

ファストプランツの水耕栽培を用いた植物栄養解析システムとその教材化

*石澤 公明・**熊坂 知世・***佐藤 絵美・****安達 真

Hydroponic culture systems of Fast Plants (*Brassica rapa* L.) to learn about plant mineral nutrients

ISHIZAWA Kimiharu, KUMASAKA Tomoyo,
SATO Emi and ADACHI Makoto

Abstract

Hydroponic culture systems of Fast Plants (*Brassica rapa* L.) were developed in order to learn about plant mineral nutrients. An Enshishoho nutrient solution was selected as the most suitable culture medium for growth and development of Fast Plants in the hydroponic systems with quartz sand and gravel as supporting materials. The hydroponics was a good teaching tool to learn about plant mineral nutrients such as nitrogen, phosphorus and potassium, and used for experiments to study on a role of soil or fertilizer on plant growth and development.

Key words : Fast Plant (ファストプランツ)

Brassica rapa L., Hydroponics (水耕栽培)

Nutrients (肥料)

Plant growth and development (植物の成長と発育)

Plant mineral nutrients (植物無機栄養)

Soil (土壌)

I. ファストプランツとは

米国の Wisconsin-Madison 大学植物病理学教授であった Paul H. Williams 博士は、米農務省 (USDA) の National Plant Germplasm System が世界中から収集した2000株以上のアブラナ科植物の中で、開花までの日数が際立って短い表現型をもつ7種の *Brassica* (*B.campestris* 「*rapa* と同種」、*B.nigra*, *B.oleracea*,

B.juncea, *B.napus*, *B.carinata*, *B.sativus*) について、1) 播種後開花までの早さ、2) 種子成熟の早さ、3) 種子休眠の欠如、4) 草丈が小さい、そして5) 高い種子生産力の5つの形質を目安に、種内選抜を繰り返し、ある程度その形質が安定した集団に RCBP's (rapid-cycle base populations) という名称を与えた。この中から更に *Brassica rapa* L. に属する集団の選別を進め、得られた植物に Wisconsin Fast Plants (ファ

* 宮城教育大学理科教育講座

** 宮城教育大学学校教育教員養成課程理科教育専攻

*** 宮城教育大学学校教育教員養成課程理科教育専攻

**** 宮城教育大学学校教育教員養成課程理科教育専攻

ストプランツ)という名称を与えて、アブラナ科の病理学の研究材料としてだけでなく、教育教材として活用することを考えた(Williams & Hill, 1986)。

ファストプランツは、約5週間の短い生活環を持ち、室内の人工光源のもとで18-25℃程度に保ち、適当な培養土で栽培すると比較的簡単に育てられる。そこで、幼稚園から大学までの教育課程で、それぞれの目的に応じた教材として利用出来ると期待されている。Williams 博士らはネット上に WISCONSIN FAST PLANTS という Website (<http://www.fastplants.org/>) を開設してその普及に努めてきた。更に、2004年には学校教員や生徒向けに、実践例を含めたファストプランツの取扱い方を平易に解説した書籍“Spiraling Through Life With Fast Plants: An Inquiry Rich Manual”(Kendall/Hunt Publishing Company, USA) を出版した。最近、実践例、直面している問題、疑問について、主に教員同士がネット上で情報交換ができる場として、Wisconsin Fast Plants Network (<http://fastplants.ning.com/>) を開設している。これらの活動を通して、現在米国を中心にして、各国での学校教育現場で、理科教材として利用が広がっている。

我が国に最初にファストプランツが紹介されたのは1990年代のようであるが、2006年に佐藤、石澤、吉岡は、日本国内での普及を目指して、“Spiraling Through Life With Fast Plants”の翻訳本「ファストプランツで学ぶ植物の世界“(In The Woods. Book)”を出版した。その後、ファストプランツの種子販売の総代理店である In The Woods は、ファストプランツの日本語版 Website (<http://www.fastplants.jp/>) を開設した。また、2010年1月に石澤は日本生物教育学会第88回全国大会(宮城大会)で、ファストプランツに関するワークショップを開催した。2010年には、前田と西野が、ファストプランツを小学校・中学校の理科教育でマルチ生物教材として利用する様々な事例を報告した。このように、日本の学校教育でもファストプランツを教材として活用することが徐々に広まってきている。

現代の植物科学の発展に、シロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana* L.) がモデル植物として極めて重要な役割を果たしてきた。シロイヌナズナを学校教育教材としても活用し、それを普及しようとする努力がなされてきたが(後藤, 1986, 1998, 2005; 八尾,

2010)、学校教育現場での使用は極限られたものになっている。その大きな理由は、小学生や中学生が扱うには、その種子や花が余りに小さいことが挙げられる。また、シロイヌナズナを栽培する設備も、学校現場で整備することが難しいこともある。これに対して、ファストプランツは、種子や花が小学生でも取り扱える大きさであり、また栽培もシロイヌナズナよりも簡単であることから、小、中学校での教育教材として、ファストプランツの特性を生かした利用法が期待されている。

我が国の学校教育でファストプランツの活用を更に進めるためには、幾つかの解決すべき問題がある。何よりもまず、栽培法に関する問題がある。栽培が容易であるとは言っても、室内での植物栽培設備を持たない小・中学校では、ある範囲の温度を維持し、生育に十分な照度と照射時間を確保できる人工光源を確保することがしばしば困難である。教室内で簡単に栽培する方法の手引きや、安価に設置できる栽培装置の工夫、温度管理が不要な期間内でも教室内で栽培することで学習教材として利用できる具体的な学習プログラムの提案などが必要である。次に、日本の学校教育において従来から使われてきた多くの教材植物に取って代わり、ファストプランツを教材として使用することにより、その教育効果が著しく上がる学習課題を提案する必要がある。

ファストプランツの特徴を最大限生かした教材として、真っ先に挙げられるのは、短い生活環を生かした遺伝の教材としての活用である。Williams 博士らにより、アントシアン欠失突然変異を利用したメンデル遺伝の学習プログラムが開発されており、その世代毎の種子も販売されている。これらの種子を利用した、我が国での実践例の報告もある(安藤, 2009)。ファストプランツを遺伝教材として使用する魅力は、生徒が自分達の手で受粉を行うことで、メンデル遺伝を実験的に確かめることが出来ることにある。形質については、アントシアン欠失を種子播種後1週間ほどの芽生えで簡単に観察できる点も優れている。しかし、これらの実験を授業の中にどのように組み込むか、また、十分な種子形成には良好な生育条件を一ヶ月から三ヶ月(どのような実験を組むかによる)維持しなければならないなど、更に各学校現場に合わせた工夫が必要になる。また、シロイヌナズナに比べ(八尾, 2010)、

遺伝の教材として活用出来る突然変異体の種類が限られていること、その形質に関わるゲノム情報が圧倒的に少ないこと（Burdzinski & Wendell, 2007）など、その活用に制限がある。しかし、これらの問題を解決した遺伝教材としての実践例が、我が国の中学校、高等学校の授業や課外活動で、今後増加していくことが期待される。

