施設園芸栽培管理におけるバイオマス生産と GHG削減の相乗便益モデルの開発

志賀 俊成¹・松井 孝典²・町村 尚³・中尾 彰文⁴・山本 祐吾⁵

¹非会員 大阪大学大学院生 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)
E-mail: toshinari.shiga@ge.sce.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大阪大学助教 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³非会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴非会員 和歌山大学大学院生 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

⁵正会員 和歌山大学講師 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

農業では食料や資材などの人間の福利を支えるバイオマス生産が可能な反面、栽培管理に伴う多大な温室効果ガス (GHG: Green House Gas) の排出があり、生態系サービス利用と気候システム問題の間にトレードオフ構造が生じている。そこで、本研究ではそのトレードオフ構造が顕著である施設園芸を対象として、バイオマス生産とGHG排出削減の相乗便益モデルの開発を目的として、鑑賞用キク生産プラントを事例として温度および肥培管理の変更に伴うバイオマス生産とGHG排出の応答を分析し、栽培管理の最適化のモデルケースの導出を行った。分析では、DNDC (DeNitrification-DeComposition) モデルによる農地からのバイオマス生産量とGHG発生量の解析、温室暖房燃料消費試算ツールによる温度管理による暖房燃料消費量の解析、LCAツールであるMilCAによる投入肥料製造に伴うGHG排出量の解析を統合して、様々な栽培管理ケースに対する炭素窒素収支の挙動を評価した。結果、対象プラントにおいて栽培管理の最適化により、現状から95%以上のバイオマス生産量を確保しつつ、GHG排出量を34.6%削減することが可能であるという結論を得た。今回構築した栽培管理の最適化のモデルケースは他の施設園芸においても有効に適用できると考えられる。

Key Words : biomass production, GHG reduction, ecosystem services, eco- efficiency, DNDC model, life cycle assessment

1. 研究の背景と目的

農業生態系では、食料の供給サービスを中心として、水源涵養や土壌形成など人間の福利を形成する多様な生態系サービスが生み出されており、この持続的利用は人類における最大の課題である。その一方で、生産環境の制御や農業機械へのエネルギー投入、土壌中の微生物活動など様々なプロセスにより、二酸化炭素 (CO₂)、一酸化二窒素 (N₂O)、およびメタン (CH₄) などの農業由来のGHG排出量は全GHG排出量の13.5%を占めている¹⁾。今後、農業活動の改善、技術導入により、生態系サービスの質を高めながら、農業生態系由来のGHG排出を大幅に減少させるという課題に対して、相乗便益型の栽培管理の展開が求められる。

その中でも、農産物の高付加価値生産様式が進み、施設園芸農業は農業生産において重要な位置を占める。特に、年間を通じた多種の食料収穫といったバイオマス供給生態系サービスの安定性の観点だけでなく、超高品質な鑑賞用植物等の生産による文化的生態系サービス供給

における役割も大きい。他方、温度・湿度等の雰囲気制御の要求レベルの高さから、過剰にエネルギー集約的であるという批判も多い。また現状の施設園芸土壌には、生産性向上を目的として多量の肥料が投入されており、露地栽培農家に比べ施設園芸農家の肥料費は約1.4倍であるという報告がなされており¹⁾、土壌に肥料成分が過剰に投入されている傾向にある。

適切な施肥管理を行うことによって、農家の肥料費の負担が軽減できるだけでなく、農耕地からのN₂O等のGHG発生量の抑制や化学肥料製造に伴うGHG発生量の抑制も可能である。そこで本研究では、良質な作物の生産が可能な反面、雰囲気管理や肥培管理に伴う多大なGHG排出があり、バイオマス生産とGHG排出の間にトレードオフ構造が生じている典型例である施設園芸を対象として、バイオマス生産率とGHG排出の栽培管理を両立させた最適化モデルケースを開発することを目的とする。

2. 研究方法

本研究では、施設園芸の一例として、鑑賞用キク生産プラントを対象として、温度および肥培管理の変更に伴うバイオマス生産とGHG排出の応答を分析し、バイオマス生産とGHG排出削減の相乗便益モデルケースの分析を行った。今回対象とした観賞用キク生産プラントではキクの外観の品質を花卉1本当たりの重量により決定しているため、分析対象をバイオマス生産量とし、品質も含め近似的に評価した。以下にその詳細なプロセスを示す。

(1) ケーススタディ対象地

本研究は和歌山県有田川町のスプレーギク温室農家のガラスハウスプラント（面積 7a）をケーススタディ対象とした。なお日本のガラスハウスプラントの標準的な規模は7～9 [a]であり、当該プラントは平均的な規模のガラスハウスである³⁾。有田川町は和歌山県のほぼ中央に位置し、西部以外は山地に囲まれ比較的急斜地の多い山岳地系となっている。気候は黒潮の影響を受け比較的温暖な気候であり、瀬戸内気候区と南海気候区に属している³⁾。年平均気温は16.1 [°C]、年降水量は1748.5 [mm]⁹⁾である。地域内の畑土壌群は約 60 % が褐色森林土壌群である⁹⁾。

