

コロニー型宇宙農場を目指す準閉鎖生態系のシミュレーションモデル

東京農工大学 佐藤歩(院)、都木恭一郎

Simulation Model of Semi-Closed Ecological System for Colony Type Space Plantation

Ayumi Sato and Kyoichiro Toki

Tokyo University of Agriculture and Technology 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo 184-8588

E-Mail: 50006643302@st.tuat.ac.jp

Abstract: This paper presents the modeling of a semi-closed ecological system for future colony type space plantation incorporating heat balance and growth curve. The environment such as air composition, pressure, gravity and sunshine/shade cycle is presently set similar to those on the earth. The plants growth is taken as a function of temperature, especially for the translocation rate of dry matter from vegetative organs to panicle. According to this program, 1) plants growth is dependent on the value of modulus in growth curve, 2) for more suitable environment for plants, more delicate control of temperature is needed.

Key words; Space Plantation, Semi-Closed Ecological System, Simulation Model

1. コロニー型宇宙農場について

将来、宇宙への長期滞在や居住を実現させるには、宇宙ステーションや基地内で地球と同様に食糧・物資生産を行い、地球に頼らずに自給自足が可能な技術が必要である。そのために、「宇宙で食糧を生産する施設」=「宇宙農場」が検討されている。

コロニー型の宇宙農場は、月面や惑星上の施設ではなく、宇宙空間に孤立している。そのため、閉鎖生態系としてその内部で完結した物質循環を中長期的に持続できなければならない。

本研究ではこのコロニー型宇宙農場(閉鎖生態系内)における、食糧としての植物生産を目標とし、植物の生長・物質循環のシミュレーションモデルを作成することによって、この持続が可能であるか否かを検討することを目的としている。

現段階では、植物生長の複雑な過程を少しずつ組み込み、農場の規模や環境制御による植物生長のシミュレーション検討を行っている。

これまで、農場の温度環境状態、植物生長シミュレーション結果などを報告してきたが、¹⁾本報告では、生長曲線の係数調整や、Penman-Monteith法と植物の含水率を用いた水収支モデルの導入、及びそのシミュレーション結果について報告する。

2. モデルの概要

本モデルの流れを Fig.1 に示す。構造モデル、熱モデル、大気モデル、水収支モデルから、農場内の環境値を算出し、これらから得られた値を植物生長枯死モデルに出力し、イネの種子 生長 収穫 枯死までを数値的にシミュレーションするものである。このモデルを C 言語プログラムで記述し、解析を行った。

宇宙農場の構造と環境

宇宙農場の概略図を Fig. 2 に示す。外半径 r_0 [m] の円の内側壁面に深さ $Dep=1$ m、農場面積 $A_{plant}=2r_0h$ [m²]の土壌において植物を栽培するとした。

また、外部構造体の素材は主にガラス(仮に透過率 100%と置く)と鋼であると仮定した。

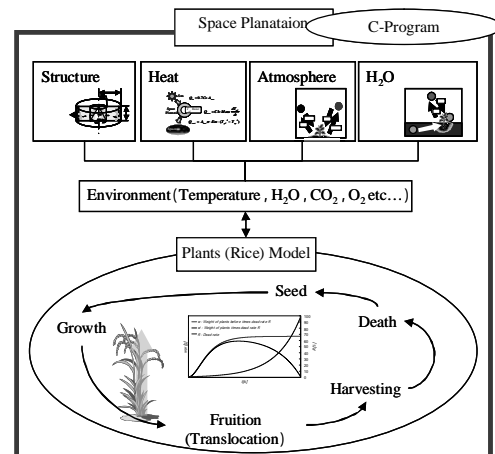


Fig.1 System Flow of Space Plantation Program

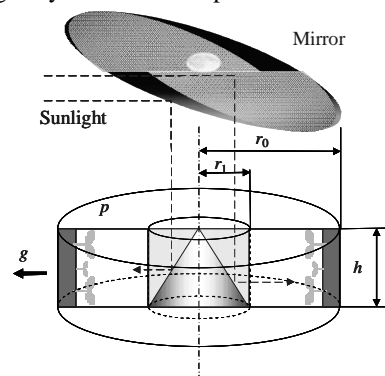


Fig. 2 Schematic of Space Plantation

本モデルでは、イネを栽培することを前提とし、可能な限り地球上と同じ環境（重力加速度 g [m/s²]、大気組成、大気圧 p [Pa]、日照/日陰周期等）を再現するものとしている。