本稿では、現在利用されている教材植物では実験をすることが難しい学習課題に、生活環が短いファストプランツを導入することで、その学習内容の理解の深化と、新たな展開が期待できる活用法について検討を加えた。

Ⅱ. 植物の成長に必要な肥料を考える

1. はじめに

我が国の小学校から中学校の理科教育において、植物を栽培してその発育を観察することは、極めて重要な学習課題として取り上げられてきた。現行の平成10年小学校学習指導要領では、第5学年の「植物の発芽、成長、結実」の単元で、発芽、成長、開花、結実の観察に加え、種子の発芽には、水、空気及び温度が関係し、種子の中の“養分”が使われることを学習することになっている。特に、種子の中の養分の存在については、デンプンを扱うことが求められている。更に、植物の成長には、日光や肥料などの環境条件が必要であることを学ぶことで、発芽と成長の条件の制御を、観察や実験を通して学習する。ここで、予想や仮説を立て、観察や実験により得た結果を整理し、最初に立てた予想や仮説を検証するという科学的思考方法の習熟へと発展させることが学習目標として掲げられている。

さて、植物の成長にとって日光が必要であることは、第6学年で葉に日光が当たりデンプンができることに導き、中学校の第2分野で、水と二酸化炭素からデンプンが作られる光合成の仕組みへと発展していくことで、小学校から中学校へと学習内容の繋がりが図られている。ところが、肥料については、第6学年ではもはや取り上げられず、中学校の第2分野で、根と茎のつくりとはたらきの章になって、「肥料」が取り上げられる。例えば、新編新しい科学2分野上（東京書籍）では、「植物の根は、からだを大地に固定するとともに、土の中の水や肥料分を吸収する役割をして

いる。」という記述とともに、脚注で「植物が生きて成長するためには、土中にとけている肥料分も必要である。」と書かれ、更に「茎のつくりとはたらき」で、「根で吸い上げられた水や肥料分は、茎を通して、からだ全体に運ばれていく。」ことが述べられている。しかし、この肥料分（養分）が何を意味するかは、第3学年で教わる2分野下巻の第七単元「自然と人間」の物質循環のなかで、「分解されてできた無機物の一部は肥料分として植物の根から採り入れられ、成長や生活のために利用される。」として、初めて肥料が無機物であることを教わることになる。さらに、高等学校の生物Ⅰの教科書では、植物の根が土壌から吸収する肥料分が、無機塩類であることを記述しているが、その具体的な物質名には触れていない。このように、現在の日本の理科教育において、植物栄養に関する学習内容は希薄で、そのより詳しい内容は、中学校の技術・家庭の教科書に記述されている。ここで、平成10年中学校学習指導要領総則第6において、各教科等相互間の関連を図ることを求めているが、教科書を見る限り、各科目は独立した教育内容を形成している。

そこで植物肥料に関する学習内容の変遷を、中学校理科の教科書で辿ってみると、平成2年発行の新改訂理科2分野上（啓林館）では、「緑色の植物は、有機物（有機養分）の炭水化物や脂肪、タンパク質を、じぶんのからだの中でつくり出している。しかし、タンパク質をつくり出すために必要な窒素の化合物や、からだが必要とするそのほかの無機物（無機栄養）の多くは、水にとけた形で、根から吸収されなければならない。」と極めて明解に肥料の説明がなされている。さらにこの教科書は水耕栽培実験を紹介し、最後に「植物が正常に成長するためには、少なくとも、窒素、リン、カリウムの化合物などいく種類かの無機養分が必要であることがわかる。」と締めくくっている。ところが、平成7年発行の新しい科学2分野上（東京書籍）では、蒸散に関係させて「根から水とともに吸い上げられた土の中の肥料分も、植物の全身にいきわたることになる。」との記述があるのみである。これら教科書の学習内容の変遷は、当然昭和44年、52年、平成2年、平成10年に行われた中学校学生指導要領の改正によるものである。

現行の教科書で、植物の成長に必要な肥料分を、「土の中の無機栄養分」と書くことが出来ないのは、無機

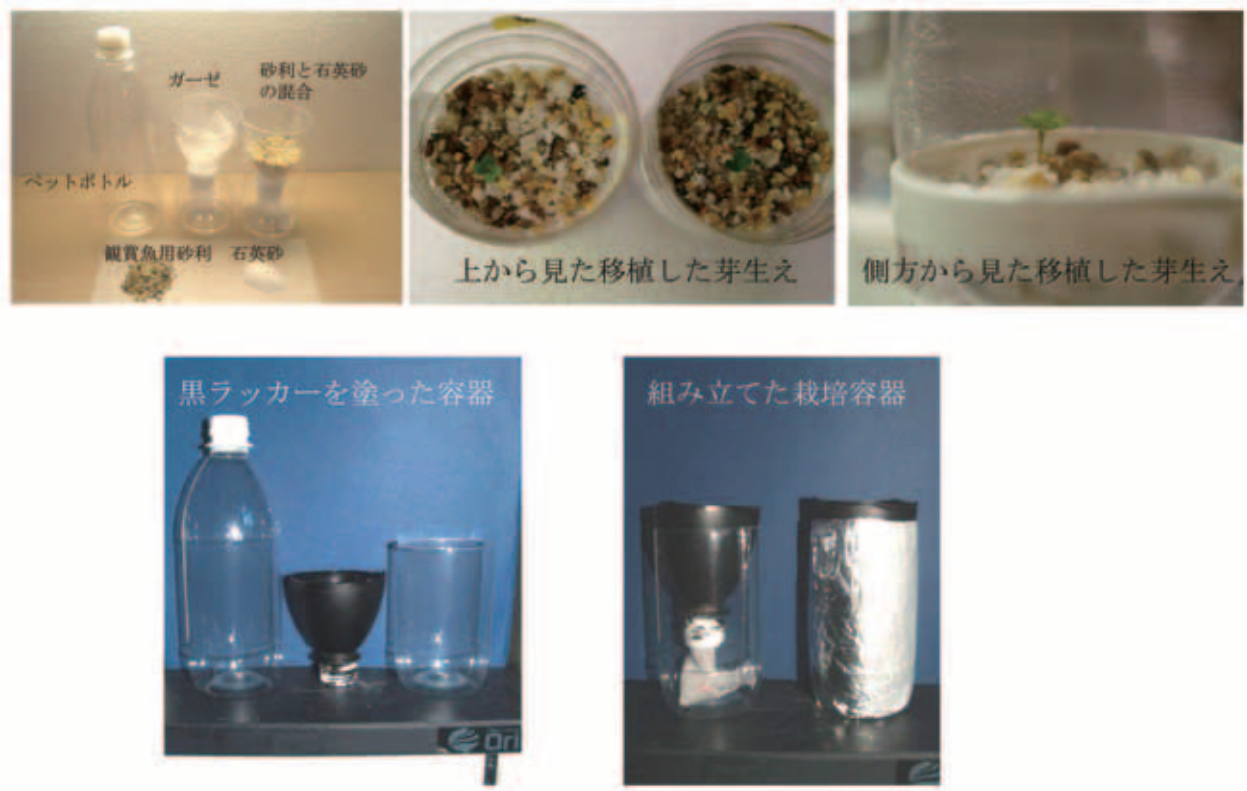


図1 培養容器と培地基材

物と有機物という語句が、根の働きを学習する第一学年では未習であることが理由になっているようである（新しい科学2分野上，教師用指導書研究編，東京書籍，2006年）。そのような状況であっても、もし手軽に栽培して観察することが出来る植物があれば、その栽培を通して、植物の生育に必要な肥料（分）とはどのようなものかを学習することが出来ると考えられる。ところが、現在学校現場で広く使用されている教材植物、例えばアサガオ、ヘチマ、ホウセンカなどの植物は生育に長い時間を要する。即ち、短期間に植物の生育を観察することが出来るような生物教材がないことが、これらの実験を学校で実践することを困難にしていると考えられる。

