

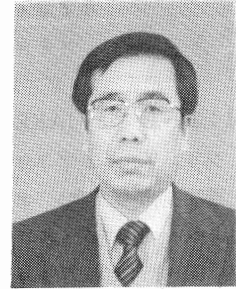
■ 展 望 ■

完全人工制御型植物工場と展望

Plant Factory and its Prospect

中山 繁 樹*

Shigeki Nakayama



1. はじめに

植物工場（野菜工場）と呼ばれるべきものが始めて出現したのは、1950年代から60年代にかけてである。デンマークのクリテンセン農場や、オーストリアのルスナー社で太陽光併用型のシステムが開発された。だから、植物工場は決して新しいものではない。

ところが、ここ数年、植物工場への関心が急速に高まってきたのは、どういうわけであろうか。また、積極的という意味での関心が、農業を専門とする分野より、どちらかというとなら農業分野で先行していることにも注目しなければならない。

このような状況をどのように解釈するかが、植物工場を展望するにあたっての出発点になると思う。これまでの農業の先行きに重大な障害があるらしいという漠然とした認識、農業の工業化を一つの市場と見る期待感、農業はおいそれと変わるようなものでないとする伝統的感覚、これらが混在しているのが現状と見られる。このような現状認識が成り立つとするならば、次の段階として、農業の歴史的流れ、工業技術からの発想をベースとした植物工場の理念、そして技術開発動向を議論し、見る必要がある。

この小論はこのような観点から植物工場を展望しようとするものである。筆者は、このような大きな課題に対して、専門的に調べているわけではない。植物工場の開発に直接関係している者の一人として、日頃考えていることを述べるだけである。いろいろのところで発表したことと重複するところがあることと合せて、予め御承願しておきたい。

2. 植物工場とは

今のところ、植物工場に対して一義的な定義は与え

* 三菱電機樹木応用機器研究所 環境・産業機開発部

バイオ機器グループグループマネージャー

〒661 尼崎市塚口本町8-1-1

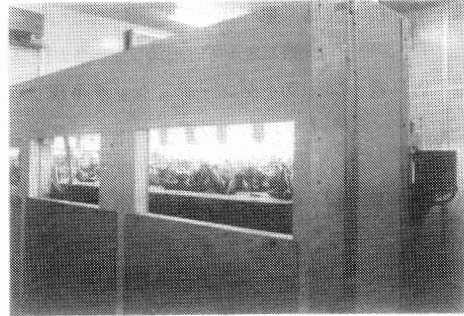


図-1 実用モデルプラント（三菱電機）

られていない。植物工場という用語に抵抗もある。ただ、混乱を避けるために、ここで述べようとしている植物工場とはどのようなものであるかを先ず始めに明確にしておく必要がある。

図-1は、三菱電機で開発された植物工場の実用モデルプラントである。苗を生産するための育苗装置と、その苗を高速栽培する促進栽培装置から構成されている。いずれにおいても、太陽の代わりにランプ、土の代わりに養液が使われ、植物の生育に関する主要な環境条件が、天候などの自然条件から独立してシステムチックに制御されている。

育苗装置では、光条件、気温、湿度、風速と養液条件（水温、養液濃度および溶存酸素濃度）が制御されている。ただし、湿度と風速はそう厳密な制御でなくともよい。環境条件は、均一な苗を生産する目的から、比較的穏やかに設定されるのが普通である。

促進栽培装置における環境制御は、育苗装置のそれに加えて炭酸ガス濃度も制御され、経済性を考慮してなるべく高速栽培になるよう設定される。生産方式は流れ作業的な連続生産である。5グラム前後の苗が投入されると移動機構により移動され、一定の滞留時間を経て収穫物として苗の投入と同期して取出される。

