

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「発酵基盤技術を活用した完全制御有機型植物工場の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 学校法人立命館

もくじ

第1章 研究開発の概要	2
第2章 本論	5
1. 土壌および養液環境制御技術の定量化（学校法人立命館 立命館大学、株式会社 キャリアネットワーク京都）	5
2. 発酵系育成資材の研究開発（株式会社キャリアネットワーク京都、学校法人立命 館 立命館大学）	15
3. 制御光源による発酵系育成資材効果の定量化（株式会社キャリアネットワーク京 都、国立大学法人京都大学）	21
4. 光合成反応に最適化した光源を用いた完全制御型植物工場システム（国立大学法 人京都大学、エスベックミック株式会社）	29
5. 多品目栽培対応型植物工場モジュールの開発（エスベックミック株式会社、国立 大学法人京都大学、株式会社キャリアネットワーク京都）	32
6. 工場生産野菜の定量的評価と有機品質確立（学校法人立命館）	34
7. 工場運営・管理システムの構築（株式会社キャリアネットワーク京都）	42
参考資料	50

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

昨今の輸入野菜の農薬問題、国内での農産物偽装問題など、われわれの生命維持に不可欠な食の安全・安心がおおきく揺らいでいる。一方で、日本国内の食料供給の重要な役割を担う、一次産業従事者である農業生産者は年々減少の一途をたどっており、このままでは国内において安全・安心な食料を継続して供給することすら危機的な状況にある。

このような中で、安全・安心な食料生産システムの構築を目的として、収益性が従来比1.5倍以上の高生産完全制御有機型植物工場を開発する。

1-2 研究体制

(1) 管理員及び研究員

【事業管理者】 学校法人立命館 立命館大学

①管理員

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
馬渡 明	立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス 課長	⑧
三ツ野 直樹	立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス 課長補佐	⑧
松田 文雄	立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス 文部科学省産学官連携コーディネーター	⑧
西川 智子	立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス	⑧

②研究員

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
久保 幹	立命館大学 生命科学部 教授	①、②、⑥
松宮 芳樹	立命館大学 生命科学部 助教	①、②、⑥
久保田 謙三	立命館大学 生命科学部 助手	①、②、⑥
津田 治敏	立命館大学 グローバルイノベーション研究機構 博士研究員	①、②、⑥
松野 敏英	立命館大学 グローバルイノベーション研究機構 博士研究員	①、②、⑥

〔再委託先〕

国立大学法人 京都大学

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
清水 浩	京都大学 大学院 農学部研究科 教授	③、④、⑤

株式会社キャリアネットワーク京都

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
元田 武彦	代表取締役	①、②、③、⑤、⑦
近藤 充正	開発部 開発部長	①、②、③、⑤、⑦
小林 隆之	開発部 主任研究員	①、②、③、⑤、⑦
山口 利一	開発部 主任研究員	①、②、③、⑤、⑦

エスベックミック株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
中村謙治	環境モニタリング事業部 部長	④、⑤
高屋和弘	環境モニタリング事業部 開発グループ 課長	④、⑤
新実 薫	環境モニタリング事業部 開発グループ 研究員	④、⑤

(2) 委託期間

開始 平成 21 年 10 月 29 日

終了 平成 22 年 3 月 31 日

1-3 成果概要

①土壌および養液環境制御技術の定量化

高レベルの微生物活性を保持する有機土壌および高品質堆肥の新規作成方法を開発し、特許を 2 件出願した。(特願 2010-53759、特願 2010-53617)。

今後、イチゴの糖度や酸度に及ぼす有機土壌の影響を測定し、より高品質の青果物を生産できるように改良していくことが必要である。

②発酵系育成資材の研究開発

植物活性資材を大まかに3分類し比較テストを行ったところ、イチゴのおいしさのバロメーターの糖度に関して有意差がみられる傾向を示した。

今後の課題としては、植物活性資材の効果的な使用時期の検証を行う必要があると考える。

③制御光源による発酵系育成資材効果の定量化

フィールドで効果が確認されている育成資材を用いて制御光源下でイチゴの栽培を行ったが苗の成長・結実共に明確な効果は確認できなかったため、効果が出せる条件を検討中である。

④光合成反応に最適化した光源を用いた完全制御型植物工場システム

LED光源を試作してイチゴへの照射実験を行い、R成分を比較的多く含むRとBの組み合わせの光質で高い光合成速度が得られることが判明した。

今後は収量や品質、RGBの組合せによる光質の影響、光源の省エネ効果、効果的な照射方法などについて検討を行なう予定である。

⑤多品目栽培対応型植物工場モジュールの開発

立命館大内と京都大学内にコンテナ型の植物工場を設計、試作し、人工光下でのイチゴの着果を確認することができ、人工光下での栽培が行えることが確認できた。

今後は、受粉と灌水の自動化が課題である。

⑥工場生産野菜の定量的評価と有機品質確立

有機品質を保証するための基準値を設定するにあたり、先行研究を調べた結果、野菜中の抗酸化物質を測定することによって有機農産物の品質保証に繋がることが明らかになった。

本研究ではイチゴ中の抗酸化物質を測定する事になるが、試料中にビタミンが多く含まれるため、今後は、ビタミンに由来する抗酸化力価を排除した測定方法を実施していく。

⑦工場運営・管理システムの構築

完全制御有機型植物工場を合理的・効率的に稼働する運営管理マニュアルを策定するため、モデルとしてイチゴ高設栽培システムと循環式水耕栽培システムの調査を行った。

⑧本事業・プロジェクトの管理・運営

本プロジェクトの管理運営を実施するとともに、3回の事業推進委員会を開催した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス
文部科学省産学官連携コーディネーター
松田 文雄
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
TEL 077-561-2802 FAX 077-561-2811
E-mail bma22013@se.ritsumei.ac.jp

第2章 本論

1. 土壌および養液環境制御技術の定量化（学校法人立命館 立命館大学、株式会社 キャリアネットワーク京都）

<目標・研究開発方法>

従来の有機農法は、主に経験に頼り有機物を利用する農法である。これは、有機肥料である堆肥などの肥料効果が正確に測定出来ないためと考えられる。そこで、本研究では有機肥料の肥効を正確に把握するため、微生物と栄養素の比率に着目した。具体的には、有機物を投入したのち速やかに無機物（肥料成分）に転換できる微生物活性を保持した農地土壌の開発である。ここで得られた知見は露地での有機栽培の安定生産に寄与するだけでなく、土壌を培地に用いる新たな植物工場の創成につながるであろう。開発に当たり、土壌中のバクテリア量、物質循環活性の定量的な診断に基づき土壌を評価し、植物工場での使用に耐えうる再現性を有し、かつ再生可能な土壌を開発する。

一方、投入するバイオマス資材（基本的には堆肥）においても、同様の診断を経て、効率良く N（窒素）、P（リン）、K（カリウム）等を供給できるバイオマス資材を開発する。その際、微生物コントロールや熱処理等により、病害虫・植物病原菌フリーな有機肥料の開発を行う。

<成果と課題の要約>

高レベルの微生物活性を保持する有機土壌の作製方法を開発した。これは赤玉土とピートモスを 7:3（体積比）で混合した基本培地に、馬糞堆肥をイチゴの施肥基準を満たすように添加する方法である。この土壌を用いて植物工場内にてイチゴ栽培を行ったところ、病害虫による被害も殆ど起こらずに順調に生育し、着果も良好である。

今後の課題は、着果数と青果物の品質に及ぼす有機土壌の影響を調査することが必要であり、これには、より長い試験期間が必要である。

<成果>

【背景】

化学合成技術の発展により、戦後、化学肥料を用いた農法が広く行われてきた。しかし、消費者の安全・安心な農作物に対する要望の高まりや、持続可能な農業生産のため、有機農法や自然農法への転換が各地で進められている。一般に有機農法では化学肥料を用いず、堆肥などの有機肥料を用いる。

堆肥中の肥料成分には、植物が直接吸収可能な形態（肥効が速効性である）、及び土壌微生物の分解作用によって植物が吸収可能となる形態（肥効が緩効性である）が存在する。植物に即効性を示す堆肥中の肥料成分は、硝酸態窒素、水溶性リン酸および水溶性カリウムであり、緩効性の肥料成分は、有機態窒素、可給態リン酸、有機態リン酸、交換性カリウム、固定カリウムであ

る。このような緩効性の肥料成分が植物に吸収されるためには、土壤微生物による分解作用が不可欠である。

これまでに、微生物を使用して大豆粕の高分子タンパク質を低分子化することで、植物が吸収可能になり、根毛増殖作用を有する植物成長促進物質として使用できることが明らかになっている¹。また、大豆ホエーをアルカリプロテアーゼで加水分解したペプチドを有効成分とする植物生長促進剤が報告されている²。これらのことから、有機肥料を使用するに当たっては、土壤中の微生物の存在が重要であることが分かる。

有機物を大量に含む有機肥料を植物が吸収できる無機体に分解する役割を微生物が担っているが、有機肥料中の微生物数および微生物種を科学的に解析した結果に基づいた有機農法のための土壤調製法も存在していない。

本研究は、微生物数を高レベルで維持でき、有機肥料を効率良く利用できる土壤の作製方法、及び当該方法により作製された土壤を使用する植物工場における植物栽培システムを提供することを目的とする。更に、微生物数を高レベルで維持でき、有機肥料を効率良く利用できる土壤についての診断方法の確立を目的とする。有機農法において有機物の無機化、すなわち緩効性肥料効果には微生物が重要な役割を担っている。これまでに水圏において微生物増殖を促進させる指標としてレッドフィールド比 (CNP 比が 106:16:1 (モル比)) が報告されているが、土壤における同様の指標は不明である。そこで、実際の農地土壤における CNP 比と微生物数との関係を調査した。得られた知見を基に、赤玉土およびピートモス等に堆肥を混合し、土壤中の微生物数および叢が高レベルで維持される CNP 比および量を検討し、最適 CNP 比を検討した。

[方法]

1. 微生物数の測定方法³

Slow-stirring 法を用いた。

2. 窒素の定量方法

2. 1. 無機態窒素抽出法

- (1) 試料 2.0 g を遠心チューブに量り取り、1.0 M KCl 溶液 20 ml を加え、100 rpm で 60 分間振とうした。
- (2) 10,000 rpm で 5 分間遠心し、得られた上澄液を無機態窒素抽出液として以下の実験に供した。

2. 2. 無機態窒素の定量

A. アンモニア態窒素の定量

インドフェノール青法を用いた。

B. 亜硝酸態窒素の定量

ナフチルエチレンジアミン法を用いた。

C. 硝酸態窒素の定量

ブルシン・スルファニル酸法を用いた。

2. 3. 可給態窒素の定量

土壌 10 g にリン酸緩衝液 (pH7.0) を 50 ml 加え、30 分間 100 rpm で振とうした。遠心後 (3000G、10 分間) 上澄液に含まれる窒素濃度を全窒素測定機 (Shimazu) を用いて測定し、可給態窒素の定量を行った。

2. 4. 全窒素の定量

ペルオキシ二硫酸カリウム法を用いた。

3. リン酸 (P_2O_5) の定量方法

3. 1. 水溶性リン酸 (P_2O_5) の定量

(1) 試料 1.0 g に 200 ml の蒸留水を加え、165 rpm で 30 分間振とうした。

(2) 試料溶液 2.0 ml を 10000 rpm で 5 分間遠心分離し、上澄液に含まれるリン酸量をモリブデン青法を用いて測定した。

3. 2. 可給態リン酸 (P_2O_5) の定量 (トルオーグ法)

トルオーグ法を用いた。

3. 3. 全リン酸 (P_2O_5) の定量

過塩素酸法を用いた。

4. カリウムの定量方法

4. 1. 水溶性カリウムの定量

(1) 試料 1.0 g に 20 ml の蒸留水を加え、100 rpm で 1.5 時間振とうした。

(2) 10000 rpm で 5 分間遠心分離し、上澄液を 1 M 硝酸で適宜希釈し原子吸光光度計で測定した。

4. 2. 交換性カリウムの定量

(1) 試料 1.0 g に 20 ml の 1 M 酢酸アンモニウム水溶液を加え、100 rpm で 1.5 時間振とうした。

(2) 10000 rpm で 5 分間遠心分離し、上澄液を 1 M 硝酸で適宜希釈し原子吸光光度計で測定した。

4. 3. 全カリウムの定量

過塩素酸法を用いた。

5. 全炭素量

土壌適当量を全炭素測定機 (Shimazu) に供し、測定した。

6. 窒素循環活性

供試土壌の含水量を調整するために、水田土壌および畑土壌はそれぞれ最大保水量の 100% および 60% の含水率に調整した。これらの土壌にアンモニア態窒素として硫酸アンモニウム水溶液あるいは亜硝酸態窒素として亜硝酸カリウム水溶液を終濃度が $60 \mu\text{g-N/g-soil}$ になるように添加し、25°C で 4 日間静置した。添加したアンモニア態窒素および亜硝酸態窒素の減少率からアンモニア酸化活性および亜硝酸酸化活性を見積もった。土壌中に含まれる無機態窒素含有量を測定するために、土壌 2.0 g と 1.0 M KCl 溶液 20 ml を混和 (100 rpm、室温、60 分間) した後、遠心

分離 (10,000 rpm、室温、5 分間) した。この上清に含まれるアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素の定量はそれぞれインドフェノール青法、ナフチルエチレンジアミン法およびブルシン・スルファニル酸法に従い行った。

7. 土壌の採取

滋賀県草津市近郊における農地土壌を採取した。採取した土壌中の炭素、窒素、リン酸およびカリウムの濃度を測定した。また、採取した土壌の CNP 比を無機塩あるいは堆肥を添加することによって一定の CNP 比を作り出し、この土壌中の細菌数の経時変化を解析した。

8. 植物工場用土壌の作製

赤玉土およびピートモスを 7:3 の比率で混合したものを基本培地とし、植物栄養素の含有量を測定した。さらに馬糞堆肥の植物栄養素含有量を測定し、イチゴ栽培の基準施肥量を参考に馬糞堆肥 (栗東有機、滋賀県) の添加量を決定した。

9. 栽培試験

植物工場内にてイチゴを栽培した。用いた植物工場には、4 列の棚 (2 段×3、3 段×1) があり、1 段にはワグネルポットが約 30 個並べる事が出来る。照明には蛍光灯を用いた。栽培条件は 12h,23°C/12h,12°C (明/暗) とし、湿度は 60~70%を保った。水やりは適宜行った。受粉にはクロマルハナバチを用いた。イチゴは章姫と宝交早生を用いた。

【結果】

高い細菌数を維持出来る土壌の CNP 比

滋賀県草津市周辺の水田と畑の土壌および堆肥の全 CNP 比と総バクテリア数の定量解析を行った(表 1)。殆どの土壌で 2.5×10^8 cells/g 以上の細菌数が確認されたが、リン酸が検出出来なかった土壌では細菌数も検出限界以下となった。その他の土壌ではリン酸の比率は炭素を 100 とした場合に 1~20 の範囲にあった。以上のことからリン酸は細菌数の向上に必須であり、リン酸の比率が炭素を 100 とした場合に 1~20 の範囲にある場合には高い微生物数 (2.5×10^8 cells/g 以上) が得られる傾向が見られた。

