

人口・資源モデルの基礎的解析

Fundamental Analysis of a Population-Resource Model

竹内 智

山梨大学 工学部 循環システム工学科

Abstract

A population-resource model is analyzed theoretically and its exact solutions are derived in the reasonable parameter region. Through the use of STELLA software employed in the field of system dynamics, behaviors of the model are also simulated numerically. Both the birth and consumption rate of the resource are assumed to have constant values. Mortality varies with time depending on the resource that remains. If the birth rate is greater than the mortality, the population increases rapidly due to positive feedback, while, in the opposite case, negative feed forward effectively works and consequently the population gradually decreases until it reaches zero. This sequential process shows behaviors of the over-shoot and collapse, whereas the resource decreases monotonically as time goes on.

キーワード: 人口・資源モデル, オーバーシュート, 破局

要旨: 人口・資源モデルを理論的に解析し、厳密解を導出して合理的なパラメータ領域を求めた。さらに、モデルの振舞を、STELLA を用いて数値的にシミュレートした。出生率と資源の消費率は一定と仮定した。死亡率は資源の残存量に依存し、時間と共に変化する。出生率が死亡率より大きいとき、人口が急激に増加する正のフィードバックが働く。一方、死亡率が出生率より大きくなると、負のフィードフォワードが働き人口は減少しつづける。この一連のプロセスはオーバーシュートと破局を表している。また、資源は時間と共に単調に減少することが示された。

1. はじめに

1972年、ローマ・クラブとMITの共同研究の成果として「成長の限界」¹が出版され、世界中の人々に大きな反響を巻き起こした。彼らは、人口と資本、食糧、天然資源、汚染が複合的に絡み合うモデルをシステムダイナミックス²でシミュレートし、近代工業化以前には無尽蔵の資源を宿していると思われた地球が実際には物質的に有限な存在であること、さらに、これまで地球のほんの一部でしかなかった人間の活動が、地球を破局へ導く可能性があることを警告した。それから20年後の1990年に、最新より詳細な統計データをもとにして、メドウズ達は「成長の限界」と同様のシミュレーションを実行し、「限界を超えて」³と題した著書を出版した。そこには、地球が破局へ向かうシナリオと、それを回避し持続可能な社会へ移行するためのシナリオが提示されている。中でも注目すべきことは、人口問題の解決なくして環境問題の解決はないといわれるように、将来の人口増加と資源枯渇の予

測である。最新の人口動態シミュレーション⁴によると、1999年に60億人を突破した世界人口は、2050年に73億人から104億人までのどこかの水準に到達し(中位予測では88億人)、その後ゆるやかに減少し始めることが予測されている。ところが、90億人にも達する人口を養えるだけの十分な資源が地球に蓄えられているとは言い切れない状況にある。

世界人口の1年間における正味の増加は約8000万人であり、それを食糧需要に換算すると年間2000万トンにもものぼる⁵。ところが、それを補う食糧供給は1日につき7万1千トンと予測され、需要に供給が追いつかない状況にある。その主要な原因とされているのが、土地の疲弊による生産力の低下である。化学肥料等の投入にも限界があり、土地の回復は困難と見られている。それに加え、地球規模の温暖化がもたらす砂漠化の拡大による耕作可能面積の減少や、地域的な気候変動による冷害の発生など、食糧の自給率を下降させる要因はいたるところにある。それに加え、発展途上国では民族紛争や国政の失敗による内乱が絶えず、社会的弱者である老人と子供の飢餓状態は想像に難くない。一方では、資源の枯渇が現実味を帯びてきた現在でも、先進国における大量生産・大量消費・大量廃棄は留まる様子もない。このような二極分化による南北格差は、今後も拡大してゆくと予想される。

現在の人間活動は広範な地域に及び、ラブロックがガイア理論⁶として展開している「地球生命圏の自律的な再生能力」、いわゆる地球の治癒力を超えるほど急速に増大している。その結果、顕在化した地球規模の環境問題は、多くの要素が複合的に絡み合って存在している。それ故、人間活動の環境への影響を調査する

ためには、このような複雑な事象から主要な特性を抽出して環境をモデリングすることが必要である⁷。人口と資源の問題も同様であり、要素還元的に考察することも重要な課題の一つであるが、互いに関連する要素全体を一つのシステムとして捉え、そこから特徴的な性質を抽出してモデル化し、より簡単なモデルに書き換えることによってシステムの振舞を考察することも必要である。

