

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19306

研究課題名（和文）CO<sub>2</sub>施用速度に対する温室内植物群落純光合成速度のリアルタイム推定法の開発研究課題名（英文）Development of a real-time response curve estimation of the canopy net photosynthetic rate to the CO<sub>2</sub> supply rate in a ventilated greenhouse

研究代表者

富士原 和宏（Fujiwara, Kazuhiro）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・教授

研究者番号：30211535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：温室管理者は、換気中の温室であっても費用対効果が十分に認められるのであれば、CO<sub>2</sub>施用を行いたい。しかしこれまでは、換気中の温室でのCO<sub>2</sub>施用の費用対効果を明確に示す有効な指標がなかった。本研究では、換気中の温室であってもCO<sub>2</sub>施用効果を最大限に発揮させ得る合理的なCO<sub>2</sub>施用を行うための中核技術となる、CO<sub>2</sub>施用速度-温室内植物個体群純光合成速度応答曲線をリアルタイムで推定する方法を開発した。本曲線の推定には、植物体の温室への移植後10日程度以降の温室内のPPFD、相対湿度、気温、温室内外のCO<sub>2</sub>濃度、温室換気回数、および温室内植物群落純光合成速度算定値の短時間間隔での記録が必要となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CO<sub>2</sub>施用は、温室栽培植物の生長促進を図る環境調節技術として特に本邦では重要な技術である。しかしながら、CO<sub>2</sub>施用の最適化を可能とする技術はこれまで開発されていない。CO<sub>2</sub>施用の最適化を可能とするには、現時点で、CO<sub>2</sub>施用速度をどれだけにすれば、温室内植物個体群の純光合成速度がどれだけになるのかをリアルタイムで推定することが必要となる。本研究では、そのCO<sub>2</sub>施用速度-温室内植物個体群純光合成速度応答曲線を換気中の温室であってもリアルタイムで推定する方法を開発し、その実証実験も完了した。これにより、費用対効果に基づいて、リアルタイムでCO<sub>2</sub>施用速度を決定できるCO<sub>2</sub>施用法の実用化が可能となった。

研究成果の概要（英文）：Even in a highly ventilated greenhouse, a greenhouse manager would supply CO<sub>2</sub> to the greenhouse if it were cost effective to supply CO<sub>2</sub> at a certain rate. However, for a ventilated greenhouse, no useful index or criterion exists for the assessment of CO<sub>2</sub> supply cost effectiveness. We developed a response curve of the canopy net photosynthetic rate (CNPR) to the CO<sub>2</sub> supply rate (CSR) for a ventilated greenhouse on a cost-effectiveness assessment basis. To create a real-time CSR-CNPR curve for a short interval, PPFD, RH, temperature, CO<sub>2</sub> concentration inside and outside the greenhouse, the number of air exchanges per hour of the greenhouse, CNPR during the day must be recorded for a short interval of more than 10 days after plants are transplanted into a greenhouse.

研究分野：植物環境工学

キーワード：CO<sub>2</sub>施用 温室 デジャブ・データ検索 ヒューリスティック 推定法 植物個体群 純光合成速度 換気回数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

温室内植物群落（厳密には個体群）の純光合成速度（以後、単に純光合成速度）を高めることを介して、栽培植物の生長速度あるいは収量を大きくする目的で、日の出前後から日中にかけて温室内に CO<sub>2</sub> を供給する技術は CO<sub>2</sub> 施用と呼ばれ、とくに果菜類を栽培する温室で広く行われている。本邦のように電気料金が高く、人工光による補光の費用対効果が小さい国・地域では、温室内 CO<sub>2</sub> 濃度を高める CO<sub>2</sub> 施用は純光合成速度を高める最も効果的な方法となる。