堆肥を添加した時の土壌の全 CNP 比と総バクテリア数の定量解析を行った(図 1、表 2)。殆どの土壌で高い微生物数が得られたが、窒素の比率が炭素を 100 とした場合に 40 を示した土壌では、最も微生物数が低くなっていた。また、リン酸については、リン酸の比率が炭素を 100 とした場合に 0.01 であっても、窒素の比率が 0.1 のものは、高い微生物数を示していた。いずれの土壌においても微生物数は 30 日後でも高い水準を示しており、一時的な増加ではないと考えられた。これらの結果から、窒素濃度が高ければ、微生物数を低下させる影響があることが示唆された。以上の結果から高い微生物数が得られる最適な CNP 比は 100 : 0.1~18 : 0.01~8 の範囲とした。さらに上記の CNP 比範囲 (100 : [0.1~18] : [0.01~17]) であれば 1×10^9 cells/g 以上の微生物数が維持できることが分かった。

表 1 種々の土壌における全 CNP 比と採取時の総バクテリア数

全 CNP 比			総バクテリア数 ($\times 10^8$ cells/g)
C	N	P	
100	13	0	-
100	0.1	2.5	2.5
100	0.08	20	5
100	13	11	5.2
100	0.02	15	8
100	0.3	7	10
100	0.1	1.9	11
100	0.04	14	13
100	0.3	1.3	14
100	0.03	17	16
100	13	8	17
100	0.04	16	21
100	0.2	1.7	24

一: 検出限界 (10^7 cells/g)以下

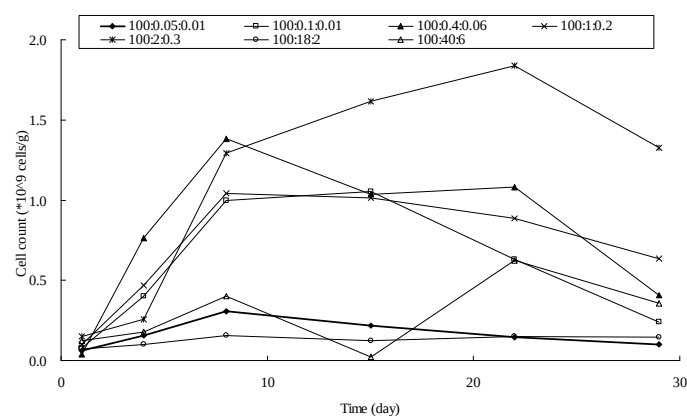


図 1. 種々の CNP 比を有する土壌における細菌数の経時変化

植物工場用の土壌の作製

赤玉土およびピートモスを 7:3 の比率で混合したものを基本培地とし、植物栄養素の含有量を測定した(表 2)。その結果、基本培地中からはリン酸が検出出来ないことがわかった。また、微生物数も検出限界以下であった。馬糞堆肥の植物栄養素含有量を測定した結果、全 CNP 比は 100:13:11 であった。このことから、堆肥中では高い微生物数が維持されていることが示唆された。

植物工場用土壌の作製を目的として基本培地と馬糞堆肥の混合土壌をイチゴ栽培の基準施肥量を参考にして作製した(表 3)。当該土壌のリン酸およびカリウム濃度は基準施肥量を超えるものの、過剰障害がでるほどではないと判断した。

表 2 ピートモスと赤玉土を 3:7 で混合した基礎土壌および馬糞堆肥が含む栄養成分

		基本培地	堆肥
アンモニア態窒素	(mg/g)	0.00098	0.041
亜硝酸態窒素	(mg/g)	0	0
硝酸態窒素	(mg/g)	0.0013	0.45
可給態窒素	(mg/g)	0.99	3.8
全窒素	(mg/g)	2.92	14.7
水溶性リン酸	(mg-P ₂ O ₅ /g)	0	3.5
可給態リン酸	(mg-P ₂ O ₅ /g)	0	5.7
全リン酸	(mg-P ₂ O ₅ /g)	0	12.5
水溶性カリウム	(mg-K/g)	0.116	27
交換態カリウム	(mg-K/g)	0.079	8.6
全カリウム	(mg-K/g)	4.39	35.5
全炭素	(mg/g)	21.8	114
微生物数	(億個/g)	検出限界以下	5.2
全 CNPK 比		100:13:0:20	100:13:11:31
水溶性 NPK 比		1:0:100	1:8:50

表 3 堆肥添加土壌が含む栄養成分

		基礎土壌	堆肥	堆肥添加土壌	施肥基準※
アンモニア態窒素	(mg/g-sample)	0.822	18.1	19	
亜硝酸態窒素	(mg/g-sample)	0.00	0.00	0.00	
硝酸態窒素	(mg/g-sample)	1.06	199	200	200
可給態窒素	(mg/g-sample)	826	1680	826	
全窒素	(mg/g-sample)	2448	6507	8955	
水溶性 P	(mg-P₂O₅/g-sample)	0	1547	1547	200
可給態 P	(mg-P ₂ O ₅ /g-sample)	0	2519	2519	
全 P	(mg-P ₂ O ₅ /g-sample)	0	5525	5525	
水溶性カリウム	(mg-K/g-sample)	96.97	11934	12031	200
交換態カリウム	(mg-K/g-sample)	65.84	3801	3867	
全カリウム	(mg-K/g-sample)	3675	15691	19366	
全炭素 (TC)	(mg/g-sample)	18288	50388	68676	
CNPk 比		100:0.3:18:18			

※ 奈良県農業試験場が推奨する圃場への施肥基準値を参考に算出した 1 ワグネルポット当たりの量

栽培試験

現在までに作製土壌を用いて、イチゴの栽培を約 10 週間行っている。植物工場の建設が終了したのが 12 月下旬頃であったため、当初の予定よりも栽培期間が少なくなっている。また、今回の植物工場は試作器であったこともあり、水漏れや、照明コントロール基盤の電気系統トラブルが発生した。これらの故障は現在すべからく解決し、順調に運転出来ている。摘果を目的としたイチゴ栽培は 25 週間から 40 週間かかるのが通例である。今回は収量を議論出来るほどの結果は得られなかったが、今後研究期間を延長することで、露地栽培や促成栽培と比肩しうる生産性を達成出来ると手応えを感じている。

土壌の作製に当たり、赤玉土とピートモスを混合した基本培地と馬糞堆肥を混合させたが、馬糞堆肥中には稲ワラに由来する繊維 (10cm 程度) および馬糞に由来する団粒 (直径 5cm 程度) が存在した。このため、馬糞堆肥と基本培地の均一な混合が困難であった。そこで、あらかじめ堆肥を十分に解す作業が必要であった。しかしながら、作製土壌の不均一さはある種の空気循環を促し、根系への通気確保に役立つという予期せぬ好影響が現れていたかもしれない。

作製した土壌における宝交早生と章姫との生育性を比べると章姫の方が早かった (図 2,3)。花芽の生長も速いため、今後は章姫を使うのが良いであろう。宝交早生は古くから研究がされてお

り、多くの知見が容易に入手しやすいため当該研究のような新たなイチゴ栽培技術を確立する研究には必要である。しかしながら、商業的なコストを考えると、章姫の方が見栄えも良く、収量も宝交早生より多い。作製土壌では重篤な病虫害は発生しなかった。ワグネルポットを用いるよりも通常のプランター様の鉢で生育させる方が良い。ワグネルポットの底部において作製土壌の腐敗が散見された。その理由としてワグネルポットは底部に水を溜める仕組みになっており、底部の湿度が上昇し、堆肥中の未分解成分の腐敗が進んだことが考えられた。今後は堆肥の熟成程度をこれまで以上に厳密にし、栽培鉢も水はけの良いものを選ぶなどの工夫が必要である。

現在、植物工場内において、章姫からランナーを派生させ、子株を得ている(図4)。これらの子株を用いて、ウイルス発生に対する知見を集めることが今後の植物工場を運用するに当たっては重要なことである。すなわち、農業生産の現場では栽培ごとにウイルスフリー株を購入しているが、本植物工場におけるウイルス発生頻度が低ければ、非常に有利な点となり得る。

受粉に関しては、当初は人工的に綿毛を用いて行っていたが、労力的な問題と、奇形果が発生するという問題があったため、クロマルハナバチを購入し、植物工場内にて飼育した(図5)。自然光ではないため、ハチの飛行能力に疑問があったが、実際には問題ではなかった。また、イチゴの花数が少ないため、餓死することが危惧されたが、市販の花粉をエサとして巣箱に入れてやることで解決した。受粉能力はミツバチよりも劣るが、おとなしいハチのため、狭い植物工場内で用いるにはミツバチよりも安全性が高いと判断した。



図2 宝交早生



図3 章姫



図4 章姫の子株



図5 クロマルハナバチによる受粉の様子

【まとめ】

【有機栽培のための土壌作製】

本研究での土壌の作製方法は、(1) 基本培地の全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比を測定し、(2) 基本培地に対して、全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比が植物生長を促進するものがあり、なおかつ微生物活性を高く維持することが出来る比率 (レッドフィールド比、100:10:1) に近づけるように堆肥を添加するものである。

作製概念

本研究において、基本培地として赤玉土とピートモスの混合物を用いているが、基本培地の種類は、いずれの土壌であっても良いと考えている。例えば、水田、畑、牧場、果樹園、森林、花壇等の土壌であっても、成分組成を明らかにし、微生物活性が高くなるように有機肥料を添加することで有機農法に使用可能な土壌が作製できると考えている。

作製方法

土壌中の全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比が上記範囲を満たすことで微生物数を高レベル(望ましくは 2×10^8 cell/g 以上)で維持でき、有機物が効率よく植物が利用できる形態に変換されるので、有機肥料を効率良く利用することが可能となる。全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比は、理想的には 100:10:1 であり、この比率に近づける事が微生物の成育に適した土壌の作製において肝要である。更に、全リン酸に対する全窒素の重量比を 0.1 以上、特に 1~20 とするように添加することが好ましい。このような範囲とすることで高レベルの微生物数を維持出来ると考えられる。

基本培地に堆肥を添加することは有機土壌を作製できるため好ましい。本研究では馬糞堆肥を用いたが、実際には、バーク堆肥などの植物堆肥、馬糞堆肥、鶏糞堆肥、牛糞堆肥、豚糞堆肥などの家畜堆肥、海藻堆肥などでも、成分組成を明らかにし、微生物活性が高く維持出来るような CNP 比にすることが肝要である。

全炭素が不足している場合は、全窒素及び全リン酸と比べて全炭素の含有量が多い副原料を添加することが望ましく、そのような副原料としては例えば、稻ワラ、籾殻などが挙げられる。全窒素が不足している場合は、全炭素及び全リン酸と比べて全窒素の含有量が多い副原料を添加することが望ましく、そのような副原料としては例えば、大豆カス、魚粉などが挙げられる。全リン酸が不足している場合は、全炭素及び全窒素と比べて全リン酸の含有量が多い副原料を添加することが望ましく、そのような副原料としては例えば、活性汚泥炭化物などが挙げられる。

本研究の操作としては、例えば、原料土壌と副原料のそれぞれの全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比を計測した後に、原料土壌と副原料を混合した後の全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比が上記比率に近いものとなるような混合比を求めて、当該混合比で原料土壌に副原料を添加して土壌を作製できる。

土壌中の全炭素、全窒素及び全リン酸の重量比が上記範囲を満たすことで、土壌中の微生物数は植物の生育に適した理想的な数である 2×10^8 cell/g 以上、好ましくは 1×10^9 cell/g 以上で維持できる。

上記土壌中の微生物数は、対象土壌から採取した試料単位重量あたりに存在する DNA 量に基づいて求めることができる。単位重量が 1g である場合、その数は、対象土壌 (又は試料) 単位重量あたりの数 (cells/g-soil 又は cells/g-sample) の単位で表すことができる。なお、ここでいう DNA 量とは、対象土壌から採取した試料単位重量あたりに存在する DNA の量を示す。土壌バクテリア数は、対象土壌から採取した試料単位重量あたりに存在する DNA 量を、適当な手法で換算することにより求めることができる。例えば、顕微鏡等の測定手段を用いて、予め土壌中の土壌バクテリアの数と DNA 量との相関関係を求めておき、採取した試料から測定された DNA 量を該相関関係に照合することによって求めることができる。

本発明により作製した土壌は、農作物、観賞用植物、牧草、木材などを育てるための土壌として使用できる。

本研究で得られた CNP 比を指標の一つとして用いることで、再現性のある有機農法が可能となり、有機農産物の安定供給に寄与することができる。その結果、化学農法から有機農法への移行が容易になり付加価値の高い農産物を生産することが可能になる。

[植物栽培]

本研究では上記の方法により作製された土壌で植物を植物工場内で栽培した。

現在の植物工場における植物の栽培は養液栽培を主流とするものであるが、本発明の土壌を使用することで、植物工場においても植物生長が良好となり、再現性のある有機農法が可能となる。

ここで植物工場とは、温度、湿度、光などを人工的に調整、制御しながら、閉鎖的又は半閉鎖的な空間内で植物栽培を行う施設であり、本発明における植物工場の光源・空調等の設備は公知のものを使用することができる。上記土壌を使用することを除く本発明の植物栽培システムにおける植物の栽培方法等(光量、温度や湿度条件等)は、通常の方法で行うことができる。

現在までに作製土壌を用いて、イチゴの栽培を約 10 週間行っている。今回は収量を議論出来るほどの結果は得られなかったが、今後研究期間を延長することで、露地栽培や促成栽培と比肩しうる生産性を達成出来ると手応えを感じている。

有機土壌の作製

土壌の作製に当たり、赤玉土とピートモスを混合した基本培地と馬糞堆肥を混合させたが、馬糞堆肥中には稲ワラに由来する繊維 (10cm 程度) および馬糞に由来する団粒 (直径 5cm 程度) が存在した。このため、馬糞堆肥と基本培地の均一な混合が困難であった。そこで、あらかじめ堆肥を十分に解す作業が必要であった。しかしながら、作製土壌の不均一さはある種の空気循環を促し、根系への通気確保に役立つという予期せぬ好影響が現れていたかもしれない。

イチゴの生長

作製した土壌における宝交早生と章姫との生育性を比べると章姫の方が早かった。花芽の生長も速いため、今後は章姫を使うのが良いであろう。章姫は見栄えも良く、収量も多い。作製土壌では重篤な病虫害は発生しなかった。今後は堆肥の熟成程度をこれまで以上に厳密に把握し、

栽培鉢も水はけの良いものを選ぶなどの工夫が必要である。

イチゴの繁殖

現在、植物工場内において、章姫からランナーを派生させ、子株を得ている。これらの子株を用いて、ウイルス発生に対する知見を集めることが今後の植物工場を運用するに当たっては重要なことである。すなわち、農業生産の現場では栽培ごとにウイルスフリー株を購入しているが、本植物工場におけるウイルス発生頻度が低ければ、非常に有利な点となり得る。

イチゴの受粉

受粉に関しては、クロマルハナバチを購入し、植物工場内にて飼育した。自然光ではないため、ハチの飛行能力に疑問があったが、実際には問題ではなかった。また、イチゴの花数が少ないため、餓死することが危惧されたが、市販の花粉をエサとして巣箱に入れてやることで解決した。受粉能力はミツバチよりも劣るが、おとなしいハチのため、狭い植物工場内で用いるにはミツバチよりも安全性が高いと判断した。

