
学会賞受賞記念講演要旨

生物と気象 (Clim. Bios.) 10:F-1, 2010

<http://www.soc.nii.ac.jp/agrmet/sk/2010/F-1.pdf>

2010年8月19日掲載

<http://www.agrmet.jp/sk/2010/F-1.pdf>

自然換気温室の換気・気流特性

佐瀬勘紀

農村工学研究所

Ventilation and air movement in naturally-ventilated greenhouses

Sadanori SASE

National Institute for Rural Engineering

1. はじめに

優れた功績と伝統を有する日本農業気象学会から普及賞を授与され、光栄かつ身が引き締まる思いです。推薦いただいた高倉直名誉会員、学会賞審査委員会の小林和彦委員長はじめ委員の皆様、岡田益己会長はじめ学会の関係者に深く感謝します。

当学会は、温室の環境調節について多くの功績がある。1973年に発足し、1977年に解散した施設園芸研究集合は、農業気象に「施設園芸環境制御に関する設計基準資料」をまとめている。1980年に設立された施設園芸研究部会は、研究会や国際シンポジウムを精力的に行った。2003年にweb版の「施設園芸読本」をまとめて解散したが、この分野の研究推進や情報交換の必要性から、園芸工学研究部会が2006年に発足している。本研究は、このような動きの中で行われた熱い議論にもまれながら、多くの人に支えられながらできあがったといっても過言ではない。以下では、研究の特徴や流れをトピックス的に紹介する。

2. 研究の概要

温室の周年利用化、生育適温がより低温の作物の施設栽培化、温暖地域への施設園芸の広まりなどから、温室内気温の高温抑制が重要な課題となっているが、換気はそのための重要な環境制御技術の一つである。一方、温室の大型化に伴って環境の分布が問題化し、近年では気流の重要性がより強く指摘されている。自然換気は、強制換気に比較して省エネルギーかつ低コストな技術であり、自然換気への移行は世界的趨勢ですらある。しかし、自然換気の設計や制御に関する知見は意外と少なく、温室構造の改善や進展にも対応してないことが研究のきっかけであった。幸運にも、現つくば市への移転に当たって農業土木試験場（現農村工学研究所）に建設された大型風洞が利用できることになり、温室の換気窓の風圧係数や流用係数を風洞実験によって算定した。それらのデータを用いて、流れの式と熱収支とを組み合わせシミュレーションを行い、風向・風速などの屋外気象条件や換気窓などの構造条件が換気量と昇温度に及ぼす影響を明らかにした。

一方、自然換気時の気流・気温分布を風洞実験によって検討した。その結果、風力換気時の気流パターンが外気が流入する換気窓の形状に依存し、温度差換気が同時に起こる場合は、屋外風

速が 1~2 m/s 前後で気流パターンが温度差換気の気流パターンから風力換気の気流パターンに移行することなどが明らかとなった。気温分布は気流パターンと一致し、気流が停滞する部分が高温となった。

このような気流・気温分布の解析のために、CFD (computational fluid dynamics, 数値流体計算) の手法を先駆的に応用し、その有効性を示した。当時は FORTRAN 言語でプログラムを作成し、大型計算センターで走らせたが、その後、市販のソフトウェアが PC 上で利用できるようになり、急激に研究に普及した。その黎明期には上記の風洞実験データが検証用として利用されている。トマトのように草丈の高い作物は、作物群落が気流抵抗として影響するので、作物群落が換気・気流特性に及ぼす影響についても、実物温室実験、風洞実験、CFD などを行った。CFD では、風洞実験で算定したトマト群落の抗力係数を入れて計算を行い、換気窓の形状や開放パターンが群落内の通風性に及ぼす影響を明らかにした。

この間、温室の軒高の増大や、屋根開放型温室に見られるように換気窓面積の増大といった改善が現場で進んだが、それらが換気・気流特性に及ぼす影響についても解析した。多連棟温室のような大型温室では側窓の効果は相対的に小さく、天窓に頼ることになるが、天窓の開口部面積が増大すると内外気温差は指数関数的に減少し、床面積に対する天窓の開口部面積の比が 0.4 以上では、昇温抑制の効果は弱まることが明らかになった。また、軒高の増大効果については、屋外風速が 0 m/s の場合、天窓の高さを 1 m 高めると、内外気温差は約 0.5 °C 低下したが、屋外風速が 2 m/s の場合は、天窓の高さ増大の効果は小さかった。

一方、トマト黄化葉巻病を媒介するタバココナジラミなどの侵入抑制のための防虫網の設置は内外で不可欠になりつつある。わが国では、0.4 mm メッシュ程度の防虫網も現在ではめずらしくない。しかし、防虫網の設置は換気も抑制することから、防虫網が換気特性に及ぼす影響を検討した。流量係数が 0.1 の防虫網を換気窓に設置した場合、換気量は網がない場合の 1/3 近くにもなることが明らかとなった。換気量を確保するには、換気窓や防虫網の面積拡大が必要であるが、後者の方法として「蚊帳張り」を検討し、強日射時に室内気温を約 1 °C 低減できることが分かった。

さらに、自然換気と組み合わせた細霧冷房では、VETH 線図 (Ventilation-Evapotranspiration-Temperature-Humidity chart) から予測できるように、冷房能力は細霧の噴霧量と換気量に依存する。屋外湿度が低い半乾燥地の気候下では、換気量が多すぎて室内湿度が低くなりすぎることもあり得る。アリゾナ大学の温室を用いた共同研究で、一定の設定室温の下で、換気量を減少させると湿度が増加し、細霧冷房のための水消費量が減少することを明らかにした。これらの結果に基づいて、気温と湿度を同時に制御する簡易な制御アルゴリズムを考案し、目標の気温 24~25 °C、相対湿度 65~75 % にほぼ制御できることを実証した。細霧の噴霧量は換気窓を最大に開放した場合に比較して 21 % 削減された。制御アルゴリズムは、細霧の噴霧量を気温に基づいて比例制御し、換気窓の開度を相対湿度に基づいて比例制御するというものである。

