

# CEEFにおけるシーケンス栽培と空気処理設備等の適合性に関する ダイナミックモデルによる検討

## A Study of Adaptability of Air Revitalization System in the Sequential Cultivation in CEEF using a Dynamic Model

○宮嶋宏行(東京女学館大), 新井竜司, 多胡靖宏, 新田慶治(環境研)

Hiroyuki Miyajima\*, Ryuji Arai\*\*, Yasuhiro Tako\*\*, Keiji Nitta\*\*

\* Tokyo Jogakkan College, 1105 Tsuruma, Machida-shi, Tokyo 194-0004 Japan, miyajima@m.tjk.ac.jp

\*\*Institute for Environmental Sciences, 1-7 Ienomae, Obuchi, Rokkasyo-mura, Aomori 039-3212 Japan

### Abstract

Sequential cultivation of crops has been conducted over the past years using the plantation module of CEEF. After fiscal year 2005, the plantation module and animal breeding & habitation module will be integrated. The sequential cultivation method can supplies food and oxygen to human without great fluctuation of the material circulation in the closed habitation experiment. Collected data from past experiments on production of edible and inedible biomass, gas and water balance in cultivation module is used to discuss and analyze the problems in adaptation of air revitalization system in the sequential cultivations by applying dynamic model.

Key Word: Biochemical Stoichiometry, Energy Cascade Model, Material Balance, Material Circulation

### 1. 緒言

現在、実験が行われている大規模な生物学的再生型生命維持システム(BRLSS)の例としては、(財)環境科学技術研究所の閉鎖型生態系実験施設(CEEF)と NASA ジョンソンスペースセンターの BIO-Plex の2例がある。CEEFでは、植物栽培モジュールを用いて複数種類の作物をシーケンス栽培する実験(植物系試験)が始まっている。シーケンス栽培は、植物栽培モジュールと動物飼育・居住モジュールを結合した閉鎖系試験で人間に食料と酸素を安定して供給するために利用される。過去に行われた植物系試験では、植物の可食部および非可食部バイオマスの生産量、植物群落のガス収支並びに水収支に関する変動データが収集された。このように1990年代後半にCEEFやBIO-Plexの実験施設の運用が始まったことで、シミュレーションで扱われる内容にも変化がみられるようになった。これらの施設の運用が始まる以前は、システムの設計やミッションの検討がシミュレーションによる研究の中心であったが、それ以降は、地上実験施設の運用の検討が新たな研究の1つとして加わった。その例には、装置処理能力やバッファのサイズおよび貯蔵量の検討<sup>1)</sup>、植物の栽培方法が装置処理能力やバッファのサイズおよび貯蔵量へ与える影響の検討<sup>2,3,4)</sup>、廃棄物処理装置の運用方法が装置処理能力やバッファのサイズおよび貯蔵量へ与える影響の検討<sup>2,3,4)</sup>、実験のスタート方法の検討<sup>3,4)</sup>などがある。これらのシミュレーションでは、物質収支解析を行った後、ダイナミックモデルを用いて物質循環解析を行う方法が採用されている。物質収支解析には生化学量論が用いられ、物質循環解析には非線形微分方程式で表されたダイナミックモデルが用いられている。本報告では、文献(3),(4)においてCEEFの物質循環をシミュレーションするために用いられた植物モデルについて示し、次に、植物系試験で得られた実験データをもとにシーケンス栽培と空気処理設備等の適合性に関して検討するために必要となる植物モデルの修正につ

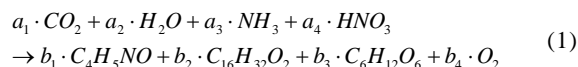
いて示す。

### 2. モデルの概要

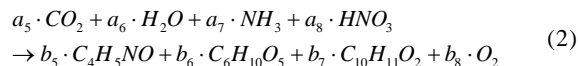
#### 2.1 物質収支モデル

植物や人間の代謝物質を元素レベルで追跡する方法に Tyler Volk and John D. Rummel が開発した生化学量論<sup>5)</sup>がある。生化学量論は、代謝物質を化学式で表し、代謝物質の物質平衡式を作成することで代謝量を元素レベルで追跡する方法である。植物の代謝物質を表す栄養素の成分は、可食部のたんぱく質・脂質・炭水化物、非可食部のたんぱく質・繊維・リグニンの6つの物質である。これらの栄養素を利用して可食部と非可食部について式(1)、式(2)が作られる。

