

長期どりトマトの高軒高ハウス・炭酸ガス施用等を活用した 先進的増収技術の開発に関する試験研究事業

戸塚 貴之* 岡田 真* 平間 毅* 平野 聡* 金子賢一** 神澤雅典*** 平野清志****

1. はじめに

茨城県は、トマトの作付面積で全国第2位、産出額は全国第5位と、全国でも有数のトマト栽培地である。うち、春冬トマトは作付面積が全体の17%でありながら、収穫量は全体の28%を占め、面積当たりの収穫量が非常に多い効率的な作物であるといえる。しかし近年、暖房用燃料費の高騰や販売単価の低下に伴い、施設栽培を用いる春冬トマトの収益性の向上が急務となっている。

2. 目的

トマトの増収技術に関しては、近年高軒高ハウスの利用や炭酸ガス施用による環境制御技術が着目されており、民間の栽培設備でも広く利用されている。しかし、効率的な炭酸ガス施用を行うのに最適と言われる炭酸ガス濃度が施用装置メーカーごとに異なるなど、不明な点も多く、より効率的で実用的な炭酸ガス施用方法の確立が求められている。

本研究事業では、県園芸研究所と共同で、炭酸ガス施用や高軒高ハウスを用いた増収技術の研究を行う。当センターでは、効率的な炭酸ガス施用のためのハウス内炭酸ガス濃度シミュレーションや、実環境下のデータ計測を行うためのセンサモジュールの開発を行う。

3. 研究内容

3.1 ハウス内炭酸ガス動態シミュレーション

ハウス内の炭酸ガス施用を行うにあたり、ハウス内で炭酸ガスがどのように分布・拡散していくのかをある程度予測し、炭酸ガス施用装置の運用やセンサモジュールによる測定点決定のための参考値とする必要がある。そのため、園芸研究所内に建設される高軒高ハウスのモデルを作成し、炭酸ガス濃度分布と温度変化のシミュレーションを行った。

シミュレーションを行うに当たり、園芸研究所内に建設した高軒高ハウスのモデルを作成した(図1)。外寸法で幅7.5m、高さ6.0m、奥行き20mとし、天井屋根までの側壁の高さは4.2mとした。また、炭酸ガスの噴射孔はφ0.3mとし、壁から1mの距離に3m間隔で5つ設けた。なお、天窗は閉じた状態とし、高さ2m、幅1mの仮出口を2個設けた。

シミュレーションを行う条件として、ハウス内の空気及び施用する炭酸ガスの物性値は表1の値を使用した。また、解析条件としてハウス内の空気の炭酸ガス濃度及び初期値は一般的な値である25℃、390ppmという値を使用し、炭酸ガス発生装置からの温度上昇は41.4℃、炭酸ガス濃度上昇は1,500ppmであるため、炭酸ガス発生装置からハウス内へ外気を取り入れて、温

度66℃、炭酸ガス濃度1890ppmで噴射する。炭酸ガス発生装置からの流量は5孔合わせて15m³/minとし、孔の断面積から流速は0.707m/sとした。その他、解析条件は表2のように定めた。

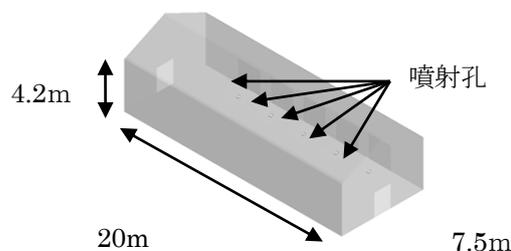


図1 高軒高ハウスモデル

表1 使用した物性値

項目	①空気	②炭酸ガス
モル質量 [kg/kmol]	28.96	44.01
比熱 [J/(kg・K)]	1,004.4	843.2
粘性係数 [Pa・s]	1.831×10 ⁻⁵	1.470×10 ⁻⁵
熱伝導率 [W/(m・K)]	2.61×10 ⁻²	1.39×10 ⁻²

表2 解析条件

項目	値など	備考
噴射条件	0.707 [m/s], 66 [℃] CO ₂ 濃度 1,890 [ppm]	
出口圧力	0 [Pa]	逆流禁止
初期条件	25 [℃] CO ₂ 濃度 390 [ppm]	
参照圧力	1 [atm]	
拡散係数	0.005 [m ² /s]	仮定
重力加速度	あり	
乱流モデル	k-Epsilon	
解析時間	20 [分]	

また、モデルのCADデータを作成するためのソフトウェアとしてSlidoWorks2013を、解析を行うCAEソフトウェアとしてANSYS CFD-Floを使用した。

