

排ガスからの CO₂ 回収・施用システムの バラ栽培への実証*

宮下真一・増田正夫・太田宗吾
吉屋康太*¹

Demonstration of CO₂ Recovery and Supply System from Exhaust Gas to Rose Cultivation

Shinichi Miyashita・Masao Masuda・Sougo Ohta
Kouta Yoshiya

CO₂ 施用は、バラやイチゴなどの作物の光合成促進による収量・品質の向上を目的に大規模施設園芸で広く行われている。しかし、化石燃料の燃焼ガス、あるいは製油所などから排出される副生ガスを圧縮・冷却し、エネルギーを消費して製造された液化炭酸ガスを用いた従来の CO₂ 施用方式は、地球環境には望ましくない。そこで筆者らは、従来よりも地球環境に対して優れたシステムを目指し、吸着材を用いて夜間にグリーンハウス内暖房用の加温機から排出される燃焼ガス中の CO₂ を回収し、日中に回収した CO₂ をグリーンハウス内に放出する CO₂ 回収・施用システムを開発した。今回、4.5 ヶ月間におよぶバラ栽培への実証試験を実施し、従来方式と比べて CO₂ 供給性能および切り花品質において遜色なく、エネルギー起源 CO₂ 排出量も約 40%削減でき地球環境に対して優れていることを明らかにした。

1. はじめに

CO₂ 施用は、バラやイチゴなどの作物の光合成促進による作物の収量・品質の向上を目的に、大規模施設園芸で広く行われている¹⁻³⁾。例えば光合成が行われる日中の 6 時から 15 時までの間にグリーンハウス（以降、ハウス）内の CO₂ 濃度を 700~800ppm 程度にすることによって、バラ栽培においては増収率が 24.4%~38.5%に増加した事例が報告されている⁴⁾。一方で、一般的な CO₂ 施用には、化石燃料の燃焼ガス、あるいは精油所等から排出される副生ガスを圧縮・冷却し、エネルギーを消費して製造された液化炭酸ガスが使用されており、地球環境には望ましくない。

そこで筆者らは、従来よりも地球環境に対して優れたシステムを目指して、夜間にハウス内暖房用の加温機から排出される燃焼ガス中の CO₂ を回収し、日中にその CO₂ をハウス内に放出する CO₂ 回収・施用システム（以降、開発システム）を開発した。本報では、従来方式と比べて CO₂ 施用の性能および切り花品質において遜色ない CO₂ 施用ができ、地球環境に対して優れているかを確認するために、開発システム・従来の燃焼式施用・無施用でのバラ栽培への実証試験を実施したのでその結果を報告する。

※ 本論文は、令和 7 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文⁷⁾ を加筆修正したものである。

*1 茨城県農業総合センター

2. システムの概要

開発システムは、本来、排出されるはずだった加温機の排ガスから CO₂を回収し、それを光合成促進に利用するシステムであり、加温機が暖房運転する冬季のみに使用する。図 1 に開発システムの概要を示す。開発システムは、主に CO₂吸着材と充填用のタンク、送風機、それを接続する風洞で構成されている。使用した CO₂吸着材は、CO₂濃度の高い気体を通気させると CO₂を吸着し、CO₂濃度の低い気体を通気させると CO₂を脱着する特性がある。CO₂回収運転は、夜間、ハウス用の加温機の運転中に送風機を運転し、CO₂濃度 7%程度の排ガスを CO₂吸着材に通気させることにより CO₂を吸着して回収貯蔵する。CO₂回収後の排ガスは屋外に排気する。CO₂施用運転は、日中の光合成の時間帯に、排ガスよりも CO₂濃度の低いハウス内の空気を通気させることにより、夜間回収貯蔵した CO₂を脱着し、ハウス内の CO₂濃度が 700~800ppm になるように送風機を ON/OFF 制御し、ハウス内に放出する。

