

# 植物工場向け燃焼式加温熱源からの排出ガスを 光合成促進に利用するための安全技術開発

所属：釧路工業高等専門学校創造工学科スマートメカニクスコース機械工学分野

助成対象者：川村 淳浩

## 概要

太陽光利用型植物工場研究施設に設備されている都市ガス焚き温水機からの燃焼排出ガスに含まれる二酸化炭素を安全に生育促進（光合成）に活用する技術開発に取り組んだ。具体的には、燃焼排出ガス浄化システムを構築して、これに含まれる一酸化炭素、炭化水素、そして窒素酸化物など農作物の生育や作業者の健康を阻害する恐れのある物質を、効果的かつ効率的に許容限界（目標清浄度）以下に低減することを目指した。この結果、モデル解析で設定した目標清浄度を達成する高い浄化性能が得られ、農作物の栽培で効果と安全性を実証した。一方、浄化システムの停止時や温水機の微小負荷運転下で、浄化性能が不十分となるなどの改善点も見つかった。

## Abstract

This paper presents the results of technological development research to safely and efficiently reduce substances contained in combustion flue gas, which may impair the growth of crops and the health of workers, below the permissible limit. In this study, the upper limit concentration of chemical substances allowed for the flue gas of the gas-fired water heater was calculated by model calculation, and it was set as the target cleanliness. In order to realize these, a system using catalyst and dilution was constructed, and it was shown that the target cleanliness was satisfied.

## 研究内容

### <背景>

農業施設（ビニールハウス、ガラス温室など）での農作物生産では、生育に必要な温度環境を保つため、ガスや灯油などを燃料として加温（暖房）する栽培がおこなわれている。このような栽培環境では、光合成に必要な二酸化炭素が不足すると生育量が大きく減少するが、大気濃度よりも十分に高めることで生育量を大きく増加させることができるため、二酸化炭素を肥料として施用（施肥）する栽培手法が広く適用されている<sup>[1]</sup>。この栽培手法は、食品添加物としても用いられる高純度の液化二酸化炭素を気化させる方法と燃焼式熱源からの燃焼排出ガスを用いる方法に大別される。前者は、農作物の生育を阻害したり作業員への健康影響を引き起こしたりするような化学物質は含まれていないが、設備の初期投資と運転経費がかさむため適用事例は限られている<sup>[2]</sup>。一方、管理温度の高い農作物や寒冷地では、加温が必要な期間が長いため、経済的な理由から燃焼式加温熱源からの燃焼排出ガスが二酸化炭素源として用いられる場合が多い。ただし、これらの燃焼排出ガスには、不完全燃焼や高温燃焼に起因する様々な化学物質が含まれている<sup>[1, 3, 4]</sup>。

農作物に対する化学物質許容上限濃度（以下、作物被害しきい値）は、我が国の旧野菜試験場（現農業・食品産業技術総合研究機構）により報告された安全基準値<sup>[1]</sup>とオランダの旧花卉園芸・温室栽培作物研究所により定められた値<sup>[3]</sup>が参考とされている。また、作業員に対する化学物質許容上限濃度（以下、作業員被ばく限界値）は、我が国の旧野菜試験場により報告された安全基準値<sup>[1]</sup>と労働者の健康障害を予防するために日本産業衛生学会が勧告している許容濃度<sup>[4]</sup>が実態に即したものとされている。

燃焼排出ガスの光合成促進利用は、農作物の施設生産が始まった 1960 年代からおこなわれてきた。その後上述の文献[1]などで、農作物や作業員に対する生物上の観点から作物被害しきい値や作業員被ばく限界値が提唱されたが、燃焼式二酸化炭素発生源の安全上の技術基準などはほとんど提示されてこなかった。

### <目的>

本研究では、燃焼式加温熱源からの燃焼排出ガスを安全に農作物生育促進に活用するために、この燃焼排出ガスに含まれる生育・健康阻害物質を効果的かつ効率的に低減する技術開発を目的とした。具体的には、釧路工業高等専門学校に設置されている太陽光利用型植物工場研究施設（栽培室床面積 13.5 m<sup>2</sup>）の燃焼式加温熱源（FF 式都市ガス焚き温水機、

定格燃料消費量 27.3 kW)からの燃焼排出ガスに含まれる一酸化炭素、炭化水素、そして窒素酸化物について、比較的低温で機能する排出ガス浄化システムの構成や制御の工夫によって許容限界（目標清浄度）以下に低減する技術開発をおこなった。

## < 結果 >

### 1) モデル解析による目標清浄度の設定

先行研究成果[5]と作物被害しきい値・作業員被ばく限界値を適用し、FF 式都市ガス焚き温水機からの燃焼排出ガスに許容される各化学物質上限濃度を計算して目標清浄度とした。ここで、作物被害しきい値は、旧野菜試験場より示された基準値である「一酸化炭素 100 ppm 以下、一酸化窒素 20 ppm 以下」を用いることとした。また、作業員被ばく限界値は、「一酸化炭素 50 ppm 以下（旧野菜試験場と産業衛生学会）、一酸化窒素 25 ppm 以下（旧野菜試験場）」という基準値（勧告値）を用いた。一例として、燃焼排出ガス中の一酸化炭素許容上限濃度を示すモデル式を式（1）に示した。

$$(C_{co})_{fg,u-limit} = f [(C_{co})_{gh,u-limit} - (C_{co})_{os}] (C_{co})_{gh,u-limit} \dots (1)$$

