

シミュレーションによる CEEF 結合試験の支援

Simulation to Support an Integration Test Project of CEEF

○宮嶋宏行(東京女学館短大), 阿部康一(環境研), 芦田章(未来研), 石川芳男(日大), 新田慶治(環境研)

Hiroyuki Miyajima*, Koichi Abe**, Akira Ashida***, Yoshio Ishikawa****, Keiji Nitta**

* Tokyo Jogakkan Junior College

1105 Tsuruma, Machida, Tokyo, 194-0004 Japan

miyajima@m.tjk.ac.jp

** Institute for Environmental Sciences

1-7 Ienomae Obuchi, Rokkasho-mura, Aomori, 039-3212 Japan

*** The Institute for Future Technology

2-6-11 Tomiakabashi bld. 4F Fukagawa, Tokyo, 135-8473 Japan

**** Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501 Japan

Abstract

A simulation of an open mode system experiment was run using the same experimental conditions as an integration test conducted from September 1999 to February 2000 using the Closed Plant Experiment Facility at the Institute for Environmental Sciences in order to evaluate the operation of closed mode system to be conducted in future. Operation of the open mode system experiment required a supply of water and carbon dioxide from the outside, and the discharge of nutrient waste water and oxygen. The present simulation verified the feasibility of using non-integrated wet-oxidation processor, nutrient synthesis unit and nutrient waste water processor connected within a closed mode system, and it was confirmed that sufficient material circulation could be achieved when rice and soybeans were divided into six beds with different growing stages to facilitate control of the nutrient solution.

Key Word : Material Circulation, Operation mode, Biochemical Stoichiometry

1. 緒言

環境科学技術研究所が建設を進めてきた閉鎖型生態系実験施設 (Closed Ecology Experiment Facilities : CEEF) が 1999 年に完成した。CEEF は閉鎖系植物実験施設 (Closed Plant Experiment Facility : CPEF)、閉鎖系動物飼育・居住実験施設 (Closed Animal Breeding and Habitation Facility : CABHF) および閉鎖系陸・水圏実験施設 (Closed Geo-Hydrosphere Experiment Facility : CGHEF) からなる。それぞれの施設は、モジュールとそれらをサポートする物理化学的な物質循環システムで構成され、それぞれの物質循環システムを相互に接続することができる¹⁾。現在は、施設内にある物質循環システムの性能試験と植物のシーケンス栽培の試験が行われており、すでにいくつかの報告がなされている^{2,5,6,8)}。そして、次の大きな課題の一つが、2005年から2007年に、植物系と動物・居住系の物質循環システムを結合して、人間が居住した閉鎖系の物質循環試験を実施することである。現在は、そのために必要となる技術を検証している段階であり、今後、これらの設備を結合して運用するための条件が整備されていくことになる。

実験条件に未確定要素が多く、様々な実験条件が考えられるシステムの検討には、シミュレーションによる解析が大きな役割を果たす。特に CEEF のように 1 つの実験に数ヶ月から数年という長い時間を必要とする場合、シミュレーションそのものが計算機上での実験の 1 つとなり、実験条件の検証や新しい条件での実験の予測に役立つ³⁾。そのためには、すでに行われた実験によって得られたデータにより予測精度を高めること、シミュレーション条件と実際のシステムの違いをきちんと押さえることが必要である。

本研究ではこれらの実試験をシミュレーションにより支援していくのが目的であり、前回の報告¹⁾では、設計値を使った解析により、

人間一人の居住と 6 種類の植物を取り入れた CEEF (植物系と居住系の結合システムの場合) の物質循環が可能かどうか検討した結果について報告した。本報告では、1999年9月から行われた「閉鎖系植物実験施設を利用した試行実験」²⁾について行ったシミュレーション解析の結果について報告する。

2. 閉鎖系植物実験施設を利用した試行実験

本実験は、植物系における試行実験として、1999年9月から、植物栽培モジュールを用いて、動物飼育・居住モジュールと結合した時に想定されるような複数種類の作物のシーケンス栽培(植付けと収穫を定期的(一部ずつ)行う栽培方法)が行われた。2000年1月中旬には、栽培室内の栽培ベッドに 10 種類の作物が段階的に生育する状態に到り、2月中旬までの約 1 ヶ月間にわたって物質のインプットとアウトプットに関するデータが取得された²⁾。この実験で結合運転した装置は、Fig.1 に示す植物系物質循環システムのうち Table 1 に示したものである。