今回の研究の主要なテーマは、主に小学校と中学校のそれぞれの段階に応じて、植物栄養を実験的に確かめるためにファストプランツを教材植物として用いる有効性を明らかにすることある。特に、生徒達が自ら実験を通して学ぶことを前提としていることから、栽培法としては、学校でも準備でき、しかも生徒が自ら作成することも考慮することにした。

2. 実験方法

(1) 培養容器と培地基材

ファストプランツを栽培する容器として、学校現場で容易に手に入れられるもので、児童、生徒が興味を持って自作できることも考慮して、ペットボトルを使用することにした（図1）。ペットボトルは、(株)玉田製作所製の500mlのペットボトル「500PET丸 (K32g)」を用いた。ペットボトルの底から14.5cmのところ、ガスバーナーで暖めたフライパン返しで切断した。下部は、養液溜として、上部は黒ラッカーで黒く塗り、これを下部の養液溜に逆に差し込んだ。短冊状に切ったガーゼ二枚をペットボトル口から垂らし、その上に丸形に切った園芸用鉢底ネット（プラスチック製網）か、矩形に切ったガーゼを二枚引き、そこに砂利と石英砂を培地基材として置いた。砂利は観賞魚用水槽の下に引き詰めるために市販されている砂利（ペット工房Fresh Sand，ペットライブラリー(株)）と石英砂（和光純薬）を数日間水道流水中で洗浄後、蒸留水で濯ぎ、乾燥したものを使用した。50gの砂利と10gの石英砂を混ぜて、培地基材とした。また、土壌を用いた栽培には、クレハ培養土（呉羽化学）を用い、ビニール製

表1 Hoagland液の組成

化 合 物	濃度	1ℓに加える量 (mℓ)				
		完全 養液	N free 養液	P free 養液	K free 養液	Mg free 養液
KNO ₃	1 M	6.0	—	6.0	—	6.0
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	1 M	4.0	—	4.0	4.0	4.0
NH ₄ H ₂ PO ₄	1 M	2.0	—	—	2.0	2.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	1 M	1.0	1.0	1.0	1.0	—
K ₂ SO ₄	0.5M	—	4.0	—	—	4.0
NH ₄ NO ₃	1 M	—	—	2.0	3.0	3.0
CaCl ₂ · 2H ₂ O	1 M	—	4.0	—	—	—
K ₂ HPO ₄	1 M	—	1.0	—	—	—
KH ₂ PO ₄	1 M	—	1.0	—	—	—
MgCl ₂ · 6H ₂ O	25mM	—	1.0	—	1.0	—
KCL	25mM	2.0	2.0	2.0	—	2.0
H ₃ BO ₄	12.5mM	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
MnSO ₄ · 4~6H ₂ O	1.0mM	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	1.0mM	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.25mM	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
H ₂ MoO ₄ (80%MoO ₃)	0.25mM	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
NaFeEDTA	53.7mM	0.3-1.0	0.3-1.0	0.3-1.0	0.3-1.0	0.3-1.0

表2 ムラシゲ・スクーグ (MS) 液の組成

化 合 物	1ℓに加える量 (mg)	化 合 物	1ℓに加える量 (mg)
NH ₄ NO ₃	1,659	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	8.6
KNO ₃	1,900	KI	0.83
CaCl ₂ · 2H ₂ O	440	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.25
MgSO ₄ · 7H ₂ O	370	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.025
K ₂ HPO ₄	170	CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.025
H ₃ BO ₄	6.2	NaFeEDTA	37.3
MnSO ₄ · 4H ₂ O	22.3	FeSO ₄ · 7H ₂ O	27.8

日本製薬(株)製植物培養用培地ムラシゲ・スクーグ培地用混合塩類より

フベールポット75（底面直径5.5cm，上面直径7.5cm，高さ6.5cm）に八分目程度の湿らせたクレハ培養土を入れ、水を入れたプラスチックトレイ（縦27cm・横37cm・深さ6cm）に並べて置いた。

(2) 養液

養液としては、表1のホークランド (Hoagland) 液、表2のムラシゲ・スクーグ (MS) 培地 (和光純薬製)、表3のシロイヌナズナ用液体培地である MGRL 培地 (Fujiwara et. al, 1992)、そして表4の園試処方液 (金浜, 1995) を用いた。Hoagland 液及び園試処方液については、これらから窒素、リン、カリ、マグネシウムを除いた養液を作成し、その効果を調査した。

(3) 培養

ファストプランツの種子は、小林ハードウェアから販売されているスタンダードを用いた。3cm又は9cmシャーレにろ紙を2枚重ねに引き、蒸留水で湿らせて種子を播き、40W 東芝プラントルックス4本を光源として、蛍光灯から20cmの距離にシャーレを置いて連続照射した。温度は23℃とした。

播種後3-4日目の芽生えを、根を傷つけないようにペットボトル又はビニールポットの培地に移植して、これを発芽と同じ光、温度条件で培養した。草丈、花芽の形成、開花時期を記録することで生育状況の観察を行った。

3. 実験結果

(1) ファストプランツの生育

ファストプランツは生活環が短いことが特徴である。種子が発芽してから、次世代の種子をつけるまで、40日前後である。図2には、クレハ培養土を用いて、プラントルックスで栽培した場合の、ファストプランツの生育過程を示した。播種後1から2日で発芽し、子葉が展開した後、本葉は1週間目頃から成長を始め、2週間目には花芽が形成された。開花は3週間目頃から始まり、6週目には発芽能をもった種子が形成された。

ファストプランツの生育を、その草丈の伸長量で記録したのが、図3である。播種後10日間の成長潜伏期を経て、10日間の伸長期の後、25日目頃に最大伸長量である28cm前後の草丈に達した。この成長曲線は典

