60, 61, 63]。この現象を利用して、植物に物理的な接触を与え、植物の形態形成を制御して、品質を高めることが可能もある[54, 55]。本研究においても、培養液の流れが根に対する物理的的刺激となり、根の形態形成に影響を与えたものと考えられる。本研究で設定した低い養液流量（2, 4 L/min）は有益ストレスを与える流量条件とみなすことができ、この範囲での流量増加は、根の生長を促進するための適切な物理的的刺激となり、根の生長とそれに伴う養分吸収が促進された結果、植物生長も促進されたと考えられる。逆に、高い養液流量（8 L/min）の場合では、根の生育にとって有害なストレスと考えられ、高流量の培養液の流れに適応するために、根はコンパクトになり、根の伸長とそれに依存する表面積の増加が抑制され、根の養分吸収量が減少した結果、植物生長が低下したものと考えられる。以上のことから、図 3-6 に示したように、水耕栽培の養液流量を適度に調節することが、根の形態形成と養分吸収の増加をもたらし、それによって植物生長の促進とその収量を高めることができると考えられる。

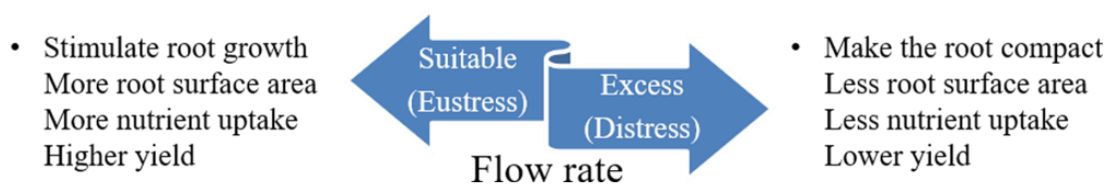


Figure 3-6. Relationship between root morphology and yield as affected by hydroponic flow rate.

3.4 要約

本章では、培養液中の根系の形態および細胞壁構成成分に着目し、水耕栽培の養液流量が植物の生長および養分吸収に与える影響について検討した。具体的には、人工照明（LED）を利用した屋内栽培室において、各養液流量（2, 4, 6, 8 L/min）によるフダンソウの水耕栽培実験を実施し、生長量（葉面積、新鮮重、乾物重）、N 吸収量、および根の形態（根の長さ、表面積、体積）と細胞壁構成成分（セルロース、ヘミセルロース）を調査した。

フダンソウの新鮮重、乾物重、葉面積およびN 吸収量は、2 L/min から 4 L/min にかけて増加し、さらに 6 L/min および 8 L/min に増加するにつれ、各値は減少する傾向を示した。これらの結果は、2 章の栽培実験の結果と同様の傾向となったことを確認した。

根の単位新鮮重当たりの体積（VFW）は、高い養液流量（6, 8 L/min）よりも低流量（2, 4 L/min）で有意に高く、根の SAFW は、2 - 6 L/min の培養液流量と比較して 8 L/min で大幅に減少した。根の VFW の減少は、根の密度の増加による根系のコンパクト化を進めるもので、これらの形態学的応答は、根が養液流量に応じた物理的刺激に適応するためのものと考えられる。その結果として、高い養液流量において根がよりコンパクトになることで表面積が減少し、根の N 吸収量が減少したと考えられる。さらに CFW と CV は、高流量の方が低流量よりも増加することがわかった。根の強度はセルロース含有量と高い正の相関がある[29, 50]ので、本章の結果から、高い養液流量で育てたフダンソウについては、コンパクトな根で強度が高くなっている可能性が示唆された。

これらのことから、水耕栽培の養液流量を適度に調節することが、根の形態形成と養分吸収の増加をもたらす、それによって植物生長の促進とその収量を高める可能性が示唆された。

第4章 植物生長と養分利用

本論文の2章および3章によって、水耕栽培における植物生長、根の形態、および養分吸収に及ぼす養液流量の影響を明らかにした。乾燥地では、作物の増産と効率的な資源（肥料）利用を両立した生産方式が常に求められている。

本章では、3章と同一の方法にてフダンソウの水耕栽培実験を実施し、植物生長、各栄養素の養分吸収量、および養分利用効率及ぼす養液流量の影響を調査した。

4.1 方法と材料

4.1.1 栽培方法

本章の水耕栽培実験については、3章で述べたものと基本的に変わりなく、簡潔に説明する。栽培水槽、循環ポンプなどで構成される栽培設備（図 3-1 参照）および人工照明用 LED（スペクトル特性：図 3-2 参照）を採用した。所定の操作により、各養液流量（2, 4, 6, 8 L/min）および栽培盤面上の光合成光子束密度（PPFD） $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ を設定した。フダンソウを供試作物とし、培養液には OAT ハウス肥料 A 処方の標準培養液（組成と濃度：表 2-2 参照）を使用した。

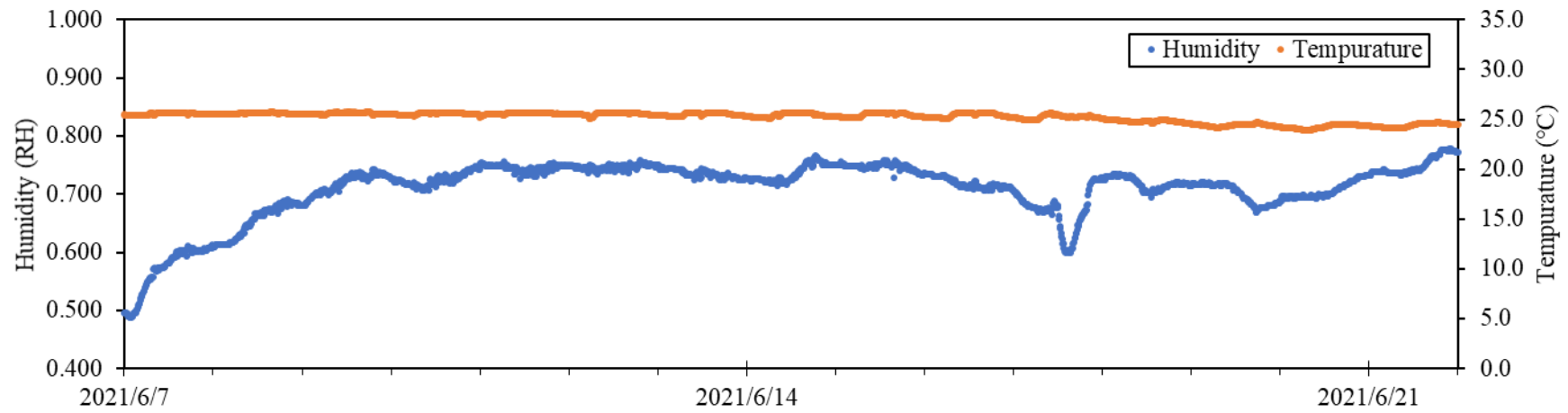
栽培においては、2021 年 5 月 10 日にフダンソウの種子をバーミキュライトに播種した。最初の葉が現れた後に、苗を非流動条件下にある 30 L の培養液（OAT 肥料 A 培養液 0.25 倍濃度；EC：0.62；pH：6.4）で満たされたプラスチック容器に移植した。その状態で苗を 10 日間育てた後、4 つの栽培穴を有する栽培盤に定植し、40 L の培養液（標準 OAT 肥料 A 0.5 倍濃度；EC 1.30 mS/cm, pH 6.4）で満たされた 16 個の水耕栽培容器に設置した。本実験においても、4 つの処理（培養液流量）のそれぞれについて 4 つの反復（水耕栽培容器）があり、4 つ株の植物が各栽培容器に植えられており、各栽培容器では 2 L/min, 4 L/min, 6 L/min, および 8 L/min の培養液流量での処理を設定した。

実験期間（2021 年 6 月 7 日～6 月 22 日）における栽培室の気温、気圧、風速、相対湿度などの気象データを記録した。それらのデータを図 4-1 に示す。

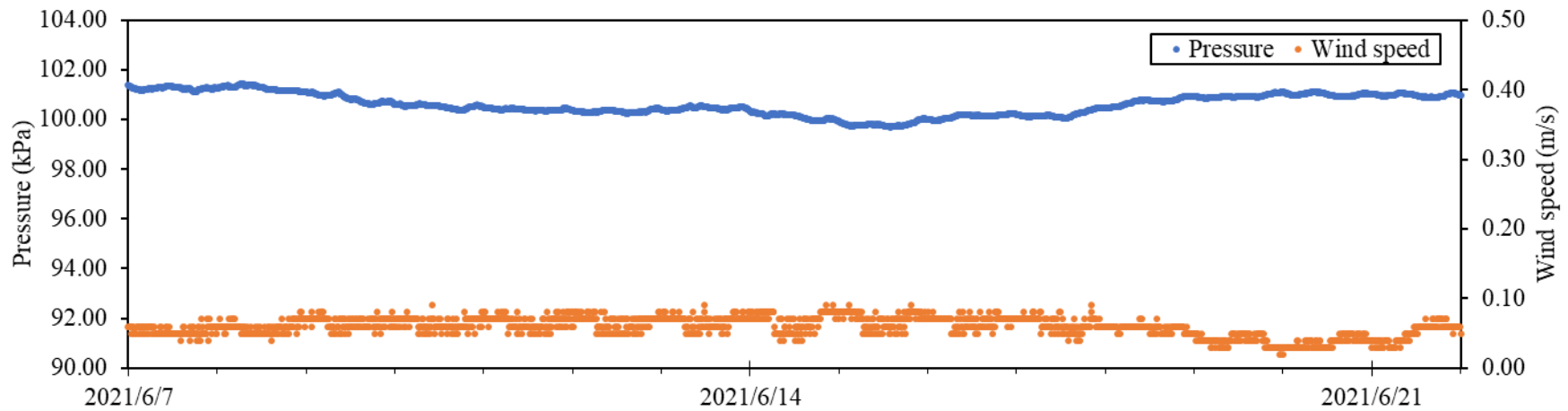
4.1.2 測定項目と測定方法

栽培したフダンソウを 14 日後に収穫し、新梢と根に切り分けた。新梢と根の新鮮重と乾物重, 葉面積, 根の長さを 3.1.2 に記載されている方法にて測定した。次に、乾燥した植物のサンプルを粉碎して栄養素含有率を測定した。新梢または根のサンプルの全窒素含有率は、有機元素分析装置 (CN corder JM1000CN, J-SCIENCE GROUP, Tokyo, Japan) を用いて測定した。栄養素であるリン (P), カリウム (K), カルシウム (Ca), マグネシウム (Mg), および硫黄 (S) の含有率を、誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS Agilent 8900, Agilent Technologies Inc.) で測定した。各栄養素 (P, K, Ca, Mg, S) の含有率については、マイクロ波システム (ETHOS UP, Milestone General, Kawasaki, Japan) の密閉容器内で硝酸 5 mL でサンプルを分解した後に ICP-MS によって測定した。各新梢と根のサンプル約 0.2~0.5 g を秤量し、分解ビンに加えた。次に、超微量分析用の 69%濃硝酸 (specific gravity 1.42, FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan) を消化容器に加え、マイクロストーブで温度 150 °C, 50 分間分解した。分解終了後に、容器を 30 分間冷却したのち、分解したサンプルを超純水 (>18 MΩcm) で 10,000 倍に希釈した。なお、この操作で使用した超純水は、Elix Essential UV 10 プレシシステム (Merck Millipore, Tokyo, Japan) を組み合わせた Milli-QReference 浄水システムで蒸留水を精製することによって得た。