従来の CO<sub>2</sub> 施用法としては、換気をしていない日の出前後から日中の時間帯に、温室内の CO<sub>2</sub> 濃度をある濃度（温室外の CO<sub>2</sub> 濃度の 2 倍程度）以上に維持する方法が一般的である。関東以西では、冬期でも晴天であれば午前中に温室内気温が栽培適温を超えて換気が必要になる場合があるので、この方法では一日の内で CO<sub>2</sub> 施用を行える時間は制限され、結果的に CO<sub>2</sub> 施用の潜在的効果を十分には発揮できない。これに対して、換気中の設定濃度を温室外の CO<sub>2</sub> 濃度程度とすることで換気中にも CO<sub>2</sub> 施用を行う方法もある。施用した CO<sub>2</sub> がほぼ植物個体群に吸収される「損失のない」CO<sub>2</sub> 施用法と評価され、温室環境制御システムを導入しているような大規模な温室で採用されている。しかし、温室内 CO<sub>2</sub> 濃度を温室外と同程度に高めても純光合成速度の増加量は大きくないので、この方法でも CO<sub>2</sub> 施用の潜在的効果を十分に発揮できるとはいえない。また温室管理者とすれば、費用対効果が見合う、すなわち純益がより増加するのであれば、施用した CO<sub>2</sub> の一部が温室外に排出されたとしても純光合成速度を高めたいのであり、その点でこの方法は消極的な CO<sub>2</sub> 施用法であるといえる。

CO<sub>2</sub> 施用を行う上で温室管理者が最も必要としているのは、その温室内に現時点でどれだけの速度で CO<sub>2</sub> を施用すれば、どれだけの効果、すなわち純光合成速度の増加が得られるのかを示す情報であり、それさえ提示されれば温室管理者は、独自の判断基準による費用対効果に基づいて CO<sub>2</sub> 施用速度を決定できる。具体的には、CO<sub>2</sub> 施用速度-純光合成速度応答曲線（以後、CP 曲線）をリアルタイムで得られるのであれば、温室管理者が費用対効果を明確に理解、把握、納得した上で、合理的に CO<sub>2</sub> 施用速度を決定できるようになる。しかもその決定アルゴリズムを温室環境制御システムに組み込めば、温室管理者ごとの費用対効果の判断に基づいて決定される CO<sub>2</sub> 施用速度がリアルタイムで算出され、その値に自動制御されることになる。すなわち温室管理者が、費用対効果を明確に理解、把握、納得した上で、換気中であっても、CO<sub>2</sub> 施用の潜在的効果を最大限に発揮させ得る、合理的な CO<sub>2</sub> 施用をリアルタイムで自動的に行うことが可能となるのである。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記のような合理的かつ画期的な CO<sub>2</sub> 施用を行うための中核技術となる、CP 曲線のリアルタイム推定法を開発することを第一目的とする。本推定法では、直近の過去数週間の当該植物栽培中における温室内外環境計測データの中から、温室内 CO<sub>2</sub> 濃度以外の環境要素（気温、日射量および飽差）レベルが現時点のそれらに近似したデータ（以後、デジャブ・データ）が記録されている時刻の純光合成速度算定値を検索し、その算定値をデジャブ・データ時からの生長分補正することで、任意の CO<sub>2</sub> 施用速度に対する現時点における純光合成速度を推定する。また、予定以上に研究が進捗した場合には、その CP 曲線のリアルタイム推定法に基づいた CO<sub>2</sub> 施用速度のリアルタイム決定および実際の CO<sub>2</sub> 施用を行うシステムの試作も行うことにした。

当初の最終（2019）年度に台風による温室外環境計測機器の損壊があったことから研究期間の延長を余儀なくされたことが、結果的に当初の計画より実質的に長い研究期間をもたらした。このため、最終（2020）年度には、当初の目的の次のステップと考えていた CP 曲線のリアルタイム推定法に基づいた CO<sub>2</sub> 施用速度のリアルタイム決定および実際の CO<sub>2</sub> 施用を実施するシステムの試作も完了することができた。そこで、以下では、本研究の最も重要な成果が得られた最終年度の研究方法と研究成果について記述する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 CP 曲線リアルタイム推定法の概要

本推定法は、モデル作成や、各種パラメータの調整が不要である。対象とする温室および温室内植物個体群において温室内外の各環境要素の測定データおよび  $P_n$  の算定データに基づいて、CP 曲線をリアルタイムで推定する。まず、温室内外の各環境要素の測定、CO<sub>2</sub> 収支に基づく  $P_n$  の算定、およびそれらの値の記録を数日以上継続して行う。次に、それらの測定データのうち、現時点での温室内の各環境要素の測定値に類似した測定データ（例えば、PPFD・気温・飽差の現時点での測定値に対して、それぞれ  $\pm 100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \cdot \pm 3.0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \pm 0.5 \text{ kPa}$  以内にすべて収まる測定データ）を検索し（デジャブ・データ検索）CP 曲線を回帰推定する。一方、現時点より以前の  $P_n$  算定データを用いるため、植物個体群の生長に伴い、現時点において推定される CP 曲線は一般には過小となる。そこで、生長に伴う  $P_n$  の増加（場合によっては減少）に応じて、デジャブ・データ検索した  $P_n$  の補正を実施する（生長量補正法）。

