

## 園芸生産に要するカーボンの排出削減に向けた技術革新

彦坂晶子\*

〔キーワード〕：施設園芸，温室効果ガス，エネルギー投入量，技術革新

## 1. はじめに

施設園芸で生産する作物（以降、園芸作物）は、人が健康に生きるために必要な栄養成分や機能性成分を含む野菜や果樹、生活の質を高める花き類である。私たちの生活に欠くことのできない園芸作物は、その生産過程で光合成によるカーボン（以下、C）吸収を行うことから、他の農林水産分野や工業分野と比べるとカーボンニュートラル（CN）に寄与しやすいと言える。しかし、実際の園芸作物の生産現場をCNの視点で見直すと、かなりの量のカーボンを排出することで成立している。

農林水産分野の温室効果ガス（GHG）の排出量は約4,747万t、全排出量の3.9%。（2019年度）であり、そのうちCO<sub>2</sub>が占める割合は34.1%で、そのほとんどが暖房に使用される燃料燃焼によるものである（農林水産省，2021）。施設園芸では、温室の建設や暖房などで排出されるC量が多く、その削減が急務となっている。本講演では、一般的に浸透している「園芸」＝「野菜，果物，花き，栄養，健康」＝「CNに貢献」というポジティブなイメージから離れ、「園芸作物が吸収するC量」と「園芸生産によって排出されるC量」を整理し、特に施設園芸におけるC削減に必要な要素技術と今後の技術革新の方向性について考える。

## 2. これまでの園芸生産の目標

カロリー源となる作物（穀類，マメ類，イモ類）は一般に土地利用型農業で適した季節に生産され、年に1回の収穫で長期保存できる。他方、園芸作物（野菜，果樹，花き）は鮮度が重要であり、長期保存ができない。そのため、周年摂取が必要なビタミン類や機能性成分を含む野菜類には周年生産が求められ、生活を豊かにする花きや果樹には特有の香

りや味，色，形状をもち高品質なものや季節外れなものに付加価値がつく。つまり、これまで園芸生産で推進してきたことは、「対象作物に不適な季節の安定生産」である。そもそもこれは「一年中、健康でいたい」「おいしいものを食べたい」「きれいな花をみたい」という人間の欲（希望）を満たすための技術革新の積み重ねである。当然、露地生産に不適な季節の生産には、適した環境にするための資源やエネルギー投入が必要である。幸い日本には多様な気候帯があり、古くから「作型」という概念が発達していたことで、主要品目については指定産地による周年安定供給が確立していた。見方によっては、これは季節ごとに栽培適地に産地を移動することで、資源・エネルギー投入量を最小限にする「日本独自の省エネ生産方式」と言える。

しかし、同じ産地で周年生産し、栽培適期を外して収穫物の付加価値を高めるためには、資源・エネルギー投入量、すなわちコストを増やすことが前提となる。そのため、生産者視点だったこれまでの研究開発では、常に「コスト削減と収量増加，品質向上」というわかりやすい目標が掲げられてきた。そしてこれまで研究者は、知見に基づいた多様な生産技術を開発し、周年安定生産や高品質生産を実現してきた。しかし、今、我々は「資源・エネルギー投入量を前提とした周年安定生産」という生産体系を見直し、「CN」という緊急の目標に取り組まなければならない。

## 3. カーボン吸収量・排出量の数値化の必要性と複雑性

## 3-1. 吸収量の数値化

工業製品の生産とは大きく異なり、園芸生産では植物が光合成によってCO<sub>2</sub>を吸収する過程がある。アマゾンや東南アジアの熱帯雨林、日本の森林や土壌が大量のCを吸収することでCNに大きく貢献しているという話、あるいはカーボンクレジット関連