乾物重と各栄養素の含有率に基づいて、フダンソウの養分吸収量を算定した。各栄養素の養分利用効率については、フダンソウ 1 株当たり乾物重の値を株に吸収された各栄養素の吸収量で割ることによって算出した。



(a) The humidity and temperature data of the cultivation room during hydroponic cultivation



(a) The air pressure and wind speed data of the cultivation room during hydroponic cultivation

Figure 4-1. The environmental data of the cultivation room during hydroponic cultivation.

4.1.3 統計処理

統計分析ソフトウェア (SPSS 25, IBM) を使用してデータを分析した。この研究で使用された統計分析法は、一元配置分散分析と、それに続く $p < 0.05$ の有意性でのダンカンの多重範囲検定であった。4 つの処理 (流量) は 4 つの反復 (栽培容器) で実施され、各反復の値については、同じ栽培容器内のすべての植物の平均値とした。それぞれの結果を平均値±標準誤差 ($n = 4$) として表した。フダンソウの葉面積、新鮮重、乾物重、根の長さとは各栄養素の吸収量との相関関係をピアソンの相関によって分析した。

4.2 結果

4.2.1 植物生長

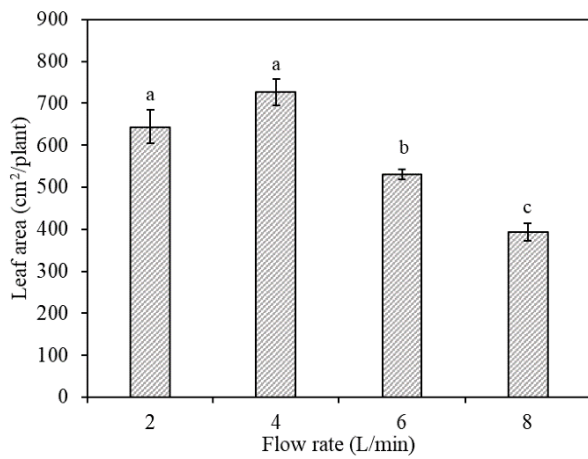
各養液流量におけるフダンソウの葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さを図 4-2 に示す。葉面積は、養液流量が 2 L/min から 4 L/min において 12.8%増加したが、養液流量 4L/min から 8 L/min においては有意に減少した。4 L/min の場合と比較して、6 L/min および 8 L/min の葉面積はそれぞれ 27.1%および 45.9%減少した (図 4-2 (a))。

新鮮重について、各養液流量間において有意な差がみられた。2 L/min から 4 L/min において新鮮重は 26.7%増加し、4 L/min から 6 L/min および 8 L/min に増加した場合には、新鮮重はそれぞれ 36.2%および 51.4%減少した (図 4-2 (b))。

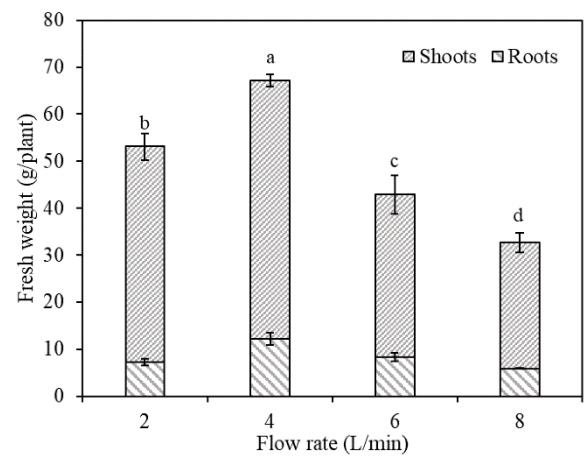
乾物重は、2 L/min から 6 L/min において有意な差はなかったが、8 L/min における乾物重は、他の養液流量と比較して有意な減少を示し、4 L/min の場合に比べて 30.0%減少した (図 4-2 (c))。

根の長さは、2 L/min から 4 L/min に増加すると 36.4%増加した。また、4 L/min における根の長さには比較して、6 L/min および 8 L/min における根の長さは有意に減少し、それぞれの減少割合は 29.6%と 50.3%であった (図 4-2 (d))。

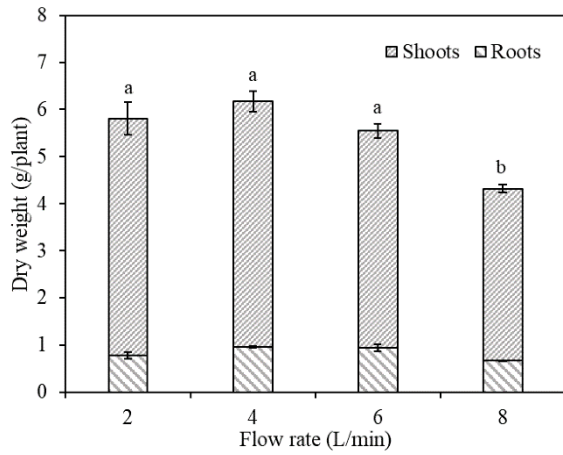
図 4-2 に示したように、養液流量に対する各測定量の変化については、2 章および 3 章での実験結果と類似の結果が得られており、フダンソウの生長に対する養液流量の影響についての再現性を確認することができた。



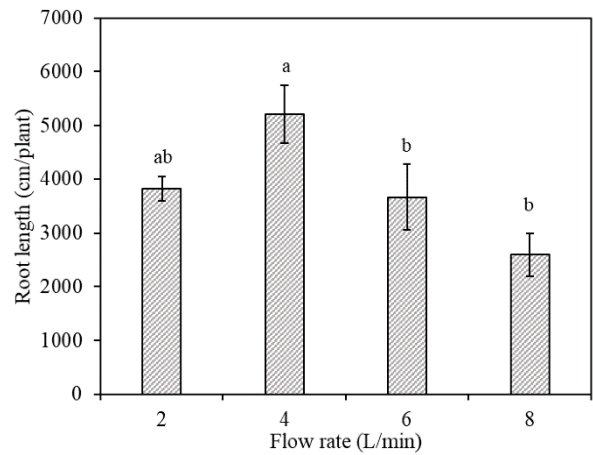
(a) Leaf area



(b) Fresh weight



(c) Dry weight



(d) Root length

Figure 4-2. Growth parameters of the plants growth under different flow rates in this study. There were significant differences in the bars marked with different letters ($p < 0.05$). Data are expressed as means \pm standard error ($n = 4$).

4.2.2 養分吸収

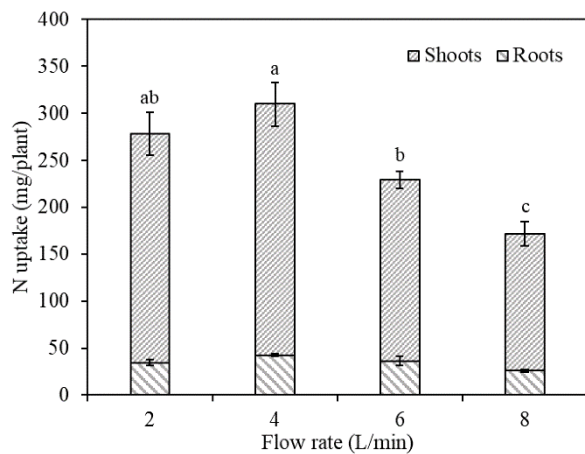
各養液流量において栽培したフダンソウ 1 株当たりの養分吸収量に関する結果を図 4-3 に示す。N 吸収量は、養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加すると、8.3%増加した。6 L/min から 8 L/min の場合には、4 L/min の場合と比較して有意に減少しており、N 吸収量はそれぞれ 23.6%および 42.6%減少した。(図 4-3 (a))。

P 吸収量においては、養液流量が 2 L/min から 6 L/min に増加しても有意な差はなかったが、8 L/min の場合では、他の養液流量と比較して有意な減少を示した。この場合、8 L/min での P 吸収量は、6 L/min と比較して 41.8%減少した (図 4-3 (b))。

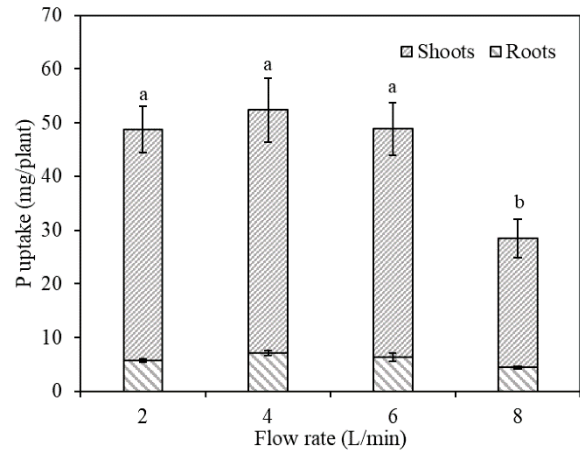
K 吸収量については、2 L/min から 4 L/min にかけて有意な増加を示し、その吸収量は 34.3%増加した。4 L/min から 8 L/min に増加した場合には、K 吸収量は減少する傾向を示した。特に、8 L/min の場合の K 吸収量は、他の養液流量と比較して有意に減少しており、4 L/min の場合からの減少割合は 55.3%であった (図 4-3 (c))。

