

# 宇宙における植物生産技術の開発動向と展望

東海大学開発工学部生物工学科  
谷 晃

## 1 はじめに

宇宙での植物生産は、宇宙船や宇宙ステーション、月面基地等で滞在するクルー（搭乗員、滞在員）に対する食糧生産や CO<sub>2</sub> の O<sub>2</sub> への変換の点で必要と考えられており、その栽培技術を確立する必要がある。また、宇宙環境が植物に及ぼす影響を検討するためには、植物を地上と同様に栽培できる装置が必須である。特に、現在までは後者の観点から、宇宙環境に対応した装置の要素技術開発が試みられている。

地上と異なる宇宙環境としては、微小重力、宇宙線が挙げられ、宇宙線の影響を調べる暴露部を除く船内では、微小重力に対応できる要素技術の開発が必要である。微小重力とは、軌道上の宇宙ステーションや宇宙船に働く微小な重力のことを意味し、10<sup>-3</sup>~10<sup>-5</sup>G の範囲のものを指す。また、宇宙ステーションや宇宙船内で植物実験を行う場合、使用可能電力や空間は厳しく制限されており、省電力、省スペースの装置が求められる。

本稿では、これまでの宇宙での植物実験結果をレビューするとともに、宇宙における植物生産技術の問題点を整理し、それらを克服するために現在開発されている植物栽培技術を紹介する。また、今後の展望について私見を述べる。

## 2 現在までの宇宙実験結果

これまで宇宙での植物実験は、ロシア（旧ソ連）と米国の宇宙船（スペースシャトルなど）や、ロシアの宇宙ステーション Mir 内で行われてきた。1987 年以前の宇宙での植物実験結果については、高橋・菅（1987）のレビューが詳しい。この後の結果については、国際的な植物生理学雑誌を中心に報告されてきた。

宇宙環境、特に微小重力が植物に及ぼす影響に関しては、発芽、シュートや根の重力屈性を中心に検討されてきた（Halstead and Dutcher, 1987；谷、相賀, 1992）。最近のユニークな例としては、キュウリが発芽時に種皮から子葉を抜き去る際、種皮を押さえつける役目をするペグの形成位置が、重力の影響を受けるという報告がある（Takahashi et al., 2000）。これらは、地球上で植物が如何に重力に対して適応し、姿勢を制御できるようになったかを探る意味で重要な研究である。結果の一例として、サラダナの初期成長に及ぼす重力の影響を表 1 に示す。胚軸の伸長量は、宇宙で微小重力から 0.01G、

表1 宇宙と地上の異なる重力下で生育したサラダナの初期成長量の比較

	Length (mm)	
	Hypocotyls	Root
Flight microG	7.0 ± 0.1	14.1 ± 0.3
Flight Centrifuge 0.01G	6.6 ± 0.2	14.4 ± 0.4
Flight Centrifuge 0.1G	7.0 ± 0.1	17.2 ± 0.4
Flight Centrifuge 1G	6.1 ± 0.1	17.3 ± 0.4
Ground Centrifuge 1G	12.9 ± 0.6	27.1 ± 0.3
Ground Stationary 1G	13.2 ± 0.2	26.9 ± 0.4

(Merkys and Laurinavicius, 1990を改変した谷ら, 1995の文献を引用)

0.1G、1G で大きな差はなかった。根の伸長量は、重力が高いと高まる傾向にあった。この結果で注目すべきことは、地上の対象2区で、宇宙での4処理区と比べて、胚軸長、根長とも著しく高く、宇宙での実験は重力以外の要因がサラダナの生育を遅らせたと考えられることである。

他方、微小重力環境が植物の全生活環と遺伝的変異におよぼす影響を検討するため、栄養成長から生殖成長に至る宇宙実験も数例行われた。これまでに用いられた植物材料は、シロイヌナズナとコムギである。サリュート7号で育てたシロイヌナズナからは若干量の種子が得られた (Merkys and Laurinavicius, 1990)。しかし、シロイヌナズナではその稔性が低下し雌蕊の形態異常が (Kaung et al., 1995)、コムギでは不稔 (Halstead and Dutcher, 1987) が認められた。

このように、これまで行われた宇宙での植物栽培では、植物が地上と同様に正常に育たなかった。その後に行われた栽培環境計測から、次章で述べる微小重力以外の様々な栽培環境も地上と異なっていたことが認められ、少なからずこれらの環境要因が宇宙での植物生育に影響したと考えられるに至った。この状況では、重力が植物に及ぼす影響を宇宙実験で十分には明らかにできない。

### 3 宇宙では、微小重力以外にどのような環境が問題であろうか？

表2に問題となりうる環境要因を整理した。

これまで実験が行われてきた宇宙船内では、微小な振動が絶えず起こり、電磁波が発生していた。表1で宇宙の4処理区でサラダナの初期成長量が低いのは、このためでないかと考えられる (Halstead and Dutcher, 1987)。