本実験は、Table 2 に示すように、植物栽培モジュールの 3 つの栽培室(B 区,C 区,F 区)と、植物系の物質循環システムの一部を用いて行われた。栽培した作物はイネ、ダイズ、オオバ、キュウリ、トマト、ネギ、コマツナ、ハウレンソウ、トウガラシ、サツマイモの 10 種類である。光強度、温湿度、CO₂濃度、O₂濃度の設定を Table 3 に、植物栽培データを Table 4 に示す。物質循環システムでは、湿式酸化処理装置、養液合成装置、O₂再生装置、養液排水処理装置は運転が定常化していないため接続されなかった。このため、廃棄物処理液や施設で合成されたアンモニア・硝安は使用せず、試薬を用いて調合した栽培養液を使用した。また、O₂を消費する湿式酸化装置を接続しなかったため、植物の光合成によって長期的には閉鎖系内に O₂

が蓄積していくため、系外に払い出しを行った。逆に CO₂ は長期的には閉鎖系内の植物によって吸収され不足することから系外からタンクに供給した。暗期には植物の呼吸により栽培室内の CO₂ 濃度が 2000 μ LL⁻¹ を超えないように CO₂ 分離装置を運転した。

Table 1 連動運転した装置

サブシステム	装置	記号
ガス処理系設備	臭気処理装置	-
	O ₂ 分離装置	PA-3
	N ₂ 分離装置	PA-5
	CO ₂ 分離装置	PA-1
	O ₂ タンク	PA-4
	N ₂ タンク	PA-6
	CO ₂ タンク	PA-2
	CO ₂ 用マスフローコントローラ	-
	微量有害ガス除去装置	PA-7
水処理系設備	補給水タンク	-
	上水タンク	PW-1
	ドレン水タンク	-
	肥料用水タンク	PA-3
	濃縮分解液タンク	PN-5
	養液調整タンク	PN-6
	養液排水タンク	PW-5
	中水タンク	PW-2

Table 2 栽培植物の配置

栽培区	栽培ベット	栽培作物	面積[m ²]
B(人工光)	A - F	ダイズ	30
C(人工光)	A - F	イネ	30
F (自然光 + 補光照明)	A	ハウレンソウ	5/3
		コマツナ	5/3
		ネギ	5/3
	B, E D, F G, J H, K I, L	キュウリ	10
		トマト	10
		オオパ	10
		トウガラシ	10
		サツマイモ	10

Table 3 栽培区の栽培環境設定

栽培区	光	温湿度	CO ₂ , O ₂ 濃度
B区, C区	高圧ナトリウム ランプ 25% (2h) 50% (2h) 75% (6h)*1 50% (2h) 25% (2h) 0% (10h)	明期 26±1°C 70±5%RH	CO ₂ 濃度 700±100 μ LL ⁻¹ O ₂ 濃度 20 - 22%vol
		暗期 19±1°C 85±5%RH	
F区	メタルハライド ランプ 4:00 - 20:00	明期 23±1°C 65±5%RH 暗期 17±1°C 85±5%RH	

*1 75%点灯群落高での光合成有効光量子フラックス密度 (PPFD) 1100 - 1340 μ mol m⁻²s⁻¹

3. シミュレーションモデル

シミュレーションに利用した植物モデルと植物系の物質循環シス

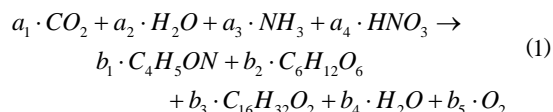
テムモデルについて示す。植物モデルは、様々な植物種や様々な状況に対応してモデル化することは不可能と考えられるので、一般的なモデルの変形によりシミュレーションへの影響を調べる³⁾。植物モデルの物質収支モデルは、文献「四訂日本食品標準成分表」⁴⁾、「可食部・非可食部有機元素分析による閉鎖系物質循環設計」⁵⁾のデータを用いて生化学量論により作成した。植物成長モデルは、一般的なロジスティック関数により作成した。さらに、光、温度、二酸化炭素濃度の影響は、文献「CEEFF 植物栽培モジュールを用いた群落光合成・蒸散測定技術試験」⁶⁾のデータを用いて無次元関数として作成した。植物系の物質循環システムモデルは、離散系・連続系対応汎用シミュレータ WITNESS(Lanner GROUP Inc.)の物理エレメント"Processor", "Tank"を用いて作成した。次に、モデルの詳細について示す。