この論文では、Deaton 達が示した人口と資源に関する簡単なモデル⁸を利用して、人口と資源の振舞について検討を行った。このモデルに関する彼らの検討は、定性的な範囲に留まっている。ところが、この人口・資源モデルが意味を持つのは、ある限定されたパラメータ領域内であり、そのことについては言及されていない。この論文の目的は、彼らが示した人口・資源モデルから厳密解を導出して、モデルの動作が成立する合理的なパラメータ領域を確定し、さらに、人口と資源の関係とそれらの時間変化について詳細に検討することである。

2. 人口・資源モデル

人口動態は、国あるいは地域の出生率と死亡率に依存する。出生率や死亡率は、時間あるいは場所に依存する環境変数(GDP や栄養水準、保健サービス、教育、家族計画、環境汚染など)¹と複合的に絡み合っているため、個々の振舞を示す解析的な解を見出すことは大変困難である。そこで、Deaton 達が提示した簡単なモデルを利用して、その振舞を解析しよう。このモデルの特徴は、複雑な人口と資源の関係が簡潔な微分方程式で表現されていることである。はじめに、人口・資源モデルの定性的な解析を行い、次に微分方程式から厳密解を導出して、解の振舞について考察しよう⁹。

2.1 モデルの定性的な解析

初期において充分な量の資源が存在するならば、初期死亡率はほとんど変化せずに人口が増加してゆく。このような状態では正のフィードバックが作用するため、時間が経過するにしたがって人口は幾何級数的に増加することになる。また、それに伴って死亡率も徐々に大きくなってゆく。正味の人口増加率は出生率と死亡率の差としてあらわされるので、死亡率が増えて出生率に近づくにしたがって、人口増加の伸びは鈍化してゆく。そして、死亡率が出生率よりも大きくなった時点で、人口は減少に転じることになる。これを境として、負のフィードフォワードが作動し、人口は急激に減少し始める。その後、人口は回復できない状態にまで減少し、最終的にゼロの極限まで落ち込んで行く。この一連のプロセスは、オーバーシュート(over shoot)と破局(collapse)としてよく知られている。ところで、この人口動態のプロセスに従うと、資源はどのように

推移してゆくのであろうか。Deaton 達はこのモデルを定性的に解析し、資源は人口の減少と共にゼロに漸近してゆくと結論付けている。しかしながら、次のような考察も成り立つ。人口の減少が進行し続けると、資源の減少は抑制されるようになる。それは、人口が少なくなったことで資源の消費量も少なくなるからである。少ない人口では、出生数が死亡数より多くなりえない限り、人口は減少し続けることになる。その結果、人口がゼロに漸近して行くとしても、最終的に一定量の資源が残ることになるだろう。

2.2 モデルの理論的解析

上述した人口と資源の定性的な関係を、次のように仮定する。

- 変数を人口と資源の2つに限定する。
- 出生率と資源の消費率は、時間に依存しない定数として扱う。
- 死亡率は資源の残存量に依存し、時間と共に変動する。
- 一人当たりの資源消費量は一定とする。つまり、全体の消費量は人口に比例する。

これらの特徴を取り入れたモデルは、次のような連立微分方程式によって記述される。

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = \left\{ B - \left[1 - \frac{R(t)}{R_0} \right] \right\} P(t) & (1) \\ \frac{dR(t)}{dt} = -CP(t) & (2) \end{cases}$$

この方程式で $P(t)$ は人口、 $R(t)$ は資源であり、いずれも時間のみの関数である。 B は一人当たりの出生率であり、 C は一人当たりの資源の消費率、 R_0 は資源の初期値である。 $1 - R(t)/R_0$ が死亡率に相当するので、正味の人口増加率は $B - [1 - R(t)/R_0]$ と表される。