また、密閉容器内で植物を育てると、内部のエチレン濃度が高まる (谷ら, 1993)。エチレン濃度の上昇は、上偏成長だけでなく、葉のクロロシスを招き光合成速度を低下させる (Tani et al., 1995; 谷ら, 1996a)。閉鎖環境内でのエチレン濃度の上昇は、栽培装置の規模が大きくなった場合でも起こりうるため、閉鎖生態系生命維持システム (CELSS) の植物生産でも詳細に検討されてきた (谷ら, 1995; 谷ら, 1996b; Tani et al., 1996; 谷ら, 1997; Tani et al., 1997)。

微小重力下では自然対流が極度に抑制され、花粉が重力によって柱頭へ落下し受粉するという過程が起こりにくい。このため、植物種によっては稔実歩合が著しく低下することも考えられる。

また、対流の抑制のため、葉面境界層抵抗が極度に高まり、葉のCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの交換

表2 微小重力および宇宙放射線以外で宇宙で問題となる植物栽培環境要因

船内の振動
船内の機器から発せられる電磁波
栽培容器内のエチレン上昇
自然対流が極度に抑制され重力に依存する受粉プロセスが行われにくい
自然対流が極度に抑制されるため光合成が低下する
自然対流が極度に抑制されるため蒸散が低下し、葉温が高まる
栽培培地内の水分分布が微小重力下と1G下で異なる
微小重力下では重力に影響される水移動がおこらない

が抑制される。このため、光合成速度と蒸散速度が低下する (Kitaya et al., in press)。蒸散の低下は奪われる気化熱量を低下させ、葉面境界層抵抗の増大による顕熱交換の抑制と同様に、葉の温度を高く維持する方向へ働く (北宅ら、1999)。

重力がほとんどない状況では、栽培培地内の水分分布が地上と異なる。地上では、培地下部ほど水分量が高い状態が普通であるが、微小重力下、親水性の培地ではシंकがない場合均一に分布する。培地に疎水性のものをを用いた場合、培地内で毛管力による水移動が起こらず、水供給個所と他の個所で水分量が極度に異なる。この現象が、Mir 内でコムギがうまく生育しなかった一因と考えられた (Salisbury, 1995)。

#### 4 微小重力下で植物の生育環境を適切に制御することで、重力が植物におよぼす影響を正しく解析できる

3章で述べたように、宇宙では重力がほぼゼロになるとともに、様々な環境要因が地上の対象区と異なる。この状況では、植物の成長・発達や遺伝的変異におよぼす重力の影響を検討する際に、重力以外の要因によって起こった現象を、微小重力によるものと誤って解釈してしまう恐れがある。

このため、微小重力下で植物の生育環境を適切に制御できる宇宙用植物栽培装置を開発する必要があると、強く認識されるようになってきた。必要とされる装置は、まず栽培空間のガス環境を適切に制御できる必要がある。CO<sub>2</sub>濃度やO<sub>2</sub>濃度の適正範囲への制御はもちろん、エチレンなどの微量有害ガスの蓄積を抑えるための除去システムあるいは換気システムを備える必要がある。また、栽培空間内に気流を起こし、葉面でのガス交換を地上と同様なレベルまで促進する。ただし、この場合、気流が強すぎると葉の

表3 現在開発中あるいは開発が完了した宇宙実験用植物栽培装置

国名	開発元	装置名	装置名略称	装置の詳細
ロシア、ブルガリア	Institute of Biomedical Problem 他	SVET		キャビンの空気をとりこむ、ガス濃度、温湿度の制御なし
米国	WCSAR, Wisconsin-Madison大学	Astroculture Plant Growth Unit	ASC-8	ガス濃度、温湿度を制御
米国	WCSAR, Wisconsin-Madison大学	Commercial Plant Biotechnology Facility	CPBF	ガス濃度、温湿度を制御
米国	NASA, Ames Research Center	Plant Genetic Bioprocessing Apparatus	PGBA	ガス濃度、温湿度を制御
米国	NASA, Ames Research Center	Salad Machine		高密度栽培システム、PGBAへの搭載を検討中
米国	NASA, Kennedy Space Center	Biomass Production System	BPS	ガス濃度、温湿度を制御
米国	NASA	Plant Research Unit	PRU	ガス濃度、温湿度を制御、ISSの大型遠心器への搭載用
日本	5大学共同研究グループ	Space Plant Box	SPB	ガス濃度、温湿度を制御
日本	NASDA	Cell Biology Experiment Facility	CBEF	温湿度制御、CO <sub>2</sub> は%レベルの制御、幼植物まで、遠心器つき
EU	ESA/ESTEC	European Modular Cultivation System	EMCS	ガス濃度、温湿度を制御、幼植物まで
EU	ESA/ESTEC	BIOLAB		ガス濃度、温湿度を制御、幼植物まで、遠心器つき
ドイツ	Berlin 大学	PHYTOSYS		ガス濃度、温湿度を制御

