

種子生産と蒸発の簡易モデルにみられる システムとしての共通性

高見晋一

(環境資源研究所)

1. はじめに

シミュレーションモデルの構築に当っては、システムの構造を設計することが「かなめ」である。「構造型」シミュレーション言語(注 1)を使うと、このかなめを容易におさえることが出来る。私達が対象とするシステムでは、大気、植生、土壌といったストック間を熱や物質のフローが移動する。「構造型」シミュレーション言語では、こういったシステムの物理的、実体的構造にそって、計算のアルゴリズムを組み立てるからである(高見, 2011)。本稿では、第一に、このような構造型シミュレーション言語のもつ特長について補足、敷衍する。その上で、第二に、この特長のもたらす利点を、既往の研究成果を用いて、例証する。最後に、この利点が、研究者として、教育者として、あるいは市民としての私達にもたらす意義について言及する。

構造型シミュレーション言語では、前稿でのべた 3 つの理由(高見, 2011)に加えて、さらに、「基本構造(モデル)」を用いることによって、構造化が容易になる。「基本構造」とは、分野や対象を横断する、共通性の高い構造をさす。例えば、指数関数的増加や指数関数的減衰といったものがそれだ。前者には、資源の制約がない条件下での生物個体数、複利預金の増加、うわさの伝搬など枚挙にいとまがない。一方、後者としては、放射性物質の崩壊や土壌有機物の分解などなど、これまたいくらでも例を挙げることができる。構造型シミュレーション言語ではこのような現象や対象が同じ「基本構造」をもつことが、ひと目で見てとれる。もっとも、このような簡単な素過程は、数式で表してもあまり違いはない。しかし、私達が通常、対象とする現象はさまざまな素過程から構成される複合過程である。した

がって、現象間の共通性を見いだすのは容易ではない。対象とする未知の現象の仕組みを既知の現象から類推するのは難しい。そこで、共通の素過程(単文)だけでなく、よく現れる「素過程の基本的な組み合わせ(複文)」を予め用意しておく。そして、実際の対象に応じて、これらの基本的な文を取捨選択して、パラグラフに、さらにはチャプターに組み立てていくのである。構造型シミュレーション言語ではこういった手順を容易に進めることができる。

本稿では、以上のことを、一見全く異なる 2 つの現象、蒸発と物質生産の種子への分配、のモデル化を通して例示する。なお、ここでは、構造型シミュレーション言語として STELLA を使う。構造型シミュレーション言語としては、他にもいくつかある(注 2)。STELLA を使うのは個人的な好み過ぎない。

2. 流入・汲み出し(ポンプ)モデル

2.1 共通基本モデル

はじめに、蒸発と種子生産に共通する基本的な仕組みとして流入・汲み出しモデルを提示する。実体モデルとしては、十分大きなタンクに水が流入し、それをポンプで汲み出すというモデル(図 1)を考えることができる。このモデルは、流入する水がタンクに貯まるという素過程と、タンク内の水が強制的に排水されるという、2 つの素過程が合わさった複合過程(「複文」)である。

図 1 において、 Fin を流入量、 $Fout$ を排水量、中間貯水量を $S(t)$ 、最終貯水量を $G(t)$ とすると、以下のような収支式が成り立つ。

$$\Delta S = (Fin - Fout)\Delta t \quad (1)$$

$$\Delta G = Fout\Delta t \quad (2)$$

ここで、 ΔS と ΔG は、それぞれ、 Δt 間の S と G の増加量である。したがって、 Fin と $Fout$ が決れば、初期値 $S(0)$ と $G(0)$ から出発して、任意の時刻の $G(t)$ 、 $S(t)$ を求めることができる。