【参考文献】

1. Matsumiya Y., Sumiyoshi S., Matsukura T. and Kubo M.: Applied Microbiology and Biotechnology, 77, 37-43 (2007)
2. 特開2006-69917号公報
3. Aoshima H, Kimura A, Shibutani A, Okada C, Matsumiya Y, Kubo M.: Applied Microbiology and Biotechnology, 71, 875-880 (2006)

＜今後の課題＞

有機土壌の作製が完成し、現在イチゴが順調に生育しているが、イチゴの品質を測定出来ていない。通常、農作物において品質と収量を同等の意味を有するため、イチゴの糖度や酸度に及ぼす有機土壌の影響を測定し、より高品質の青果物を生産できるように改良していくことが必要である。これには、収穫試験が数回必要であり、長期間の研究が求められる。

2. 発酵系育成資材の研究開発（株式会社キャリアネットワーク京都、学校法人立命館 立命館大学）

＜目標・研究開発方法＞

以下の3種の植物活性化資材の特徴を定量化して、植物活性化資材の効果的な使用方法を探ることを目的とする。

- ①・DSP（ペプチド）を主成分にする活性化資材
- ②・酵素系：発酵生産物を主成分にする活性化資材
- ③・微生物系：各種微生物を生菌として含む活性化資材

<成果と課題の要約>

植物活性資材を大まかに3分類し比較テストを行ったところ、イチゴのおいしさのバロメーターの糖度に関して有意差がみられる傾向を示した。今後の課題としては、植物活性資材の効果的な使用時期の検証を行う必要があると考える。

また、有意差のあらわれた糖度に関してアミノ酸をほとんど含まない微生物資材系が高い値を示したことは現行栽培の常識であるアミノ酸などの吸収が糖度の上昇につながるという考えだけではないことも示しており、微生物量とイチゴの品質などの関連性も今後の課題として調べる必要があると考える。

<成果>

[方法]

土壌は、有機土壌試験区として馬わら堆肥（以下 012 系と呼ぶ）、および、放線菌堆肥（以下 015 系と呼ぶ）を用いる。また、012 系の対象としてケミカル系を設定し N（窒素）ベースで成分を等量に調整する。活性資材の土壌散布（1 回／週）または葉面散布（1 回／週）を行い、生育の観察と果実の評価を行う（表1、2）。用いた活性資材の成分を表3に示す。

表1 012 系およびケミカル系における活性化資材の散布

土壌	土壌散布	葉面散布
有機土壌 10 区 CN-012	ペプチド	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	酵素系	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	微生物系	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	ブランク	
ケミカル 10 区	ペプチド	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	酵素系	ペプチド
		酵素系
		微生物系

RC-002	微生物系	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	ブランク	

表2 015 系における活性化資材の散布

土壌	土壌散布	葉面散布
有機土壌 10 区 CN-015	ペプチド	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	酵素系	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	微生物系	ペプチド
		酵素系
		微生物系
	ブランク	

表3 活性化資材の成分

	成分	含有量 (μg/ml)		
		DSP	酵素系	微生物系
窒素成分関連	ペプチド・アミノ酸	30000	3900	553
	アンモニア態窒素	2200	2.29	
	亜硝酸態窒素	0	0.107	0
	硝酸態窒素	28.1	1620	0
リン成分関連	全リン酸	30	490	6
カリウム関連	全カリウム	2800	8210	2930
炭素関連	全有機炭素	12800	164000	

【結果】

(1) 活性化資材の土壌散布区

異なる土壌 (012 系土壌、015 系土壌、およびケミカル系土壌) に定植したイチゴ株に対して、活性化資材 (DSP、酵素系、および微生物系) を土壌散布し、イチゴの果数、平均重量、および平均糖度への効果を調査した (表4、図1～3)。

表4 活性化資材の土壌散布の影響

土壌	活性化資材	果数 (個)	平均重量 (g)	平均糖度 (%)
012 系	DSP	28	4.8	9.3
012 系	酵素系	21	4.0	10.8
012 系	微生物系	25	3.8	12.7
015 系	DSP	10	2.8	6.3
015 系	酵素系	8	3.3	8.5
015 系	微生物系	12	5.5	5.8
ケミカル系	DSP	31	6.9	8.2
ケミカル系	酵素系	16	7.0	8.3
ケミカル系	微生物系	19	5.9	11.3

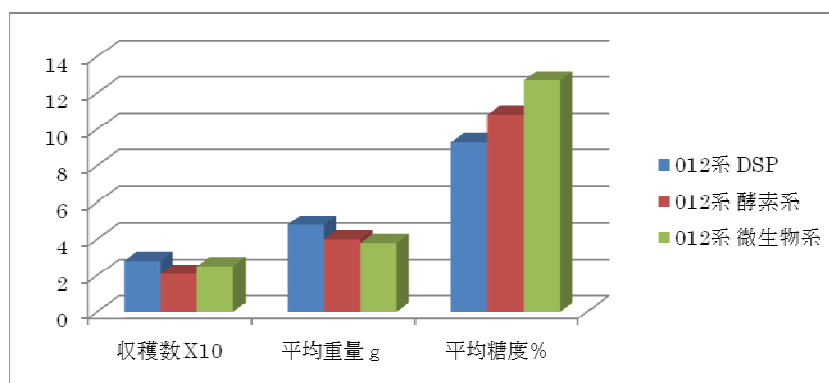


図1 012系における土壌散布の効果

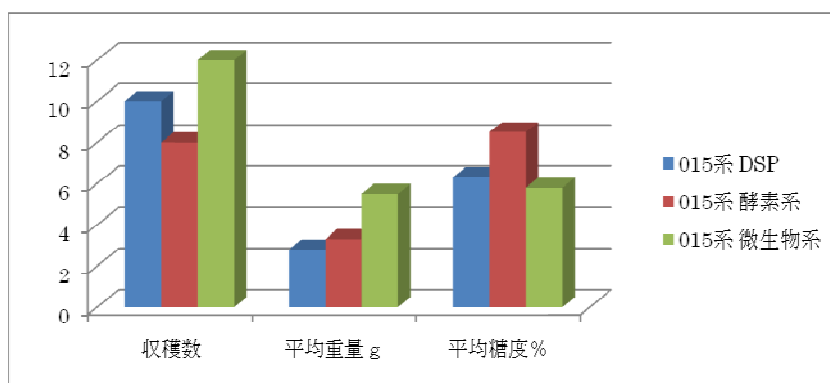


図2 015 系における土壌散布の効果

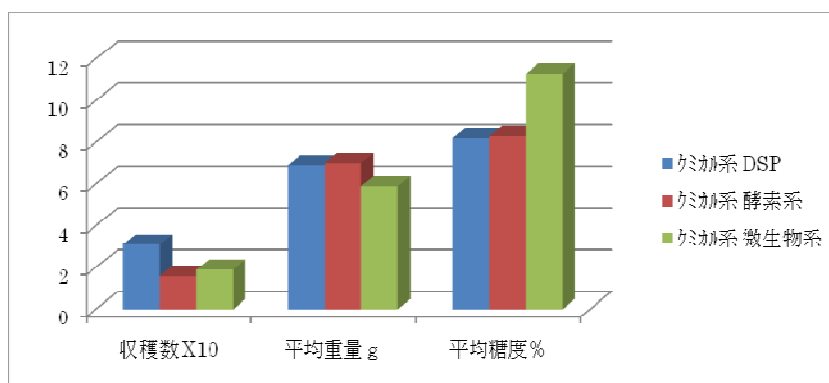


図3 ケミカル系における土壌散布の効果

(2) 活性化資材の葉面散布区

異なる土壌 (012 系土壌、015 系土壌、およびケミカル系土壌) に定植したイチゴ株に対して、活性化資材 (DSP、酵素系、および微生物系) を葉面散布し、イチゴの果数、平均重量、および平均糖度への効果を調査した (表5、図4～6)。

表5 活性化資材の葉面散布の影響

土壌	活性化資材	収穫数 個	平均重 量 g	平均糖 度 %
012 系	プランク	11	5.0	8.5
012 系	DSP	37	4.4	8.9
012 系	酵素	14	3.7	10.6
012 系	微生	23	4.4	13.0
015 系	DSP	13	3.6	6.6
015 系	酵素	6	4.4	6.3
015 系	微生	5	5	7.4
ケミカル系	DSP	28	7.3	7.9
ケミカル系	酵素	17	6.6	9.8
ケミカル系	微生	21	5.8	10.3

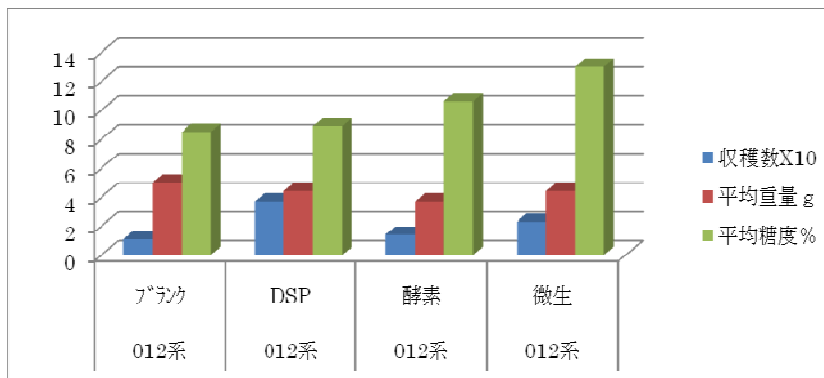


図4 012系における葉面散布の効果

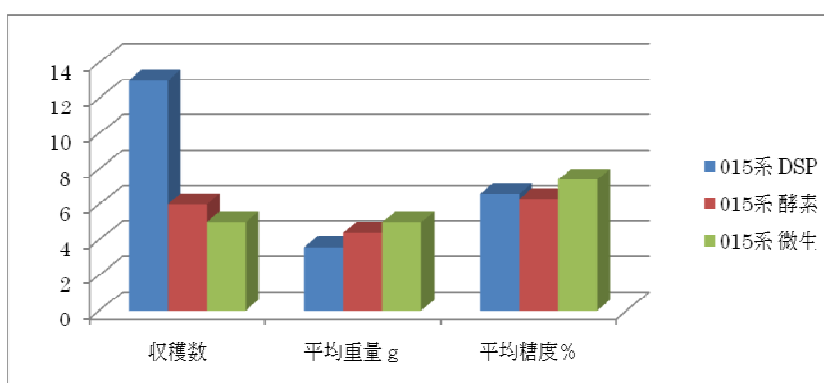


図5 015系における葉面散布の効果

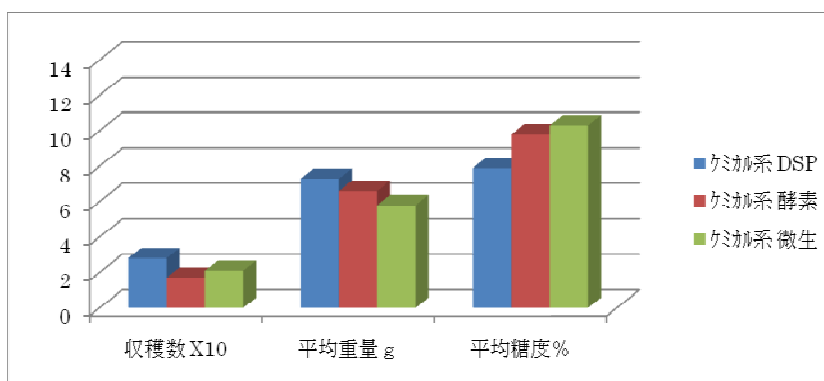


図6 ケミカル系における葉面散布の効果

[まとめ]

各種土壌 (012 系土壌、015 系土壌、およびケミカル系土壌) に定植したイチゴ株に対して、異なる3種の活性化資材 (DSP、酵素系、および微生物系) を土壌散布し、イチゴの果数、平均重量、および平均糖度を調査した。012 系土壌およびケミカル系土壌の果数および平均重量は全ての活性化資材において同等であったが、平均糖度は微生物系の活性化資材で有意差が認められた (表4、図1、3)。015 系土壌では、全てのイチゴ株の生育が極めて不良であった。これは、用いた放線菌堆肥に由来する肥料焼けが原因であると考えられる。このため、活性化資材によるイチゴ果実の良否の程度は比較できず、当該区の結果は参考程度に用いた (図2)。

さらに、活性化資材を葉面散布した効果についても調査した。012 系土壌およびケミカル系土壌の平均糖度は、他の活性化資材と比較して微生物系において有意差が認められた(表5、図4、6)。015 系土壌は、先述したように生育不良を示したために当該結果は参考程度であるが、DSP が他の活性化資材よりも果数の増加傾向を示した(図5)。

また、活性化資材の土壌散布および葉面散布の両方において、ケミカル系土壌の果数および平均重量は有機土壌(012 系土壌および 015 系土壌)よりも高い値を示した(表4、5)。

これらの結果から、イチゴ果数の増大に効果的な土壌および活性化資材の組合せは 012 系土壌と DSP であること。同様に、平均糖度では 012 系と微生物系であることを明らかにした。

3. 制御光源による発酵系育成資材効果の定量化(株式会社キャリアネットワーク京都、国立大学法人京都大学)

<研究開発方法>

従来の発酵系育成資材の評価は殆どの場合、実際のフィールドで行われているために再現性のある実験データを得るのは困難である。

本研究開発では LED 光源の実装配置と果菜葉面との位置を正確に決め、LED の波長、照射時間等の条件を厳密に設定して効果を定量的に把握・評価する。

<要約>

発酵系育成資材が、植物工場でのいちごの栽培、特に苗の生長速度・結実の規模(重量/個)及び美味しさ(糖度)の獲得にどのような効果があるかを確認することが目的である。

京都大学植物工場の一角に、実験区として4トレイを設置し、各トレイに6ポットのイチゴを定植して代表的な3種類の活性化資材①成分系、②酵素系および③微生物系を最も効果を発揮するとされる条件(濃度、散布頻度)で供与した。

30日以上を経過したが、苗の成長・結実共に明確な効果は確認できなかった。選んだ育成資材はフィールドで効果の確認されているものである。どのような条件で何を確認すれば効果を見出せるのかを検討し、次の実験に備えたい。

3-1.発酵系育成資材効果の調査

京都大学において、発酵系育成資材3種を葉面散布したハウレンソウについてその後の光合成の進展を計測したデータが作成された。この3種の育成資材は、キャリアネットワーク京都で実験に使われるのと同様のものであり、且つ余り例のない実験データであるので以下に結論を引用したい。

散布資材による光合成速度への影響に関しては有意差は認められなかった。

一方で、フィールドでは3種の育成資材を使った多くの効果が報告されている。この事は、3種の育成資材の選択に誤りがあったのか、育成資材の効果が「光合成の促進」とは別の部分で機能するのか、そうとすればそれはどんな部分かが解明されねばならない。その為には、周到的準備が必要である。即ち、洗浄・消毒された培土に汚染されていない苗を植え、光・温度の管理と施肥・消毒をしっかりやった上で、発酵系育成資材がどのような機能を果たすか確認すべきである。そのような実験を次ぎのステージで是非とも実施したい。

3-2.制御光源による発酵系育成資材効果の検討

京都大学植物工場の中の24ポットに於いて、発酵系育成資材(微生物系、酵素系、成分系)の葉面散布に伴う生育の変化を観察・記録する。その中で、育成資材の効果を明確にす

