



根圏制御型砂栽培装置サンドポニックスを用いた農業生産支援システムの開発

High Quality Agricultural Production Support System by Smart Sand Culture Device New Sandponics

金澤 進一*
Shinichi Kanazawa

松尾 圭一郎
Keiichiro Matsuo

馬場 将人
Masato Baba

三須 英幸
Hideyuki Misu

池口 直樹
Naoki Ikeguchi

ニューサンドポニックス (NSP) は、従来の砂栽培装置サンドポニックスに底面給水を組み合わせた新しい栽培装置である。従来の砂栽培は、砂が再利用可能である反面、装置が重くなるという難点があった。NSPは、従来のサンドポニックスの10%以下の砂培地量にすることで、また、給液方法を改良することによりメンテナンスの軽減を達成した。現在は排水が無く成長状態に応じた液肥給水による野菜品質の制御を実現しつつある。本稿では、その特長である培地中の根への酸素供給性能をさらに改善することで、トマト収穫の増量に成功したNSP栽培の例を示すとともに、当社が目指す農業のIoT化に向けた、サンドポニックスを用いた農業生産の支援システムの構築の試みについて紹介する。

New Sandponics (NSP) is a unique cultivation device that uses sand as the primary medium, as in the early Sandponics, and additionally employs a floor irrigation method. Using only 10% of the sand medium volume used in the early Sandponics, NSP reduces the device weight and maintenance costs. The floor irrigation method has enabled us to control water and fertilizer supply depending on the growth phase of the crops for higher yields and quality. This paper reports on our efforts in increasing the yield of tomatoes by using a new medium of air-rich structures and also presents our attempts at IoT-based agricultural production using Sandponics.

キーワード：養液栽培、砂栽培、底面給水

1. 緒言

1970年代から続く当社の農業生産支援システム事業は、開発時の北川会長が提唱した「農業の工業化」に端を発している。特に当時語られた、農業と情報社会との融合⁽¹⁾は、21世紀に入って飛躍的に進化を遂げた情報技術の発展とともに昨今現実味を帯びつつあり、まさに先見の明があったと言える。人口の増加に伴う世界的な食糧不足と国内における高齢化による農業担い手の不足が叫ばれる中、そのコンセプトの実現は近年益々重要となってきている。

当社の砂栽培システムであるサンドポニックスは、主に温室におけるメロンや野菜類の点滴栽培システムとして1977年から市販され、①安定した物性の砂を用いた点、②排液の少ない管理栽培法を採用した点、③連続栽培が可能であった点などが評価された⁽²⁾。我々は2013年よりこのシステムのさらなる効率化に取り組み、新たに底面給水を取り入れたニューサンドポニックス⁽³⁾ (NSP) として、トマト栽培による実証実験を実施している(図1)。

本稿ではNSPの特長と、それを活かしたさらなる改善によってトマト収穫が増量した例を提示するとともに、根圏制御性に優れたNSP装置による栽培に、モニタリング技術とデータ解析技術を組み込んだ、安定した農業の生産性を実現する総合的栽培支援システム構想について紹介する。

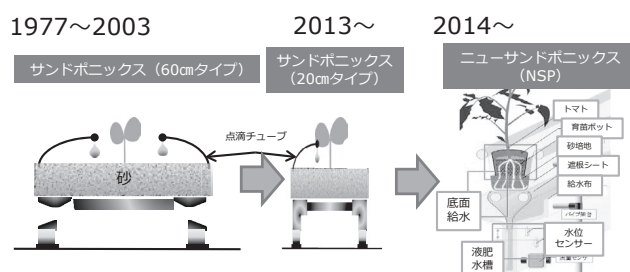


図1 サンドポニックス装置の変遷

2. 底面給水の原理

NSPは、少量の「砂培地」とその下部に設けた液肥水槽から給水布の毛管現象を利用して液肥を供給する「底面給水」を利用した液肥栽培装置である(図1右図)。

毛管現象は、図2に示すように水面に接した径の細い管(毛管)の管内を重力に逆らって水が揚がる現象で、この揚水高さは、図2式①のように管径に反比例して高くなる。

底面給水の給水材料として重要となってくる特性としては水の移動に対する毛管伝導度 (capillary conductivity) があるが、この逆数が毛管中を水が通る際の透過抵抗に相