Ca 吸収量は、2 L/min から 6 L/min の範囲においてばらつきがみられた。一方で、8 L/min における Ca 吸収量は、他の養液流量よりも有意に減少した。(図 4-3 (d))。

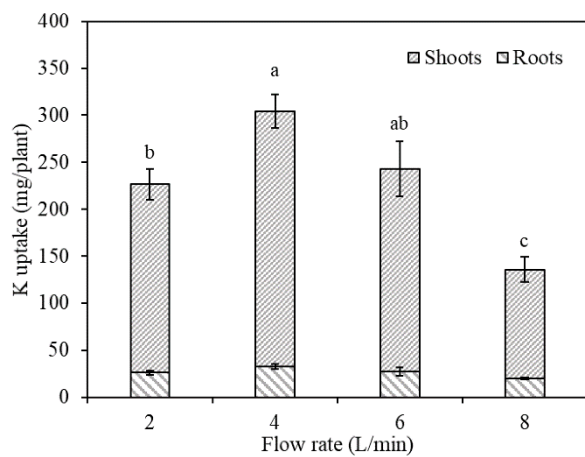
Mg 吸収量および S 吸収量については、2 L/min から 6 L/min における吸収量に有意差はなかった。しかし、Mg 吸収量および S 吸収量においても、8 L/min の場合には有意に減少しており、6 L/min の場合と比較したとき、Mg 吸収量では 42.5%、S 吸収量では 48.2%の減少を示した (図 4-3 (e),(f))。



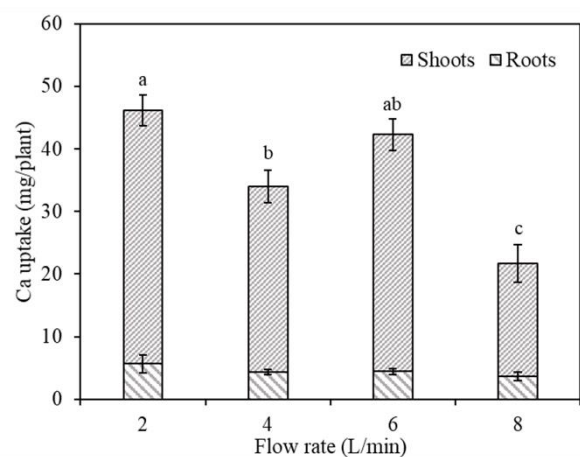
(a) Nitrogen uptake by a whole plant



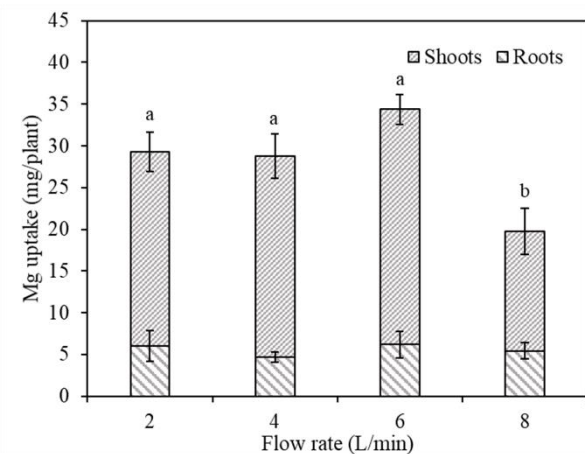
(b) Phosphorus uptake by a whole plant



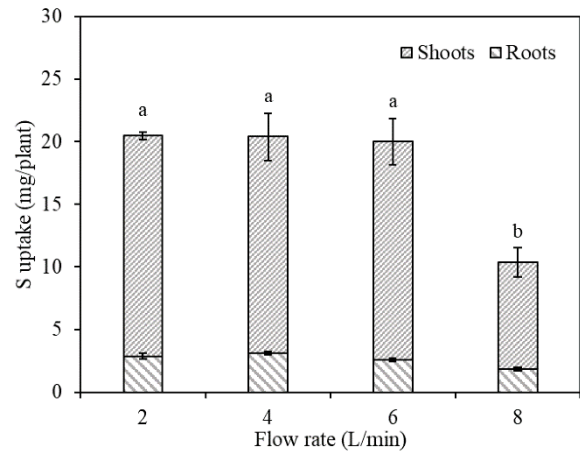
(c) Potassium uptake by a whole plant



(d) Calcium uptake by a whole plant



(e) Magnesium uptake by a whole plant



(f) Sulfur uptake by a whole plant

Figure 4-3. Nutrient uptake of plants under different flow rates. There were significant differences in the bars marked with different letters ($p < 0.05$). Data are expressed as means \pm standard error ($n = 4$).

4.2.3 植物生長と養分吸収の相関

葉面積，新鮮重，乾物重，根の長さ，および各栄養素（N, P, K, Ca, S, Mg）の吸収量の各項目間の相関関係を図 4-4 に示す。全体的な傾向として，植物生長と養分吸収に関する項目間には，正の相関関係が認められた。葉面積について，植物の新鮮重，乾物重，根の長さ，および各栄養素（N, P, K, Ca, S）の吸収量との間での相関係数は 0.516 から 0.916 となり，有意な正の相関関係が認められた。新鮮重では，N, P, K および S 吸収量と有意な正の相関関係があり，乾物重ではすべての栄養素の吸収量と有意な正の相関関係が確認された。特に乾物重と N 吸収量との間の相関係数は 0.849 と高かった。根の長さは，葉面積，新鮮重および栄養素（K, P）の吸収量との間に有意な正の相関関係が示された。

4.2.4 養分利用効率

栽培実験で得られた乾物重（図 4-2 (c)）と養分吸収量（図 4-3）の値を用いて算出された各栄養素の養分利用効率を図 4-5 に示す。

窒素利用効率（NUE）は，養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加すると，3.5% 減少したのに対し，4 L/min から 6 L/min および 8 L/min へ増加すると，NUE はそれぞれ 19.3% および 26.0% 増加する傾向を示した（図 4-5 (a)）。

リン利用効率（PUE）およびマグネシウム利用効率（MgUE）は，養液流量間で有意差がなかった（図 4-5 (b), (e)）。

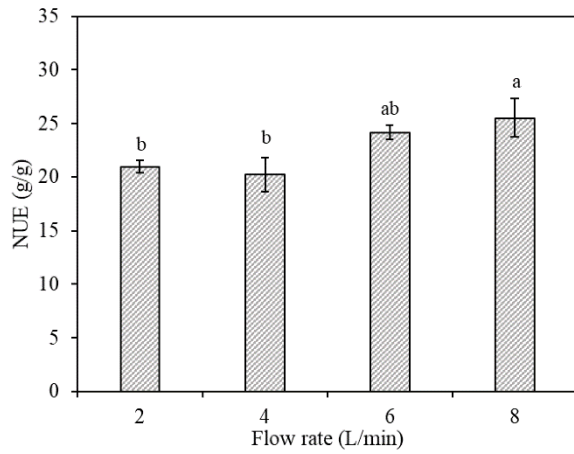
カリウム利用効率（KUE）は，養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加するにつれて KUE は 22.0% 減少したが，6 L/min および 8 L/min へと増加するにつれ，KUE はそれぞれ 17.1% と 36.6% 増加した（図 4-5 (c)）。

カルシウム利用効率（CaUE）については，養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加すると，CaUE は 45.2% 増加し，4 L/min から 6 L/min に増加すると CaUE は 27.6% 減少した。さらに 6 L/min から 8 L/min へ増大した場合には，CaUE は 76.7% 増加した。8 L/min における CaUE が最大となった（図 4-5 (d)）。

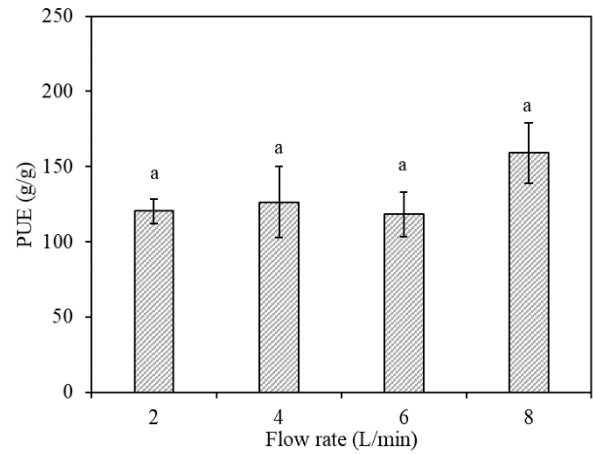
硫黄利用効率 (SUE) は、養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加すると、9.2% 増加し、さらに 6 L/min に増加すると、SUE は 8.5% 減少した。6 L/min から 8 L/min に増加すると、SUE が 54.0% 増加した。8 L/min における SUE は、他の流養液流量の場合と比較して、有意に増加した (図 4-5 (f))。

	Leaf area									
Leaf area	1	Fresh weight								
Fresh weight	0.916**	1	Dry weight							
Dry weight	0.829**	0.781**	1	Root length						
Root length	0.640**	0.769**	0.429	1	Mg uptake					
Mg uptake	0.418	0.334	0.627**	0.085	1	K uptake				
K uptake	0.698**	0.814**	0.704**	0.714**	0.646**	1	P uptake			
P uptake	0.721**	0.720**	0.627**	0.740**	0.539*	0.742**	1	S uptake		
S uptake	0.639**	0.650**	0.792**	0.468	0.818**	0.851**	0.698**	1	Ca uptake	
Ca uptake	0.506*	0.339	0.698**	0.049	0.743**	0.394	0.434	0.759**	1	N uptake
N uptake	0.847**	0.773**	0.849**	0.439	0.488	0.664**	0.588*	0.739**	0.561*	1

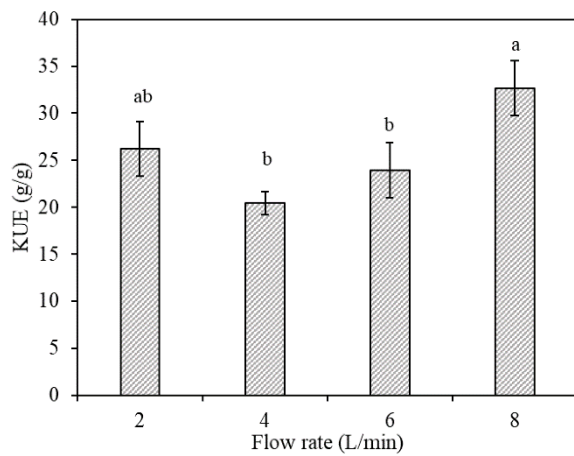
Figure 4-4. Correlations among plant growth parameters and plant nutrient uptake. Pearson’s correlation coefficients are presented. “*” denotes $p < 0.05$ and “**” denotes $p < 0.01$.