る。

1) 実験の概要と実験条件

(1) 4つのトレイ(トレイの中には6個のワグネルポットに移植されたイチゴが入る)は次の構成である。

- ① 成分系育成資材を供与されたいちご
 - ② 酵素系育成資材を供与されたいちご
 - ③ 微生物系育成資材を供与されたいちご
 - ④ 育成資材を供与しない(アミノ酸のみ養分補給)いちご
- 以下、写真で示す。



図3－1. 酵素系育成資材のイチゴ葉面散布写真(品種;章姫)



図3－2. 成分系育成資材のイチゴ葉面散布(品種;章姫)



図3－3. ブランク (コントロール) の糖度測定サンプル



図3－4. 成分系育成資材葉面撒布イチゴの糖度測定サンプル



図3－5. 酵素系育成資材葉面撒布イチゴの糖度測定サンプル



図3－6．微生物系育成資材葉面撒布イチゴの糖度測定サンプル



図3－7．イチゴ奇形果の発生

変化の記録は、以下の部位に分けて比較検討した。

- ① クラウン径、葉柄長、草丈の変化
- ② 葉数、葉の大きさ(長さ、幅)、クロロフィル
- ③ 実の数、重量/個、糖度

(2)この実験は、京都大学植物工場での光源制御の下に行われた。

即ち、 $R:G:B=1:1:1$ という太陽光に一番近いとされる光源下で且つ光源といちごの距離が10～15cm という至近距離のもとで行われた実験である。4つのトレイ全て同一条件である。

(3)この実験期間は 2/8(月)～3/22(月)の42日間である。植物工場設備の完成遅れが原因で時間が十分とはいえないが、丁度2番花が咲くタイミングが実

験の開始時期に当たり、生育の観察には、適していた。毎週、月・木曜日が観察(計測)、火・金曜日に育成剤の供与とした。供与の効果が、中1日で顕れるか・中5日おいて顕れるか更にもっと遅れて顕れるか、何れにせよ計測日に記録される筈である。

(4)観察されるイチゴの経歴

守山ほ場において路地栽培された章姫を使用した。路地栽培では微生物系の土壌および葉面撒布を実施していた。当実験寸前に、路地からワグネルポットに移植され持ち込まれたものである。移植は、農業熟練者が慎重に作業した。

(5)今回使われた育成材の濃度・供与頻度を下表に示す。条件については、活性資材メーカーの推奨条件に合わせた。

	葉面撒布液 100cc/6 ポット	灌水
成分系	500 倍希釈 1,000 倍希釈のアミノ酸	1,000 倍希釈のアミノ酸 500cc/ポット、3～4日間隔
酵素系	10,000 倍希釈 1,000 倍希釈のアミノ酸	同上
微生物系	2,500 倍希釈 1,000 倍希釈のアミノ酸	同上
ブランク	1,000 倍希釈のアミノ酸	同上

実験トレーは、成分系、発酵系、微生物系の4つに分けられ育成剤の撒布は必ず別室に移し、噴霧が他のにかかる影響を遮断して行った。

2) 実験

①クラウン径、葉柄長、草丈の測定結果

①クラウン径、葉柄長、草丈の変化

(単位mm)

	2月8日	2月11日	2月15日	2月18日	2月22日	2月25日	3月1日	3月4日	3月8日
クラウン径									
成分系	20	20	20	19	19	19	19	20	19
酵素系	19	19	20	20	19	20	20	18	19
微生物系	17	19	19	19	19	19	19	19	18
Control	20	20	21	21	21	20	20	19	19
葉柄長									
成分系	102	106	106	104	103	102	104	104	102
酵素系	100	105	106	104	102	106	102	100	102
微生物系	97	101	102	100	101	101	100	105	106
Control	105	107	107	107	107	106	103	104	106
草丈									
成分系	139	142	124	96	97	72	109	101	111
酵素系	126	126	128	106	114	102	102	112	121
微生物系	132	131	137	125	130	132	122	125	118
Control	142	145	141	121	87	123	118	117	112

註1. クラウン径は、1トレイ6ポットの平均値とした。

2. 葉柄長・草丈は、1ポットから3葉を選びこの期間中、同一葉を計測した。従って、数値は18葉の平均値。

3. 草丈の数値に変動があるのは、水不足でしおれて葉の重みに耐えきれず横たわってしまったためである。又、期間中同一葉を計測したため、成長から取り残された葉も多く見られた。

■クラウン径、葉柄長、草丈の測定結果の考察

クラウン径、葉柄長共に、この期間中に変化(成長が促進された痕跡)は、認められなかった。成分系も酵素系も微生物系も何も供与してないブランクも全く変化は無かったといえる。

草丈が変化している様に見えるが、これは註3で説明した事情であり観察・記録した者の実感からも、撒布した育成資材の影響で数値が変わったとは思えなかった。即ち、育成資材の効果は無かった。

3-1で引用した、京都大学の光合成速度分析による育成資材の生育への影響について「有意差なし」との判定を裏付ける結果となった。

しかしながら、クラウン径・葉柄長・草丈共に灌水に伴い根から吸収されるモノの影響を受ける部分の寸法変化の記録である。このように、光合成活動そのものと今回選抜した育成資材の関わりは希薄である事は確かなようである。

②葉数、葉長、クロロフィルの測定結果

(単位～葉数：枚、葉長：mm、クロロフィル：葉緑素数/面積)

	2月8日	2月11日	2月15日	2月18日	2月22日	2月25日	3月1日	3月4日	3月8日
クラウン径									
成分系	13	16	17	17	19	19	19	19	19
酵素系	12	13	15	15	16	16	17	17	17
微生物系	13	15	14	15	17	17	18	19	18
Control	13	14	15	16	17	18	19	20	20
葉柄長									
成分系	63	70	71	72	73	72	74	73	73
酵素系	65	72	74	73	72	73	73	72	72
微生物系	63	65	67	67	68	67	68	68	68
Control	71	72	73	74	74	71	72	72	72
草丈									
成分系			57	60	60	61	60	61	61
酵素系			57	60	60	60	61	61	60
微生物系			57	61	61	60	60	61	61
Control			57	81	61	60	60	61	61

注1. 不要な葉は、適宜摘み取った。新しく生まれた葉と不要な葉の差が葉の増加となっている。

2. 葉長は、初めに定めた3枚の葉/ポットの長い方の寸法の平均値、葉幅のサイズも記録しているが、今回の表記からは除外した。

3. クロロフィルの測定結果は除外している。

■葉数、葉長、クロロフィルの測定結果の考察

- (1) 葉数は全体として増えている。40%の増加/月であるが、育成材を加えていない Control についても同様しており、育成材の効果とは言い難い。
- (2) 葉のサイズ(今回は葉の長辺の寸法を代表させた)は成分系、酵素系、微生物系の順で大きくなっており、育成材を供与していない Control は殆ど変化がない。即ち、育成材を葉面撒布した結果「葉のサイズが大きくなった」事実は残っている。
- (3) クロロフィルについては、育成材は何の関係も無いようである。光合成の促進に関与しないのを通ずるものと思われる。

③実の数、重量gr/個、糖度の変化

	2月18日	2月23日	2月25日	3月1日	3月4日	3月8日
実の個数 (摘果数)						
成分系 (摘果)	42 (-)	46 (▲9)	48 (-)	43 (▲15)	66 (▲21)	42 (▲22)
酵素系 (摘果)	29 (-)	29 (-)	29 (-)	33 (▲6)	48 (▲22)	17 (▲10)
微生物系 (摘果)	26 (-)	28 (-)	23 (-)	27 (▲9)	65 (▲33)	13 (-)
Control (摘果)	22 (-)	27 (▲3)	24 (-)	32 (▲12)	45 (▲14)	40 (▲20)
重量gr/個		成分系		酵素系	成分系	成分系
		22.4、13.3		42.2、21.4	23.4、14.1	17.2、13.2
		22.2、10.3		29.6、20.0	17.2、13.4	
		16.2、7.6		22.7、18.1	15.2、13.2	
		16.1、4.8			14.7、12.6	
		*14.8		微生物系	微生物系	酵素系
				26.9、26.2	21.5、17.0	21.2、15.7
				26.7、25.0	18.7、15.6	
		Control		26.6、22.8	17.8、14.9	
		29.3、12.0		*26.4	*17.6	
糖 度 (上記重量の 実の糖度)		成分系		酵素系	成分系	成分系
		8.8、9.6		14.2、12.0	13.5、14.1	11.5、16.0
		14.0、13.8		14.0、11.0	16.4、12.5	
		10.2、9.8		12.5、11.8	10.5、12.0	
		12.8、8.0			12.0、11.5	
		*10.6		微生物系	微生物系	
				13.5、12.0	12.0、12.0	
				13.7、14.0	12.0、12.0	
		Control		16.0、13.0	13.5、14.5	
		13.0、11.2		*13.9	*14.5	
				Control	Control	
				14.5、12.0	12.0、14.5	

■実の数、重量/個、糖度の測定結果の考察

- (1) 2月25日頃より、うどんこ病・黒カビが蔓延した。それまで順調に結実・大型化・色付きが進行していたのに残念な結果になった。窒素肥料過多が原因とか、硫黄を燃やすのが有効とか情報はあがるが万全の予防策が必要である。
- (2) 図3-7の写真にもあるように、3番花は全て奇形果となった。原因は蜂の活動が不十分で受粉がうまく行っていないとか、光量不足とかいわれるが、たしかに多湿のため蜂が弱り(死んだ蜂も多かった)活動が不十分であったことは間違いない。
- (3) 実の付くタイミングに若干差がみられたが、実の付く個数・重量に大きな差はない。結実に、育成資材が機能した形跡も見られない。又、気になる糖度でも育成資材を供与していないブランクのいちごが劣るデータも得られていない。

巷間言われる、“病気に強い”という噂も実証出来なかった。全てのポットが同じ様にうどん

こ病・黒カビにやられた。植物工場でイチゴを栽培する場合、病虫害対策は徹底してやっておく必要がある。

3-3. 制御光源による発酵系育成資材効果の実験

実験棟内のRGB・LEDを制御することで、上記光合成能の比較データを取り、発酵系育成資材の効果を確認する。

今回は、大学のRGB・LEDの制御実験も基礎実験中であり、又実験スペースが限られることもあって、太陽光に一番近い条件下でのみ行った。

大学の基礎実験が終わり、いちごの生育速度・実の付き方や大きさ・糖度の上昇等にどの条件が有効かが明らかに成ってくれば、それに対応した実験が可能になる。

3-4. 制御光源による発酵系育成資材効果のデータベース構築

上記実験により、光源の制御による植物体の活性化度合いをデータベースとして栽培ステージごとの最適値をデータベースとして構築する。

今回は、実験スペースが限られている事もあって、育成剤の供与を1パターンでしか実施出来なかった。今回の実験を踏まえて、いちごの生育に最も有効な育成材に絞り込み、育成材実の数、重量/個、糖度の測定値供給の濃度・頻度に差をつけた実験を3-3の最適光源下で行うことにより、実用性(コストと狙いの効果のバランス)を追求する実験に向かうべきである。今回はその為の基礎的な実験であったと位置づけられる。

3-5. 制御光源による発酵系育成資材効果データベースの評価

本実験で得られたデータベースを元に、光源制御と発酵系育成資材の最適使用方法をもとめ、次年度の実証栽培テストにつなげる。

この実験は、完全制御型植物工場装置のなかで行う必要がある。

今回は、京都大学植物工場の中で発酵系育成資材の最適使用方法について農業経験者・育成剤の情報発信者のアドバイスを受け実験を行った。3-4で述べた通り、今回はテストの実験であり更なる実験が必要とされる。

4. 光合成反応に最適化した光源を用いた完全制御型植物工場システム（国立大学法人京都大学、エスベックミック株式会社）

<目標・研究開発方法>

初期の植物工場の光源は高圧ナトリウムランプなどの高輝度放電灯が用いられていた。これは電気エネルギーをいかに有効に光エネルギーに変換するかという変換効率の観点から選択されていたのが主たる理由である。高輝度放電灯は発光面からの放熱量が大きいため、栽培している植物と光源の距離をある程度離す必要があったことなどから、天井に光源を設置して栽培ベッド上で植物を栽培するという、従来のガラス温室内での水耕栽培と同じように設置面積あたり1レイヤーの栽培面積しか確保できなかった。その後、安価な蛍光灯を用いた栽培システムが開発された。蛍光灯は高輝度放電灯と比べると管表面からの発熱が少ないため、光源と植物の距離を短くできる近接照明が可能となった。これにより1フロア内に多段の栽培棚を設置できるようになり、面積当たりの生産量(土地生産性)が飛躍的に向上した。

しかしながら、蛍光灯は元来人間が使用することを目的に作られているため、人間の標準比視感度曲線を考慮して設計されているはずであり、必ずしも植物の成長に最適化されているわけではない。標

準比視感度曲線は単峰形をしており、そのピーク値は 555nm の緑色である。人間の目は同じ可視光線でもこの波長に近い光は強く感じ、逆に赤や青色に近づくにつれて同じ光強度でも感じ方が弱くなる。人間が使用することを目的として設計された光は基本的にこの特性に合致するように作られており、このような光源が植物の成長に最適であるとは考えられない。

そこで、本プロジェクトではイチゴを対象とした人工光有機植物工場における最適な光源を開発することも重要なテーマの一つとして設定した。初年度の研究としては、実験用光源の試作およびその性能、光質が光合成速度に与える影響の基礎試験を実施した。

<成果>

本プロジェクトでは、植物工場用光源として LED を用いることとした。その理由としては単色光であることから、異なる波長の LED を組み合わせることにより任意のスペクトルの光を創出することが可能なのが挙げられる。また、そのほかに発光面からの放熱が少ないこと、消費電力が小さいこと、発光チップが非常に小さいことから省スペースが実現できること、長寿命であることなども LED のメリットと言える。植物工場用の LED 光源の開発はすでに多くの機関でおこなわれているが、それらはワット数の小さい LED チップを面上に配置して、栽培面すべてを同じ光強度で照射するものである。常に非常に密植した状態であるのなら、栽培面全体に均一な光を照射することの意味はあるが、イチゴ栽培も含めて多くの植物工場ではそのようなことはない。つまり、栽培パネル一面に植物が繁茂しているわけではなく、偏在しているのが一般的である。つまり、栽培パネル一面に均一な光を照射しても、植物が存在していないところがあるわけで、このようなところにエネルギーを使うのは明らかに無駄である。

そこで、本プロジェクトでは植物1個体に LED 光源1つを対応させ、植物だけにその成長ステージに応じて、光の量と質の両面から必要な光エネルギーを照射するエネルギーに無駄のない新しい光源システムを開発する。

イチゴを栽培するのに必要な照射範囲を確保するため、予備実験で評価したレンズのうち一番指向性の弱いレンズ 1 (Part No. 10196) を用いることとし、これと3原色のLED (赤色 (中心波長:627nm)、緑色(530nm)、青色 LED(470nm) (Philips Lumileds, LUXEON Rebel)) を組み合わせた。栽培に要求される光量と1つの LED チップからの放射量との関係から1つのヒートシンクに R、G、B の各 LED を一つずつマウントし、これを3セット用いることで約 20cm の高さで PPFD $200 \cdot \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量を実現した。

