

視覚的シミュレーションの勧め

高見晋一

(近畿大学大学院農学研究科)

1. はじめに

わが国の農学・生物学分野にシステムダイナミクスに基づくコンピュータシミュレーション技術が紹介されてから(高倉, 1977), もう30年以上になる。それ以来, この方法の重要性は広く認識されるようになってきた。それは, 実験が不可能あるいは困難な問題へのアプローチに欠かすことができない。また, 実験が可能な場合でも, その設計に, そして, 結果の一般化に大きな役割を果たす。しかし, そのような認識にもかかわらず, またすぐれたテキスト(Takakura and Son, 2004)等の刊行にもかかわらず, いまだにこの方法が十分, 普及しているとはいえない。

普及を妨げている原因としては, 2つのことが考えられる。一つは, われわれの取り扱う対象が通常, 熱と物質の流れを介した, 多くのフィードバックを含む複雑なシステムであることだ。したがって, このシステムの構造をどうとらえるかが第一の関門となる。多くのプログラミング言語ではこの構造化が容易ではない。われわれが対象とするシステムでは, 普通, 物質とエネルギーの流れが中心であるのに, プログラミングのフローチャートは情報の流れ(計算手順)を取り扱うからだ。もう一つは, 数理解析あるいは数値計算上の問題である。多くの生物系学徒にとって, 現象を数式(通常, 微分方程式)で表し, それを計算機で処理できるようにプログラム化することは, 相当な困難をとまなう(注1)。

このような困難性は, 近年, パソコン上で手軽に操作出来るシミュレーションソフトの開発・普及によって, 著しく軽減されてきた。その代表的なものの一つがここで取り上げるSTELLAである(注2)。STELLAは次のような特徴を持つ。第一に, 通常の実験系と同様に, “装置”(モデル)を視覚的に組み立て, 直感的に操作できる。そのため, 計算を行なうというより, 通常の実験を行なう感覚に近い。第二に, “装置”の部品が少なく, 規則が簡単で

ある。そのため, 組み立て・操作が容易である。第三に, この組み立て・操作作業を通じて, 要素間の種々のつながりを考察し, 試すことができる。そのため, 対象を一つの「システム」として扱うことが容易になる。システム的な思考が, 自然に誘発され, 自由自在に展開できる。第四に, 数値計算のための差分化も, それを解くためのプログラミングも必要としない。そのため, 外因と内部構成要素との関係, 構成要素間の関係等に関する仮説の構築といった, 数値モデル作成上の, ひいては問題解決のための, 本質的な作業に力を注ぐことができる。

本稿では, 以上のことを例証するため, 2つの事例を紹介する。一つは, 「ソーラーポンプ(太陽熱水輸送・蒸留装置)の性能評価」(市川, 2010)である。これは, フィードバックのないごく単純な物理システムである。このような単純な対象であっても, STELLAが実験の設計, 取りまとめに有用であることを示す。もう一つは, 「水資源変換型」の植物生産モデル(高見, 未発表)である。STELLAによって, システムの構造化とフィードバックの取り扱いが容易に行なえることを示す。

2. ソーラーポンプの性能評価モデル

「ソーラーポンプ」はベラニ型アトモメータ(蒸発計)を蒸留装置に応用したもので, 水を汲み上げながら, 蒸留を行なうことが出来る(市川ほか, 2011)。先端にポーラスカップを装着した導水・蒸発管と凝結器が基本的な構成要素で, 導水・蒸発管を水で満たし, 水源に浸す(市川ほか, 2011のFig. 1)。すると, ポーラスカップ表面から蒸発が生じるので, それをガラス球で凝結させて蒸留水として回収する。

2.1 モデルの構成

時刻 t における水源水量, 凝結器内付着水量, および造水量をそれぞれ, $R(t)$, $C(t)$, および $D(t)$ とする。また, 水源からの単位時間あたり蒸発量を FC , 凝結器から回収槽への流出量を FD , そして以上の経路から系外へのリーク量を FL で表す。すると, STELLAでは, 現存量はストック(□のアイコン)で, 「流量」はフロー(バルブつき矢印)で表すので, 装置との対応から, 直感的に図1のようなマップを描くことができる(このマップでは $R(t)$