3.2 センサモジュールの開発

実際のハウス内では栽培するトマトの光合成及び呼吸、栽培に伴う水分の散布などの影響により、炭酸ガス濃度や温度変化条件などが3.1でのシミュレーション結果と異なってくることが考えられる。そのため、効果的な炭酸ガス施用方法を確立するためには3.1で行ったシミュレーション結果の妥当性を検証するとと

もに、実環境下での炭酸ガス濃度や温湿度の計測を行い、トマトの生育状況と照らし合わせることで環境制御方法の検討を行う必要がある。

そこで当センターでは、炭酸ガス濃度センサと温湿度センサが接続可能で、かつ多点での同時計測が可能なセンサモジュールとして、H25 年度まで電力見える化モジュールとして開発を行ってきたものをベースに改良を行い、ハウス内の環境計測が可能な無線センサモジュール (図 2) を開発した。

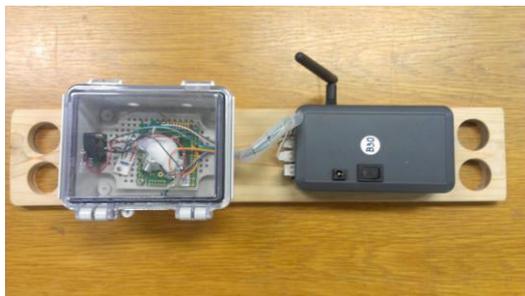


図 2 開発したセンサモジュール

また、使用したセンサ及びマイコン等の部品を表 3 に示す。

表 3 部品一覧

部品名	型番
CO ₂ センサ	SenseAir 社製 CO2Engine K30
温湿度センサ	SENSIRION 社製 SHT75
無線通信ユニット	Xbee PRO
データ処理用マイコン	PIC24FJ64GA002

CO₂センサの選定については、測定対象がハウス内の炭酸ガス濃度であることから外気の炭酸ガス濃度 (一般的に 400 p p m 程度)、及びそこから炭酸ガス施用を行った際に上昇した炭酸ガス濃度を計測できるものとして、0~5000 p p m までの範囲を測定できるセンサとして SenceAir 社製の CO2EngineK30 を選定した。また、温湿度センサとして小型かつ一般的な環境計測に使用可能で、過去に製作した電力見える化モジュールでも使用実績のある SENSIRION 社製の SHT75 を採用した。

無線通信ユニットとして用いた XbeePRO は、通信規格として Zigbee を使用した通信モジュールである。Zigbee とは無線 LAN と同じ ISM バンドである 2.4GHz を使用した無線通信規格であり、消費電力が非常に低いことや、ノードを複数接続してのメッシュネットワークの構築が可能といった特徴がある。本研究ではトマト栽培ハウス内の炭酸ガス濃度等を多点で計測する必要があるため、複数のセンサモジュールを接続し同時計測を可能とする Zigbee を通信規格として採用している。

従来の電力見える化モジュールはアナログ入力のみに対応であったが、本研究事業で開発したセンサモジュールは通信ノイズによる影響を考慮し、デジタル入

出力に対応できるよう改良を行った。CO₂センサからのデジタル入出力は UART を用い、温湿度センサとの通信はプログラム側で作成したデジタル IO を使用している。これらの測定データを無線通信ユニットによって計測用パソコンへと送信し、専用ソフトウェアにて集計やグラフの表示などを行う。

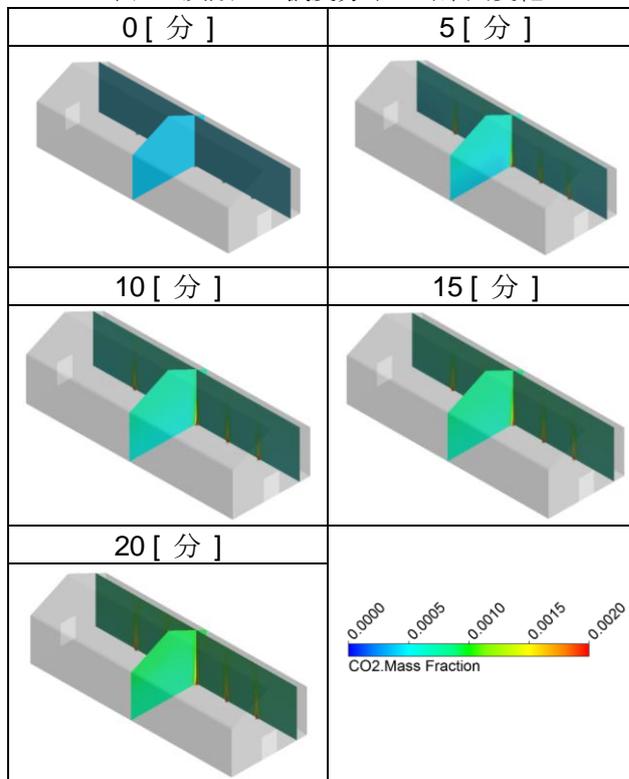
また、CO₂センサと温湿度センサを封入したボックスには通気口と吸気用ファンを設置し、ハウス内の空気とセンサ周辺の空気を攪拌し、より正確な値の測定ができるようハードウェアの設計を行った。