以上のように、自然換気や自然換気が関係する環境制御技術のいくつかを検討したが、残された課題も少なくない。特に、自然換気に依存する室内の温湿度、気流、CO₂ などが作物生産に及ぼす影響とその最適化は重要であろう。

3. 謝辞

以下、名前を列記して深謝したい。学生時から御指導を賜った、三原義秋博士 (千葉大学名誉教授)、高倉直博士 (東京大学名誉教授)、古在豊樹博士 (千葉大学)、林真紀夫博士 (東海大学)、岡田益己博士 (岩手大学)。共同研究等で御協力いただいた、蔵田憲次博士 (東京大学)、島地英夫氏 (東京都農林総合研究センター)、後藤英司博士 (千葉大学)、富士原和宏博士 (東京大学)、

大橋敬子博士 (玉川大学)。海外で御支援をいただいた, Prof. William J. Roberts (ラトガース大学名誉教授), Dr. David R. Mears (ラトガース大学名誉教授), Dr. Kuan-Chong Ting (イリノイ大学), Dr. Bernard J. Bailey (元シルソー研究所), Dr. Gene A. Giacomelli (アリゾナ大学), 久保田智恵利博士 (アリゾナ大学)。訪問研究員として御協力いただいた, 福田直也博士 (筑波大学), 邱国玉博士 (北京大学), Dr. In-Bok Lee (ソウル大学), Dr. Murat Kacira (アリゾナ大学), 古野伸典博士 (山形県庄内総合支庁), 大森 (鈴木) 雅子氏 (塩谷農業振興事務所), 玉城磨氏 (沖縄県農業研究センター)。最後に, 研究室の先輩・同僚として終始御協力いただいた, 奈良誠博士 (元農業工学研究所), 奥島里美博士 (農村工学研究所), 大谷敏郎博士 (内閣府食品安全委員会), 五十部誠一郎博士 (食品総合研究所), 小綿寿志博士 (東北農業研究センター), 池口厚男博士 (畜産草地研究所), 石井雅久博士 (農村工学研究所), 森山英樹博士 (農村工学研究所)。

文献

- Kacira, M., Sase, S. and Okushima, L., 2004: Optimization of vent configuration by evaluating the greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind induced ventilation. *Trans. of the ASAE*, **47**, 2059-2067.
- Kozai, T., Sase, S. and Nara, M., 1980: A modelling approach to greenhouse ventilation control. *Acta Hortic.*, **106**, 125-136.
- Okushima, L., Sase, S. and Nara, M., 1989: A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. *Acta Hortic.*, **248**, 129-136.
- Okushima, L., Sase, S., Maekawa, T., Ikeguchi, A. and Bailey, B.J., 2000: Temperature distribution in a naturally ventilated Venlo greenhouse with six spans and high eaves: A wind tunnel study. *J. of the Soc. of Agric. Struct., Jpn.*, **30**, 343-352.
- Sase, S., 1989: The effects of plant arrangement on airflow characteristics in a naturally ventilated glasshouse. *Acta Hortic.*, **245**, 429-435.
- 佐瀬勘紀, 2003: 施設の種類と形式, 換気・気流制御 (日本施設園芸協会編「五訂版施設園芸ハンドブック」). 日本施設園芸協会, 26-37, 182-195.
- 佐瀬勘紀, 2003: 換気, 屋根開放型温室 (日本農業気象学会施設園芸研究部会編「施設園芸読本」), <http://phdsamj.ac.affrc.go.jp/>.
- Sase, S., 2006: Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. *Acta Hortic.*, **719**, 313-323.
- Sase, S., 2008: Greenhouse energy and resource use - Cooling in semiarid greenhouses. *Acta Hortic.*, **797**, 299-306.
- Sase, S. and Christianson, L.L., 1990: Screening greenhouses - Some engineering considerations. ASAE Paper No. NABEC 90-201.
- 佐瀬勘紀・奥島里美, 1998: 軒高や天窓面積の増大が温室の自然換気特性に及ぼす影響. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会・日本生物環境調節学会 1998 年度大会講演要旨, 258-259.
- Sase, S., Ishii, M., Ikeguchi, A., Kurata, K., Kubota, C., Yokoi, S., Sabeh, N. and Giacomelli, G.A., 2005: Efficient greenhouse cooling in semiarid climate (I) Fog cooling in combination with natural ventilation in a single-span double-polyethylene greenhouse. Proceedings of International Conference on Research Highlights and Vanguard Technology on Environmental Engineering in Agricultural Systems, CD-ROM (ISSN 1880-2087), 207-210.
- 佐瀬勘紀・古在豊樹・奈良 誠・根岸久雄, 1980: 温室の換気 I. 風洞実験による単棟温室の風圧係数と流量係数の測定. 農業気象, **36**, 3-12.

- Sase, S., Kubota, C., Ishii, M., Kurata, K., Hayashi, M., Moriyama, H., Sabeh, N., Romero, P. and Giacomelli, G.A., 2006: Effect of natural ventilation rate on relative humidity and water use for fog cooling in a semiarid greenhouse. *Acta Hortic.*, **719**, 385-392.
- Sase, S., Suzuki, M. and Okushima, L., 2008: Effect of insect screen configuration on natural ventilation in a single-span glasshouse. *Acta Hortic.*, **801**, 237-243.
- Sase, S., Takakura, T. and Nara, M., 1984: Wind tunnel testing on air flow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Hortic.*, **148**, 329-336.