\*千葉大学大学院園芸学研究院（Shoko Hikosaka）

のニュースなどから、園芸生産にも CN 的なイメージを持つ消費者は多い。しかし、実際の C の流れを考えると、光合成によって固定される C は一時的に植物体中に貯留されるものの、可食物のほとんどが一年以内に食料として消費され、非可食部もじきに焼却されたり、埋設後に土壤微生物によって徐々に分解され、短期間のうちに大気へと放出される。すなわち、草本植物が貯留できる C 量は木本植物に比べて少なく、また貯留期間も短い。他方、果樹は木本植物のため、他の園芸作物や花きよりも固定した C の貯留期間が長いと考えられるが、毎年、同じ樹形を維持するために剪定は必須であり、剪定枝や落葉の処理方法によっては、やはり C 吸収量は多くない。忘れがちだが、CN 達成に必要なのは「光合成による C 固定」だけでなく「固定した C の貯留」である。この視点での研究開発は農学分野においては新規課題であり、C 収支の全体像を考えるような思考領域の拡張が求められる。

### 3-2. 排出量の数値化と収支

施設園芸で排出される主要な C には、石油由来の燃料（農業機械、暖房など）や温室の被覆資材（外張り、保温・張遮光カーテン）、マルチ栽培やトンネル栽培に用いられる被覆資材などが含まれる。石油由来の燃料や資材の使用は、何百万年もの時間をかけて木本植物と自然環境が固定した C を短期間で地上に排出することになるため、相当の「C ポジティブ」と言える（ポジティブというの良いことのように聞こえるが、環境負荷が大きいという意味）。しかし、「生産に不適な季節」を「適した季節」に環境制御する施設園芸では、現状、これら石油由来の燃料や資材の投入は必要不可欠である。

ここまで C 吸収と排出の主要因を説明してきたところで、かなり大雑把に収支計算を試みる。

【吸収量：ネガティブ】トマト群落の純光合成速度を  $5\sim 10\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ （成熟葉）とすると、1日（明期 12 時間）あたりの  $\text{CO}_2$  固定量は  $10\sim 19\ \text{g}\ \text{m}^{-2}$  であり、葉面積指数  $\text{LAI}=1.0$ （総葉面積＝栽培面積）で栽培面積が 10 a の場合、 $\text{CO}_2$  固定量は  $9\sim 18\ \text{kg}/\text{日}$  である。ここでは敢えて暗期の呼吸（ $\text{CO}_2$  排出）は光合成よりも圧倒的に少量として無視する。

（注：LAI を増やしても面積あたりの日射量は一定で、むしろ相互遮蔽が増えるので、計算誤差として

$\text{CO}_2$  吸収量が最大 2 倍になることはあっても 10 倍になることはない。）

【排出量：ポジティブ】温室（10 a）の果菜類に暖房する場合、A 重油暖房の年間使用量（高知県）を日平均すると  $10\sim 27\ \text{L}\ 10\text{a}^{-1}$  であり、A 重油の  $\text{CO}_2$  排出量は  $2.7\ \text{kg}\ \text{L}^{-1}$ （環境省）なので、1日あたりの  $\text{CO}_2$  排出量は  $27\sim 73\ \text{kg}$  である。

【収支】暖房燃料だけで既に光合成で固定した C の 1.5～8 倍あり、C ポジティブである。実際には、さらに被覆資材や肥料、水、農薬の生産時や、流通時の C 排出量が加算されることから、施設園芸での CN 達成に必要な  $\text{CO}_2$  吸収量を考えると気が遠くなる。露地野菜などの土地利用型園芸生産においても、生産施設と暖房以外の部分は共通であり、むしろ農業機械の燃料や水、肥料、農薬は施設園芸の数倍必要であることから、CN への道のりは施設園芸同様、長いものと思われる。

### 3-3. 数値化の必要性と複雑性

CN に向けた取り組みとして必須なのは、C の数値化である。1990 年代から、製品やサービス等のライフサイクルを通じた環境負荷を定量的に評価する手法として、ライフサイクルアセスメント（LCA: Life Cycle Assessment）という ISO 規格に基づいた評価法が利用されている。最近では、農業分野でも CN に向けた取り組みに利用され、生産施設の LCA を比較した研究報告なども増えている（Blom et al., 2022; Kikuchi et al., 2018）。また、環境省や農林水産省から簡易 C 排出量試算ツールが提供されており、品目や条件は限られるが、一般利用が可能である。