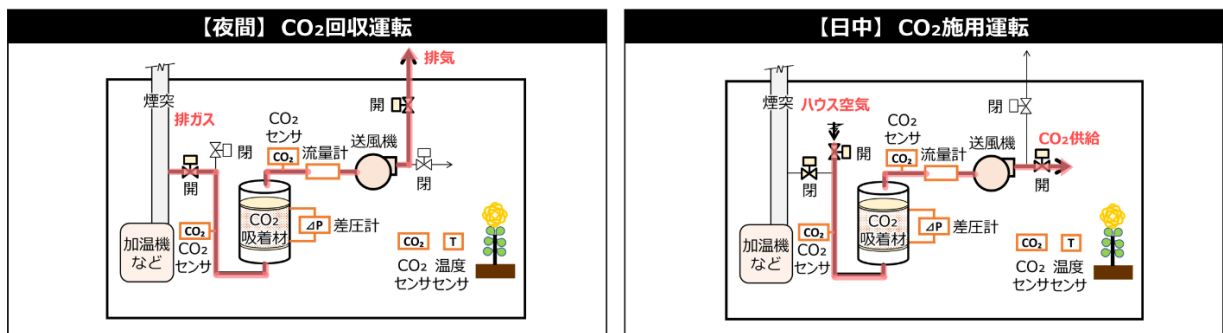


図 1 開発システムの概要

2. 実証試験の概要

2.1 試験方法

実証試験は、2023年12月16日～2024年4月30日の135日間、茨城県農業総合センター内（茨城県笠間市）にて実施した。表 1 に試験条件、図 2 に開発システムのシステムフローを示す。試験区は、試験区 1：開発システム（写真 1）、試験区 2：燃焼式施用（LPG 燃焼式 CO₂発生装置（写真 2））、試験区 3：無施用とした。ハウスの規模は、床面積 100m²×軒高 3m とし、試験区毎に 1 棟を使用した（写真 3）。バラの試験品種はアマダ+の 2 年生株を使用し、株数は 30 株/区とした。加温機の燃料は灯油とした。

CO₂回収運転は、試験区 1 で 15 時～翌朝 6 時とし、加温機の暖房運転中の運転信号により、開発システムの CO₂ 吸着材充填タンク入口および送風機出口の二方弁を切替して送風機を運転し、CO₂ 吸着材充填タンクに排ガスを通気させて CO₂ を回収し、回収後の排ガスは屋外に排気した。CO₂回収完了の判断は、CO₂ 吸着材充填タンクの入口と出口に設置した CO₂ センサにより、CO₂ 濃度差が 0.5%以内となった時点とした。

CO₂ 施用運転は、試験区 1、2 共通で光合成が行われる 6 時～15 時とし、ハウス内の平面中央(FL+2.0m)の CO₂ 濃度が 700~800 ppm になるように CO₂ 吸着材充填タンク入口および送風機出口の二方弁を切り替えて送風機を ON/OFF 制御した。CO₂ 施用は、バラ棚の末端から行い、ハウス付帯設備の循環ファンにて攪拌し、事前にハウス内の CO₂ 濃度の分布に偏りが無いことを確認した。ハウスの天井および側面に付帯している換気用窓（約 9m×約 0.7m×4 枚）は、バラの生育に適した温度になる様にハウス内の温度により開閉が制御されており、ハウス内の平面中央(FL+2.0m)の温度が 28℃以上で開放、26℃以下で閉鎖される。換気用窓が開放されると、施用した CO₂ が屋外に流出するため、開発システムもこの制御に合わせ、換気用窓が開放されると CO₂ 施用を停止し、換気用窓が閉鎖されると CO₂ 施用を再開し、無駄な CO₂ 施用を防止した。

表 1 試験条件

項目	試験区 1：開発システム	試験区 2：燃焼式施用	試験区 3：無施用
システム	CO ₂ 回収・施用システム ・風量 : 80m ³ /h ・CO ₂ 施用量 : 約 1.5kg-CO ₂ /日 ・送風機出力 : 1.5kW	LPG 燃焼式 CO ₂ 発生装置 ・型式 : KCH-20Z (桂精機製作所) ・CO ₂ 発生量 : 0.25kg-CO ₂ /h ・燃料消費量 : 1.67kg-CO ₂ /h(LPG) ・消費電力 : 12W	—
CO ₂ 施用方法	ハウス内への全体施用	—	—
CO ₂ 施用時刻	6:00~15:00	—	—
CO ₂ 回収時刻	15:00~翌日 6:00	—	—
CO ₂ 濃度設定	ハウス中央の CO ₂ 濃度が 700~800ppm になるように送風機を ON/OFF 制御。 換気用窓と連動し、換気用窓が開放で CO ₂ 施用停止、閉鎖で CO ₂ 施用再開。	—	—
ハウス付帯設備	加温機	型式 : KA-325 (ネボン)、風量 : 3,300m ³ /h、暖房能力 : 37.2kW、消費電力 290W、燃料消費量 : 4.4L/h (灯油)、温度設定 : 18°C (ハウス内中央の温度が 18°C未満で暖房運転開始、18°C以上で停止)	—
	換気用窓	ハウス内中央の温度が 28°C以上で開放、26°C以下で閉鎖	—

