

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24380136

研究課題名(和文) 太陽光利用型植物工場における「環境制御 - 作物生育」統合モデルの開発

研究課題名(英文) Development of an integrated simulation model by combining environment control with plant growth in a modern greenhouse

研究代表者

後藤 英司 (Goto, Eiji)

千葉大学・園芸学研究科・教授

研究者番号：00186884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：温室建設や環境制御はコストがかかるため、建設前に温室内環境を把握し、栽培に必要な冷暖房量および水使用量の推定をすることが重要である。正確な温室内環境予測と資源量推定を行うためには温室内環境シミュレーションモデルの構築が必要である。そこで本研究では、建物内外の熱収支から室内の気温等を推定できる建築シミュレーション用ソフトウェアのTRNSYSをベースとし、様々な環境制御装置の機能と植物モデルを付加して、温室内環境シミュレーションモデル(栽培環境 - 生育モデル)を開発した。またその応用例として、トマトの周年栽培を想定した温室内環境をシミュレートし、世界各地の都市間で資源・エネルギーの使用量を比較した。

研究成果の概要(英文)：To predict greenhouse environments under given weather conditions, we developed an integrated model for greenhouse climates by using the transient system simulation program (TRNSYS). TRNSYS includes many of the components for thermal and electrical energy systems. We modified and added components that modeled ventilation, shading, heating, evaporation cooling, and evapotranspiration, and calculated the heat energy balance necessary for predicting inside air temp. and humidity. We evaluated the developed model by using a greenhouse and applied the model to greenhouses under various climatic conditions in different countries. We estimated the energy required for heating and/or cooling and CO2 and water in order to control the internal environmental conditions at the targeted values under given weather conditions. The study indicates that the model is an effective tool for making strategic decisions in the installation of greenhouses from the viewpoint of energy and resource application.

研究分野：植物環境工学

キーワード：施設園芸 温室 シミュレーション 暖房 冷房 細霧冷房 熱収支モデル 植物生育モデル

1. 研究開始当初の背景

施設園芸は、先進国のみならず、新興国や発展途上国を含め世界的に普及しつつある。その中でも太陽光型植物工場などの先進的な温室では、自然エネルギーや資源の利活用を目指した冷暖房技術や水利用技術の開発が盛んである。しかし、温室に導入する環境制御技術およびその制御法は、気象条件ごとに異なる。そのため施設の立地条件、気象条件、環境制御のコストなどを考慮したうえで生産量を最大にするための環境制御法は未だ開発されていない。また環境制御下の温室内外の熱収支・水収支および資源使用量を推定する手法も確立されていない。

その解決のために、環境制御モデルとその下で育成する作物の生育モデルを結合して「環境制御-作物生育」統合モデルを作成すれば、任意の気象条件下でのシミュレーションを行うことにより、導入する環境制御技術の成長・収量への効果を評価を行うことが可能になると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、太陽光型植物工場と呼ばれる計画・周年生産を行う温室の国内外での普及促進を目指して、果菜類等を周年安定的に生産する際に求められる環境制御モデルとその下で育成する作物の生育モデルを結合して「環境制御-作物生育」統合モデルを作成する。このモデルは、1) 屋外気象データを用いて制御環境下の施設内環境を推定する環境制御モデル、2) 温室内外環境要因と生育・収量の関係を定式化する作物生育モデル、を結合するもので、任意の気象条件下でのシミュレーションを行うことにより、より好適な環境制御アルゴリズムの構築、および導入する環境制御技術の成長・収量への効果を評価することが可能になる。

3. 研究の方法

本研究では一般建築分野での使用を想定して開発されたシミュレーションソフト「TRNSYS」で温室内外環境シミュレーションモデルを開発する。TRNSYSはモジュール構造の一般建築シミュレーション用ソフトウェアであり、建物内外の熱収支から室内の気温等を推定する。このソフトでは熱収支や湿り空気の計算はモジュール化されており、複雑なモデルを比較的容易に記述することが可能である。このソフトの基本モデルを構成するだけでは温室の機能が足りないために十分なシミュレーションはできない。そこで細霧冷房の計算モジュールや植物の生育状態から蒸散を計算するモジュールを組み込む。