植物モデル⁷⁾

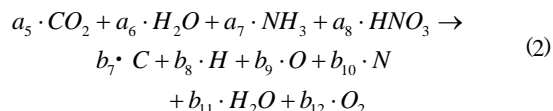
植物モデルは、式(1)~(4)に示す物質収支モデルと式(5)に示す植物成長モデルからなる。植物成長モデルの入出力は光合成による入力が二酸化炭素、栽培水、アンモニア、硝酸の4種類、出力がバイオマス(タンパク質・炭水化物・脂肪・非可食部)、水、酸素の3種類、暗呼吸による入力が、バイオマス(炭水化物・脂肪・非可食部)、酸素の2種類、出力が二酸化炭素、水の2種類となる。このうち暗呼吸によるバイオマスの消費と水の生産は植物内部の変化であり、外部への出力は伴わないため、合計9の入出力を持つことになる。

[物質収支モデル]

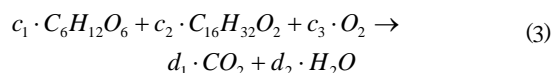
【明期の可食部】



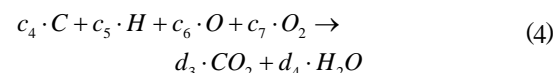
【明期の非可食部】



【暗期の可食部】



【暗期の非可食部】



式(1),(2)は可食部と非可食部の光合成を表し、 a_1, a_5 は吸収した二酸化炭素のモル数、 a_2, a_6 は吸収した水分のモル数、 a_3, a_4, a_7, a_8 は吸収した養分のモル数、 $b_1, b_2, b_3, b_7, b_8, b_9, b_{10}$ はバイオマスの可食部中のタンパク質、炭水化物、脂肪、非可食部中のC、H、O、Nのモル数、 b_4, b_{11} はバイオマスに含まれる水分のモル数、 b_5, b_{12} は生産した酸素のモル数を表す。

式(3),(4)は可食部と非可食部の暗呼吸を表し、 c_1, c_2, c_4, c_5, c_6 は暗呼吸により消費したバイオマスの可食部中の炭水化物、脂肪、非可食部中のC、H、Oのモル数、 c_3, c_7 は消費した酸素のモル数、 d_1, d_3 は生産した二酸化炭素のモル数、 d_2, d_4 は生産した水のモル数を表す。

また、式(2),(4)の物質平衡式を文献7)からさらに実験データを反映

しやすくするために不可食部の成分を C, H, O, N の4元素で扱うように変更した。

[植物成長モデル]

植物成長モデルは、ロジスティック関数によりモデル化する。植物の光合成、すなわちバイオマスの単位面積あたりの増加率 dx/dt は、

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot x \cdot \left(1 - \frac{x}{x_m}\right) \quad (5)$$

と記述できる。ここで x はバイオマス [g/m^2]、 x_m は最大バイオマス [g/m^2]、 α は光合成係数 [1/day] である。 x_m は植物種によって、 α は光の強さ、温度、二酸化炭素濃度などの環境因子によって決まり、

$$\alpha = f(I, T, co_2) \quad (6)$$

$$= \alpha_{ave} \cdot \alpha_I \cdot \alpha_T \cdot \alpha_{co_2}$$

と表せる。ここで I は光の強さ [$\mu mol/m^2/s$]、 T は温度 [$^{\circ}C$]、 co_2 は二酸化炭素濃度 [ppm] である。 α_{ave} は平均光合成速度である。 $\alpha_I, \alpha_T, \alpha_{co_2}$ は光・温度・二酸化炭素濃度が植物の成長に与える影響を無次元関数で表したものである。

$$\alpha_I = a_I \cdot I \quad (0 \leq I \leq 2000) \quad (7)$$

$$\alpha_T = a_T \quad (20 \leq T \leq 30) \quad (8)$$

$$\alpha_{co_2} = \begin{cases} a_{co_2} \cdot co_2 + c_{co_2} & (100 \leq co_2 < 500) \\ 1 & (co_2 \geq 500) \end{cases} \quad (9)$$