植物工場では、育苗と促進栽培が連続かつ並行して行われるので、連続的なコンベア生産が可能になる。

以上がこれから述べる植物工場の概要であるが、太

陽光を使いランプを補助とする太陽光併用型もあることを付言しておく。

3. 農業の流れ

植物工場の展望にあたって、従来の農業をどのように見るかが重要になる。そこで、農業の流れを概観することにしよう。図-2に示した人口の推移は、この流れを象徴的に表現しているように思われる(1)。

3.1 農業の誕生

人類は、この地球上に発生して以来相当の長期間、他の動物たちと同じように野生の動物や植物を採取することにより、生命を維持してきたことであろう。農業以前の時代である。

この時代は人類も自然生態系に組込まれており、他の構成員との相互関係のなかで互いにバランスをとって生存していた。生態学の教えるところでは、このバランスは、各構成員が充分満足した状態で成立しているのではない。採取し得る品種や量に制限があり、採取に要する時間は長く労力も大変なものであったと想像できる。ところが幸か不幸か、人類はこのバランスにひとり満足できず、独自の行動をとった動物であった。

農業と呼べるものは焼畑栽培により始まったと見ることができる。植物を積極的に効率よく栽培しようとする意思が明確に現われたであろうからである。焼畑農業により生産量は飛躍的に拡大され、ある程度の定住をも可能にし、次の発展の基盤を作った。

焼畑農業は人の意思による自然破壊であり、明らかに生態系のバランスを破るものである。自然破壊により農業が始まったのは皮肉なことと言わなければならない。

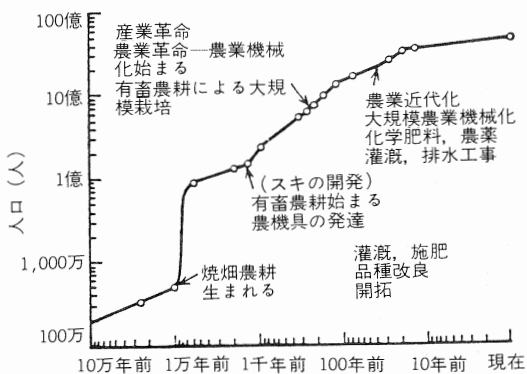


図-2 世界人口の変遷と農業技術の発達 (サイエンティフィック・アメリカンから矢吹作図)。

3.2 農業の発展

その後、農地の開拓、農機具、家畜利用、農業機械、かんがい、化学肥料、農薬などが導入開発され、生産量はさらに大幅に拡大していった。図-2を見るとこの関係がよくわかる。生産の場の人工化をさらに高度に推し進めたことといえる。

このような流れと並行したもう一つの重要な流れは植物の品種改良である。この改良とは植物の有用部位の品質と生産性の向上である。この過程で、栽培植物と呼ばれる奇形ともいえる人工植物が開発された。現在栽培されているほとんどの作物は栽培植物である。栽培植物は周知のとおり極めて有用な植物であり、これがなければ、今日必要とする生産量はとても確保できない。

ところで、栽培植物は決して野生植物でないことは、以外に認識されていない。栽培植物の栽培には、人の保護がなければならないことに注意しなければならない。肥料を与え、害虫や共生する雑草を駆除し、病害から守らなければならない。栽培植物の栽培は、生産の場の人工化と両立させることによって始めて成立するものである。

3.3 農業の問題

以上で見てきたような方向で農業は変化・発展してきたが、一貫して変わらない濃みがある。栽培植物も植物一般が持つ基本的通性を残し持っていることである。植物は動物と異なり、自ら好ましい環境へ移動できない生物であり、このために、その生育は環境条件に決定的に依存する。栽培植物の栽培は、不安定な脱自然生態系のなかにあって自然に依存するという矛盾を内在することになった。

この矛盾から次のような問題が必然的に派生したと考えることができる。

- ① 生産立地制約が強い
- ② 生産が天候等の自然条件に左右され不安定になる
- ③ 労働条件が相対的に悪い
- ④ 農業使用が避け難い
- ⑤ 化学肥料の多用による地力の低下
- ⑥ 連作障害