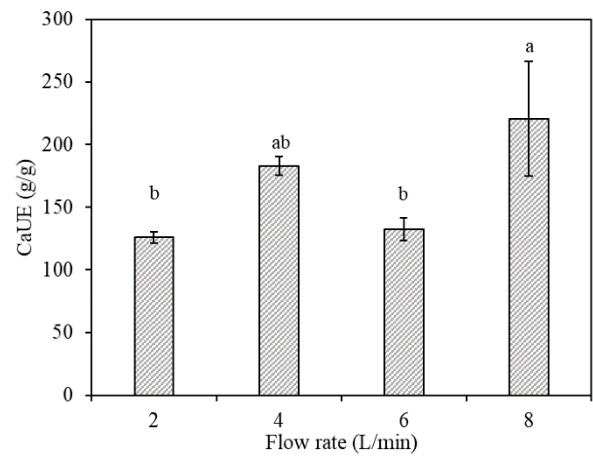
(a) Nitrogen use efficiency (NUE)



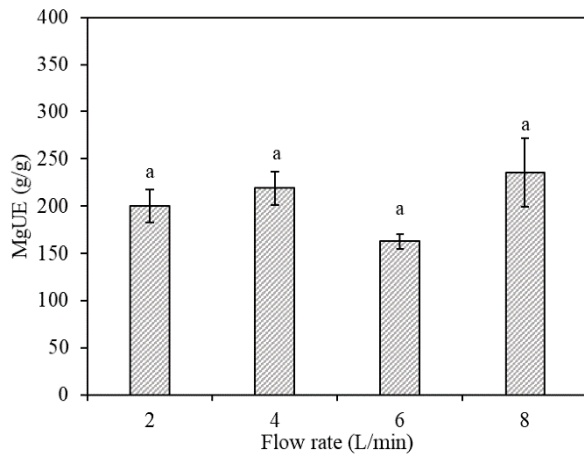
(b) Phosphorus use efficiency (PUE)



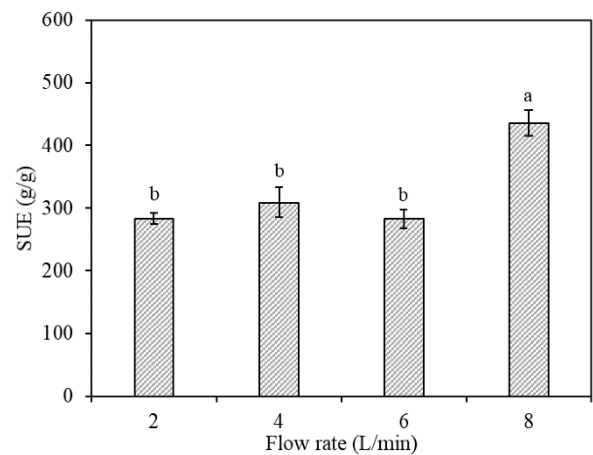
(c) Potassium use efficiency (KUE)



(d) Calcium use efficiency (CaUE)



(e) Magnesium use efficiency (MgUE)



(f) Sulfur use efficiency (SUE)

Figure 4-5. Nutrient use efficiency under different flow rates (values are calculated by dry weight/nutrient uptake of a whole plant). There were significant differences in the bars marked with different letters ($p < 0.05$). Data are expressed as means \pm standard error ($n = 4$).

4.3 考察

すべての植物は、その生育に 17 の必須元素を必要とし、それぞれの元素による機能や役割を得ながら生長する[65-71]。そこで、異なる養液流量条件 (2, 4, 6, 8 L/min) のもと、フダンソウを水耕栽培した。収穫物の葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さとともに、各栄養素 (N, P, K, Ca, S, Mg) の吸収量とその栄養利用効率について検討した。

本章の実験結果からも、2 L/min から 4 L/min へ養液流量を増加させると、葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さは増加した。いずれの値も 4 L/min で最大となり、本実験で設定した最大養液流量 8 L/min で有意に減少した。この傾向は、2 章および 3 章で行った栽培試験の結果とも妥当に一致しており、本実験の再現性を確認できた。

栄養素について、特に N, P, および K 吸収量については、養液流量の増加に伴って 4 L/min で最大となり、8 L/min で有意に減少する傾向が認められた(図 4-3(a), (b), (c))。養液流量の増加に伴う乾物重や新鮮重の変化傾向と栄養素の吸収量の変化傾向が類似する[23]ことが、本章の実験でも確認された。一方で、葉面積、乾物重、栄養素の吸収量 (N, P, K) との間に有意な正の相関関係がみられた(図 4-4)。2 章および 3 章では N 吸収量についてのみの検討であったが、養液流量が P および K 吸収量にも影響を与えることがわかった。したがって、養液流量を適切に増加させることで、植物の生長を促進する一方で、養液流量が過剰に大きくなると、過度の物理的刺激により、栄養素の吸収量が減少し、植物の生長が阻害されるという、一連の関係性がより明確となった。

主要な植物の主要栄養素としての N, P, および K の利用効率については、養液流量が 2 および 4 L/min から 8 L/min へ増加する場合に養分利用効率が増加することが示された(図 4-5(a), (b), (c))。このことは、適正な流量条件が、フダンソウの養分利用効率を向上させる可能性があることを示唆している。各養液流量による収量と養分利用効率の両面から、本研究の実験範囲において 6 L/min

が適切な流量であると考えられる。ただし、この流量が他の水耕栽培システムに適するとは限らないことに注意する必要がある。すなわち、適切な流量の調整には、植物の種類や栽培容器の形状、その流量による培養液流れ場の特性を把握する必要がある。これらの課題に関するさらなる知見の蓄積によって、培養液の適切な流量制御は水耕栽培における収量の最大化[72]と省資源による栽培管理[73]に有用な手段となりうる。一方、植物の生長は、栽培環境の影響を受ける複雑なプロセスである。養分利用効率を調査することに加えて、作物の生命活動のメカニズム（例えば、新鮮重の増加、根の形態および構造）において非常に重要である一次代謝（例えば光合成）と二次代謝（例えば生命活動に関連する活性化合物）からの生理学的プロセスの測定も将来の研究で評価すべきである。

4.4 要約

本章では、異なる養液流量（2, 4, 6, 8 L/min）で水耕栽培したフダンソウの生長と養分吸収の関係、ならびに養分利用効率に及ぼす養液流量の影響について検討した。人工照明（LED）を利用した屋内栽培室において水耕栽培を実施し、生長量（葉面積、新鮮重、乾物重、根の長さ）および栄養素（N, P, K, Ca, S, Mg）の吸収量を測定した。また、乾物重と各栄養素の吸収量から算定した養分利用効率に及ぼす養液流量の影響を検討した。

フダンソウの生長に関して、養液流量が 2 L/min から 4 L/min に増加すると、葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さが増加し、さらに 6 L/min および 8 L/min に増加すると、これらの値は減少した。また、4 L/min において、葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さが最大となった。

養分吸収については、N, P, および K 吸収量については、養液流量の増加に伴って 4 L/min で最大となり、6 L/min および 8 L/min へと増加すると減少する傾向を示した。養液流量の増加に伴う乾物重や新鮮重の変化が、栄養素の吸収量の変化と類似する[23]ことが示唆されているが、本章の結果においても前述した生長量の場合と同様の傾向を示すことが確認された。さらに、植物の生長量（葉面積、新鮮重、乾物重、根の長さ）と N, P, および K 吸収量の各項目間で有意な正の相関関係が認められた。また、他の栄養素（Ca, S, Mg）においても、8 L/min における吸収量は有意に減少した。さらに、N, P, および K については、4 L/min から 8 L/min へ増加するにつれ、それら養分利用効率が増加したことから、養液流量の設定が養分利用効率を向上させる可能性がある。本章の実験範囲において、乾物重と養分利用効率の両面から 6 L/min が適切な養液流量であると考えられた。

第5章 総合考察

乾燥地にある多くの開発途上国では、食料を安定的に供給できる持続可能な農業生産技術の開発が緊喫の課題である。自然土壌を利用せず、培養液を用いる水耕栽培 (Hydroponics) は、土地劣化が進行する乾燥地における有用技術として認められている。水耕栽培では、植物の栄養となる無機イオンの移動を促進させるために、栽培水槽内で培養液を流動させる。これまでに、レタス[18-20, 23]やホウレンソウ[17, 22, 45]を供試作物にして水耕栽培を行い、植物の生長や養分吸収に及ぼす養液流量の影響を検討してきた。しかしながら、栽培試験で使用された栽培容器のサイズや形状に関する情報がなく、実際の容器内の培養液の流動状態と植物の生長や養分吸収との関連性については不明の点が多い。さらに、水耕栽培で生長する植物体では、その根系は培養液の流れに接触していることから、培養液の流動状態と根系の挙動を把握することも重要であると考えられるが、先行研究においてこのような視点から十分に解明されていない。

そこで、第2章では、フダンソウを対象に、異なる養液流量 (0, 2, 4, 6, 8 L/min) にて水耕栽培実験を実施した。その結果、養液流量 2 L/min から 6 L/min まで増加するにつれ、フダンソウの新鮮重、乾燥重、葉面積、根の長さ、および N 吸収量も増加したが、8 L/min では各値は大きく減少した。この傾向は、レタス[19-20]やホウレンソウ[17, 45]を用いた場合と類似しており、根系の N 吸収と伸長生長を促進し、植物生長を促進する適切な養液流量がある可能性が示唆された。また、PIV 手法を用いて培養液の流れ場を可視化した結果、8 L/min では培養液中の根系のほとんどの部分が、高い流速の培養液流れに接しており、これが物理的刺激 (動圧、摩擦抵抗など) によるストレスとなり、フダンソウの生長および養分吸収を阻害したと考えられた。