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/agrmet/sk/2011/H-1.pdf>

2011年9月29日掲載

Copyright 2011, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

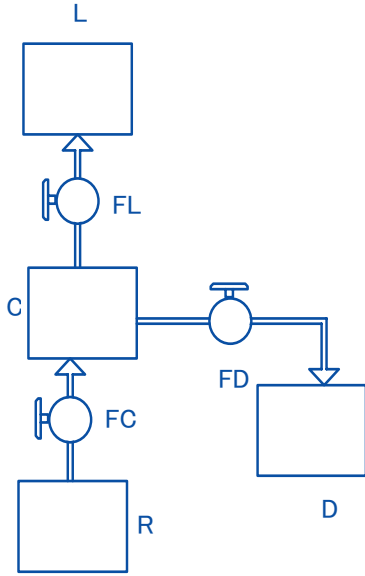


図1 ソーラーポンプにおける貯留量(R, C, L, D)とその間の流量(FC, FL, FD)との関係

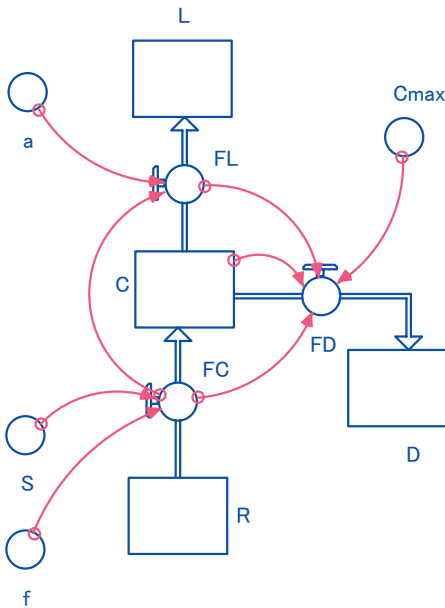


図2 図1に各流量(フロー)をコントロールする要因(a, S, f, Cmax)をコンバーターで付け加えたマップ(市川2010)。

などをRと記す)。

この図をかくことは、実は以下の3つの収支式を書くことと同じである。いいかえれば、STELLAでは式(1)~(3)をプログラミングするかわりに図1を描けばよい。

$$R(t) = R(t - dt) - FCdt \quad (1)$$

$$C(t) = C(t - dt) + (FC - FL)dt - FDdt \quad (2)$$

$$D(t) = D(t - dt) + FDdt \quad (3)$$

ただし、ここで dt は収支計算を行なう時間間隔で、この間、各フロー (FC , FD および FL) は一定とする。すると、各ストックの初期値とフローの値を与えることによって、一定時間間隔 dt 毎に各ストックの値が計算される。

次は、フローを決める(図2)。まず、 FC については、日射量に比例すると仮定しよう。すると、比例定数を f として次のように与えられる。

$$FC = f \cdot S \quad (4)$$

そこで、STELLA では、 f と S をコンバータのアイコン(○)で FC の側に置き、そこから→で FC のバルブとつなぐ。→の向きは影響を及ぼす変数から影響を受ける変数に向ける。そして、バルブの中に式(4)を書き込む(注3)。次に、リーク FL については FC に比例すると仮定するのが、ありそうでかつもっとも簡単な関係だ。さらに、 FD についてはリークを差し引いた残りについて、次のように仮定するのが、これまたありそうでかつもっとも簡単な関係だ。凝結器内の凝結量がある一定量 (C_{max}) になるまでは、正味流入する水蒸気 ($FC - FL$) は全て凝結器内にたまり、それを越えると全て回収槽に溜るとする関係である。これは、よく使われる「バケツモデル」にほかならない(注4)。以上のことを数式で表すと次のようになる。

$$FL = a \cdot FC \quad (5)$$

$$FD = (FC - FL) - [C_{max} - C(t - dt)]/dt \quad (6)$$

FC の場合と同様、これらの式中のパラメータをコンバータでマップに表し、かつフローをそれぞれ式(5)と(6)で定義すると、モデルは一応、完成である(図2)。すると、このモデルに、3つのパラメータ値 (a , f , C_{max}) と日射量 S および各ストックの初期値を与えることによって、各ストックの時間的変化が計算できる。