1 光質がイチゴの光合成速度に与える影響

本節では、光質が光合成速度に与える影響について実験的に検討した結果について述べる。

実験方法は光合成速度の場合と同様であり、PPF は $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であるが、光源を BG、GR、RB の組合せで 12 通りに変えて光質の影響を調べた。本来であれば RGB の3種類の光源の組合せで行なうべきであるが、組合せ数が膨大になるため2種類の光源とした。

具体的には下表に示す組合せである。ここでたとえば B40G60 とは B:40%、G:60%の混合比という意味である。

表中で空欄になっている組合せについては目標の $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量が確保できなかったの、実験条件から除外した。いずれも Green の比率の高い組合せであるが、使用した緑色の LED の出力が相対的に弱かったことが原因である。

表 レンズの仕様一覧

BG	GB	RB
	G20R80	R20B80
B40G60	G40R60	R40B60
B60G40	G60R40	R60B40
B80G20		R80B20
B100		R100

さて、各光質ごとの光合成速度の測定は次のような方法を採用した。まず測定開始前に1時間にわたって設定 PPF の光を照射してから測定を開始し、その同じ光質で 200、150、100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の3段階の光強度でそれぞれ3回ずつ光合成速度を測定し、次の光質に変更してから 20 分間はその光質および光強度に馴化させて同様に 100、150、200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の3段階の光強度でそれぞれ3回ずつ光合成速度を測定した。これを繰り返して 12 種類の光質のもとの光合成速度を測定した。

PPF100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では R100 および R80B20 において光合成速度が最大であり、次いで R100 が高い値を示したが、同様に赤色成分を多く含む G20R80 でも高い値を得た。これは B と G の効果の差があらわれたもので、クロロフィルの吸収スペクトルから考えても合理的である。この G20R80 は全組み合わせの中では3番目に光合成速度が速く、次に R60B40、G40R60 とやはり相対的に R 成分が多い光質条件がよい結果となった。逆に光合成速度が最も遅かったのは B100 であり、実に R80B20 の場合と比較して 25%の減少となっている。R に着目して考えた場合、GR の組み合わせ、RB の組み合わせともに R 成分が減少するにしたがって光合成速度も低下していることから、R 成分が主たる要因となっていることが推察され、特に R 成分が低い組み合わせ (G80R20 と R20B80、G60R40 と R40B60、G40R60 と R60B40) では光合成速度はほぼ同じ値となっている。しかし R 成分が 80%以上になると組み合わせる光のスペクトルによって光合成速度に差が現れ G よりも B のほうが光合成速度を高める効果があることが観察された。

PPF150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でも R 成分が多いほど光合成速度が速くなる傾向が認められ、R100 で最大であった。続いて R と B の組み合わせのうち R 成分の多い R60B40 と R80B20 が続いた。

この PPF でも B と G を用いた光源ではいずれの組み合わせでもあまり高い光合成速度は得られず、最も低かったのは B100 であり、G100 よりも低かったのは PPF100 の場合と同様である。R を含む RG と RB の組み合わせについて R 成分を同じ比率で含む光質について光合成速度を比較すると、R20B80 > G80R20、R40B60 > G60R40、R60B40 > G40R60、R80B20 > G20R80 となり、いずれの組み合わせにおいても B を含む光質のほうが光合成速度が速くなり、これは PPF100 の場合とは異なる傾向を示し、光質が光合成速度に与える影響は光強度 (PPF) も考慮しながら考える必要があることを示唆している。

PPF200 ではさらにその傾向は強まり、この光強度のもとでは R と G の組み合わせにおける G 成分の効果がほとんど認められなかった。つまり、G20R80、G40R60、G60R40 での光合成速度はほとんど差がなかった。この光強度でも光合成速度が最大であったのは R100 であり、続いて R60B40、R80B20 となり R を B の組み合わせで相対的に R 成分の割合が多い光質において光合成速度が速かった。これは PPF150 の場合と同様である。光合成速度は小さいものの G と B の組み合わせについても興味深い結果が得られた。いずれの光強度においても G の成分が多くなるほど光合成速度は速くなる傾向が観察され、これはクロロフィルの吸収スペクトルや葉の吸収スペクトルからではうまく説明することができない。G 成分の効果についてはいくつかのレポートがあり、RGB の3色を組み合わせた光源で何らかの効果が期待される。

さて、次にこれら光質による光合成速度への効果が統計的に認められるか否かを分散分析によって

確認した。いずれ PPF のともでも分散分析およびクラスカル・ウォリス検定においても P 値は 0.01 以下となり、光質が光合成速度に影響を及ぼしているとの判定結果を得た。

<今後の課題>

本章ではイチゴを人工光源で栽培する場合、最適な光源はどうあるべきかを光合成速度の観点から基礎的かつ実験的に検討した結果を述べた。

光合成速度の測定においては、植物ごとに光のステップ入力に対する反応が異なることが明らかとなり、同じ株であればどの葉を用いてもほぼ同様の傾向がみられることが明らかとなった。具体的には振動しながら収束するケースと振動せずに収束するケースの2つが観察されたが、これはあくまでも定性的なことであり振動するケースでも振幅や周期は同じ株であっても葉毎に異なった。このような葉を用いて光質の実験を行なっても、光質とは無関係の振動を含むデータとなるため光質のみの影響を定量的に評価することが難しい。そこで、振動しない葉を対象に光質の実験を実施した。その結果、R 成分を比較的多く含む R と B の組み合わせの光質 (R100、R80B20、R60B40) で高い光合成速度が得られることが判明した。本年度は実質的な実験期間が短かったため、これらの光質で栽培した場合の収量や果実の品質などについてはデータを得ることができなかったが、来年度は収量や品質、RGB の組合せによる光質の影響、光源の省エネ効果、効果的な照射方法などについて検討を行なう予定である。

5. 多品目栽培対応型植物工場モジュールの開発 (エスベックミック株式会社、国立大学法人京都大学、株式会社キャリアネットワーク京都)

<目標・研究開発方法>

現在の完全制御型植物工場は、単一作目を大量生産する大規模化に適したシステム開発が主流である。この場合、初期投資費用も大きく、また栽培されるものも殆どがリーフ系レタスなどの葉菜類であり、今後増加が予想される他の植物工場野菜との競争を勝ち抜いていくには資金力のあ

る大企業等でないと厳しいと予想される。
ユニット化、モジュール化を徹底的に図り、限られたスペースでも多品目栽培を可能にするフレキシブルな設計と工法を工夫する。

<成果と課題の要約>

本年度は、立命館大内と京都大学内に本試験に供する、コンテナ型の植物工場を設計、試作をまず行った。上記の装置の場合、土の試験を主体に行うため、栽培試験区はワグナルポットを用いて行っているため、実際の栽培に行こうする際には、灌水や栽培部分の連続性が求められる。ことため、大阪市内にある丸紅ラボにおいて地下の実験室を、空き店舗などを想定した 15 坪程度の部屋をそれにみたと、イチゴの栽培システムレイアウト設計を行い、装置の設置、予備的な栽培試験を行った。光源にはスリム蛍光灯を用いて、土栽培と、底面給液方式のフィールド養液栽培方式の栽培ベッド2ラインを設けてのイチゴ栽培を行い、人工光下でのイチゴの着果を確認することができ、人工光下での栽培が行えることが確認できた。

平行して、イチゴ栽培の条件等を勘案して、イチゴ対応型植物工場の調査・見学を行った結果、イチゴ対応植物工場に応用できる候補としては、高設栽培システムと水耕栽培システムが上げられることが明らかとなった。調査・見学の概容は、本報告の末尾に参考資料として掲載する。

<成果>

5.9.10 イチゴ栽培対応型植物工場の設計・評価

実用に供するイチゴ栽培システムとして、完全制御型植物工場の場合は多段式の栽培棚での栽培システムにすることが、床面積と空間を有効に使うことができるため、生産性を向上させることが可能となる。

ただ、イチゴの場合はレタスなどの葉菜類とは異なり、草丈が20～30cmになること、より強い光量を好むなどの異なる条件になること、さらに着実したイチゴは左右に垂れ下がるような状態にしないと果実の奇形や病害発生率が高くなり、形のよいイチゴ果実にならない。

これらの条件を踏まえて、大阪市内にある丸紅ラボ地下の実験室をイチゴ栽培試験室として改造し、栽培棚を設置しての栽培試験を行った。使用した部屋はW5m×L8mの約40㎡でここに栽培システムを2台配置した。栽培システムはW45cm、長さ6m、棚面は3段とし、栽培光源には28W型スリム蛍光灯6灯を1ユニットとした。栽培ベッドは発泡スチロール製のフィールドベッドの果菜用を使用し、1台はヴェルデナイト・ピートモスを主成分とする土壌、もう1台は、パミス(軽石)を培地とし、底面から給水する、フィールド養液栽培方式の2方式とした。

栽培試験には、あき姫、べにほっぺ、さちのかの3品種を選定し、それぞれを定植しての予備栽培試験を行った。

定植を11月中旬に行い、土、養液栽培ともにイチゴの着実を確認できた。受粉や土栽培区の灌水を手で行った。



丸紅ラボ イチゴ栽培予備試験(栽培モジュール設計例)





イチゴの配置と着実状況

＜今後の課題＞

受粉や土栽培区の灌水を手で行っていたため、受粉がおいつかない、灌水ムラによる株の生育不良などが一部の株に見られた。これら受粉と灌水の自動化は特に今後の課題である。

6. 工場生産野菜の定量的評価と有機品質確立（学校法人立命館）

＜目標・研究開発方法＞

従来の植物工場では、生産性（重量としての収穫量）が生産基準となっていた。植物品質においては、残留農薬や糖度やビタミン量等の測定は行われていたが、有機品質を保証するためのものは未だない。有機品質を保証するため、化学農法と有機農法で大きく異なる植物共通の成分を分析し、有機品質を保証するための基準値を明確に設定する必要があると考えた。有機品質を保証するための基準値を明確に設定するにあたり、これまでの先行研究を調べた。

＜成果と課題の要約＞

各国における各論評からわかることは、有機農産物と非有機農産物との間で差がある物質は抗酸化物質くらいだということである。それゆえ、今後の研究手法として野菜中の抗酸化物質を測定することが、有機農産物の品質保証に繋がると考えた。

抗酸化物質の測定方法には数種類あり、それぞれ測定する物質が異なる。本研究ではイチゴ中の抗酸化物質を測定する事になるため、試料中にビタミンが多く含まれる。ビタミンに由来する抗酸化力価を排除した測定方法を現在検討している。本研究で栽培したイチゴに含まれる抗酸化物質を測定し、有機農法を行った場合の基準を設定していくことが必要である。

＜成果＞

化学農法と有機農法で大きく異なる植物共通の成分を分析し、有機品質を保証するための基準値を明確に設定するにあたり、これまでの先行研究を調べた。そのうち、諸外国の取り組みで科学的で参考になるものを以下に示す。

【フランスでの取り組み】^{1,2}

欧州委員会は、有機農産物の市場を開発するため、消費者の有機製品理解や有機製品の付加価値に関する情報の改善を優先事項として掲げた。有機農産物の購入理由として

は、健康との関連が最大の動機であると示唆されていたためである。従って、「公的機関により客観的で信頼できる情報」、「有機農業の原則と有益性についての情報」を得ることを重要視した。

2003 年、フランスの食品衛生安全機関 (AFSSA) が有機食品の栄養・衛生上のリスクと便益の評価に関する報告書を発表した。報告書は有機食品をめぐる従来の議論において曖昧であった多くの側面を明確にし、今後の研究の方向に有力な示唆を与えるものと思われる。この報告本文の内容を、以下に紹介する。

【目的】 有機農産物の栄養的・衛生的リスクを、慣行農業由来の農産物と比較して評価すること。

【結果】 有機食品の栄養的側面の特徴

有機農業産品は慣行農業産品よりも栄養面で優れているという根拠は得られなかった。

この報告で検討されたデータでは、一般的には有機農業由来の原料と慣行農業由来の原料の化学的構成は、大きな、また再現可能な違いを示さなかった。食品の化学的構成と栄養価に起こる変動の要因 (品種、季節、気候など) の多くは、農業方法 (肥料の性質など) に結びついた要因よりも重要であった。

・乾物量

根菜、球根、塊茎、葉菜では有機農業由来のほうが乾物含有量が多い傾向が示された。果実ではこの傾向はない。

・炭水化物

食品に応じて、さらに同一食品でも矛盾した結果が示された。従って、利用可能なデータでは、炭水化物含有量への生産方法の影響を実証することはできない。

・タンパク質

有機農業由来の穀物の蛋白質含有量は慣行農業由来の穀物に比べて少ない傾向が示めされた。これは、明らかに有機生産での窒素投入の制限によるものである。

・ミネラル

多くの比較研究があるが、大部分は大きな差がない。有機農産物では鉄とマグネシウムで増加、マンガンで減少する弱い傾向が認められた。

・ビタミン

ビタミンCとβカロチン以外のビタミンに関しては利用できるデータがほとんどない。ジャガイモのビタミンC含有量は有機のほうが若干多いが、野菜のβカロチンの含有量には影響はないようにみえた。

・植物微量構成要素

生産方法は果実・野菜のリコペン含有量に影響を与えないように見える。ポリフェノール類については、利用でき、有効と判断される大多数のデータで有機果実・野菜が勝ると結論している。

生産方法による栄養素含有量の大きな差は証明されず、消費者の栄養状態に生産方法が与える影響はない。

現在、栄養面で考慮すべき問題は食事全体のバランスと必要栄養量の確保である。有機農業由来の食品と慣行農業由来の食品の化学的構成と栄養価の間には、いくつかの栄養素について、また一定の研究において若干の違い明らかにされたが、これはこの問題の観点からは重要な意味をもたない。ポリフェノールについては、摂取基準がなく、また現実の摂取量がよく知られていないため、栄養面での影響は評価できず、今後の研究領域とな

り得るだろう。農産物の生長要因は複雑に絡み合っているため、多数の食品についての多くの分析が必要である。

食品衛生安全上の側面での影響

最近の食品安全にかかわる諸事件は、汚染リスク点（生産・貯蔵・輸送・原料）にあることを示している。有機農業の生産・流通サイクルは短いため、汚染リスクは慣行農業よりも少ないであろう。

・農薬汚染

有機農作物の生産規則が化学物質由来の農薬に頼ることを禁じているため、これに関連したリスクは限定され、環境汚染の最小化にも寄与する。しかし、有機栽培で使用が認められている自然起源の農薬もまた人間への毒性を示し、これら農薬の残留に関する研究は極めて少なく、また残留の検出が困難であることから、農産物にこれら農薬が残留しているのを確認することができない。

・重金属

有機農産物と慣行農産物の重金属濃度に違いはなかった。

・マイコトキシン

有機産品の汚染レベルは様々で、非常に高いものもあるが、全体的には慣行産品との差はない。

マイコトキシンは、特に収穫・貯蔵時の湿度、気温等の要因に影響される。有機農業では殺菌剤処理が制限されるためマイコトキシンの汚染リスク増大に結びつく場合がある。しかし、作物のローテーション、耕起、窒素肥料削減、成長調整剤の不使用などは、汚染を減らす方向に働く。

・硝酸塩

利用可能なデータの分析では、有機野菜の硝酸塩含有量は全体的に少なかった。これは単に有機肥料中の窒素成分が低かったためである。現在、慣行農業の窒素施肥は削減されているため、新たな研究で確認する必要がある。