園芸生産に限らず、排出した C を試算する上で最も難しいのは、「空間・時間的にどこまでを含めるか」ということである。燃料使用量は季節や気象条件で大きく異なり、被覆資材は素材や使用方法・頻度により遮光・保温効果（熱貫流率）や耐用年数が異なる。上述のように、実際には燃料と被覆資材に加え、温室の構造物、農業機械、水、肥料、農薬を生産（精製）するための C や、これら資材や収穫物を輸送する C（空路か陸路か）など、詳細に定義して試算する必要がある。さらに、試算の表示方法も目的に応じて変える必要があり、生産物の重量あたりや栽培面積あたり、月平均や年平均など、多様な分母で試算・評価することが求められる。

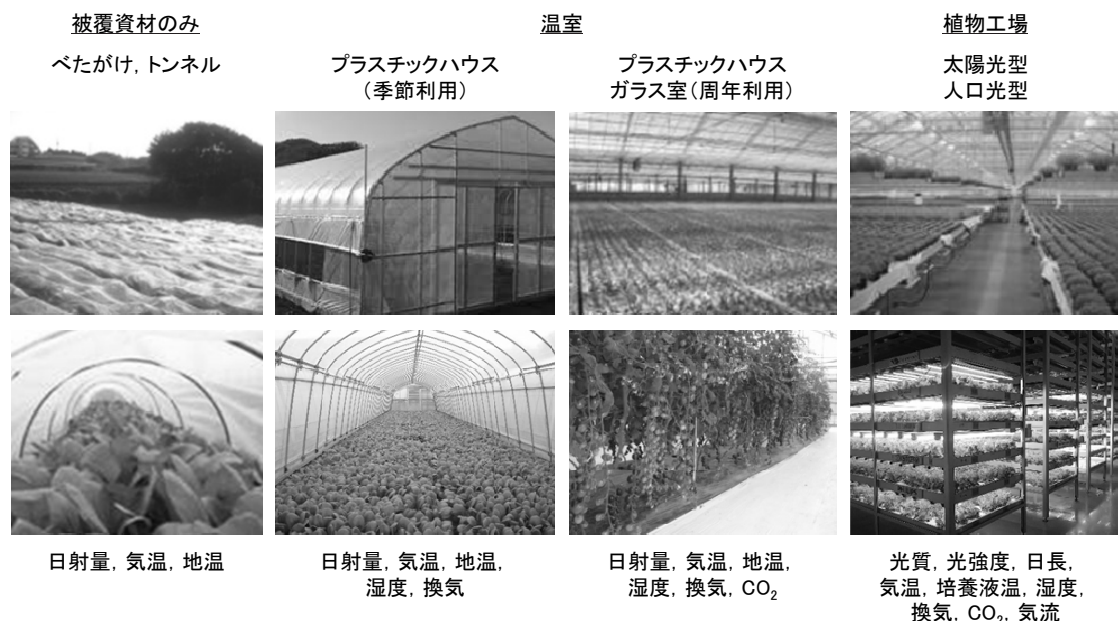


図1 生産施設の種類と制御可能な環境要素

施設園芸の中でもトンネル, パイプハウス, 大規模温室, 植物工場など, 様々な生産施設があり, 資源・エネルギー投入量が多いほど制御できる環境要因が増え, 周年安定生産や高収量・高品質生産が可能になる。しかし, これら生産施設の建設コストや資材の耐用年数, 栽培に必要な資源・エネルギー投入量は, 立地や生産施設ごとに異なることから, C排出量の試算や比較は容易ではない。しかし, CNの達成にはC吸収・排出量の数値化と収支計算は必須であり, 今後, C収支の算定精度の向上, 試算に関する報告や活発な議論が期待される。

