

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560984

研究課題名(和文)ハイドレート技術を用いた農工融合による低炭素社会の実現に関する研究

研究課題名(英文)A study on low carbon society by the agricultural and manufacturing system using CO2 hydrate technique

研究代表者

松尾 誠治(Matsuo, Seiji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20302755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、工業圏から発生するCO₂を低コストのハイドレート技術により分離回収し、そのCO₂並びに冷熱を農業圏のハウスや植物工場で有効利用する農工融合型施設園芸システムを提案した。実験では、人工光を用いた栽培システムへのCO₂ハイドレートを用いた栽培試験を実施した。その結果、5000ppmのCO₂場合を施肥した場合の成長率は2000ppmの場合の成長率の約3倍になり、CO₂ハイドレート供給の有効性が窺えた。一方、CO₂ハイドレート技術による青果物内の鮮度保存を検討した。これより、青果物の種類や反応条件によってX線回折強度は異なるものの、青果物内のハイドレートの生成を確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this research, a plant factory system using CO₂ hydrate has been considered. We conducted an experiment with Japanese mustard spinach in the plant factory for five days in each humidity, temperature and CO₂ concentration condition. As a result, we demonstrated that Japanese mustard spinach could be grown in the plant factory system by using CO₂ hydrate and found out that humidity control is vital for the plant growth. We also showed that this system could enhance the growth of the plant. In order to use the system mentioned in this study in the practice, larger trials are needed to consider the feasibility of plant factory system using solar light and commercial-scale operation. On the other hand, the freshness preservation in the fruit and vegetables by CO₂ hydrate technology was considered. Although x-ray diffraction intensity changed with the kind and reaction conditions of fruit and vegetables, the diffraction peak of CO₂ hydrate origin was accepted.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：CO₂ 低炭素社会、施設園芸 ハイドレート 環境対応 二酸化炭素排出量削減

1. 研究開始当初の背景

世界のエネルギー需要は、中国・インドをはじめとする新興国の急速な経済成長を背景に今後大幅に増加することが予想され、これによる気候変動抑制には増大するエネルギー需要を可能な限り低炭素なエネルギー源で供給する、低炭素社会の実現が不可欠となってくる。そのため、世界全体で温室効果ガス排出量の大幅削減を進めるため再生可能エネルギーの普及、火力発電における効率改善や燃料転換、原子力発電の導入以外に、CO₂ 回収貯留 (CCS) といった供給側の積極的な対策が今後需要側にも求められる。しかしながら、CCS 技術には莫大なエネルギーと費用を必要とするがそこには生産性がないため経済的な成長が期待できない。そこで、社会システムの省エネルギー化を実行しつつかつ余剰に排出された CO₂ をより積極的にエネルギーに変換する「循環型低炭素社会システム」の構築が必要となり、の実現に向け提案する対策の有効性が求められる。特に、CO₂ のエネルギー変換には農業・バイオ分野の応用が不可欠で今後は「農工融合」による問題の解決が有効であると思われる。

2. 研究の目的

本研究では、循環型低炭素社会システムの構築の一つとして工業圏から排出される CO₂ を二酸化炭素クラスレートハイドレート技術により分離回収後輸送し、分解時に生じる CO₂ と冷熱を施設園芸分野に有効利用する農工融合型システム(図 1)を提案し、その実現にむけた種々検討を実施した。これにより工業圏での CO₂ 固定による環境改善と農業圏での生産コストの削減と収量の増加の両者が期待できる。

3. 研究の方法

研究においては、施設園芸における CO₂ ハイドレートを用いた CO₂ と冷熱の有効利用について人工光、太陽光について検証した。するとまた、ハイドレートの新たな利用技術として鮮度保存への利用可能性についても検討した。具体的な研究の方法は下記のような。