参考文献: Hoehn et al., 2000; Daunicht and Richer, 2000; Zhou and Turner, 2000; Zhou et al., 2000; Kliss et al., 2000; Brinckmann and Brillouet, 2000)

振動を招き、葉に加速度を与えることから、適度な気流速が必要である。栽培培地には、親水性で毛細管が発達したものをを用い、微小重力下で水の移動を容易にする必要がある。親水性培地では、疎水性培地に比べて 1 G 下でも水の分布が均一になりやすく、1 G 下と微小重力下で水の分布差異を小さくできる。

### 5 開発が進む宇宙用植物栽培装置

現在開発中の、あるいは開発を完了した栽培装置を表 3 に示す。これらの装置の多くは、4 章で述べた改良点を考慮し、様々な工夫が施されている。ただし、Mir に搭載されている SVET は、培地の水分環境の制御に注意が払われているものの、ガス環境は制御されず、キャビンの空気を直接利用する。このため、高 CO<sub>2</sub> 濃度や高エチレン濃度など不適切なガス環境になり、先に述べた水の不均等分布に加えて、コムギの不稔の原因になったと報告された (Salisbury et al., 1996)。米国は、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の研究所を中心に装置開発が進んでおり、スペースシャトルに搭載し、基礎性能の評価試験を度々行ってきた。ヨーロッパや日本でも、国際宇宙ステーション向けの装置開発が進められている。

### 6 日本製の栽培装置 - 微小重力場植物実験装置 (Space Plant Box, SPB) -

#### 6.1 SPB の概要

著者らは、1997 年より日本宇宙フォーラムの助成を受けて日本独自の栽培装置の開発を進めてきた (谷ら, 1999., Kitaya et al., 2000a)。この装置を微小重力場植物実験装置と名づけ、英語名を Space Plant Box (以下 SPB とする) とした。SPB の模式図を図 1 に示す。

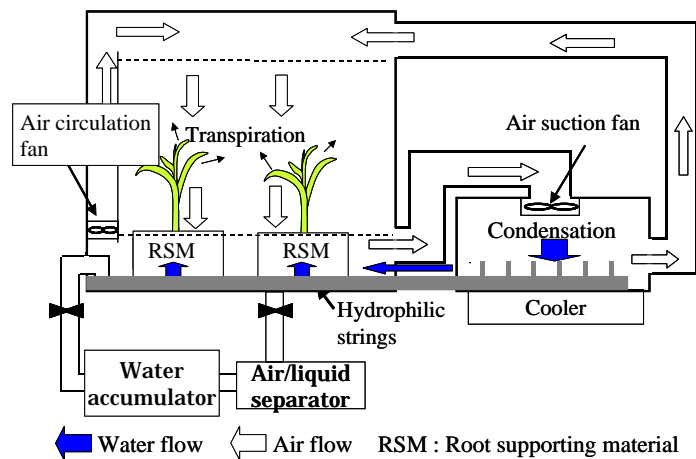


図 1 SPB の模式図

本装置の開発に当たっては、表 4 に示す要素技術を開発あるいは応用し、小重力を実現する航空機実験にて表 5 に示すいくつかの選定要素技術および新しい考案技術の性能評価を行った。これらの検討をもとにし、1999 年に試作機 1 号 (図 2) を製作し、その試作機で植物栽培を通して性能評価実験を行った後、一部に改良を加え 2000 年春に Breadboard Model を完成させた (図 3) (Tani et al., 2000a)。

本装置は、栽培チャンバーと冷却部からなり、栽培チャンバー内の温湿度、CO<sub>2</sub> 濃度、培地の水分含有量、冷却フィン面温度を制御でき、微量ガスの蓄積を抑えることができる。また、光合成と蒸散の速度を継続的に自動計測できる点で、他の装置を超える性能を持つ。根の支持体には、特製のセラミックヌードル支持体 (図 4) を用い、親水性のヌードル表面特性によって水移動が円滑に行える。

また、親水性のガラス繊維を用いた水循環システムは、水を輸送するためにエネルギーを必要としない（大熊ら，2000）。これは、水ポテンシャル勾配にそって移動する水に対する抵抗を、最大限に低減できる親水性ガラス繊維を用いることで実現できた（図5）。また、このガラス繊維を用いることで、繊維上でのカビの発生を完全に防止できる。

本装置は、冷熱面で除熱する空気交換経路以外に、チャンパー内のみで空気循環する経路を持つ。これら2経路を切り換え、かつ冷却フィン面温度を制御することで、チャンパー内空気から一定の顕熱を奪いながら、奪う潜熱量（水蒸気量）をコントロールできる（図1参照）。これによって、栽培