可食部



非可食部



$a_1, a_5$ : 二酸化炭素消費量のモル数

$a_2, a_6$ : 水消費量のモル数

$a_3, a_7$ : アンモニア消費量のモル数

$a_4, a_8$ : 硝酸消費量のモル数

$b_1, b_5$ : バイオマス(たんぱく質)生産量のモル数

$b_2$ : バイオマス(脂質)生産量のモル数

$b_3$ : バイオマス(糖質)生産量のモル数

$b_6$ : バイオマス(繊維)生産量のモル数

$b_7$ : バイオマス(リグニン)生産量のモル数

$b_4, b_8$ : 酸素生産量のモル数

## 2. 2 ダイナミックモデル

植物成長のダイナミックモデルには式(3)に示すロジスティック曲線が使われた。

$$dx/dt = \alpha \cdot x \cdot (1 - x/x_m) \quad (3)$$

- $x$  : バイオマス[g/m<sup>2</sup>]  
 $x_m$  : 最大バイオマス[g/m<sup>2</sup>]  
 $\alpha$  : 光合成係数[1/day]

ここで、光合成係数 $\alpha$ は式(4)のように光強度・温度・二酸化炭素濃度の影響関数の重ね合わせで表わされる。

$$\alpha = \alpha_{avg} \cdot \alpha_I \cdot \alpha_T \cdot \alpha_{CO_2} \quad (4)$$

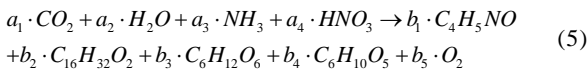
- $\alpha_I$  : 光の影響関数[-]  
 $\alpha_T$  : 温度の影響関数[-]  
 $\alpha_{CO_2}$  : 二酸化炭素濃度の影響関数[-]  
 $\alpha_{avg}$  : 平均光合成係数[1/day]

## 3. モデルの修正

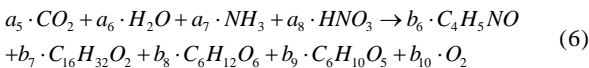
### 3. 1 物質収支モデルの修正

植物系試験では、収穫した作物の食品分析試験が行われ、そこから得られるマクロ栄養素の成分は可食部のたんぱく質・脂質・糖質・繊維、非可食部の粗たんぱく質・粗脂質・可溶性無窒素物・粗繊維の8つの物質である。そこで、表1に示すようにたんぱく質と粗たんぱく質はアミノ酸、脂質と粗脂質はパルチミン酸、炭水化物(糖質)と可溶性無窒素物はブドウ糖、炭水化物(繊維)と粗繊維はセルロースで近似する。これらの栄養素を利用して可食部と非可食部について式(5)、式(6)が作られる。

可食部



非可食部

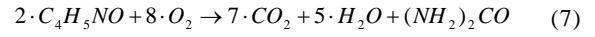


- $a_1, a_5$ : 二酸化炭素消費量のモル数  
 $a_2, a_6$ : 水消費量のモル数  
 $a_3, a_7$ : アンモニア消費量のモル数  
 $a_4, a_8$ : 硝酸消費量のモル数  
 $b_1, b_6$ : バイオマス(たんぱく質)生産量のモル数  
 $b_2, b_7$ : バイオマス(脂質)生産量のモル数  
 $b_3, b_8$ : バイオマス(糖質)生産量のモル数  
 $b_4, b_9$ : バイオマス(繊維)生産量のモル数  
 $b_5, b_{10}$ : 酸素生産量のモル数