・微生物・回虫のリスク

有機農業生産システムとその農産物における病原性細菌の出現に関する科学研究は非常に少なく、結論あるいは傾向を議論できる段階ではない。

【イギリスでの取り組み】³

英国食品基準庁は 2003 年、有機農産物に対する栄養学および衛生学的な見解を発表した。以下にその一部を記す。

「Is organic food better for you?」

Food Standard Agency

有機農産物は成功した。10 年前には有機農産物をスーパーで見かけることは殆ど無かった。今や主要なスーパーの殆どが有機栽培された果実、野菜、肉やそれらの加工品を販売している。

10 年前と比べればその売り上げは約 10 倍と試算されている。

有機食品を好む人は多くの理由を持っている。例えば、「有機農産物はおいしい」、「有機農産物は安全だ」、「有機農産物は栄養価に優れる」、「環境に優しく、家畜環境も良い」などがあるだろう。あるいは、もっと単純に「有機農産物は自然だ」という理由もあるかもしれない。

有機食品は過剰な期待を受けつつも、消費者の食生活を豊かにしたのである。

しかし、このテーマは「有機食品は良いのか？」である。数分後にはこの問いに対する私の答えをあなた方と共有したいと考えている。しかしその前に、有機食品と食品企画庁 (FSA) との関わりを簡単に説明させて頂きたい。

FSAは、消費者側の立場を取っている。我々は食品の安全性や、健康的な食生活と選択に責任がある。有機食品の増進は我々の役目ではない。また、家畜環境や環境保護についても同様に関係しない。これらの観点から食品ラベルの苦情が来たならば対応するだけである。

さて、「有機食品は良いのか？」

現段階での科学的な値からは、有機食品が従来のものと比べて、栄養学的あるいは衛生面において優れているとは言えない。

我々だけがこの評価を下したのだろうか？例えば、フランスのAFSSAも最近になって 128 ページの有機食品に関するレビューを提出した。ここにも、我々と同様に有機食品と従来の食品との間に違いはないと書かれている。

また、スウェーデンの国立食品庁も最近の研究報告で有機食品に栄養学的な優勢はないと結論づけた。

消費者協会は 2003 年に有機食品の保健効果について総意は得られていないと結論づけた。

しかし、もちろんのことだが、科学的な証拠は動的であり（あえて有機的と言おう）、それゆえ我々は常に新たな証拠に対してオープンでなければならない。

将来の有機食品と消費者の選択性を議論するため、FSAは去年の 11 月に研究集会を開いた。研究集会での生の議論はこの分野における正当な研究計画が容易ではないことを示していた。例えば、有機食品は栄養価が高いから良いものだと言いたいのなら、

どの栄養素を測るべきなのか？

畑に生っているものを測るのか、お店で売られているものを測るのか？

どれくらいの差があれば重要なのか？健康に影響を与えるほどの差があるだろうか？

意見をもっている研究者もいるだろうが、我々はこれらの問いに答える気はない。しかし、FSAは栄養学および衛生学の観点から有機食品を研究するための研究助成基金を用意していることは確かだ。

略

以上

上記の見解においても、食品の安全性や品質などの点で、有機農産物に特有の成分というものが現在見付かっておらず有機農法が優れているとは言えないと書かれている。しかしながら、有機農法は持続型農法の一つであることは確実であり、こうした取り組みを進めていくことで自然環境を破壊することなく、人々が豊かに暮らしていける様になるだろう。

【ACSH によるまとめ】

ACSH (American Council on Science and Health) は 1978 年に設立された非営利団体である。この団体が 2009 年にまとめた報告を以下に記す。

The Organic Food Nutrition Wars

By Joseph D. Rosen

数週間前、世界の有機農法の弁護者は「有機食品は通常の食品と比べて栄養価が高いことはない」という研究報告に揺れた。消費者は長い間有機食品に払う割高な値段が正当かどうか興味を抱いていたゆえ、このテーマは非常に興味深いものであろう。

背景

1924 年には、有機農産物の栄養学的優位性あるいは劣性についての研究が数多く報告されてい

る。Katrin Woese (1997)⁵、Virginia Worthington (2001)⁶、Diane Bourn & John Prescott (2002)⁷、および Faidon Magkos(2003)⁸ がこれらの研究を再考している。Woese 等は 150 の論文を検討した結果、通常農産物中に含まれる高い硝酸濃度と低いビタミン C 濃度を除いて有用な栄養価は有機農産物と通常農産物との間に差はないとした。Worthington は 41 の論文を検討した結果、有機農産物は高いビタミン C、マグネシウム、鉄、およびリン酸濃度を有し硝酸濃度が低いことを見いだした。彼女はその他のミネラルやビタミンにおいて差は見られないとした。

Bourn と Prescott は 49 の論文を調べ、硝酸濃度以外の栄養素において差は無いことを見いだした。彼らはまた、盲検の結果、有機食品がこれまでの食品と比べて特においしいという事はないと報告している。Magkos は野菜や果実を摂ることで食餌バランスを整えることが健康に寄与することは明らかであり、それらの食品の起源が有機や慣行農法のどちらでも同じであると報告している。最近の *Journal of the Science of Food and Agriculture* での論文は微量元素においても有機食品が優れていることはなかったと報告している。

近年、有機食品中の抗酸化物質が強調されてきている。抗酸化物質はラジカルなどの我々が通常の代謝過程で生産する物質の制御に重要であることが信じられている。ラジカルなどはガンや動脈硬化を引き起こすとされている。食品中には数種類の抗酸化物質があることが知られている。例えば、β カロテン、リコペン、ビタミン C、およびフェノール酸類 (カフェイン酸、フラボノイドなど) がある。

The Soil Association

Soil Association は英国の団体であり、有機食品を推進している。最近の入手可能な統計によれば、年収は約 3100 万ドルであり、その 1/3 以上を有機農家から得ている。

Soil Association の設立は 1946 年で、設立者は 30 年間にわたる実験でオーガニック農作物の方が栄養価が優れているということを証明しようとしたが出来なかった。しかしそれにも関わらず Soil Association は何年もオーガニック農作物の方が栄養価が優れていると宣伝し続けている。

現在の Soil Association の政策主導者は Peter Melchett 卿である。

Melchett 卿にとって最高の日

2007 年 10 月 30 日は Melchett 卿にとって最高の日だった。ロンドンの主要紙がオーガニック食品は栄養価が高いと報道してくれたからだ。これは 4 年間の 2500 万ドルかけた EU プロジェクト「aims to improve quality, ensure safety and reduce cost along the organic and low input food supply chains through research, dissemination and training activities.」のリーダーである Carlo Leifert 教授 (ニューキャッスル大学) が、有機食品のほう「野菜で最大 40%、ミルクで最大 90% 身体によい化学物質が多く含まれる」と主張したからである。ちなみに教授は英国で最大手の有機食品販売会社であるテスコから 87 万ドルの投資を受け、Tesco Centre for Organic Agriculture を設立し、その社長となっている。このプロジェクトは 37 の研究所、会社、および大学の科学者が共同に行ったものである。

Leifert 教授は有機食品を摂ることは毎日野菜や果実をたくさん食べるのと同じ効果があるとし、慣行農法での食品は肥満や心臓疾患を引き起こすことをほのめかした。彼はこれらの結果は 2008 年中には公表され、有機食品には有用な成分が多く含まれ、悪い物質が少ないことがはっきりとするだろうと BBC に語った。英国メディアは熱狂した。

「有機食品を非難した者は撤回せよ」(タイム誌)、「有機食品はより健康で安全であることが EU の調査で明らかに」(インディペンデント誌)。

いずれのメディアも教授にこれらの発見の証拠を尋ねなかった。実際には、教授の主張を裏付けるデータはなかったが、メディアは気にしなかった。彼らは英国政府と Soil Association との闘いに興味を持っていたからだ。教授は FSA とその主任研究者 Andrew Wadge に、有機食品の方が優れていることを

認めると迫ったが、この時には FSA は独立した外部の科学者グループに関連する文献のレビューを依頼していた。

2007 年 10 月 30 日の Soil Association のプレスリリース

Soil Association は FSA に有機食品の栄養価が優れていることを公式に認めることを要求した。この要求は以下の 5 つのポイントに基づくものである。

1. 2001 年に 400 本以上の論文をレビューした報告ではビタミン C、ミネラル、および微量成分が多いことが示されている。
2. QLIF (Quality Low Input Food) のシンポジウムでのフランスとポーランドの 3 つのプレゼンテーション (有機栽培のモモ、トマト、およびリンゴ中の抗酸化物質は高濃度であると発表)。
3. カリフォルニア大学の研究者が査読有りの論文で発表した、有機栽培のキウイは慣行のものに比べてビタミン C と抗酸化物質を高濃度で含むという報告
4. 英国の農場で調査された「牧草とクローバーで育った牛の乳中にはビタミン、抗酸化物質、および ω -3 脂肪酸が多く含まれる」という報告
5. Leifert 教授が発表した QLIF での結果 (査読無し)

2007 年 10 月 30 日の Soil Association のプレスリリースに対する返答

1. 2001 年の報告

John Krebs 卿 (FSA の長官、当時) は 2000 年に「有機食品が非有機食品と比べて優れているといえる証拠は現在入手出来ていない」と発表した。この発表により打撃を受けた Soil Association は「Organic Farming, Food Quality, and Human Health: a review of the Evidence.」という評論を執筆した。著者である Shane Heaton は栄養学者であるかのように執筆したが、彼が栄養学を専攻した記録も、その他の学学科についての記録もなかった。

Soil Association は「400 以上の論文をまとめた結果、ビタミン C だけでなく有益な微量成分でも有機農産物は高い濃度で含む」と主張したが、400 以上の論文のうち、99 本のみが有機農法と慣行農法を比較しており、これらの 70 本は比較する基準に満たないという作者の独断で排除されている。残った 29 本のうち、16 本だけが査読有りの雑誌に投稿されたものである。29 本のうち 5 本が抗酸化物質を扱い、そのうち 2 本が査読有りの雑誌に投稿されたものであり有意差は無いとしている。16 本の貴重な研究結果は、一致さえしていなかった。有機農産物がミネラルを多く含むという主張は 14 の研究のうち 7 本であり、ビタミン C については 13 本中 7 本であった。

2. QLIF シンポジウムでの発表

発表の要約を読めば、シンポジウムでどのように報告されたのか正確にわかっただろう。一つ目の QLIF の発表では 2004 年に栽培した者ではフェノール類が多かったが、2005 年には有意差はなかったとしている。発表で示された値からは、2005 年には慣行農法の方が 30% も高かったことがわかる。

二つ目の発表では有機農法と慣行農法との比較をトマトで行っている。ポーランドの異なる農場で試験されたこの研究では有機農法と慣行農法とで栄養成分濃度は様々な値を示しており、有機農産物が高品質であるとはいえないと結論づけている。

三つ目の発表では有機栽培したリンゴ中の抗酸化物質が高濃度で含まれるとあるが、抗酸化力の指標として重要である全ポリフェノール量は有機農法と慣行農法との間で有意差はなかった。

以上の 3 つの発表から 2 年が経つがいずれも学術雑誌に投稿されていない。

3. 有機農法と慣行農法におけるキウイの比較

カリフォルニア大学の研究者は二つの重大なミスを行った。一つ目は彼らの試験方法は抗酸化物質だけでなくビタミン C も同時に測定する方法だったことだ。彼らはビタミン C 量を差し引く事をしなかった。それゆえ、有機栽培キウイに含まれる抗酸化物質の量を高く見積もってしまった。二つ目は抗酸化

物質は通常果肉よりも果皮に多く含まれるということだ。彼らの試験では、有機農法キウイの果皮は慣行農法と比べて 35%も厚かった。

以上のことから、有機農法キウイに含まれる抗酸化物質の増加は、全てではないにしろ、大部分が果皮に含まれていると解釈出来る。キウイの果皮は食べることが出来ないのだから、キウイの可食部分のみを測定しなければならないだろう。

4. ω 3 脂肪酸

2003 年から 2006 年までに発表された論文はクローバーと牧草で飼育した牛の乳中に含まれる ω 3 脂肪酸と α リノレン酸(ALA)の量が、トウモロコシや干し草で飼育したものよりも多いと報告した。 ω 3 脂肪酸は近年メディアで評判が良く、エイコサペンタエン酸 (EPA)やドコサヘキサエン酸 (DHA)はシャケやカツオに含まれ、ガンや心疾患の抑制作用があると考えられている。ALA は ω 3 脂肪酸であるが、EPA や DHA とは異なる。疫学者の幾人かは EPA や DHA は前立腺ガンに有用かもしれないが、ALA はリスクを高める可能性があるとしている。

はっきり言ってしまうと ALA の増加は意味がないということだ。栄養学者は我々に一週間に 60～80g のシャケを食べることを勧めている。もし我々が牛乳から同量の EPA と DHA を摂取するならば、毎週約 200L の慣行飼育での牛乳を飲まなければならない。有機飼育した牛の乳であれば、毎週 110L を飲まなければならない。

5. QLIF の 4 年間に渡る UK プロジェクトの「結果」

現在、Leifert 教授がプロジェクトを終えて約 2 年が過ぎたが、査読のある雑誌に彼らの結果が載ることとは無かった。

Soil Association の 5 つのポイントの要約

以上の Soil Association が提出した 5 つのポイントは、有機食品の栄養価が高いと言う主張は調査の結果崩れた。2001 年の報告からは何も得られなかった。ただ、牛乳では有機飼育した場合に成分が増加するが、保健効果を示す濃度ではなかった。キウイの研究は二つの間違いがあったため、結論は疑わしく、QLIF のシンポジウムで発表された内容は Soil Association の主張する内容とは隔たりがあった。Leifert 教授がやった実験で参考になるものは、実際、メディア操作の実験ぐらいだろう。

FSA の逆襲

Soil Association の攻撃に応えた FSA の委託した科学的レビューの結論は 2009 年 7 月 29 日に発表された。その結果は有機食品は通常栽培食品より栄養価が優れているということはないというものだった。この報告書を担当した Alan Dangour 氏は、Leifert 教授と違ってその結果をきちんと査読有りの学術雑誌に発表し、批判も受け付けている。

オーガニックセンター

北米の有機推進団体オーガニックセンターが Dangour 教授の報告書を批判している。この団体は非営利団体であるが、有機農産物を扱う企業によって運営されていることは記憶にとどめておくべきだろう。反論の根拠は 8 報だけである。1 報は慣行農法に有利な結果であり、5 報は査読無しの論文である。残る 2 報のうち一つは先ほどのキウイの研究であり、もう一つは有機および慣行農法どちらにも有利な結果を載せているが、慣行農法の結果は示さなかった。

食餌中の硝酸塩

有機食品では硝酸塩濃度が低いと主張する人々がいる。オーガニックセンターは多くの科学者が食餌中の硝酸塩には発がん性があり危険であると認識しているという。しかし、栄養学や疫学を専攻する科学者でこのような主張をする者はまずいないだろう。

食餌中の硝酸塩とガンとの間に疫学的な証拠は何もない。現在科学的に証明されている事は、多く

の果実と野菜（硝酸塩を含んでいる）を摂ることで発がん性が減少することである。欧州食品安全機関は野菜に含まれる硝酸塩では健康被害が起きることは無いだろうと宣言している。

