

シミュレーションのためのみどりのカーテンモジュールの開発

奥島里美*・高倉 直**

〔キーワード〕: ニガウリ, TRNSYS

はじめに

植物を含む温室のダイナミックシミュレーションは 1970 年代に始まり (Takakura ら 1971), その後数多くのシミュレーションモデルが開発された。しかし, いずれもそれぞれが独自に開発されたものであり, 使用言語も一般的な FORTRAN が主であり, モデルの細かい内容は開発者にしかわからない状態であった。そのため, 開発されたモデルを拡張させたり, 一般化させたりするようなことは出来なかった (Takakura ら 1985)。

そのような機運がないわけではなかった。それまでに開発された主要な 3 つのモデルの比較検討が行われた (van Bavel ら 1985)。しかし, 使用言語の制約もあり, 一般化するのは無理であった。ほぼ同じ頃に建築学分野では TRNSYS に代表されるような, 一般化が行われていた。すなわち, モデルをモジュール化して組み立てることで, 多様なモデルも同じ手法で, モジュールを組み替えることで, 進化させることも可能である。そのため, 他の人が作ったモデルを土台にして新たなモデルを作ることも容易に出来る。モジュールには基本的なものから, 各種の応用面でのものが数多くすでにあり, 利用者が共有できるし, TRNSYS User Group に登録すると, 毎日のように各モジュールに関する質問や回答やコメントが世界中から届くようになっている (TRNSYS-users <trnsys-users@lists.onebuilding.org>).

夏の節電対策や CO₂ 削減, 都市のヒートアイランド防止につながるものとして, 屋上緑化 (Takakura ら 2000, 高倉 2010) やみどりのカーテンを設置する取り組みが行なわれるようになってきた (三坂ら 2012, 関西電力 2012)。さらに, 東日本大震災とそれに伴う原子力発電所の事故により, 今後は電力需要, 特に夏場の電力消費を大幅に削減することが必須となり, 再生可能な自然エネルギー利用だけでなく, みどりを利用した冷房負荷軽減も重要なテーマ

となっている。

みどりのカーテンの夏場の冷房負荷軽減効果を把握する圃場実験を行ない, 植物 (ニガウリ) であれ人工物 (よしず) であれ, 蒸散量あるいは蒸発量が冷却効果をもたらすことを明らかにした (奥島ら 2014)。みどりのカーテンの効果的な配置を計画する上では, 夏場に大きく変動する気象条件や冷房負荷, 建物形状とみどりのカーテンの相互関係を考慮した動的な熱解析が望まれる。

すでに述べたように, 建物の熱・エネルギーの動的解析ツールの 1 つとして TRNSYS がある。TRNSYS はウィスコンシン大学の SEL (Solar Energy Laboratory) で 1970 年代に開発が開始された。カーネル部分として収束までの反復計算を行うエンジンとそれらを取り扱い易くまとめたコンポーネントライブラリがモジュール化されて提供されている。このモジュールを GUI で接続することで解析実行できる。また, 他のアプリケーションとの連携やアドオン等の拡張機能を備えている。建築物の空調やエネルギー機器の熱・エネルギー解析について一通りのことができるようになっている。ただ, 植物に関するモジュールは提供されていない。

そこで, みどりのカーテンによる建築物の冷却効果の動的解析を行なうために必要不可欠な植物モジュールとして蒸散に基づく葉温計算モジュールを開発したので, 紹介したい (奥島ら 2013)。

解析及び実験方法

1. 葉温の算出方法

みどりのカーテン付近の熱収支を図 1 に示す。

この系で, 中心となるのは葉温であり, その時間変化は書きの方程式で表される。

$$\frac{dT_p}{dt} = [S_a(1 - r_g) + S_s(1 - r_s) + L_a - 2L_i + L_g - LAI((E_i + E_0)l + 3.6(Q_0 + Q_i))]/C_p/Z_p \quad (1)$$

*農研機構農村工学研究部門 (Limi Okushima)

**東京大学・長崎大学名誉教授 (Tadashi Takakura)

ここで、

dT_p : 葉温 (°C)