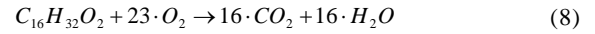
次に、これらの化学式により表現された物質平衡式を呼吸商(RQ)を用いて検証する。RQの計算は、式(7) - 式(10)に示す燃焼の式を利用して行う。これらの式から導かれる酸素と二酸化炭素のモル数より  $RQ = CO_2[mol] / O_2[mol]$  が求まる。この式から求めた RQ と文献<sup>8,9)</sup>による RQ を表2に示す。脂質と炭水化物の RQ は、式と文献による RQ がほぼ一致するが、たんぱく質の RQ は、式による RQ と文献による RQ の差が大きい。これは、

たんぱく質は20種類以上のアミノ酸が100万個以上結合し、組成が一定でなく酸化生成物が複雑なためである。さらに、たんぱく質量は窒素量に表3に示すような窒素-たんぱく質換算係数<sup>9)</sup>を掛けて得られ、この係数は一部の作物では作物ごとに異なることから1つの化学式で近似することは難しいと考えられる。

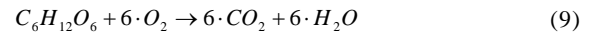
たんぱく質



脂質



炭水化物(糖質)



炭水化物(繊維)

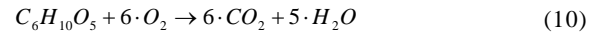


表4に示した食品成分分析データよりイネ(成長量 14.2g/day/m<sup>2</sup>, 収穫指数 0.394, 栽培面積 30m<sup>2</sup>)、ダイズ(成長量 6.5g/day/m<sup>2</sup>, 収穫指数 0.434, 栽培面積 30m<sup>2</sup>)について式(5)、式(6)の係数を決定する。このときの CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> のモル数を表5に示す。イネの CO<sub>2</sub> が 38.66mol、O<sub>2</sub> が 40.36mol、ダイズの CO<sub>2</sub> が 17.42mol、O<sub>2</sub> が 19.79mol となる。これらのモル数から生化学量論により求めたイネとダイズの RQ は、0.958 と 0.880 となる。これを表5に示した実験による値と比較するとイネでは非常に近い値となっているが、ダイズでは大きな違いが見られる。すなわち、たんぱく質の元素組成の問題からたんぱく質の成分が非常に多い大豆は式(5)、式(6)を用いて正確に近似できないことが実験データからも明らかになった。

次に、たんぱく質を構成する必須アミノ酸の元素組成、窒素-たんぱく質換算係数、RQ(式(7)より求めた理論値)を表6に示す。窒素-たんぱく質換算係数は 5.21 - 11.79、RQ は 0.71 - 0.88 と大きな幅を持ち、個々のアミノ酸は大きく異なる窒素含有率や RQ を持つことがわかる。また、たんぱく質を構成するアミノ酸の構成は作物ごとに異なる。よって、一部の作物については CHNO の元素分析を行うことでたんぱく質を表わす化学式を変えながら物質収支計算を行う必要がある。

### 3. 2 ダイナミックモデルの修正

植物による可食部および非可食部の生産やガス交換をシミュレーションするためには、植物の反応がその年齢、サイズ、環境に大きく依存していることから、短期的な環境の影響だけではなく、長期的な環境の影響も考慮したダイナミックモデルが必要となる<sup>7)</sup>。この要求を満たす植物成長モデルの候補の1つとしてエナジーカスケードモデル(ECM)<sup>11,12)</sup>が考えられる。ECMは3つの段階からなる。第一段階は、光すなわち光合成有効光量子束(PPF)が植物群落に吸収される過程である。第二段階は、光合成の間に炭素がショ糖に変わるために PPF の量子収量のエネルギーが使われる過程である。第三段階は、ショ糖のほとんどが暗呼吸の間にバイオマスに変わる過程である。しかしショ糖の一部は燃えてエネルギーを発生