栽培作物であるスプレーギク (*Spray Chrysanthemum*) は日本では施設栽培で生産されるキク科キク属の多年草で、一般的に認知されている輪菊と異なり一茎多花咲である。単位面積当たりの収穫本数が大きく、窒素吸収量が小さい傾向にあり⁷⁾、窒素吸収が少ない反面、品質を担保するために施肥が多くなりがちなのが指摘されている⁸⁾。この点で本研究が目的とする温度・肥培管理の分析において、典型的な分析対象として適していると考えられる。

(2) DNDC モデルを利用したシミュレーション

対象プラントにおける炭素窒素収支を分析するためには、窒素の硝化、脱窒、溶脱や炭素の土壌呼吸による排出などの物質フローの把握が不可欠であるが、今回対象としたスプレーギクに関する詳細な物質フローモデルは存在しない。そこで本研究では、Li ら (1992) によって開発された農地土壌における炭素窒素収支のシミュレーションが可能な生物地球化学プロセスモデルである DNDC モデル Ver9.5 (Denitrification and Decomposition model)^{9), 10), 11)} を用いて、対象プラントの炭素窒素収支の分析を実施した。DNDC モデルでは、気候データ、土壌、作物、営農管理の入力に対して、土壌気象、作物成長、有機物分解の3つのサブモデルが応答して、土壌中の硝化、脱窒、発酵プロセスを経て、バイオマス生産量、土壌中炭素窒素濃度や硝化・脱窒量等が出力される。近年ではモデルの適

合性などの理論研究¹²⁾や、実事例への応用¹³⁾など多岐にわたる研究がなされている。畑土壌の炭素動態のみを再現するRoth-Cモデル¹⁴⁾と比較して、バイオマス成長や窒素動態を扱うことや詳細パラメータを設定する点やモデルパラメータで施設園芸を設定可能である点などで単体の施設園芸規模でのシミュレーションに最適なモデルであると考えられる。また今回使用するDNDCモデル Ver9.5は畑地向けのモデルであり、水田や有機栽培での分析には適用に課題があると報告がなされている¹⁵⁾。以下に本研究で行った DNDC モデルの操作の詳細を示す。

a) DNDC モデルへの入力データの設定

直近2年間における栽培管理に対して、対象プラントの管理者に対するヒアリングおよび栽培作物16サンプルとプラント内土壌6サンプルの成分分析を実施し、気候データと土壌、作物、栽培管理に関するパラメータの設定を行った。

気候について、まず対象プラントの近隣の地方気象台である川辺観測所（北緯33.536，東経135.130）の2011年の気候データを入手した¹⁵⁾。ここで、対象プラントではプラント内が日最低気温 18 [°C] 以上、日最高気温 25 [°C] 以上になるように温度管理しているため、モデル内でこの温度環境を再現するために、日最低気温が18 [°C] 以下の場合には、18.0～18.3 [°C] で乱数を割り当て、日最高気温が25 [°C] 以下になる場合には25.0～25.3 [°C] で乱数を割り当てることで気候データを修正した。それ以外の場合は、対象プラントでは天窓を開放しているため、プラント内温度は外気温と同等と仮定し、そのままの気候データを利用した。降雨量については、対象プラントでは天水を直接利用せず、貯水タンクによる灌水を行っているため0と設定した。

土壌については、モデル内では土地利用形態、土性、炭素・窒素の含有量のパラメータ群を設定する必要がある。仮比重と土壌 pH については成分分析を基に、表層 10 cm での仮比重を 0.9046 [g・cm⁻³]、土壌 pH を 6.2 と設定

表-1 作物パラメータ入力値

名 称	値	備 考
最大バイオマス生産量 [kg C・ha ⁻¹]	1343.17	作物サンプルの全炭素量及び収穫本数、植え付け本数等をヒアリングを基に設定。
花炭素重量比	0.13	サンプリング調査の部位別の重量比と全炭素率より算出。4品種の平均値。
葉炭素重量比	0.35	
茎炭素重量比	0.47	
根炭素重量比	0.05	
花C/N比	11.93	サンプリング調査の部位別のC/N比の4品種の平均値
葉C/N比	5.75	
茎C/N比	21.15	
根C/N比	16.22	
有効積算温度 TDD [°C・day]	2107	0 [°C] 以上を有効気温とし、栽培日程及び温度管理についてのヒアリングを基に設定
成長適正温度 [°C]	25.0	モデル内のFlowerのデフォルト値を引用
農地残渣率	0.11	残渣に関するヒアリング調査を基に設定