(1) 人工光型植物工場における CO₂ ハイドレート利用試験

人工光を用いた栽培システムへの CO₂ ハイドレートを用いた栽培試験を実施した。構築した人工光型栽培システムを図 2 に示す。実験は、温度管理が可能なグロスチャンパー内に設置したアクリル板製の小型チャンパー内に作物と熱交換用ファンを配置し、CO₂ ハイドレート 分解装置からの冷熱の熱交換を行った。CO₂ ハイドレートが分解して生成する CO₂ は、電磁弁・流量調整器を経由しチャンパー中に導入し、チャンパー内の CO₂ 濃度が指定濃度以下となった時点で、電磁弁を開け CO₂ を一定区間供給した。チャンパー内部の気温が設定温度以上となった場合に小型

ポンプを ON として水槽内の冷却水を熱交換機に循環させた。内部にはコマツナを 2 株程いれチャンパーを閉じ密閉した。

(2) 太陽光を利用する施設園芸における CO₂ ハイドレート利活用の考察

太陽光を利用する施設園芸に CO₂ ハイドレートを利用する場合、先の人工光閉鎖系とは異なり高い熱エネルギーを供給する太陽熱や、換気と併用した細霧冷房などが存在するため、これらを複合した効率的な CO₂ ハイドレートを利用した栽培方法が求められる。ここでは簡単に数 m² の園芸ハウスを想定し、その熱収支・CO₂ 収支・水収支の定常モデルに基づきハウス内における CO₂ ハイドレートの供給能力を評価した。

(3) ハイドレートの鮮度利用

ハイドレート技術の新たな利用として実用化を念頭に CO₂ ハイドレート技術による青果物内の鮮度保存を検討した。この水の構造化を利用した手法は Xe ガスを用いた先行研究が見られるが、本研究では実用化を念頭に CO₂H 技術による青果物内の鮮度保存を目指し検討を実施した。今回は、X 線回折法によりその生成の有無を確認し、キュウリ、ナス、ブドウ、ニンジン、ジャガイモを用い、ブドウについては丸ごと、それ以外の青果物については、中心部を内径 1.75cm のコルクボーラーで打ち抜いたものを精密に長さ 2cm に切断して円柱形に調製しそれぞれ検討を実施した。

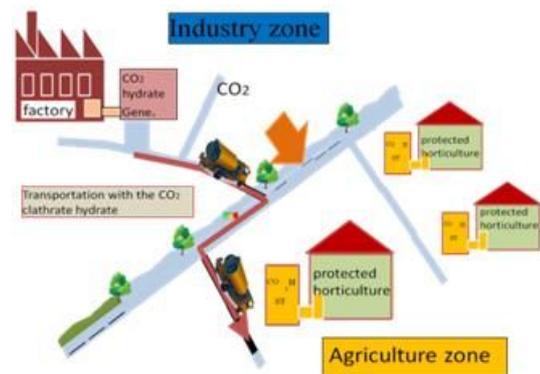


図 1 ハイドレートによる農工融合システム

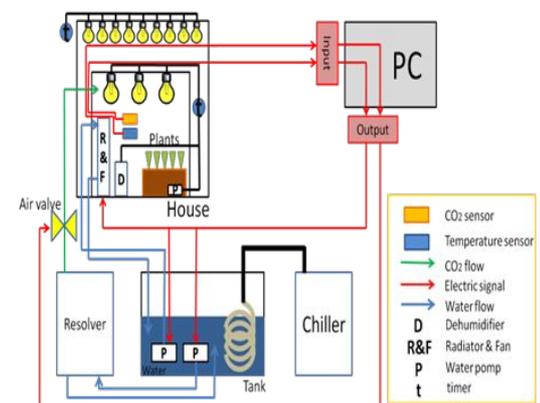


図 2 人工光型ハイドレート利用栽培システム

4. 研究成果

本研究により得られた結果を以下に示す。
(1)人工光を用いた栽培システムへのCO₂ハイドレートを用いた栽培試験

模擬ハイドレートの生成

工業圏から分離回収されることを想定し、およそ1Lの圧力容器に水とCO₂と冷熱により模擬CO₂ハイドレートを実験室で生成した。その際、農業利用を見据え比較的低純度のCO₂ハイドレートを生成し、それを作物栽培に利用した。