し二酸化炭素となる。

総光合成  $P_g[\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}]$  は、光合成有効光子量子束  $PPF[\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}]$ 、吸収された  $PPF$  の比率  $A[-]$ 、群落量子収量  $Q[\mu\text{mol}/\mu\text{mol}]$  によって

$$P_g = A \cdot Q \cdot PPF \quad \text{明期} \quad (11)$$

$$P_g = 0 \quad \text{暗期} \quad (12)$$

と表せる。このとき純光合成  $P_n[\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}]$  は、

$$P_n = P_g - R = C \cdot P_g = C \cdot A \cdot Q \cdot PPF \quad \text{明期} \quad (13)$$

$$P_n = -R \quad \text{暗期} \quad (14)$$

となる。ここで、 $C[\mu\text{mol}/\mu\text{mol}]$  は純光合成の総光合成に対する比率であり  $C = 1 - R / P_g$  と表わせ、 $R[\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}]$  は呼吸であり  $R = P_g - P_n = (1 - C) P_g = (1 - C) A Q PPF$  と表せる。

このとき炭素増加量  $DCG[\text{mol}/\text{m}^2 \text{ d}]$  は

$$DCG = k \cdot (H \cdot P_g - 24 \cdot R) \quad (15)$$

と表せる。ここで、 $k$  は単位を  $\text{h } \mu\text{mol}$  から  $\text{s mol}$  に変換するための係数、 $H$  は明期の時間  $[\text{h}/\text{d}]$  である。しかし、 $H$  が  $24 (R / P_g)$  より小さいとき  $DCG$  が負となるので、これを修正するために 24 時間の炭素利用効率  $C_{24}$  を導入する。

$$C_{24} = \frac{H \cdot P_g - 24 \cdot R}{H \cdot P_g} \quad (16)$$

ただし、大豆・ピーナツなどの場合には

$$C_{24} = C_{24\text{MAX}} \quad t \leq t_Q \quad (17)$$

$$C_{24} = C_{24\text{MAX}} - (C_{24\text{MAX}} - C_{24\text{MIN}}) \left( \frac{t - t_Q}{t_M - t_Q} \right) \quad t_Q < t \leq t_M$$

と表す。ここで、 $C_{24\text{MAX}}$  と  $C_{24\text{MIN}}$  はそれぞれの作物に固有の定数である。このとき、 $DCG$  は

$$DCG = k \cdot C_{24} \cdot H \cdot P_g = k \cdot C_{24} \cdot H \cdot A \cdot Q \cdot PPF \quad (18)$$

となる。よって、 $CGR$  は

$$CGR = MW_C \cdot \frac{DCG}{BCF} \quad (19)$$

と表わせる。 $MW_C$  は炭素の分子量、 $BCF$  はバイオマスに対する炭素の比率を表わす。この  $CGR$  を 0 から  $t_M$  まで積分すれば全体のバイオマス、 $t_E$  から  $t_M$  まで  $XFRT(t_E)$  以降の可食部比率を掛けて積分すれば可食部のバイオマスとなる。

さらに、 $A$ 、 $Q$  は式(20),(21)のように表せる。 $A$  は時間  $t$ 、群落によって日が当たらなくなる時間  $t_A$  の関数である。

$$A = A_{\text{MAX}} \left( \frac{t}{t_A} \right)^n \quad t < t_A \quad (20)$$

$$A = A_{\text{MAX}} \quad t \geq t_A$$

ここで、 $A_{\text{MAX}}$  は 0.93、 $n$  は作物に固有の定数である。 $t_A$

は作物特有の  $PPF$  と  $[\text{CO}_2]$  からなる多変数多項式回帰関数により決まる。

また、群落量子収量  $Q$  は式(21)のように定義される。

$$Q = Q_{\text{MAX}} \quad t \leq t_Q \quad (21)$$

$$Q = Q_{\text{MAX}} - (Q_{\text{MAX}} - Q_{\text{MIN}}) \left( \frac{t - t_Q}{t_M - t_Q} \right) \quad t_Q < t \leq t_M$$

ここで、 $t_M$  は収穫もしくは成熟する時間、 $t_Q$  は作物の老化が始まる時間である。 $Q_{\text{MAX}}$  は作物特有の  $PPF$  と  $[\text{CO}_2]$  からなる多変数多項式回帰関数により決まる。他方、 $Q_{\text{MIN}}$  は作物特有の定数である。