(1)式を(2)式で割ると次式となる。

$$\frac{dP}{dR} = \frac{B - (1 - R/R_0)}{-C} \quad (3)$$

この積分は次のようにして求められる。

$$C \int dP = \int - (B - 1) - \frac{R}{R_0} dR \quad (4)$$

人口の初期値を P_0 として積分を実行すると

$$CP = CP_0 - (B - 1)(R - R_0) - \frac{1}{2R_0}(R^2 - R_0^2) \quad (5)$$

が求まる。これは人口と資源の関係における保存量であり、人口 P は資源 R の2次関数として与えられることを示している。

(5)式を(2)式の右辺に代入すると、次式で表されるような微分方程式となる。

$$\frac{dR}{dt} = -CP_0 + (B-1)(R-R_0) + \frac{1}{2R_0}(R^2 - R_0^2) \quad (6)$$

この式を次のように変形して解を導出する。

$$\int \frac{2R_0}{(R-\alpha)(R-\beta)} dR = \int dt \quad (7)$$

ただし、 α と β は(6)式の右辺における R に関する2次方程式の解である。つまり、

$$(R-\alpha)(R-\beta) = -2CR_0P_0 + 2R_0(B-1)(R-R_0) + (R^2 - R_0^2) \quad (8)$$

また、 $\alpha > \beta$ とすれば、二つの解は以下のように与えられる。

$$\begin{cases} \alpha = R_0(1-B) + \sqrt{R_0^2B^2 + 2CR_0P_0} \\ \beta = R_0(1-B) - \sqrt{R_0^2B^2 + 2CR_0P_0} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、(7)式の左辺における被積分関数を

$$\frac{2R_0}{(R-\alpha)(R-\beta)} = \frac{A}{R-\alpha} + \frac{B}{R-\beta} \quad (10)$$

とにおいて、未定係数法によって係数を求めると

$$A = \frac{2R_0}{\alpha-\beta}, \quad B = -\frac{2R_0}{\alpha-\beta} \quad (11)$$

となる。これより、(7)式の積分は以下のように与えられる。

$$\frac{2R_0}{\alpha-\beta} \int \frac{1}{R-\alpha} - \frac{1}{R-\beta} dR = \int dt \quad (12)$$

積分を実行すると

$$\frac{2R_0}{\alpha-\beta} [\ln(R-\alpha) - \ln(R-\beta)] = t + \kappa_0 \quad (13)$$

となる。ここで κ_0 は積分定数であり、初期条件 $t=0$ のとき $R=R_0$ として求められる。したがって

$$\frac{R-\alpha}{R-\beta} = \frac{R_0-\alpha}{R_0-\beta} \exp\left(\frac{\alpha-\beta}{2R_0}t\right) \equiv I_0 \exp\left(\frac{\alpha-\beta}{2R_0}t\right) \quad (14)$$

となる。さらに、関数 $f(x) \equiv \exp[(\alpha-\beta)t/2R_0]$ を定義すると、 $R(t)$ は最終的に次式で与えられる。

$$R(t) = \frac{\alpha - \beta I_0 f(t)}{1 - I_0 f(t)} \quad (15)$$

次に、人口 $P(t)$ を導出しよう。上式を時間 t で微分すると

$$\frac{dR}{dt} = \frac{I_0(\alpha-\beta)}{[1-I_0f(t)]^2} \frac{df}{dt} = \frac{I_0(\alpha-\beta)^2 f(t)}{2R_0[1-I_0f(t)]^2} \quad (16)$$

となる。ただし、関数 f の微分として $df/dt = [(\alpha-\beta)/2R_0]f(t)$ を代入した。左辺の微分は(2)式の左辺と等しいので、最終的に次式のように書き換えることができる。

$$P(t) = -\frac{I_0(\alpha-\beta)^2 f(t)}{2CR_0[1-I_0f(t)]^2} \quad (17)$$

以上より、人口数 $P(t)$ と資源 $R(t)$ の厳密解が時間の関数として求められた。

これら二つの厳密解の性質を調べることにしよう。はじめに、時刻 $t=0$ のとき、初期条件 $R(0)=R_0$ 、 $P(0)=P_0$ を満足しなければならない。そこで $f(0)=1$ の関係を用いると

$$\begin{aligned} R(0) &= \frac{\alpha - \beta I_0 f(0)}{1 - I_0 f(0)} = \frac{\alpha - \beta \frac{R_0 - \alpha}{R_0 - \beta}}{1 - \frac{R_0 - \alpha}{R_0 - \beta}} \\ &= \frac{\alpha R_0 - \beta R_0}{\alpha - \beta} = R_0 \quad (18) \end{aligned}$$

また

$$\begin{aligned} P(0) &= -\frac{I_0(\alpha-\beta)^2 f(0)}{2CR_0[1-I_0f(0)]^2} = -\frac{I_0(R_0-\beta)^2}{2CR_0} \\ &= -\frac{(R_0-\alpha)(R_0-\beta)}{2CR_0} = P_0 \quad (19) \end{aligned}$$