当する。この毛管の透過抵抗は図2式②（ポアズイユ式の変形）のように管径の4乗に反比例して大きくなる。

すなわち、毛管は径が細くなれば揚水高さは上がると同時に水が急激に移動しにくくなるという性質を持つ。

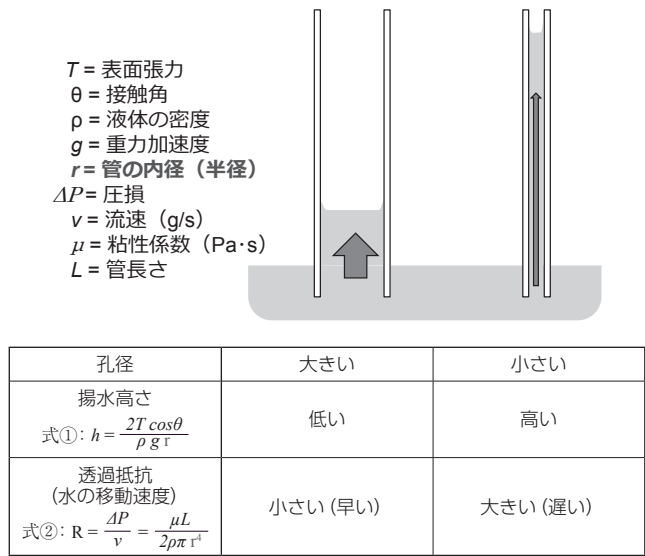


図2 毛管現象と給水特性の関係

底面給水を構成する給水布や培地は、それを構成する材料の隙間・空隙が底面給水において水を揚水する毛管現象を起こす毛管として働いている。例えば、給水布に用いられる不織布やロックウール等の繊維状の材料は、構成する繊維の隙間が毛管に相当し、砂やココピート（椰子柄）のような粒状の材料では、粒間の隙間が毛管（孔径）となる。また不織布のような、ほぼ均一径の繊維を圧縮した工業生産材料では均一性の高い空隙となる（図3右図）が、砂や土のような天然材料は一般的に含まれる様々な粒径分布を反映し広い径分布（図3左図）となる。このため空隙の構造が複雑となる砂や土は、毛管の集合体としての説明には限界がある⁽⁴⁾と一般的には見なされるが、本稿では簡略のためにこの後も毛管で説明したいと考える。

このような各材料の毛管径分布は、その材料がどのような径の毛管で構成された集合体であるかを表すため、底面給水における重要な特性である、①揚水能力、②下部水槽からの水位差における空隙の気相／水相の割合、③給水速度、を決定する、もっとも重要な基本特性である。

図4は、NSPの底面給水を構成する代表的な材料の、下部水槽からの一定の水位差における含水率を測定したグラフで、水位差（＝揚水高さ）における空隙の水と空気の比率のイメージ示している⁽⁵⁾。