ここで、

$(C_{co})_{fg,u-limit}$  : 燃焼排出ガス中の一酸化炭素許容上限濃度 [ppm]

$f (= NV / V_{sg(dilute)} - 1)$  : 換気流出ガスと供給ガス（希釈した燃焼排出ガス）の流量比

$N$  : 温室の換気回数 [ $h^{-1}$ ]

$V$  : 温室の内容積 [ $m^3$ ]

$V_{sg(dilute)}$  : 供給ガス（希釈した燃焼排出ガス）量（体積流量） [ $m^3N/h$ ]

$(C_{co})_{gh,u-limit}$  : 施設内の一酸化炭素許容上限濃度 [ppm]

$(C_{co})_{os}$  : 外気の一酸化炭素濃度 [ppm]

である。

図 1 に、式（1）より求めた供給ガス（希釈した燃焼排出ガス）中の一酸化炭素許容上限濃度と換気回数の関係を示した。ここでは、施設内の一酸化炭素許容上限濃度を作業員被ばく限界値 50ppm とした場合に加え、参考として大気汚染防止法環境基準値 10ppm を用いた場合も示した。なお、外気

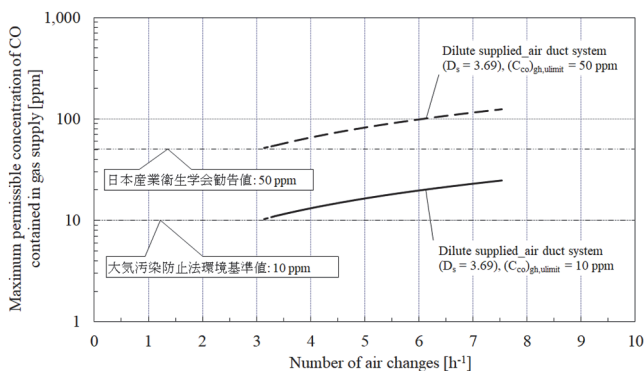


図 1 供給ガス（希釈した燃焼排出ガス）中の一酸化炭素許容上限濃度と換気回数の関係

と施設内の一酸化炭素濃度の初期値は、気象庁により報告されている外気の一酸化炭素濃度の1年間の平均データより、0.132ppmとした。これらより、供給ガス（希釈した燃焼排出ガス）中の一酸化炭素許容上限濃度を10ppm以下とすることを目標とした（目標清浄度）。

## 2) 燃焼排出ガス浄化システムの構築

図2に、本研究で構築した燃焼排出ガス浄化システムの模式図を示した。これは、FF式都市ガス焚き温水機の排気筒から燃焼排出ガスを引き込む入口ダンパ、液化二酸化炭素容器からの放出弁、三元触媒、希釈ダンパ、誘引ファン、ダクト、各種センサ、そして制御機能で構成される。基本的な作動状態としては、植物工場施設内の二酸化炭素濃度が設定値以下かつ加温条件で

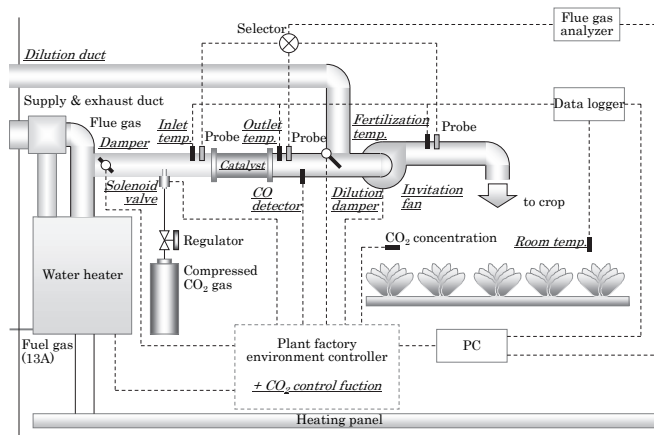


図2 燃焼排出ガス浄化システムの模式図

あれば、燃焼排出ガスを浄化して二酸化炭素として施肥する。このとき、高温の燃焼排出ガスによる農作物の障害を防ぐために、大気と希釈して室温程度まで冷却して供給ガスとした。

