植物工場における成長モデルの解析

高辻正基

東海大学開発工学部 410 沼津市西野

Analysis of a Growth Model for a Plant Factory

Masamoto TAKATSUJI

*School of High-Technology for Human Welfare, Tokai University
Numazu, Shizuoka 410, Japan*

Summary

A growth model for a leaf vegetable suitable for a plant factory is developed which includes the effect of source and sink-dependent photosynthesis and translocation. Depending on the relative size of these coefficients, it is shown that plant growth is accelerated or decelerated compared with usual exponential growth. This fact suggests the importance of activation of root and rapid translocation.

はじめに

筆者が植物工場の研究を始めたのが1974年で、もう20年も前になる。実験装置が整っていない項、植物の成長モデルの解析から始めたものである。これは小論文として同年発表した¹⁾。それ以来、植物工場の研究開発はずいぶん盛んになったが、完全制御型植物工場に関しては三浦農園やキューピー、タバイエスベックなどを除いてまだ実用化例は少ない。植物工場を推進してきた筆者にとって、これはやはり不満足な状態である。そこで問題を基本的に考え直そうとして、前前報²⁾と前報³⁾を発表した。前前報では植物工場における環境制御の原理として、環境要因の飽和効果が現れない領域でコストパフォーマンスの大きい環境要因から最適化すべしという「最適化原理」を提案した。この意味で水耕条件の最適化、すなわち最適な水耕栽培方式の採用、適切な培養液管理、根の活性化は第一に重要である。前報では「利益関数」を導入することによって、完全制御型植物工場の定式化を試みた。三浦農園を例にとって環境条件と利益との関係や、利益を極大にするという意味での最適環境条件を求めた。

本論文は初心に帰るという意味で、1974年の論文を見直し、植物工場ということを念頭において検討し直したものである。器官間の相互作用を考慮することによって、定性的にはあるが、根の活性化とスムーズな転流が成長促進に重要であることを示した。

成長モデルの導出

植物の一般的な成長モデルとしては、Rossのものが知られている¹⁾。これは器官の乾重量の時間変化が、光合成の分配（転流）による増加分と呼吸および枯死による減少分の差、そして貯蔵

1992年8月10日受理

物質の転流によって支配されるとする連立微分方程式によって与えられる。この方程式は非常に複雑なので、個々の場合に依じて簡単化するための物理的考察が必要になる。

完全制御型植物工場で対象とする植物はサラダナのような葉菜類であり、しかも栽培室では、定植から収穫までの栄養成長期だけが問題になる。さらに成長が飽和に至る前に収穫するのが普通なので、拡大再成産の期間が対象になる、そこで対象となる器官は葉と根の二つである（茎は葉に含める）。それぞれの乾重量を M と m 、光合成速度を P 、それぞれの呼吸速度を R と r 、光合成産物の葉から根への転流速度を T とすると、成長方程式は次のように書ける。

$$dM/dt = kP - uR - T \quad (1)$$

$$dm/dt = T - wr \quad (2)$$

ここで k は再生産係数、 u, w は定数である。また、葉自体への転流効果は再生産係数 k に含めて考えることにする。 P, k, T, R, r の重量依在性を求めよう。

葉は光合成産物の‘ソース’といわれる。光合成速度 P は一般に、このソースとしての葉の乾重量 M に比例すると考えてよい。一方、ソースに光合成産物がたまってくると、これが光合成能の阻害要因になることがよく知られている。光合成産物の受け皿としての‘シンク’の切除や成長の阻害によって、光合成能が低下するという報告が数多くなされている^{4,5)}。言い換えれば、転流が盛んであれば光合成能は高まることになる。たとえばトマトで下位の葉が遮光されるとこれがシンクになり、光合成能が上昇するという報告がある⁵⁾。また最近の実験では、コカブのように肥大根（大きなシンク）を持つ場合には、光や炭酸ガス濃度の限界値においても光合成の飽和は観測されなかった⁶⁾。こうして P は一般に

$$P \propto M(1 - sM + eT) \quad (3)$$

の形に書けるだろう。ここで s と e は定数である。

次に再生産係数 k は、シンクの活性度に影響されると考えられる。根からの養分吸収は生合成をととして植物体構成に関与する。水耕栽培の生産性が土壌栽培に比べて高いのは、根の発達がよく、養水分を十分に吸収できるからである。細根が発達した良好な根は、この能力をさらに高めるだろう。いま根の発達の指標を重量 m で表わすと、 k は根の活性度を表わす定数 c を使って次の形に書けるだろう。