2.2 パラメータ値の決定

パラメータは、装置の寸法、構造、材質等に応じて、それぞれの装置に固有の値をとると考えられるので、実験によって決めなければならない。では、何をどう測れば求まるだろうか。まず、 C_{max} は凝結器に最終的に残っている水量に等しいとみなしてよいだろう。それ故、凝結器の

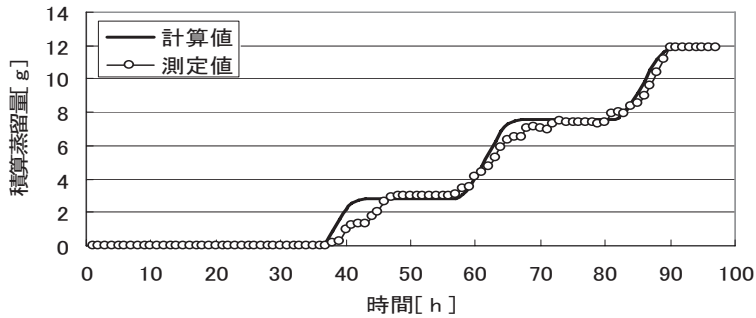


図3 蒸留量Dについての計算値と測定値の時間変化(市川, 2010)

最初と最後の質量差を測ればよい。次に、 f は式(4)で S と FC が分れば求まる。しかし、この式で一定時間毎に f をもとめてその平均を取るの賢明ではない。それよりも、この式を積算して得られる次の関係式を使えば、一気に安定した平均的な値が得られる。

$$f = \Sigma FC / \Sigma S = \{R(t) - R(0)\} / \Sigma S \quad (7)$$

ここで、 ΣFC は式(1)から分るように、貯水槽の最初と最後の質量差 $\{R(t) - R(0)\}$ 、つまり貯水槽から蒸発で失われた水量に等しい。最後に、 a は式(5)から求まる。ただし、これもこの式を積算した関係、つまり積算リーク量と積算蒸発量の比として求めればよい。

$$a = \Sigma FL / \{R(t) - R(0)\} \quad (8)$$

以上のような用意をした上で、3日間野外で蒸留実験を行ない、日射量と気温を測定しながら、各ストックの時間変化を測定した。その結果、貯水槽から蒸発した水は 35.1 g ($\{R(t) - R(0)\}$)で、そのうち 4.3 g が凝結器に残存し、 0.8 g (ΣFL)が系外へリークして失われ、結局、残り 30.0 g ($D(t)$)が蒸留水として回収された。また、この間の積算日射量は 48.6 MJ/m^2 であった。したがって、各パラメータの値は、 $C_{max} = 4.3 \text{ g}$ 、 $f = 0.722 \text{ g}/(\text{MJm}^{-2})$ 、 $a = 0.023$ と得られる。

2.3 モデルの検証

パラメータの値を含めたモデルの妥当性を同様の野外実験で調べた。その結果、上記のパラメータ値と日射量の測定値 (Table 5, 市川ほか, 2011) から計算した回収蒸留量 26.7 g は測定値 11.9 g を大幅に上回った。そこで、この測定値が再現出来るように f を求め直すと $f = 0.377 \text{ g}/(\text{MJm}^{-2})$ となった。そして、この値を用いると、積算蒸留量の時間変化も正確に再現出来ることが認められた (図3)。

パラメータ f が2.2で得られた値の半分ほどになったのは、気温の影響と考えられる。測定期中の平均気温は約

13°C で、2.2の実験時よりも 10°C ほど低かった。気温が f を左右することは、実は、一般の太陽熱蒸留装置で既に分っている。それにもかかわらず、2.2の段階で f を気温の関数(注5)として求めておかなかったために、ここでの検証は不完全なものになってしまった。もし、上記のモデルで、気温の影響を組み込んだ f 値を用いて測定値と同じ蒸留量が得られれば、任意の地点の日射と気温を使って、その地点での性能が評価出来る。

