

||||| 特集：宇宙に生きる—基礎から応用まで— |||||  
(原著論文)

## スペースコロニー型宇宙農場の概念設計検討

佐藤 歩<sup>1</sup>・都木 恭一郎<sup>2</sup>

### Study of Conceptual Design for Space Colony Type Space Plantation

Ayumi SATO<sup>1</sup> and Kyoichiro TOKI<sup>2</sup>

#### Abstract

This paper presents the modeling of a semi-closed system for space colony type space plantation incorporating heat balance and growth curve (Mitscherlich-Bertalanffy curve). In this model, environments such as atmospheric composition, pressure, gravity and day/night cycle are assumed to be the same as on the earth. The plants growth is taken as a function of temperature, and the harvest would be gathered when the ear weight computed with translocation rate of dry matter from vegetative organs to panicle reaches a regulated value. Under these conditions, a simulation program was coded by C-language. According to this simulation system, 1) the temperature of plantation determined by louver open/close temperature 2) the fastest plants growth is simulated in the present model. In the future, it is necessary to adjust the modules of growth curve for improvement more realistic food production.

#### 1. 序 論

宇宙利用が盛んになるにつれ、今後長期滞在ミッションが増加すると予想される。月面基地や有人惑星探査など数ヶ月、数年にわたる長期ミッション、さらには月面など他の天体への居住を実現させるためには、推進システムの効率化・長寿命化だけでなく、生命維持のための食糧確保も大きな課題となる。

そこで、宇宙で食糧を自給自足する技術の確立が必要である。宇宙農場は、水や空気の供給が困難な宇宙空間で、独立した閉鎖生態系システムとして、物質を内部で循環させる。将来的には植物、動物、人間を含んだ複合的なシステムが必要となる。

本論文では、食糧生産施設として、植物の生産のみを目的とした、スペースコロニー型宇宙農場のモデル化、及びシミュレーションについて報告する。

#### 2. スペースコロニー型宇宙農場の概要

##### 2.1 形状

本報告で述べる宇宙農場は、独立で機能し、惑星など特定の環境以外での要求に応えられるよう、スペースコロニー型を採用した。基本となる形状は Fig. 1 に示すようなスタンフォードトラス型である。

そこでトラスを回転させることによって、側面内側部

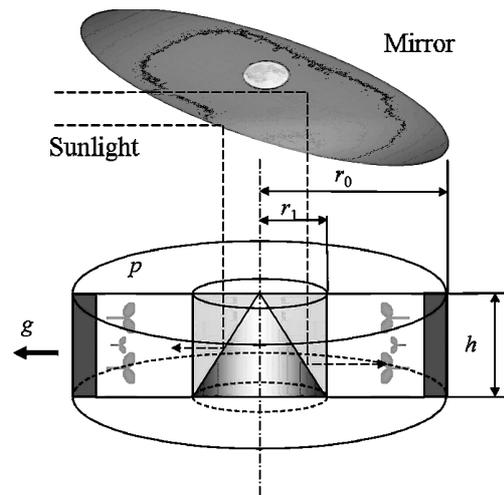


Fig. 1 Schematic of Space Colony Type Space Plantation.

分に発生する外向きの人工重力を利用して、同面を農場として植物を栽培する。また、回転数を変えることによって、農場にかかる重力を制御することができ、太陽光を取り込む鏡の角度調整によって日照/日陰の制御を行う。

##### 2.2 内部環境

農場内部は外部（宇宙空間）との物質の授受のない、閉鎖生態系である。本報告においては、重力、大気などの初

1 東京農工大学大学院工学府

Tokyo University of Agriculture and Technology, Graduate School of Engineering

2 東京農工大学 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT), 2-24-16 Naka-cho, Koganei-city, Tokyo 184-8588, Japan

期環境は地球環境と同等（重力加速度  $g$  [m/s<sup>2</sup>]・大気組成・大気圧  $p$  [Pa]・日照/日陰周期等）であると仮定した。これは、現段階で植物の、特に重力環境に対する反応が十分に解明されておらず、参考のできるデータが乏しいためである。

### 2.3 モデル植物

本報告でモデルに用いる植物は、イネとした。イネは、品種改良が進み、生育データが得やすいだけでなく、主食として、最も日本人に馴染み深い植物であるので、宇宙農場で栽培する植物として適していると考えた。

## 3. モデル概要

本報告での宇宙農場は次の5つのモデルからなる。

- 構造モデル
- 熱収支モデル
- 大気モデル
- 水収支モデル
- 植物生長モデル

Fig. 2 に示すように、これら構造モデル、熱収支モデル、大気モデル、水収支モデルから農場内の温度、大気環境について算出し、これらの環境を植物生長モデルの入力として与えることで、各環境状態における植物の生長状態を出力する。