この他、周辺からのインパクトとして、後継者問題、農地の都市化などもある。

3.4 今後の農業

このような問題に対して、いろいろのアプローチがある。

その一つの大きな流れはバイオテクノロジーの導入であることは、多くの認めるところである。新しい育種や低毒農薬の開発が期待される。これは、歴史的な観点で見ると、従来の流れを継続する本流をなすものであると思われる。

第二の方向として、自然への回帰もあるであろう。有機農業などはその一つである。ある意味では流れに逆行するもので、土地と労働力の確保が大前提になる。

第三は、徹底した自然依存からの脱却を目指すものである。農業の流れが自然からの脱却であったとする見方が成り立つとするならば、一方の大きな流れとしてそれを徹底的に追及することは当然考えられてよいはずである。いうまでもないが、これが植物工場を意味する。

これ以外にもいろいろあり、養液栽培、貯蔵技術あるいは情報化なども重要であるが、ここでは考えない。

4. 植物工場の理論

4.1 植物の物質再生産モデル

葉などの光合成系において生産されたデンプンなどの光合成産物は、光合成系と根などの非光合成系に分配され、そこで根から取り入れられた各種養分との一連の生化学的反応によって両系の構造体へ転形される。このような過程を通して、両系が量的に拡大され、結果として構造的に潜在生産力が増強されることになる。つまり、植物は生産能力を拡大しながら生長していくという注目すべき特性を備えている。これを植物の物質再生と呼ぶ²⁾。

図-3は、門司³⁾により提案された物質再生産のモデルである。植物を光合成器官と非光合成器官に大胆に分けるモデルであるが、示唆に富むので少し詳しく説

明することにする²⁾。

光合成器官の重量をFとすると、単位時間に生産される総光合成産物量 ΔP_g は、 $\Delta P_g = aF$ で表わされると仮定する。ここで、aは光合成速度定数である。続いて、 ΔP_g は光合成系と非光合成系に分配比mおよび(1-m)の比率で分配される。ここで、これらの一部は、植物の生命維持のためのエネルギー源にするために、酸化(呼吸)されて消費される。これを維持呼吸といい、その消費量は $r_f F$ 、 $r_c C$ である。Cは非光合成系の重量、r維持呼吸率である。添字f、cは光合成系、非光合成系を表わす。分配された総光合成産物からの呼吸消費量を差し引いた残りは、k(転形率)の比率でそれぞれの器官へ転形される。これも一連の生化学反応であり、それを進行させるためのエネルギー源はやはり産物の一部を呼吸消費して得られる(構成呼吸)。この呼吸率はその定義から $(1-k)/k$ になる。

a, m, rおよびkは環境条件に依存するが、環境条件が一定でこれらが時間に依存しない定数であるとすると、光合成系と非光合成系の重量増加速度が得られ、それらを解くと次式が得られる。

$$F = F_0 \cdot \exp(\alpha t), \quad \alpha = (ma - r_f)k_f \tag{1}$$

$$C = \frac{(1-m)ak_c F_0}{\alpha + B} \{ \exp(\alpha t) - \exp(-Bt) \} + C_0 \exp(-Bt), \quad B = r_c k_c \tag{2}$$