ここで $a_I, a_T, a_{co_2}, c_{co_2}$ は $\alpha_I, \alpha_T, \alpha_{co_2}$ が線形関数で表わされたときの係数である。

平均光合成係数 α_{ave} は次の手順で求める。まず、式(5)を解くと、

$$x(t) = \frac{x_{max}}{1 + K \cdot e^{-\alpha t}} \quad (10)$$

$$\text{ただし、} K = \frac{x_{max}}{x_0} - 1$$

となる。植物が最大増加量を示す時期を t_{max} [day] とし、 t_{max} が最大バイオマス x_{max} の半分になった時期のものと仮定すると、

$$\frac{x_{max}}{2} = \frac{x_{max}}{1 + K \cdot e^{-\alpha t_{max}}} \quad (11)$$

と書ける。これより t_{max} を求めると、次式となる。

$$t_{max} = \frac{1}{\alpha} \{ \ln(x_{max} - x_0) - \ln x_0 \} \quad (12)$$

ここで、 t_{max} を決めると、

$$\alpha_{ave} = \frac{1}{t_{max}} \{ \ln(x_{max} - x_0) - \ln x_0 \} \quad (13)$$

となり、 α_{ave} が決定できる。式(13)のように α_{ave} は平均値を取ったものである。実際には植物の α_{ave} は絶えず変化しており、普通は成長に伴って低下する。本モデルでは α_{ave} を播種から収穫までの平均値とする。これらのパラメータの決定は文献6)によった。

物質循環システムモデル⁷⁾

湿式酸化装置を例に取り物理化学的装置の一般的なモデル化について説明する。非可食部の処理を行う湿式酸化装置のモデルは式(14)に示す物質平衡式と式(15)に示す処理過程を表すモデルからなる。この装置の入出力は入力処理物 (C, H, O, N , 水分)、処理水、酸素の3

種類、出力が二酸化炭素、水、窒素の3種類である。

$$\begin{aligned} f_{19} \cdot C + f_{20} \cdot H + f_{21} \cdot O + f_{22} \cdot N + f_{23} \cdot H_2O \\ + f_{24} \cdot H_2O + f_{25} \cdot O_2 \rightarrow \\ g_{13} \cdot CO_2 + g_{14} \cdot H_2O + g_{15} \cdot N_2 \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)の $f_{19}, f_{20}, f_{21}, f_{22}, f_{23}$ は処理物の C, H, O, N 、水分のモル数、 f_{24}, f_{25} は湿式酸化に用いる処理水と酸素のモル数、 g_{13}, g_{14}, g_{15} は反応後発生する二酸化炭素、排水、窒素のモル数を表す。

$$\begin{aligned} \frac{dx_{wO_3}}{dt} = F_{CHON} \cdot \delta_{CHON} + F_{O_2} \cdot \delta_{O_2} \\ - F_{CO_2N_2} \cdot \delta_{CO_2N_2} - F_{H_2O} \cdot \delta_{H_2O} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)の x_{wO_3} は湿式酸化装置内の物質質量、 $F_{CHON}, F_{O_2}, F_{CO_2N_2}, F_{H_2O}$ はそれぞれ廃棄物タンク出口、酸素タンク出口、排ガスタンク入口、濃縮装置入口の物質流量を表す。 $\delta_{CHON}, \delta_{O_2}, \delta_{CO_2N_2}, \delta_{H_2O}$ はそれぞれのバルブの開閉(1: 開, 0: 閉)を表す。この装置の1バッチの処理工程は原料導入、昇温、酸素導入による昇圧、再昇温再昇圧、第一反応、第2反応、降温降圧、分解液払出、排ガス払出からなり、所要時間は約6時間である⁸⁾。

物質循環システムは、このような処理工程をもつ反応器やタンクより構成されているので、WITNESSの物理エレメント“Processor”と“Tank”を用いて作成した。Processorでは、容量、最少反応容量、反応時間、注入(Input Rule, Volume, Rate)、抽出(Output Rule, Volume, Rate)などのパラメータ、Tankでは容量、初期量、注入(Input Rule, Volume, Rate)、抽出(Output Rule, Volume, Rate)などのパラメータを設定する。