表3 シロイヌナズナ用液体培地 (MGRL 培地) の組成と作り方

A表

1. 200xPi液	含 量	4. 200xMicro液	含 量
NaH ₂ PO ₄ ・Anhydrous	36g/ℓ	Na ₂ ・EDTA・2H ₂ O	4.35g/ℓ
Na ₂ HPO ₄ ・Anhydrous	7.1g/ℓ	NaFeEDTA・3H ₂ O(FeⅢ)	732.7mg/ℓ
		MnCl ₂ ・4H ₂ O	407.7mg/ℓ
2. 200xCa K N(Control)液		ZnCl ₂	27.53mg/ℓ
Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O	94.4g/ℓ	CuCl ₂ ・2H ₂ O	32.73mg/ℓ
KNO ₃	60.7g/ℓ	H ₃ BO ₃	370.98mg/ℓ
		(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ・4H ₂ O	5.93mg/ℓ
3. 200xMgSO ₄ 液		CoCl ₂ ・6H ₂ O	6.19mg/ℓ
MgSO ₄ ・7H ₂ O	74.0g/ℓ		

B表

	水 1 ℓ に 加える量
200xPi液	5 ml
200xCa K N(Control)液	5 ml
200xMgSO ₄ 液	5 ml
200xMicro液	5 ml

1, 2, 3はオートクレーブ滅菌、4はフィルター滅菌

表4 園試処方液の組成

化 合 物	1 ℓ に加える量 (mg)			
	園試 処方液	園試N free養液	園試P free養液	園試K free養液
MgSO ₄ ・7H ₂ O	492	492	492	492
Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O	944	—	944	1417
KNO ₃	808	—	808	—
NH ₄ H ₂ PO ₄	152	—	—	230
CaCl ₂ ・2H ₂ O	—	588	—	—
K ₂ SO ₄	—	174	—	—
K ₂ HPO ₄	—	261	—	—
KH ₂ PO ₄	—	408	—	—
NH ₄ NO ₃	—	—	106	160
NaFeEDTA	24	24	24	24
H ₃ BO ₄	3	3	3	3
MnSO ₄ ・4~6H ₂ O	2	2	2	2
ZnSO ₄ ・7H ₂ O	0.22	0.22	0.22	0.22
CuSO ₄ ・5H ₂ O	0.05	0.05	0.05	0.05
Na ₂ MoO ₄	0.02	0.02	0.02	0.02

典型的なS字曲線を示した。時限ロゼット植物であるファストプランツの成長潜伏期から伸長期への移行は、花芽を形成するに伴って節間が伸長する抽台（ちゅうだい）に相当する。この時、節間が伸長することで茎生葉が形成され、花芽のつけ根に葉柄を持たない高出葉が形成された。雌蕊が受粉して受精が成立

すると、胚珠内で胚形成が始まり、子房の成長とともに種子の成熟が始まり、草丈の伸長停止期に入った。

(2) 各種養液の成長曲線に対する影響

この成長曲線が無機栄養条件によりどのような影響を受けるかを調査するために、Hoagland液、MS培地、MGRL 培地、園試処方液を養液とした砂礫耕栽培を行った。その成長曲線を図3に示す。

Hoagland 液の場合は、抽台が始まる伸長期初期では、クレハ培養土と同じ成長を示したが、途中から成長速度の低下が起こり、最大伸長量が15cm 程度と57%低下した。花芽の形成は播種後10日目から始まり、開花も播種後18日目に始まり、クレハ培養土との大きな違いは認められなかった。MS 培地の場合は、播種後9日目につぼみの形成が見られ、17日目に開花したが、伸長期に入る時期が少し遅れ、伸長期の成長速度が著しく低く、最大伸長量が10cm とクレハ培養土の36%に留まった。葉に黄化するものも見られ生育不良となった。MGRL 培地については、つぼみ形成は播種後8日目に起こり、17日目には開花した。伸長期に入る時期や伸長停止期に入る時期は、クレハ培養土とはほぼ同じであったが、伸長期の成長速度が少し低く、結果として最大伸長量が20cm 程度とクレハ培養土の70%程度となった。園試処方液を用いた場合は、つぼみの形成が、播種後9日目に始まり、16日後に開花した。又、伸長期に入る時期や停止期に達する時期、又伸長期の伸長速度は、クレハ培養土で栽培した場合とほぼ同じ成績を与えた。このことは、園処方液を養