ただし、 F_0 、 C_0 はFとCの初期値であり、枯死は無視している。

このモデルから、光合成系の重量は指数的に増加するという結果が導かれる。非光合成系も時間がある程度以上長くなると、

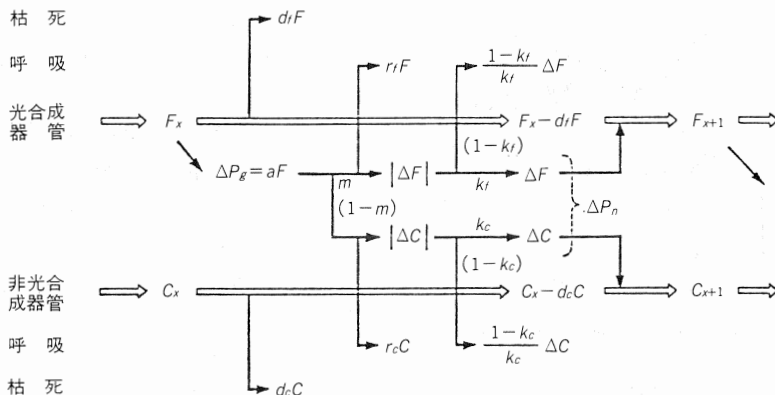


図-3 植物の物質再生産モデル²⁾

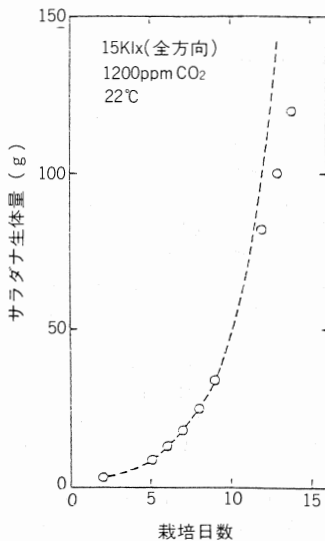


図-4 全方向照射によるサラダナ生長カーブ

$$C = \frac{(1-m)akc}{\alpha+B} F \quad (3)$$

と近似でき、やはり指数関数的生長になる。また、FとCの比率は各定数で決り一定になることをも示している。

このモデルは非常に単純化したものであるが、環境条件が一定である場合には、かなりの程度まで成り立つと考えられる。図-4は、一定の人工環境のもとでサラダナを栽培したときの生体重と栽培日数の関係をプロットしたものである(4)。破線は指数関数曲線であり、それと比較すると、そうかけ離れたものでないことがわかるであろう。

このモデルを基礎として植物の生育を見ると、次のような観点を導くことができる。

- ① 環境制御により、植物が孤立系で本来持っている物質生産能力を最大限発揮させることができる(高速栽培)
- ② 環境制御により分配率の制御が可能であれば、それにより有用部位の生産効率が高められる可能性がある(高効率栽培)
- ③ 植物工場における栽培技術の中核は、各定数を最適値に保持、かつ制御することである。したがって、任意の環境制御は植物の効率的な栽培に重要な意義を持つ(工業技術からの発想)

4.2 植物工場の特長と欠点

植物工場は次のような特徴を持つであろうことは容易に理解できる。

- ① 生産は天候に左右されない
- ② 生産立地条件を問わない
- ③ 生産量および品質の安定化が計れる
- ④ 軽労働である
- ⑤ 労働生産性、土地生産性が高い
- ⑥ 無農薬栽培が可能
- ⑦ 種々の工業技術を導入し易い

欠点は経済性にある。すなわち、

- ① 証明電力を中心とした電力消費が大きい
- ② 設備費が高い

ことがあげられる。しかし、今の農業に前述したような問題があるとする背景のなかでは、自然栽培との単純な対比による経済性のみで評価されるべきでない。植物工場の特徴の内容は、多くの面で農業の問題の裏返しともいえるもので、評価すべき内容を含んでいるからである。

4.3 植物工場の意義

植物工場において、環境条件を任意に制御することは極めて重要なことである。これによって、自然依存の農業で不可能、若しくは困難な生産が可能になり、農業の本質的な問題のいくつかが解決可能になるわけである。また、経験を要する複雑な栽培技術から解放され得ると考えられることから、非農業分野との重なりができ、非農業分野での新規事業と見なし得るようになったと考える。これが非農業分野での関心の高さの一因と思われる。

しかし、実際には生産費の点で制約があることは既に述べたとおりであり、万能の生産手段にはなり得ない。

このように考えると、植物工場の意義は自ずと明らかになるであろう。簡潔にまとめると、いろいろの工業技術を農業生産に比較的容易に適用できる場であり、それによって農業の問題のいくつかを解決するための役割を担うと共に、多様化するニーズに答えるところに意義がある。