4. シミュレーション条件

「閉鎖系植物実験施設を利用した試行実験」に示した実際の実験とシミュレーションで異なる条件について示す。シミュレーションでは、実際には接続されていない湿式酸化装置、養液合成装置、養液排水処理装置を接続した場合について計算を行った。湿式酸化装置を接続して、植物のシーケンス栽培が完成すれば、酸素を外部へ払出したり、二酸化炭素を外部から供給する必要がなくなる¹⁾。この湿式酸化装置の運用は、一日分の食料に相当する可食部と非可食部を1日1回処理するように設定した。次に、養液合成装置と養液排水処理装置を接続することによって、水の循環が閉鎖系で行えるようになる。さらに、植物のパラメータの決定は、過去に行われた実験データ⁹⁾を使用しており、本実験のデータは使用していない。イネの育苗は、実験では栽培区Fの栽培ベットCで行われているが、栽培区Cで育苗したのとして計算を行った。

本報告では、開放系とは、上水を外部から上水タンクへ、養液排水を養液排水タンクから外部へ、二酸化炭素を外部から二酸化炭素タンクへ、酸素を酸素タンクから外部へ移動を許すことである。また、閉鎖系とは、これらの物質のやり取りを外部と許さないことである。

5. シミュレーション結果

閉鎖系植物実験施設を開放系で運用した場合(試行実験の運用形態)と閉鎖系で運用した場合の物質循環の比較、及び栽培植物の分割数が物質循環へ与える影響について示す。これらの結果について実験データとの検証は行っていないが、シミュレーション上は、植物栽培空間の酸素濃度・二酸化炭素濃度・湿度、及び植物栽培ベットの養液濃度の制御がうまく行われた場合についての結果である。

(1) 開放系と閉鎖系の物質循環の比較

Fig.2(1)に外部の上水バッファタンクと排水バッファタンクの貯蔵量の変動を示す。開放系運用の場合は、上水は常に状態量が低下しており、排水は常に状態量が上昇している。これは、養液排水処理装置を運用していないので、常に、上水が系内に流入し、排水が系内から流出していることを示している。閉鎖系運用の場合は、上水と排水ともに状態量の変動がみられない。これは、養液排水処理装置を運用すれば、1日目から水に関しては閉鎖が可能であることを示している。

Fig.2(2)に外部の二酸化炭素バッファタンクと酸素バッファタンクの貯蔵量の変動を示す。開放系運用の場合は、二酸化炭素の状態量が低下しており、酸素の状態量が上昇している。これは、湿式酸化装置を運用していないので、常に、二酸化炭素が系内に流入し、酸素が系内から流出していることを示している。閉鎖系運用の場合は、植物のシーケンス栽培が完成(最も栽培量が多いイネの栽培期間 114日間に相当)するまでは、二酸化炭素の状態量が低下し、酸素の状態量が上昇している。植物のシーケンス栽培が完成した後は、二酸化炭素と酸素ともに状態量の変動がみられない。これは、シーケンス栽培が完成した後は、気体に関して閉鎖が可能であることを示している。

(2) 栽培植物の分割数が物質循環に与える影響

ケースA(イネ 19 分割, ダイズ 22 分割, その他の作物は Table 4 と同じ)とケースB(イネ 6 分割, ダイズ 6 分割, その他の作物は Table 4 と同じ)の場合について比較した。Fig.2(3)に栽培植物量の変動を示す。ケースBがケースAよりも変動が大きくなっている。Fig.2(4)に外部の二酸化炭素バッファタンクと酸素バッファタンクの貯蔵量の変動を示す。系外との気体のやり取りについては、ケースAとケースBの間にほとんど違いはみられず、イネとダイズの分割数の影響はあらわれていない。Fig.2(5)に上水タンクの貯蔵量の変動を示す。ケースAとケースBの間にほとんど違いはみられず、イネとダイズの分割数の影響はあらわれていない。Fig.2(6)に二酸化炭素タンクと酸素タンクの貯蔵量の変動を示す。ケースAとケースBの間にほとんど違いはみられず、イネとダイズの分割数の影響はあらわれていない。水と気体の循環について、イネとダイズの分割数の影響が大きくなるのは、湿式酸化装置の運用を1日1回の処理(1日分の食料に相当する可食部と非可食部)に限定しているためである。