4. 研究成果

初年度は、まず「TRNSYS」で構築したモデ

ルを用いて密閉した温室および自然換気の温室内外環境の推定を試みた。想定する温室として、千葉大学内の単棟温室(ダッチライト型、床面積約 200 m²)を使用した。2012年8-9月に無栽植状態の温室において、換気窓を全閉もしくは全開状態にして温室内外環境を測定し、モデルの検証を行った。換気窓を全閉にした状態での温室内外気温の推定値はおおよそ実測値と一致した。しかし、換気窓を全開にした場合では、換気窓の開口部に防虫ネットが展張されているため、開口面積を補正することにより、実測値と比較的近い推定値が得られた(図1)。

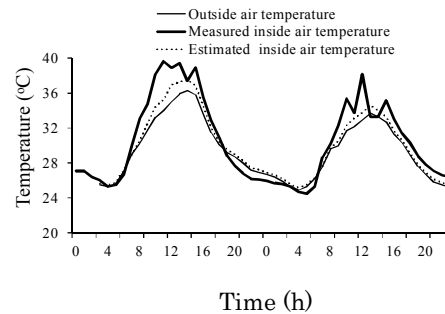


図1 換気窓を全閉にした状態での温室内外気温の推定

つぎに試験温室を用いて、細霧冷房等の冷房、換気、遮光などの制御環境条件下での環境データを収集し、温室の環境制御モデルを構築した。前述の換気窓を全閉もしくは全開状態の条件に加えて、任意の換気率でシミュレートできる計算過程を盛り込み、様々な換気条件を反映するモデルとした。また植物群落の光合成を推定するために必要な群落内外での光分布を推定する過程を組み込んだ。また、群落からの蒸発散を推定するルーチンを組み込んで、温室内外の温湿度推定の入力として使えるようにした(図2)。

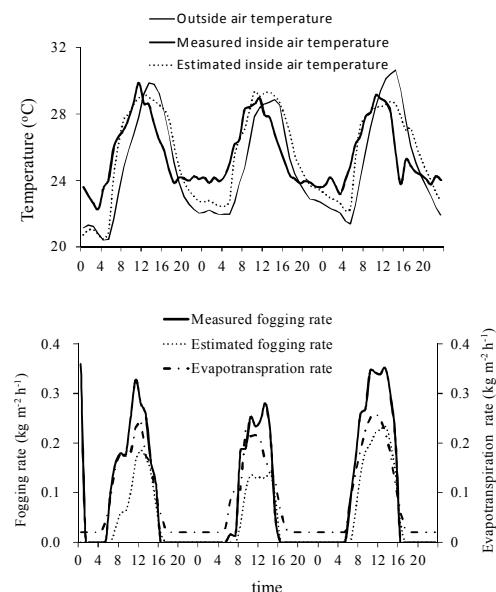
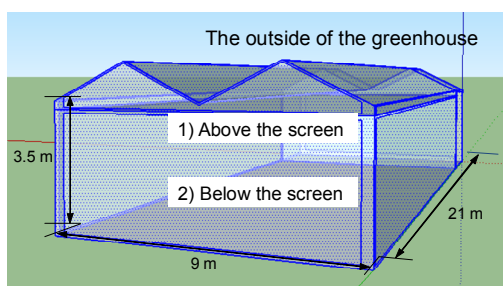


図2 細霧冷房および植物蒸散における内気温の推定および細霧速度・蒸散速度の算定

温室建設や環境制御はコストがかかるため、建設前に温室内環境を把握し、栽培に必要な冷暖房量および水使用量の推定をすることが重要である。正確な温室内環境予測と資源量推定を行うためには温室内環境シミュレーションモデルの構築が必要である。本研究で作成した TRNSYS をベースとし、様々な環境制御装置の機能と植物モデルを付加した温室内環境シミュレーションモデル（栽培環境-生育モデル）の応用例として、トマトの周年栽培を想定した温室内環境をシミュレートし、世界各地の都市間で資源・エネルギーの使用量を比較した。