5. 植物工場の現状

5.1 内外の現状

国内外の現状として日経バイオテック(5)の調査がよくまとまっているので、表1に引用させて戴く。この他にも国内企業で開発に着手したところが幾つか有ると聞いているが、不明な点が多いので省略する。

この他の最近の動向として、農林水産省による「施設園芸新技術実用化促進事業」の発足がある。これは、

表1 主な植物生産システムの現状（日経バイオテクより）⁵⁾
 （人工光を単独で利用する……レタス、サラダ菜、ホウレンソウなど葉菜類以外は実用化が難しい？）

企業・団体・研究所名	技術の内容・分類・規模	研究開発、実用化の現状
ハイシャトルグループ (京都、静岡、福岡の農家)	人工光、水耕、非移動式 各農家の栽培面積は約300㎡ 人工光の唯一の実用例	5年ほど前に京都ではじめられ、現在では4～5件ほどの農家がレタスなどを生産している。300㎡の栽培室でレタスが毎日500個ほど収穫できる。スーパーと契約し、無農薬の新鮮な野菜としてレタス1個が約100円と高値で出荷されている。人力に頼る作業が多く、毎日安定に生産を続けるためかなりの労力を費している。
米国General Mills(GMI)社	人工光、水耕、移動式 4500㎡の大型工場を建設 播種、発芽、収穫など各行程を自動化	10年の研究を経て種蒔きから収穫まで自動化したシステムを開発、植物育成面積が約4500㎡(2階構造)で実証した。82年に日本企業へ売り込みに来たが、今のところ具体化していない。現在は、GMI社の研究員5～6人がGMI社と合意の上でPhyto Farm of America社を設立、事業化を進めている。ハーブの栽培も試験している。
日立製作所基礎研究所	人工光単独及び太陽光との併用 水耕、移動式 70㎡×2の研究施設	73年から研究を始め、葉菜類については生育に最適な環境条件の検討など基礎データの収集は一段落。植物工場の納入実績は4件。船橋ラポートのダイエー店舗内に66㎡の商業生産プラントを納めた他、筑波科学万博の展示も担当し、都内の2企業の研究用を納めた。
三菱電機応用機器研究所	人工光、水耕、移動式 5㎡の研究用施設	81年から研究を始めた。発熱量の少ない蛍光灯を光源に用い、植物から20cmほどに近接した位置で照射させ、電力の消費を低減できる見通しを立てた。86年3月まで兵庫県伊丹市と共同で植物工場の研究を進めてきた。
東洋エンジニアリング	人工光、水耕、 320㎡を建設	千葉大学と共同で研究を進め、新技術開発事業団からの委託で、寒冷地向けシステムを開発、86年3月までに1億4100万円の開発費で、約320㎡の工場を釧路に建てた。寒冷地とともに、中近東諸国向けにも野菜工場を売り込んでいる。

日本施設園芸協会が委嘱を受けて進めるもので、四つの分科会の一つとして「高度集約生産分科会」が設けられ、生産現場に導入し得るシステムを産・官・学の協力のもとで開発しようとするものである。また、61年5月に東京晴海で開催された「施設園芸新技術展」も注目されてよい。国内初の試みであったが、予想を

越える4万3千人の入場者があった。学会においても計測自動制御学会で「農業における情報・計測・制御」調査委員会が5年前に発足し、地道な活動が行われている。

5.2 技術課題と開発の一動向

これまでの議論から明らかなように、植物工場の技

表2 全方向照射によるサラダナ栽培実験

光強度 ($\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2}(\text{s}^{-1})$)	CO ₂ concentration (ppm)	速度定数 (day ⁻¹)	葉の根の 重量比 (g/g)	葉面積重量 (mg/cm ²)	含水率 (%)
250 (15klx)	350	0.34	3.5	5.1	90.1
	950	0.31	3.8	6.4	90.3
	2,000	0.32	3.2	6.1	87.2
	4,000	0.33	3.6	8.1	86.4
164 (10klx)	350	0.26	4.4	4.3	91.0
	1,200	0.31	4.5	5.2	91.3
	4,000	0.27	3.9	4.9	89.2
85 (5klx)	350	0.21	5.3	3.7	92.2
	1,200	0.29	4.8	4.0	94.1
	4,000	0.27	4.7	4.7	89.5
50 (3klx)	1,200	0.21	—	—	—