#### 3.2 CP 曲線のリアルタイム推定システム

CP 曲線のリアルタイム推定システムは、環境要素測定用センサ（図 1）、CO<sub>2</sub> 施用速度の制御装置（マスフローコントローラ）、センサ出力電圧の A/D 変換および CO<sub>2</sub> 施用速度の制御出力を行うマイクロコントローラ（Arduino Uno）および周辺回路、PC、 $P_n$  算

定、データ記録、CP 曲線推定、画面表示等を実行するプログラム、の5点で構成した(図2)。温室内中央における気温、相対湿度およびCO<sub>2</sub>濃度、温室外における光合成有効量子束密度(PPFD)およびCO<sub>2</sub>濃度を測定した。マイクロコントローラにおいて測定値の読取り(A/D変換)を行い、PC上のプログラムにおいて、各環境要素の平均値の算定、CO<sub>2</sub>収支に基づくP<sub>n</sub>の算定、およびデータベースへの記録を行った(5分間隔)(図2)。データベースに現時点での環境条件に類似した条件での測定データが十分存在(n>5)する場合、CP曲線推定を随時実施した。

### 3.3 実証実験

実証実験は、東京大学弥生キャンパス内の強制換気小型温室(面積15m<sup>2</sup>、容積44m<sup>3</sup>)(図1)において栽培したトマト個体群(40株、2019年9月定植)を対象とし、2019年11月4日から12月3日の計30日間にわたって実行した。実行の期間中、6-18hにCO<sub>2</sub>施用を実施した。本システムの実行開始日(11月4日)を0日目として、2日目以降、CP曲線のリアルタイム推定を5分ごとに実施した(図3)。およそ10日間の測定データの蓄積によって、推定実行が安定して可能となり、CP曲線に基づくP<sub>n</sub>の推定値は、CO<sub>2</sub>収支に基づくP<sub>n</sub>の算定値に対して、多くの時刻でよく一致した(データ略)。結果的に、当初の研究目的を達成しただけでなく、次のステップと考えていたCP曲線のリアルタイム推定法に基づいたCO<sub>2</sub>施用速度のリアルタイム決定および実際のCO<sub>2</sub>施用を実施するシステムの試作も完了することができた。

他方、週単位を超える長い期間継続した同様な気象条件がそれに続く期間でまったく異なる気象条件となるような場合には、デジャブ・データ検索で類似した測定データが少なくなるため、デジャブ・データ検索のための条件設定法と生長量補正法に若干の改良が必要であることも判明した。