チャンパー内の気温と湿度を、同時に簡単に制御できる。また、チャンパー内空気循環経路を設けることによって、この経路での循環中に蒸散速度を計測できるようになった（チャンパー内の水蒸気増加速度 = 蒸散速度）。

## 6.2 SPBの性能

オオムギを67日間栽培した地上実験中のSPB内の気温、湿

表4 SPB用に開発した、あるいは改良した要素技術

- 下方気流による気流制御技術(a)
- 光触媒と炭素系吸着剤を併用した微量ガス除去技術
- 気流循環経路の制御による光合成・蒸散計測技術(b)
- フィン面温度と気流循環経路の制御による温湿度制御技術(b)
- 貯水タンク親水化による水供給技術(c)
- 気液分離技術(d)
- セラミックヌードル支持体(e)
- LED光源(f)
- ガラス繊維による水輸送技術(g)
- 冷却フィンの親水化による水蒸気回収システム(h)
- 緩効性肥料による養分供給方法(e)

- (a) Kitaya et al., 2000b, (b) Tani et al., 2000a
- (c) Tani et al., 2000b, (d) 中村ら, 2000 (e) 斎藤ら, 1999
- (f) Goto et al., 2000, (g) 大熊ら, 2000b, (h) 谷ら, 1999



実験装置正面と右側面

実験装置背面

図2 SPB 試作機1号の概観写真

表5 小重力環境を作り出す航空機実験で検討した項目

- ポトメータ法による蒸散計測(a)
- 対流抑制が葉温、光合成、蒸散にあたえる影響(b)
- 湿度センサの出力と重力の関係(c)
- 水供給システムの作動性能(d)
- ミストによる養液供給方法(e)
- 表面張力フィルターを用いた気液分離法(f)
- セラミックヌードル支持体内の水分布
- 水輸送用繊維の透水係数(g)
- 対流の抑制と湿度センサの応答

- (a) 小林ら, 1999 (b) Kitaya et al., in press
- (c) Tani et al., 2000c (d) Tani et al., 2000b
- (e) 後藤ら, 2000 (f) 中村ら, 2000 (g) 谷ら, 2000

度の変化を図 6 に示す。プログラムミスによる気温上昇が起こった 7 日目を除いて、気温は 20 ~ 20.5 °C、湿度は 55 ~ 65% の範囲内に維持できた。フィン面温度と湿度が一時的に大きく変化している部分は、故意にフィン面温度を変化させて制御可能な湿度範囲を調べる実験を行った時期のデータである。図 7 にフィン面温度を変化させた場合の、栽培チャンバー内の気温と湿度の変化を示す。気温を一定に維持しながら、湿度を 20 ~ 30% の幅で制御できることがわかった。ただし、この制御可能湿度範囲は、チャンバーへの熱負荷や植物の蒸散速度に依存する。図 8 は、1 時間ごとに 1 分間強制的に空気経路をチャンバー内循環に切り換え蒸散速度を計測した時の、栽培チャンバー内の温湿度の変化を示す。チャンバー内循環中は、水蒸気のシンクがないため水蒸気量が上昇し気温も高まるが、蒸散測定終了後直ちにチャンバー内空気は冷却部へ送られ、2 分以内に温湿度は制御範囲内に低下する。図 9 に、1 時間ごとに計測した蒸散速度の日平均値をプロットした、栽培期間中の蒸散速度の経日変化を示す。この結果から栽培期間中のオオムギの総蒸散量は、2630 mL と計算された。図 10 に栽培期間中のガラス繊維の含水率と積算水供給量の変化を示す。本装置は植物の蒸散水を回収し、再利用しているが、植物体内に蓄積された水や装置外へ漏れた水を外部から補う必要がある。そのため、培地下面の繊維の含水率を赤外線式水分センサでモニタリングし、設定値以下になると一定量を供給する制御を行った。この図から、栽培期間中繊維の含水率が低下するとともに、必要量の水が外部から供給され、含水率が一定値以上に維持されていることがわかる。栽培期間中の総供給水量は 90 mL で、実験中に植物が体内に蓄えた水の量は約 70 mL であったことから、約 20 mL の水が SPB から外部へ漏れたと推測された。SPB の水循環効率を

$$\text{水循環効率} = \{(\text{総蒸散量} - \text{漏れによる損失量}) / \text{総蒸散量}\} \times 100$$

として計算すると、99.2% と高い水循環効率であった。図 11 に栽培期間中のオオムギの光合成速度の変化を示す。光合成速度は、蒸散速度と類似の変化傾向を示した。栽培期間中にオオムギが吸収した総炭素量は 0.26 mol と計算され、これは栽培終了時に計測したオオムギの乾物重から概算した固定炭素量 (0.31 mol) と大差なかった。