4. 研究結果と考察

4.1 シミュレーション結果

3.1 の条件で炭酸ガス動態のシミュレーションを行ったところ、表 4 の結果が得られた。ハウス断面における炭酸ガス濃度の時系列変化に着目した結果、施用開始直後はハウスの噴出孔と天井付近の炭酸ガス濃度が高くなっている。噴出孔付近の炭酸ガス濃度が高くなるのは自明のことであるが、天井付近の炭酸ガス濃度が高くなるのは施用方法が地面付近から天井に向けて炭酸ガスを噴出する構造になっているためと思われる。しかし施用開始から時間が経過すると高さによる炭酸ガス濃度の差が小さくなっている。これは炭酸ガスの密度が空気より高いことによる、自重による拡散効果のためではないかと思われる。

表 4 炭酸ガス濃度分布 時系列変化



また、ハウス全体の炭酸ガス濃度の平均値の時系列変化のグラフを図 3 に示す。炭酸ガス施用開始時の外気と同じ値である 390ppm からリニアに炭酸ガス濃度は増加していき、シミュレーション終了の 20 分後には

平均で 800ppm 程度となった。ハウスの容積が 765 m³、炭酸ガス流量が 15 m³/min であり、ハウス内の炭酸ガス濃度が比例的に増えていくという結果からすると、20 分間施用を行った場合の炭酸ガス濃度は

$$390 + 1,500 \times (20/51) = 978 \text{ ppm}$$

と予想される。しかし解析結果はそれよりも少ない値となっており、天井の開閉は今回のシミュレーションでは考慮していないことから、これは仮出口からの流出による影響と思われる。

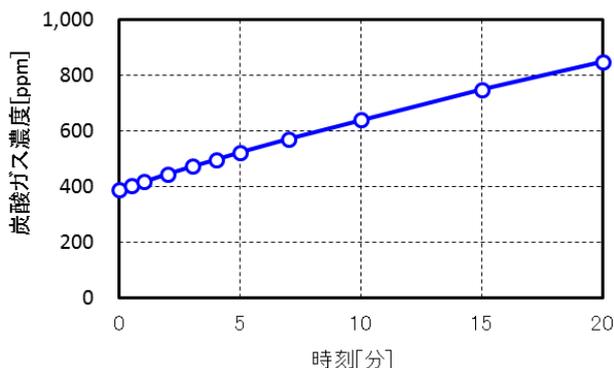


図 3 ハウス内炭酸ガス濃度平均値の推移

4.2 センサモジュールを使用した計測結果

園芸研究所に建設した高軒高ハウスでの測定を行うための事前実験として、メーカー製の炭酸ガス施用装置と炭酸ガス等センサモジュールを使用しトマトの栽培を行っている県内の農家にご協力いただき、多点での炭酸ガス濃度と温湿度の測定を行った。炭酸ガスの拡散状況をモニタリングするため、炭酸ガス施用を行っているハウス内に、3 点の設置場所に高さを変えて 3 台ずつ、合計で 9 台のセンサモジュールを設置し、1 週間連続でのデータ収集を行った。センサモジュールの設置場所については、①炭酸ガス施用装置付近、②既設のメーカー製炭酸ガス濃度・温湿度センサユニット付近（ほぼハウス中心位置）、③①の設置場所の対角線位置の 3 点に設置した。また、高さごとの炭酸ガス濃度推移を測定するため、設置高さとしてトマトの成長点である地面から 200 c m の位置を最高点とし、80 c m 間隔で地面から 120 c m、40 c m の位置にそれぞれセンサモジュールを設置した。測定位置別に集計した 0 時から 24 時までの 1 日の炭酸ガス濃度推移を図 4、図 5、図 6 に示す。