次に、表 7 に示された設定条件のもとで ECM を用いてイネの成長をシミュレーションした。この設定条件は文献(7)に示された実験条件(RICE B 700 $\mu\text{L}/\text{L}$ , 28 $^\circ\text{C}/21^\circ\text{C}$ ) とほぼ同じである。純光合成速度の計算結果と実験結果<sup>7)</sup>の比較を図 1、バイオマスの計算結果と実験結果<sup>7)</sup>の比較を図 2 に示す。図 1 より純光合成速度の変化は、ECM と実験の間で大きく異なることがわかる。また、純光合成速度の最大値は、ECM と実験の間にかかなりの違いが見られる。図 2 よりバイオマスの変化は、ECM と実験の間ではほぼ一致したが、実験の方が ECM より少しバイオマスが多いことがわかる。今回の結果はある特定の栽培条件で計算されたものであり、今後さらに光と二酸化炭素の変動に対する特性について ECM と実験の一致について検討が必要である。

#### 4. 結言

従来の生化学量論では、たんばく質の元素組成が正確でないためたんばく質の多い作物の酸素と二酸化炭素の収支を正確に計算できないことが実験データから確認された。その対処法として、たんばく質が多く含まれる作物のたんばく質のモデル式を変える必要がある。

植物の年齢・サイズ・環境(光・温度・ $\text{CO}_2$  濃度)の変動の影響が考慮されたダイナミックモデルの 1 つとしてエナジーカスケードモデルについて検討を行った。ある特定の栽培環境では計算と実験の結果がよく一致した。さらに、環境が変動した場合の植物の反応特性について ECM と実験の一致について検討が必要である。

#### 引用文献

1. C. Finn, Dynamic System Modeling of Regenerative Life Support Systems, SAE 1999-01-2040, 1999
2. C. Finn, K. Meyers and B. Duffield, Dynamic Model of the BIO-Plex Air Revitalization System, SAE 2001-01-2318, 2001
3. H. Miyajima, Y. Ishikawa, A. Ashida and K. Nitta, Development of Simulation Model and its Application to an Integration Test Project of CEEF, SAE 2000-01-2334, 2000
4. H. Miyajima, K. Abe, Y. Ishikawa, A. Ashida and K. Nitta, Simulation to Support an Integration Test Project of CEEF, SAE 2001-01-2130, 2001
5. T. Volk and J. Rummel, Mass Balances for a Biological Life Support System Simulation Model, Adv. Space Res. Vol. 7 No. 4, pp.(4)141-(4)148, 1987
6. Y. Tako, R. Arai, K. Otsubo and K. Nitta, Integration of Sequential Cultivation of Main Crops and Gas Water

Processing Subsystems Using Closed Ecology Experiment Facilities, SAE 2001-01-2133, 2001

7. Y. Tako, R. Arai and K. Nitta, Analysis of Photosynthesis and Biomass Allocation for Simulation of Edible and Inedible Biomass Production and Gas Exchange of Main Crops within Ceef, SAE 2002-01-2484, 2002
8. 北岡正三郎, 入門栄養学, 倍風館, 1985
9. 菅野道廣 他, 栄養学総論, 朝倉書店, 1980
10. 香川芳子, 五訂食品成分表 2002, 女子栄養大学出版部, 2002