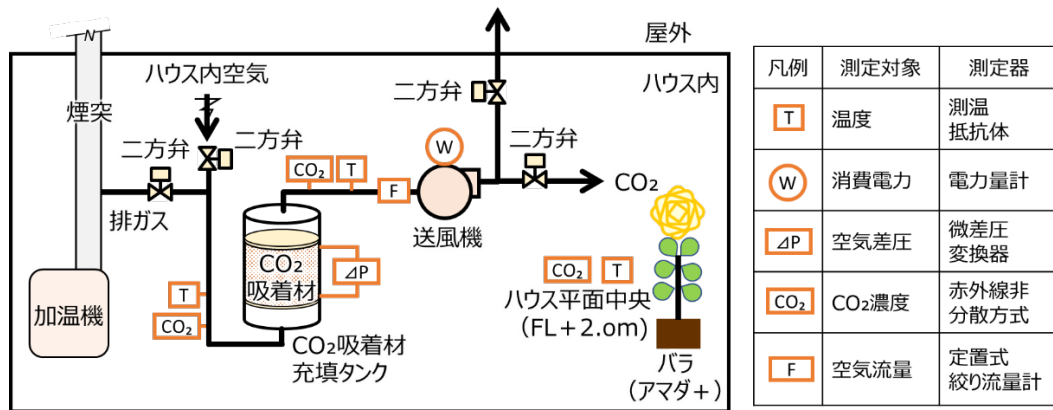


図 2 開発システムのシステムフロー(試験区 1)

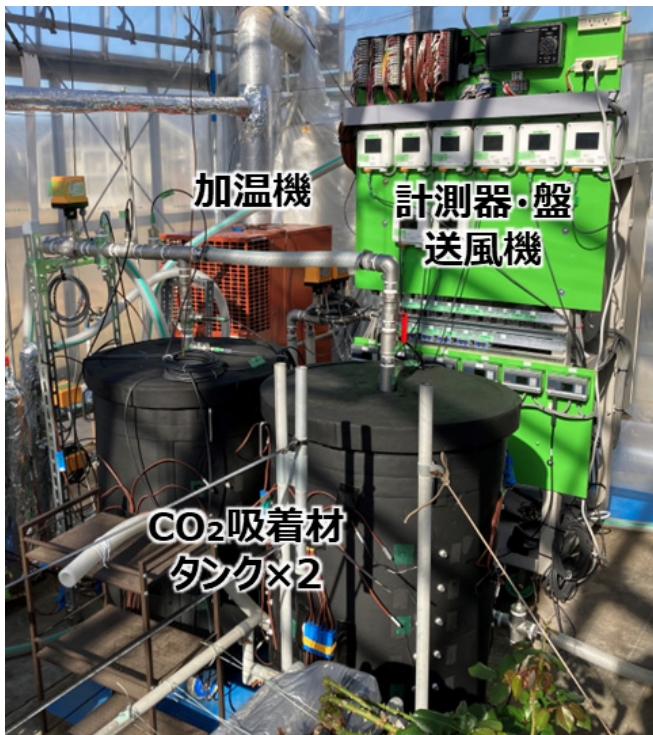


写真 1 開発システム(試験区 1)



写真 2 LPG 燃焼式 CO₂発生装置(試験区 2)



写真 3 ガラスハウス(床面積 100m²×3 棟)

2.2 試験結果

2.2.1 開発システムにおけるCO₂濃度と温度

図3に開発システムにおけるCO₂吸着材充填タンク入口・出口のCO₂濃度の推移を、図4に試験区1~3の外気温度の違いによるハウス内のCO₂濃度と温度の運転事例(上:晴天日、下:曇天日)を示す。図3下段と図4上段は同一日時の結果である。図3のCO₂吸着材充填タンクの槽内差圧が0kPaの時は、開発システムが停止、約1kPaの時は運転している状態を示しており、CO₂回収時の加温機からの運転信号やCO₂施用時のハウス内のCO₂濃度およびハウス付帯設備の換気用窓の開閉状態によって、ON/OFF運転を繰り返した。