3. 「水資源変換型(注6)」植物生産モデル

はじめに物質生産過程をモデル化する。枯死・脱落などが無いとすれば、ある時点の現存量(t/ha) (注7)は、単位時間当りの純生産量 NPP ($\text{t}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$)というフローが流れ込むストックとみなすことができる。したがって、図4のようなマップを描けばよい。すでに2で述べたように、STELLAではこの図を描くことによって、ある時間間隔を dt として次の計算が行なわれる。

$$\begin{aligned} \text{ある時点の現存量} &= \text{その前の時点の現存量} \\ &+ NPP \cdot dt \end{aligned} \quad (9)$$

つぎに行なうのは、やはり2と同じく、 NPP を決めることである。ここでは、 NPP がよく知られた、蒸散(mm/yr)に比例する(たとえば、Cambell and Norman, 1998)という関係式を用いる。

$$NPP = WUE \cdot (\text{蒸散}/\text{飽差}) \quad (10)$$

ここで比例定数 WUE は水利用効率である。2と同じく、右辺の量を図に付け加え、そこから矢印を NPP にのぼして式(10)を書き込めば、物質生産過程のパーツが一応完成する。しかし、野外で植生からの平均的な蒸散量を求めるのは非常に困難だ。そこで、ここでは、まず比較的求めやすい蒸発散量(mm/yr)を求め、つぎにそれから蒸散量を分離することにする。なお、 WUE と飽差の単位は

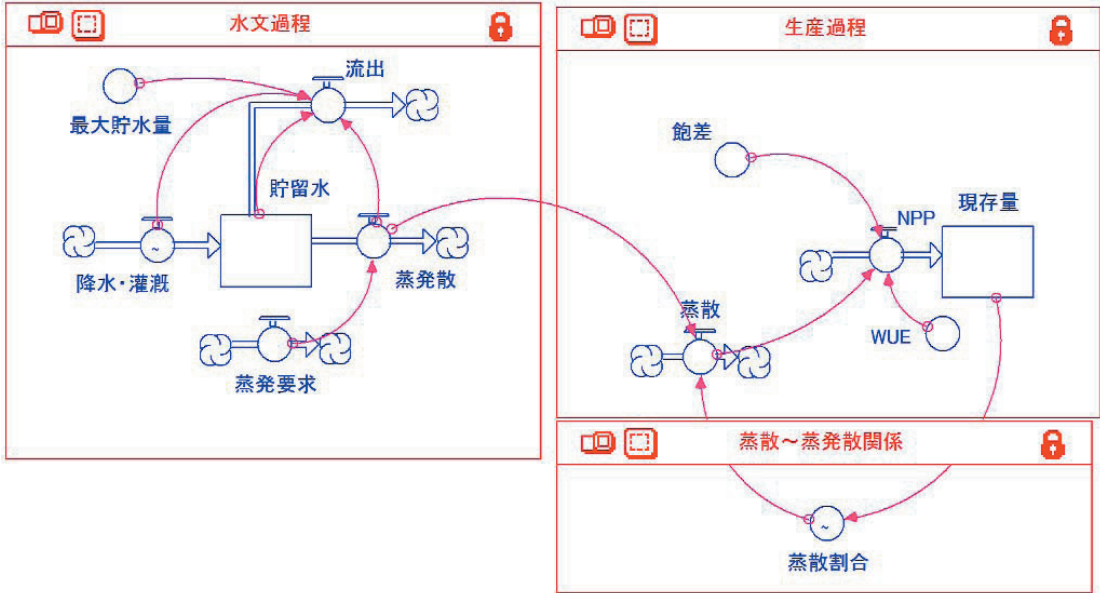


図4 「水資源変換型」バイオマス生産モデル

表2に記した通りである。

蒸発散を決める過程(水文過程)は、次のように組み立てる。まず、マップ画面に土壌の貯水量というストックをおき、それへの流入フロー(降水・灌漑)と流出フロー(蒸発散と流出)に付け加える。次に各フローを決める。一つは流出で、これは貯水量が限度(最大貯水量)をこえると生じるので、次式で与える。これらストックの単位はmm、フローの単位はmm/yrである。

$$\begin{aligned} \text{流出} = & \text{降水} \cdot \text{灌漑} - \text{蒸発散} \\ & - (\text{最大貯水量} - \text{現在の貯水量}) / dt \end{aligned} \quad (11)$$