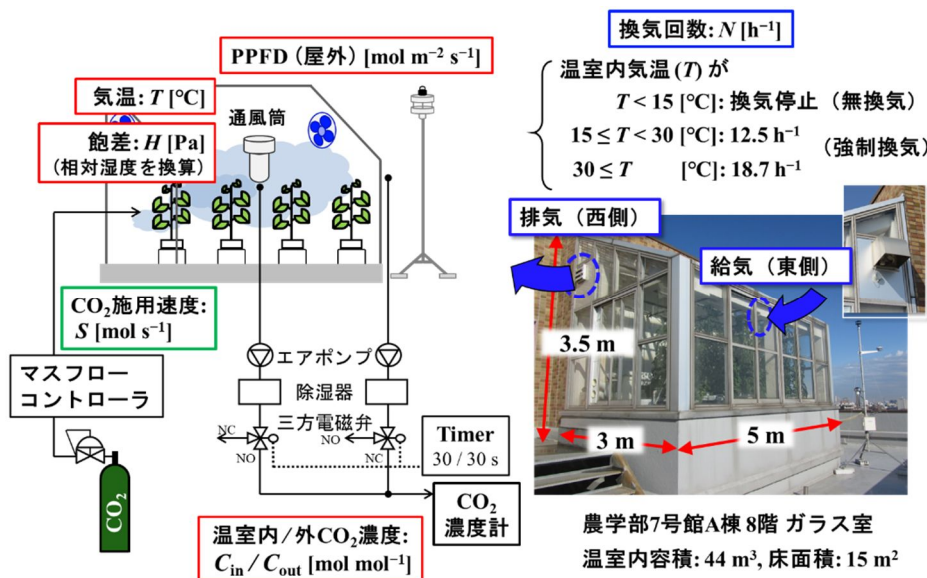


図1 強制換気小型温室および主要な環境要素測定・制御機器の構成と換気回数設定の概要

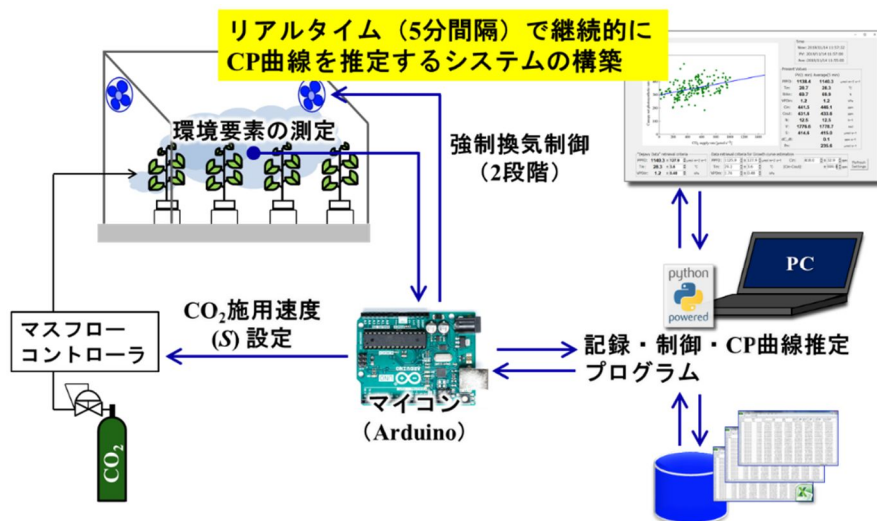


図2 CO<sub>2</sub>施用速度-温室内植物個体群純光合成速度曲線のリアルタイム推定システムの概要

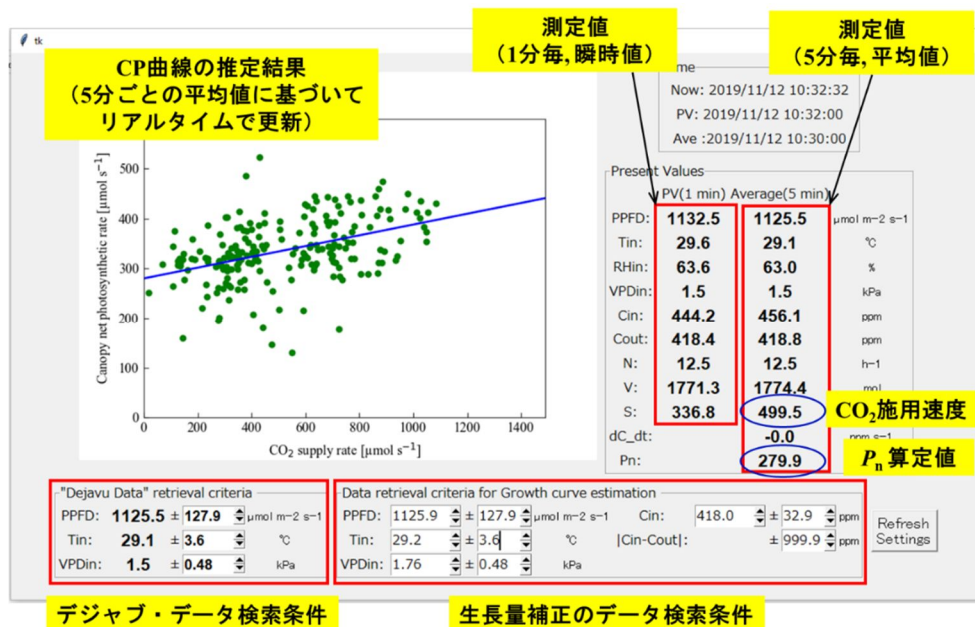


図3 CO<sub>2</sub>施用速度-温室内植物個体群純光合成速度曲線のリアルタイム推定システム実行中のプログラム (Python 3.7) の表示画面

#### 4. 研究成果

強制換気小型温室においてCP曲線のリアルタイム推定を実行するシステムを開発し、30日間にわたる実証実験で継続的な推定を継続できた。デジャブ・データ検索のための条件設定法と生長量補正法には若干の改良が必要であることが示されたが、本システムの稼働状況は、ほぼ当初の予定通りのものであった。上記システムの開発・改良には、計4回の栽培実験を要したが、当初の研究目的を達成しただけでなく、次のステップと考えていたCP曲線のリアルタイム推定法に基づいたCO<sub>2</sub>施用速度のリアルタイム決定および実際のCO<sub>2</sub>施用を実施するシステムの試作も完了することができた。このことは、温室管理者ごとの費用対効果の判断に基づいて決定されるCO<sub>2</sub>施用速度がリアルタイムで算出され、その値に自動制御される、すなわち温室管理者が、費用対効果を明確に理解、把握、納得した上で、換気中であっても、CO<sub>2</sub>施用の潜在的効果を最大限に発揮させ得る、合理的なCO<sub>2</sub>施用をリアルタイムで自動的に行うためのプロトタイプシステムが開発されたことを意味する。

また、デジャブ・データ検索のための各環境要素許容範囲設定がCP曲線の推定精度に及ぼす影響を調べるための、完全制御環境下でありながら自然環境下にある温室の各環境要素変動に近い変動を実現した環境で行う実験により、1日の間に同じCO<sub>2</sub>量を施用しても、大型温室で広く普及しているゼロ濃度差CO<sub>2</sub>施用法よりも、光合成有効光量子速度の大きい時間帯にのみ温室内CO<sub>2</sub>濃度を外気よりも100 μmol mol<sup>-1</sup>高くする方法の方が1日の純光合成速度の積算値を高められることを証明した。このことは、CP曲線のリアルタイム推定法を用いたCO<sub>2</sub>施用法が、ゼロ濃度差CO<sub>2</sub>施用法よりも、1日あたりのCO<sub>2</sub>施用効率を高くできることを示唆するものである。

以上より、CO<sub>2</sub>施用を行う上で温室管理者が最も必要としている、その温室内に現時点でどれだけの速度でCO<sub>2</sub>を施用すれば、どれだけ温室内植物個体群の純光合成速度の増加が見込まれるのかを示す情報、すなわち、CO<sub>2</sub>施用速度-純光合成速度応答曲線(以後、CP曲線)をリアルタイムで推定する方法を、強制換気温室について当初の目的通りに開発した。さらには、CP曲線のリアルタイム推定法に基づいたCO<sub>2</sub>施用速度のリアルタイム決定および実際のCO<sub>2</sub>施用を実施するシステムの試作も行った。これにより、温室管理者が費用対効果を明確に理解、把握、納得した上で、合理的にCO<sub>2</sub>施用速度を決定するための基本的な技術が開発されたことになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuhiro Fujiwara and Yuki Ohshima