CO₂回収運転は、図3上段のグラフが示すように、17時頃から加温機が運転を開始し、加温機の運転状態に応じて送風機をON/OFF制御した。CO₂回収運転直後は、約7%程度の排ガス中のCO₂をCO₂吸着材充填タンクに流入させてCO₂を回収し、CO₂回収後の出口空気は1%未満であった。その後、CO₂を回収するにつれて出口空気中のCO₂濃度は徐々に上昇し、18時30分頃にはCO₂吸着材充填タンクの入口と出口のCO₂濃度が0.5%以内となり、CO₂回収運転を終了した。

CO₂施用運転は、図3下段のグラフおよび図4上段のグラフの試験区1のCO₂濃度が示す様に、翌朝6時から開始し、ハウス内のCO₂濃度が700~800ppmになるように送風機をON/OFF制御した。CO₂施用開始直後は約6%程度のCO₂を施用し、その後、CO₂を施用するにつれて徐々にCO₂濃度が低下し、12時頃になるとCO₂濃度は1%未満になり、CO₂施用が終了する14時頃には、0.4%程度まで低下した。

晴天日は、図4上段のグラフが示すように、6時~10時までの間、ハウス付帯設備の換気用窓が常時閉じており、試験区1、2共にハウス内のCO₂濃度を700~800ppmに制御することができた。10時以降になると、日射の影響によりハウス内の温度が高くなり、28℃以上になると換気用窓が開放し、ハウス内のCO₂濃度が外気相当まで低下した。開発システムは、換気用窓の開放と連動し、図3の下段グラフのCO₂吸着材充填タンクの差圧が示す様にCO₂施用を停止した。再び26℃以下になると、換気用窓の閉鎖に連動してCO₂施用を再開し、ハウス内CO₂濃度を700~800ppmに維持した。CO₂施用を実施しない試験区3のCO₂濃度は屋外と同程度であった。

曇天日は、図4下段のグラフが示すように、日中を通して、ハウス内の温度が28℃未満で換気用窓が常時閉鎖しており、ハウス内のCO₂濃度を700~800ppm程度に維持することができた。

晴天日および曇天日ともに、ハウス内のCO₂濃度や換気用窓の開閉に連動したCO₂施用を実施し、換気用窓が閉鎖している間は、ハウス内のCO₂濃度を700~800ppm程度に維持することができた。

