

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26850159

研究課題名（和文）数値流体力学を用いた解析による温室の隙間換気の推定

研究課題名（英文）Prediction of Leakage Rate of Greenhouses Using Computational Fluid Dynamics

研究代表者

畔柳 武司（Kuroyanagi, Takeshi）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・西日本農業研究センター傾斜地園芸研究領域・主任研究員

研究者番号：60414778

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：隙間換気は温室のエネルギー効率を損ねるため、定量的な評価手法が必要である。本研究では、数値流体力学を用いた解析から算出した温室外表面における風圧力と、被覆材の隙間を通過する空気量を計算するモデルを用いて隙間換気回数を推定した。計算値と実測値の相関係数、ならびに計算値の2乗平均平方根誤差は、いずれも良好な結果であったことから、本手法は保温性に優れた温室設計の一助となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Air leakage of greenhouses accounts for the heating load and the carbon dioxide supply. Quantitative evaluation of the greenhouse air leakage is essential to estimate the variable costs for greenhouses of adequate energy efficiency. In this study, the greenhouse leakage rate was estimated through a combination of CFD simulation of the external pressure coefficients of the greenhouse cladding and modelling of airflow through leakage paths on the greenhouse walls. The simulation results of the leakage rate were validated by the experimental results obtained from two greenhouses with the same structure but different orientation. The correlation coefficients between the simulated and measured values ranged from 0.98 to 0.99, and the RMSE of the simulated leakage rate ranged from 0.020 to 0.052. This methodology will be helpful for designing light-weight greenhouses in windy regions.

研究分野：農業環境工学

キーワード：シミュレーション 施設園芸

### 1. 研究開始当初の背景

数値流体力学 (CFD) 解析は、任意空間内の流れ、熱伝達、相変化等を推定する数値解析手法である。施設園芸分野では、温室内気流分布の推定に利用されて以来 (Okushima et al., 1989), 多くの解析が積み重ねられ、内容もより現実の温室に即したものとなっている。Lee et al. (2000) は、植物とそれを取り巻く空気を均質な多孔質体に置換え、圧力損失を与えることで、初めて植物による気流阻害という現象を再現した。Boulard・Wang (2002) は、多孔質体内の風速、温度、湿度、その空間へ入射する日射量から植物の蒸散量と対流伝熱量を計算し、作物群落内で生じる熱・水蒸気の移動現象を CFD 解析に取り入れた。CFD 解析で再現される温室環境は、実際の環境に近づきつつあり (Bournet・Boulard, 2010), 循環扇等の設備配置を検討するツールとして使用することができる段階にある (Kuroyanagi, 2013)。

しかしながら、CFD 解析が精度よく温室環境を再現し得るのは、温室構造を解析空間上に正確に描画することが前提であり、流れの出入り口を特定できない温室の隙間換気を予測することは困難である。

隙間換気は、閉め切った温室の暖房負荷の 2 割に達することがあり (高倉・岡田, 1972), 温室の保温性を損ねる要因の 1 つである。また、太陽光利用型植物工場のように室内の CO<sub>2</sub> 濃度を上げて作物の光合成を促進させる場合、換気窓の閉鎖時にも関わらず、供給した CO<sub>2</sub> の大半が隙間換気を通じて大気中へ失われている (Kuroyanagi et al., 2014)。

今後、省エネルギー・低環境負荷が求められる施設園芸にとって、隙間換気の抑制を考慮した温室設計、立地の選択、防風施設利用の観点は必要不可欠であり、それらの有効性を事前に検討できるツールの存在意義は大きい。このような場面では実験に比べて時間とコストを節約できる CFD 解析は有用であり、そうした用途に対応させるためには、閉め切った温室周辺の気流性状から定量的に隙間換気量を推定できるプロトコルを構築することが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、CFD 解析から温室の隙間換気量を推定するプロトコルを明らかにする。具体的には、閉鎖時の温室を対象として、トレーサガス法による隙間換気測定を行うとともに、隙間換気測定時の温室の周辺環境を再現した CFD 解析を行う。温室周辺の気流性状の実測値との比較を通して予測精度を検証した後、隙間換気回数の実測値と温室各面に作用する風圧係数の CFD 解析の計算値との関係を解析することで、CFD 解析による温室の隙間換気量を推定するプロトコルを明らかにする。

### 3. 研究の方法

棟方向の異なるアーチ型のプラスチックハウス (床面積 6×14 m, 棟高 3.5m) を供試した (図 1)。六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>) をトレーサガスとした濃度減衰法によって、隙間換気測定を行った。トレーサガスの測定には、光音響ガスモニタ・マルチポイントサンプラ (1412-2・1309, LumaSense Technologies Inc.) を用いた。さらに温室周辺の気流性状を捉えるため、温室より十分離れた位置に固定した超音波風向風速計を基準風速とし、別に用意した超音波風速計を用いて温室周辺の風向風速の移動観測を行い、CFD 解析に用いる様々なデータを得た。