つまり、降水・灌漑から、蒸発散を引き、さらに土壌がその時点で最大限貯留できる量を差し引いた分が流出するとする。これは2で出てきたバケツモデルに他ならない。二つ目は蒸発散で、蒸発要求(可能蒸発)と次式で関係づける。

$$\text{蒸発散} = \text{蒸発要求} \quad (12)$$

以上でモデルの構造はできたので、貯水量の初期値、および一つのパラメータ(最大貯水量)と2つの境界条件(降水・灌漑、蒸発要求)に値を与えれば、一定時間(dt)ごとの貯水量が次式(注8)で自動的に計算される。

$$\begin{aligned} \text{貯水量}(t) = & \text{貯水量}(t - dt) \\ & + [(\text{降水} \cdot \text{灌漑}) - \text{蒸発散} - \text{流出}] \cdot dt \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、蒸発散の決め方について補足が必要である。蒸発散は、式(12)で与えたからといって、常に蒸発要求に等しくなるのではない。実は、次のように決められている。

$$\text{蒸発散} = \text{Min} \{ \text{可能水供給量}, \text{蒸発要求} \} \quad (14)$$

つまり、蒸発散は蒸発要求(可能蒸発)が「可能水供給量」を下回れば蒸発要求に、上回れば可能水供給量に等しくなるのだ。これは、式(11)～(13)が同時に成り立つという条件のもとに、貯水量というストックが負の値を取らないよう予めセットしておいたからである。こういったことができるのはSTELLAの特長の一つだが、ここは分かり難いかもしれない。その場合は、式(12)の代わりに、式(14)を使えばよい。なお、ここで、可能水供給量とは次式で定義される量のことである。

$$\begin{aligned} \text{可能水供給量} = & \text{降水} \cdot \text{灌漑} \\ & + [\text{貯水量}(t - dt) - \text{貯水量}(t)] / dt \end{aligned} \quad (15)$$

降水・灌漑だけでなく土壌水分が減少する分も勘定に入っていることに留意しなければならない。

最後に、蒸発散から蒸散を分離するために、蒸散割合(蒸散/蒸発散)という量を導入する。すると、この量を

表1 現存量と蒸散割合(蒸散/蒸発散)との関係

現存量(t/ha)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
蒸散割合	0	0.305	0.700	0.785	0.895	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

表2 環境条件とシステム特性値

年	環境条件			システム特性値	
	蒸発要求 (mm)	降水プラス灌漑 (mm)	飽差 (g/m ³)	WUE #	最大貯水量 (mm)
1	1000	100	20	0.5	0.0
2	1000	200	20	0.5	0.0
3	1000	300	20	0.5	0.0
4	1000	400	20	0.5	0.0
5	1000	500	20	0.5	0.0
6	1000	600	20	0.5	0.0
7	1000	700	20	0.5	0.0
8	1000	800	20	0.5	0.0
9	1000	900	20	0.5	0.0
10	1000	1000	20	0.5	0.0
11	1000	1250	20	0.5	0.0
12	1000	1500	20	0.5	0.0
13	1000	2000	20	0.5	0.0

((g/m³)(t/ha)/mm)