このように、SPB は植物の栽培環境を長期にわたって適切に制御でき、物質交換量や循環量を正確に把握できることを確認した。

### 6.3 SPB の開発課題

地上での栽培実験で、SPB は植物を正常に栽培可能なことを確認した。また、SPB に用いた微小重力対応の要素技術性能を、0.01 ~ 0.02G の小重力を実現する航空機放物線飛行実験にて評価し、必要に応じて改良を加えた。今後、SPB の装置自体の微小重力下での性能評価を行う必要がある。

さらなる開発課題としては、植物の生育状況をモニタリングできる技術の開発あるいは応用が必要である。植物の形態、葉温、蛍光などを非接触で計測し、できるだけ多くの植物生理・生体情報を収集できるシステムを装備したい。また、今後日本独特の植物

栽培実験として水稻の栽培を行う必要があると著者は考えており、水稻栽培用根圏環境制御装置の開発を進めていきたい。水稻栽培システムの開発は、SPB が今後日本の装置としての独自性を強調するためにも、ぜひ進めていきたいと考えている。

## 7 宇宙での植物生産の展望

現在、スペースシャトルで行われている植物実験では、重力屈性機構の解明が中心であり、植物ホルモン分布、酵素活性、Ca などのイオン濃度、膜電位計測などに加えて遺伝子レベルでの解析が行われつつある。一方、国際宇宙ステーションで予定されている植物実験は、栽培期間を長く取れることから、発芽から栄養成長を経て生殖成長にいたる実験、いわゆる Seed to seed 実験に焦点を絞ったものが多数行われる予定である。これらの実験は、宇宙環境が植物の生殖成長や遺伝的変異におよぼす影響の解析を試みるものであり、生物学的な基礎課題を明らかにするだけでなく、将来的な宇宙における植物生産の基礎課題を解明し、長期の有人宇宙活動にとって不可欠な生命維持システムを確立するためにも重要である。このように宇宙での植物実験は、短期の実験で解析可能な重力屈性などの反応メカニズムの解析から、長期の実験ではじめて結論が出る植物の生産、食糧供給という課題へ変わりつつある。

現在、著者らのグループや各国の研究者が開発を試みている植物栽培装置は、電力、空間の点で制約が厳しく、微小重力対応の技術開発も不十分である。その意味で、装置開発は困難を伴うが、取り組み甲斐のある研究課題でもある。現在まで、開発された栽培技術は、どの装置に関しても宇宙での長期の性能評価はまったく行われていない現状であるが、この状況は国際宇宙ステーションの完成、運用開始とともに一変するであろう。国際宇宙ステーションが完成し、運用が本格化すると、その後の十年で栽培技術は確立されるであろう。2020 年までの 20 年間で栽培技術開発上、最も重要な期間になると予想される。その後の食糧生産へ向けての装置の大型化は、空間と電力の制限がなくなる、あるいはあったとしても極めてゆるいものになるため、それほど困難を伴わないであろう。また、月面での閉鎖生態系 (or 制御生態系) 生命維持システム (CELSS) における植物生産装置の開発では、重力が地球の 1/6 と小さいが存在するため、技術移転は容易である。

## 8 謝辞

本研究の共同研究者の東北大学高橋秀幸教授、大阪府立大学北宅善昭助教授、東京大学後藤英司助教授、宇都宮大学斎藤高弘助教授には、研究を通じて有益な議論を重ねることができたことを感謝する。本研究は、日本宇宙フォーラムの地上公募研究の助成金を受けて行った。ここに、謝意を表する。