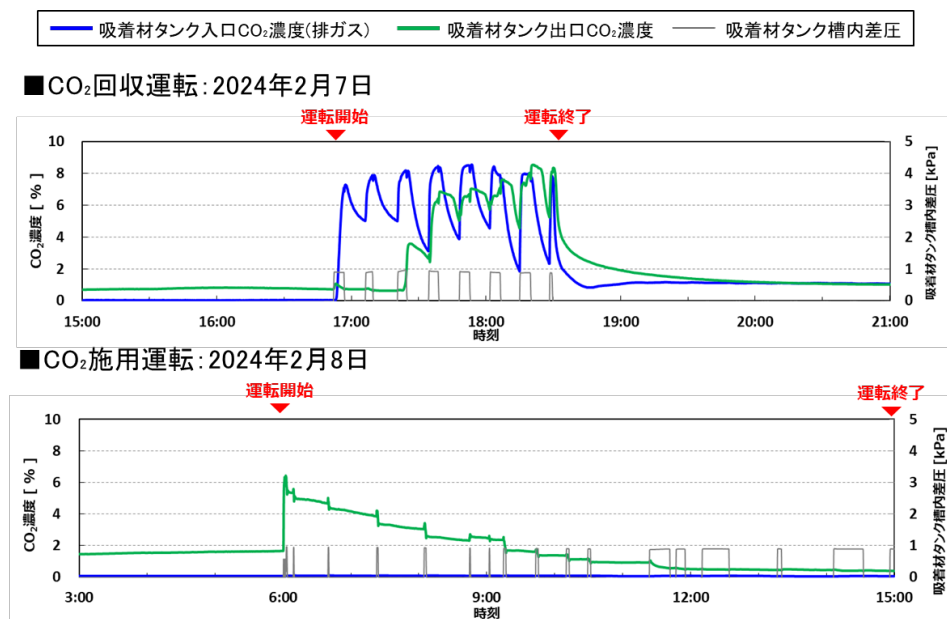


図3 開発システムにおけるCO₂吸着材タンクCO₂入口・出口濃度の推移

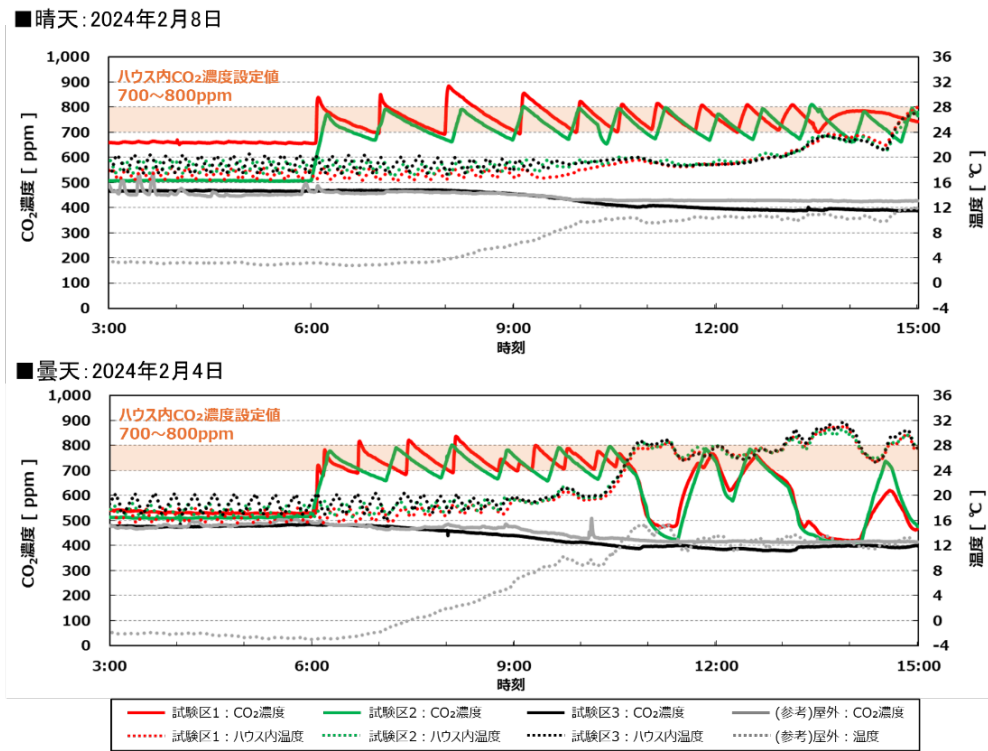


図4 ハウス内のCO₂濃度および温度の運転事例

2.2.2 CO₂施用量およびエネルギー起源CO₂排出量の比較

表2に試験区1、2におけるCO₂施用量およびエネルギー起源CO₂排出量の比較を示す。試験期間中のCO₂施用量の平均は、試験区1、2共に1.3kg-CO₂/日と同程度であった。135日間の試験期間全体のエネルギー起源CO₂排出量は、試験区1は337kg-CO₂（送風機効率0.2）、104kg-CO₂（送風機効率0.65）、試験区2は175kg-CO₂であった。実導入を想定している1,000m²程度以上の大規模ハウスでの送風機効率0.65の場合、試験区1は試験区2と比べてエネルギー起源CO₂排出量を約40%削減できると想定される。

表2 試験区1、2におけるCO₂施用量およびエネルギー起源CO₂排出量の比較

		試験区1		試験区2	備考
		送風機効率補正前	送風機効率補正後		
CO ₂ 施用量 ^{※1}	kg-CO ₂ /日	1.3	—	1.3	試験区1はCO ₂ 施用量、試験区2はLPG消費量より算出
エネルギー消費量 ^{※1}	電気 kWh	747	230 ^{※2}	0.07	※2 送風機効率を0.2から0.65に補正 747kW×0.2÷0.65=230kW
	LPG m ³	—	—	29.2	
エネルギー起源CO ₂ 排出量 ^{※1}	電気 kg-CO ₂	337	104	0.03	CO ₂ 排出係数:0.438kg-CO ₂ /kWh ⁵⁾
	LPG kg-CO ₂	—	—	175	CO ₂ 排出係数:2.99kg-CO ₂ /kg-LPG ⁶⁾ 密度:2.0kg-LPG/m ³ -LPG
	合計 kg-CO ₂	337	104	175	