$$k \propto 1 + cm \quad (4)$$

根の状態が悪い場合は c が負と解釈してもよい。

転流速度 T については、これはまずソースの重量 M に比例する。さらに、シンクを切除すると、転流が阻害されることがトウモロコシで報告されている⁵⁾。つまり転流はシンク容量にも依存する。もちろん輸送経路である篩管の特性にも依存するわけで⁴⁾、これに関係する定数 v を使って、 T は次の形に表わせるだろう。

$$T = vM(1 + qm) \quad (5)$$

ここで q は定数である。最後に呼吸速度 R と r はそれぞれ、 M と m に比例する。

式(3)～(5)を式(1)と式(2)に代入し、比例定数を含めて k, u, w を定義しなおすと

$$dM/dt = M(a + bm - hM) \quad (6)$$

$$dm/dt = vM(1 + qM) - wm \quad (7)$$

ここで

$$a = k - v - u, \quad b = kc - vq, \quad h = k(s - ev) \quad (8)$$

ただし式(6)の右辺で、 M と m に関して3次および4次の項は小さいとして省略した。式(6)と式(7)が植物工場における葉菜類の基本的な成長モデルになる。しかしこれは非線形の連立微分方程式であり、一般に解析解はない。そこで近似解を求めよう。

近 似 解

すでに述べたように完全制御型植物工場では最適化原理により、光合成が飽和するような領域で環境制御することは避けるのが望ましい。葉に光合成産物がたまりすぎて、光合成能が落ちるなどということはコスト的に損である。光合成産物がスムーズに根に転流される状況を想定できるので、式(6)でまず $h=0$ と置いてみよう。さらに根の呼吸が小さいとして、 $w=0$ とする。根の旺盛な成長がこの仮定を正当化している。この二つの仮定のもとで、連立方程式は次のように書ける。

$$dM/dt = M(a + bm) \quad (9)$$

$$dm/dt = vM(1 + qm) \quad (10)$$

これは変数分離形になるので容易に積分できる：

$$vqM = bm + (a - b/q) \ln(1 + qm) \quad (11)$$

いま上式において $1 > qm$ ，すなわち器官間の相関による転流は自然転流に比べて小さいとしよう。対数関数を qm で展開して第1項までをとると

$$vM = am \quad (12)$$

が得られる。これは葉と根の乾重量が比例するという「相対成長」(アロメトリー)の関係にはかならない。1個の個体に対して、この関係は一般的に成立すると考えられている。式(12)を式(9)に代入して積分を実行すると、次の解が得られる。

$$M/M_0 = e^{at} / \{1 - p(e^{at} - 1)\} \quad (13)$$

$$p = bvM_0/a^2 \quad (14)$$

ここで M_0 は葉の初期重量を表わす。

式(13)は式(14)の p の符号にしたがって、次の3種類の解を持つ。ここで p の符号は式(8)から、 $b = kc - vq$ の符号に等しい。

① $p=0$

葉と根の器官間の相互作用を無視する場合に相当し、拡大再生産期に特有の指数関数的成長を与える：

$$M/M_0 = e^{at} \quad (15)$$

② $p < 0$

根の活性化による光合成係数の増加 (c で表わされる) が転流の増加 (q で表わされる) より小さい、あるいは根の発達が不十分で $c < 0$ の場合に相当し、S字型のいわゆるロジステック成長になる。この場合は式(15)に比べて成長は減速される。

③ $p > 0$

根が活性化され、それによる光合成係数の増加が転流を上回る場合で、成長は式(15)より加速される。

この三つの場合について式(10)を図示したのが Fig. 1 である。ここで a の値は、三浦農園におけるサラダナの成長率 0.26 に等しいとした。また $p = 0.04, 0, -0.04$ にとってある。器官間

Fig. 1. Growth curves for three values of interaction coefficient between organs

の相互作用を表わす係数 p の符号とその値によって、成長に顕著な差異が現れることがわかるだろう。特に根の活性化は重要であり、それを促すような水耕栽培方式の採用や、磁化水などの適用が望ましい。

相対成長のモデル

次にソースに炭水化物がたまりすぎるために生ずる光合成の抑制効果を見るために、 h の項を含む式(6)をそのまま使おう。ただしこのままでは積分できないので、相対成長の近似式(12)を仮定する。式(12)を式(6)に代入すれば、これも初等的に積分できて、式(13)と同型の解を得る：

$$M/M_0 = e^{at} / \{1 - f(e^{at} - 1)\} \quad (16)$$

$$f = (bv - ha)M_0/a^2 \quad (17)$$

この f は式(14)の p の表式で、 bv を $bv - ha$ に置きかえた表現になっている。式(8)から $h = k(s - ev)$ であるから、光合成産物の葉への蓄積が転流による除去よりも大きくなれば、 $h > 0$ になる。このとき $p > f$ であるから、Fig. 1 に示したグラフよりさらに成長は抑制される。とくに $f < 0$ になるほど h が大きくなると、成長は指数関数的増大からロジスティック曲線に落ちこんでしまう。