栽培条件：

地上部

光照射：全方向、24時間日長

炭酸ガス：350ppm

気温、湿度、風速：22度、85%、0.5m/s

地下部

養液：大塚1号、2号

水温：23度

電気伝導度：1.1～1.3mS

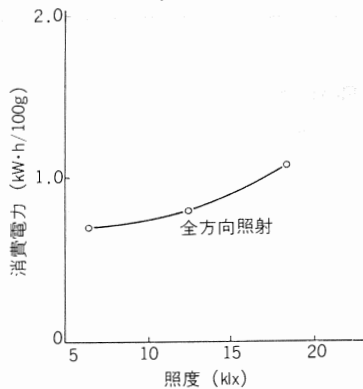
DO：7ppm

pH：7.0～4.5

術課題のなかで最も根本的なものは、照明電力の低減である。生産変動費のほとんどが電力費で、そのなかでも照明電力費が大半を占めるからである。ここでは、三菱電機で進められている開発状況について紹介させて載く^{4, 6)}。

三菱電機で進められているのは、低照度全方向照射方式である。これは、蛍光ランプを使い、低照度の光を植物の葉群になるべく全方向から光を照射しようとするものである。ガラス円筒でその周囲にランプを配置したグロースチャンバーでサラダナを栽培すると、気温と炭酸ガス濃度を好適に保てば、5キロルクスの低照度でも高速栽培できるというものである。表2にその結果をまとめておく。

この方式の実用性評価として、植物とランプを接近させた構造のチャンバーで照明電力評価が調べられた。図-5は最大電力効率と物理的品質を示したものである。低照度で栽培すると、100グラムのサラダナ生産に必要な照明電力消費は0.8kwh程度になり、かなりの省電力化になっている。ただし、表からわかるように、この場合葉の形が大きくなり、薄くなっている。照度を上げると葉形は小さくなりかつ厚くなる。このとき、照明消費電力は増すが生長速度も高くなるので、照度増加に比べて相対的に小さい。ここで、“最大”とことわったのは、チャンバー内の植物体間隔を適当に保った状態での値であることを意味する。



サラダナの品質

照度 ($\mu E : m^{-2} \cdot s^{-1}$)	含水率 (%)	葉面積重量 (mg/cm ²)	葉と根の 重量比 (g/g)
112(6.6klx)	94.9	0.8	14.7
213(12.5klx)	94.6	1.3	14.2
309(18.2klx)	94.4	1.7	13.7

図-5 照明電力費と品質 (サラダナ)

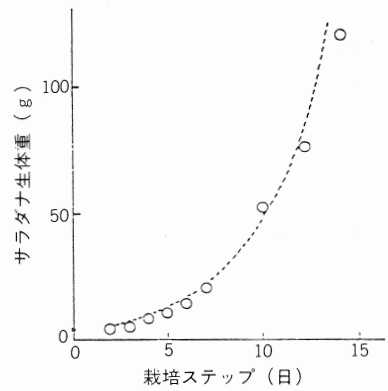


図-6 実用モデルプラントによるサラダナ生長カーブ

図-6は、図-1に示したモデルプラントによるサラダナの生長曲線である。この場合の照明消費電力は最低で1kwh強であり、植物体間隔の調整が理想どおりになっていないため前述の値より高くなっている。

6. 植物工場の今後

植物工場は、これまで繰り返して述べてきたように、特長と欠点を合せ持っている。したがって、特長が欠点をカバーして余り有る用途が開けるかどうか、欠点をできるだけ軽減させるための技術開発の見通しが、展望のポイントになる。

