植物工場理論に基づく移植時期および苗箱構造の最適化

水島宜彦

浜松ホトニクス株式会社 〒434-0041 浜北市平口 5000

Optimization of the Transplantation Schedule and the Nursery Design Utilizing the Plant Factory Theory

Yoshihiko MIZUSHIMA

Hamamatsu Photonics, 5000 Hiraguchi, Hamakita 434-0041

Abstract

Based on the theory of plant factory, effects of transplantation scheduling and the accompanying growth delay due to transplanting damage are quantitatively discussed. Optimizing analysis of the transplantation period design for the optimum profit indicates that the nursery stage should carefully be redesigned. The result implies an optimized condition for skipping the transplantation process at an early stage, which can be realized by an improved capacity design of the nursery.

Keywords : plant factory, nursery, transplantation, lettuce

緒 言

植物工場理論¹⁻³⁾は、完全制御型の植物工場の経済化について種々の指針を与えてくれる。これを拡張して、本論文では、植物工場における移植、定植時期の最適化問題に応用する。

移植や定植を何時どういう時期に行うべきかについては、明確な判断基準はなかったが、植物工場のように運転効率を至上命題とする場合には無視できない因子である。本論文ではこの点に着目して、定植後の成長の停滞(植え傷み遅延)効果を含め、その経済的最適化を検討する。その結果、植え傷みよりはむしろ稼働面積効率が大切であること、すなわち初期の苗箱での育苗時期における占有面積が重要であること、これに従って構造を新しく変更した苗箱を使用する場合について利益を予測し、これが経済的に有効であることを示す。

モデル植物工場では、苗箱に種を蒔き、発芽後に育苗パネルに移植し、更に栽培パネルにと順次展開しながら

定植するなど、手作業による場合は通常2回の移植手順を踏んでいる。これは、最終出荷時の株間隔に最初から展開して植えると無駄な面積を抱えることになるので、当然のやり方である。この最適化については、従来は無駄なスペースを詰めることを主眼に考えて、色々なスペーシングの手法が検討されてきた。特に、二次元的2軸機構により株間を連続的に調節する大規模工場の場合については、植え傷みはほとんど発生しない代りに、自動化機械のコスト(原価償却など)が比較の対象になる。この計算は既に論じた⁴⁾ので、ここではむしろ小規模工場で不連続的に移植定植を行う場合について、苗の段階での占有面積に着目した最適経済化を検討する。自動スペーシング技術の効果は、必要により、これに重ねて考えれば良い。

以下では文献に従い、小規模モデル工場を対象に取って考える。栽培植物はサラダ菜とする。サラダ菜は成長速度が速いので、植え傷みの問題が顕著に出るからである。誤解のないときには、移植も定植もまとめて移植と総称する。

1997年12月24日受付

1998年3月6日受理

植物工場理論に基づく検討

(1) 植え痛み遅延日数の定義

光植物工場では、できるだけ面積の集約化を図ろうとして、定植を遅らせることがある。しかし苗を大きくしてから定植すると、それだけ植え傷みがひどくなったり、根が大きくなると移植時にパネルの穴に入りにくくなって移植ミスが起こりやすくなり、逆効果となる。植え傷みによる成長遅延は年間回転率を下げるので、植物工場においては重要である。

後で必要になるので、移植に伴う植え傷み遅延について初めに検討しておく。定植に伴って植物体にショックがあり、成長の停滞が起こる。これを植え傷み遅延と定義することとしよう。従来この問題を定量的に解析した例は見当たらないが、著者は以前の論文⁴⁾で、この点を少し扱った。ここでは更に詳しく考察する。

まず、植え傷み遅延量の計測方法を示す。図1に、生体重量(対数目盛)を栽培室への定植後の経過日数に対し

図1 植え痛み決定法

縦軸は生体重量(対数目盛)、横軸は栽培室への定植後の経過日数、パラメータは照度。

外挿直線と初期重量値の水平線との交点から、植え傷みによる成長遅延日数(D)が求められる。

Fig. 1 Determination of Transplantation Damage

Fresh weight is plotted as a function of the elapsed days after the transplantation, the illuminance as a parameter. Growth delay (D) is defined on the abscissa as a horizontal shift of the starting point of the assumed exponential growth rate.