熱モデル

簡単のため植物の生長量は農場温度 T_{pl} [K]のみに依存するとした。

入射熱 Q_{in} [W/m²]は太陽からの入射熱量(太陽定数) $C_s = 1395$ W/m²に農場表面の熱吸収率[0.7]と太陽入射面積 $A_{sun} = r_1^2$ [m²]を乗じ、式(1)で与えた。

$$Q_{in} = 0.7C_s \cdot A_{sun} \quad (1)$$

また、農場表面からのふく射で排出される熱 Q_{out} [W/m²]と農場の温度上昇に用いられる熱 Q_{use} [W/m²]を次の式(2)で与えた。

$$Q_{out} + Q_{use} = A_{sur} \sigma \cdot Em \cdot (T_{pl}^4 - T_{sp}^4) + Ch \cdot Mass \frac{dT_{pl}}{dt} \quad (2)$$

式(1)、(2)が等しくなるとして与えられる微分方程式から T_{pl} が求められる。

最大排熱面積は上底面と側面 $A_{shade} [2(r_0^2 - r_1^2) + 2hr_0]$ [m²]、ステファンボルツマン定数 $= 5.699 \times 10^{-8}$ W/(m² · K⁴)、外宇宙温度 T_{sp} [K]、農場比熱 Ch [J/(K · kg)]、農場総質量 $Mass$ [kg]、微小時間あたりの温度上昇 dT_{pl}/dt [K/s]とし、ふく射率 Em [-]は排熱ルーバの開閉により変化する。

大気モデル

植物は光合成や呼吸によって、周囲の大気と O₂、CO₂を交換している。各ガス濃度は、単位時間あたりの生長質量 dW_{pl}/dt [kg/(s · m²)]が光合成反応式の生成物 C₆H₁₂O₆であるとし、物質比によって増減するものとした。

水収支モデル

植物は、自体が含水率を保っている。また、光合成と同時に主に個体温度維持のために蒸散を行い、温度によって農場内の水蒸気圧は変化する。

各々の量は、Penman-Monteith法を用いて蒸散を、生長や温度・気温に伴う植物含水率の変化より植物内水分を、これら二つと農場内全水分と温度における凝縮から土壌中の水分を算出するものとした。

植物の生長 - 枯死モデル

生長モデルは生存植物重量 W_{pl} [kg/m²]を生長曲線の一つである Mitscherlich-Bertalanffy 曲線(式(3))であらわす。

$$\frac{dW_{pl}}{dt} = 3\lambda W \left(\left(\frac{W_{pl}}{W} \right)^{2/3} - \frac{W_{pl}}{W} \right) \quad (3)$$

W 、は係数であり、これを T_{pl} の関数にすることにより生長が温度によって変化するものとした。

式(4)再転流速度 Rt [kg/day · m²]で与える時刻 t [s]におけるイネの穂の重量 W_{ear} [kg/m²]が基準値を超えた時点で生長を終了し、生長曲線の一つである Gompertz 曲線(式(5))により死亡率 Rd [-]をあたえ枯死のモデルとした(式(6))。

$$W_{ear}^t = W_{ear}^{t-1} + Rt \cdot dt \quad (4)$$

$$Rd = R_0 e^{at} \quad (5)$$

$$W_{pl}^t = W_{pl}^i (1 - Rd^i \cdot dt) \quad (6)$$

R_0 、は死亡曲線の係数で枯死期間によって適当な数値を与えた。

W_{pl} と T_{pl} は与えられた微分方程式を用いて線形化(式(7))した。 f は各関数とする。

$$f^t = f^{t-1} + \left(\frac{df}{dt} \right)_{t=t-1} dt \quad (7)$$

シミュレーションプログラム

プログラムは、時刻 t [s]を 60 秒ずつステップさせ、各ステップでは日照状態 ルーバ開閉 T_{pl} W_{pl} 各ガス濃度 C_{gas} [kg/m²]の順に計算を行い、植物の生存に必要な不可欠な CO₂、H₂O、O₂ 濃度 (C_{co2} [kg/m²]、 C_{h2o} [kg/m²]、 C_{o2} [kg/m²])が 0 以上である限り、生存植物重量 W_{pl} が初期種子重量と同重量に枯死するまで繰り返した。

3. 解析結果と考察

生長曲線の係数

生長曲線はその係数により様々に形状が変化する。生長 枯死の 1 サイクル終了後の、生存植物質量を初期値に与えて、2 サイクル目の解析を行った。(Fig. 3(a))しかし、このとき設定した係数では、イネモデルの生長期間が 56 日と、通常のイネに比べて早すぎる結果が得られた。発芽から 2 ヶ月足らずでイネが収穫可能というのは、最速生長に近いと推測される。

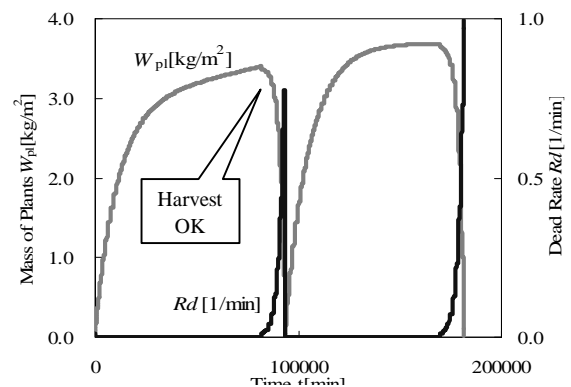


Fig. 3(a) Before the Adjustment of Modules

そこで、より実際の稲作に即した結果を得るために、時定数である の係数調整を行なった。その結果 Fig. 3(b)に示すとおり、生長期間が約 2.5 倍に伸び、植物の生長曲線の特徴である S 字型が得られた。また、再転流時の実りの質量は直線的に増加する。