栽培試験条件

栽培では、1日8時間CO₂ハイドレートを供給しそれを5日間実施した。栽培条件としては、湿度管理しないもの(Case 1)とするもの(Case 2)に分け、さらに温度、CO₂濃度を変え複数の条件設定を試みた。なお、設定CO₂濃度は2000ppm, 5000ppm, 設定温度は25, 26, 30とした。この栽培の目的は、図3が示すように光合成速度が増加するハウス内のCO₂濃度と温度条件をCO₂ハイドレートの供給により実現することである。

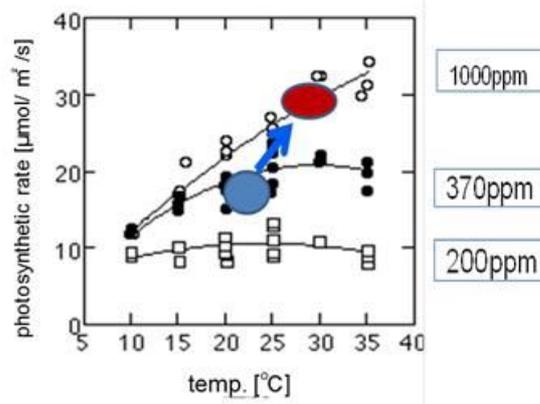


図3 作物の成長と温度・CO₂濃度の関係

栽培結果

まず湿度が栽培に与える影響を検討した。作物において湿度の増加は必ずしも負の要因ではないが、この実験では単にCO₂ハイドレートを用いて温度、CO₂濃度を適切に維持しても図4のcase1が示すようにコマツナは育成ができなかった。そこで、case2のように湿度を管理した場合は、効果的な栽培が行えた。これは、容器内のCO₂濃度を上昇させるために閉鎖系にしたことが原因で、葉からの蒸散による水分の増加分をある程度除去する必要性が窺える。また、CO₂濃度2000ppmの下で温度条件を25, 26, 30と設定した場合の葉面積の成長率の変化を調べた結果が図5に示されている。この場合、葉の成長率は上がり、特に、30の場合の成長率は25度の場合の約2.5倍となるなど、CO₂ハイドレートの供給により過高温の状況を回避しつつ光合成を促進させる条件を維持することができているものと考えられる。

さらに、図6は、光合成を最大化するCO₂と温度の条件湿度の管理を行った状態で、あ

る管理温度25においてCO₂濃度を変化させたときの作物葉面積の成長割合の変化を示している。結果を見てわかるように、この温度一定下において5000ppmのCO₂場合を施肥した場合の成長率は2000ppmの場合の成長率の約3倍になった。