## 9 引用文献

- Brinckmann, E., Brillouet, C., 2000. SAE Technical Paper Series 2000-01-2472.
- Daunicht, H. J., Richer, C., 2000. SAE Technical Paper Series 2000-01-2474.
- Goto, E., J. Tsujimura, H. Takahashi, Y. Kitaya, T. Saito, A. Tani, 2000. Proceedings of the XIV Memorial CIGR World Congress 2000. 1799-1802
- 後藤英司・辻村淳之助・高橋秀幸・北宅善昭・齋藤高弘・谷晃, 2000. CELSS 学会平成 12 年度年次学術講演会要旨集 p.41-42
- Halstead, T. W., Dutcher, F. R., 1987. Annu. Rev. Plant Physiol., 38 : 317-345.
- Hoehn, A., Stodieck, L. S., Clawson, J., Robinson, E., Seelig, H., Heyenga, A. G., Kliss, M. H., 2000. SAE Technical Paper Series 2000-01-2232.
- Kaung, A., Musgrave, M. E., Matthews, S. W., Cummins, D. B., Tucker, S. C., 1995. Amer. J. Bot. 82 : 585-595.
- 北宅善昭・川井優幸・鶴山浄真・後藤英司・高橋秀幸・谷晃・齋藤高弘・清田信. 1999. 日本農業気象学会・日本生物環境調節学会・日本植物工場学会合同大会 p.322-323
- Kitaya, Y., A. Tani, E. Goto, T. Saito, H. Takahashi, 2000a. Adv.Space Res. 26(2) : 281-288
- Kitaya, Y., Kawai, M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T., Kiyota, M., 2000b. Proceedings of the XIV Memorial CIGR World Congress 2000. 1008-1013
- Kitaya Y., Kawai, M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T., Kiyota, M., Adv. Space res., in press.
- 小林有一・齋藤高弘・志賀徹・荒川陽司・高井政和・島貫雅一・谷晃・北宅善昭・後藤英司・高橋秀幸, 1999. CELSS Journal. 12(1) : 9-14.
- Kliss, M., Heyenga, G., Hoehn, A., Stodieck, L., SAE Technical Paper Series 2000-01-2476.
- Merkys, A. J., Laurinavicius, R. S., 1990. In "Fundamentals of Space Biology". Japan Sci. Soc. Press, p69-83.
- 中村智丈・齋藤高弘・福村一成・志賀徹・谷晃・後藤英司・北宅善昭・高橋秀幸, 2000. 平成 12 年度日本農業気象学会・日本生物環境調節学会大会講演要旨集. p.456-457
- 大熊健・谷晃・齋藤高弘・後藤英司・高橋秀幸・北宅善昭. 2000. 日本植物工場学会平成 12 年度大会 p.28-29
- 齋藤高弘・中村智丈・志賀徹・安藤達男・谷晃・高橋秀幸・北宅善昭・後藤英司. 1999. 平成 11 年度日本植物工場学会・日本農業気象学会・日本生物環境調節学会合同大会. p.324-325
- Salisbury, F. B., Bingham, G. E., Campbell, W. F., Carman, J. G., Bubenheim, D. L., Yendler, B., Jahns, G. 1995 Life Support and Biosphere. 2 : 31-39.
- Salisbury, F. B., Bingham, G. E., Campbell, W. F., Carman, J. G., Hole, P., Gillespie, L., Nan, R., Jiang, I., Bubenheim, D. L., Yendler, B., Sytchev, V. N., Podolsky, I. B., Levinskikh, M., Chernova, L., Ivanova, I. 1996 SAE Technical



**Paper Series, 961392..**

谷晃・山南明久・清田信・北宅善昭・相賀一郎. 1993. *CELSS Journal* 5 : 11-16.

谷晃・相賀一郎, 1995 新版-生物環境調節ハンドブック 「重力と植物, (1) 植物」の  
章担当 養賢堂

Tani, A., Kiyota, M., Aiga, I. 1995. *Biological Sciences in Space* 9 : 314-326.

Tani, A., Kiyota, M., Aiga, I., Nitta, K., Tako, Y., Ashida, A., Otsubo, K., Saito, T.  
1996. *Adv. Space Res.* 18(4/5). 181-188.

谷晃・齋藤隆雄・清田信・相賀一郎. 1996a. *生物環境調節* 34 : 37-43.

谷晃・清田信・相賀一郎. 1996b. *生物環境調節* 34 : 29-35.

谷晃・清田信・相賀一郎. 1997. *生物環境調節* 35 : 41-46.

Tani, A., Kiyota, M. 1997. *Adv. Space Res.* 20(10) : 1923-1926.

谷晃・大熊健・田中茂樹・齋藤高弘・北宅善昭・後藤英司・高橋秀幸, 1999. *CELSS Journal*.  
12(1) : 21-25.

Tani, A., T. Okuma, E. Goto, Y. Kitaya, T. Saito, H. Takahashi, 2000a. *Proceedings  
of the XIV Memorial CIGR World Congress 2000.* 1008-1013

Tani, A., T. Saito, Y. Kiyota, H. Takahashi, E. Goto, 2000b. *Environ. Control in Biol.*  
38(2) : 89-97

Tani, A., Y. Kitaya, E. Goto, T. Saito, H. Takahashi, 2000c. *Journal of Agricultural  
Meteorology.* 56(3) : 209-215

谷晃・梅木利春・大熊健・齋藤高弘・後藤英司・高橋秀幸・北宅善昭. 2000. *日本植物  
工場学会平成 12 年度大会講演要旨集* p.26-27

高橋秀幸・菅洋, 1987. *宇宙船の植物学、学会出版センター、pp142*

Takahash, H., Kamada, M., Yamazaki, Y., Fujii, N., Higashitani, A., Aizawa, S.,  
2000. *Planta* 210 : 515-518.

Zhou, W., Duffie, N., Mookherjee, B., 2000. *SAE Technical Paper Series*  
2000-01-2474.

Zhou, W., Turner, M., 2000. *SAE Technical Paper Series* 2000-01-2473.