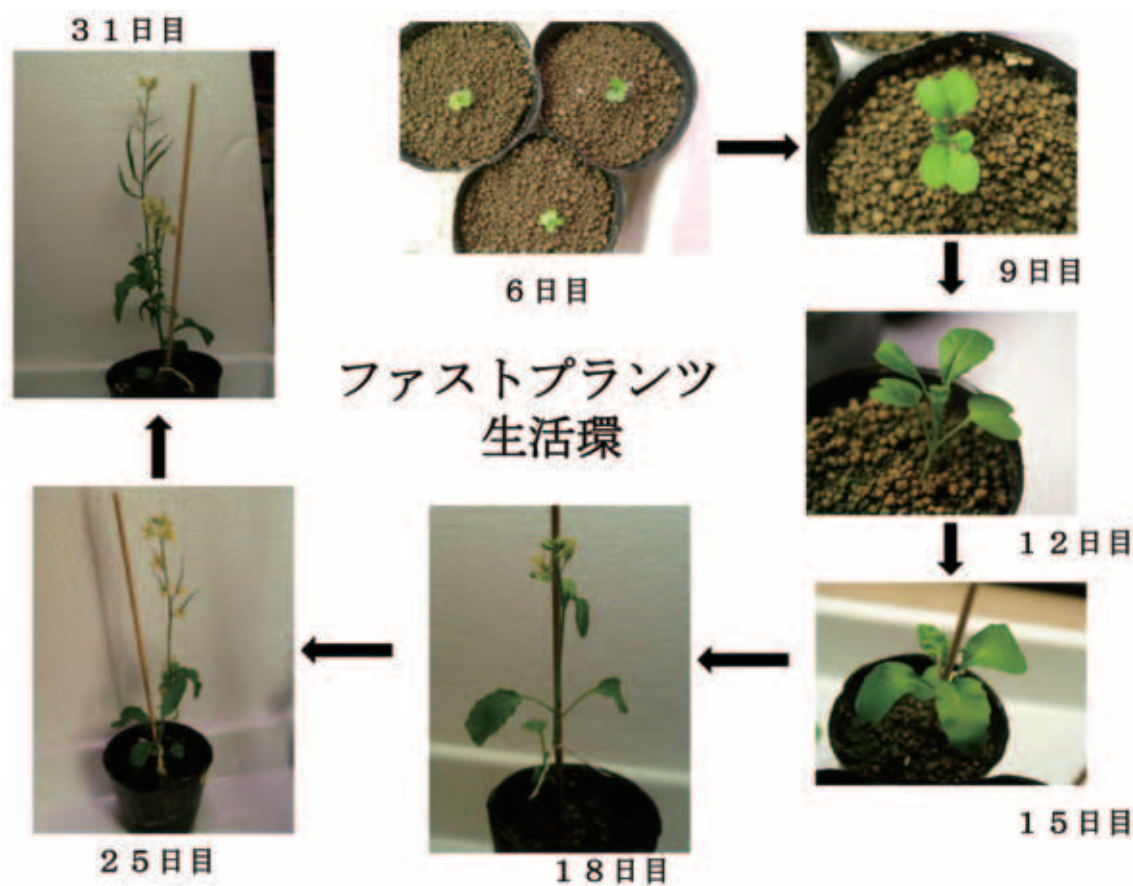


図2 ファストプランツの一生

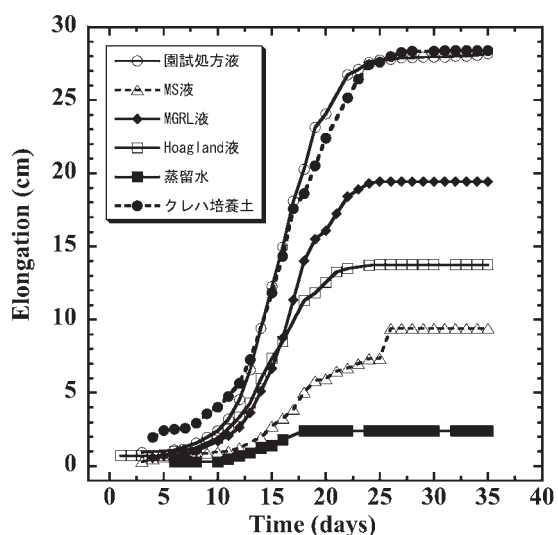


図3 ファストプランツの砂礫耕栽培による成長曲線

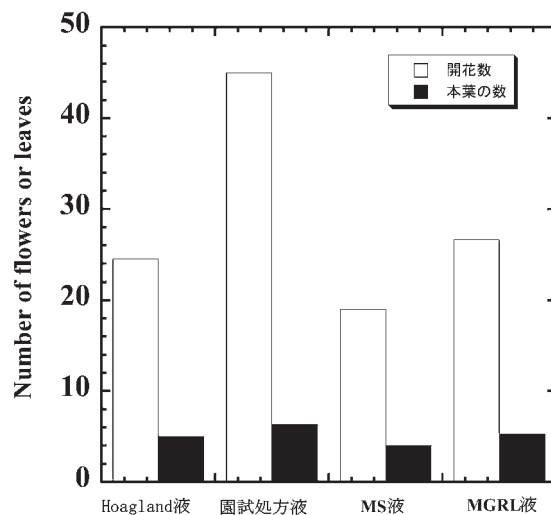


図4 各種養液の砂礫耕栽培によるファストプランツの開花数と本葉枚数の変化

液として砂礫耕栽培を行うことで、クレハ培養土（土）とほぼ同様な成長曲線が得られることが明らかとなった。

図4は、Hoagland液、MS培地、MGRL培地及び

園試処方液を養液とした砂礫耕栽培で、吸水を停止したときまでに開花した花と、展開した葉の1個体当たりの総数を表したものである。花及び葉の数は園試処方液で最も多く、その次がMGRL液、MS培養液で最

も少なくなった。この順番は、図3に表した伸長量の大きさと一致した。

(3) 必要元素の成長に及ぼす影響

植物の生育に無機栄養素がどのような影響を与えるかを調べるために、Hoagland液と園試処方液を養液とした砂礫耕培養で検討した。無機栄養素を含まない養液として、脱イオン後蒸留した純水（ADVANTEC GS-200）を与え、無機栄養素の効果を調べるために、窒素（N）、リン（P）、カリ（K）そしてマグネシウム（Mg）を除いたHoagland液又は窒素、リン、カリを除いた園試処方液を養液として用いた。

図5にはHoagland液を用いた場合を示した。まず、蒸留水で培養した場合、播種後5日目頃から葉の緑色が濃くなり、葉縁が丸まり始めた。つぼみ形成は播種後11日目に見られたが、伸長成長は殆ど起こらず、茎と子葉の葉縁が紫色に変化し始め、やがて本葉全体が紫色になった。花は播種後21日目に開花したが、雌蕊を欠き、子房は僅かに成長したが種子形成は起こらなかった。

窒素を含まない養液での成長は、蒸留水の場合と似て殆ど成長しなかった。播種後10日目にはつぼみの形成が見られ、19日目には開花したが、蒸留水の時と同じように雄蕊を欠き、子房の成長も見られなかった。子葉、茎、本葉の葉柄や葉脈は紫色になり、子葉は播種後25日目には枯死した。

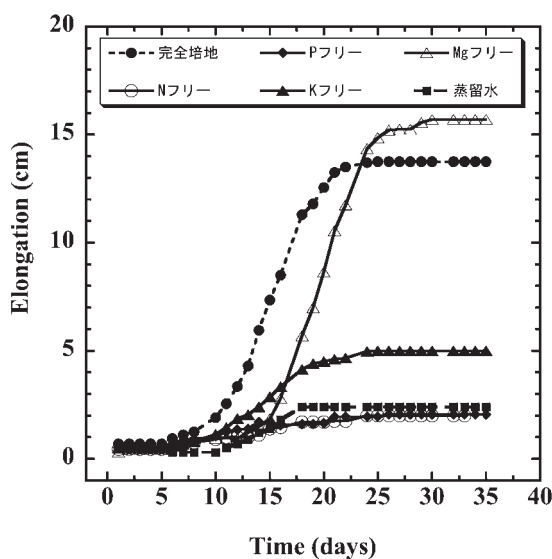


図5 Hoagland液によるファストプランツの成長に対する栄養要求性の検討

リンを含まない養液での成長も、蒸留水及び無窒素養液の場合と似ており、殆ど成長しなかった。つぼみ形成は播種後11日目に見られ、19日目には薄い黄色の花を開花した。播種後14日目には、子葉の縁、茎、本葉の葉脈と葉柄が紫色に変色し、21日目には葉全体が紫色になり、28日目には枯死した。1個体当たり平均1個の花で子房の成長が見られた。

カリを含まない養液の場合には、10日目につぼみ形成が起こると伸長成長が誘導されたが、その成長速度は著しく小さく、26日目には最大伸長量5 cmに達して伸長は停止した。その最大成長量はHoagland液完全培地を養液とした伸長量（14 cm）の36%であった。19日目に開花が見られ、1個体当たり平均2つの花で子房の成長が見られた。

マグネシウムを含まない養液では、11日目につぼみをつけ、19日目に開花した。子葉は縁から枯れるものがあり、本葉の数も少なく、所々黄化するものもあった。成長は完全培地に比べて遅れ、20日目頃までは成長が悪かったが、背丈は25日目以降に完全培地のものを追い越した。

図6には園試処方液を基本養液として、窒素、リン、カリを含まない養液の成長に対する影響を示した。

窒素を含まない園試処方液の場合、Hoagland液の場合に比べると最大伸長量が3 cmと僅かに大きくなったが、子葉、葉、本葉が紫色に変化し、開花した花は雄蕊を欠如している点など、著しい生育阻害が認