第3章では、同じくフダンソウを供試作物として水耕栽培を行い、生長量、N 吸収量、根系の形態、および細胞壁構成成分量に及ぼす養液流量 (2, 4, 6, 8 L/min) の影響について調査した。本章の実験範囲では、4 L/min においてフダンソウの乾物重や N 吸収量が最大になることを実証した。また、VFW が減少することは、

根の単位体積当たりの重量を増加させ、根系がコンパクト化する。一般的に、植物に対する物理的刺激は、植物の伸長生長を抑制し、肥大生長を促進する「接触形態形成」のこと[57-64]が報告されており、養液流量に応じた物理的刺激に適応するために、根系が形態学的応答を示したと考えられる。さらに、CFW と CV は、高い養液流量(6, 8 L/min)の方が低い養液流量 (2, 4 L/min) よりも増加することが明らかになった。根の強度はセルロース含有量と高い正の相関がある[29, 50]ので、高い養液流量で育ったフダンソウについては、強度が高くコンパクトな根系になった可能性が示唆された。

第4章では、異なる養液流量条件 (2, 4, 6, 8 L/min) のもと、フダンソウの水耕栽培を実施した。収穫物の葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さとともに、各栄養素 (N, P, K, Ca, S, Mg) の吸収量とその栄養利用効率について検討した。葉面積、新鮮重、乾物重、および根の長さは、いずれの値も 4 L/min で最大となり、本実験で設定した最大養液流量 8 L/min で有意に減少した。この傾向は、2章および3章で行った栽培試験の結果とも妥当に一致しており、本実験の再現性を確認できた。植物の生長量 (葉面積、新鮮重、乾物重、根の長さ) と N, P, および K 吸収量の各項目間の相関係数は 0.646~0.910 と高く、有意な正の相関関係にあることが示された。また、N, P, および K 吸収量については、養液流量の増加に伴って 4 L/min で最大となり、8 L/min で有意に減少する傾向が認められた。さらに、これら N, P, および K の養分利用効率については、2 および 4 L/min の流量から 8 L/min の流量へ増加する場合に養分利用効率が増加することが示された)。このことは、適正な流量条件が、フダンソウの養分利用効率を向上させる可能性があることを示唆した。

以上のように、本研究では、温室・自然光の栽培環境 (第2章) と室内・人工光の栽培環境 (第3, 4章) で、フダンソウの水耕栽培実験を行い、各章の結果から、植物の生長に与える養液流量による影響を明確にすることができた。一方で、第2章と第3章の結果を比較すると、養液流量の増加に伴うフダンソウの生長指標の変動性を再現できたものの、作物の最大乾物重および最大新鮮重を示す流量の値が温室・自然光の栽培環境では 6 L/min, 室内・人工光の栽培環境

では 4 L/min であったことが指摘される。それぞれの栽培時の気象条件に着目すると、温室・自然光での栽培期間においては、1 日の気温が 10°C~40°C に変化し、日最大日射強度が 400 W/m² (晴天日) ~100 W/m² (曇天日) となる (図 2.3) のに対して、室内・人工光の栽培期間においては、1 日の気温がほぼ 25°C で推移し (図 3.3)、日射特性 (図 3.2) もほぼ一定であった。これらの栽培時の気象条件の違いが作物の生長に影響を与えたことが推測される。また、第 3 章と第 4 章の結果を比較すると、栽培条件を一定にして生長期間を 21 日間 (第 3 章) および 14 日間 (第 4 章) と変化させると、養液流量の増加に対する乾物重などの変動性が再現されたものの、生長期間を長くした場合の方が植物の生長指標 (葉面積、乾物重、新鮮重など) は大きくなることが示された。同じ種の植物であっても、生長段階が異なると、植物の特性は異なると考えられるので、養液流れ場に対するそれらの応答も異なってくる可能性が考えられる。以上のことから、養液流量に加え、他の栽培環境 (気温・日射、水温など) および生長期間などとの複合的要因をさらに追究しなければいけないが、ここではその必要性を指摘するにとどまり、本研究の今後の展開につなげるものとする。

一方、植物の応答はさまざまな生物学的、化学的、および物理的刺激の後に引き起こされる [24]。ストレスの用量と期間を制御することで、植物の応答を刺激して、植物の収量と品質を改善する可能性がある。ストレスは、水耕栽培の作物の品質強化にも適用される可能性がある。水耕栽培では、培養液の流れが植物の根に機械的刺激を与える。本研究の範囲において、低い養液流量 (2, 4 L/min) は有益ストレスとみなすことができ、この範囲内で流量を増やすと、根の生長が促進し、根系がより多くの養分を吸収できるようになり、それによって植物の生長が促進された。逆に、高い養液流量 (8 L/min) は有害ストレスとなり、根はコンパクト化し、根の養分吸収量が減少することとなり、植物の生長が低下した。図 5-1 に示したように、培養液の流量を適切に調節することで、植物の形態形成と養分吸収を促進し、それにより、水耕栽培の作物の収量を高めることができることを示している。本研究では、一定サイズの栽培容器で行われ、流れ可視化手法 (PIV) を利用して、栽培容器内の培養液流れによる植物の生長にどのように

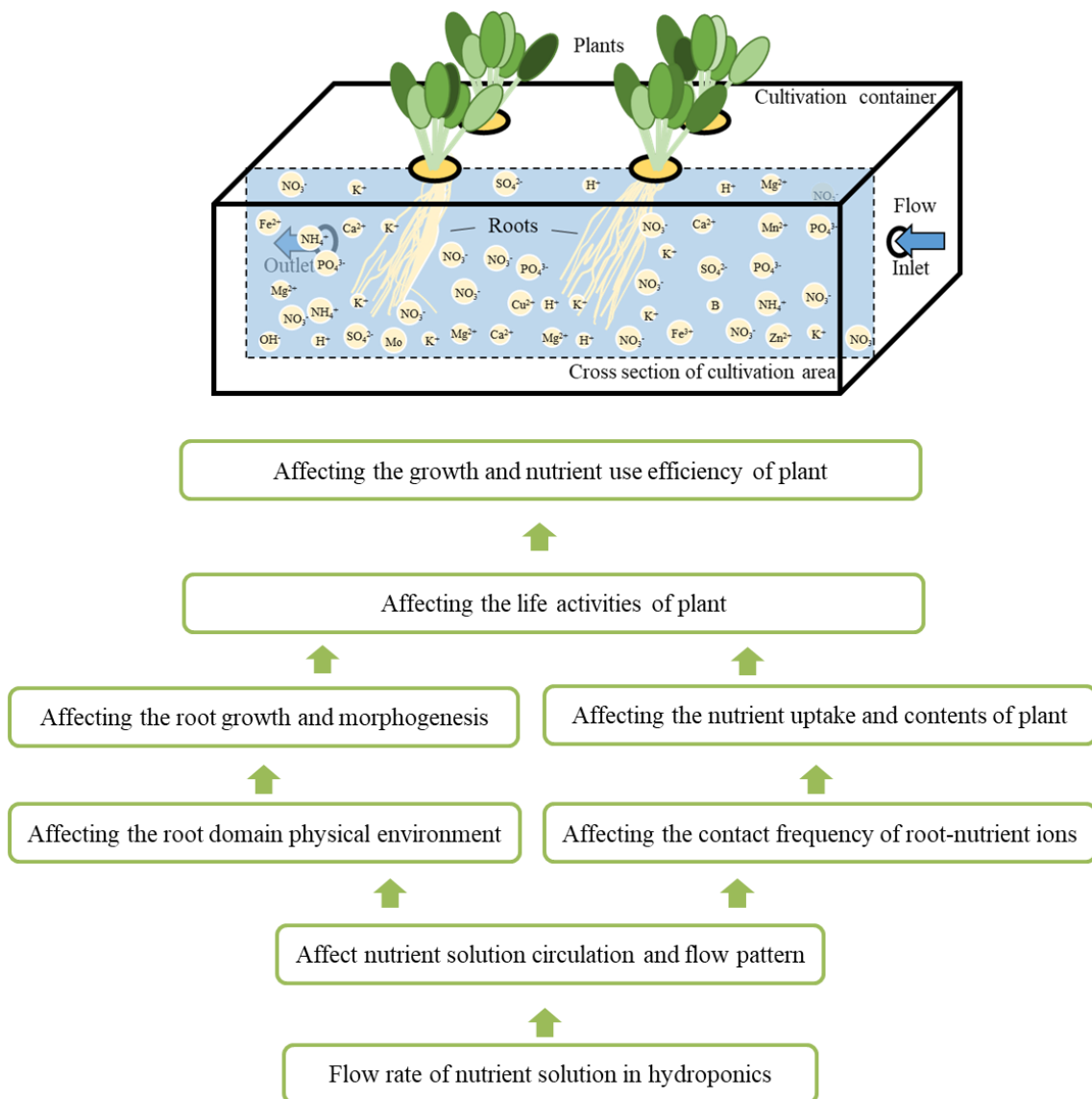


Figure 5-1. Flow rate affects plant growth and nutrient utilization efficiency.