硝酸塩はほ乳類の感染症への抵抗性を高めることが知られている。硝酸ナトリウムを摂取した場合に収縮性の血圧降下があったことが報告されている（*New England Journal of Medicine*）。テンサイのジュースを飲むことで実際に血圧は下がる。高硝酸塩を摂食したマウスは惹起した心臓発作にたいして高い生存率を示した（*Proceedings of the National Academy of Sciences*）。

硝酸塩は胃潰瘍を防ぐことが知られているし、アスピリンや抗潰瘍薬の副作用を鎮めることも知られている。総括的な医学的なレビューでは「これまでに得られた野菜や果実に含まれる硝酸塩や亜硝酸塩のデータは、これらを摂取することで保健効果があることを強く示唆する」と判じた（*The American Journal of Clinical Nutrition*）。また、同論文では作物由来の硝酸塩と亜硝酸塩は「心血管疾病と胃腸免疫機構において生理学的に不可欠な役割を持っている」としている。ザクロ、レタス、ホウレンソウ、およびテンサイなどの高い硝酸塩濃度の野菜は肥満、糖尿病、高血圧、および心動脈疾患のリスクを低下するのに役立つだろうという報告もある（*Medical Hypotheses*）。

硝酸塩は安全であるだけでなく、保健効果を有することが示唆されているのだ。

結論

有機食品のほうが優れているという主張に根拠はない。有機農法支持者は彼らの主張に根拠を提示する必要はないことを学習した。単に自分たちの主張を無限に繰り返していればメディアや環境団体が勝手に広めてくれるのだから。

以上

上記の論評は、本研究の目的とはいささか異なるものであるが、これまでの研究がよくまとめられていると考えられる。この論評からわかることは、有機農産物と非有機農産物との間で差がある物質は抗酸化物質くらいということである。それゆえ、今後の研究手法として野菜の抗酸化活性を測定することが、有機農産物の品質保証に繋がると考えた。

【抗酸化活性の測定方法】

植物中の抗酸化物質にはビタミン、ポリフェノールなどがある。これらの測定方法を以下に記す。

【ビタミン類】⁹

・抽出

組織を 0.5% 塩化スズ溶液（5% リン酸）に懸濁し、乳鉢ですりつぶす。

懸濁液を濾過する。

・ジケト L-グルコン酸（DKA）の測定

濾液 100ml に硫化水素ガスを 15 分間通気する。

水素と硫黄が飽和状態になった濾液 40ml にチオ尿素を 0.4g 加え溶解させた後、濾過する。

濾液に二酸化炭素ガスを 5 分間通気させる。

上記の溶液 4ml を試験管にとり、2% 2,4-ジニトロフェニルヒドラジン溶液（9N 硫酸）を 1ml 加え、37℃で 6 時間反応させる。ジニトロフェニルヒドラジン溶液を加えないものをブランクとする。

吸光度 520nm を読み取る。

・デヒドロ L-アスコルビン酸

上記の抽出液 4ml に 2% 2,4-ジニトロフェニルヒドラジン溶液（9N 硫酸）を 1ml 加え、37℃で 6 時間反応させる。ジニトロフェニルヒドラジン溶液を加えないものをブランクとする。

吸光度 520nm を読み取る。

この値から DKA 値を差し引く事で DHA 量を測定する。

・アスコルビン酸

水素と硫黄が飽和状態になった濾液に空気を通気し、硫化水素を追い出す。

チオ尿素を 1%量加える。

この溶液 4ml を試験管にとり、2%2,4-ジニトロフェニルヒドラジン溶液 (9N 硫酸) を 1ml 加え、37℃で 6 時間反応させる。ジニトロフェニルヒドラジン溶液を加えないものをブランクとする。

吸光度 520nm を読み取る。

この値から DKA 値と DHA 値を差し引く事で AsA 量を測定する。

【ポリフェノール類】

総ポリフェノール含量は、Folin-Denis 法により測定する¹⁰。

【総括】

これまでの調査・研究の結果、有機農産物で特に高くなる物質として抗酸化物質があることがわかった。今後は、本研究で栽培したイチゴに含まれる抗酸化物質を測定し、有機農法を行った場合の基準を設定していくことが必要である。

【参考文献】

- 1: Evaluation des risques et bénéfices nutritionnels et sanitaires des aliments issus de l'agriculture biologique, ASFFA, France (2003)
2. フランス: AFSSA、有機食品の栄養と安全性の評価報告書, 農業情報研究所 (2003)
3. Is organic food better for you?, Food Standard Agency (2003)
4. Joseph D. R.: The organic food nutrition war, American Council on Science and Health (2009)
5. Katrin Woese: Journal of the Science of Food and Agriculture, 74, 281-293 (1997)
6. Virginia Worthington: Journal of Alternative and Complementary Medicine, 7, 161-173 (2001)
7. Diane Bourn and John Prescott: Critical Reviews in Food Science and Nutrition 42, 1-34 (2002)
8. Faidon Magkos: International Journal of Food Sciences and Nutrition, 34, 357-371 (2003)
9. Roe J. H., Mills M. B., Oesterling M. J. and Damron C. M.: Journal of Biological Chemistry, 174, 201-209 (1948)
10. Maeda T., Kakuta H., Sonoda T., Motoki S., Ueno R., Suzuki T. and Oosawa K.: Hortscience, 40, 1221-1224 (2005)

＜今後の課題＞

抗酸化物質の測定方法には数種類あり、それぞれ測定する物質が異なる。本研究ではイチゴ中の抗酸化物質を測定する事になるため、試料中にビタミンが多く含まれる。ビタミンに由来する抗酸化力価を排除した測定方法を実施していく。

7. 工場運営・管理システムの構築（株式会社キャリアネットワーク京都）

＜目標・研究開発方法＞

現状の植物工場は、無機の化学肥料による大量生産のため機械的一元管理となっている。本有機植物工場は、微生物との共生型となり、安定した稼働を達成するまでに5～20年の経験知が必要と考えられる。

完全制御有機型植物工場を合理的・効率的に稼働する運営管理マニュアルを策定する。

<研究成果と課題の要約>

イチゴ栽培対応型植物工場運営・管理システムを構築するために、

1. イチゴ栽培対応型植物工場モデルの設計
2. 主要なパートの運営・管理シミュレーション (運営・管理システムの初版)
3. イチゴ対応型植物工場の 1/5 モデルのパイロットプラントによる試作・評価実験
4. 試作・評価実験データに基づく運営・管理システム第2版の作成
5. 本プラントを設計、稼働し、最終の運営・管理システムを構築
の手順で進める。

前出のイチゴ栽培対応型植物工場の調査に基づき、本植物工場の雛形としてはイチゴ高設栽培システムと循環式水耕栽培システムが候補として挙げられる。

1) 高設栽培システムの導入について

- ① 栽培技術が確立され、種々の方式、論文、データが公開されており、モディファイすれば植物工場に導入できる。
- ② 高設栽培システムを導入した多くのイチゴ栽培農家で経営が成り立っている。
- ③ イチゴ高設栽培に堪能な栽培技術者が育成されている。
- ④ 関連する周辺機材のメーカーが育ってきて、肥料メーカー、プラントメーカー、種苗メーカー等の有力メーカーが競争しており、投資額を抑えて優れた装置を設計、製作できる。

という事が挙げられる。

2) 循環式水耕栽培システムの導入について

- ①実績事例が10箇所程度と少なく、栽培指導出来る人材も限られている。
- ②部材は全て輸入品であり、資材の融通が困難である。

b高設栽培方式とは対蹠的なポジションにあるが、栽培密度を大きくとれることが魅力的あり、課題をクリアすれば、空き店舗利用型植物工場事業化の有力な候補となる。

<成果>

7-1.イチゴ高設栽培システムと植物工場等の事例調査

7-1-1.イチゴ高設栽培システムの運営・管理概要

1) ジャット式高設栽培の運営・管理概要

(次のページに概容記載)

2) ジャット式施肥管理表

定植の前後から運営・管理の重点は、イチゴの生育状況を観察しながら行う施肥管理に移る。その事例を有機肥料栽培の観点から以下に示す。

①元肥段階設計例

- ・アミノ 21 ペレット(6-7-4-2.4) 300kg チッソ成分は100%有機由来
 - ・ジャットPK粒(1-13-10)50kg チッソ成分以外は非有機
- 元肥のチッソ成分は有機100%で可能だが、P、Kは非有機となる。

②定植前段階設計例

- ・ミネクロンどぶ漬け:天然ミネラル(S,Zn,Mo,Mn,Cu,B 等)48種含有
- 本品は蛭石から抽出しているので、天然素材であるが、抽出過程で使用した化学薬品が残留している可能性がある。

③追肥1ー定植活着直後

・9月上～中旬 分化揃えと徒長抑制:ジャットP K粉(0-12-10)40kg 全て
非有機である。

・9月下旬 展葉促進:発酵一番(7-4-2)30~60kg チッソ成分は 100%有機由来

④追肥2ーマルチ掛け5日前

・2番分化揃えと徒長抑制:ジャットP K粉 40kg 全て非有機

・弱草勢の場合:発酵一番(7-4-2)30~60kg チッソ成分は 100%有機由来

⑤液肥灌水

＜出らい～開花期＞

・Nアップ G-3(2-8-8)5kg 7~10 日間隔 有機由来チッソ率6.8%

・エキカル 5kg 7~10 日毎2回 主成分は有機酸カルシウム

＜肥大～着色期＞

・N アップ G-1(6-6-6)5kg 7~10 日間隔 活性アミノ酸液 有機由来チッソ率 4.3%

・肥大促進:ランセットN 5kg 有機由来チッソ率 51.8%

・肥効促進:ランドライフ 2L 有機スルホン酸・フミン酸

・根勢強化:天地10万年 5L 核酸、アミノ酸、ビタミン等の集合体

他に、微量要素欠乏対策に「いきいきK」:非有機、体質強化に「カカラン」

:非有機である。

ジャット式高設栽培の運営・管理概要

6月中旬(子苗の確保)



収穫も終わりに近づくと盛んに「子苗(ランナー)」が出ます。このうち生育状態のいいものを抜粋して苗にします。その際、根に「つる一と」と言う綿状のものを巻きつけ、水もちを良くし、3から5日冷蔵庫にいれます。それに根が充分絡まったのを確認して、根の発育促進に有効な、特殊な「トレイ」に移植します。

6月中旬から9月(子苗の育成)



「トレイ」に移植された苗は、定植まで毎日2回の灌水と病虫害の防除を行います。苗は土地から離して、防虫ネットを張ったビニール・ハウスの中で、病虫害や雑菌から隔離し、酷暑の間は寒冷紗をかけて、暑さから苗を守ります。

7月から9月(本田の準備)



本田では病虫害の防除を、できるだけ薬剤を使わずに栽培するため、夏の間ハウスを密閉し、水分を与えて、太陽熱消毒を行います。日中は80度にもなり、ほとんどの病虫害は死滅してしまいます。

9月初旬には「EM菌」により発酵させた有機肥料や微量元素を加えて、「高設土耕」の全面に配付し、クワ等でかきまぜます。

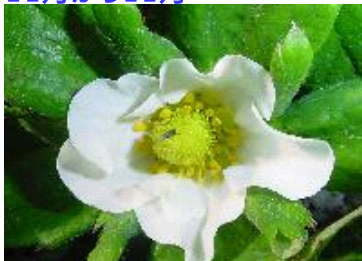
9月から10月(定植とハウス懸け)



トレイで約4ヶ月間、朝夕2度の灌水で丁寧に育てられた苗は、9月中旬にハウス内の本田に定植されます。

ハウスかけは10月下旬。この定植とハウスかけの時期が、収穫時期決定の重要なポイントとなります。

11月から12月



ハウス掛けが終われば、すぐに黒のポリ「マルチ」を敷きます。これで雑草を押さえ、雑菌の進入を防ぎます。開花時期は11月上旬、開花と同時に「蜜蜂」を入れ、花の受粉作業を手伝ってもらいます。

また12月に入れば、「電照」を行い、イチゴに春が来たと思わせ、収穫時期を早めます。

12月から翌年3月(培地暖房)

7-1-2.噴霧式水耕栽培植物工場の事例：TSファームタイプ

A社はTSファームタイプの完全制御型植物工場である。TSとは三角パネル(Triangle Panel)と噴霧水耕栽培(Spray Culture)それぞれの頭文字をとって名付けられている。植物は生育パネルと呼ばれる長方形の板に開いた穴に支持材とともに埋め込まれ、そのパネルを使い、二等辺三角形を作るよう立てかける(写真1)。床とパネルで形成された三角形の中にはパイプが通っており、そこから霧状の培養液または水が一定間隔で放出され、植物の根はそれを吸収して成長する。光源には高圧ナトリウムランプを用いており、光合成効率を高めるためのCO₂施用も行われている。その結果、TSファームの植物は露地栽培に比べ、約2倍の成長速度が達成される。

●本システムの特徴

- ・栽培がマニュアル化されているため農業の経験が無くても栽培ができる
- ・完全無農薬栽培が可能であるため、洗わなくても食べられる
- ・露地栽培に比べ細菌数が低レベルである
- ・商品になる率が高く安定生産が可能である

ことなどが挙げられる。ビタミンなどの栄養成分については、露地の野菜とほぼ同等の品質が得られている。



写真1 噴霧耕の植物工場内部

噴霧耕という根部に固形物を用いない独自の溶液栽培技術が採用されている。播種、育苗、定植、収穫まで30日～35日で行われている。

7-2.空き店舗利用型イチゴ栽培型植物工場モデルの設計

高設栽培モデルと噴霧式水耕栽培モデルともにイチゴ栽培植物工場として共通して満足すべき設計条件は次の3点である。

- ①植物工場内は、無菌状態が簡単に維持・運用・管理できる設備設計とする。
- ②植物育成用の光は光転換効率が最も高い照明源を選定するとともに、光の利用度合いを極限まで高める工夫を行う。
- ③照明源の発熱除去システムとしてはヒートポンプ等の経済的なシステムを選定する。

また、トータル設備投資はイチゴ1株当たりで換算して、高設栽培の1.5倍以内に抑える(立地条件等の優位性をイチゴ売値の付加価値に換算)ものとする。

7-2-1.高設栽培型植物工場モデル

附表ー1. に示すように◎印が植物工場に即応用出来る項目であり、○印はモディファイすれば応用出来る項目を示す。

1) 栽培土

高設栽培に用いられている有機質培養土で、無菌状態が長期間保持でき、かつ、耐久寿命が10年程度の実績のあるものから選定する。

2) 栽培槽

少ない培養土でイチゴの根が充分機能を発揮出来るような環境を形成する栽培槽の形状を選定する。栽培密度が確保出来、且つ作業性の良いことが制約条件となるため、2条千鳥植えに適した栽培槽の形状を設計する。

3) 栽培システム

栽培密度を高設栽培の3倍以上にできる栽培槽のレイアウト設計を行う。

4) 光照射システム

照明器具の比較を附表－2に示す。

発光効率が高く、熱損失が少なく、かつ、投資・運用コストを基準に選定すると、当面は蛍光灯がベターである。

5) 温度制御システム

温度制御の対象は照明源となる発熱体と工場内温度であり、発熱体はヒートポンプを使って直接冷却を行い、工場内温度は既設の空調機があればそれを利用するシステムが効率的かつ経済的である。