図 1 実験に用いたプラスチックハウス

CFD 解析の準備として、温室周辺地形の測量結果を元に解析空間を作成した (図 2)。AIJ guideline (Tominaga et al., 2008) および Bourdin & Wilson (2008) の指針の範囲内でメッシュサイズを変化させながら、連続式、運動方程式、乱流に関する輸送方程式を解く CFD 解析を繰り返し、解のメッシュ依存性を無視できる解析空間を決定した。

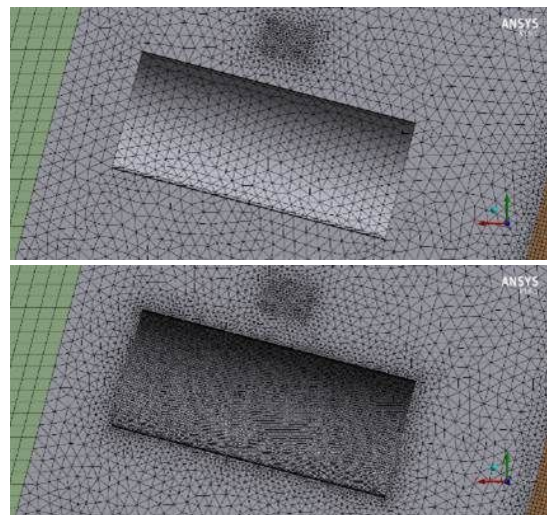


図 2 検討したメッシュサイズの例 (上図：粗いメッシュ、下図：密なメッシュ)

決定した解析空間に対して、乱流モデル、地面境界条件となる壁関数、等を変化させながら、連続式、運動方程式、乱流に関する輸送方程式群を解く CFD 解析をワークステーション上にて繰り返した。温室周辺の気流性状の観測結果と計算結果との比較を通じて、温室周辺の流れ場の特徴を精度よく解像し、かつ計算に要する時間が適切な範囲に収まる解析条件を決定した。

決定した解析条件の下、隙間換気測定時の気流性状を再現するCFD解析を相当数繰り返すことによって、実測の隙間換気回数のデータセットに対応する、温室各面に作用する外圧係数の計算値の数値データセットを得た。

各温室の外圧係数は、温室表面を東西の妻面、南北の軒面、アーチ天面、の5つに分割し、各面の平均値として算出した。温室の隙間換気回数の推定には、建物壁面の隙間流れを計算するVickery & Karakatsanis (1983)の式を用いた。外圧と内圧の差によって生じる隙間流れの単位時間流量の和が温室全体ではゼロになると仮定して、外圧係数より内圧係数を算出し、それらを用いて温室を出入りする空気流量を再度算出することで、隙間換気回数を推定した。

#### 4. 研究成果

解のメッシュ依存性は、温室周辺の空間により細かいメッシュサイズを適用することで小さくなり、温室周辺の風速の計算値の相対誤差 (RMSE) は 21.3%から 8.0%に抑えられた (図3)。

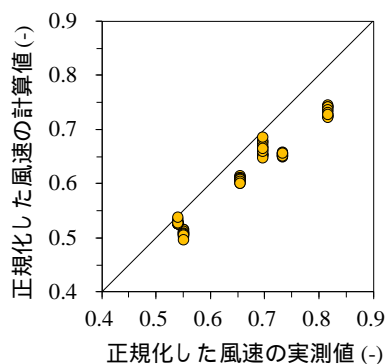


図3 細かいメッシュ適用時の計算結果

CFD解析から得られた温室の外圧係数は、風上側の表面で正となった一方、それ以外の面では負となった (図4)。計算値は、既往の文献値 (Richardson, 1986) とほぼ同様の範囲内に収まった (図5)。

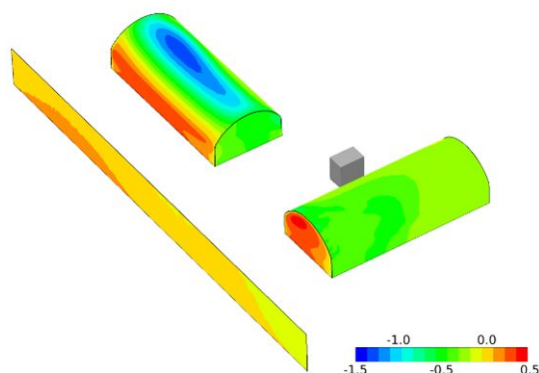


図4 温室の外圧係数の計算値

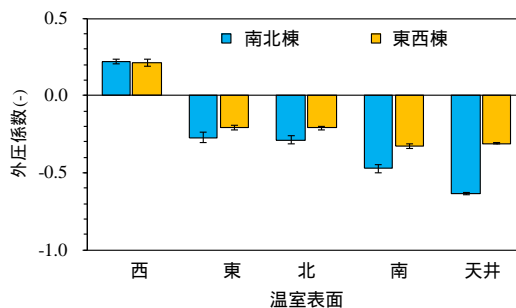


図5 温室各面の外圧係数の平均値

得られた外圧係数を下式に当てはめ、各面における単位時間流量の和が温室全体ではゼロになると仮定して、外圧係数より内圧係数を算出し、それらを用いて温室を出入りする空気流量を再度算出して、隙間換気回数を推定した。