### 3.1 構造モデル

リング型農場の内半径  $r_1$  [m] の、円筒状ガラス壁から取り込まれた太陽光が農場上に降り注ぐ。また、外半径  $r_0$  [m] の円の内側壁面に深さ  $Dep = 1$  m、面積  $A_{plant} = 2\pi r_0 h$  [m<sup>2</sup>] の土壌上において植物を栽培するとした (Fig. 1 参照)。

外部構造体の主要素材は、ガラスと鋼であると仮定した。壁面厚さは農場内の圧力、土壌の質量などを元に、農場全体が圧力容器であると仮定して、重力と内圧に耐えるよう設計した。

### 3.2 熱収支モデル

農場は Fig. 3 の様に太陽光よりエネルギーを受け、農場温度  $T_{pl}$  [K] 上昇に使用し、農場表面の排熱ルーバを用いて、熱を排出する。

入射熱  $Q_{in}$  [W/m<sup>2</sup>] は、太陽からの入射熱量（太陽定数） $C_s = 1395$  W/m<sup>2</sup> に、農場表面の熱吸収率  $= 0.7$  と太陽入射面積  $A_{sun} = \pi r_1^2$  [m<sup>2</sup>] を乗じたものであり、式(1)で与えた。

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

また、農場表面の排熱ルーバからふく射で排出される熱  $Q_{out}$  [W/m<sup>2</sup>] と農場の温度上昇に用いられる熱  $Q_{use}$  [W/m<sup>2</sup>] を次の式(2)で与えた。

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

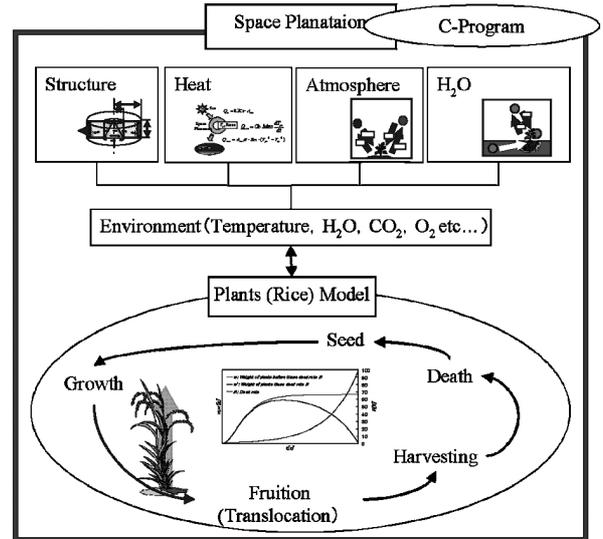


Fig. 2 System Flow of Space Plantation Program: The system incorporates structure, heat, atmosphere, H<sub>2</sub>O and plants models.

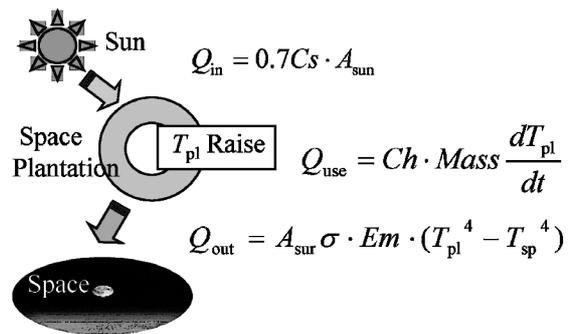


Fig. 3 Energy Flow in Space Plantation: Heat from the sun ( $Q_{in}$ ) will be used for  $T_{pl}$  raise ( $Q_{use}$ ) and exhausted by the louvers ( $Q_{out}$ ).

式(1), (2)が等しくなるとして与えられる微分方程式を解くと  $T_{pl}$  が求められる。

ふく射面積  $A_{sur} = 2\pi(r_0^2 - r_1^2) + 2\pi r_0 h$  [m<sup>2</sup>]、ステファンボルツマン定数  $\sigma = 5.699 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)、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] とした。ふく射率  $Em$  [-] は排熱ルーバの開閉により変化し、ルーバ開時は  $Em = 0.4$ 、閉時は  $Em = 0$  とした。

### 3.3 大気モデル

植物は大気中の CO<sub>2</sub> を用いて光合成を行っている。したがって、閉鎖空間では、植物の光合成と呼吸により、大気組成が微量ながら変化すると考えられる (Fig. 4)。

各ガス濃度は、単位時間あたりの生長質量  $dW_{pl}/dt$  [kg/(s·m<sup>2</sup>)] が光合成反応式の C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> であるとし、物質質量比によって増減するものとした。

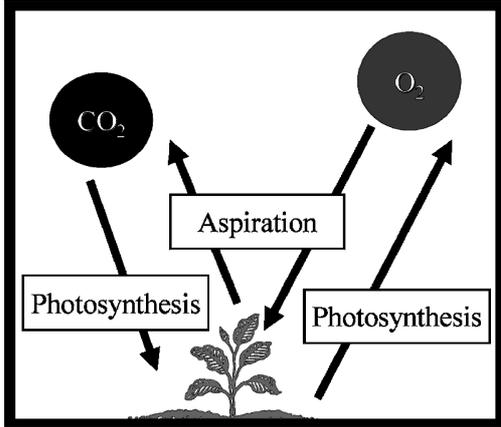


Fig. 4 Gases Flow in Space Plantation: With aspiration and photosynthesis, concentrations of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> rise or fall.