した。その他の項目に関しては実測のデータや統計データを得ることができなかったため、土壌全炭素および全窒素の実測値とモデルの予測値が近似するようにモデルチューニングを実施して決定した。このときのモデルチューニングの詳細については2章2節b)項にて記述する。

作物について、入力が必要なパラメータは、作付面積当たりの最大バイオマス生産量 [$\text{kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$]、花・葉・茎・根の炭素重量比、各部位のCN比、積算温度 [$^{\circ}\text{C}$]、成長適正温度 [$^{\circ}\text{C}$]、根を除いた農地に鋤き込む残渣の発生割合である。これらのパラメータは表-1のように設定した。

栽培管理については、大きく分けて栽培日程、耕起、化学肥料施肥、有機肥料施肥、灌水についてのパラメータを設定する必要がある。まず収穫、施肥、灌水の実施日等の栽培日程については対象プラントの直近2年間での栽培記録を基に設定した。耕起深についてはヒアリングにより20cmで設定した。次に施肥に関して、対象プラントにおける1作での肥料投入は、実際の肥料投入量の記録と肥料成分表を基に、元肥で有機配合肥料を120 kg、追肥で液体化学肥料を40 kgで設定した。投入している肥料の窒素成分は元肥の有機配合肥料の全窒素率が7.87%であり、その内、有機態窒素が55%、無機態窒素が45%であった。追肥の液体化学肥料は全窒素率が10%であり、無機態窒素が100%であった。元肥の無機態窒素は硫酸アンモニウムが67%、リン酸アンモニウムが33%、液肥はアンモニア態窒素が14%、尿素態窒素が86%であった。有機肥料に関しては実際にはナタネ粗を中心とした混合有機肥料を投入しているため、DNDCモデルの設定ではbean cakeを選択した。CN比については10と設定した¹⁹⁾。

最後に灌水については、対象プラントに対する2010～2011年の2年間の灌水実施日に関する記録と1回当たりの灌水量に関するヒアリングを基に1回毎の灌水量を記載した灌水情報ファイルを作成した。なお、灌水量は0.86[cm]であった。

b) 実測値との比較によるモデルチューニング

DNDCモデルは、これまで北米、欧州、中国を中心とした国々の圃場試験データを基に適合性の検証が行われている^{18), 19)}が、日本特有の土壌条件下や施設園芸の特殊な環境下でのモデルの適合性は十分検討がなされていないことが指摘されている²⁰⁾。さらに対象プラントでは土壌中の病害虫、雑草種子の駆除を目的として、作付けごとにボイラーにより加熱した水蒸気で土壌を一時的に高温にする蒸気消毒を実施しているため、土壌の理化学的な変化や微生物相の貧弱化等が発生し、通常の土壌とは異なる状態にある可能性が高い²¹⁾。この点を鑑みて、モデルチューニングでは粘土率と有機物分解速度の土壌パラメータを調整することでモデルチューニングを実施

表-2 チューニング前後での土壌パラメータ入力値

項 目	単 位	チューニング前	チューニング後
仮比重	[$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	0.9046	0.9046
粘土率		0.19	0.23
空隙率		0.47	0.47
圃場容水量	[wfp]	0.51	0.51
シオレ点	[wfp]	0.24	0.24
透水係数	[$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$]	0.03	0.03
分解速度係数		1.000	0.013
初期有機炭素量	[$\text{kg C} \cdot \text{kg soil}^{-1}$]	0.02	0.02
初期 NO_3^- 量	[$\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$]	0.50	0.50
初期 NH_4^+ 量	[$\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$]	0.05	0.05

表-3 チューニング前後のモデル収束値と実測値の比較

	炭素率 [%]	窒素率 [%]	硝酸態窒素量 [$\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$]
実測	2.31	0.31	691.6
チューニング前	0.40	0.08	375.5
チューニング後	2.29	0.32	663.4

した。粘土率、分解速度係数以外のパラメータについてはローム土壌用のモデルデフォルト値を用いた。モデルの適合性の判断には、DNDCモデルのシュミレーションにおいて、大気との N_2O 等の交換を行う土壌表層10 cmでの炭素率および窒素率、硝酸態窒素濃度の予測値が対象プラントでの実測値を再現するかを確認した。チューニング前後での土壌パラメータの設定値を表-2に、モデルチューニング後のシュミレーションの収束値を以下表-3で示す。モデルチューニング実施前と比べて表層10 cmにおける土壌の炭素率、窒素率、硝酸態窒素量のいずれにおいても誤差が5%未満になり精度が改善した。この結果よりチューニング後のモデルのシュミレーションの収束値が現状の対象農地の炭素窒素収支を再現していると判断した。