<http://www.agrmet.jp/sk/2012/H-1.pdf>

2012 年 11 月 29 日 掲載

Copyright 2012, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

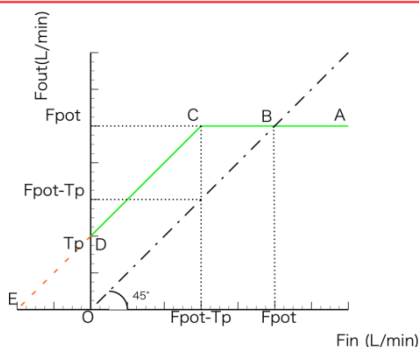
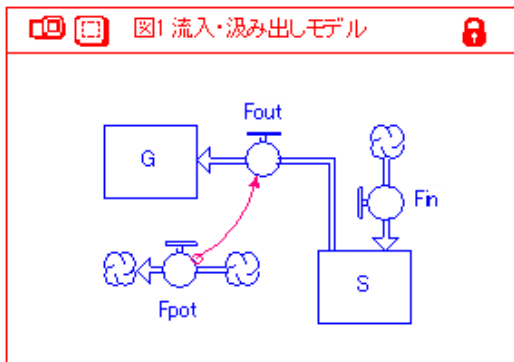


図2 Fin, Fpot の関数としての Fout

図1のようなシステムを想定すれば、 F_{in} とポンプの排水能力 F_{pot} とは独立に外部変数として与えることになる。すると、 F_{out} はこの2つの外部変数の、次のような関数となる(図2)。もし、水の供給速度が F_{pot} に見合うかそれ以上であれば、排水量はポンプの排水能力に等しくなる(図の線分 ABC)。すなわち、

$$F_{in} \geq F_{pot} + T_p \text{ ならば } F_{out} = F_{pot} \quad (3)$$

という関係が成立する。ただし、この式中の T_p は、ある時点における S の単位時間当り最大可能減少量 ($-\Delta S/\Delta t$) である(注3)。もう一つは、水の供給速度が F_{pot} 以下であれば、水の排水速度はそれに見合っただけになる(図の線分 CD)。すなわち、次の関係が成立する。

$$F_{in} < F_{pot} + T_p \text{ ならば } F_{out} = F_{in} + T_p \quad (4)$$

具体的には、中間貯水量がある程度以上あれば、流入量がゼロでもポンプの汲み上げ能力に見合っただけの排水量が維持出来る。しかし、貯水量がゼロとなり、流入量がポンプの汲み出し能力以下になると、ポンプは半ば空回りし、流入量に等しいだけの排水しかできない。

2.2 蒸発

上記の基本モデルにおいて、 F_{pot} を蒸発要求に、 F_{in} を降水量に、 S_i を土壌水分量に置き換え、そして F_{out} を蒸発量とみなせば、蒸発モデルができる。これは、古くからある限定要因法に基づく蒸発モデルに他ならない(高見, 1997 参照)。ただし、ここでは簡単のため、土壌の最大水分保有量は十分大きく、流出は生じないとした(流出がある場合については、高見, 2011 参照)。

計算は次のように行なう。図1を描いたあと、降水量と蒸発要求量のアイコンを開いて月値を、土壌水分量のアイコンを開いて年初の値 562 mm をあたえる(表1)。また、 F_{out} のアイコンを開いて式(3)を記入する。そして、時間刻み $DT=1.0$ 月で12ヶ月間の計算を実行すると、STELLA は式(4)を自動的に満たしながら式(1)、(2)によって月別の蒸発量と土壌水分量を計算する(表1)。式(1)、(2)はマップを描いた段階で、自動的に書き込まれるので、私達は何もしなくてよい。

こうして得られた結果は、当然ながら以下のように図2を満足する。まず、1月の収支をみると、降水量だけでは蒸発要求を満足できない。しかし、土壌には十分な水が貯留されているので、それからの補給により、蒸発要求に等しいだけの蒸発が生じる。以下、2月から5月までこの状況が続き、その間、土壌水分量は次第に減少する。そして、6月になると、土壌水分を全部使っても(注4)、蒸発要求を満足出来ず、蒸発量はこの残りの土壌水分に降水量を