S_d, S_s : 直達, 散乱日射量 (W/m²)

r_g, r_s : 直達, 散乱日射の反射率

$L_a = \epsilon_p \sigma (T_o + 273)^4$: 外気の放射熱量 (W/m²)

$L_p = \epsilon_p \sigma (T_p + 273)^4$: 植物の放射熱量 (W/m²)

$L_g = \epsilon_p \sigma \epsilon_g (T_g + 273)^4$: ガラスの放射熱量 (W/m²)

ϵ_p : 植物体の放射率

ϵ_g : 植物体の放射率

LAI : 葉面積指数

T_o : 外気温 (°C)

T_i : 建屋側の気温 (°C)

T_g : ガラス面の温度 (°C)

$E_o = K_{mo}(W_o - \beta_o W_p)$: 外気側の蒸散量 (kg/m²)

$E_i = K_{mi}(W_o - \beta_i W_p)$: 建屋側の蒸散量 (kg/m²)

l : 気化熱, 2501 (kJ/kg)

$Q_o = h_o(T_p - T_o)$: 外側の対流伝熱量 (W/m²)

$Q_o = h_o(T_o - T_i)$: 内側の対流伝熱量 (W/m²)

$h_o = 2.8 + 1.2 \times V_o$: 外気側での対流伝熱係数 (W/m²/°C)

$h_i = 2.8 + 1.2 \times V_i$: 建屋側での対流伝熱係数 (W/m²/°C)

V_o : 外気側での気流速 (m/s)

$V_i = V_o/2LAI$: 建屋側での気流速 (m/s)

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$: シュテファン-ボルツマン定数 (W/m²/K⁴)

$K_{mo} = 3.6 \times h_o \rho / C_a / L_e$: 気孔抵抗係数

$K_{mi} = 3.6 \times h_i \rho / C_a / L_e$

$C_a = 1.164$

$L_e = 0.9$

ρ : 空気の密度 0.9 (kg/m³)

β_o : 外気側での気孔と境界層抵抗 (s/m)

β_i : 建屋側での気孔と境界層抵抗 (s/m)

C_p : 比熱 (kJ/m³/°C)

z_p : 植物体の厚み (m)

2. モジュール化方法

モジュールの中心は式 (1) であるが、モジュール化には入力変数, 出力変数, パラメータを分ける必要がある。式 (1) で、入力変数は T_o (°C), T_g (°C), V_o (m/s), W_o (kg/m²), W_p (kg/m²), S_d (kg/m²), S_s (kg/m²) であり、出力変数は T_p (°C) である。入力変数はすべて他のモジュールからえられるもの

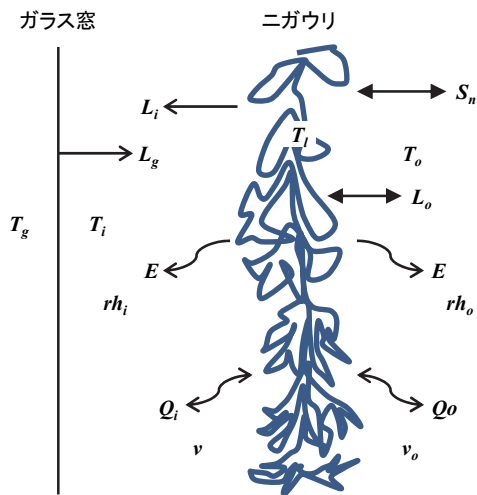


図1 ニガウリの熱収支を構成する各環境要因

表1 パラメータ

r_g		0.2
r_s		0.2
ϵ_p		0.95
ϵ_g		0.95
LAI		2.0
β_i		0.9
β_o		0.9
z_p	m	0.01
L_e		0.9

であり、出力変数はこれをプロッターモジュールなどに接続することで、グラフなどの出力がえられる。今回使用したパラメータの一覧を表1に示す。中心となる式 (1) は、ルングクッタ法により解を求めるプログラムを IntelFORTARN により作成し (牛島 2007, 黒瀬ら 1998), Type246 としてモジュール化した。

TRNSYS では、GUI があり、図2に示されているように、コンピュータ画面上で、各モジュールを配置して、情報の流れを示す線で結ぶ。開発した植物モジュールは Type246 として示されている。図2に示されているのが、今回の建物全体のモデルである。ここで、各モジュールをつないでいる線は情報の伝達を意味し、詳しい内容は線をクリックすることで調べることが出来る。Type15-6 は気象データが格納されているモジュールであり、気象データはあらか