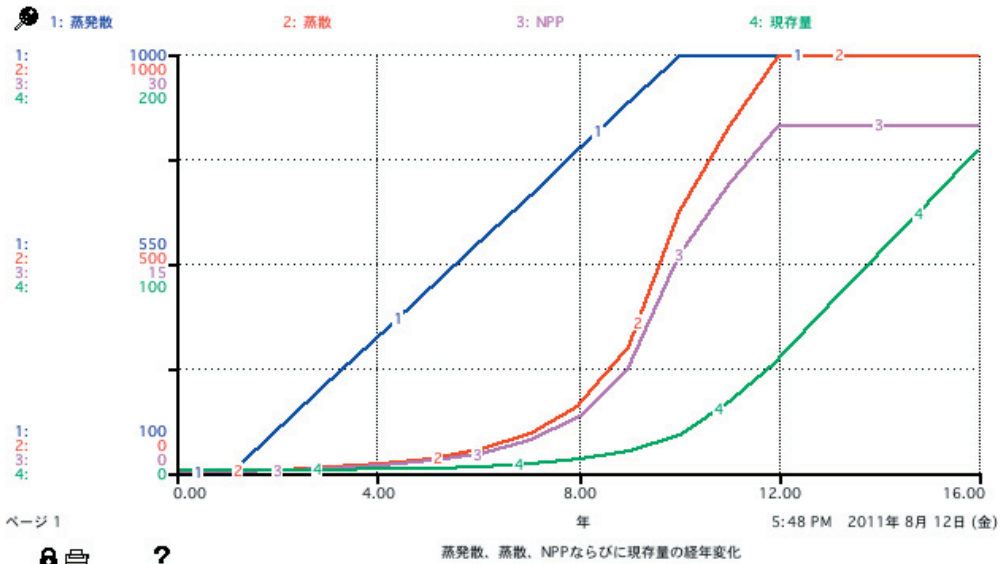


図5 蒸発散, 蒸散, NPPならびに現存量の経年変化を示す出力画面

蒸発散に乗じれば, 蒸散が得られる(図4)。蒸散割合は現存量の関数として与えることにしよう。そのおおよその形は現存量が0のときの0から次第に増大し, 現存量がある閾値を超すとほぼ1に近い一定の値に落ち着く(つまり, 蒸発散はほとんど全て蒸散で占められる)としてよいだろう。具体的にどのような関数形をとるかは経験的に決

めなければならない。ここでは, ありそうで簡単な関係を想定した。このように, 変数間の関係を式ではなく, 図あるいは数値データとして簡単に与えることができるのも STELLA の特長である。

3.2 シミュレーション

こうして得られたモデルを用いて, 表1のような蒸散

割合をもつ仮想的な永年性作物 (あるいは樹木) についてシミュレーションを行なった。成長に伴って年々水供給量 (降水+かんがい水量) を増やし, その他の環境条件は一定とした (表 2)。12 年目より後の年は, 12 年目と全て同じにし, 16 年後までのシミュレーションを行なった。その結果 (図 5), 12 年目までは現存量が指数関数的に, それ以降は直線的に増加することが認められた。

このシミュレーションでは, 植生の発達につれて, 降水プラス灌漑で十分な水を与えた。そのため, 蒸発要求が蒸発散だけでなく蒸散をも律速するまでは, 植生は必要なだけ水を蒸散として使うことができた。このように, はじめのうちは, 資源の制約がないため, 指数関数的ないいかえれば複利的な生長が続いた。しかし, その後は蒸発要求の制約のため一定量の水しか蒸散で使えず, 直線的な生長になったことが分る。

以上のように, シミュレーションによって, 資源量と生産との間の一般的な関係が再現できた。したがって, このモデルは基本的には妥当だと考えられる。ただし, これでもモデルの検証をしたことにはならない。本当の検証を行なうには, 環境条件を測定しながら, 蒸散割合を決定する実験によらなければならない。

4. おわりに

物質生産や生態系といったようなシステムを取り扱うにはどうしてもシステムダイナミックス的な考え方が必要である。統計的方法では, フィードバックが取り扱えない。また, ここで取り上げたようなシミュレーションソフトを使うのが得策である。多くの人にとって, 微分方程式から出発し汎用言語を使うシミュレーションに比べて, ずっと分りやすく簡便である。さらに, STELLA では視覚的・直感的にモデル化を進めることができる。