c) ベースケースの構築

対象プラントでの現状のバイオマス生産量とGHG排出量を分析するために、以下の様なシュミレーションを実施した。まず前項でチューニングしたモデルによる500年間のスピナップシュミレーションによって得られた土壌状態の収束値をモデルの初期値として設定し、現状の気候、栽培管理による100年間のシュミレーションを実施した。シュミレーションで得られた100年間のバイオマス生産量 [$\text{kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$]および N_2O 発生量 [$\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$]、 CH_4 発生量 [$\text{kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$]、土壌貯留炭素の変化量 [$\text{kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$]の合計値を、栽培1サイクルである2年間のバイオマス生産量とプラント土壌からのGHG排出量に換算して、これをベースケースにおけるバイオマス生産量と対象プラント土壌からのGHG排出量と定義した。

(3) 栽培管理の変更によるバイオマス生産率とGHG排出量の応答分析

栽培管理における重要な要素は主に温度管理と肥培管

理である。このとき、まず積算温度に応じて作物のバイオマス成長量が決定され、そこから作物の窒素要求量が決定されるため²⁾、まず分析 1 として温度管理の変更を行い、分析 2 として肥培管理の変更を行うモデルとした。以下にそれぞれの管理における設定を示す。最後に上記 2 つの分析を基に、栽培管理の変更によるバイオマス生産率と GHG 排出削減量を評価した。なお、バイオマス生産率は、ベースケースでのバイオマス生産量で管理変更後のバイオマス生産量を除した値である。

a) 分析 1：温度管理による炭素窒素収支分析

まずチューニング後の DNDC モデルを用いて施設園芸プラント内の施設内暖房設定温度を変化させた際のプラント内のバイオマス生産や土壌由来の GHG 排出等の炭素窒素収支の挙動を分析し、次に施設内暖房設定温度別の燃料消費量の変化から化石燃料消費由来の GHG 排出量を算出して、暖房設定温度変更による総 GHG 排出削減量を分析した。

施設内暖房設定温度別入力データの設定では、DNDC モデル内に施設暖房温度を設定するパラメータは存在しないため、気象データの日最高気温と日最低気温に以下のような調整することで異なる施設暖房設定温度下での環境を再現した。暖房設定温度を t [°C] とした時、対象プラントは暖房利用時に最低気温 t [°C]、最高気温 $t+7$ [°C] で温度管理していると仮定し、観測所での日最低気温が t [°C]、日最高気温が $t+7$ [°C] をしたまわる日に関しては施設暖房の利用を想定し、日最低気温、日最高気温がそれぞれ t [°C] 以上、 $t+7$ [°C] 以上になるように設定した。それ以外の日に関しては先での設定と同様に換気が十分に行われるものと考え、そのままの気候データを使用した。 $t=12\sim22$ の 1°C ごと の計 10 の温度管理ケースを想定し、対象プラント土壌からの GHG 排出変化量とバイオマス生産率を算出した。

また温度管理の変更に伴う燃料消費量の変化量は、温室暖房燃料消費試算ツール²³⁾を用いて算出し、化石燃料消費由来の GHG 排出削減量の算出をおこなった。温室暖房燃料消費試算ツールは野菜茶研究所・高収益施設野菜研究チームが開発したモデルであり、地点情報、栽培施設の大きさや被覆材、暖房設定温度、暖房試用期間を与えると、対象の気象条件に対応した暖房燃料消費量を算出することが可能なモデルである。モデルの動作に必要な施設資材、施設面積、使用燃料、内張りの有無等のパラメータはヒアリングを基に設定した。表-4に一覧を示す。地点情報に関しては選択可能な 51 の地点の中で対象地に最も気候が近いと考えられる大阪を選択した。暖房機効率は最近の温風暖房器の性能から得られたモデルのデフォルト値である 0.82 を用いた。暖房開始日および終了日の設定は DNDC モデルに入力する気候データを調整した日と対応させて設定した。上記に設定した項

表-4 温室暖房燃料消費試算ツールへの入力設定

項 目	単 位	値
軒高	[m]	2.0
間口	[m]	7.2
奥行	[m]	49.5
連棟数	[棟]	2
地点		大阪
被覆資材		ガラス
内張り		塩化ビニル2層
隙間換気		内張り2層
風速補正		一般地・内張りあり
燃料種		A 重油