このモデルでは実際の温室の構造（図3）と、様々な環境制御装置の機能（表1）を再現している。ここでは、暖房能力、ヒートポンプ冷房能力は無制限と仮定した。

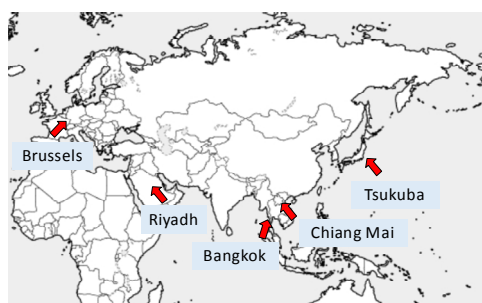


3-D geometry model of the greenhouse

図3 モデル温室の形状

表1 シミュレーションにおける環境制御装置の作動条件の例（トマトの栽培最適環境）

制御装置	稼働時刻	稼働条件 (温室内)
暖房	0-24	15°C以下
換気窓	0-24	25°C以上
細霧冷房	5-18	28°C以上 RH90%以下
ヒートポンプ冷房	18-5	25°C以上



Simulation conditions
 # Greenhouse
 Area: 160 m²
 U value of roof and wall: 5.7 W m⁻² K⁻¹
 # Vegetation
 LAI: 2.0
 # Ventilation
 Natural ventilation using top and side ventilators (open area ratio: 25%)
 # Set-point in summer
 Daytime for fog cooling
 Air temp.: 28 °C
 R.H.: 90 %
 Nighttime for heat pump cooling
 Air temp.: 25 °C
 # Set-point in winter
 Air temp. for heating: 15 °C

図4 シミュレーションの選定都市

世界各地の温室内環境をシミュレートするために、世界166ヶ国、1325ヶ所の気象データを有する気象データベース Meteororm を用いた。本研究では、表1に示す条件下で、1分ごとの温室内環境をシミュレートした。大陸、気候帯ごとに5都市を選定してシミュレーションを行い、都市間で温室内環境と資源使用量を比較した（図4）。

表2 東京（つくば）の月ごとの計算結果

Month	Ambient weather condition				Estimated inside condition		Estimated requirement of energy and resources		
	Solar radiation (kJ/m ² /month)	Air temp. (°C)	R.H. (%)	Wind speed (m/s)	Air temp. (°C)	R.H. (%)	Heating load (kJ/Month)	Cooling load in nighttime (kJ/month)	Water required for fogging (kg/month)
1	22.3E+6	2.0	67	2.2	16.8	31	3.44E+07	0.00E+00	0
2	22.6E+6	2.8	68	2.5	17.1	32	2.75E+07	0.00E+00	0
3	28.9E+6	6.1	69	2.6	17.8	36	1.98E+07	0.00E+00	0
4	29.4E+6	11.8	75	2.8	19.2	50	6.76E+06	0.00E+00	0
5	33.4E+6	16.6	77	2.6	21.5	57	1.33E+06	7.91E+04	115
6	27.8E+6	19.7	83	2.5	23.2	67	9.24E+04	3.81E+05	343
7	29.2E+6	23.6	83	2.2	25.1	76	2.76E+03	1.67E+06	5,306
8	31.4E+6	25.2	82	2.5	25.9	80	0.00E+00	2.62E+06	8,301
9	23.6E+6	21.1	83	2.3	23.9	71	3.10E+04	6.22E+05	1,304
10	21.5E+6	15.2	80	2.1	20.0	61	2.51E+06	0.00E+00	0
11	18.5E+6	9.5	78	2.0	17.9	50	1.25E+07	0.00E+00	0
12	19.2E+6	4.1	73	2.0	16.8	38	2.80E+07	0.00E+00	0
Total							1.33E+08	5.36E+6	15,369

1分ごとの温室内環境をシミュレートしたものを日平均、日積算などを行い、月ごとの結果シートにした例を示す（表2）。冬季は暖房負荷、夏季は日中は細霧冷房の水使用量と夜間の電気ヒートポンプの負荷をリストしている。