6. まとめ

開放系で運用した場合、外部から上水と二酸化炭素を供給し、外部へ養液排水と酸素を払出する必要があるが、今回の実験で結合運転されなかった湿式酸化装置、養液合成装置、養液排水処理装置を接続することによって閉鎖系で運用できることをシミュレーションで確認した。また、養液管理を行いやすいようにイネとダイズの分割数を栽培ベット数と同じ6分割栽培にしても閉鎖系での物質循環が可能であることを確認した。

参考文献

1. H. Miyajima, Y.Ishikawa, A. Ashida, K.Nitta(2000), Development of Simulation Model and its Application to an Integration Test Project of CEEF, SAE No.2000-01-2334
2. 多胡靖宏,曾田匡洋,新井竜司,大坪孔治,新田慶治(2000), CEEF 植物系システムを用いた物質循環に関する研究, CELSS 学会 2000 年年次学術講演会講演集, p131-136
3. 丸井晃,丸山一孝,芦田章(1998), CEEFシミュレーションソフトの検討, CELSS 学会 1998 年年次学術講演会講演集, p21-24
4. 食品成分表'90,一橋書店
5. 芦田章,多胡靖宏,新田慶治(1997), 可食部・非可食部有機物元素による閉鎖系物質循環設計, CELSS 学会 1997 年年次学術講演会講演集, p27-31
6. 多胡靖宏, 新井竜司, 大坪孔治, 新田慶治(1998), CEEF 植物栽培モジュールを用いた群落光合成・蒸散測定技術試験, CELSS 学会 1998 年年次学術講演会講演集, p79-84
7. H.Miyajima and Y.Ishikawa(1999), Development of a Model for Design and Control of a CELSS, SAE No.1999-01-2043
8. 原博紀,丸山一孝,服部功,林健一郎,芦田章,新田慶治,武末金治, 閉鎖生態系実験施設に於ける湿式酸化装置の運転試験性能, 1998 年年次学術講演会講演集, p39-44

Table 4 植物栽培データ

Plant No.		Yield(fresh wt)	Energy	Cultivation period	Harvest index	Quantity of harvest (d)	Area	Beds	Stage
		[g]	[kcal]	[day]	[-]	[g/m ²]	[m ²]	-	-
1	RICE	380	1352.8	114	0.402	12.7	30+(5)	6+(1)	19
2	SOYBEAN	230	1584.6	88	0.476	7.7	30	6	22
3	PERILLA	200	133	60	0.6	20	10	2	10
4	CUCUMBER	200	41.8	60	0.6	20	10	2	10
5	TOMATO	170	60.8	60	0.661	17	10	2	10
6	WELSH ONION	30	102.6	60	0.6	20	1.5	3/10	10
7	KOMATSUNA	90	45.6	40	0.621	59.79	1.5	3/10	10
8	SPINACH	100	95	40	0.6	50	2	4/10	10
9	CAPSICUM	100	167.2	90	0.5	10	10	2	10
10	SWEET POTATO	100	467.4	120	0.6	19	10	2	10
	Total	1690	3773.4	-	-	-	115+(5)	24	-