図3 SPB Breadboard Model の写真



図4 根の支持体（培地）に用いるセラミックマードル

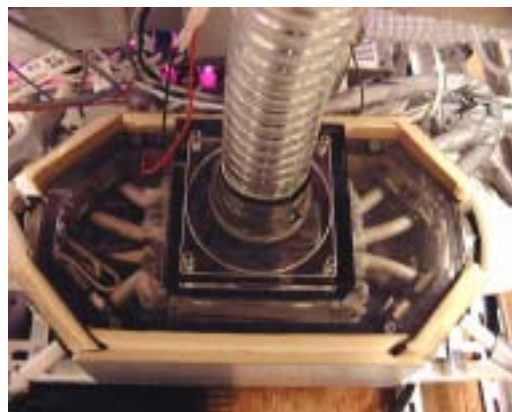


図5 冷却部内のフィン面を被ったレーヨン繊維からつながる水輸送用親水性ガラス繊維

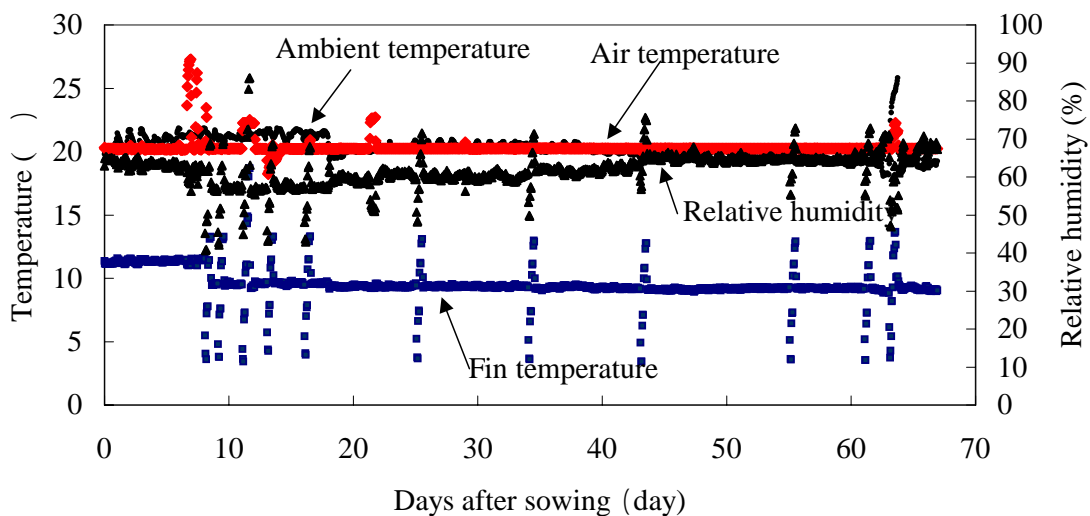


図6 67日間のオオムギ栽培中のSPB内気温、湿度、冷却フィン面温度の推移

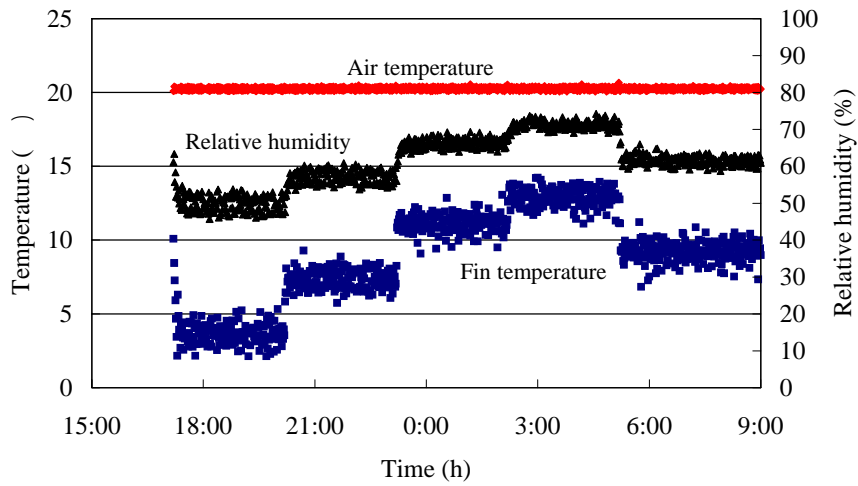


図 7 フィン面温度を変化させた場合の、栽培チャンバー内の気温と湿度の変化