図4 湿度変化による栽培試験結果
(a)Case 1 (b)Case 2

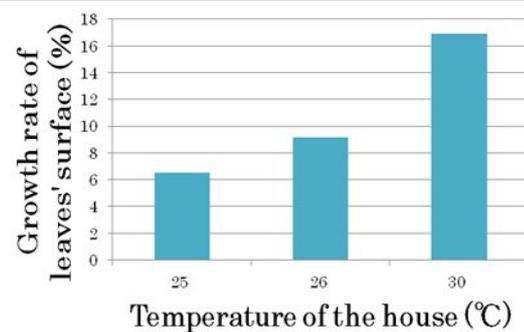


図5 温度変化が栽培に与える影響

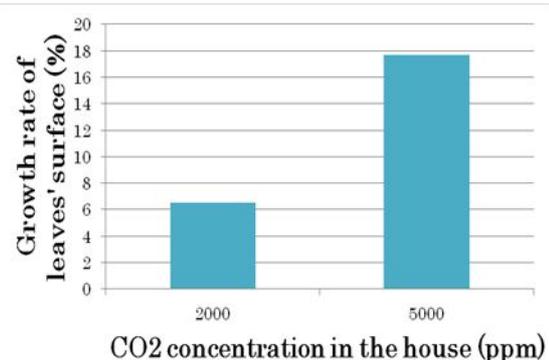


図6 CO₂濃度が栽培に与える影響

(2) 太陽光を利用する施設園芸におけるCO₂Hの利活用

数m²の園芸ハウスを想定し(図7)その熱収支・CO₂収支・水収支の定常モデルに基づきハウス内におけるCO₂ハイドレートの供給能力を評価した。これらの試算によると、CO₂ハイドレートから分離生成したCO₂の供給量については、太陽光型ハウスにおいても必要量の供給が可能であることが分かり、従来CO₂はボンベまたは灯油の燃焼等によって供給していた方法の代替に有効であることが窺えた。一方、冷熱に関しては、図に示すようにCO₂ハイドレートは氷の融解潜熱より大きいものの細霧冷房などの気化熱利用冷熱に比べると小さく、これだけで十分な冷房

能力を得ることは難しい。しかしながら、この問題を克服する為に作物の成長に合わせた冷熱の供給時間帯や供給箇所の検討や、ハイドレートの分解圧を利用した新たな冷熱供給方法の提案を検討している。また、CO₂ ハイドレートを最も効率的に供給し光合成を促進する栽培環境を得るには、冷熱供給を増やし可能な限り室内換気を減らすことで比較的高いCO₂濃度の維持が望まれる。現在、小規模な園芸施設においてハウスの温度とCO₂管理、換気の時間帯、ハウス内湿度（飽差：気孔の状態）管理などを想定した栽培手法の提案に向けた取り組みを実施している。

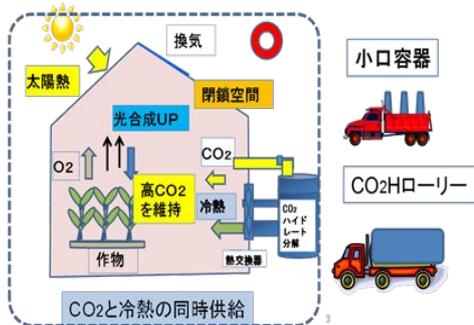


図7 太陽光型園芸ハウス

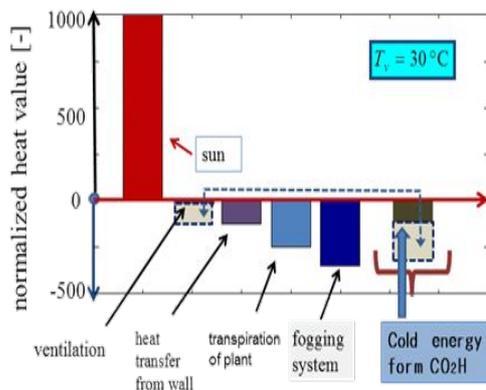


図8 園芸施設内の熱バランスの試算

(3) ハイドレートの鮮度利用

ここでは、CO₂ ハイドレートの青果物内における生成に関する基礎的知見を得ることを目的に、X線回折法によりその生成の有無を確認した。また、青果物品目や反応条件の違いによる生成量の差異についても検討を試みた。実験の供試材料には、キュウリ、ナス、ブドウ、ニンジン、ジャガイモを用い、ブドウについては丸ごと、それ以外の青果物については、中心部を内径 1.75cm のコルクボーラーで打ち抜いたものを精密に長さ 2cm に切断して円柱形に調製した。耐圧容器内に青果物サンプルと共に炭酸ガスを 3MPa の圧力で封入し、2 に設定した冷蔵庫内に 6, 12, 18, 24 時間静置して反応させた。その後、未反応の炭酸ガスの液化を避けるために容器内圧力を 0.5Mpa まで減圧させ、-40 の冷凍庫内で 12 時間凍結した。図 9 は X 線回折法による分析結果の一例を示している。これよ

り、青果物の種類や反応条件によって X 線回折強度は異なったものの、CO₂H 由来の回折ピークが認められその生成を確認できた。一方、図 10 には異なる青果物に対して 2 -3MPa 炭酸ガスの条件で 12 時間反応させた際の CO₂ ハイドレート生成率を示している。青果物の種類によって生成率が異なったが、組織構造や内容成分組成の違いなどが原因として考えられる。