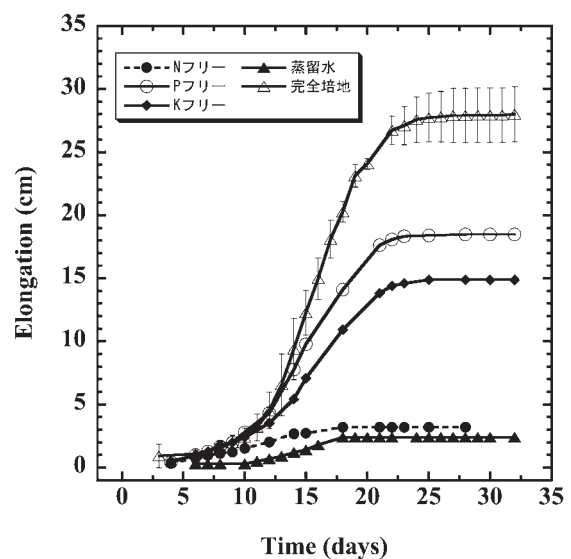


図6 園試処方液によるファストプランツの成長に対する栄養要求性の検討

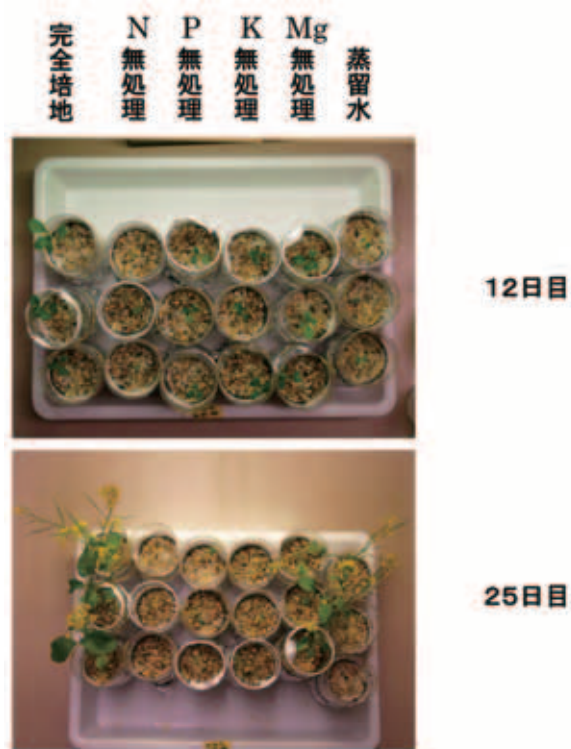


図7 砂礫耕栽培で養液として用いた園試処方液（完全培地）から、窒素（N）、リン（P）、カリ（K）、マグネシウム（Mg）を除いたもの、また蒸留水のみで栽培したファストプランツの生育状況

められた。

リンを含まない園試処方液の場合は、初期の成長はリンを含む園試処方液と殆ど変わらないが、播種後16日目頃の伸長成長期の途中から成長速度が低下し始め、最大伸長量が19cm程度と68%低下した。葉の枚数も4～5枚と少なく、葉の成長も抑制された。

カリを含まない園試処方液では、伸長期に入ってから伸長速度がリンを含まない園試処方液よりも低く、最大伸長量も15cmと完全園試処方液の54%と阻害された。

図7には、園試処方液の完全培地、窒素、リン、カリ、マグネシウムを除いたもの、そして蒸留水を養液として、砂礫耕栽培で培養した時の12日目と25日目のファストプランツの生育の写真を示している。完全培地とマグネシウム欠乏培地では良好な生育が見られるが、それ以外の養液では、生育が著しく悪化することが分かる。

以上の実験結果から、Hoagland液と園試処方液を基礎養液として、窒素、リン、カリがない養液でのファストプランツの生育を観察することで、これらの元素

が植物の生育に極めて重要な役割があることを示すことが出来た。

3. まとめ

今回用いた養液栽培は根圏培地に土壌を用いない栽培法である。養液栽培は、養液だけを用いて栽培する水耕（非固形培地耕）と固形培地耕に分けられる。固形培地耕では根の支持、根圏域への酸素（空気）供給及び養液保持などの機能をもたせるための培養基材として様々な材質が用いられている。有機物として、ピートモス、おがくず、籾殻、ヤシガラ繊維などを、無機物として、ロックウール、礫、砂、くん炭などが用いられる。本研究では、学校での使用を念頭において、安価で簡単に手に入る資材として、熱帯魚用礫と石英砂を用い、その混合比を5：1とする砂礫耕栽培を試みた。その混合比が最も適したものであるかどうかについては、更に検討を加える必要である。しかし、図3で示されているように、ファストプランツの栽培に、砂礫耕栽培で園試処方液を用いることで、クレハ園芸培養土を用いた場合とほぼ同程度に生育することが示された。このことは、所謂土を用いなくても、適切な養液を与えることで植物は正常に発育・成長することが示されたことになる。

今回行った砂礫耕栽培法では、養液としてHoagland液を用いた場合には、園試処方液ほど良好な生育が認められなかった。両養液の組成を比較すると、そのイオン組成に大きな違いは認められず、唯一異なるのは、園試処方液では塩素塩を含まないのに対して、Hoagland液では塩素塩を使用している点である。Hoagland液による生育不良がこの塩素イオンにあるのかどうか、今後更に検証が必要である。

今回の実験結果から、ファストプランツの砂礫耕栽培を行うことで、植物が窒素、リン、カリが欠乏すると生育が著しく悪化することが簡単に観察できることが明らかになった（図5，6）。窒素、リン、カリの不足は、草丈の伸長だけでなく、葉の成長や花芽の形成とその数、また葉や茎の色など多面的の影響を与えることを観察することができた。また、蒸留水のみで栽培したとき、花芽の形成から開花にいたる段階で、子葉が緑色からやがて紫色に変化する様子は、丁度落葉樹が紅葉することを連想させる。根からの無機塩類の供給が絶たれた条件では、開花に必要な物質を子葉から

転流して回収していると想像される。植物体内での物質輸送を調べる上で大変面白い現象であり、今後詳しく調査すべき研究課題であると考えている。

さて、窒素、リン、カリ以外の元素について、マグネシウムを欠失した Hoagland 液を用いた場合（図5）、また、園試処方液を用いた場合（図7）を試みたが、窒素、リン、カリの場合ほど、その生育に顕著な差を示すことができなかった。更に、Ca、S、B、Mn、Zn、Cu、Fe、Moなどの要求性を調べるために、これらを除いた培養液で栽培し、その生育に障害が生ずるかどうかを検討したが、今回用いた砂礫耕栽培ではこれらの元素の欠乏症状を十分に観察することは出来なかった。これは、使用した石英砂や礫に吸着して持ち込まれたこれら微量元素で、ファストプランツの生育には十分であったのかもしれない。高等学校以上の実験で、このような植物栄養に関する本格的な実験を行うためには、今回用いた石英砂と礫の混合培地以外の資材を使った養液栽培法を検討する必要がある。