11. H. Jones and J. Cavazzoni, Top-Level Crop Model for Advanced Life Support Analysis, SAE 2000-01-2261, 2000

12. H. Jones, J. Cavazzoni and P. Keas, Crop Models for Varying Environmental Conditions, SAE 2002-01-2520, 2002

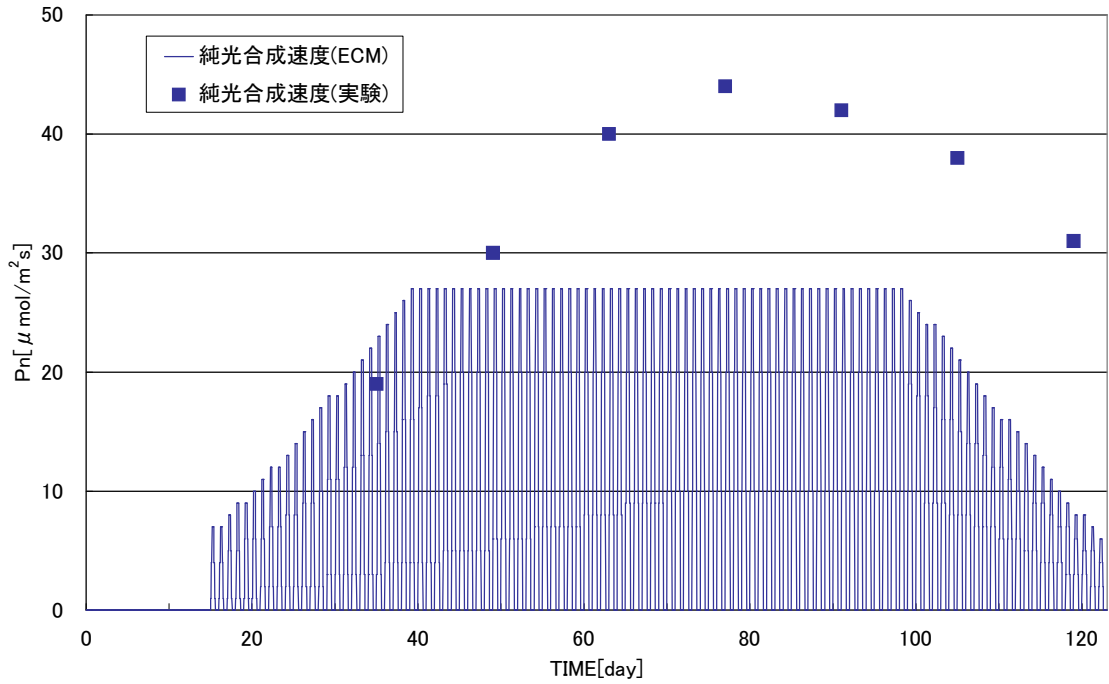


図1 イネ群落の純光合成速度の変化

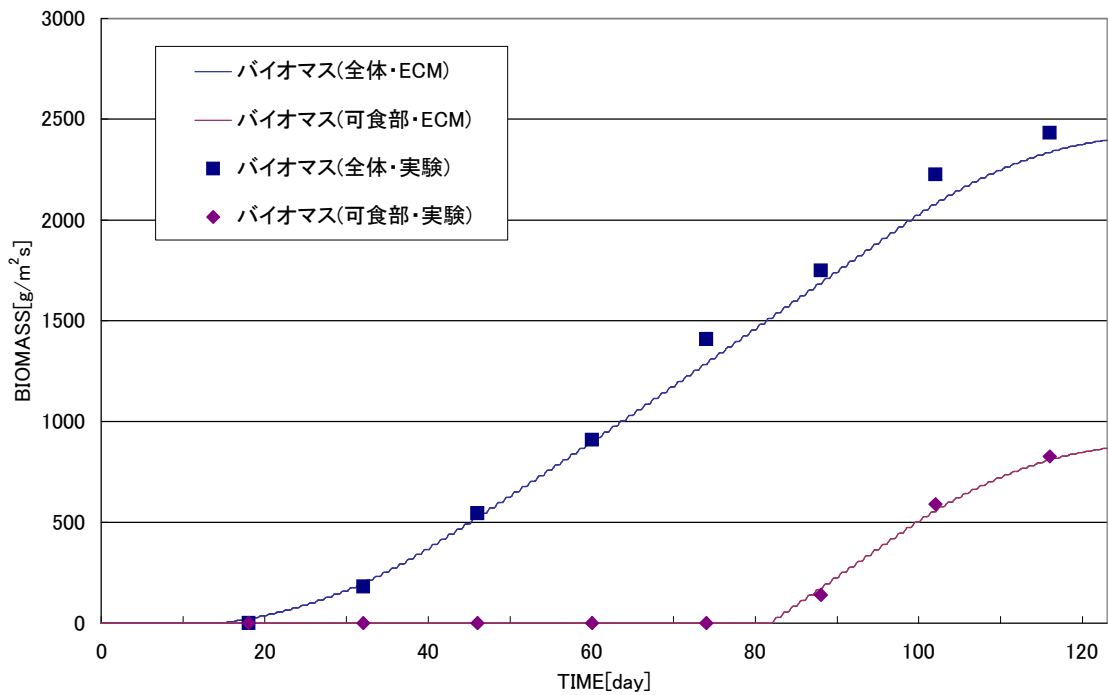


図2 イネ群落のバイオマスの変化

表1 生化学量論による栄養素の化学式<sup>5)</sup>

	栄養素	近似した物質	近似した化学式
可食部	たんぱく質	アミノ酸	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> ON
	脂質	パルチミン酸	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
	炭水化物(糖質)	ブドウ糖	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
	炭水化物(繊維)	セルロース	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>
非可食部	粗たんぱく質	アミノ酸	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> ON
	粗脂質	パルチミン酸	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
	可溶性無窒素物	ブドウ糖	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
	粗繊維	セルロース	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>

表2 栄養素の呼吸商

	式による RQ[-]	文献 <sup>8,9)</sup> による RQ[-]
たんぱく質	0.875	0.8 - 0.83
脂質	0.696	0.7 - 0.71
炭水化物(糖質)	1.0	1.0
炭水化物(繊維)	1.0	1.0

表3 窒素-たんぱく質換算係数<sup>10)</sup>

分類	食品	換算係数
穀類	米(玄米、精白米)	5.95
	小麦全粒粉、大麦、ライ麦	5.83
	小麦粉	5.70
	そば	6.31
豆類	落花生	5.46
	大豆	5.71

表4 食品成分分析データ

		たんぱく質 [%]	脂質 [%]	糖質 [%]	繊維 [%]	灰分 [%]
イネ	可食部	10.1	3.1	79.7	0.8	1.4
	非可食部	9.6	1	48.1	22.3	8.2
ダイズ	可食部	33.9	24	27.9	3.4	5.8
	非可食部	8.6	2	47.1	23.4	11.6

表5 理論値と実験値の RQ の比較

	生化学量論			実験 <sup>6)</sup>		