Plant No. 3-10の植物栽培データは「閉鎖系植物実験施設を利用した試行実験」²⁾のデータとは異なる

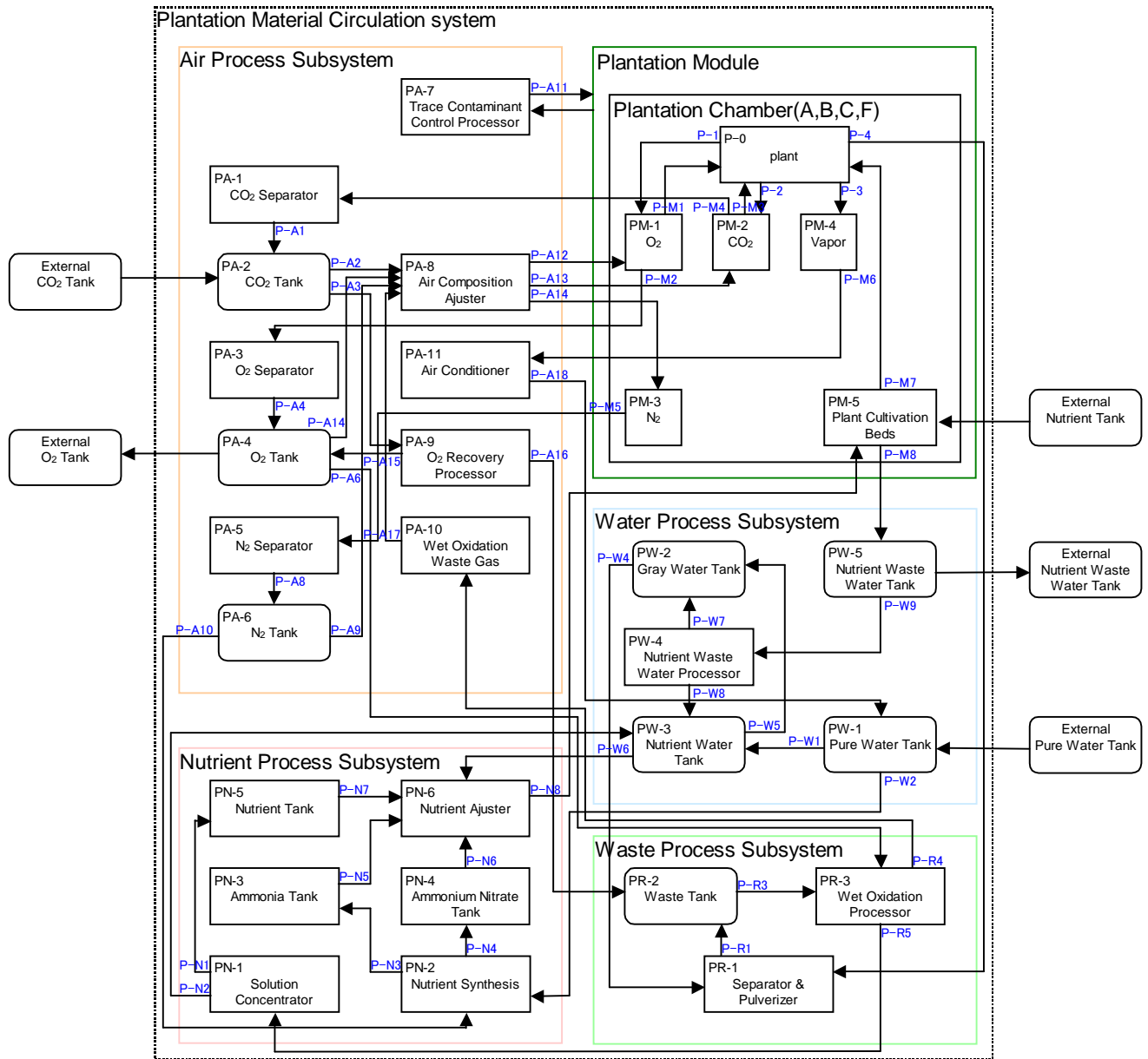
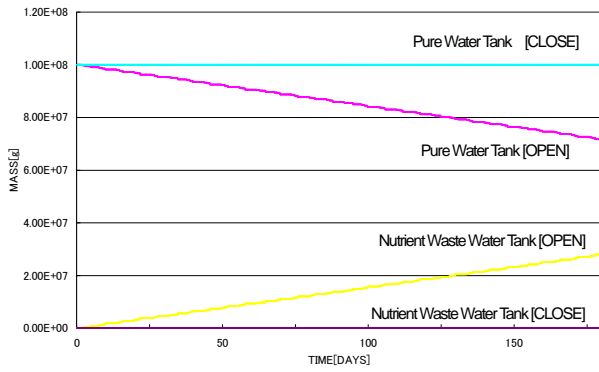
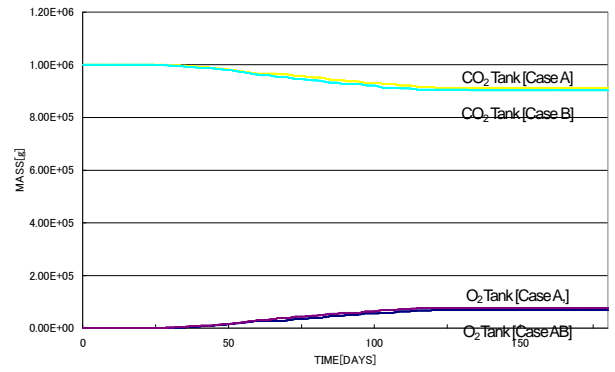