平成10年に改正された学習指導要領のもとで行われている、現在の小学校及び中学校の理科での植物の生育に必要な肥料について学習は、その内容が極めて限定されていることは本講の最初に指摘した。植物の栄養に関する学習は、根の働きの一つとして、土壌から肥料分を吸収することを学ぶことに加え、植物が独立栄養生物であり、動物など従属栄養生物と根本的に異なる生物であるという極めて基本的問題に発展する項目であり、生物学を学ぶ上で大変重要な内容である。そのことを考えると、小学校、中学校での理科の学習で、植物が必要とする肥料分を追求する学習内容を充実させるべきである。しかしながら、平成22年7月に発表された小学校、中学校の学習指導要領の改正においても、現行の学習内容からの大きな変更はない。新小学校学習指導要領理科はその目標として「自然に親しみ、見通しをもって観察、実験などを行い、問題解決の能力と自然を愛する心情を育てるとともに、自然の事物・現象についての実感を持った理解を図り、科学的な見方や考え方を養う。」を掲げ、また新中学校学習指導要領理科でも「自然の事物・現象に進んでかわり、目的意識をもって観察、実験などを行い、科学的に探究する能力の基礎と態度を育てるとともに自然の事物・現象についての理解を深め、科学的な見方や考え方を養う。」を目標として掲げている。これら

を達成するために、生徒達が植物を自分の手で育て、植物の生育に必要な栄養を考える実験を導入することは、科学的思考法を学び、また植物という生き物を理解する上で極めて有効であると思われる。

Ⅲ. 植物の成長に必要な水と肥料についての小学校理科の学習

1. はじめに

小学校では、植物の成長に水と温度と空気と光に加えて、肥料が必要なことを学ぶ。肥料とは何かを学ぶために、インゲンマメの芽生えをパーミキュライトに植え、これに肥料を加えた水（多くの場合はハイポネックスなどの液肥）と肥料を加えない水を与え、その生育を観察することが多くの学校で行われている。数週間後、肥料を含む水に比べ、水だけ与えたインゲンマメの成長が著しく劣ることを示し、植物の成長に肥料が必要なことを学ぶ。ファストプランツをパーミキュライトで生育させた場合も、肥料を与えないと著しい生育阻害が見られる。しかし、これらの実験では、市販されているハイポネックスのような液体が、突然「肥料」として登場することで、子ども達はこの「肥料」とはなんだろうという素朴な疑問を持って、このことには答えることはできない。即ち、ハイポネックスは「肥料」であることを前提にしてしまうことになる。そこで、この疑問を生徒達に考えさせる実験を、ファストプランツを使って開発することにした。

2. 実験方法

ファストプランツを身近な色々な水で育ててみることで、水に溶けているものが植物の生育に必要なこととの結論を導くことを目的とし、実験には、ペットボトルを培養容器として、石英砂及び小石、そして養液を用いた砂礫耕栽培を用いることにした。実験する水は、なるだけ身近なものの中から選択することにし、ここでは水道水、浄水器を通した水道水、雨水、川の水、池の水、そして蒸留水及びハイポネックス（ハイポネックスジャパン、6-10-5原液）の蒸留水で500倍に希釈した液、そして蒸留水（脱イオン水の一次蒸留水）とした。

土と肥料の関係を調べるための実験では、色々な場所から採取した土でファストプランツを栽培すること

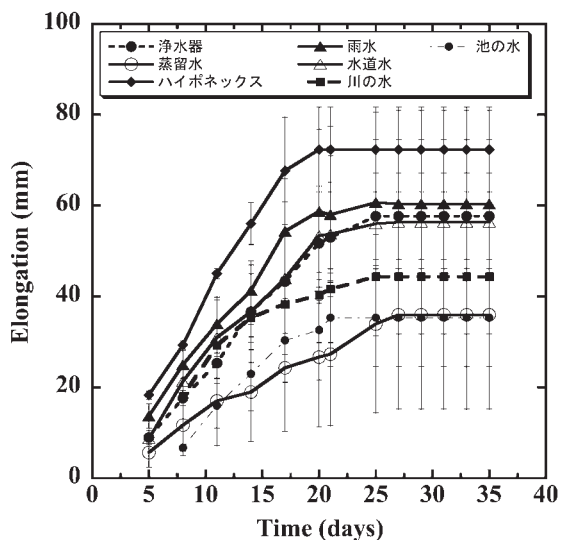


図8 ファストプランツの砂礫耕栽培で用いる各種の水の影響

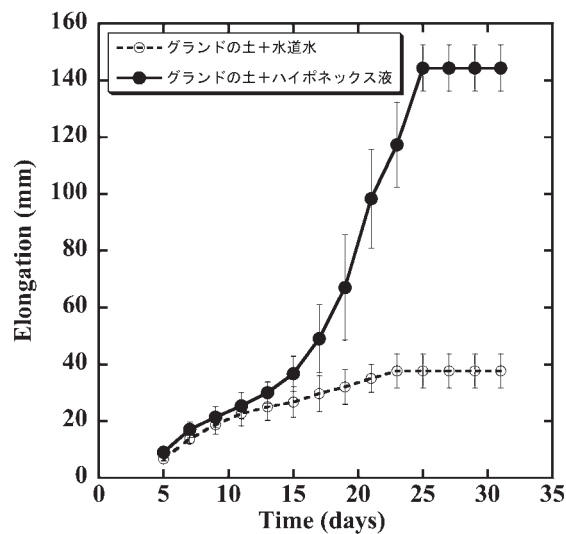


図10 グランドの土を用いたファストプランツの生育に及ぼすハイポネックス溶液の効果

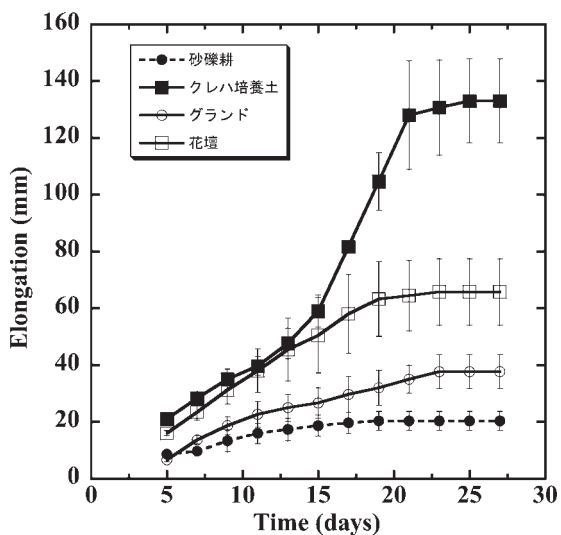


図9 ファストプランツの生育に及ぼす各種の土の影響

にした。土の採集場所は、グランドと花壇を選んだ。これらの土の対照としてクレハ培養土をペットボトルで作った培養器に入れ、水道水か、ハイポネックスの500倍希釈液を養液として、ファストプランツを栽培した。

2. 実験結果

(1) 水だけで植物は育つだろうか。

普通小学生が植物を栽培する場合には、水道水を与えることに何の疑問も持たないであろう。しかし、身の回りには様々な状態で水が存在している。そのような水を使って、ファストプランツを育て、植物の生育