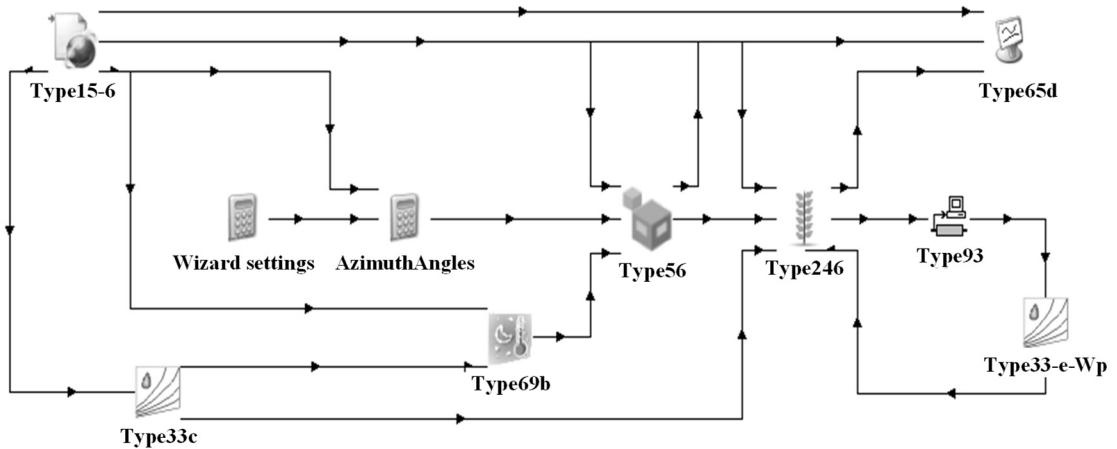


図2 モジュールの接続

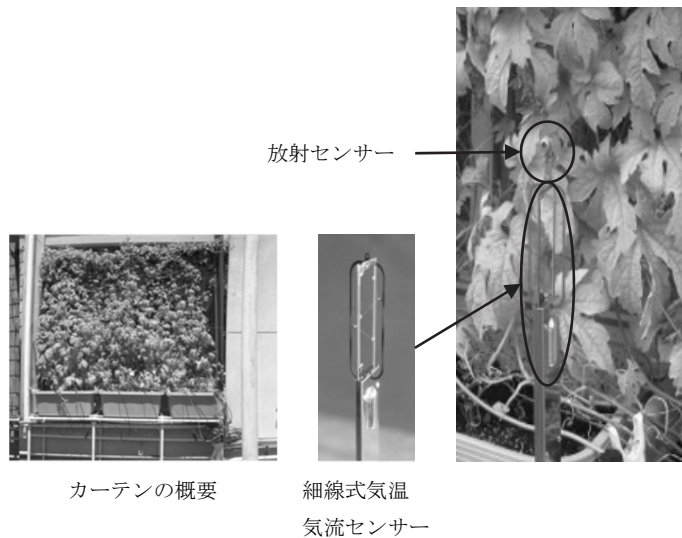


図3 みどりのカーテン(ニガウリ)の様子と放射温度センサーおよび湿度センサー付きの細線式気温気流センサー

はじめ組み込まれている各地の気象データを用いることも出来るが、観測値を読み込むことも出来る。Type56 は建物の熱収支計算，Type93 は過去のデータを保管しておくモジュール（1ステップ前の時間の葉温 T_p を保管），Type33e-Wpは1ステップ前の時間の葉温から飽和絶対湿度を計算（Type246で用いる蒸散量 E_i ， E_o を計算するため），Type33-cは露点温度の計算（天空温度の計算に使用するため），Type69bは天空温度の計算のモジュールである。結果はType65dによりプロッター形式で出力される。

TRNSYS上で、パラメータはType246のパラメー

タ入力画面にて任意に設定し、入力変数は他のモジュールの出力変数と配線することにより入力される。

3. 現状との比較

現状との比較を行うために、2012年8月5日～7日に農工研農業施設研究棟（つくば市）の1階南側にあるガラス窓において、ニガウリ（*Momordica charantia* L.）（品種：あばし）のみどりのカーテンを設置し（図3）、気温、日射、ニガウリの葉温を測定した。気温と葉温の測定には長波放射センサーおよ