式1 ある面における隙間流れ流量の推定式

$$Q_j = k_j a_j U_{ref} (C_{pej} - C_{pi}) |C_{pej} - C_{pi}|^{-0.5}$$

$a_j$ : 隙間面積 (m<sup>2</sup>)       $k_j$ : 流量係数 (-)  
 $C_{pej}$ : 外圧係数 (-)       $Q_j$ : 隙間流量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $C_{pi}$ : 内圧係数 (-)       $U_{ref}$ : 基準風速 (m/s)

隙間換気回数の計算値は、南北棟および東西棟の実測値とよく一致した (図6,  $R = 0.98 - 0.99$ ,  $RMSE = 0.020 - 0.052$ )。温室の隙間換気回数は、風上側にドアのある東西棟でより大きい傾向となることが実測値から示されたが、同様に、計算においても東西棟の隙間換気回数が常に大きくなるのが再現された。

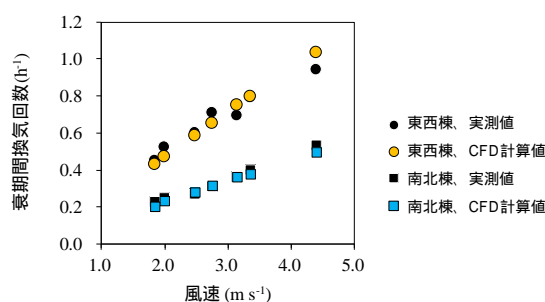


図6 温室の隙間換気回数の計算値と実測値

以上より、CFD解析から温室の外圧係数を算出し、隙間換気回数の推定へ繋げるプロトコルを構築し、その推定精度を棟方向の異なる温室において検証した。本手法は、例えば、強風地帯において保温性に優れた温室設計の一助となるのが期待できる。今後の課題として、天窗を有する温室などで検証を重ねる必要がある。

## <引用文献>

- Bournet·Boulard. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies, *Computers and Electronics in Agriculture*, 74:195-217.
- Boulard·Wang. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel, *Computers and Electronics in Agriculture*, 34:173-190.
- Bourdin·Wilson. 2008. Windbreak aerodynamics: Is computational fluid dynamics reliable? *Bourd.-Lay. Meteorol.* 126:181-208.
- Kuroyanagi, T. 2013. Validation of CFD simulation of Airflow from an Air Circulator above Crops, *Acta Horticulturae*, 1008:213-220.
- Kuroyanagi et al. 2014. Efficiency of carbon dioxide enrichment in an unventilated greenhouse. *Biosystems Engineering*, 119:58-68.
- Lee et al. 2000. Two-dimensional Numerical Simulation of Natural Ventilation in a Multi-span Greenhouse, *Transactions of the ASAE*, 43(3):745-753.
- Okushima et al. 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics, *Acta Horticulturae*, 248:129-136.
- Richardson. 1986. Wind loads on a full-scale film-plastic clad greenhouse: with and without shelter from a windbreak. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 23, 321-331.
- 高倉・岡田. 1972. 実測による温室暖房負荷係数の決定. *農業気象*, 27:93-98.
- Tominaga et al. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 96:1749-1761.
- Vickery & Karakatsanis. (1983). External wind pressure distributions and induced internal ventilation flow in low-rise industrial and domestic structures. *ASHRAE Transactions* 93(2): 2198-2213.

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Kuroyanagi T. (2017) Prediction of Leakage Rate of a Greenhouse Using Computational Fluid Dynamics. *Acta Horticulturae*, in press. (査読有)

[学会発表](計5件)

畔柳 武司. 外風向が温室の隙間換気回数に及ぼす影響. 日本生物環境工学会. 2016.9.14 金沢工業大学(石川県・野々市市)

Kuroyanagi T. Application of Computational Fluid Dynamics to the Prediction of Greenhouse Leakage Rate. *CIGR-AgEng* 2016. 2016.6.28 Aarhus (Denmark).

畔柳 武司. 数値流体力学解析による温室の隙間換気回数の推定. 農業環境工学関連5学会. 2015.9.17 岩手大学(岩手県・盛岡市)

Kuroyanagi T. Prediction of Leakage Rate of a Greenhouse Using Computational Fluid Dynamics. *Greensys* 2015. 2015.7.21 Evora (Portugal).

畔柳 武司. 温室の隙間換気回数と温室外表面の風圧係数の関係. 日本生物環境工学会. 2014.9.10 明治大学(東京都・千代田区)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

畔柳 武司 (KUROYANAGI, Takeshi)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・西日本農業研究センター 傾斜地園芸研究領域・主任研究員  
研究者番号: 60414778