ただし、(8)式において、 $R=R_0$ を代入したときの値 $(R_0-\alpha)(R_0-\beta)=-2CR_0P_0$ を用いた。

次に、時間を無限大にしたとき、 R と P の極限について調べてみよう。関数 $f(t)$ は時間と共に無限大に発散するので、資源 $R(t)$ に関する極限は

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\alpha - \beta I_0 f(t)}{1 - I_0 f(t)} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{\frac{f(t)}{I_0} - \beta} = \beta \quad (20) \end{aligned}$$

と与えられる。一方、人口 $P(t)$ については

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-I_0(\alpha - \beta)^2 f(t)}{2CR_0[1 - I_0 f(t)]^2}$$

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-\frac{I_0}{f(t)}(\alpha - \beta)^2}{2CR_0[1/f(t) - I_0]^2} = 0 \quad (21)$$

となる。つまり、人口は、初期値や死亡率、消費率に依存することなく時間が経過するにしたがって $P(t) \rightarrow 0$ となる。ところが、資源の極限值はゼロとはならず、 $R(t) \rightarrow \beta$ という一定値に収束する。次節では、数値シミュレーションを行いながら、上述の結果をより詳細に検討する。

3. STELLA によるシミュレーションの結果

微分方程式(1)、(2)式を初期値 R_0 と P_0 でそれぞれ規格化し、 $\tilde{P}(t) \equiv P(t)/P_0$ と $\tilde{R}(t) \equiv R(t)/R_0$ に変数を置き換える。さらに、資源の消費率は $\tilde{C} \equiv CP_0/R_0$ とする。これらの規格化によって初期値の大きさに依存することなく、方程式の性質を調べることが可能となる。規格化された連立微分方程式は

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{P}}{dt} = [B - (1 - \tilde{R})]\tilde{P} & (22) \\ \frac{d\tilde{R}}{dt} = -\tilde{C}\tilde{P} & (23) \end{cases}$$

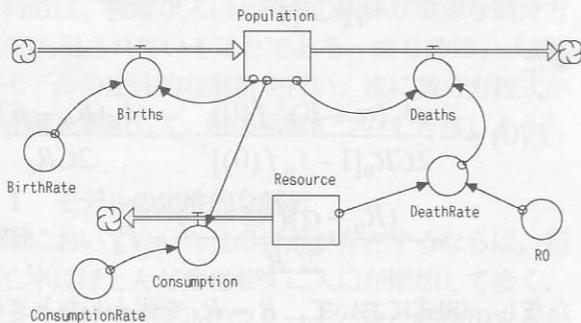


図1 人口・資源モデルのダイアグラム

と与えられる。システムダイナミックスの汎用ソフトである STELLA¹⁰ を利用して、微分方程式の性質を数値的に調べてみよう。図1に示したダイアグラムを利用して、方程式の特徴を述べる。出生数は出生率に人口を掛けて求められるので、 $Births = BirthRate * Population$ となる。また、死亡数は死亡率(ここでは、1から資源の減少率を差し引いた値)に、人口数を掛けて求められるので、 $Deaths = (1 - Resource/R_0) * Population$ となる。さらに、資源の消費量は消費率に人口を掛けることによって、 $Consumption =$

$ConsumptionRate * Population$ と求められる。 $Population$ は $Births$ を介して正のフィードバックループを構成している。つまり、このループは人口が増大するように動作する。一方、 $Consumption$ と $Deaths$ を介した $Population$ と $Resource$ のループは、負のフィードバックループを構成している。この2つのループの競合によりオーバーシュートと破局の振舞が説明される。初期において出生率が死亡率より大きいとき、正のフィードバックが作用し、 $Population$ の急激な増加がもたらされる。一方、死亡率が出生率よりも大きくなると、負のフィードバックループが支配的となり $Population$ が幾何級数的に増大することを抑える役割を果たすことになる。

人口と資源の関係を直接的に表している(6)式は

$$\tilde{P} = -\frac{1}{2\tilde{C}}[(\tilde{R} - 1 + B)^2 - B^2] + 1 \quad (24)$$

のように、規格化された \tilde{R} に関する2次関数となる。また、 $\tilde{P} = 0$ における二つの解は

$$\begin{cases} \tilde{\alpha} \equiv \frac{\alpha}{R_0} = (1 - B) + \sqrt{B^2 + 2\tilde{C}} \\ \tilde{\beta} \equiv \frac{\beta}{R_0} = (1 - B) - \sqrt{B^2 + 2\tilde{C}} \end{cases} \quad (25)$$