6.1 技術開発

(1) 生産費の低減

照明電力の低減が基本的な課題であり、前述した低照度全方向照射方式はそれに向けた一つである。太陽光の強度は非常に強力であり、低照度栽培はこの点で自然栽培と異なる結果になることがある。ビタミンなどの栄養価はむしろ高くし得るが、葉形が大きいかつ薄くなる傾向がある。自然栽培と同じにする必要は必ずしもなく、この違いを武器として活用すべきであると考えている。

栽培用のランプ開発も不可欠である。三菱電機でも検討中であるので、近いうちに成果が出るであろう。

弱光で栽培できる植物の開発は、植物工場にとって特に望まれるところである。まだほとんど手が付けられていないのが現状であるが、植物工場に与えるインパクトは大きいであろう。

(2) 対象作物の拡大

これまでは省電力やシステム開発が主流であった。今後は対象作物の拡大が本格的に進められることになる。

(3) 装置システムの開発

生産費のなかの固定費率を下げるためには、ある程度以上の生産規模を必要とする。これに対応するためには、プロセスの自動化、システム化が進められることになる。

(4) バイオテクノロジーと結合

植物工場における育種の必要性は前述したとおりである。

植物工場が農業生産の一つとして定着すると、これをベースとしたバイオテクノロジーの利用が本格化するものと予想される。均一で優良な苗の大量生産は重要であり、工場独自の新製品開発へと流れていくものと考えられる。

6.2 用途の開発

植物工場は万能でないので、合理的な適用を可能にする市場を開拓しなければならない。作物の多様化と品質の多様化を進め、健康な生活のためにはまだ不足しているといわれている緑色野菜の需要を掘り起こし得るかどうかが、鍵を握っている。

7. さいごに

植物工場は、自然依存農業と異質の農業生産と認識されるべきものである。工業技術からの発想を中核とする栽培技術により自然農業では困難な生産を可能に

し、農業と工業を融合させるところに特徴があるからである。

しかし、農業は軽々に扱われるべきものでないことも確かである。社会システムのなかで整合性を得るために、多方面からの検討が加えられなければならない。このところの動きはこの点で力強いものを感じる。

最近、某工場の広大な敷地の一角で、試験的ではあるが相当規模の施設栽培が行われているところを見る機会があった。正社員が生き生きとした表情で作業をしていた。筆者はそれを見てある種の感慨を得た。農業の将来の一つを暗示しているように思えたからである。

参 考 文 献

- 1) 矢吹らほか8名；農業環境調節工学（1985）。朝倉書店。
- 2) 木村，戸塚；生態学講座9，植物の生産仮定（1973），共立出版。
- 3) Monsi, M., T.Saeki, J.Jap.Jour. bot., 14巻（1953），22-52
- 4) 池田，江崎，中山；生物環境調節，22巻，4号（1984），71-77
- 5) 日経バイオテク，付録特別版（1986. 6-2）。
- 6) 池田，中山，江崎，河相；生物環境調節学会第23回大会（1985）。

新刊洋書紹介

Energy Applications of Biomass

バイオマスのエネルギー利用

書 名：Energy Applications of Biomass

著 者：Michael Z. Lowenstein

価 格：£35 plus £ 2.5 post/packing

発行所名：Elsevier Applied Science Publishers, London

サイ ズ：23 × 15 cm

内 容：

米国太陽エネルギー研究所の主催で1984年10月バーヂニア州アーリントンで開かれたエネルギー関連バイオマス研究開発年会の論文集。

米国および世界各国からの産・官・学各界の研究者による論文が3部分に分れて収載されている。第Ⅰ部はバイオマスエネルギーに関係する各分野での重要課題についての総合的討論。第Ⅱ部はバイオマスエネルギー研究開発後援者の研究関心についての詳細な討論。第Ⅲ部は研究成果の実際が報告されている。

申込み：近くの洋書店にお申込み下さい。