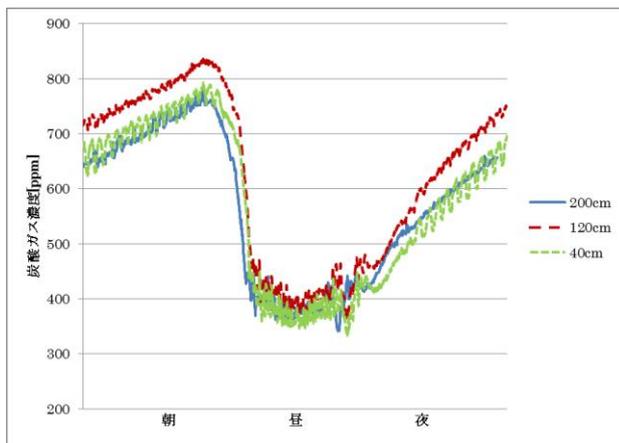


図 4 炭酸ガス施用装置付近の炭酸ガス濃度時間推移

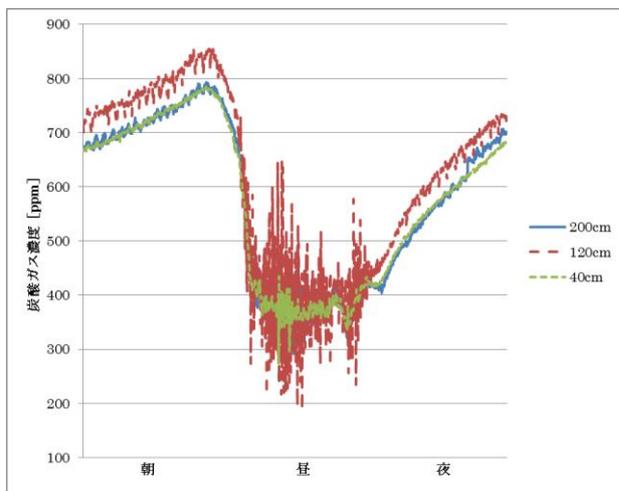


図 5 既設センサ付近の炭酸ガス濃度時間推移

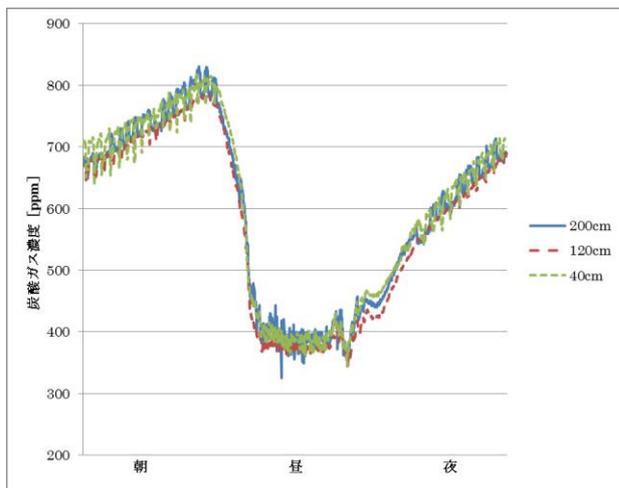


図 6 対角線位置の炭酸ガス濃度時間推移

これらの結果から、高さごとに炭酸ガス濃度に特徴があることが分かる。シミュレーション結果では、施用を行った場合最も天井の高い位置から炭酸ガス濃度が高くなっていったが、測定結果では特に炭酸ガス施用装置から近い位置での地表から 120 c m 地点での炭酸ガス濃度が高くなっていた。また、既設センサ付近での 120 c m 地点における昼間の炭酸ガス濃度に大きな揺れがあるが、地表付近及び成長点付近にて濃度の

揺らぎが見られないことから、これは作業者の呼気に含まれる炭酸ガスによる影響と思われる。人体の呼気に含まれる炭酸ガス濃度は外気や施用装置からの排気に比べ非常に高く、120cmという高さが人体の鼻や口からの呼気が当たりやすい高さであることが原因であるとの推測から、計測モジュールには問題はないものと判断した。

また、本実験での測定前に全センサモジュールの動作実験を行った際、同様の環境を測定しているにもかかわらず、センサごとの測定結果に最大100ppm程度のばらつきが見られた。使用した炭酸ガスセンサごとに個体差があるためと思われる、全てのセンサモジュールを既設のメーカー製炭酸ガスセンサモジュール付近に設置し、同時刻に測定したメーカー製モジュールの測定値をリファレンスの値として比較を行い、差分を補正值として測定結果に反映させた。

これらの測定結果は県園芸研究所に引き渡し済みであり、現在園芸研究所内にて拡散状況の解析を行っている。

5. まとめ

- ・高軒高ハウスのモデルを作成し、炭酸ガス濃度分布のシミュレーションを行った。その結果、ある程度の時間経過でハウス内の炭酸ガスは拡散し、高さや位置による濃度の偏りは小さくなると予測される。
- ・炭酸ガス濃度と温湿度の測定を多点で同時に行えるセンサモジュールの開発を行い、県内トマト栽培農家に協力いただき実環境下での測定実験を行った。その結果、実際のハウス内では高さや位置による炭酸ガス分布の違いが出る事が分かった。

6. 今後の予定

本年度の研究で制作したセンサモジュールを使用し、今後県園芸研究所に建設した高軒高ハウスにて環境測定を行っていく。そこで得られた計測データを効率的な炭酸ガス施用装置の開発や高性能な計測モジュールの開発のため県内企業に提供していく。