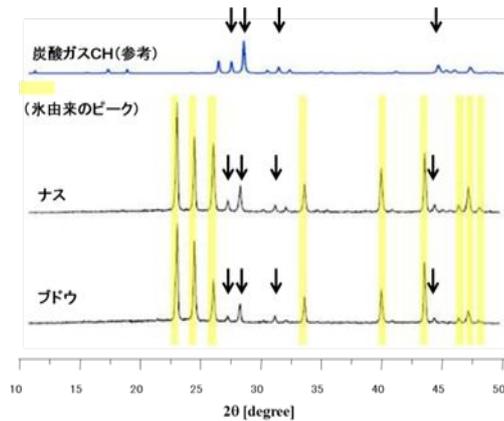


図9 炭酸ガス処理した青果物の X 線回折パターン

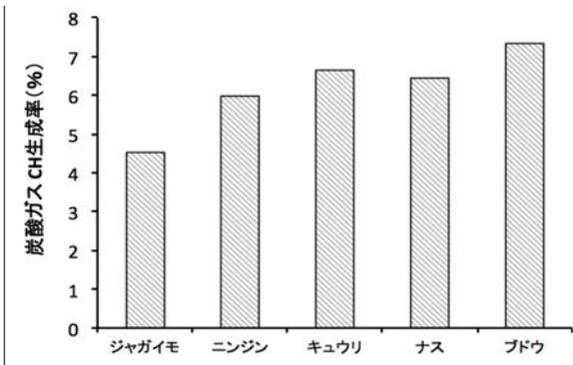


図 10 青果物の違いがガスクラスレート水和物の生成率に及ぼす影響

今後は、図 11 に示すように位相コントラスト X 線 CT 法によって青果物内に生成された CO₂ ハイドレートの分布状態を個体レベルで明らかにし、このような差異が生じた原因についてさらに詳細な解析を進める。また、CO₂ ハイドレートの生成が青果物品質に与える影響について検討する。さらに、青果物の組織構造を活用したガスクラスレートハイドレートの新たな貯蔵媒体の提案、CO₂ ハイドレートを利用した青果物の輸送システムの実証などについても検討を進めている。

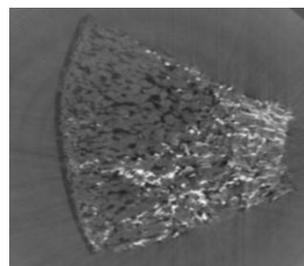


図 11 位相コントラスト X 線 CT 法による青果物内の CO₂ ハイドレート分布状態

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

S.Muromachi, S.Takeya, Y.Yamamoto, R.Ohmura, Characterization of Tetra-n-butylphosphonium Bromide Semi-clathrate Hydrate by Crystal Structure Analysis, RYSTENCOMM, 査読有, Vol.16, 2013, pp.2056-2060

竹谷 敏, クラスレート水和物の分解と氷の結晶成長, 低温科学, 査読有, Vol.71, 2013, pp.153-160

岩崎 泰永, 太陽光利用型植物工場における省エネルギー技術の開発, 冷凍, 査読有, Vol.88, 2013, pp.175-181

川村 太郎, 山本 佳孝, 尹 志豪, ガスハイドレートのヒートポンプ冷媒利用, 分離技術, 査読有, Vol.41, 2011, pp.199-202

〔学会発表〕(計 12 件)

松尾誠治, 工業圏から分離生成した二酸化炭素ハイドレート技術を用いた農工融合システムの実現, 農業施設学会年次大会シンポジウム(招待講演), 2013 年 08 月 28-30 日, 岐阜大学応用科学部, 岐阜県岐阜市

Y.iwasaki, D.Ahn, S.Matsuo, H.Umeda, Feasibility study of an effective of carbon dioxide hydrate in greenhouse production, Greensys, 2013 年 10 月 6-11 日, IICC Jeju, Jeju, Korea

竹谷敏, 中野浩平, 他 5 名, 野菜および果物内部に形成された炭酸ガスクラスレート水和物の可視化, 第 26 回日本放射光学会年会, 2013 年 1 月 12-14 日, 名古屋大学, 愛知県名古屋市