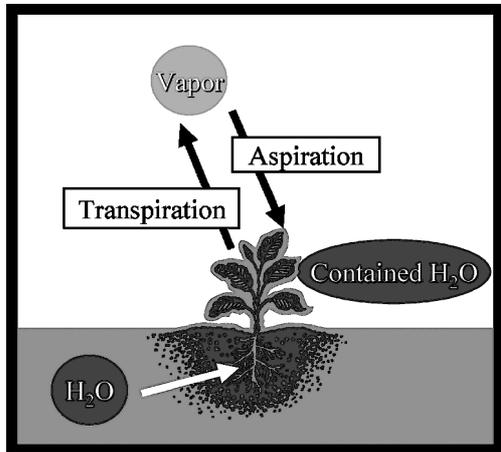


Fig. 5 H<sub>2</sub>O Flow in Space Plantation: With aspiration and transpiration, H<sub>2</sub>O's migrate among air, plants and soil.

### 3.4 水収支モデル

農場内の H<sub>2</sub>O は、温度変化や生長、呼吸などの植物の生理作用に伴って状態変化、移動する。植物は水分を多量に含んでおり、主に個体温度維持のために蒸散を行っている。以上のことから、農場内の水収支は次の Fig. 5 のように仮定した。

各々の量は、Penman-Monteith 法<sup>1)</sup>を用いて蒸散を、生長や温度・気温など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。

### 3.5 植物生長モデル

簡単のため植物の生長量は農場温度  $T_{pl}$  のみに依存するものとした。生長モデルは生存植物質量  $W_{pl}$  [kg/m<sup>2</sup>] を生長曲線の一つである、Mitscherlich-Bertalanffy 曲線<sup>2)</sup> (式(3)) であらわす。

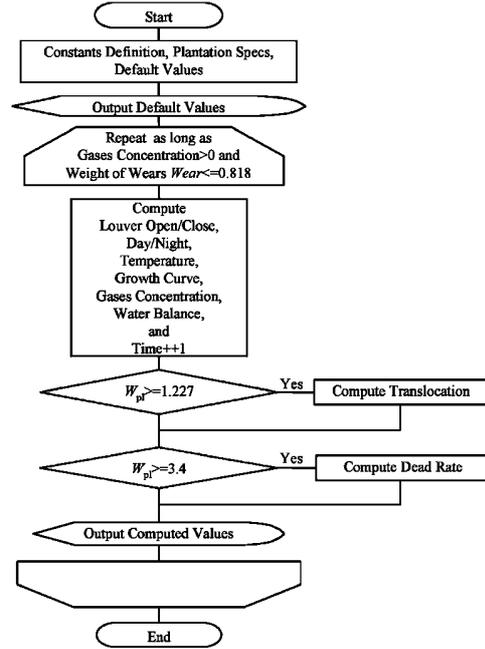


Fig. 6 Program Flow of Space Plantation Program.

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

$W, \lambda$  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。係数決定には、最適温度において、3ヶ月間で収穫可能になるだけの数値を生長曲線から逆算して与えた。

茎や葉などで蓄えた栄養分が穂に移動することを再転流という。この再転流速<sup>3)</sup>  $Rt$  [kg/day·m<sup>2</sup>] で与える時刻  $t$  [s] におけるイネの穂の質量  $W_{ear}$  [kg/m<sup>2</sup>] (式(4)) 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 Gompert 曲線<sup>4)</sup> (式(5)) により単位時間あたりの死亡率  $Rd$  [1/min] をあたえ枯死のモデルとした (式(6), 左辺  $W_{pl}^t$  は生長および枯死, 右辺  $W_{pl}^t$  は生長のみの生存物質量を表す)。

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

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

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

$R_0, \alpha$  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。

## 4. 解析手法

$W_{pl}$  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。

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

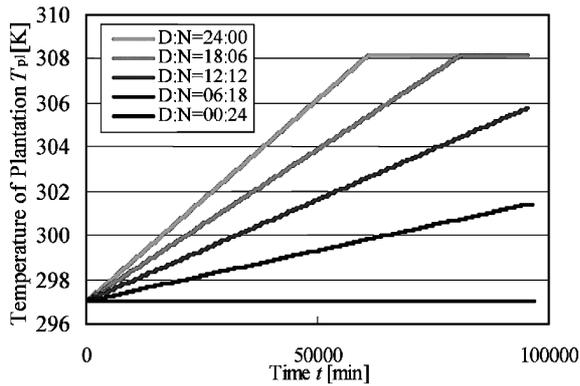


Fig. 7 Relationships between Temperature of Plantation  $T_{pl}$  and Time  $t$  each Day/Night Rate: 308 K is the temperature of louvers open/close.