2. 発表標題 Real-time response curve estimation of the canopy net photosynthetic rate to the CO <sub>2</sub> supply rate in a ventilated greenhouse
3. 学会等名 International Society for Horticultural Science (GreenSys2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富士原和宏・川島崇志・大嶋勇樹・松田怜
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 施用速度 - 温室内植物個体群純光合成速度応答曲線のリアルタイム推定法 (2)
3. 学会等名 日本農業気象学会 (2018年全国大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島崇志・富士原和宏・松田怜・大嶋勇樹
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 施用速度 - 温室内植物個体群純光合成速度曲線のリアルタイム推定法の改良
3. 学会等名 日本農業気象学会北陸支部・関東支部 (2018年度合同例会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島崇志・大嶋勇樹・松田怜・富士原和宏
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 施用速度 - 温室内植物個体群純光合成速度曲線推定法の小型ガラス温室への適用
3. 学会等名 日本農業気象学会 (2019年全国大会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Takasi Kawashima, Ryo Matsuda and Kazuhiro Fujiwara
2. 発表標題 Improvement of the real-time response curve estimation of the canopy net photosynthetic rate to the CO2 supply rate in a ventilated greenhouse.
3. 学会等名 American Society for Horticultural Science (2019 Annual Conference) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川島崇志・松田怜・富士原和宏
2. 発表標題 CO2施用速度-温室内植物個体群純光合成速度曲線のリアルタイム推定プログラム開発
3. 学会等名 日本農業気象学会関東甲信越支部 (2019年度合同例会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川島崇志・松田怜・富士原和宏
2. 発表標題 強制換気温室におけるCO2施用速度-植物個体群純光合成速度曲線のリアルタイム推定システムの開発
3. 学会等名 日本農業気象学会 (2020年全国大会) (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考