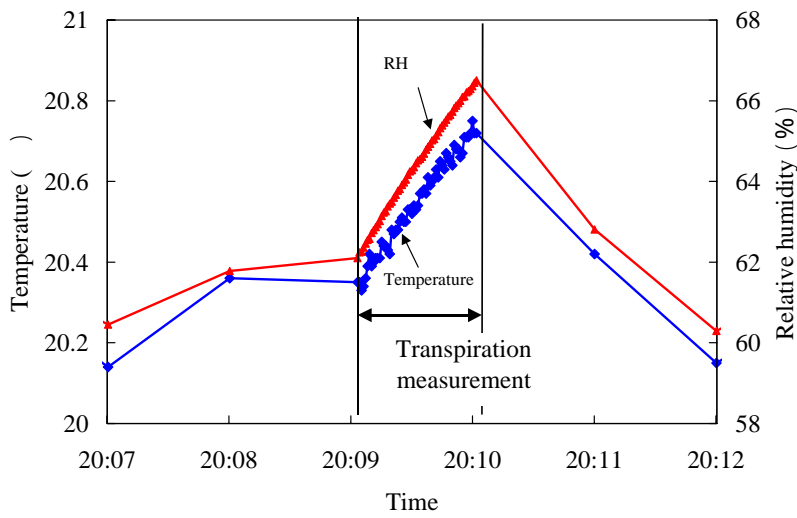


図 8 蒸散測定中の栽培チャンバー内の温湿度の変化

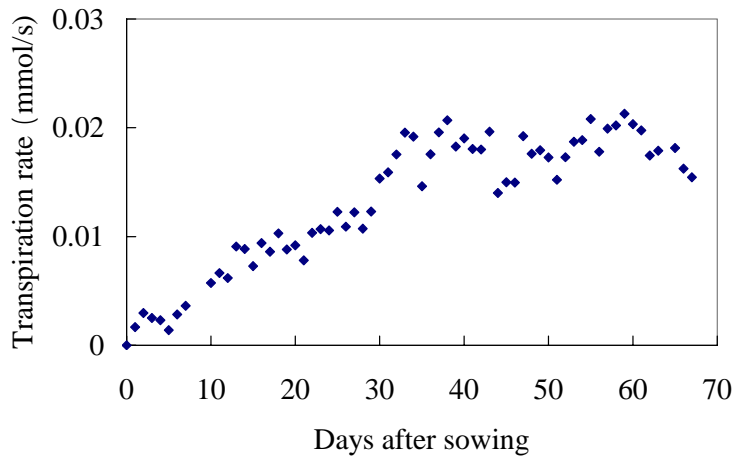


図 9 栽培期間中の蒸散速度の推移

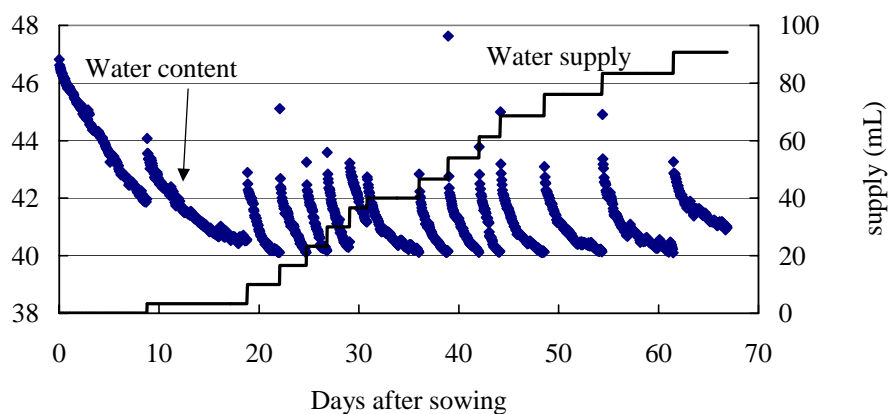


図 10 栽培期間中のガラス繊維の含水率と積算水供給量の変化

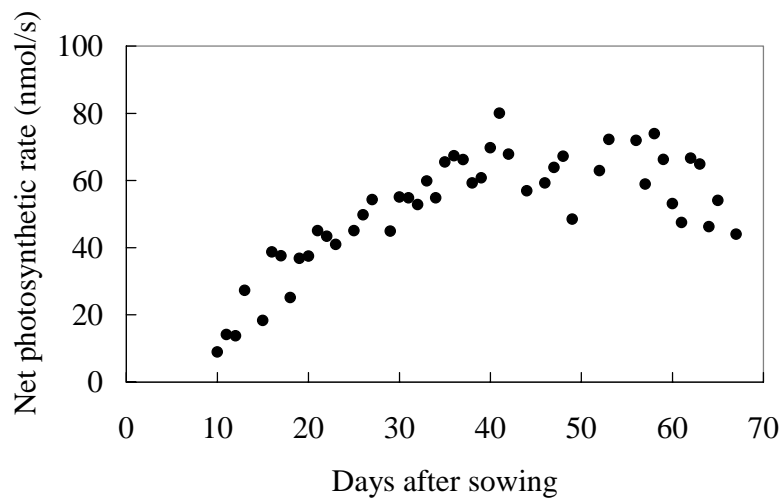


図 11 栽培期間中のオオムギの光合成速度の変化