ヒートポンプは配管を巡らし、照明源から直接熱吸収出来るシステムが望ましい。

附表－１．イチゴ高設栽培システムの植物工場応用に関する技術評価

項 目	高 設 栽 培	植物工場	テーマ
I. 要素技術			
1. イチゴ苗			
1) イチゴ品種	・一県一品種	品種選定	*周年栽培システムと関連して検討する
2. 培養土			■軽量有機培養土の開発
1) 物理特性	・緩衝能がたかい(有機質)	◎	
	・通気性に優れる	◎	
	・ミズミチができない	◎	
	・横浸透しやすい(点滴灌水自動化)	◎	
2) 化学特性	・有機質培養土	◎	
	①ピートモス；粒のサイズ		
	②ヤシ殻；あく抜き		
	③モミ殻；要熟成		
3) 培養土管理	・毎年補充；1割程度	○	・リサイクルシステムの検討
3. 栽培槽			
1) 素材	・透根性・透水性素材；細根発達、根巻き防止、根部酸素供給	◎	■培養土／栽培槽の開発
2) 形状	・オメガ型；上根伸張、熱交換	○	
4. 肥料			
1) 基肥	・緩行性固形肥料；肥効調節型	必要性検討	
	2年目以降の培養土特性		
2) 液肥	・有機培土では1液方式で良い	◎	(■有機液肥の開発：立命館大学)
	・点滴チューブ；自動化	◎	
	・廃液循環利用(栽培余剰水10-15%)	要検討	
3) 養液管理	・低濃度施用	◎	
	・簡易土壌EC測定；異常時精密測定	◎	
	・PHチェック；週1回	◎	
II. 栽培技術			
1. イチゴ育苗			*周年栽培システムと関連して検討する
1) 採苗	・親株の低温処理		
	・空中採苗(槽高さ1.5m)		
	・長い採苗期間(5月～9月)		
2) 育苗	・用土の影響排除；愛ボット		
	・小面積で大量の苗生産		
3) 定植	・密植システム	◎	
	・子苗の直接定植	要検討	
2. イチゴ栽培			■イチゴ栽培実証実験
1) 手入れ	・腋芽、花、葉の整理、ドロ芽除去	◎	・品質の作り込み
	・ミツバチ受粉	○	・生産技術確立
	・果柄の折れ対策	○	
2) 温度	・10℃～25℃	○	
3) 湿度		要検討	
4) 炭酸ガス	・1000～1500ppm	○	
5) マルチ	・果実面は黒色マルチ		
	・架台下透明フィルム		
III. システム	・高設栽培システム		■全体システムの設計
			経済性評価；売上高－固定費－変動費
1. 栽培システム	・長期1作		■周年栽培システムの開発
2. 空調システム			
3. 養液システム			
4. 照明システム			(■LED照明システムの開発：京大)

附表－２．各種照明器具の発光効率と発熱

照明器具の比較				
特性	LED 照明 (青色発光 LED と 黄色発光蛍光 体)	白熱電球	蛍光灯	HID ランプ (High Intensity Discharge Lamp)
発光強度	高出力品 30-60 lm (入力 1-2W)	800 lm (60W)	3,100 lm (40W)	40,000 lm (400W)
発光効率	15-20%	8-14%	25%	20-40%
エネルギー変換 率	15-20%	8-14%	25%	20-40%
発光スペクトル	470nm と 575nm にピーク	400nm から 700nm まで増加	蛍光体の 2 つの ピークと 400nm、 550nm、570nm に 水銀の輝線があ る	
色温度	4,600-15,000K	2,400-3,000K	4,200-6,500K	3,800-6,000K
演色性 (平均演色評価 数)	72	100	61-74	65-70
寿命	2 万-6 万時間	1,000 時間	12,000 時間	12,000 時間
発熱	熱損失 80-90%	熱損失+赤外放 射 90%	熱損失+赤外放 射 75%	熱損失+赤外放 射 80%
応答性	100 ナノ秒以下	0.15-0.25 秒	1-2 秒	安定まで数分
指向性	レンズ付きは指 向性あり	等方性	等方性	等方性
電流-光出力 (光出力 $\propto$ 電流 の n 乗)	比例関係 $n<1$	$n=6$ 程	比例関係 $n<1$	比例関係 $n>1$
温度-光出力	温度依存性小	温度依存性小	温度依存性大	温度依存性小

7-2-2.完全循環式水耕栽培型植物工場モデル

1) 溶液循環システム

調査・検討中である。

2) 栽培槽

溶液が均一にイチゴの根に吸収され、且つ、栽培密度が高い(面積当たり高設栽培の6～8倍)立体的レイアウトを検討する。

3) 光照射システム

光照明システムがミツバチの活動に干渉しない工夫が必要である。

4) 温度制御システム

基本的には高設栽培型植物工場モデルと同じシステムで検討する。

7-3.パイロットプラントの設計

平成22年度に設計する。

7-4.パイロットプラントの運営・管理システム

平成22年度以降に構築する。

参考資料

イチゴ栽培対応型植物工場の条件、特徴である

- ①立地環境からの制約で、大地と絶縁した状態で栽培せざるを得ないこと。
- ②設備投資の制約で、空間を効率良く活用する高密度栽培が行えること。
- ③ほぼ均一な環境を保持できるので、栽培環境を精度良くコントロール出来る。
- ④植物の生育状態を一様に維持できるので、観察・分析・計測データに基づき、きめ細かい育成・施肥コントロールが可能である。

等を勘案して、イチゴ対応型植物工場の調査・見学を行った結果、2つのシステムが植物工場に応用できる候補として残った。一つは、10数年前からイチゴのハウス栽培に用いられている高設栽培システムであり、いま一つは水耕栽培システムである。この2つの方式に基づく植物工場設計を行い、その運営・管理についてシミュレーションを行う。

事業採算から見た植物工場のポイントを突き詰めると次の三点に集約出来る。

- 一、 高設栽培に比較して3倍以上の密植栽培が出来ること
- 二、 密植栽培を可能にする効率的、経済的な光照射方法の開発
- 三、 合理的かつ経済的な照明発熱除去方法の開発

今後はこの2つの方式のパイロットプラントでこれらの実証実験を行い、イチゴ対応植物工場として最適なプロセスを確立する予定である。

5-6. イチゴ栽培対応型植物工場の調査

5-6-1.イチゴ栽培について：栃木県農業試験場イチゴ研究所の調査と試験場見学

日本においてはイチゴ品種の開発がメインで、各県農業試験場が競って新品種を開発を行い、その栽培方法とセットで農家に提供してきた。ところが横並び開発競争の弊害として、精緻な栽培技術ときめ細かな施肥対策に傾斜しがちである。このためイチゴ近接交配の影響もあり、品質は良くなり、大きく、甘く、美味くなったが、病気に弱く、少しの環境変化が収量に影響するようになった。

●平成21年度イチゴ研究所の研究課題

いちごの新品種育成、促成用新品種の育成、四季成性新品種の育成、業務・加工用品種の育成、組織培養系を利用したイチゴ萎黄病耐病性個体の作出、野菜の系統適応性検定、施設いちごの高収益生産技術の確立、昇温抑制技術を利用したいちごの安定生産技術の確立、園芸作物の品質向上と有利販売のための生育診断・予測技術の確立、いちごの生育診断基本調査、いちごの省力・快適化生産技術の確立、いちごの閉鎖型養液栽培における低コスト化と高品質化技術の確立、次世代型いちご経営たい育成の展開方向の解明、いちご経営の発展段階別経営体育成支援マニュアル策定、いちご王国づくりのためのマーケティングリサーチと評価等であり、多角的にイチゴ事業の全国制覇を目指した展開に取り組んでいる。

●イチゴ新品種育成とイチゴ品質の改良について

収量、味覚、形姿、香り、色等に優れた品種の開発を目指して品種改良がなされている。

その方法は実生のイチゴ14000株→300株→50株→10株→？と絞り込んで最後に残ったものを徹底評価するために、最低7～8年の期間が必要である。

日本の品種開発は、1990年代は「東の女峰」「西のとよのか」の2大品種時代で、2000年代に入り、東日本は「とちおとめ」に品種が切り替わり、西日本は「さがほのか」「さちのか」「あまおう」等品種の乱立状態になっている。

「とちおとめ」は2004年産で「とよのか」を抜いて、国内シェアナンバー1の品種になる。

●栃木式高設栽培システムークリプトモス培地による栽培方法の開発ー

1) 土壌栽培方法との比較

①ばらつきのない品質のイチゴが収穫できる。

土壌方式の品質が100～0%とばらつくとした場合、本方式は70～80%ののあたりで安定した品質で収穫出来る。

②収量が反当たり8トンと高収量である。

③手間がかからず、利益率が50%以上確保出来る。

2) 栽培方法の特徴

①吸水布を使用して廃液ゼロを達成する。

②炭酸ガス濃度は日照前の4、5時から燃焼方式で1500ppm 程度にしておき、日照と同時に光合成ダッシュをかける。

③日照時間は3時間ほど延長させる。

5-6-2.高設栽培システムの調査・見学

1) ジャット式高設栽培システム



このシステムの最大の特徴は、イチゴ栽培槽として均一な排水を可能にする高耐久培度用シートを使用していることである。

●ジャット式高設栽培イチゴハウスの調査・見学ー坂野イチゴハウスー

①栽培規模 0.8反の丈夫なハウスに6300株の章姫とゆめの香を栽培

②事業性

・初期投資:1980万円(イチゴ苗、肥料等全て含み、内ハウスに200万円)

県の営農支援無利子融資(2年据置、10年払い)

・収量:5～7トン(昨年)

- ・売上げ:初年度600万円、昨年は800万円 70%が直販で売値は1600円/kg
- ・知多半島ハウス農家の平均売上げは450万円/反であり、生産額は2倍である。

③経費

- ・人件費:栽培は坂野氏、パック詰めは奥さん(200パック/日)
- ・変動費 エネルギー費用 1万円/月
- ・肥料代 一定していないが30~40万円
- ・水道代;6000円/月
- ・他に育苗に要する経費が発生するが、経費率はかなり低い(推定15~20%)。

④栽培

- ・忠実にジャットのシステムを導入している。ただし、排水の再利用はしていない。
また、排水率は測定していない。施肥量は苗の状態で判断している。
- ・栽培マニュアル;特に無い、葉の色、形、実の色、味、香りの変化を注視しながら対応している。
- ・病気予防;10カ所/10a の割でイオウを毎日3~5時間ほど燻煙しているので病気は殆ど発生しない。

⑤土壌管理

- ・培度の分析は年1回実施している
ジャットでは収穫終了1ヶ月以上前に、反当たり5カ所(表面から10cmの所)の培度を採取して分析し、対処することを薦めている。
- ・培度の滅菌処理;60℃で3日以上処理が基準で、ここでは20日間実施している。
- ・培度の寿命は7~10年で8年の実績がある。坂野ハウスは4年目である。

⑥温度制御

- ・ハウス内気温;8℃以下になると自動で重油を焚く、3ヶ月間で500L
- ・栽培土地温;13℃以下になると自動で灯油ボイラー給湯、3ヶ月間で300L

⑦品種

- ・章姫:反応が素直で作りやすい、ただし周辺農家も章姫を栽培しており消費者に飽きられてきた。重さは50gまで。
- ・ゆめの香:酸味が適度で日持ちするが、うどん粉病が出やすい。

⑧ジャットシステムに対する坂野氏の評価

- ・カタログ記載通りの特徴と性能を発揮している。

*考察

ジャットシステムは技術的に完成度が高く、安定かつ低コストで持続的な生産を実現している。特に培度の寿命が長く、植物工場用培度として評価できる。

2) 奈良農試式高設栽培システムの調査・見学一鳥取県大山町森田イチゴハウスー

①栽培規模

丈夫な2重3連構造のハウス(面積は24m×69m)で、イチゴベッドは65mで20ラインである。別に苗床用に10aのハウスを持っている。章姫、紅ほっぺ、かなみ姫を主として13000株栽培しており、8~9トンの収穫を上げている。

②事業性

- ・初期投資:1600万円(ハウス、イチゴ苗、肥料等全て含み)
県の営農支援無利子融資を800万円、後は自己資金
- ・売上げ:JAに卸して販売しており、シーズンで500万円の売上げである。

③経費

- ・人件費：栽培は森田氏と母親を入れて5人のパートでまかなう。
- ・変動費：エネルギー費用として重油代が100万円と坂野ハウスの10倍である。
- ・したがって経費率は56%と高い。

④栽培

- ・肥料は自作の液肥と市販の液肥を6:4の割合で混ぜて使っている。
- ・自作の液肥は有機材料/酵素/ボカシを発酵させてつくる。
- ・栽培層は30cm幅で通水性の良いシートを使用し、排水受けのフィルムがある。
- ・栽培用土壌は奈良農試方式のピートモスに活性炭等を加えて作成し、株あたり5L有機培土を使用している。

⑤病気予防対策

通常は60回の化学農薬使用を20回に減らしている。化学農薬の使用をおさえるために、毒性や残留性の低い安全な「微生物農薬」を使用している。

⑥温度制御

- ・ハウス内気温：重油バーナーを焚き、80cm径ほどのポリエチのダクトを4列ほど配管。

⑦廃棄物

- ・イチゴ廃棄物が10トン程度発生して田んぼに放置しており、計算すると、1株あたり1kgの廃棄物が出る勘定になり、市街型植物工場では産業廃棄物として検討する必要がある。

5-6-2.イチゴ水耕栽培システムについて

1) イチゴ栽培用循環式水耕栽培システム—マザー牧場—

栽培規模：7棟のハウスに反当り20000株のさちのかと紅ほっぺ等を栽培

長さ：50m

高さ：1.8m、6段植え

溶液供給：μチューブ



- ・観光農園のため間隔を広く取っている。
- ・構造は塩ビ薄肉管の組み立て方式であり、3角形の頂点にあるパイプは100φ、斜辺の2本は80φでイチゴサポート部はやはり65φ程度の短管で構成される。
- ・パイプの間隔は20cm、段の間隔は20cm強である。
- ・ロックウールにはさまれたイチゴは長さ10cmほどの短管に支持され、斜管に挿入されているだけで、固定されていない。
- ・溶液は大塚化学の液肥を5種類ほど混合したものを上部の主管から各斜管へ連続的に24時間供給している。

- ・エアレーションは行わず、10トンタンクへの戻り水の落下効果を利用している。戻り水は毎秒数リッター程度である。
- ・蜂は導入始めに白いパイプのためか、10数%減少したとのことである。

2. 栽培システムの履歴

- ・開発はオーストラリアの A&B 社で、日本の販売代理店はアクアポニックス社：
（富士経の関連会社）の吉岡氏が導入、渡辺パイプに買収されて引き続き吉岡氏が販促、サービスを行なっている。
- ・Jサンセンはアクアポニックス社の工事下請けであり、社長の市川氏はマザー牧場の日本方式（第二期工事2棟分:50m×20m）をH13年に施工した。
- ・第一期は純オーストラリアタイプであり、施工も A&B 社が実施した。5棟建設し、高さが2.2mほどで高く、溶液濃度も日本の倍（EC:2.0）であった。日本方式は観光農園のために低くし、日本のイチゴに適した溶液濃度に改造している。
- ・オーストラリアでは短管当たり2株ずつ栽培していた。
- ・日本ではマザー牧場が最初の成功事例であり、他に10箇所ほどあるとのこと。