てプロットした典型的モデル例を示す。これは第2章で示す実験の一部であるので、実験条件などは後記参照。パラメータは光照度である。成長が盛んなときは指数関数的成長をすることが知られていて、成長の後半ではそれが見られる。ところが、移植直後には成長の停滞が見られており、照度を変えて測った2本の直線は、定植直後の重量のままの共通の停滞値から、ある日数経過後に別れて成長を始めることを示す。従って、二直線の交点は通常初期重量に近い水平線上に存在するので、遅延日数は定義可能である。

実際、定植直後には外見上もやや萎れ、培養液も酸性に傾く期間があるが、その後元気な成長を始める。この期間は経験によると1ないし3日であり、これが遅延日数(D)である。(もちろん、完全な停滞でなく初期は別の曲線に乗っていると考えてもよいが、正常な後期の直線的成長率が確立するまでの遅延という意味では等価なので、上記のように定義できる。)

定植直後では重量変化が小さいので、測定誤差や苗ごとのばらつきが大きい。図のような外挿法によって上記の交点を決定することにより、水平方向のずれ、つまり遅延日数を知ることができる。この例では $D=2.5$ 日である。出荷がこれだけ遅れることは、回転率向上を至上命題とする植物工場では、致命的になりかねない。成長速度を少々促進するよりも、植え傷みを改善する方が重要かも知れないので、このことを調べる。

同様に苗箱から育苗パネルに第1回目の移植をしたときの植え傷み遅延日数を仮定することもできるが、実験的には苗が未だ小さいので測定精度が悪く、遅延日数を決めることができないが、取りあえず D' としておく。実際には占有面積率が低い部分なので、無視できるだろう。

(2) 植え痛み遅延の対策としての移植定植時期の最適化理論

モデル植物工場では、上記のように、苗箱から移植パネルへの移植、移植パネルから栽培パネルへの定植と2回の移植を行うのが通例なので、これを検討の基準とする。

以下では従来の基準状態での定植パネルの全占有面積を1と規格化しておく。育苗パネルから定植する際に、栽培パネルでの所要面積は元の育苗パネルでの占有面積の n 倍に展開されるとすると、育苗パネルの規格化面積は、 $1/n$ であり、モデル工場では n は3程度である。面積を必要とする栽培パネル上の滞在日数を短縮するため、移植パネル滞在日数を長めに保つ目的で従来 n は小さめに選ばれている。 n' は苗箱から育苗パネルへの

展開率で、通常 12 程度である。

栽培パネル部分の占有面積	1 と規格化すると
播種以後の苗箱部分の占有面積	$1/nn'$
移植パネル部分の占有面積	$1/n$
故に全面積は	$1+1/n+1/nn'$

また、次のように定義する。

播種後の苗箱有効生長日数	T_1
移植パネル有効生長日数	T_2
栽培パネル有効生長日数	T_3
移植時の植え痛み遅延	D'
定植時の植え痛み遅延	D
移植パネル上の実際の滞在日数	T_2+D'
栽培室での実際の滞在日数	T_3+D
故に全所要日数は	$T_1+T_2+T_3+D'+D$

以下では移植定植時期を動かして最適化することを考えるが、時期をずらしていくと結局移植または定植時期と重なって、これを 1 回省略することになってしまうので、1 回省略を前提としてみよう。育苗パネルから栽培パネルへ xT_2 (ただし $0 \leq x \leq 1$) の時期に 1 回の定植する場合を考えると、 $x=0$ とは、 T_1 で既に定植し、 $x=1$ とは T_1+T_2 で定植することである。換言すれば、 $x=0$ とは、2 回目の移植(定植)を省略しようという場合で、 $x=1$ とは、1 回目の移植を省略して苗箱で待っている場合に相当する。

また、 x が大きいときには、植え傷みが発生するので、それを含めて、栽培パネルへ早期移植後の全滞在期間は $(1-x)T_2+T_3+xD$ となる。ここで、簡単のために、遅延は苗が大きいほど比例して大きいと近似する。

計算の前提条件としては、モデル工場⁴⁾の規模を基準とし、その工場稼働部分の全面積を同じに保って考える。こうすると建築費およびその償却費や温度条件従って成長速度なども同じになる。また全体の管理費、照明や冷暖房の費用も同じなので、そういう推定評価の難しい項を省くことができる。パネル上の栽植密度や収穫時の大きさなどを一定とする。ただし内部の面積割りが変わるので、出荷株数と回転率が変わる。出荷株数に係る売り上げ、出荷経費などと、定植作業に係るコスト(人件費など)だけ比較すればよいので、式が簡単になる。

この問題の最適化解を、植物工場理論の立場から、利益を極大化することを判定基準として決定する。売上げは回転率と栽培パネル面積との積に比例する。年間の回転率は成長日数の逆数に比例し、 $365/(T_3+D)$ から $365/[(1-x)T_2+T_3+xD]$ に変化する。いっぽう年間売