## 3) 機能試験・解析（パラメータ実験）

モデル解析ではFF式都市ガス焚き温水機を定格出力に固定して希釈割合を変化させた。実際の運転では比例出力になることもあり、浄化性能に影響を及ぼす可能性のある他の因子として、燃焼排出ガス温度、触媒温度、燃焼排出ガス量、空気過剰率（残留酸素濃度）、誘引ファン送風量、そして触媒容積などを取り上げた。これらの因子の影響を調べるパラメータ実験の結果、触媒温度、空気過剰率（残留酸素濃度）、そして希釈割合の影響が比較的大きいことがわかった。一例として、触媒温度と一酸化炭素の浄化率の関係を図3に示した。触媒温度の増加と共に浄化率が向上したが、実験した触媒温度範囲では、触媒による浄化率よりも希釈の効果が大いことがわかった。具体的には、目標とした一酸化炭素濃度10ppm以下を達成するためには、触媒温度が概ね75℃以上必要であ

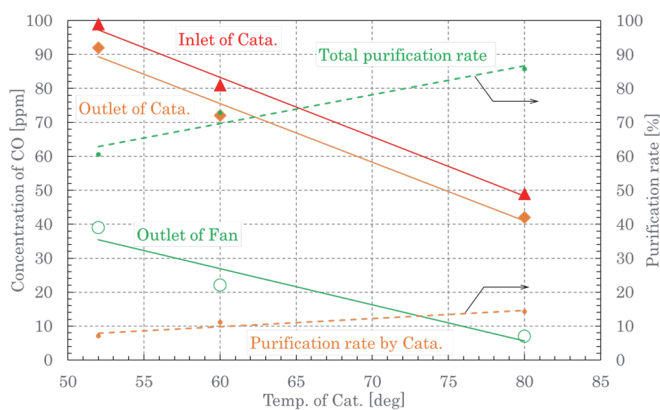


図3 触媒温度と一酸化炭素の浄化率の関係

ることがわかった。なお、図示はしていないが、触媒温度はFF式都市ガス焚き温水機の比例出力と誘引ファン送風量の影響を受けた。

#### 4) 実証試験(自動栽培運転下における検証)

図4に、冬期間のレタス栽培における実証試験の状況を示した。ここでは、PLC (Programmable logic controller) によるシーケンス制御を適用して、FF式都市ガス焚き温水機の比例出力と誘引ファン送風量を常に連動させることで運転時の触媒温度を維持する(必要以上に温度低下させない)制御上の工夫をおこなった。なお、施設内の管理温度(室内空気、栽培液)を20℃、日中の設定二酸化炭素濃度を1,000ppmとした。この結果、図5に示したように、連続自動運転下において、燃焼排出ガス浄化システムが所定通り作動している条件では、誘引ファン出口の一酸化炭素濃度が10ppmを超えないことが確認された。また、定植から収穫までの全栽培期間(1ヶ月半)において、生育障害等の異常は認められず、液化二酸化炭素による気化式と同等の品質・収量が得られた。



図4 実証試験の状況

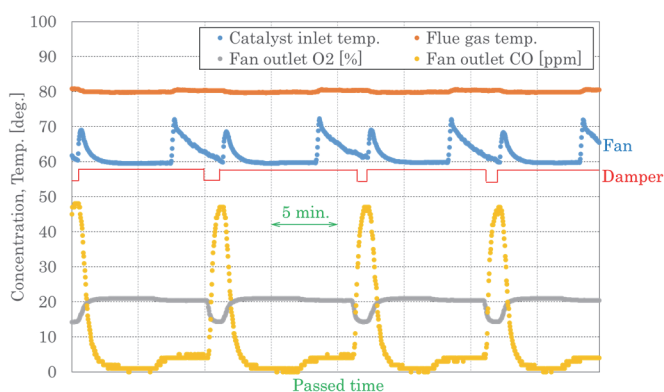


図5 連続自動運転下での動作状況

#### <今後>

課題として、FF式都市ガス焚き温水機の微少負荷運転下などで燃焼排出ガスの浄化が不十分となる場合や、浄化システムの停止時の一酸化炭素濃度の立ち上がりなどが認められた。前者は、熱容量の関係から触媒の活性を保つ温度を維持することができないことに起因するもの、後者は入口ダンパからの燃焼排出ガス漏れに起因するものと思われる。今後は、これらに対する対策を進めることで、最終的には全体の技術基準提案まで発展させたい。

## 引用文献

- [1] 伊東正:CO<sub>2</sub>施用, 三原義秋編著「温室設計の基礎と実際」, 養賢堂, p. 205-213(1980).
- [2] Klimstra J.: Exhaust Treatment for CO<sub>2</sub> Fertilization with Reciprocating Gas Engines, International Gas Research Conference, p. 391-403(1998).
- [3] 日本産業衛生学会: 許容濃度等の勧告, 産業衛生学雑誌 63(5), p. 179-211(2021).
- [4] 川島信彦:施設栽培におけるCO<sub>2</sub>施用の現状と課題, 農業気象 47(3), p. 177-182(1991).
- [5] 川村淳浩: 数式モデルを用いた温室における各種燃焼式二酸化炭素供給方法の得失評価, 植物工場学会誌 16(2), p. 50-62(2004).

## 本助成に関わる成果物

[口頭発表]

1. 川村淳浩: 燃焼排出ガスを安全に光合成促進に利用するための技術開発研究, 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2022年1月25日, オンライン, 講演論文集 p. 332-334(2022).