表1 降水量と蒸発要求から限定要因法によって求めた月別蒸発量と土壌水分量

月	降水量 mm	蒸発要求 mm	蒸発量 mm	土壌水分量 mm
1	66	94	94	534
2	26	108	108	452
3	22	132	132	342
4	30	172	172	200
5	32	192	192	40
6	48	170	88	0
7	72	182	72	0
8	120	172	120	0
9	140	154	140	0
10	336	142	142	194
11	398	116	116	476
12	188	102	102	562

*土壌水分量は期末値

プラスしたものと等しくなる。こうして土壌水分 0 mm で迎えた 7 月には、そしてそれ以降 9 月までは、蒸発要求が降水量を上回るので、降水量は全て蒸発に使われ、蒸発量=降水量となる。でも 10 月からは、蒸発要求を上回る降水量があるので、蒸発要求に見合うだけの蒸発があり、残りは土壌に貯留されていく。

以上を要するに、蒸発は、6 月から 9 月は水供給量(降水プラス土壌水分減少量)によって、その他の期間は蒸発要求によって、律速されていることが分かる。なお、年単位の蒸発量についても同様の方法が適用出来る。そして、その場合は土壌水分量の変化が無視出来るので、蒸発量と降水量との間に、蒸発要求をパラメータとする簡単な関係が成立する。この関係を基準化すると、有名な Budyko の放射乾燥度が導かれる(高見, 1998)。

2.2 種子生産

植物では、開花受精後、同化産物の多くが種子の生長へと振り向けられる。一見複雑なこの過程も、同化産物の生産と分配の観点からは、意外に簡単である。上記基本モデルの具体例とみる事ができるからだ。すなわち、図 1 において、 F_{in} を同化産物の生産速度 ($t/(ha \cdot d)$)、 F_{out} を同化産物の輸送速度 ($t/(ha \cdot d)$)、 F_{pot} を種子の潜在生長速度、 S_i を種子以外の植物体における同化産物貯留量、とした、「流入・汲み出しモデル」が成立する(小葉田・森脇, 1990; Takami *et al.*, 1990)。

計算方法は、2.1 と基本的には同じである。ただし、連続的な変化を求めたいため $DT=0.25d$ とした。また、期間は 40d とした。図 3 はこうして得られた結果である。計算に用いたデータ(表 2)は、小葉田・森脇(1990)からとった。図には、その結果に加えて、

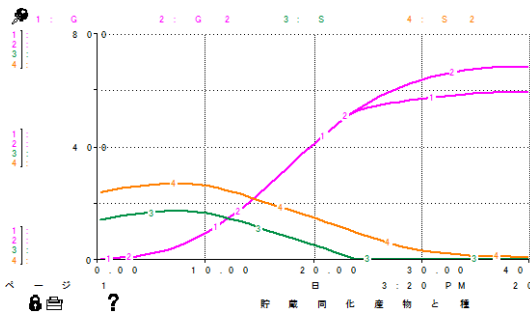


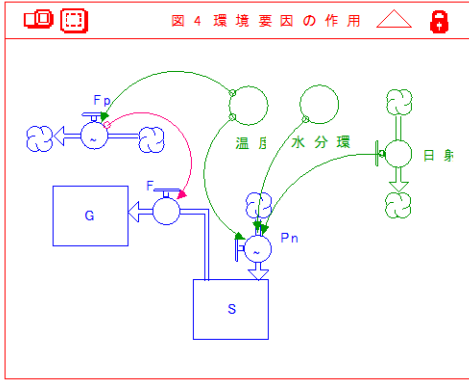
図 3 表 2 のデータを与えて計算した種子重(G)と貯蔵同化産物量(S)の推移。ただし、 G_2 , S_2 は $S(0)=238 \text{ g/plant}$ とした場合。G と S の単位は、いずれも、g/plant。

表 2 シミュレーションに用いた正味の光合成速度 P_n と種子の潜在生長速度 F_p の測定値 (小葉田・森脇, 1990)