影響するかを調べた。作物生産と養分利用効率の両方を考慮して最適流量を決定した場合、本研究の範囲では 6 L/min となった。ただし、この養液流量がすべての水耕栽培システムに最適であるとは限らない。また、水耕栽培の適切な養液流量を決定するには、容器サイズおよび植物の根特性の相互作用による養液流れ場を把握する必要がある。本研究では、2次元流れ場を可視化した。栽培容器内の植物の根はあらゆる方向の水の流れから力を受ける。今後、異なる養液流量の下での水耕栽培の流れ場を3次元流れ場の計測（3D-PIV）を実施す

ることによって、植物の生長と流れ場環境との関係がさらに明確になるものと考えられる。

最後に、水耕栽培における養液流れ場の形成と栽培装置の設計指針を導くためには、単に養液流量を設定するのではなく、装置設計に特有的な指標（培養液流量と栽培容器形状および植物根の特徴を含む無次元数）を提案する必要があると考える。さらに、植物の生長に及ぼす多くの要因（生物遺伝的および栽培環境的の両方）の影響、水耕栽培における培養液と植物生長および養分利用効率の関係性に対する他の栽培環境要因の影響、などを包括的に解明することも将来の課題になる。

第6章 摘要

世界人口の約 1/3 以上の人々が乾燥地に暮らしており、人口増加や貧困といった社会背景のもと、干ばつなどの異常気象に伴う食料・水不足などの深刻な問題に直面している。このような問題の解決に向けて、食料を安定的に供給できる持続可能な農業生産技術の開発・導入開発が期待されているが、乾燥地にある国々の多くは開発途上にあり、技術導入の現場となる農村部では経済的な余裕がないために、広く普及させることは困難な状況にある。乾燥地のような農業に不適切な土地での作物生産に向いているとして、自然土壌以外の栽培基質を利用する無土壌栽培(Soilless culture)が世界的に注目されている。その中でも、培養液を用いる水耕栽培(Hydroponics)は、植物の根を培養液に浸し、生育に必要な水、養分、および酸素を根から吸収させるので、低価格かつ省資源での作物生産により、収量の向上も期待されている。

水耕栽培では、培養液をポンプなどで循環・流動させることで、植物の栄養となる無機イオンの移動を促進させている。この培養液の循環流量を増加させることは、無機イオンと根の表面との接触頻度を増加させるとして、植物の養分吸収や収量の向上に寄与するものと考えられている。水耕栽培における植物の生長に関しては、栽培水槽内の培養液特性(pH, 液温, 電気伝導度, 溶存酸素濃度, 組成および濃度)の影響について数多くの研究報告があるものの、養液流量が植物の生長や養分吸収に与える影響について研究報告は数少ない。これまでに、レタスやホウレンソウを対象にして、植物の生長や養分吸収に及ぼす養液流量の影響が検討され、流量の増加が収量や養分吸収を向上させることや、最大収量を得る適切な流量が存在することが示唆されている。しかしながら、栽培試験で使用された栽培容器のサイズや形状に関する情報がなく、実際の容器内の培養液の流動状態は不明である。また、根系は培養液の流れと接触し揺動しているが、根系の挙動についてもその詳細は検討されていない。植物の生長や養分吸収に及ぼす養液流量の影響やその要因については十分に解明されていない。そこで本研究では、供試作物による栽培実験および養液流れ場の可視化実験に基づい

て、養液流量が植物の生長や養分吸収に与える影響を明らかにすることを目的とした。

供試作物としてフダンソウ (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* cv. *Seiyu Shirokuki*)を用いて、異なる養液流量 (0, 2, 4, 6, 8 L/min) のもとで水耕栽培実験を実施した。その結果、養液流量 0 L/min および 2 L/min における新鮮重と乾物重はほぼ同等であった。いずれの場合も、培養液中では根はほぼ静止した状態にあり、根系周りの流れが類似しているためだと考えられた。さらに 4 L/min から 6 L/min において、新鮮重および乾燥重は増加した。このとき、養液の流動状態が高くなって、根の変形と揺動が認められたものの、根の長さや N 吸収量は増加する傾向を示しており、このことが、新鮮重と乾物重の増加につながったと考えられる。一方で、8 L/min では各値は大きく減少した。このとき、培養液中の根系のほとんどの部分が高い流速の培養液流れに沿うように浮き上がっており、これが根の表面の物理的刺激によるストレスとなり、フダンソウの生長および養分吸収を阻害したと考えられた。この一連の傾向から、本実験範囲において N 吸収量と根の伸長を促進し、フダンソウの生長と収量を向上させる適切な養液流量が存在する可能性が示唆された。

次に、屋内栽培室の人工光照明下でフダンソウの水耕栽培を行い、生長量、N 吸収量、根系の形態、および細胞壁構成成分量に及ぼす養液流量 (2, 4, 6, 8 L/min) の影響を調査した。この場合、養液流量が 4 L/min において、乾物重や N 吸収量が最大になる傾向を示した。また、VFW が減少し、根のコンパクト化が生じたものと考えられた。植物は物理的刺激を受けると、伸長生長を抑制し、肥大生長を促進すること (接触形態形成) が生じることから、根系が培養液の流動状態に対する形態学的応答を示した可能性が示唆された。さらに、高い養液流量 (6, 8 L/min) における CFW および CV が、低流量 (2, 4 L/min) 場合よりも増加した。根の強度はセルロース含有量と高い正の相関関係があるので、高い養液流量における根系は、強度が高くコンパクトな状態にあるものと考えられる。

各栄養素 (N, P, K, Ca, S, Mg) の吸収量とその栄養利用効率についても検討した結果、葉面積、新鮮重、乾物重、根の長さ、N, P, および K 吸収量の各項目

間において、有意な正の相関関係が認められた。また、N、P、およびK吸収量については、養液流量の増加に伴って4 L/minで最大となった後に減少した。N、P、およびKの養分利用効率は、2 L/minおよび4 L/min場合に比べて、8 L/minの場合が高くなった。このことは、養液流量の増加が、フダンソウの養分利用効率を向上させる可能性を示唆した。各養液流量による収量と養分利用効率の両面から、本研究の実験範囲においては6 L/minが適切な流量であると考えられた。

本研究では、培養液の養液流量が増加するにつれ、フダンソウの乾物重およびN吸収量が増加し、ある養液流量で最大となったのちに減少する傾向を示した。このことから、根系からの無機イオンの吸収と根系の伸長を促進し、植物の生長を促進する適切な養液流量があることが示唆された。水耕栽培の培養液流れは植物の根に物理刺激を与え、植物の形態形成に影響を与える。適切な流量は、有益なストレスと見なすことができる。適切な流量範囲で、流量の増加は、植物の根に適度な物理的刺激を与えて、根の生長を促進する。根の生長が進むと、根系がより多くの養分を吸収できるようになり、植物の生長が良くなる。逆に、過剰な流量は有害なストレスと見なされ、高流量の抗力に適應するために、植物の根はコンパクトになり、根の長さや単位重量当たり体積および表面積が小さくなる。根の長さや表面積は、植物の養分吸収能力を決定する重要な要素であり、植物全体の生長に影響を与える。したがって、培養液流量を調節することで植物の形態形成と養分吸収を調節することができ、水耕栽培における作物の収量に影響を与えることを示した。さらに、本研究では、異なる培養液流量の下で、植物の生長と養分吸収の関係および養分利用効率の変化も分析した。培養液流量の増減によって、養分吸収と植物生長指標が同様の変動傾向があり、植物生長指標と養分吸収の相関関係を検討したところ、N、P、およびKの吸収量と植物の生長を表す諸量との間に強い正の相関関係があることがわかった。一方、多量元素(N、P、K、Ca、Mg、S)の養分利用効率は、培養液流量の増加とともに増加したことが分かった。これは、培養液流量が養分吸収に影響を与えることによって植物の生長に影響を及ぼし、培養液流量の増加が養分利用効率の改善に役立つ可能

性があることを示している。水耕栽培では、培養液流量を合理的に調整することで、収穫量を増やすだけでなく、養分利用効率を高めることもできるので、適度な培養液流量を調整することが推奨される。

本研究では、一定サイズの栽培容器で水耕栽培実験が行われ、流れの可視化 (PIV) を利用して、容器内の養液流れ場と植物生長との関連性を明らかにした。収量と養分利用効率の両方を考慮して最適流量を決定した場合、本研究の範囲では 6 L/min となった。ただし、この養液流量がすべての水耕栽培システムに最適であるとは限らない。水耕栽培の適切な養液流量を決定するには、容器サイズおよび植物の根特性の相互作用による養液流れ場を把握する必要がある。本研究の成果をもとに、水耕栽培における養液流れ場の調整と、それに基づく栽培装置の設計指針を導くためには、特有的な指標 (培養液流量と栽培容器形状および植物根の特徴を含む無次元数) を提案することが有用となる。さらに、植物の生長に及ぼす多くの要因 (生物遺伝的および栽培環境的の両方) の影響、水耕栽培における培養液と植物生長および養分利用効率の関係性に対する他の栽培環境要因の影響、などを包括的に解明することも将来の課題になる。

第 7 章 SUMMARY

More than one-third of the world's population lives in arid areas, and under the social background of population growth and poverty, they face serious problems such as food and water shortages due to abnormal weather such as drought. To solve these problems, the development and introduction of sustainable agricultural production technology that can provide a stable supply of food are expected. But it is difficult to introduce it widely because there is no economic margin in the rural areas where the site is located. Soilless culture, which uses a cultivation substrate other than natural soil, is attracting worldwide attention as it is suitable for crop production in a land that is unsuitable for agriculture such as arid land. Among them, hydroponics uses a nutrient solution, the roots of the plant in the nutrient solution absorb water, nutrients, and oxygen necessary for the growth of plants. Compared with soil cultivation, hydroponics reduced the loss of resources, so that crop production is inexpensive and resource-saving.

In hydroponics, the nutrient solution is circulated and flowed by a pump to promote the movement of inorganic ions that feed the plants. Increasing the circulating flow rate of the nutrient solution is thought to contribute to the improvement of nutrient absorption and yield of plants by increasing the contact frequency between the inorganic ions and the root surface. Regarding the growth of plants in hydroponics, although there are many research reports on the effects of nutrient solution characteristics (pH, temperature, electrical conductivity, dissolved oxygen concentration, composition and concentration) in the cultivation water tank, the nutrient solution flow rate is There are few research reports on the effects on plant growth and nutrient absorption. So far, the effects of nutrient solution flow rate on plant growth and nutrient absorption have been investigated for lettuce and spinach, and the increase in flow rate improves yield and nutrient absorption, and it is suggested that adjust the appropriate flow rate to obtain the maximum yield. However, there is no information on the size and shape of the cultivation container used in the cultivation experiment, and the flow pattern of the nutrient solution in the container is also unknown. In addition, the root is in contact with the flow of the nutrient solution and oscillates, but the details of the behavior of the root have not been investigated. The effects of nutrient solution flow rate on plant growth and nutrient

absorption and their factors have not been fully elucidated. Therefore, the purpose of this study was to clarify the effect of nutrient solution flow on plant growth and nutrient absorption based on cultivation experiments and visualization experiments of nutrient solution flow fields.