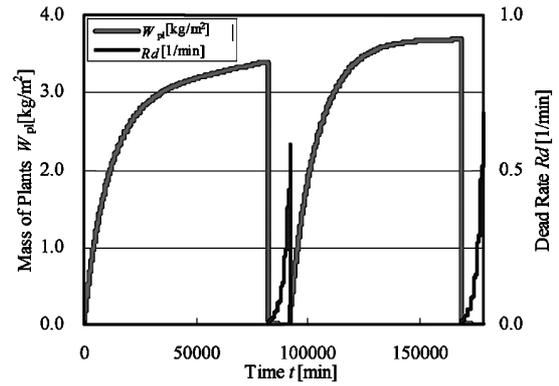


Fig. 8 Relationships between Mass of Plants  $W_{pl}$ , Dead Rate  $Rd$  and Time  $t$ : The fastest plants growth is simulated in this model.

#### 4.1 解析プログラム

プログラムはC言語で記述し、時刻  $t[s]$  を60秒ずつステップさせた。各ステップでは構造、熱、大気、水の各モデルを用いて、日照状態→ルーバ開閉→ $T_{pl}$ → $W_{pl}$ →各ガス濃度の順に環境条件を算出し、植物の生存に必要な不可欠な  $CO_2$ 、 $O_2$  濃度が0以上である限り、生存植物質量  $W_{pl}$  が初期種子質量と同質量に枯死するまで繰り返した (Fig. 6)。

### 5. 結果と考察

#### 5.1 日照/日陰割合と温度変化

日照/日陰の割合を変化させることによる、農場内温度変化の違いをシミュレーションした結果を Fig. 7 に示す。

この結果により、プログラムでルーバの開閉温度に設定されている、植物推奨上限温度  $T_{maxbet} = 308 K$  付近で農場温度が一定になることが分かる。昼夜比が1:1の条件で、温度変化速度が0.13 K/day程度と緩やかであることから、ルーバの開閉温度が可変であれば、季節周期の温度変化を与えることが可能である。

#### 5.2 生長と枯死

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ところ、Fig. 8 に示す生長・枯死の曲線 (2サイクル) が得られた。

この結果ではイネの生長が56日目で終了する。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。

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  $\lambda$  の係数調整を行ったところ ( $\lambda = 4.2 \times 10^{-20} \rightarrow \lambda = 5.2 \times 10^{-5}$  (農場温度  $T_{pl} = 298 K$  時)), 112日目で生長終了する結果が得られた。しかし、非常に早期に枯死する結果が得られており、死亡率の係数調整により今後対応する。

#### 5.3 水収支・大気モデルについて

農場内の  $CO_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$  は、本モデルにおいて、植物の生長とともに消費 ( $O_2$  は生産) されるが、有意な結果は得られていない。

### 6. 結論

- (1) 本モデルでは、ルーバの開閉設定温度で温度を一定にできることがわかった。今後このモデルを用いて、季節変化を与えることも可能である。
- (2) 本モデルにおいて、生長曲線の係数の調整によって、任意に植物の生長度合いを設定できる。

### 7. 今後の課題

#### (1) 無機塩類の導入

今後、具体的な生産計画を立てることを目指し、多サイクル化させるためには、土壌無機塩類の枯渇及びその補給についてモデルに導入する必要がある。

#### (2) 他の環境条件

現段階では植物の生長は温度環境にのみ依存すると仮定しているが、今後、 $CO_2$  濃度及び日照条件等 (照度の均一化を含む) の他の環境についても適用していく。

それともない、現段階で有意な結果が得られていない  $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $O_2$  について、精度の高い結果を得ることが課題となる。

### 参考文献

- 1) 東 博紀, 岡 太郎: 京都大学防災研究所年報, 45 (2002) 735.
- 2) 篠崎吉郎: 数理科学, 15 (1977) 54.
- 3) 楊重法, 井上直人, 藤田かおり, 加藤昌和, 萩原素之: 日本作物学会記事, 74 (2005) 65.
- 4) 井尻憲一: 数理科学, 15 (1977) 62.

(2007年7月27日受理, 2007年9月10日採決)