実験装置をくむ場合, パーツ毎にその作動を確認しながら作業を進める。全部組み上げてチェックするのでは遅い。そこで不具合が出てきたら, どこがおかしいのかを特定するのが大変だからだ。同様にモデルを作成する場合も一步一步, チェックしながら進めることが大事である。2 のケースを例にとると, 図 1 の段階で $FL = FD = 0$ とし, FC に暗算で計算出来るような簡単な値を与えて, 一定時間後の R の減少量が C の増加量に等しいかどうかを確認する (①)。次に, 式 (4) の段階で, $f = 1.0$ として S に①のチェックで使った簡単な値を入れて①と同じ結果になるかどうかを確認する。さらに, 式 (6) の段階では, $C_{max} = 0$ として, C が初期値のまま一定であることを確認するなどといった具合である。STELLA では, 3 種の出力デバイスによって, 結果がすぐに数値あるいは図として示されるので, こういったチェックが簡単にできる。

STELLA は isee systems 社の製品である。そのホームページから (<http://www.iseesystems.com/>) 無料の試用版が入手できる。チュートリアルや豊富な例題も用意されている。システムダイナミックスの生みの親 J.W.Forrester は, 今年 93 歳, いまも元気で STELLA を使って子ども達にシステムの思考法を教えているそうだ。なお, Vensim社 (<http://www.vensim.com/software.html>) からはもっと廉価なソフトが出されている。STELLA とほぼ同じような機能をもつという。こちらは教育目的での使用が無償だ。どちらも日本語版が利用出来る。

注

- (1) 微分量は分り難い。私たちがふつう目にしたり測ったりするのは積分量だからだ。その上, 物理科学で発達した方法では, 通常, 対象とするシステムの挙動を微分方程式で表し, それをある特定の条件下で解いて (積分して), 観測, 測定された挙動が再現されるかどうかを調べる。つまり, 一旦微分したものを, また積分して (あるいは差分を連続的に繰り返して) もとに戻すということを行なう。一般性の高い法則 (通常, 微分方程式で表される) を求めるのならそれも必要だが, 私たちが対象とする現象の多くについては, それは回り道だ。STELLA では最初から差分の積み重ねでストックの変化を追うことができる。
- (2) 他に同様のソフトとしては Berkley Madonna などがある (高倉, 2009)。
- (3) STELLA では, 式を入力する画面を開くと, 関連の変数が現れるので, 必要なものを選び, 演算記号で結ばばよい。
- (4) 小さな孔のあいたバケツに水道から水を入れる場合を想定しよう。流入量が孔から漏れる量より多ければ, その多い分は全てバケツに溜り, 一杯になるとそれ以降の正味流入量は溢れだす。
- (5) 実際には式 (4) の代わりに, FC を S と気温 T の関数, つまり $FC = e \cdot T \cdot S$ とし, この比例定数 e をパラメータとした方がよいかもかもしれない。
- (6) 植物は吸収した二酸化炭素量, 日射量, 窒素量などの資源をバイオマスに変換する。したがってバイオマスの生産量は吸収資源量に比例する。一方, 水はほとんどが素通りし, バイオマスに変換されるわけではない。しかし, バイオマス生産量はやはり吸収量に比例するので, 便宜上「資源変換」型として取り扱う。
- (7) ここでは, 簡単のために, たとえば蒸散という現象を表す術語でもって, 蒸散フラックス密度という量を表すことにする。また, その量を蒸散といったように記号ではなく, 術語そのもので表す。

(8) 2 の例でみたように、この関係はマップを描いた段階で自動的に設定される。

引用文献

Cambell, G. S. and Norman, J. M., 1998: *Introduction to Environmental Biophysics*, Springer-Verger, New York. 286pp.

市川寿人, 2010: 多孔質体による太陽エネルギーを利用した蒸留・水輸送に関する研究.

金沢大学自然科学研究科博士論文, 金沢大学, 金沢. 83pp.

市川寿人・高見晋一・関 平和, 2011: 多孔質体による太陽エネルギーを利用した蒸留・水輸送法の可能性. *生物と気象*, **11**, 23–30.

高倉 直 (監訳), 1977: *生物ダイナミクス—そのシミュレーション技術—*. 講談社, 東京. 176pp.

高倉 直, 2009: 農学・生物学におけるコンピュータシミュレーション (1) 農業及び園芸 **84**, 305–308.

Takakura, T. and Son, J. E., 2004: *Simulation of Biological and Environmental Processes*. Kyushu Univ. Press, Fukuoka. 139pp