Day	P_n	F_p	$S(t)$
	(g/(plant · d))		(g/plant)
0	-	-	140
1	9.0	2.0	
5	12.0	9.0	
9	15.5	21.5	
13	19.0	31.2	
17	24.0	35.8	
21	18.5	32.4	
25	8.0	20	
29	5.0	12.0	
33	3.5	6.2	
37	1.0	1.6	
41	0.0	0.0	

S の初期値を 1.7 倍にした時の結果(S_2 と G_2)も示した。 $S(0)$ として測定値=140 g/plant の 1.7 倍を仮定すると、同化産物の供給が十分なため、種子は終始、その潜在生長量力を発揮し、最終的には 688 g/plant に達すると予測される(図の G_2)。しかし、実際は、開花後、24 日後ぐらいに、貯蔵同化産物が底をついたため(注 5)、種子の最終生長量は 597 g/plant にとどまった。小葉田・森脇(1990)は、受光量を変えた実験で、このような計算結果が測定値とよく一致することを確認した。

では、以上の過程と環境条件はどのような関係にあるのだろうか。その関係は二つの柱からなる。一つは、 P_n と F_p とが独立にシステムを駆動しているで、環境要因もこの 2 つにそれぞれ独立に作用するという仕組みである。環境要因が P_n を介して F_p に間接的に作用するという事はあり得ない。図 1 に、 F_{in} から F_{pot} へのアクションコネクター(→)が描かれていないのは、そのためである。それ故、このモデルが正しければ、たとえば、「登熟初期の同化産物不足が種子の潜在生長量を低下させ、それが最終的な種子生産量の減少をもたらす」といったことは起らない。このことを、Kobata *et al.* (2000)は、イネについて登熟初期には遮光を、後期には間引きを行なった実験によって鮮やかに示した。光だけでなく、水についても(Takami *et al.*, 1990)、温度についても(Kobata and Uemuki, 2004)、同じことがいえる。もう一つは、 F_p は温度のみの関数で、それ以外の環境要因には殆ど左右されないというこ



と (Kobata and Uemuki, 2004) である。いいかえれば、種と温度のみできまる「資源無制限型の成長」を示す。こうしてみると(図 4)、植物は、環境資源を種子生産に最大限に利用するしきみを備えていることが分る。つまり、種子生産過程というものは非常に安定したシステムであるといえる。長い進化のすえ到達した、種の保存を確保するシステムだとすれば、それも当然であろう。

以上、種子への物質分配モデルと蒸発モデルとの共通性をみてきた。しかし、両者は全く同じではない。以上のモデルでは取り扱っていない、重要な違いがある。それは、蒸発モデルでは G つまり大気容量に限度を考える必要がないのに対して、種子生産の場合の G には上限があることだ。したがって、上限が近づくにつれて、 G から F_{out} へ、さらには F_{in} へフィードバックがかかってくる(注 6)ことが考えられる。こういったフィードバックの存在は古くからいわれてきた (Evanco, 1975) もの、その定量的評価は不十分で、どのような影響がどれくらいあるのか、いまだにはっきりしない。その解明には、実験とシミュレーションを同時に進める必要があり、そこでは構造型シミュレーション言語の本領が一層発揮されるだろう。

3. むすび

システムダイナミクスに基づくシミュレーションモデルでは対象とする現象、過程の構造化が最も重要である。構造型シミュレーション言語では、代表的な基本構造を用いることにより、現象の特徴に応じた構造化が FORTRAN や BASIC 等に比べてずっと容易にできる。本稿では、そのことを蒸発と物質生産の種子への配分という現象を取り上げ、例示した。

上記のような構造化はどんな利点をもたらすのだろうか。それは、未知の対象を既知の現象から類推

することを容易にする。また、より複雑な現象のしくみが分りやすくなる。本稿では、蒸発や種子生産といった現象が、ポンプによるくみ出しという身近なモデルによって、直感的に理解出来るようになることを示した。それは同時に、専門家と「素人」との間の溝を埋める一助となるだろう。構造型シミュレーション言語は、万人が容易に読み書きの出来る「絵文字」だからだ。専門用語や数式の厚い雲で覆われた分野毎の現象や概念が、「共通のことば」で描かれた構造図によって、専門外の人々にも分りやすく伝わるのが期待される。