この特性曲線は、構成する毛管を径の大きな順に左から

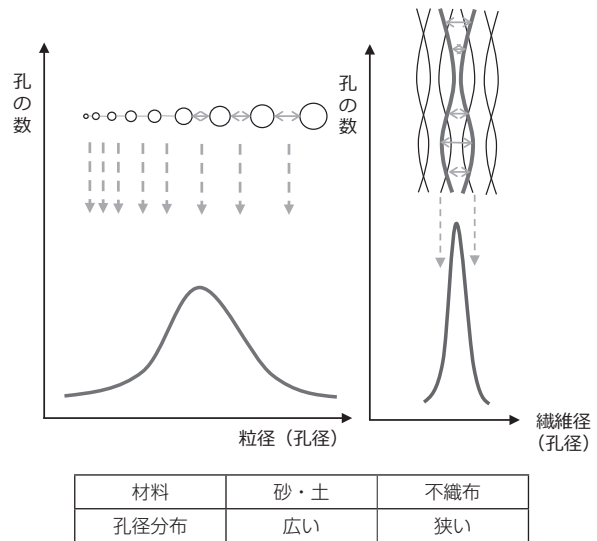


図3 給水材料と管径分布

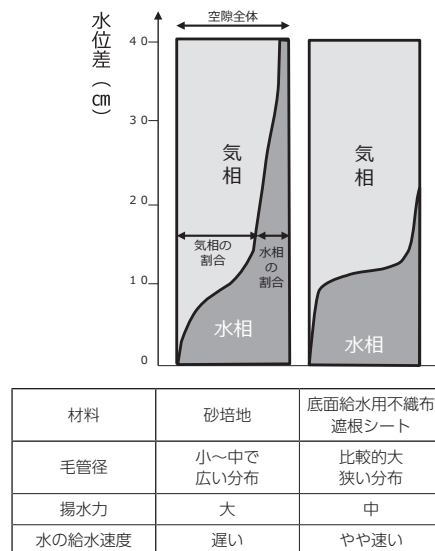


図4 NSPの給水材料の気相／水相比率

並べたイメージを考えると理解しやすい（図5）。図1で述べたように太い毛管は揚水高さが低いのでそれ以上の高さではその空隙は空気で満たされることになりより細い管だけが水を持っている状態となり、水位差が高くなるほど気相が占める割合が増えていく。

これらの材料の給水性能を最初に述べた毛管現象の原理から考えてみると、NSPで培地として使用されている砂は、細かい隙間を多く含むため培地層の高い位置まで揚水できる反面、その水の移動速度が下記のシートより遅いことになる。一方で給水布や透水遮根シートは、砂に比べて揚水力は高くないが水を速く伝達する性能は優れていることになる。このような水分特性の異なる材料を組み合わせること

により、植物の生育に最適な水分環境を構成することが可能となり、その条件を明らかにした。

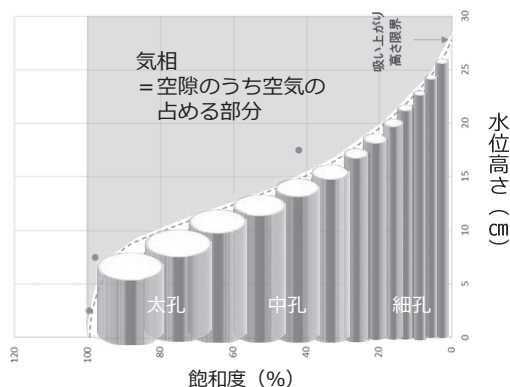


図5 毛管径分布と気相/水相比率

3. NSPの特長

NSPは、前述の底面給水の原理を設計に応用し、以下のような特徴的な構造を取っている(図6)。

- (1) 揚水性の高い砂を少量用いた培地
- (2) 根の下部への伸展を防ぐ透湿遮根シート
- (3) 水の伝達速度の速い不織布を用いた給水布
- (4) 一定水位に制御された下部水槽

さらに、一般的な底面給水式の養液栽培装置にない、特徴的な構造として、

- (5) 不織布が懸架されており、特に培地の下部分(図6の砂培地と給水布の下部分)が空気に触れる構造になっている

点を特長として上げることができる。

以上の構造的特徴によってNSPは栽培において以下のような特長を示すことが可能となる。

- (1) 培地が従来の砂栽培システムに比べ軽量で設置やメンテナンスが容易である
- (2) 栽培後の廃棄物がほとんど出ない(栽培後の根の除去が容易である)
- (3) 水位差による常に安定した水分ストレスにより糖度コントロールが容易で確実(透水遮根シートによる遮根と一定水位の水槽による水位差制御)
- (4) 栽培植物の吸水に合わせた速い給水能力
- (5) 供給される液肥および培地への十分な酸素供給

これらの効果の結果、NSP栽培では通常の養液栽培法に比べて、旺盛な根の伸展とそれに伴う健全な植物体の成長、高品質の収穫物が高い収穫量で生産可能となる。次章からは、実際にNSPを用いたトマト栽培の例から、これらの利点について説明する。