目を入力し、温室暖房燃料消費試算ツールで暖房設定温度 t [°C] の時の2年間の A 重油使用量を算出した。そこにライフサイクルアセスメントツールである MilCA²⁴⁾で算出した A 重油製造・燃料燃焼に伴う GHG 排出原単位 3.087 [tC・kL⁻¹] 乗じることで GHG 排出量に換算し、温度管理の変更による暖房利用に伴う GHG 排出削減量を算出した。

b) 分析 2：肥培管理による炭素窒素収支分析

次にチューニングを実施したモデルを用いて対象プラントにおいて施肥量を減らす「減肥」を想定したバイオマス生産や土壌由来の GHG 排出等の炭素窒素収支の挙動を分析した。加えて、投入する肥料の製造に由来する GHG 排出量についてもライフサイクルアセスメントを行い、肥培管理変更による総 GHG 排出削減量を分析した。

ベースケースから施肥量を減じていく場合を想定し、以下のように入力パラメータを調整した。まず、減肥量 n は 1 作当たりの施用量を 10 ~ 150 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹]、10 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] 毎の計 15 の肥培管理ケースを設定し、肥培管理の変更による対象プラント土壌からの GHG 排出変化量とバイオマス生産率を算出した。減肥は元肥、追肥ともに同等の割合で減じることとした。次に 1 サイクル 2 年間で投入した肥料量に、MilCA で算出した窒素化学肥料および有機質肥料の GHG 排出原単位を乗じて肥料製造に伴う GHG 排出量を算出した。窒素化学肥料については 6.084 [kg CO_{2eq}・kg N⁻¹]、有機肥料について 0.0713 [kg CO_{2eq}・kg⁻¹] を用いた。

(4) バイオマス生産と GHG 排出の統合評価による栽培管理の最適化モデルケースの導出

前節で算出した各温度管理と肥培管理でのバイオマス生産量と GHG 排出量を基に栽培管理の最適化モデルケースの算出を行った。ここでは、施設暖房設定温度 t [°C] の温度管理と減肥量 n [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] の施肥管理を同時に実施する栽培管理を想定した。今回の対象作物であるスプレーギクの出荷要求仕様を満たすバイオマス生

図-1 ベースケースにおける炭素収支フロー

産率を 0.95 以上とした場合に、単位 GHG 排出量当たりのバイオマス生産量で定義する環境効率 $[\text{kg C} \cdot \text{CO}_2\text{eq}^{-1}]$ が最大となるものを算出し、これを栽培管理の最適化条件とした。ここでの GHG 排出量は、2 章 3 節で示した各栽培管理を実施した際のプラント土壌からの GHG 排出量、暖房燃料消費による GHG 排出量、投入肥料の製造に伴う GHG 排出量の 3 つの合計値と定義した。DNDC モデル内のバイオマス生産量の算出は、積算温度、そこからの作物窒素要求量、土壌状態に応じた養分吸収量、バイオマス生産量の順で決定されるため、まず減肥量 $n=0$ における環境効率を最大化させる温度管理 t を算出し、次にその t の条件下で環境効率を最大化させる n を算出した。

3. 結果・考察

(1) ベースケースにおける炭素窒素収支分析結果

ベースケースにおける 2 年 1 サイクルでの炭素収支と窒素収支の結果をそれぞれ以下の図-1, 2 に示す。炭素収支については化石燃料消費由来のハウス外への CO_2 排

図-2 ベースケースにおける窒素収支フロー

出が際立って多く、施設園芸における燃料消費は大きな課題であることが明らかになった。土壌呼吸、植物呼吸、光合成等の炭素収支についてはバランスしており、栽培施設内のコンパートメントから外部への炭素流出は非常に小さいものであった。窒素収支については、土壌からの窒素溶脱量が $607.9 [\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$ と非常に大きく、投入している肥料の 45 % が作物に吸収されずに土壌外に溶脱しており、現状の対象プラントにおいて窒素が過剰に供給されていることが示唆された。土壌からの揮発の内、 N_2O が $30.9 [\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$ であった。またベースケースにおけるバイオマス生産量は $9.32 [\text{t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$ が算出されたが、直近2年の対象プラントでのバイオマス生産量の実測値が $9.21 [\text{t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$ であるため、誤差 1 % 程度でベースケースが現状のプラントのバイオマス生産をよく再現できていると考えられる。このとき、プラント土壌からの GHG 排出量は $14.9 [\text{t CO}_2\text{eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$ と算出された。なおプラント土壌からの GHG 排出量は、土壌からの N_2O 排出量 $[\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$, CH_4 の排出量 $[\text{t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$, 土壌炭素貯留変化量 $[\text{t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2\text{yr}^{-1}]$ を二酸化炭素量に換算し足し合わせることで算出した。