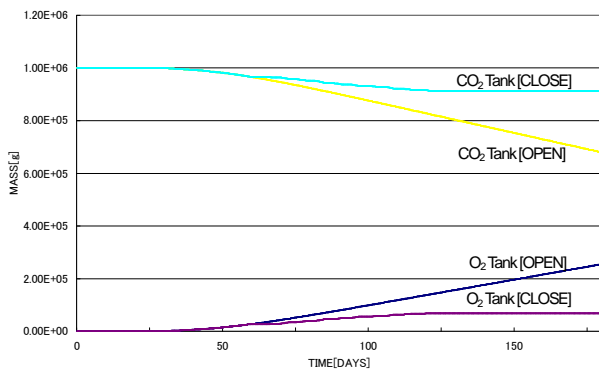
Fig.1 植物系の物質循環システム



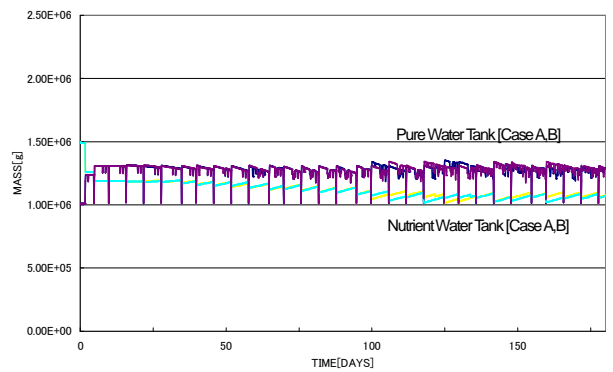
(1) Fluctuation of masses in the external buffer water tank



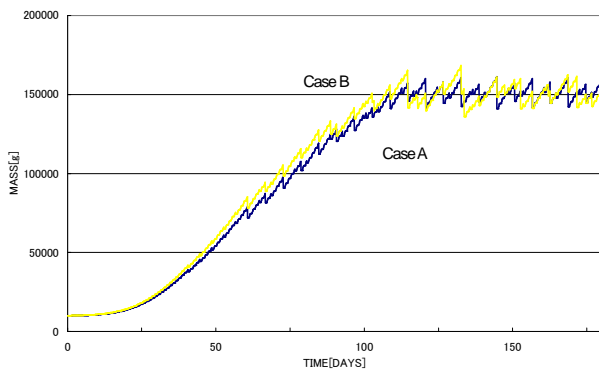
(4) Fluctuation of masses in the external buffer gas tank



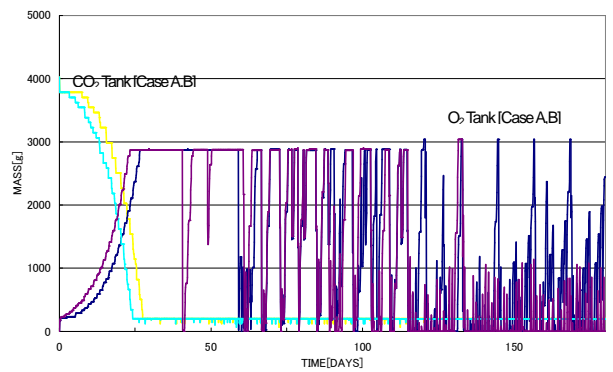
(2) Fluctuation of masses in the external buffer gas tank



(5) Fluctuation of masses in the water tank



(3) Fluctuations in cultivated plant biomass



(6) Fluctuation of masses in the gas tank

Case A : RICE(19 stages),SOYBEAN(22 stages), Case B : RICE(6 stages), SOYBEAN(6 stages)

Fig. 2 シミュレーション結果