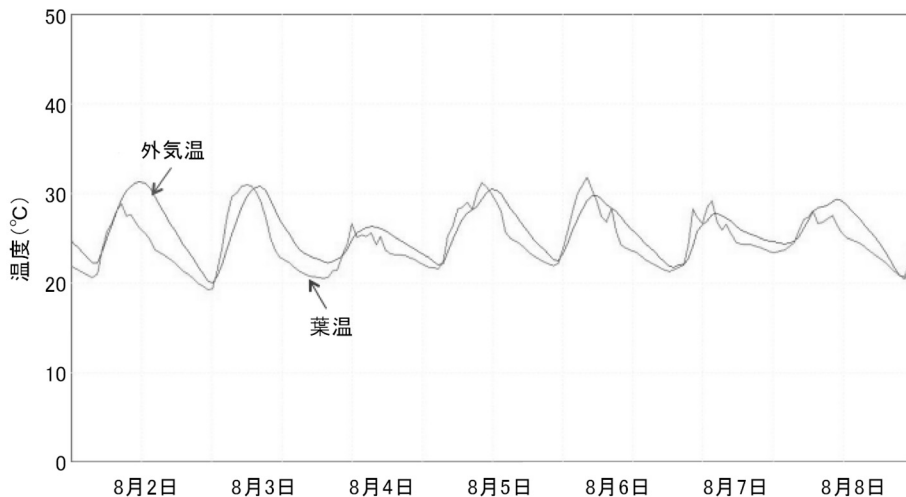


図4 葉温の試算例

び湿度センサー付きの細線式気温気流センサー（佐瀬ら 2013）を用いた。日射計は通常のものを用いた。ニガウリの葉面積指数は2.8であった。

結果

1. 試算例

建物は長さ5m(南北方向)および4m(東西方向)、高さ3mで南面に幅3m×高さ2mのガラス窓があり、ガラス面に入射する日射量の50%は緑のカーテンにより日除けされると想定した。8月2～8日の葉温を図4に示す。葉温は外気温よりも低い傾向にあり、蒸散効果を再現していることを示唆する結果が得られている。

2. 実測との比較

(1) 昼間葉温の比較

対流伝熱係数は風速の関数であるが、様々な関数式や係数が提案されている(Takakura 1993)。表2に示す3つの提案式によるTRNSYSでの計算値(Case 1～3)と実測値の比較を図5に示す。葉温の計算値(Case 1)は実測値よりも全体的に小さかった。外気温での対流伝熱係数を用いた場合(Case2)はCase1よりも葉温が高くなった。

また、Case 3もCase 1より葉温が高くなる傾向が見られた。このように、対流伝熱係数や気孔抵抗係数の設定を変えることにより葉温計算値に数°Cの違いが生じたことから、みどりのカーテンの種類や

表2 計算ケース

Case 1	$h_{i,o} = 2.8 + 1.2 \times V_{i,o}$	$Km_{i,o} = 3.6$
Case 2	$h_{i,o} = 2.8 + 1.2 \times V_{i,o}$	$Km_{i,o} = 1.8$
Case 3	$h_{i,o} = 3.85 + 1.2 \times V_{i,o}^{0.8}$	$Km_{i,o} = 3.6$

条件によって適切な係数の設定が重要であると考えられる。Case 1～3のなかでは、昼間の葉温はCase 2が比較的実測に近い値であった。

(2) 夜間葉温の比較

一方、夜間の葉温はどの計算でも外気温よりもガラス面温度よりも低くなった。実測では夜間の葉温はガラス面温度と外気温の間にあり、妥当な値と考えられる。実際には気孔抵抗は光の影響も受けることから(Takakura 1993)、日射が200W/m²以下になった場合は気孔抵抗が1/8に低下するとした光関数を導入した。光関数を導入した結果と導入なしの結果を図6に示す。この光関数の導入により夜間の葉温に関して改善が見られた。