の状況を調べてみることで、植物にとって水とはどのような物かを探ることにした。

図8にその結果を示す。20日間の生育期間で比べると、蒸留水<池の水<川の水<水道水=浄水器を通した水道水<雨水<ハイポネックスを含む蒸留水という結果が得られた。このことから、身の回りには水は、蒸留水（純水）とは異なり、植物の生育に必要なものが溶けていることを知ることができることになる。

(2) 土と肥料の違いは何だろう。

小学生にとって、植物を土に植えることは常識であろう。しかし、土（土壌）と肥料との関係についてはどうであろうか。土壌と肥料の関係について、現在の教科書は極めて曖昧な取扱いをしている。そこで、様々な場所の土を培地にして、水道水だけを与えてファストプランツを栽培した場合に、どの程度生育するかを調べることで、土により植物の育ち方が異なることを気付かせることを目的とした。

図9は、グランドの土、花壇の土、そして市販されている植物栽培用の培養土（クレハ培養土）でファストプランツを育てた結果である。21日後の草丈を比較すると、クレハ培養土>花壇の土>グランドの土の順に生育が悪くなることを示した。

図9の結果で最もファストプランツの生育が悪かったグランドの土には、何かが欠けていたということを知りたい。ここにはハイポネックスを添加した

場合と比較する実験を行ってみた（図10）。同じグラウンドの土でも肥料を加えることで、クレハ培養土と同程度に生育することが示された。

3. まとめ

一つ目の実験を行う目的は、自然界の水には色々なものが含まれており、これが植物の生育に影響を与えることを知ることである。このことは、第5学年の理科での物の溶け方についての学習と関係すると共に、第6学年の生物と環境について「生物は、水及び空気を通して周囲の環境と関わって生きていること。」（平成20年8月学習指導要領解説）に繋がる学習内容である。身の回りに存在する様々な水を使って植物を育てると、植物の生育にどのような違いが生ずるかを観察することを通して、水には色々な物質が溶けていることを実感させ、植物の生育に、水に溶けている物質が必要であることを容易に気づかせることができると考えられる。小学校理科の範囲を超えるが、発展課題として、物質が溶けていない水（純水）とはどんなものだろうかということまで考えさせることができるのではないだろうか。

二つ目の実験の目的は、植物にとって土とはなんだろうと言う疑問を考えてみることにある。小学生の段階で、肥料と土の違いを正確に理解させることは困難と思われる。しかし、小学生にとって植物を土に植えることは常識であることを考えると、土と植物の肥料（栄養）との関係を考えさせることは極めて重要な学習内容である。今回行った実験で、身の回りの様々な場所から採集した土を使って、水道水だけでファストプランツを育てることで、土には植物に必要な物質が必ず十分に含まれているとは限らないことを確かめることできた。このことが土と肥料の違いを認識する手がかりを与える事になる。更に、今回試みたように、余り良く育たない土に液肥を加えることで、植物の成長に必要な物質（肥料）があることを学習できるのではないだろうか。

さて、現行の学習指導要領のもとで執筆されている小学校理科の多くの教科書、例えば、教育出版小学校理科5上、啓林館わくわく理科5上、大日本図書たのしい理科5上、東京図書新しい理科5上、信濃教育出版部楽しい理科5上では、植物の生育に発芽では必要でなかった肥料が何故必要になるかを、子葉に含まれ

ている養分が発芽の過程で使われてなくなるために、その後の成長には肥料が必要になると説明している。学習指導要領には、種子に含まれる「養分」としてデンプンを取り上げることが指示されていることから、教科書では、子葉に含まれるデンプンが発芽の過程で消費されることを、ヨウ素による染色で調べる実験を記載している。「養分」であるデンプンがなくなった結果、その後の成長に「肥料」が必要になるとの論理からすると、当然肥料はデンプンを主成分にするものと理解されるべきである。ところが、一方で、肥料としてハイポネックスなどの液肥が記述されている。これらの記述は、植物の生育に必要な「肥料」とデンプンなどの「養分」とが混同されて生徒に理解される危険をはらむものである。このことは、植物の成長に必要な「肥料」が、学習内容として極めて重要な事柄であることを示している。

ファストプランツの栽培実験は、植物の生育に必要な「肥料」「土」そして「水」について、生徒が自ら考え、学習できる教育プログラムとして、これらの問題を解決するために有効である。

謝 辞

この研究の一部は、平成20、21、22年度の科学研究費基盤研究(C)（課題番号20500743、代表石澤公明）の援助を受けて行われた。ここに感謝の意を表明する。

文 献

- 安達真（2008）ファストプランツの水耕栽培を用いた栄養要求性の解析、平成19年度宮城教育大学教育学部卒業論文
- 安藤秀俊（2009）中学校の遺伝学習に対する認識—ファストプランツの有効性の検証—、理科教育研究、49(3) 13-21
- Burdzinski C., Wendell D.L. (2007) Mapping the *Anthocyanineless (anl)* locus in rapid-cycling *Brassica rapa* (RBr) to linkage group R9. BMC Genetics 8:64
- Fujiwara T., Hirai M.Y., Chino M., Komeda Y. and Naito S. (1992) Effects of sulfur nutrition on expression of the soybean seed storage protein genes in transgenic petunia. Plant Physiol. 99 : 263-268.

- 後藤伸治 (1998) シロイヌナズナを用いた遺伝実験—メンデルの「優性の法則」と「分離の法則」—、遺伝別冊10号127-131
- 後藤伸治 (1986) シロイヌナズナ—多目的利用をかねた生活環境教材の開発(4)—、遺伝40(9)61-66
- 後藤伸治 (2005) シロイヌナズナを用いた多目的実験、遺伝別冊18号131-134
- 金浜耕基 (1995) 著 日向康吉・羽柴輝良 編：植物生産農学実験マニュアル、ソフトサイエンス社
- 熊坂知世 (2009) ファストプランツを使った植物栄養解析システムの開発、平成20年度宮城教育大学教育学部卒業論文
- 前田紗綾香・西野秀昭 (2010) ファストプランツの小学校・中学校でのマルチ生物教材としての活用性に関する研究、科学教育研究、Vol.34 No.1 2-12
- Robin Greenler, John Greenler, Daniel Lauffer, Paul Williams (2004) Spiraling Through Life with Fast Plants: an Inquiry Rich Manual. 1st Edition, Kendall/ Hunt Publishing Company, USA
- 佐藤絵美 (2010) ファストプランツの水耕栽培を利用した理科教材開発、平成21年度宮城教育大学教育学部卒業論文
- 佐藤茂・石澤公明・吉岡俊人 (2006) ファストプランツで学ぶ植物の世界、In The Woods. Books
- Williams H. Paul, Curtis B. Hill (1986) Rapid-cycling populations of *Brassica*. Science 232 : 1385-1389.
- 八尾晃一 (2010) 高等学校生物におけるシロイヌナズナを用いた教材の開発に関する研究 平成21年度(第53回)岩手県教育研究発表会資料(理科) 1-20

(平成22年9月30日受理)