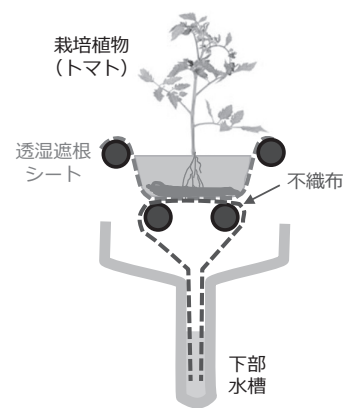


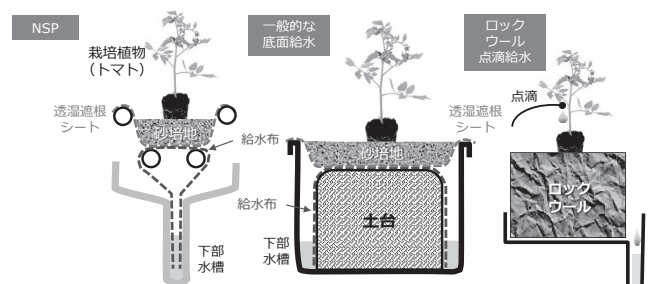
図6 NSP構造の模式図

4. NSPを用いたトマトハウス栽培

4-1 代表的な養液栽培法との比較実験

代表的な栽培方法として、土台の上に給水布を敷いた底面給水式砂栽培(以降、土台式底面給水栽培と記す)と、ロックウール培地による点滴栽培の2つを用いて、NSPとの性能比較を目的としたトマト栽培実験を行った。

トマト苗はCF桃太郎ヨークのピートモス苗床5cmポット植えの5葉展開苗を、底面穴あきポットに移してそのまま培地の上に株間15cmで156株ずつ定植した。各栽培装置の構造模式図および、培地の量および底面積、また給水方法は図7に示す通りである。



	NSP	土台式底面給水栽培	ロックウール点滴給水栽培
培地量	400cm ³ /苗	640cm ³ /苗	2400cm ³ /苗
培地底面積	75cm ² /苗	150cm ² /苗	300cm ² /苗
給水方法	下部水槽の水面と培地底面の水位差6cmで給水、5cmで給水停止		定期給水、日中30分毎80cc/苗

図7 各栽培装置の構造と給水方法

栽培は、千葉大学柏の葉キャンパス内の植物工場⁽⁶⁾1号棟にて2016年5月27日~10月初旬まで7段階摘心にて実施した。液肥はOATハウス肥料SA処方にて電気伝導度で初期0.8~1.0mS/cm、後半1.2mS/cmで濃度管理した。ま

た、夏場の栽培であったためハウス環境制御として、日中は飽差^{*1}6~8g/m³で細霧冷房、夜間は25℃以下になるようにヒートポンプ温調を実施した。収穫結果を表1に示す。

表1 NSP、底面給水、ロックウール点滴栽培の結果

栽培方法	NSP	土台式 底面給水栽培	ロックウール 点滴給水栽培
液肥使用量	0.3~1.0L/株・day		1.5L/株・day
収穫量	7.5 ton/10a	6.2 ton/10a	10.0 ton/10a
平均糖度	6弱で安定	初期5、後半7超	4~5で安定
根の状態	白色・健全	褐色化、根腐れ有	白色・健全

収量が最も多かったのは、ロックウールによる点滴給水栽培で、糖度は2つの底面給水栽培で高かった。NSPとロックウール栽培では栽培の間、安定した糖度・果実重量の収穫が得られ、栽培後の解体調査では培地の底面に白色のルートマット^{*2}形成が見られた。

これに対して、土台式底面給水栽培では、栽培後期に樹勢に衰えが見られ平均果実重量が低下したことで急速な糖度上昇が見られた。栽培後の調査では培地の側面に根が集中しており、底面の土台の上に入った付近で根の進展が停止して一部の根に褐色化・根腐れが見られた⁽⁷⁾。

NSPによる栽培は、他の代表的な栽培に比べて非常に少量の培地・少ない液肥消費量で、収量は抑制されるものの高糖度栽培が可能であった。

4-2 NSPの根の分布改善

給水時に水が培地の上から下に流れる点滴給水に比べて、NSPが採用している底面給水は、培地の下にいくほど水があるという水の分布が常に存在する。そのため根にはより水のある下方向に向かおうとする垂直方向の指向性が強くかかってしまう。根は培地を下に進んだ後に透水遮根シートにそれ以上の下方向への進展を阻まれるが、地上部の生育量が増えれば、さらなる給水を求めて遮根シート上面のルートマットの厚みが増加することが観察される。