3. みどりのカーテンによる冷房負荷の算出

蒸散がある場合とない場合で、室内への顕熱量を計算しているの、それを示す(図7)。

今回は、モジュールの作成が主目的であり、実測値との比較は試験的なもので、パラメータの設定などを現状と一致させることで実測値との違いは小さく出来ると考えている。

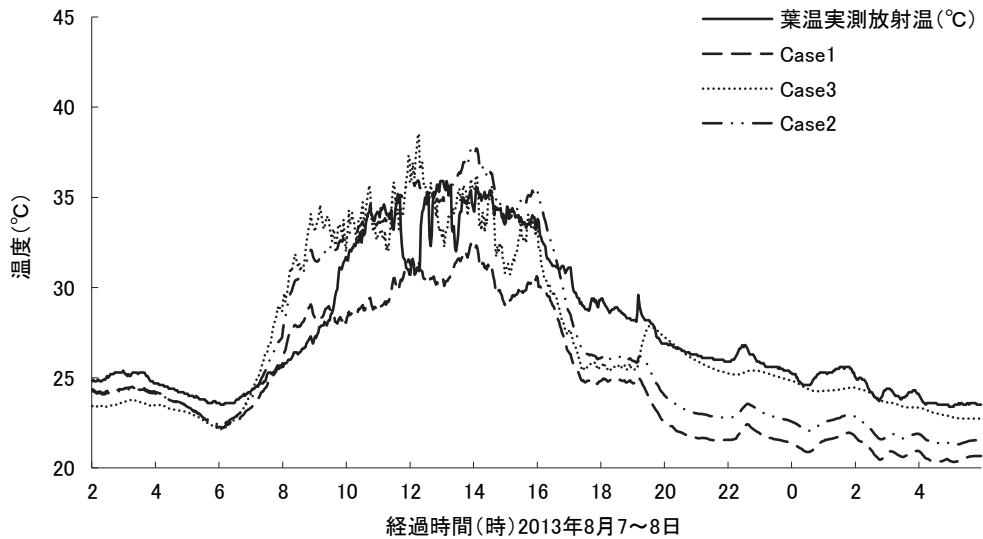


図5 葉温の計算値と実測値の比較

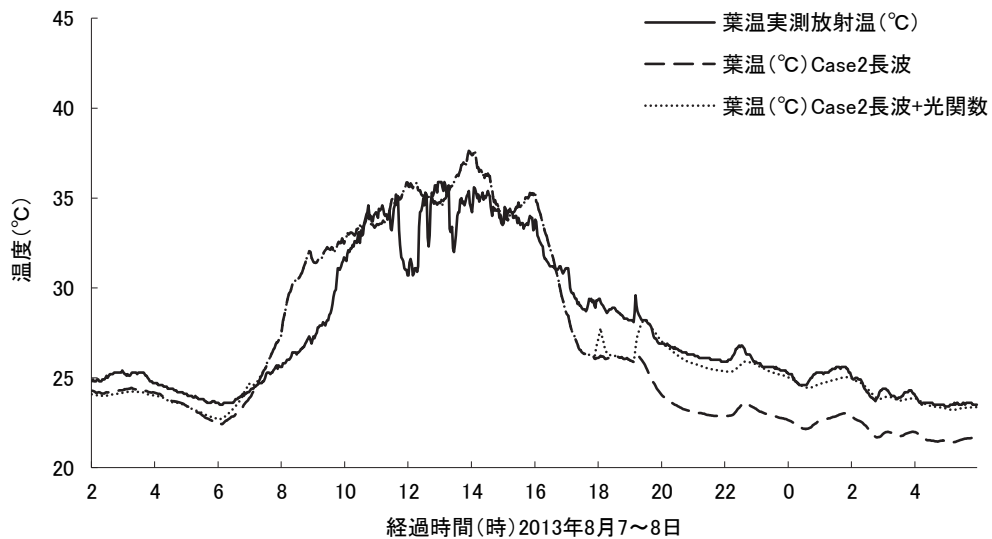


図6 光関数の有無

謝辞

本研究は、(財)新技術開発財団の植物研究助成(みどりを最大限に活用した住宅の省エネルギー方式の動的解析と評価)により実施した。

引用文献

牛島 省 2007. 数値計算のための Fortran 90/95 プログラ

ミング入門. 森北出版. 244pp.