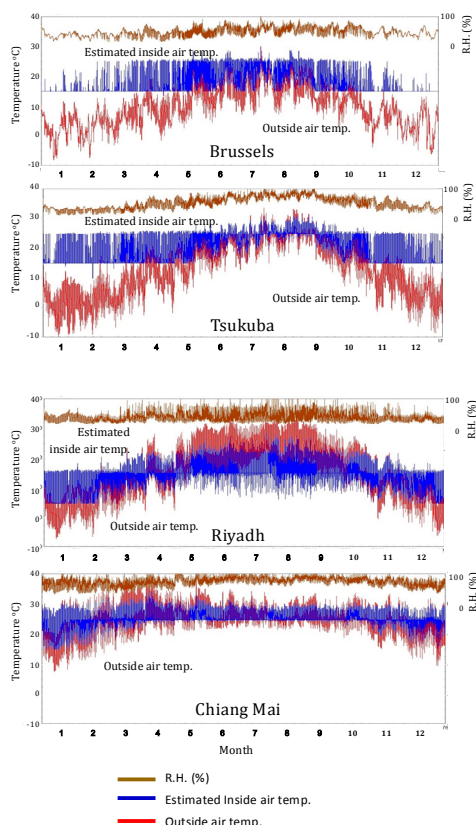


図5 各都市のシミュレーションによる推定温湿度

図5のように図示化すると都市間の同一条件に制御する場合の温湿度の比較が容易になる。

表 3 5都市間の年間必要エネルギーおよび資源使用量の比較

Location	Heating				Cooling	
	Electric heat pump (kWh)	Heavy oil (bunker A) (L)	LPG (m ³)	Woody pellet (kg)	Electric heat pump (kWh)	Water supplied (kg)
Tsukuba	12,297	3,774	1,458	8,680	497	15,369
Brussels	18,494	5,676	2,193	13,055	303	1,330
Riyadh	1,770	359	139	826	6,271	362,380
Chiang Mai	108	33	13	76	4,290	132,939
Bangkok	0	0	0	0	5,869	168,590

表3は都市間の年間必要エネルギーおよび資源使用量を比較したものである。なお、暖房はどの形態の資源を利用するかは地域・国によって異なる。そこで暖房必要エネルギーに燃焼効率を加味して求めて比較した。

このように異なる気候条件の都市間で同一条件でトマトを栽培すると仮定する場合の冷暖房に必要なエネルギーと資源使用量を比較することができる。

同様な方法を用いて、世界150都市についてシミュレーションを行った。表4ではそのうちの7都市の結果を示す。

表 4 各都市の温室外気象条件およびシミュレーション結果の例

都市名	気象データ			推定値		
	年平均気温 (°C)	年間日射量 (MJ m ⁻² year ⁻¹)	年平均相対湿度 (%)	年平均温室温度 (°C)	年間必要エネルギー (MJ year ⁻¹)	年間必要水資源 (m ³ year ⁻¹)
A Jakarta, Indonesia	27.3	6564	83	26.6	0	117996
B Singapore	26.6	5942	84	26.4	0	65116
C Aswan, Egypt	23.8	8566	27	25.2	1801	378250
D Tsukuba, Japan	13.2	4272	77	20.1	48783	13722
E Chengde, China	11.9	5225	63	19	63394	0
F La Paz, Bolivia	7.5	6946	66	18	90244	0
G Yvanovka, Russia	-3.9	3752	71	17.3	312449	1348

シミュレーションしたほとんどの都市において、目標の内気温を維持するためには細霧冷房と暖房の両方が必要であった(データ略)。しかし、赤道付近の一部の都市では暖房が不要であり(表4のA、B)、標高の高い一部の都市では細霧冷房が不要であった(表4のE、F)。よって、これらの地域では建設計画の段階で暖房または細霧冷房が不要と判断可能なため、設備投資を抑えることができる。暖房の稼働によって、内気温は全ての都市で周年15°C以上を維持できた(図6)。しかし、夏季に細霧冷房を使用しても温室内部気温を目標の28°C以下に維持できない都市が多かった(表4のA~D、G)。これは噴霧し

た細霧によって温室内の相対湿度が90%を上回り、細霧冷房が停止したためである。この現象は熱帯地域の都市で周年的にみられた(図6のB)。これは熱帯地域では年間通じて相対湿度が高く、細霧による冷房が難しいことを示唆した。Aswan, EgyptはSingaporeと比べて、年平均気温がほぼ同じであるが、細霧による水使用量が約3.5倍多かった(表4のB、C)。これは砂漠地帯では、日射量が多いため、昼間の気温が高く、また、相対湿度が低いため、より長時間、細霧冷房が稼働したためと考えられる。