#### 4. 低コスト化, カーボン排出削減に向けた これまでの取り組み

##### 4-1. コスト, 燃料削減のこれまでの背景

燃料費や電気料金が日本では, これまで何度となく暖房用灯油や重油の高騰を経験してきた。「歴史はらせん階段状に繰り返す」の言葉通り, 10-15年間隔で暖房費を抑制する暖房方法や温室の保温技術に関する研究開発が活発化している。最近では, 2011年の東日本大震災の際に広範囲な停電や節電があり, この時はCNという目標はなかったものの, 省エネに関する多数の研究開発が行われた。

これまで積極的に研究開発されたものには, 温室

の断熱資材, 地中熱・地下水利用, 局所冷・暖房, 木材チップ利用などがある。類似の研究は古くからあるものの, その時代に開発された新素材や新技術を取り入れ, 少しずつ実用化に向けて研究成果を蓄積している。

##### 4-2. 断熱性と高機能被覆資材

コンクリートや断熱材などで覆われているビルや植物工場と違って, 通常の温室では断熱性の低い(熱貫流率が高い)薄いフィルム資材や保温カーテンで栽培空間を覆っている。当然, 内外での熱移動は大きく, 現状, 冬季や寒冷地の暖房によるC排出量は, 大きくなる。一般に, 温室内に投入した暖気をできるだけ温室内にとどめておくために, 2重, 3重の内張カーテンを設置することで, 断熱性を高めている。現状, 内張カーテンにも石油由来のフィルムが用いられることから, 耐用年数に応じたカーテン資材の更新, すなわちC排出が伴うことになる。2018年には農研機構からナノファイバー断熱資材のマニュアルが出され, 新素材の重油の節減効果や資材の特性についての広報が進められた。いずれにしても, 温室内外の熱交換を抑制する「断熱」は重要な研究要素であり, 断熱性が高く, 生産時のC排出量が極力少ない被覆資材の開発が求められる。

他方、夏季の高温時には気温と日射の制御が難しい。例えば、温室外日射は十分にあるものの、昇温抑制のために遮光カーテンを展張すると光合成が抑制される。そこで近年開発が進むのは、光合成有効放射（PAR）を十分に透過し、近赤外線（NIR）を反射する被覆資材である。このような高機能被覆資材が商品化されれば、温室の昇温抑制に加え、温室の閉鎖度を高められる。

閉鎖度の高い温室では、日中でもCO<sub>2</sub>施用やヒートポンプ（HP）冷房の利用が可能となり、夏季の日射量を十分に生かした高い光合成速度が得られる。最近、工場や発電施設、大気中からCO<sub>2</sub>を回収・濃縮する装置の研究開発が進んでおり、これらを農業利用することが期待されている。また、閉鎖度の高い温室では夏季の病害虫の侵入リスクを大幅に低減でき、農薬散布量や労力の削減に加え、農薬の製造時のC排出や散布機械の洗浄に使用される水も低減できる。

#### 4-3. 木材チップ利用

近年、山間部や森林に近い一部の温室では、燃料に重油や灯油ではなく木材チップを利用した暖房設備が導入されている。これは大気中のCを吸収した木本植物を燃料として利用するもので、地下にある石油由来のCを新たに地上に放出しないという点でCNに合致する。また、森林の受光状態をよくするための間伐などで出される木材の利活用にもなっている。ただし、この木材チップの利用は、木本植物が固定したCを大気に再放出することから、大気中のC濃度を下げることではなく、後述の暖房の電力化に移行する間の手段としては有効であるが、可能な限り木材は燃焼させずに木材のまま利用、貯留することが望ましい。

### 5. 今後の技術革新

#### 5-1. 石油燃料から電力へ

温室の環境制御に必要な装置（冷・暖房、遮光・補光、かん水）は、コストを度外視すれば技術的にすべて電化できる。これをコストも加味して究極まで進めたのが植物工場である。電化できるということは、C排出のない（少ない）方法で発電すれば、温室の環境制御に伴って排出されるCはCNに近づく。すぐにゼロにならないのは、LCAの観点からも温室