奥島里美, 海保 昭, 石井雅久, 森山英樹, 佐瀬勘紀, 高倉 直 2014. グリーンカーテンによる冷却効果の比較解析. 生物と気象 14 : 10-17.

奥島里美, 安田雄市, 松元良枝, 高倉 直 2013. TRNSYS 植物モジュールの開発. 農業気象学会 2013 年全国大会.

三坂育正, 鈴木弘孝, 藤崎健一郎, 成田健一, 田代順孝 2012. 壁面緑化の蒸散効果に関する研究. http://leo.nit.ac.jp/~narita/profile/paper/2005CEIS_wallgreen.pdf#search=%E8%91%89+%E8%92%B8%E6%95%A3%E9%87%8F

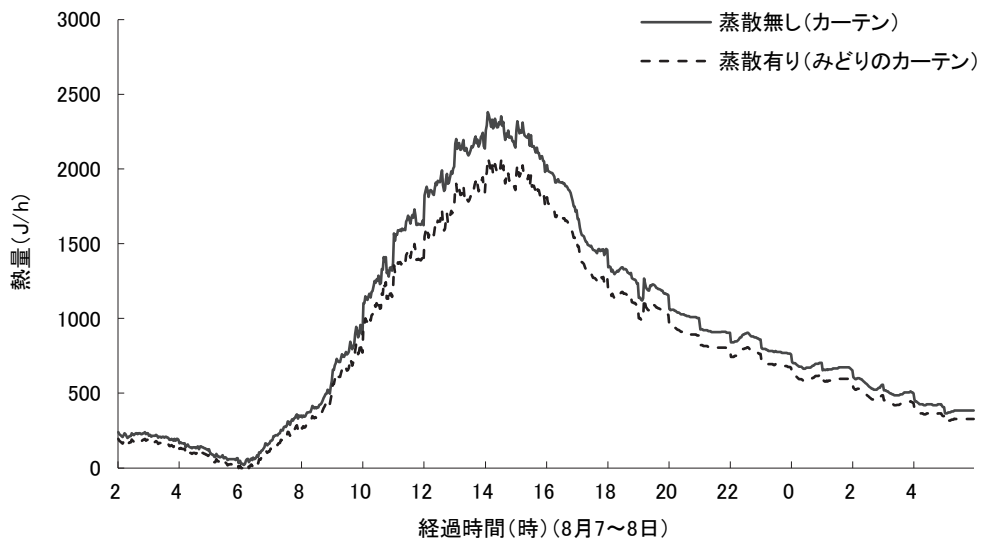


図7 建物内への顕熱量の違い (2m×3mの窓全体)

関西電力 2012. 環境への取り組み, グリーンカーテン.

<http://www1.kepc.co.jp/kankyou/greencurtain/index.html>

黒瀬能事, 松島勇雄, 松尾俊彦 1998. Fortran90のためのサブルーチンライブラリ: 数値計算, 統計計算, 3次元CGライブラリ. 森北出版. 228pp.

佐瀬勘紀, 奥島里美, 海保 昭 2012. 気温気流測定器. 特許出願 2012-031049, 出願人: 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構, 有限会社グリテック.

Takakura, T., Jordan, K.A. and Boyd, L.L., 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. Trans. ASAE 14: 964-971.

Takakura, T., Kurata, K. and Honjo, T., 1985. Physical models and the greenhouse climate. Acta Hort. 174: 97-104.

Takakura, T., 1993. Climate Under Cover. Digital Dynamic

Simulation in Plant Bio-Engineering. Kluwer Academic Publishers. 155pp.

Takakura, T., Kitade, S., and Goto, E., 2000. Cooling effect of greenery cover over a building. Energy and Buildings 31: 1-6.

高倉 直 2010. 屋上緑化の盲点. 農業及び園芸 85: 1205-1208.

Van Bavel, C.H.M., Takakura, T. and Bot, G.P.A. 1985. Global comparison of three greenhouse climate models. Acta Hort. 174: 21-33.

本稿に関する問い合わせはこちらまで

E-mail: takakura@nagasaki-u.ac.jp