近年、学問は「知的爆発の時代」を迎えた。そのため、同じ専門分野でもテーマが違えば、それぞれのやっていることを理解するのが非常に難しくなってきた。異分野間や専門家と一般との間のコミュニケーションの困難さはいままでもない。そのため、私達は、よく分らないから専門家のいうことを鵜呑みにするという状態に陥ってはいないだろうか。地球温暖化問題を始め、私達が対処しなければならない環境問題はこういったこれまでの在り方に反省をせまっている。環境問題はすぐれて学際的、分野横断的だからだ。しかし、だからといって、誰もがさまざまな問題を専門家なみに、専門家のように理解することはできない。では、どうすればよいのか。もっと、分野や専門を横断した「知の共通基盤」を養うことが必要ではなからうか。いいかえれば、専門家と「素人」が共にそこに立って対等に渡り合える、共通の土俵がのぞまれる。構造型シミュレーション言語は、いわば一種の思考支援ツールとして、そういった基盤を築いていくための有力な一手段となるだろう。

注

- (1) 私達が対象とするシステムは、その内部でまたその外部との間で物質、エネルギーの交換を行なっている。その有様をレート変数(フロー)と状態変数(ストック)を中心に図式化したものを、ここでは「構造」と定義する。そして、この「構造」を、そのまま計算のアルゴリズムに使っているシミュレーション言語を「構造型」とよぶことにする。
- (2) Berkley Madonna, Vensim, PowerSim などがあり、いずれも STELLA より廉価である。また、Vensim と PowerSim とは optimization 機能によって、未知のパラメータ値を決めることができるという(松野裕, 私信)。このように、価格、使いやすさ、機能などから比較すると、それぞれのソフトは一長一短である。

- (3) ある時点の S が Δt の間にゼロになったとすれば, $(S-0)/\Delta t$ が単位時間当り最大減少量である。
- (4) 土壤水分が完全にゼロになることはない。したがって, ここでいう土壤水分とは, いわゆる有効土壤水分のことである。
- (5) 土壤水分と同様, 貯蔵同化産物も完全にゼロになるということはないだろう。したがって, ここでの貯蔵同化産物も「有効貯蔵同化産物」とよんだ方がよいかもしれない。
- (6) STELLA のマップ(構造図)では, アクションコネクタ(→)が G から $Fout$ へ, さらに Fin へ伸びる。

引用文献

- Evance, L. T., 1975: The physiological basis of crop yield. In *Crop Physiology* (ed. by Evance, L. T.), Cambridge University Press, London, pp. 325-327.
- 小葉田亨・森脇 昇, 1990: 登熟期におけるイネの乾物生産速度と穀実生長速度との関係 —異なる受光環境下における簡易分配モデルの検討— 日作紀 **59**, 1-7.
- Kobata, T. and Uemuki, N., 2004: High temperatures during grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. *Agron. J.*, **96**, 406-414.
- Kobata, T., Sugawara, M. and Takatu, S., 2000: Shading during the early grain-filling period does not affect potential grain dry matter increase in rice. *Agron. J.*, **92**, 411-417.
- Takami, S., Kobata, T. and Van Bavel, C. H. M., 1990: Quantitative method for analysis of grain yield in rice. *Agron. J.*, **82**, 1149-1153.
- 高見晋一, 1997: 植物の水環境. In 農学・生態学のための気象環境学(文字信貴 編). 丸善, 東京, pp 76-87.
- 高見晋一, 1998: 限定要因の法則からみた蒸発. 水文・水資源学会誌, **11**, 67-69.
- 高見晋一, 2011: 視覚的シミュレーションのすすめ. 生物と気象, **11**, H1-7.