図-3 温度管理ケース別のプラント土壌由来の GHG 排出量

図-4 温度管理ケース別の GHG 排出削減量とバイオマス生産率の応答

(2) 結果 1 : 温度管理変更によるバイオマス生産率と GHG 排出量の応答の分析結果

次に、図-3に温度管理ケース別のプラント土壌からの GHG 排出量の結果を示す。暖房温度を高く設定するほどプラント土壌からの GHG 排出量が小さくなる傾向にあることが示された。これは施設内暖房設定温度が高くなるにつれて、作物の成長最適温度として設定した 25 [°C] を満たす日数が増加することによりバイオマス生産量が増加し、それに伴い土壌からの作物の窒素吸収量も増え、結果として土壌中の窒素蓄積を減少させたことで土壌からの N_2O を主とする GHG 排出量が減少したためと考えられる。なお 22 [°C] の温度管理ケースではベースケースと比較して土壌中の窒素蓄積量が 7.98 [kg N・ha⁻¹・2yr⁻¹] 減少するという結果を得た。

図-4には、温度管理ケース別のプラント土壌由来および化石燃料消費由来のGHG排出削減量とバイオマス生産率の結果を示す。施設内暖房設定温度をベースケースから 6 °C 下げて温度管理を実施することで、591.0 [t CO₂ eq・ha⁻¹・2yr⁻¹] の GHG の削減が可能であるという結果を得た。GHG 排出量の内約は A 重油の燃料消費量が支配的であった。特に暖房設定温度 20 [°C] を分岐点として GHG 排出量が著しく増加し、21 [°C] と 22 [°C] の温度管理ではベースケースと比較した際にそれぞれ 667.4 [t CO₂ eq・ha⁻¹・2yr⁻¹]、836.0 [t CO₂ eq・ha⁻¹・2yr⁻¹] の GHG 排出量の増加が見込まれる。これは 20 [°C] を境に日最低気温が施設内暖房設定温度を下回る日数が増加するという対象地の気候条件に影響を受けたためである。またバイオマス生産率と GHG 排出削減量との関係を見ると、暖房設定温度を高く設定するとバイオマス生産量が増加するとともに GHG 発生量が増え、逆に低く設定すると、バイオマス生産量が低下するとともに GHG 排出が抑制されるというトレードオフが存在することが定量的に示された。ただし、現状の 18 [°C] の設定に対して施設内暖房設定温度を上昇させても、バイオマス生産量の上昇は最大で 22 [°C] の 0.8% 増加と小さいものであり、過剰な高温設

定によってバイオマス生産量が増加することは期待できず、GHG排出のみが 1.87 倍に増加して非効率化するという結果が得られた。

(3) 結果 2 : 肥培管理変更によるバイオマス生産率と GHG 排出量の応答の分析結果

図-5に肥培管理ケース別のプラント土壌からの GHG 排出量を示す。プラント土壌からの GHG 排出量は 90 ~ 100 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] までの減肥において直線的に減少し、それ以上の減肥についてはほぼ横ばいに推移し、130 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] の減肥において 1.90 [t CO₂ eq・ha⁻¹・2yr⁻¹] で最少になるという結果を得た。減肥に伴い N_2O の発生源である土壌中の無機態窒素量が減少し、 N_2O 発生が抑制されたためと考えられる。また 90 ~ 100 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] 以上では、 N_2O 排出量は減少傾向にあるが、一方で土壌中の窒素枯渇によってバイオマス生産量が減少して土壌への鋤き込み残渣が減少することや、減肥に伴って有機肥料投入量が減少して土壌貯留炭素量が減少することで CO₂ 排出量が大きくなることが示された。

図-6に肥培管理ケース別のプラント土壌由来および肥料製造由来のGHG排出削減量とバイオマス生産率の算出結果を示す。GHG排出削減量は 150 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] の減肥で最大の 16.81 [t CO₂ eq・ha⁻¹・2yr⁻¹] となった。 N_2O 削減量が最も影響が大きく、90 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] の減肥では GHG 排出削減量の 86 % を占めるという結果になった。温度管理による GHG 削減効果に比べると効果は 10 分の 1 程度であるが、90 [kg N・ha⁻¹・1作⁻¹] までの減肥であればバイオマス生産量を抑制することなく GHG 削減が可能であることが示された。ただし、一方でそれ以上の減肥を実施した際は大きくバイオマス生産率が低下し、バイオマス生産と GHG 排出削減を同時に達成できないことが示唆される。