上げは S 、また売上げに連動して変わるものに出荷経費(m)がある。1 回省略で節約できる定植関係のコスト(人件費、ないし自動ロボットの原価償却費)を m_0 とする。従来の 2 回の移植をする方法(苗箱から育苗パネルへの移植、および育苗パネルから栽培パネルへの定植)を基準状態とし、 x を変数として、利益の変化(Δg)は栽培面積の変化と回転率の変化の積を考慮して、次の式で表わされる。

$$\Delta g = (S - m) \left(1 + \frac{1}{n} - \frac{1}{nn'} e^{xrT_2} \right) \left(\frac{T_3 + D}{(1-x)T_2 + T_3 + xD} - 1 \right) + m_0$$

ここで、指数関数を含む項は栽培面積変化率であるが、苗箱(実は育苗)期間が指数関数分だけ変化するために栽培面積が食い込まれることを考慮している。モデル工場の実例の数字として、 $S=1,800$ 万円/年、 $m=300$ 万円/年、 $m_0=30$ 万円/年、また $T_1=10$ 日、 $T_2=10$ 日、 $T_3=11$ 日、 $D=2$ 日と取ってみる。育苗段階での r は測定が困難で不明なので、とりあえず後期の成長段階での値 0.2 を援用する。

x に関して、この式の極大値を求めれば良いが、解は $x=1.1$ にあり、 $0 \leq x \leq 1$ の範囲に極値はない。1 より大きいときには、栽培パネルの過程に食い込んで考えれば良いだけだが、育苗の状況によっても変わるので、とりあえず、事態をあまり変更せずに、極値の近似的な解として $x=1$ と取ってみよう。これはつまり、従来の移植パネル期間を全部含めて苗箱で育ててから直接定植する場合で、もちろん移植は 1 回で済む。このとき、利益増加は 155 万円/年となる。売り上げに対して 1 割弱である。 x が小さいときは負になり、 $x=0$ のときは 301 万円/年の損失となる。

結局、利益に貢献するのは、植え傷み遅延の対策による回転率向上よりも、移植回数を減らして稼働面積を増やす効果のほうが大きい。これらのことは人手が少なくて済む経営方法にも繋がるので重要である。

実験による検討

(1) 苗箱の構造変更と実験方法

上記の結論は、当然ながら、若い段階で長く置くことが良いということの再確認である。従来から、最大面積を占める栽培室での滞在日数を減らすために、ギリギリまで育苗室に長く置くことが行われてきたが、それと同じことである。重要なのは初期段階のパネル占有面積であり、このことから、更に、もう一つ前段階での、苗箱

表 1 新旧苗箱による定植後の成長
Table 1 Growth rate and delay time of seedlings derived from conventional and new enlarged nurseries

収穫日時	従来苗箱				新苗床			
	22 klx		14 klx		22 klx		14 klx	
	成長率	遅延	成長率	遅延	成長率	遅延	成長率	遅延
97/ 8/12	0.20	2.5	0.15	2.5				
97/ 8/23	0.20	2	0.14	2	0.21	2	0.18	2.5
97/ 9/ 7	0.18	2	0.15	2	0.20	2	0.16	3
97/ 9/19	0.22	3	0.18	3	0.19	2	0.15	2
97/10/ 5	0.19	1.5	0.13	1.5	0.18	2	0.14	2

での滞在日数をできるだけ長く引き伸ばすことを提案したい。より若い段階での占有面積は、より小さいので、そこに長く滞在させれば工場総面積が経済的になることは当然である。

しかし苗箱に長く置いてから栽培パネルへ直接定植する場合については、苗箱の構造の変更が必要になる。現在広く使われている苗箱(90 cm×60 cm に 300 粒を蒔く)の構造では、 T_1+T_2 まで置くと苗が大きくなりすぎる。また浅い苗箱から苗を取り出すときに幼根の傷みも激しくなるので、従来方式の苗箱を改造することが必要である。苗箱に詰めたウレタンブロックの間隔や、培養液に漬かる下部の水深に余裕を取ることになるが、結局は面積を占める改造となるから、苗床というべき形状で、移植パネルに直接蒔くことと本質的に同じことである。

新しい苗箱に付随する事情としては、大型の苗箱では種子の発芽率が悪いとき、その面積損失が直接歩留まりへ影響を及ぼす。ただし、予備を蒔いておいて補植をすれば救えるので、今は考えない。また、幼苗時には照明や培養液濃度を若干変更することも行われるが、これについても成長率の換算をすればよいので、ここでは省略する。

実験によると、 $T_1+T_2=20$ 日目において葉が互いに触れ合う程度に離すのは、苗箱の面積にしてほぼ 5~7 倍程度の大きさが必要である。この数字は、面積的にも負担にならない適当な妥協点と考えて良い。このとき、生産量連続条件と展開率とを組み合わせると、この苗床の株数と密度を決めることができる。例として、通常の 90 cm×60 cm のパネルなら 120~150 穴程度のものに相当する。