の構造物や発電装置、環境制御装置の作製といったイニシャル部分で多量のCが排出され、それが減価償却されるまで時間がかかることが理由である。さらに、水、肥料、農薬などの合成（精製）や輸送といったランニング部分でもCが排出される。

近年では、冷・暖房能力の高いHPが開発されているものの、日中の温室内の昇温抑制にはまだ能力不足である。また、機器の価格や電気代の高さから、生産施設での普及は進んでいない。C収支の観点から言えば、HPの「冷・暖房能力のさらなる向上」、「自然エネルギー由来の電力を安定十分供給」の2点が実現すれば、温室内の冷・暖房に使用される燃料を削減できる。これには工学分野での技術革新が必要で、農学分野と他分野との情報交換や研究協力が必要である。

#### 5-2. 資源・エネルギーおよびカーボンの地産地消

太陽光発電で得た電気エネルギーを蓄電池に貯めて利用できれば、石油由来のC排出なしに温室の環境制御や栽培管理が可能となる。この場合、太陽光を電気に変換・利用するので、冷・暖房によるC排出量は大幅に削減される。このような発電と蓄電技術が今後一層進めば「電力の地産地消」が実現し、送電ロスの削減や地域内での消費電力の平準化（調整）によって、広域かつ大幅なC削減に貢献することができる。

20年ほど前から植物工場を組込んだ都市・農村モデルは提言されていたものの、CNの観点から近年再評価されている都市モデルとして、地域一体となって資源・エネルギーを無駄なく利用するスマートシティがある。これは発電施設や工場などから排出される熱源やCO<sub>2</sub>を隣接する温室や植物工場で利用し、生鮮野菜を少ない輸送コスト（C排出）で地産地消する都市である。このモデルでは地域ごとの特色を生かし、水産や畜産分野とも連携することで、流通や消費段階で発生したフードロスや飼料や堆肥などに利用することもできる。実際の研究事例として、電力中央研究所は離島を実証地として、植物工場を発・蓄電拠点かつ消費電力の平準化（調整）バッファとして利用することで、電力を地産地消する研究開発を進めている（庄子ら、2022）。このような地域限定のモデル研究はC収支が解析しやすく、得られたデータはLCAの算定精度の向上につながると思われる。

園芸生産に利用される資源・エネルギーの種類や価値は地域によって異なり、生産物もまた地域や季節によってその価値が異なる。よって、このような生産とエネルギーに関する実データを蓄積していくことで、将来的に、環境制御による収量・品質の最大化と、それに必要な資源・エネルギー使用量(C 排出量)の最少化を達成するためのシミュレーションモデルの開発などへ繋がっていくことが期待される。

### 5-3. エネルギー保存則 (余談)

前節で「換気やHPで生産施設内の気温や湿度を最適化できる」と書いた。この時、同時に「HPでは温室外に不適な気温や湿度の空気が排出された」と理解された方は正解である。夏季のビル群や住宅密集地では、エアコン(HPのこと)からの排熱で建物外の気温が上昇する。これと同じで、温室内環境の最適化は「局所冷・暖房している(自分の)空間以外はどうでもいい」という状態になっていることを忘れてはならない。仮に、1棟の温室内だけでなく、複数の温室群、地域全体を周年快適に空調制御したい場合、複数の地域間(または地上と宇宙空間)で熱交換をする巨大HPと巨大蓄熱槽が必要になる。資源・エネルギーやCを移動させるには、エネルギー(熱)が必要であり、C収支を考える際には熱収支についての議論も欠かせないが、本稿では割愛する。

## 6. 農学研究、次の100年に向けて

現在の生産技術では、残念ながら施設園芸におけるCN達成は困難である。しかし、課題は明らかで、まずはC収支の算定精度の向上と試算例の蓄積が必要である。次に、収量・品質と、それに必要な資源・エネルギー使用量やC排出量を最小化するシミュレーション開発が求められる。具体的な生産技術としては、生産時や輸送時のC排出量を極限まで減らし、固定したCを貯留する技術開発が求められる。