図-5 肥培管理ケース別のプラント土壌由来の GHG 排出量

図-6 肥培管理ケース別の GHG 排出削減量とバイオマス生産率の応答

図-7 栽培管理最適化モデルケースにおける炭素収支フロー

(4) 栽培管理の最適化モデルケースの算出結果

まず減肥量 $n = 0$ の際に、スプレーグク生産の出荷要求仕様であるバイオマス生産率 0.95 以上を確保するという制約下で環境効率が最大となる温度管理ケースは $t = 15$ で最大の環境効率 $15.3 [\text{kg C} \cdot \text{CO}_2\text{eq}^{-1}]$ となった。次にこの温度管理下での最適な肥培管理ケースは減肥量 $n = 90$ にて最大の環境効率 $15.7 [\text{kg C} \cdot \text{CO}_2\text{eq}^{-1}]$ となった。以上よりバイオマス生産を維持したままで GHG 排出を最大に削減して環境効率が最大となる最適化モデルケースは、温度管理 $15 [^\circ\text{C}]$ 、施肥量 $102 [\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{作}^{-1}]$ での栽培管理であることが導かれた。この栽培管理によりベースケースに対し 96.6 % のバイオマス生産量を確保しながら、34.6 % の GHG 排出量削減が可能であるという結果を得た。GHG 排出削減量は温度管理によるものが大きく、97 % が燃料使用量、2 % がプラント土壌由来、1 % が投入肥料の削減によるものであった。

(5) 最適化モデルケースにおける炭素窒素収支の改善

最後に、最適化モデルケースにおける炭素と窒素の収支の分析結果をそれぞれ図-7, 8に示す。最適化モデルケースでは、炭素収支については化石燃料消費由のハウス外への排出が 34 % 減少した。また窒素収支については、土壌からの窒素溶脱量が最適ケースではベースケースと比較して 97.2% 減少するという結果になり、炭素窒素収支が改善されたことが示された。

5. まとめと今後の課題

(1) まとめ

本研究では生態系サービスの持続的な利用と温室効果ガス削減の相乗便益を得るためのモデル開発を目的として、施設園芸においてトレードオフが顕著であるバイオマス生産とGHG排出を最適化する栽培管理の最適化モデルケースの導出を行った。分析では DNDC モデル、温室暖房燃料消費試算ツール、MiLCA を統合的に用い

図-8 栽培管理最適化モデルケースにおける窒素収支フロー

て、対象プラントにおいて温度・肥培管理を変更した際のバイオマス生産量と GHG 排出量の応答を分析し、対象プラントにおいて栽培管理の最適化により、現状から 95 % 以上のバイオマス生産量を確保しつつ、GHG 排出量を 34.6 % 削減することが可能であることを示した。またこれらのバイオマス供給生態系サービスと GHG を同時に考慮した栽培管理の最適化モデルケースの導出プロセスは他の施設園芸にも適用可能であると考えられる。

(2) 今後の課題

本研究では、ヒートポンプなどの最新の暖房機器等の設備投資ではなく、栽培管理の最適化という農家の行動選択のみによっても十分なバイオマス生産と GHG 排出を相乗的に管理できる潜在があるというモデルケースを示した。これを更に良化するためには、GHG 排出の主因である熱源管理として、例えばバイオマスボイラーの導入による炭素中立化や、CO₂ 施肥・蓄熱・発電トリジェネレーションシステムの導入による超高効率化といった技術実装も含めたバイオマス生産と GHG 排出の相乗便益モデルを検討する必要がある。

また今回の分析結果には計上していないが、水系への窒素の溶脱に起因する N_2O 排出も考慮する必要があることが指摘されており²⁵⁾、日本温室効果ガスインベントリ報告書が設定する溶脱・流出の間接排出としての排出原単位 $0.006 \sim 0.025 [\text{kg N}_2\text{O-N} \cdot \text{kg N}^{-1}]$ ²⁶⁾を仮に最適化モデルケースに計上した場合、プラント土壌からの GHG 排出削減量が追加的に11~46%増加すると試算できる。本研究は施設園芸を対象としているため暖房利用による燃料消費量の影響が大きく、土壌からの GHG 排出は影響が小さくなっているが、同様の最適化モデルケースの導出を露地栽培で実施する際には、溶脱に伴う GHG の間接排出について十分に考慮する必要があると考えられる。