水収支モデルの結果

Fig.3(b)の生長曲線と同時に得られた、水収支モデルの結果を Fig. 4 に示す。

植物内 H_2O 質量 W_{H_2Op} [kg]は、植物の生長にともなった変化をしており、常に一定の含水率が保たれていることがわかる。

また、土壌内 H_2O 質量 W_{H_2Op} [kg]においては、植物が多く生長する時に、土壌内の水分が多く消費されていることがわかる。

大気内 H_2O 質量 W_{H_2Oa} [kg]は農場の温度上昇と植物の蒸散にともない上昇し、一定の値(湿度 100%、このとき温度一定)になる。

このため、農場の温度下降 温度上昇をより急激に与えることによって、湿度 100%を回避できるような排熱ルーバの開閉設定や、農場の規模や材質変化による比熱調整を行うことが必要であると考えられる。

4. 結論

今回得られた結果により、生長曲線係数、温度と H_2O 質量に関して次の結論が得られた。

1) 生長曲線係数

生長曲線係数の調整によって、本モデルがあらゆる植物の生長に適用可能であると考えられる。

2) 温度制御と H_2O 質量

土壌 H_2O 変化は、全体量の 1%程度であり、現モデルにおいて植物の生長に支障のない土壌及び土壌水分が確保されていると考えられる。

大気 H_2O については、蒸散が植物の個体温度維持を担っていることを考えると、湿度 100%という状態が長く続くことは植物の生存・生長を阻害すると思われる。そのため、排熱ルーバ開閉設定や農場規模や材質変化による比熱調整によって、1K/hour 単位での温度変化を与えることが必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤歩, 都木恭一郎: スペースコロニー型宇宙農場の概念設計検討, 日本マイクロ重力応用学会誌, 第 24 巻, 第 4 号(2007) pp.330-334 .
- 2) 東博紀, 岡太郎: 植物の成長と茎内流量を考慮

した蒸発散モデル, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号 (2002) , pp.735-744 .

- 3) 篠崎吉郎: 生長の理論, 数理科学, 第 15 巻, 第 169 号 (1977) pp.54-61 .
- 4) 楊重法, 井上直人, 藤田かおり, 加藤昌和, 萩原素之: イネ登熟前期の再転流速度に及ぼす気温の影響のモデル化, 日本作物学会記事, 第 74 巻, 第 1 号 (2005) , pp.65-71 .
- 5) 井尻憲一: 老化と死, 数理科学, 第 15 巻, 第 169 号 (1977) pp.62-71 .

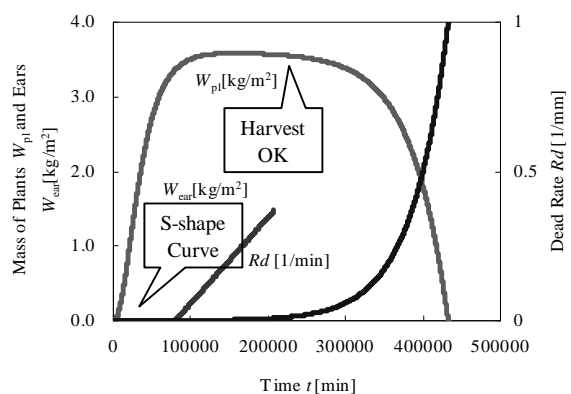


Fig. 3 (b) After the Adjustment of Modules

Fig. 3 Relationships between Mass of Plants W_p , Dead Rate R_d and Time t

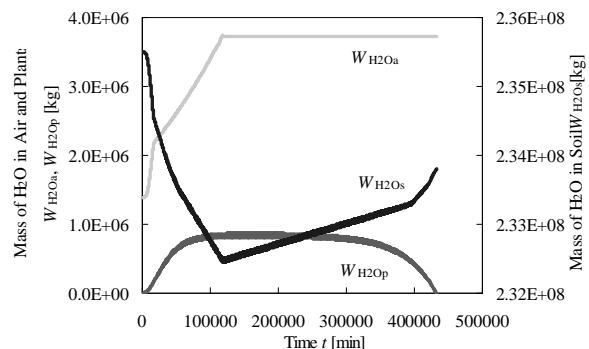


Fig. 4 Relationships between Mass of H_2O in Air, Plants and Soil W_{H_2Oa} , W_{H_2Op} , W_{H_2Os} and Time t