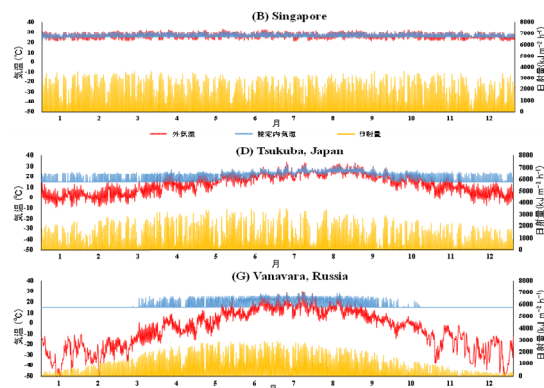


図 6 Singapore (B) と Tsukuba, Japan (D) と Yvanovka, Russia (G) のシミュレーション結果

以上より、温室内環境および環境制御下の資源・エネルギーの使用量の推定には、本シミュレーションモデルが有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① E. Goto, Y. Ishigami, L. Okushima. (2016). Development of a greenhouse simulation model to estimate energy and resources necessary for environmental controls under various climate conditions. *Acta Hort.* (in press) (査読有)

② Ishigami, Y., Goto, E., Watanabe, M., Takahashi, T., Okushima, L. (2014). Development of a simulation model to evaluate environmental controls in a tomato greenhouse. *Acta Hort.* 1037, 93-98 (査読有)

DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.7
<http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.7>

[学会発表] (計7件)

① 奥島里美, 後藤英司, 石神靖弘, 安田雄市,

高倉 直. TRNSYS 単純温室モデルによる暖冷房エネルギーのシミュレーション (農業環境工学関連 5 学会 2015 年合同大会、2015 年 9 月 16 日、岩手大学)

②E. Goto, Y. Ishigami and M. Watanabe, L. Okushima. Development of a Greenhouse Simulation Model to Estimate Energy and Resources Necessary for Environmental Controls under Various Climate Conditions. (2015 年 7 月 22 日、国際園芸学会 GreenSys2015、ポルトガルエボラ市)

③石神靖弘、渡辺賢、後藤英司、奥島里美. TRNSYS を用いた温室環境シミュレーション-換気窓制御アルゴリズム等の組み込み-日本農業気象学会 2014 年大会、2014 年 3 月 17 日、北海道大学)

④Eiji Goto, Yasuhiro Ishigami, Masaru Watanabe, Taro Takahashi, Limi Okushima. Development of a Simulation Model to Evaluate Environmental Controls in a Tomato Greenhouse. (2013 年 10 月 7 日、国際園芸学会 GreenSys2013、韓国チェジュ市)

⑤ 渡辺賢・石神靖弘・後藤英司・奥島里美. TRNSYS を用いた温室環境および作物生育の統合モデルの開発 - 群落光合成モデルの組み込み - (日本生物環境工学会 2013 年大会、2013 年 9 月 3 日、香川大学)

⑥石神靖弘、渡辺賢、後藤英司、奥島里美. TRNSYS を用いた温室環境シミュレーション (日本農業気象学会 2013 年大会、2013 年 3 月 27 日 石川県立大学)

⑦石神靖弘、小林尚輝、後藤英司. 赤外線カットフィルムによる遮光がトマトの光合成・蒸散に及ぼす影響 (日本生物環境工学会 2012 年大会、2012 年 9 月 5 日、東京大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 英司 (Goto, Eiji)
千葉大学大学院園芸学研究科・教授
研究者番号：00186884

(2) 研究分担者

彦坂 晶子 (Hikosaka, Shoko)
千葉大学大学院園芸学研究科・准教授
研究者番号：50345188

石神 靖弘 (Ishigami, Yasuhiro)
千葉大学大学院園芸学研究科・助教
研究者番号：50361415

奥島 里美 (Okushima, Limi)

独立行政法人農業・食品産業技術総合
研究機構 農村工学研究所・上席研究員
研究者番号：10373226