謝辞：本研究は日本生命財団環境問題研究助成H24年若手研究助成「農業生産におけるエネルギーセキュリティと環境品質の向上をめざした農産物チェーンの低炭素戦略」を受けて実施した。また調査においては現地の農家の方からの多大な支援を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change : Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, < <http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/> >
- 2) 木谷収：施設園芸のための脱石油技術の現状と展望、施設と園芸、146号、4-9、2009
- 3) 日本施設園芸協会：低コスト耐候性鉄骨ハウス施工マニュアル、2001、< <http://www.jgha.com/files/houkokhouk/12/lowcost-kaze.pdf> >
- 4) 和歌山県有田川町：第1次有田川町長期総合計画、< <http://www.town.aridagawa.lg.jp/news/documents/all.pdf> >、2007 (2013.03 参照)。
- 5) 気象庁：気象統計情報、< <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> > (2013.03 参照)。
- 6) 和歌山県：土壌肥料対策指針< http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070109/dojouhiryoun/m_sankou.htm > (2013.03 参照)。
- 7) 農林水産省：都道府県施肥基準等、< http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/ > (2013.03 参照)。
- 8) 西尾道徳：施設ギク農家の肥料投入行動とその技術的意識、< <http://lib.ruralnet.or.jp/nisio/?p=1455> >、2011 (2013.03 参照)
- 9) Li, C., Frolking, S., and Frolking, T.A. : A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research 97, 9777-9783, 1992.
- 10) Li, C., Frolking, S., and Frolking, T.A. : A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications, Journal of Geophysical Research 97, 9777-9783, 1992.
- 11) Li, C : Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems, Nutrient Cycling in Agroecosystems 58: 259-276, 2000.
- 12) 中川陽子、凌祥之：DNDC モデルの硝酸態窒素溶脱量予測における適合性の検討とモデルシミュレーションの応用、農工研技報 204, 221-232, 2006.
- 13) DNDC Biogeochemistry Model, < http://www.DNDC.sr.unh.edu/?page_id=9 >、(2013.03 参照)
- 14) Jenkinson D.S. and J.H. Rayner : The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Sci, 123, 298-305, 1977.
- 15) Fumoto, T., Kobayashi, K., Li, C., Yagi, K. and Hasegawa, T : Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. Global Change Biology, 14, 382-402, 2008.
- 16) 気象庁：気象統計情報 過去の気象データ検索、< <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture00.php> > (2013.03 参照)。
- 17) 農林統計協会編：ポケット肥料要覧 2010、農林統計協会、2012。
- 18) Brown, L., Jarvis, S., Sneath, R., Phillips, V., Goulding, K., and Li, C : Development and application of a mechanistic model to estimate emission of nitrous oxide from UK agriculture, Atmos. Environ., 36, 917-928, 2002.
- 19) Butterbach-Bahl, K., Kessel, M., Michle, P., Papen, H., and Li, C : Quantifying the regional source strength of N-trace gases across agricultural and forest ecosystems with process based model, Plant and Soil, 260, 311-329, 2004.
- 20) 中川陽子、凌祥之：日本の農耕地土壌への DNDC モデル適合性の検討、農工研技報 204, 221-232, 2006.
- 21) 福岡県：IV 土壌消毒対策、< http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/33/33032_3111398_misc.pdf > (2013.03 参照)。
- 22) Zhang et al : A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture, Ecological Modeling, 151, 75-108, 2002.
- 23) 独立行政法人農業技術環境研究所、野菜茶業研究所・高収益施設野菜研究チーム：わが国各地における各種温室の暖房燃料消費量の計算ツール、< www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/other/1_sisan_turu.xls > (2013.03 参照)。
- 24) 産業環境管理協会：MiLCA, 2012, < <http://www.milca-milca.net/> >、(2013.03 参照)。
- 25) Intergovernmental Panel on Climate Change : Agriculture, Forestry and Other Land Use, Vol. 4, IPCC guideline for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC National Greenhouse Gas Inventory Program, Hayama, Japan, 687, 2006. < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> > (2013.03 参照)。
- 26) 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 2012、：日本国温室効果ガスインベントリ報告書、地球環境研究センター、独立法人国立研究所、225-226、< http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2012/NIR-JPN-2012-v3.0-J_web.pdf > (2013.03 参照)。

(2013.07.30 受付)

Development of Co-benefit Model of Biomass Production and GHG Emissions in Greenhouse Horticulture Plant

Toshinari SHIGA, Takanori MATSUI, Takashi MACHIMURA, Akifumi NAKAO
and Yugo YAMAMOTO

Agricultural ecosystems can provide high quality biomass production as an ecosystem service. On the other hand, intrusive agriculture and searching for higher profitability, has induced enormous Green House Gas (GHG) emissions from agricultural ecosystems. In this way, trade-off between mitigating climate change and benefiting from biomass production ecosystem service has occurred. This trade-off is especially evident in greenhouse horticulture because of the requirement of high quality biomass production. Against this background the goal of this study is to develop a co-benefit approach between reducing GHG emissions and sustaining biomass production in greenhouse horticulture as a flagship model of solving this trade-off structure. Biomass production and GHGs emission from soil were analyzed using DNDC (DeNitrification DeComposition) model. Fuel consumption for heating was analyzed using a tool for estimating greenhouse heating fuel consumption. GHGs emission reduction by means of greenhouse temperature management and fertilizer use reduction was analyzed. As a result, the case study plant was found to be using excess fertilizer. Reducing fertilizer use by 45 % was found to have limited effect on the biomass production. Environmental efficiency defined as the ratio of biomass production and GHGs emission was found to be at its highest when fertilizer use was reduced by 47% and the greenhouse temperature was lowered by 3°C at the case study production plant.