NSPは先に述べたように、他の栽培方法に比べて少量の培地での栽培を可能にしているが、培地底面積が小さいために他に比べてルートマットを厚く形成する(図8右写真)。



図8 NSP栽培終了後の培地(左:断面、右:底面)

このルートマットの、より上層の根は、下層に存在する根に比べ液肥を吸収しにくくなることが考えられる。植物体の成長を阻害する要因となり、場合によっては根の活性低下を引き起こすことも考えられる。

図9に示す培地の積層構造化は、小さな培地、底面給水による高糖度化というNSP栽培の特長を活かしたままでルートマットの肥大化・機能不全の問題を克服するために、底面給水特有のルートマットを階層状に形成する方法として考案したものである。

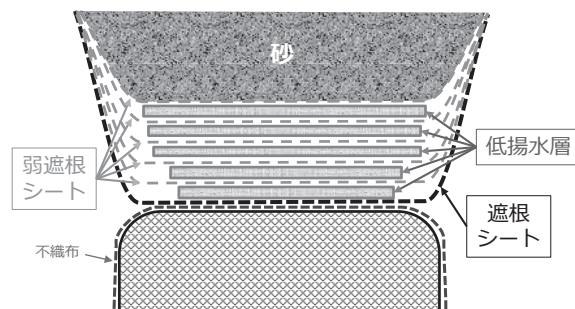


図9 培地の積層化

積層構造化の効果をトマト栽培実験で実証した。前述の図7の土台式底面給水栽培を比較対象区として、比較対象区の3cm厚砂培地の下層1/2(約1.5cm厚)を、以下の材料を使用して図9のような5層の積層構造を作製した。

弱遮根シート：ベル開発製透水遮根シートRG-W

低揚水層：①ベル開発製不織布アクアベルSR250

②SR250の上に十和田砂層

遮根シート：ベル開発製透水遮根シート(特注)

実験では、弱遮根シートと低揚水層は繰り返し5層積層しており、その最下層を遮根シートとしている(図9)。

弱遮根シートとして用いたRG-Wは、遮根性は認められるもののトマト根は一部でシートを突き破って下層に進展が可能な材料である。また、低揚水層のSR250は、厚さ約250μmの厚手の不織布で、揚水高さがメーカー公表値4cmで、栽培実験における培地の水槽からの水位差5~6cmでは多くの間隙は揚水できないため気相となる材料である。

また併用した十和田砂は、内部に空隙を持つ~数mmの径の礫砂で敷設によってより多くの空気層の含有が期待できる。

トマト栽培実験は、栽培期間が2016年6月30日~11月初旬としたこと以外は、前章の栽培実験と同じ条件で実施した。結果を表2に示す。

表2 積層構造NSPの栽培結果

栽培方法	一般的な底面給水	積層構造①	積層構造②
培地構造	砂3cm厚 2101	砂1.5cm RG-W/SR250×5層 2101	砂1.5cm 同左+十和田砂×5層 2101
収穫量	5.5 ton/10a	7.4 ton/10a	8.1 ton/10a
平均糖度	初期5、後半7超	5強で安定	5強で安定
根の状態	褐色化、根腐れ有	白色・健全	

積層構造栽培では、比較実験区の底面給水に比べて根の褐変化が抑制され、多収であった。

5. 理想の底面給水栽培に関する考察

積層培地における栽培では、培地の解体調査の結果、5層の弱遮根シートの上面に根の展開が認められ、これまで底面給水栽培では見られなかったルートマットの階層化が求められた(図10)。

前にも述べたが、底面給水は一定の水分制限を植物体に与えることで収穫物の高糖度化等の品質のコントロールが可能になる点で優位であるが、その反面、樹勢を支える根の展開・分布を限定してしまうリスクがある。

特に培地量の少ないNSPでは、その傾向が顕著に表れるが、根に対する酸素供給を考えた場合は培地量が少ない点がメリットになる場合があることがわかった。



図10 積層培地の根の分布(点線部分)