松尾誠治, 岩崎泰永, 山本佳孝, 中野浩平, 竹谷敏, 梅田大樹, 二酸化炭素ハイドレート技術を用いた農工融合型施設園芸システムの開発, 第 5 回メタンハイドレート総合シンポジウム, 2013 年 12 月, 4-5 日, 産総研臨界副都心センター, 東京都江東区

平林紳一郎, 竹内基, 永川圭介, 種橋航, 山本佳孝, 微小氷を用いた CO₂ ハイドレート生成機構の力学的・熱力学的考察, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2013 年 6 月 20 日-21 日, 千葉大学西千葉キャンパス, 千葉県千葉市

中野浩平, ムンクバト, 竹谷敏, 梅田大樹, 松尾誠治, 低温・微高圧炭酸ガスによる青果物の品質保持技術の開発, 第 18 回生物関連高圧研究会シンポジウム, 2013 年 9 月 5-6 日, 岐阜大学, 岐阜県岐阜市

ムンクバト, 竹谷敏, 梅田大樹, 松尾誠治, 中野浩平: 青果物品目の違いが低温・高圧処理による炭酸ガスクラスレ-

ト水和物の生成量に及ぼす影響, 第 72 回農業食料工学会年次大会, 2013 年 9 月 10-13 日, 北海道帯広市

松尾誠治, 藤田豊久, 岩崎泰永, 山本 佳孝, 中野浩平, 竹谷 敏, 梅田大樹, ハイドレート CO₂ 及び冷熱を用いた農工融合型施設園芸システムに関する研究, 日本エネルギー学会, 2012 年 7 月 30 日, 工学院大学, 東京都新宿区

Seiji Matsuo, K.Okaya, T.Fujita, S.Takeya,

A study on generation of low decomposition rate lump hydrate for a long-term storage in the atmospheric pressure", proceedings of the 7th Int. Conference on gas hydrates, 2011 年 7 月 17-21 日, Edinburgh central hall, Edinburgh, Scotland, United kingdom

山本佳孝, 竹内基, 村田篤, 保科貴亮, 辻智也, 平林紳一郎, 川村太郎, マイクロアイスを用いた低圧化での効率的炭酸ガスハイドレート生成, 日本海水学会若手会第 3 回研究発表会, 2012 年 3 月 5 日, 徳島大学フロンティア研究センター, 徳島県徳島市

松尾誠治, 渥美沖採掘試験を含むメタンハイドレート開発の現状とハイドレート技術の産業利用の可能性, 平成 24 年度 豊橋市イノベーション創出等支援事業(招待講演), 2012 年 12 月 4 日, 豊橋サイエンスコア, 愛知県豊橋市

松尾誠治, ガスハイドレートの現状と産業分野への応用, 環境資源工学会第 127 回例会(招待講演), 2012 年 11 月 10 日, 東北公益文科大学酒田キャンパス, 山形県酒田市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 植物栽培システム
発明者: 松尾誠治, 梅田大樹
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特開 2007-319022 号広報
出願年月日: 2012 年 9 月 14 日
国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 誠治 (MATSUO, Seiji)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：20302755

(2) 研究分担者

藤田 豊久 (FUJITA, Toyohisa)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：70124617

岡屋 克則 (OKAYA, Katsunori)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：80134493

山本 佳孝 (YAMAMOTO, Yoshihiko)
産業技術総合研究所・マテリアル・レート研究センター
- 物理特性解析チーム長
研究者番号：80358283

竹谷 敏 (TAKEYA, Satoshi)
独立行政法人産業技術総合研究所・計測加工
研究部門・主任研究員
研究者番号：40357421

中野 浩平 (NAKANO, Kohei)
岐阜大学・応用生物科学部・准教授
研究者番号：20303513

岩崎 泰永 (IWASAKI, Yasunaga)
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究
機構・野菜茶業研究所・上席研究員
研究者番号：40500947

(3) 連携研究者

()
研究者番号：

* 研究協力者

梅田 大樹 (UMEDA, Hiroki)
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究
機構・野菜茶業研究所・研究員