	CO <sub>2</sub> [mol]	O <sub>2</sub> [mol]	RQ [-]	CO <sub>2</sub> [N l]	O <sub>2</sub> [N l]	RQ [-]
イネ	38.66 *1	40.36 *1	0.958	800.4	827.0	0.968
ダイズ	17.42 *2	19.79 *2	0.880	391.3	494.1	0.792

\*1 イネ (成長量 14.2g/day/m<sup>2</sup>, 収穫指数 0.394, 栽培面積 30m<sup>2</sup>), 灰分を除く\*2 ダイズ (成長量 6.5g/day/m<sup>2</sup>, 収穫指数 0.434, 栽培面積 30 m<sup>2</sup>), 灰分を除く

表6 必須アミノ酸の式(7)による呼吸商と窒素-たんぱく質換算係数

アミノ酸	分子式	換算係数[-]	呼吸商 RQ[-]
イソロイシン	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	9.36	0.73
ロイシン	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	9.36	0.73
リジン	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5.21	0.71
メチオニン	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub> S	10.64	0.75
フェニルアラニン	C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	11.79	0.85
スレオニン	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub>	8.50	0.88
トリプトファン	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	7.29	0.87
バリン	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	8.36	0.75

表 7 ECM のパラメーター一覧

$PPF$ [ $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$ ]	1400 (75%) *1	$t_E$ [d]	82
$\text{CO}_2$ [ $\mu\text{mol}$ ]	700	$t_M$ [d]	123
$A_{MAX}$ [-]	0.93	$t_Q$ [d]	98
$Q_{MIN}$ [ $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$ ]	0.01	$H$ [h]	14
$C_{24MAX}$ [-]	0.64	$MW_C$ [g]	12
$C_{24MIN}$ [-]	0	$n$ [-]	1.5
$XFRT$ [-]	0.98	$k$ [s mol/h $\mu\text{mol}$ ]	0.0036
$BCF$	0.43	植付け[d]	14

\*1 光強度は 2h (25%), 2h (50%), 6h (75%), 2h (50%), 2h (25%)とする。