簡単な実験により、上記の新しい育苗条件による定植後の成長状況を従来法と比較した。栽培品種はサラダ菜(サンタクララ)である。新しい苗箱は、穴数 120 のパネルの一部を使ってポリエチレンシートで囲い、培養液を独立に区分できる構造とした。ここでは播種後数日間は培養液濃度をやや低めに保つ。その他の条件はモデル植

物工場の栽培条件^{4,5)}とほぼ同じにした。気温は 23~24°C、水温は 22~23°C、湿度は 40~60%、炭酸ガス濃度は 2,500 ppm、照明は高圧ナトリウムランプにより 12 時間の照明、照度は 22 klx および 14 klx (すなわち、PPFD にしてそれぞれ 268 および 171 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$)、また培養液は大塚 A 処方、その EC は 1.5~1.7 mS/cm で、pH は 6~7 とした。

(2) 結果と考察

苗箱に播種してから 2 回の移植定植を行う従来法での定植後の成長と、最初から新苗床で播種育苗を行い、 T_1+T_2 の期間を過ごしてから栽培パネルに直接定植する新しい方法での定植後の成長とを比較した。実験の結果の例は図 1 のようであり、全部をまとめたものを表 1 に示す。成長率および遅延の単位は、それぞれ $[d^{-1}]$ および $[d]$ である。

同じ横の行は同じ環境で同時に成長させた組み合わせ実験で、播種から収穫まで共通の経過日数のものである。各ロットはそれぞれ 12 株以上を使用し、そのロット内平均をとって示す。実験結果の数字は、前報告⁵⁾と同様である。新旧の苗箱による差はほとんどない。すなわち、幼苗時期には移植回数が 1 回違っても、その差は僅かであり、後半の定植時の成長にマスクされてしまう。定植時の植え傷みは避けられないが、その遅延日数についても、定植時の苗の大きさが(同じ行について見ると)新旧ではほぼ同じだったので、特に大きな差は見られていない。結局、最初に意図した遅延日数の短縮効果はなかった。いっぽう試行ロット毎の差は若干あるようで、たぶん定植時の苗の大きさが違うためだろうが、明確でない。

この新しい方法での定植パネルの規格化占有面積率は、移植回数が減ったことから、

$1+1/3-\exp(2.2)/(3\times 12)=1.083$ である。工場面積一定の中でも、移植回数を減らすことで出荷に直結する稼働面積が増えた。成長速度に関係する回転率は変わらないが、育苗時期の面積の節約で、結局は有利となること判る。売り上げ増加は 150 万円/年であり、第 1 章の

推定と一致する。これに伴う人件費増加を差し引いて、利益増加は約120万円/年程度と見積もることができる。苗箱については若干の変更が必要なものの、定植プロセスとそのコストを省略できるので、効果は確実だろう。

結 論

回転率と稼働面積の効率化とは植物工場の基本である。従来は、栽培パネルの無駄面積が目立つので、スペーシングのような対策が種々取られてきているが、ここでは移植時期をずらせるという別の見地から最適化を検討した。そのために植え傷みによる回転率低下現象について、成長遅延日数を定量化して、総合経済効果の分析に取り入れた。このさい移植定植回数を一回に減らすことが考えられるので、その経済効果を検討した。定植時の植え傷みがあっても、それを考慮して最適化設計をすればよい。

移植定植を含めて経済化する鍵は、植え傷み対策そのものよりも、むしろ稼働面積効率を向上させるための苗

箱の構造にある。すなわち、従来の固定観念だった苗箱を大きくし、苗をここでできるだけ長く置いてから直接に定植することである。利益ばかりでなく、起こりやすい移植ミスを省き、農村の労働力を省略できることにも繋がるので、今後のために、苗箱の構造について再検討していくことが望ましい。

ご指導をいただいた三浦雅司氏に感謝する。

引用文献

- 1) 高辻正基：植物工場の理論，SHITA TECHNOLOGY 1，日本植物工場学会，pp. 1-48(1993)
- 2) 高辻正基：植物工場の理論と展開，SHITA REPORT 7，日本植物工場学会，pp. 3-14(1995)
- 3) 高辻正基：植物工場の基礎と実際，装華房，pp. 1-164(1995)
- 4) 水島宜彦：植物工場理論を基礎とした小規模植物工場の最適経済設計，植物工場学会誌，9(3)：16-29(1997)
- 5) 水島宜彦：植物工場理論にもとづく炭酸ガス施肥の経済効果，植物工場学会誌，10(1)：5-9(1998)