※1 CO₂施用量は試験期間中の平均値、エネルギー消費量およびエネルギー起源CO₂排出量は試験期間全体を示す。

2.2.3 切り花品質への影響

表3に試験区1~3における切り花品質の比較を示す。Tukeyの多重平均は、園芸分野を含めて、独立した3群以上の連続変数（長さなど）のデータを比較する際に用いられる統計解析手法の一つであり、有意差の有無によってアルファベットやn.s.を付与する。5%水準において、異なるアルファベット間（aとb）は有意差があり、同じアルファベット間（aとabもしくはbとab）およびn.s.は有意差がないことを示す。例えば、切り花長において、試験区1と試験区3は有意差があり、試験区1と試験区2は有意差がないことを示す。試験区3と比べて試験区1、2の切り花長、花高、切り花重、茎径が同程度増加し、有意差が見られた。試験区1~3において、奇形花や葉の褐色、斑点等の可視障害発生は確認されなかった。

表3 試験区1から3における切り花品質の比較

	切り花長 (cm)	花首長 (cm)	花高 (cm)	切り花重 (g)	節数 (節)	茎径※ (mm)
試験区1(開発システム)	81.9 a	12.8 n. s.	5.0 a	71.9 a	15.0 A	8.4 a
試験区2(燃焼式施用)	78.7 ab	12.6 n. s.	4.9 a	73.5 a	14.4 B	8.5 a
試験区3(無施用)	75.7 b	12.8 n. s.	4.7 b	59.1 b	14.0 B	7.6 b

※切り口から1cm上部を測定した。

3. まとめ

今回、4.5ヶ月に及ぶバラ栽培への実証試験により、以下が得られた。

- (1) CO₂施用の性能に関して、開発システムはハウス内のCO₂濃度変動や換気用窓の開閉と連動し、換気用窓が閉鎖している間は、CO₂濃度を目標の700~800ppmに運転制御して維持することができた。
- (2) バラの品質・安全性に関して、開発システムは無施用と比べて切り花長・花高・切り花重・茎径は同程度増加し、従来燃焼施用と同等の有意差が見られた。
- (3) 地球環境に対して、開発システムは従来燃焼式施用と比べて試験期間全体のエネルギー起源CO₂排出量は約40%削減できる可能性を示した。

以上より、新たに開発したCO₂回収・施用システムは、従来方式と比べてCO₂施用の性能および切り花品質において遜色ないCO₂施用を行うことができ、地球環境に対して優れていることを明らかにした。

謝辞

実証試験に関するご助言、バラの生育および品質の評価などについてご協力いただきました茨城県農業総合センターの関係部署の皆さまに深甚なる謝意を表する。

文 献

- 1) 農林水産省: 施設園芸をめぐる情勢(<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-39.pdf>), (2025.10)
- 2) 独立行政法人: 施設園芸・植物工場をめぐる動向と課題
(https://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/senmon/2303_chosa1.html#title3), (2023.3)
- 3) 農業総合センター園芸研究所: 「いばらキッス」は早期夜冷育苗・炭酸ガス局所施用・肥効調節で収量が増加する
(<https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/enken/seika/yasai/ichigo/documents/18ichigo1.pdf>), (2018)
- 4) 茨城県農業総合センター園芸研究所: バラ栽培における日中の炭酸ガス施用は収益性を向上させる
(https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/enken/seika/kaki/tanennsei/documents/h29kaki06bara_tansangas.pdf), (2017)
- 5) 環境省: 電気事業者別排出係数一覧 令和6年提出用
(https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r06_denki_coefficient_rev10.pdf), (2024)
- 6) 環境省: 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 令和5年12月12日更新
(https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf), (2023)
- 7) 宮下ら: 排ガスからのCO₂回収・施用システムのバラ栽培への実証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.326-329, (2025).

ABSTRACT

CO₂ application is carried out in greenhouses to improve crop yield and quality. However, conventional methods using fossil fuel combustion gases or liquefied CO₂ produced by compressing and cooling by-product gases are not good for the global environment. Aiming to develop a system that is more environmentally friendly than conventional methods, we developed a system that recovers and supplies CO₂ from exhaust gases using an adsorbent. In this study, a 4.5-month demonstration test was carried out on rose cultivation, and a comparison was made with combustion CO₂ application and no CO₂ application. As a results, it was confirmed that our developed system is able to supply CO₂ that is comparable to conventional methods in terms of CO₂ supply performance and cut flower quality, and it reduced energy-derived CO₂ emissions by approximately 40%, making it superior to conventional method in terms of the global environment.