Using Swiss chard (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* cv. *Seiyou Shirokuki*) as a research plant, hydroponic cultivation experiments were carried out under different nutrient solution flow rates (0, 2, 4, 6, 8 L/min). The results show that the fresh weight and dry weight are almost the same at the nutrient solution flow rates of 0 L/min and 2 L/min. In both cases, the roots are almost stationary in the nutrient solution, and the flow pattern around the root system is similar. In addition, when the flow rate of the nutrient solution increases from 4 L/min to 6 L/min, the flow velocity of the nutrient solution speeds up. The root swing with the flow is observed, and the root length and nitrogen uptake tend to increase, and the fresh weight and dry weight have also increased significantly. On the other hand, when the flow rate is up to 8 L/min, the value of each plant growth index is lower than before. At this time, most of the roots in the nutrient solution fluid float along with the nutrient solution flow due to the high flow rate, and the flow of the nutrient solution fluid produces physical stimulation and stress on the root surface, which inhibits the growth and nutrient absorption of Swiss chard. This series of trends indicate that within the scope of this experiment, there may be an appropriate nutrient solution flow rate that promotes N absorption and root elongation and improves the growth and yield of Swiss chard.

Next, the hydroponic cultivation of Swiss chard was carried out under artificial light in the indoor cultivation room, and the effects of nutrient solution flow (2, 4, 6, 8 L/min) on plant growth, N absorption, root morphology, and cell wall composition were studied. In this case, when the nutrient solution flow rate is 4 L/min, the dry weight and N absorption of the plant tend to be the maximum. In addition, when the flow rate increases, the VFW is reduced and the root becomes compact. When plants received physically stimulated, plants inhibit elongation growth and promote hypertrophic growth (thigmomorphogenesis), which indicates that the root system may exhibit a morphological response to the flow rate of the nutrient solution. In addition, the CFW and CV at high nutrient flow rates (6, 8 L/min) are higher than those at low flow rates (2, 4 L/min). Because the root strength is highly positively correlated with the cellulose content,

it is inferred that the root system under a high flow rate is in a high-strength and compact state.

Next, the absorption of each nutrient (N, P, K, Ca, S, Mg) and its nutrient use efficiency, leaf area, fresh weight, dry matter weight, and root length were tested. And analyzed the correlation between these plant growth indicators and each item of the results of N, P, K absorption, and found that these results have a significant positive correlation. In addition, as the flow rate of the nutrient solution increases, the absorption of N, P, and K decreases after reaching the maximum at 4 L/min. The nutrient utilization efficiency of N, P, K at 8 L/min is higher than 2 L/min and 4 L/min. This indicates that an increase in the flow rate of the nutrient solution may improve the nutrient utilization efficiency of Swiss chard. From the perspective of improving yield and nutrient utilization efficiency, 6 L/min is considered to be an appropriate flow rate within the experimental range of this study.

In this study, with the increase of the nutrient solution flow rate, the dry weight and nitrogen uptake of Swiss chard increased, and after reaching the maximum value at a certain flow rate, it is showing a downward trend. This shows that there is an appropriate nutrient solution flow rate, which promotes the absorption of inorganic ions by the root system and root elongation and promotes plant growth. In hydroponics, the flow of the nutrient solution produces physical stimulation to the roots of plants and affects the morphogenesis of plant roots. A proper flow rate can be considered as beneficial stress. Within a proper flow rate range, the increased flow rate gives moderate physical stimulation to the roots of the plant and promotes root growth. As the root grows, the root system can absorb more nutrients and the plant grows better. On the contrary, excessive flow is considered harmful stress. In order to adapt to high flow resistance, the roots of plants become compact, reducing root length and volume and surface area per unit weight. Root length and surface area are important factors that determine the plant's ability to absorb nutrients and affect the growth of the entire plant. Therefore, it is shown that the morphogenesis and nutrient absorption of plants can be adjusted by adjusting the flow rate of the nutrient solution, thereby affecting the yield of hydroponic crops. In addition, in this study, we analyzed the relationship between plant growth and nutrient uptake and changes in nutrient use efficiency under different flow rates. Nutrient absorption and plant growth index tend to fluctuate in the same way as the flow rate of the nutrient solution

increases or decreases, and it is found that there is a strong positive correlation with the quantity. On the other hand, it is found that the nutrient utilization efficiency of the macronutrients (N, P, K, Ca, Mg, S) increases with the increase of the flow rate of the nutrient solution. This shows that the flow rate of the nutrient solution affects the growth of plants by affecting the absorption of nutrients, and the increase in the flow rate of the nutrient solution may help improve the efficiency of nutrient utilization. By rationally adjusting the flow rate, it is possible not only to increase the yield but also to ensure the efficiency of nutrient utilization. It was suggested that in hydroponic crop production systems, plant yields could be improved by adjusting the flow rate. However, if the flow rate is set too fast or too slow, the yield will not improve sufficiently or it will not be economical. Therefore, proper flow patterns must be carefully selected, and increasing flow rates increase power consumption, resulting in higher operating costs. It is important to keep a balance between plant yields, nutrient management and energy use.

As a basic study, this study was carried out in a specific size of cultivation container. Using the flow visualization method (PIV), the effect of the flow of culture medium in the cultivation container on plant growth was studied. If the optimal flow rate was determined considering crop production and nutrient utilization efficiency, this study was 6 L/min, but this flow rate was not necessarily suitable for all hydroponic cultivation systems. The determination of the appropriate flow field environment for hydroponic cultivation is affected by the interaction between the flow rate of nutrient solution, the size of the cultivation container and the characteristics of plant roots. In order to guide the adjustment of flow field environment and the design of cultivation device in hydroponic cultivation, not only the flow rate but also the special indexes (the dimensionless number including nutrient solution flow rate, the shape of cultivation container and the characteristics of plant roots) need to be put forward. In addition, considering both the influence of biological genetics and the cultivation environment to study the influence of nutrient solution flow rate in hydroponic cultivation on plant growth and nutrient utilization efficiency will also become a topic in the future.

引用文献

1. 恒川篤史, 「21 世紀の乾燥地科学—人と自然の持続性」, 古今書院, pp.1-229, 2007.3.
2. 北村義信, 「乾燥地の水をめぐる知識とノウハウ—食料・農業・環境を守る水利用・水管理学」, 技報堂出版, pp.1-238, 2016.3.
3. Solh, M., & van Ginkel, M. (2014). Drought preparedness and drought mitigation in the developing world' s drylands. *Weather and Climate Extremes*, 3, 62-66.
4. 恒川篤史, 「乾燥地を救う知恵と技術 砂漠化・土地劣化・干ばつ問題への対処法」, 丸善出版, pp.1-142, 2014.3.
5. Jones Jr, J. B. (2016). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC press.
6. Bradley, P., & Marulanda, C. (2000, May). Simplified hydroponics to reduce global hunger. In *World Congress on Soilless Culture: Agriculture in the Coming Millennium 554* (pp. 289-296).
7. Sheikh, B. A. (2006). Hydroponics: key to sustain agriculture in water stressed and urban environment. *Pak. J. Agric., Agril. Eng., Vet. Sci*, 22(2), 53-57.
8. Sardare, M. D., & Admane, S. V. (2013). A review on plant without soil-hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(3), 299-304.
9. Jensen, M. H. (2001, April). Controlled Environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions-A World Review. In *International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses 578* (pp. 19-25).
10. Balliu, A., Zheng, Y., Sallaku, G., Fernández, J. A., Gruda, N. S., & Tuzel, Y. (2021). Environmental and cultivation factors affect the morphology, architecture and performance of root systems in soilless grown plants. *Horticulturae*, 7(8), 243.
11. Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A review on the science of growing crops without soil (soilless culture)-a novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(11), 833.

12. Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. *Hydroponics-a standard methodology for plant biological researches*, 1-22.
13. Barber, S. A., Walker, J. M., & Vasey, E. H. (1963). Mechanisms for movement of plant nutrients from soil and fertilizer to plant root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 11(3), 204-207.
14. Roose, T., Fowler, A. C., & Darrah, P. R. (2001). A mathematical model of plant nutrient uptake. *Journal of mathematical biology*, 42(4), 347-360.
15. Pandey, R., Jain, V., & Singh, K. P. (2009). Hydroponics Agriculture: Its status, scope and limitations. *Division of Plant Physiology, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi*, 20.
16. Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of the flow rate on plant growth and flow visualization of nutrient solution in hydroponics. *Horticulturae*, 7(8), 225.
17. Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W. N. S., & Hassan, A. (2009). Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. *Desalination and Water Treatment*, 5(1-3), 19-28.
18. Genuncio, G. D. C., Gomes, M., Ferrari, A. C., Majerowicz, N., & Zonta, E. (2012). Hydroponic lettuce production in different concentrations and flow rates of nutrient solution. *Horticultura Brasileira*, 30(3), 526-530.
19. Al-Tawaha, A. R., Al-Karaki, G., Al-Tawaha, A. R., Sirajuddin, S. N., Makhadmeh, I., Wahab, P. E. M., ... & Massadeh, A. (2018). Effect of water flow rate on quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in nutrient film technique (NFT) under hydroponics conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(5), 793-800.
20. Dalastra, C., Teixeira, M., da Silva, M. R., Nogueira, T. A., & Fernandes, G. C. (2020). Head lettuce production and nutrition in relation to nutrient solution flow. *Horticultura Brasileira*, 38, 21-26.
21. Soares, H. R., Silva, Ê. F. D. F., Silva, G. F. D., Cruz, A. F. D. S., Santos, J. A., & Rolim, M. M. (2020). Salinity and flow rates of nutrient solution on cauliflower biometrics in NFT hydroponic system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 258-265.