CNに向けたアプローチは他にも多数ある。土壌特性を生かした耕地利用、遺伝子組換えやゲノム編集による耐病性強化や可食物率・目的成分濃度の向上、環境制御技術による高効率生産、長期鮮度保持技術なども有効である。これらは農学研究が深く関わる領域であり、学会連携を通じて効率的に取り組

むべき研究課題である。

来年、2023年に(一社)園芸学会は創設100年を迎える。これまで園芸学研究は、地域に適した園芸生産技術と、生理・生態、ゲノム、流通に関する基礎研究を積み重ね、全国や海外の園芸産業の発展に寄与してきた。今、急激な気候変動、資源・エネルギー問題、極端な経済不均衡という世界規模の危機に際し、次の100年を無事に向かえるためには、他分野、他学会との連携を通じて、科学的見地から何を研究し、何を提唱すべきか、慎重かつ迅速に判断しなければならない。

### 引用文献

- Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R.M., van den Dobbelsteen, A.A.J.F. (2022) The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production* 377: 134443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443>
- Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Yoshikawa, N., Okubo, T., Takagaki, M. (2018) Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan. *Journal of Cleaner Production* 186: 703-717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.110>
- 庄子和博・地子智浩・石井隆・伊藤憲彦・坂東茂・比嘉直人・後藤文之(2022)再エネ活用植物工場実験施設の宮古島設置とデマンドレスポンスによる植物の成育影響. *日本生物環境工学会. 福岡大会講演要旨*. p.80-81.

### 参考 URL

- 農業分野における気候変動・地球温暖化対策について(2021)農林水産省. 農産局農業環境対策課. <https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-72.pdf>
- 第3回グリーンイノベーション戦略推進会議WG 2020年9月8日 農業由来温室効果ガス排出削減技術の開発. [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/green\\_innovation/pdf/003\\_03\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/003_03_01.pdf)
- 資料3. 温室効果ガス排出の現状等(2021)経済産業省. [https://www.meti.go.jp/shingikai/chikyuu\\_kankyo/ondanka\\_wg/pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/chikyuu_kankyo/ondanka_wg/pdf)
- 環境省 資料4 燃料別の二酸化炭素排出量の例. <https://www.env.go.jp/council/16pol-car/y164-04/mat04.pdf>
- 施設園芸省エネルギー生産管理マニュアル(改定2版)平成30年10月農林水産省生産局. <https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-112.pdf>
- 園芸農業の省エネルギー等に関する調査報告書(Ⅲ)(緊急雇用創出臨時特例基金事業)平成24年2月 高知県農業振興部環境農業推進課. [https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/111901/files/2012062500570/2012062500570\\_www\\_pref\\_kochi\\_lg\\_jp\\_uploaded\\_attachment\\_74650.pdf](https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/111901/files/2012062500570/2012062500570_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_attachment_74650.pdf)
- 地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン(第3版)平成19年3月環境省地球環境局地球温暖化対策課 参考資料2 温室効果ガス排出量計算のための算定

- 式及び排出係数一覧. [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin\\_g/3rd\\_edition/ref2.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf)
- ナノファイバー断熱資材活用マニュアル 平成 30 年 1 月 農食事業 27013C コンソーシアム. [https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/publication/files/warc\\_man\\_NanofiberManual201802a.pdf](https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/warc_man_NanofiberManual201802a.pdf)
- 農産物の温室効果ガス簡易算定シートの概要. [https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/b\\_kankyo/attach/pdf/220912-1.pdf](https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/b_kankyo/attach/pdf/220912-1.pdf)
- 環境技術解説 ライフサイクルアセスメント (LCA) 国立環境研究所. <https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=57>
- 電気新聞テクノロジー&トレンド「食の脱炭素」へ 2022 年 6 月 24 日 電中研の挑戦 電力中央研究所. <https://cripi.denken.or.jp/press/journal/techtrend/220411.html>