これまでの実験結果からは、砂を用いた底面給水式栽培における根の成長および維持には、養液供給だけでなく酸素の供給が重要であることが示唆された。NSPは、培地を支える透水遮根シートおよび給水布をハンモック様に懸架することでルートマットが成長する培地の底面の真下に空間を設け培地への酸素供給を実現し、根の活性低下を抑制できたと推定した。

積層実験では、根の垂直方向の進展を制限する弱遮根シートに根の展開を見たが、ここでも同様の「根の集中部位の下には必ず気相がある」という観察結果を得た。

以上の結果考察を総合すると、底面給水の理想の実施形

態のひとつは、①砂培地で特徴的な高い揚水性能による養液供給と、②培地下への液肥槽からの速やかな液肥・酸素の補給であり、NSPはそれを具現化したものである(図11)。

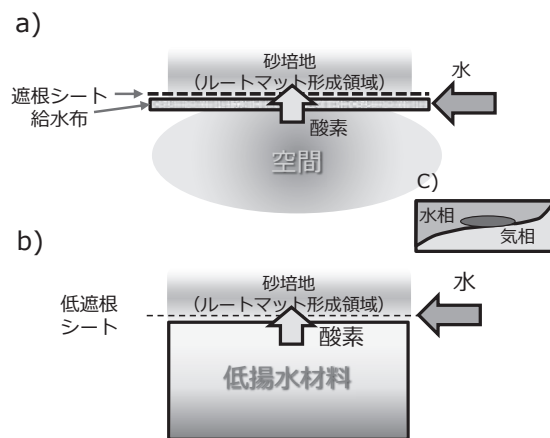


図11 理想的な底面給水栽培の例、模式図
a) NSPの底部、b) 積層構造の積層面、c) 共通する環境状態

6. 栽培支援システム

最後に、現在我々が開発を進めている、サンドポニックスを用いた栽培支援システムについて紹介する。

NSPは砂培地と水位差で制御する底面給水式栽培装置であり、太陽光利用型の農業では唯一制御可能な環境条件である、養液吸収の量をリアルタイムで測定・管理できる栽培装置・方法である。

現在、当社はこの利点を活かし野菜収穫を質・量の両面から最大限の結果をもたらす農業支援システムの開発を進めている。

具体的には、図12に示すような栽培現場からの植物栽培状況の定量データから、最大限の収穫結果を導き出す栽培レシピを出力可能な情報処理システム体系である。

現在、千葉および大阪で栽培中のトマトの装置・環境・作業の進捗を集中サーバーに取り込み・解析による栽培レ

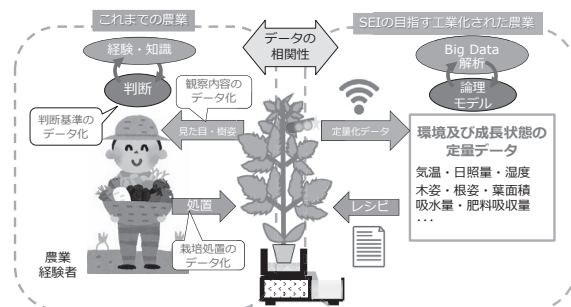


図12 IoT活用による農業生産支援システム

シピ作成とその効果の検証について検討している。

小規模な特定環境の例ながら、これまでの解析の成果として、①液肥濃度調整による高糖度化、②同pH調整による収量増、③給水システムの変更による収量増、が挙げられており、千葉植物工場温室におけるトマト栽培では、周年目標(図13)と掲げている、糖度6以上収量22.5トン/10aが達成可能な条件を明らかにした(表3)。

表3 トマトのレシピ栽培例

栽培区	目標値	比較			
		ロックワール点滴栽培	液肥高濃度化1.2倍	pH調整 使用井水 pH5→6.5	点滴補助 8%点滴 給水補助
夏期収穫量 (ton/10a)	10	11.1	9.8	7.5	10.5
周年収量 (積算、ton/10a)	22.5	23.6	22.3	20.0	23
平均糖度	6以上	5	5.8	6.6	6.2