22. Nuwansi, K. K. T., Verma, A. K., Prakash, C., Tiwari, V. K., Chandrakant, M. H., Shete, A. P., & Prabhath, G. P. W. A. (2016). Effect of water flow rate on polyculture of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) and goldfish (*Carassius auratus*) with water spinach (*Ipomoea aquatica*) in recirculating aquaponic system. *Aquaculture international*, 24(1), 385-393.
23. Khater, E. S. G., & Ali, S. A. (2015). Effect of flow rate and length of gully on lettuce plants in aquaponic and hydroponic systems. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 6(3), 1.
24. Downs, R. J. (2012). *Environment and the experimental control of plant growth* (Vol. 6). Elsevier.
25. Gosselin, F. P. (2019). Mechanics of a plant in fluid flow. *Journal of Experimental Botany*, 70(14), 3533-3548.
26. CHUN, C., & TAKAKURA, T. (1994). Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentrations in hydroponics. *Environment Control in Biology*, 32(2), 125-135.
27. Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Shao, Y., ... & Ibaraki, Y. (2021). Effect of nutrient solution flow rate on hydroponic plant growth and root morphology. *Plants*, 10(9), 1840.
28. Lynch, J. (1995). Root architecture and plant productivity. *Plant physiology*, 109(1), 7.
29. Cosgrove, D. J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature reviews molecular cell biology*, 6(11), 850-861.
30. Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14.
31. Wortman, S. E. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 194, 34-42.
32. Nxawe, S., Laubscher, C. P., & Ndakidemi, P. A. (2009). Effect of regulated irrigation water temperature on hydroponics production of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *African Journal of Agricultural Research*, 4(12), 1442-1446.
33. Sakamoto, M., & Suzuki, T. (2020). Effect of Nutrient Solution Concentration on the Growth of Hydroponic Sweetpotato. *Agronomy*, 10(11), 1708.

34. Goto, E., Both, A. J., Albright, L. D., Langhans, R. W., & Leed, A. R. (1996, August). Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. In *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems 440* (pp. 205-210).
35. Maboko, M. M., & Du Plooy, C. P. (2013). Effect of plant spacing and harvesting frequency on the yield of Swiss chard cultivars (*Beta vulgaris* L.) in a closed hydroponic system. *African journal of agricultural research*, 8(10), 936-942.
36. Mzoughi, Z., Chahdoura, H., Chakroun, Y., Cámara, M., Fernández-Ruiz, V., Morales, P., ... & Majdoub, H. (2019). Wild edible Swiss chard leaves (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*): Nutritional, phytochemical composition and biological activities. *Food Research International*, 119, 612-621.
37. OAT house fertilizer series, Product information ,OAT Agrio Co., Ltd. <https://www.oat-agrio.co.jp/cgi/psearch/item/2013101716413104/> (accessed on 2021.10.21)
38. Jones Jr, J. B. (1991). Kjeldahl method for nitrogen determination. *Kjeldahl method for nitrogen determination*.
39. Csanady, G. T. (1973). *Turbulent diffusion in the environment* (No. 3). Springer Science & Business Media.
40. Grant, I. (1997). Particle image velocimetry: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 211(1), 55-76.
41. Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014). PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *Journal of open research software*, 2(1).
42. Huang, W., Ratkowsky, D. A., Hui, C., Wang, P., Su, J., & Shi, P. (2019). Leaf fresh weight versus dry weight: which is better for describing the scaling relationship between leaf biomass and leaf area for broad-leaved plants?. *Forests*, 10(3), 256.
43. Barber, S. A., & Silberbush, M. (1984). Plant root morphology and nutrient uptake. *Roots, nutrient and water influx, and plant growth*, 49, 65-87.
44. Durst, F. (2008). *Fluid mechanics: an introduction to the theory of fluid flows*. Springer Science & Business Media.
45. Hussain, T., Verma, A. K., Tiwari, V. K., Prakash, C., Rathore, G., Shete, A. P., &

- Saharan, N. (2015). Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system. *Aquaculture International*, 23(1), 369-384.
46. Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of Substrate Flow Rate on Nutrient Uptake and Use Efficiency in Hydroponically Grown Swiss Chard (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* 'Seiyou Shirokuki'). *Agronomy*, 11(10), 2050.
47. Guzmán-Valdivia, C. H., Talavera-Otero, J., & Désiga-Orenday, O. (2019). Turbulent Kinetic Energy Distribution of Nutrient Solution Flow in NFT Hydroponic Systems Using Computational Fluid Dynamics. *AgriEngineering*, 1(2), 283-290.
48. Grigas, A., Kemzūraitė, A., Steponavičius, D., Steponavičienė, A., & Domeika, R. (2020). Impact of Slope of Growing Trays on Productivity of Wheat Green Fodder by a Nutrient Film Technique System. *Water*, 12(11), 3009.
49. Kim, B. S., Youm, S., & Kim, Y. K. (2020). Sterilization of Harmful Microorganisms in Hydroponic Cultivation Using an Ultraviolet LED Light Source. *Sensors and Materials*, 32(11), 3773-3785.
50. An, P., Li, X., Zheng, Y., Matsuura, A., Abe, J., Eneji, A. E., ... & Inanaga, S. (2014). Effects of NaCl on root growth and cell wall composition of two soya bean cultivars with contrasting salt tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(3), 212-218.
51. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350-356.
52. Aladjajjyan, A. (2007). The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria. *Journal of Central European Agriculture*, 8(3), 369-380.
53. Jaffe, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis: the response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*, 114(2), 143-157.
54. Morel, P., Crespel, L., Galopin, G., & Moulia, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching of garden rose. *Scientia Horticulturae*, 135, 59-64.

55. Braam, J. (2005). In touch: plant responses to mechanical stimuli. *New Phytologist*, *165*(2), 373-389.
56. Vázquez-Hernández, M. C., Parola-Contreras, I., Montoya-Gómez, L. M., Torres-Pacheco, I., Schwarz, D., & Guevara-González, R. G. (2019). Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production. *Scientia Horticulturae*, *250*, 223-229.
57. Le Gall, H., Philippe, F., Domon, J. M., Gillet, F., Pelloux, J., & Rayon, C. (2015). Cell wall metabolism in response to abiotic stress. *Plants*, *4*(1), 112-166.
58. Wiesel, L., Newton, A. C., Elliott, I., Booty, D., Gilroy, E. M., Birch, P. R., & Hein, I. (2014). Molecular effects of resistance elicitors from biological origin and their potential for crop protection. *Frontiers in plant science*, *5*, 655.
59. Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in plant science*, *7*, 2049.
60. Börnke, F., & Rocksch, T. (2018). Thigmomorphogenesis—Control of plant growth by mechanical stimulation. *Scientia Horticulturae*, *234*, 344-353.
61. Chehab, E. W., Eich, E., & Braam, J. (2009). Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechano-stimulation. *Journal of experimental botany*, *60*(1), 43-56.
62. Gardiner, B., Berry, P., & Mouliat, B. (2016). Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, *245*, 94-118.
63. Braam, J., & Chehab, E. W. (2017). Thigmomorphogenesis. *Current Biology*, *27*(17), R863-R864.
64. De Langre, E. (2008). Effects of wind on plants. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, *40*, 141-168.
65. Soetan, K. O., Olaiya, C. O., & Oyewole, O. E. (2010). The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants-A review. *African journal of food science*, *4*(5), 200-222.
66. Malhotra, H., Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In *Plant nutrients and abiotic stress tolerance* (pp. 171-190). Springer, Singapore.

67. Amtmann, A., Troufflard, S., & Armengaud, P. (2008). The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia plantarum*, 133(4), 682-691.
68. Kirkby, E. A., & Pilbeam, D. J. (1984). Calcium as a plant nutrient. *Plant, Cell & Environment*, 7(6), 397-405.
69. Tränkner, M., Tavakol, E., & Jákl, B. (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. *Physiologia plantarum*, 163(3), 414-431.
70. Hawkesford, M. J., & Barraclough, P. (2011). *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*. John Wiley & Sons.
71. Njira, K. O., & Nabwami, J. (2015). A review of effects of nutrient elements on crop quality. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 15(1), 9777-9793.
72. Wittwer, S. H. (1970). Maximizing agricultural production. *Research Management*, 13(2), 89-110.
73. Venkateswarlu, B., & Shanker, A. K. (2012). Dryland agriculture: bringing resilience to crop production under changing climate. In *Crop stress and its management: perspectives and strategies* (pp. 19-44). Springer, Dordrecht.

謝辞

この研究を遂行するにあたり、終始暖かく見守って下さった鳥取大学農学部 山田 智教授に厚く御礼申し上げます。日頃から研究の進み具合を気にかけていただき、優しい言葉で私を励まして下さいました。的確な御指導と数多くの御助言、激励の御言葉を賜りましたこと。ここに、心より厚く御礼申し上げます。

鳥取大学農学部 山本 定博教授、西原 英治教授、島根大学生物資源科学部 増永 二之教授、山口大学農学部 荊木 康臣教授におかれましては、本研究の遂行ならびに学術論文のまとめに際し、有益なご指摘やご助言を賜りました。ここに、深く感謝申し上げます。

また、鳥取大学農学部 田川 公太郎准教授には、研究環境の整備および本論文の執筆に関しまして、ご支援およびご助言をいただきました。ここに、心より感謝申し上げます。

実験の実施および各分析機器による測定にあたり、鳥取大学農学部 山田 美奈研究員、王 鑫妍様、清水 克之教授、馬場 貴志研究員、楮 宗慧様、植物栄養学研究室や自然エネルギー工学研究室内の皆様、工学部 松野 隆准教授、研究推進機構研究基盤センター機器運用・研究支援部門 藤本 美枝子様、東地 知子様、水田 敏史様、竹歳 大樹様、鳥取大学乾燥地研究センター 安 萍准教授ならびに安研究室の皆様、山崎 裕司助教、鳥取大学技術部 加納 由紀子様、岩下 雅子様、沖田 総一郎様から多くのご支援とご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

中国・東北農業大学工程学院 李 岩教授からは、鳥取大学へ留学する機会とご推薦をいただきました。深くお礼申し上げます。

最後に、鳥取大学での学生生活において、大変お世話になりました鳥取大学大学院連合農学研究科、鳥取大学国際乾燥地研究教育機構、鳥取大学教育支援・国際交流推進機構国際交流センター、鳥取県国際交流財団、鳥取北ロータリークラブの諸先生方や事務職員の皆様に、心よりお礼申し上げます。

私を支援していただく家族の皆様に感謝申し上げます。

論文目録

本論文の基礎となる発表論文：

- 第2章

Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of the flow rate on plant growth and flow visualization of nutrient solution in hydroponics. *Horticulturae*, 7(8), 225. DOI: 10.3390/horticulturae7080225

- 第3章

Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Shao, Y., An, P., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of nutrient solution flow rate on hydroponic plant growth and root morphology. *Plants*, 10(9), 1840. DOI: 10.3390/plants10091840

- 第4章

Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of substrate flow rate on nutrient uptake and use efficiency in hydroponically grown Swiss Chard (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* ‘Seiyou Shirokuki’). *Agronomy*, 11(10), 2050. DOI: 10.3390/agronomy11102050