一方、転流がすみやかに行なわれ光合成産物が余分にたまらなければ、 $h < 0$ ということもありうるわけで、この場合は成長は式(13)よりも促進される。しかしあまり転流を促進させすぎると、式(8)の a の表式のなかの v の項が大きくなって、増大係数 a が小さくなってしまう。しかし適度な転流の促進は、成長にとって好ましいことが理解されるだろう。従来、 v, c, q, r, e といった器官間の相関を表わす定数は一般に測定されていない。ソース・シンク関係の定量的分析は、成長促進をモットーとする植物工場においても今後の重要な課題になると思われる。

参考文献

- 1) 高辻正基：植物成長の数理モデル，数理科学，NO. 136：57～61(1974)

- 2) 高辻正基：限界効用の通減則と植物工場の最適化原理，植物工場，4：6～9(1992)
- 3) 高辻正基：完全制御型植物工場の経済性の解析，植物工場，4：本号論分(1993)
- 4) 及川武夫：光合成産物の分配と成長，岩城英夫編「群落の機能と生産」，朝倉書店，p. 163～192(1979)
- 5) 藤田耕之輔：ソース・シンク関係と植物生産，茅野充男編「物質の輸送と貯蔵」，朝倉書店，p. 145～164(1991)
- 6) 池田 彰・谷村 泰・中山繁樹：人工光型植物工場における光環境の制御，「植物工場のキーテクノロジー」，日本植物工場学会，p. 28～29(1991)

~~~~~ 書 評 ~~~~~

「生物にやさしい知能ロボット工学」

著 者：岡本嗣男・白井良明   体 裁：A5判 215 ページ

藤浦建史・近藤 直

発行所：実教出版株式会社

定 価：3,000 円（本体 2,913 円）

近年，ロボットの開発研究が急速に進み，工業分野を中心として種々のロボットが普及している。しかし，生物生産の分野への導入は緒についたところであり，十分成長した作物を対象として，マニピュレータにより作業を行うタイプのロボットについては，実用化にもう一步のところまで，足踏みしている。その原因として，対象が規格化された工業製品と異なり，その色，寸法，形状，位置等が多様であり，全く同じものはないこと，生き物であるためやさしく扱わなくてはならないこと，環境が時々刻々と変化すること，圃場内の不整地走行のための自律移動技術が必要なこと等があげられる。これまでこれらの問題点を克服するために必要な具体的な技術などを解説する良書がなかった。

本書は，従来のロボット工学の基礎知識だけでなく，上述した問題点を克服するために必要な技術をやさしく解説した，この分野において待ち望まれた書である。したがって，大学の学部・大学院生の教科書として，あるいは複雑な環境化で多様な対象を扱うロボットの開発・研究にたずさわる技術者・研究者の参考書として，お勧めできる好著であると言えよう。以下に，その内容をかいつまんで説明する。

まず，第1章“生物生産とロボット”では，生物生産における作業の特徴を述べた上で，ロボット化の意義，解決すべき課題が述べられている。第2章“生物生産ロボットの構成”では，マニピュレータ，ハンド，生物生産ロボットに欠かせない各種センサ，移動機構，および制御装置等が詳しく，ていねいに解説されている。第3章“生物生産ロボットの知能化”では，生物生産ロボットの知能化のための手法において重要である画像理解，知識工学，ファジィ制御，ニューラルネットワークについて，その基礎が述べられている。第4章“生物生産におけるロボット”では，国内外で今までに研究された生物生産ロボットが豊富に紹介されている。その主なものをあげると，接木・育苗ロボット，薬剤散布，施肥等の栽培管理ロボット，トマト，キュウリ，オレンジ，ブドウ等の果実収穫ロボット，搾乳ロボット，羊毛刈取りロボット，枝打ちロボット等である。第5章“バイオテクノロジーロボット”では，現在注目を集めているバイオテクノロジーの技術，ならびに培養組織の植え継ぎロボット，幻植物の分割・移植，苗の選別等を行うロボットが詳しく説明されている。第6章“21世紀の生物生産システムとロボット”では，今後ロボットと共に変化するであろう各種の生物生産システムの形態とそのなかでのロボットの役割について述べられている。いずれの章も，図，写真が豊富に使用されているため，わかりやすく，興味のわく内容である。

(村瀬治比古)