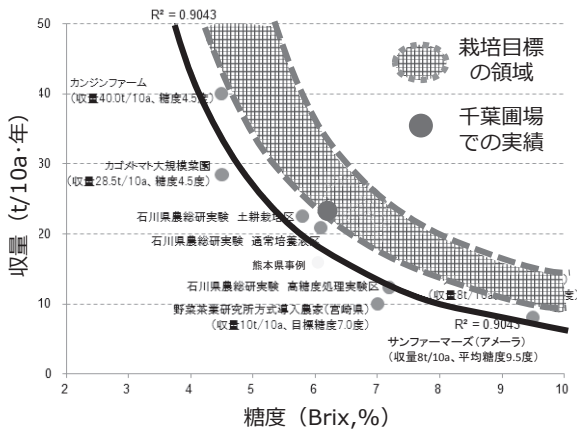


図13 一般トマト栽培と当社栽培目標、実績⁽⁸⁾

今後は、様々な環境に対応可能な農業生産支援システムを確立すべく栽培地拡大を進めるとともに、数年後を目処にさらなるノウハウの蓄積を進めるモニター栽培システムの実用化を目指している。

7. 結 言

NSPは根圏の安定した成長制御にフォーカスした新しい養液栽培装置である。その特長である、高いメンテナンス性と高品質・高収量で安定した生産性は、①少量の砂培地、②養液伝達能に優れた応答を示す給水布、さらに③根の呼吸を促進する高気相構造に支えられている。

植物の根は人の腸に例えられることがある。我々の健康が腸内環境を整えることが基本となるのと同様に、根圏環境の制御が植物の健全な生育を支え、最終的な収穫結果を

生む重要な技術であることは間違いない。

当社の目指す農業事業は、情報化社会における農業の在り方を模索することから始まり、農業の工業化をキーワードに、基幹事業で培った工業製品の安定生産の技術から改めて農業を見直す検討を進めるものである。

今後ともサンドポニックスを軸に、工業生産の観点から栽培情報の可視化・定量化と、栽培の制御技術のIoT化による、農業生産の安定化を目指して検討を続けていく。

8. 謝 辞

本稿執筆に当たり、ご指導・ご助言いただきました農研機構・中野明正先生に深く感謝します。

用語集

※1 飽差

環境の乾燥しやすさを表す指標で、空気1m³にあとどれくらい水蒸気が入るかを水の質量で表した物理量(g/m³)。飽和水蒸気量×(100-湿度)/100で計算できる。

※2 ルートマット

平面に層状に積み重なって根が形成された状態(マット状)、あるいはその根。水のある下に向かう根の生育は遮根シートで遮られてそれ以下には向かえないため、根の成長が続くと遮根シートの上面に折り重なってルートマットが形成される。

- ・サンドポニックス、Sandponics、ニューサンドポニックスは、住友電気工業(株)の商標です。
- ・桃太郎ヨークは、タキイ種苗(株)の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 北川一栄ら、「情報時代の農業—農業はどう変わるか」、創元新書(1971)
- (2) 鈴木木夫、「植物の砂栽培システムに関する研究」、東京大学博士論文(1988)
- (3) 馬場将人ら、「新型サンドポニックスによる工業的作物生産」、SEIテクニカルレビュー第186号、pp.98-101 (Jun. 2015)
- (4) 宮崎毅ら、「土壌物理学」、朝倉書店(2005)
- (5) 藤巻晴行 他、「低圧力水頭領域における不飽和透水係数推定のための定常蒸発方の砂丘への適用」、日本砂丘学会誌、Vol.46、No.1、pp15-26 (1999)
- (6) 住友電気工業(株)、国立大学法人千葉大学、プレスリリース (July. 2014) http://www.sei.co.jp/news/press/14/prs067_s.html
- (7) 大木三男 他、「毛管水耕法利用によるトマト栽培について」、信州大学繊維学部附属農場研究報告 Vol.15、pp55-61 (1994)
- (8) 中野明正、「施設園芸・植物工場と野菜品質機能の向上技術」、施設と園芸、173、pp10-15 (2016)より改編

執筆者

金澤 進一* : 新領域技術研究所



松尾圭一郎 : 新領域技術研究所



馬場 将人 : 新領域技術研究所
博士(理学)



三須 英幸 : 新領域技術研究所



池口 直樹 : 新領域技術研究所 研究室長



*主執筆者