と与えられる。(18)式より、時間が経過するにしたがって、資源は最終的に β の値に漸近して行くことから、資源が負の値とならないためには、解の存在条件に加え、 $\tilde{\beta} \geq 0$ が必要な条件となる。つまり、以下の2つの不等式

$$B^2 + 2\tilde{C} \geq 0, \quad B + \tilde{C} \leq \frac{1}{2} \quad (26)$$

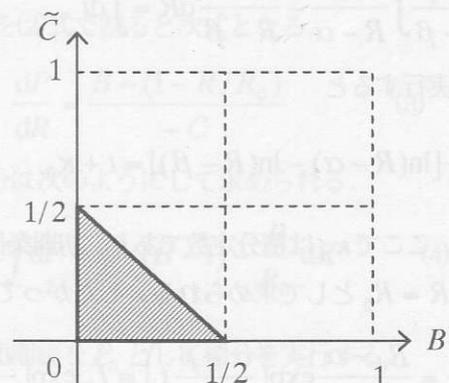


図2 出生率と消費率の相関

合理的なパラメータの領域は、三角形の辺上とその内部に存在するような出生率と消費率の値である

を満足しなければならない。ただし $0 \leq B \leq 1$ 、 $0 \leq \tilde{C} \leq 1$ である。この領域は、 $B\tilde{C}$ 平面における3

点の座標(0,0), (0,1/2), (1/2,0)を頂点とする二等辺直角三角形の3辺上とその内側の領域に一致する(図2参照).

消費率 \tilde{C} を固定し, 出生率 B を変化させたときのグラフを図3に示す. 図3(a)は人口と資源の関係をあらわしている. 横軸が規格化された資源 \tilde{R} で, 縦軸が規格化された人口 \tilde{P} である.

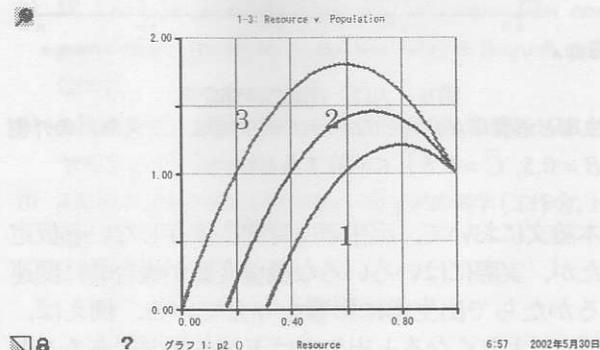


図3(a) 人口と資源の関係

$$\tilde{C} = 0.1, 1: B = 0.2, 2: B = 0.3, 3: B = 0.4$$

初期値は $(\tilde{R}, \tilde{P}) = (1, 1)$ と与えられている. したがって, ここを始点として, 時間が経過するとともに, $(\tilde{R}, \tilde{P}) = (\tilde{\beta}, 0)$ に漸近して行くことが分かる. 上に凸な2次関数となっているので, $\tilde{R} = 1 - B$ のとき最大値 $\tilde{P}_{\max} = (B^2 / 2\tilde{C}) + 1$ となる. 出生率が $B = 0$ のときは $\tilde{P}_{\max} = 1$ となるので, 人口は増加することなく減少する. ところが, 出生率がある値を持ち, 資源の消費率が小さな値であるならば, かなりの人口増加となることがわかる. 人口増加と相反して資源は時間と共に減少する. 特に, (26)式の不等式において等号が成立する場合, つまり $B + \tilde{C} = 1/2$ のとき, 資源はゼロに漸近して行く.

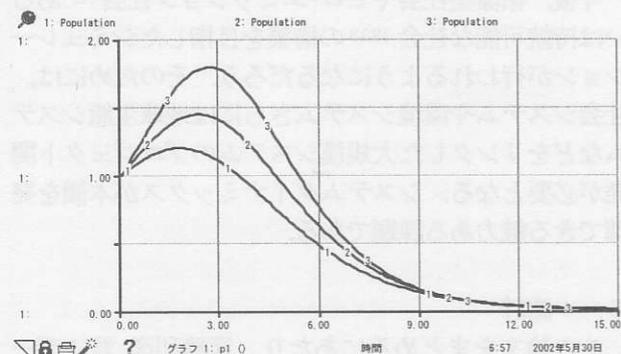


図3(b) 人口の時間変化

$$\tilde{C} = 0.1, 1: B = 0.2, 2: B = 0.3, 3: B = 0.4 = 1/2 - \tilde{C}$$

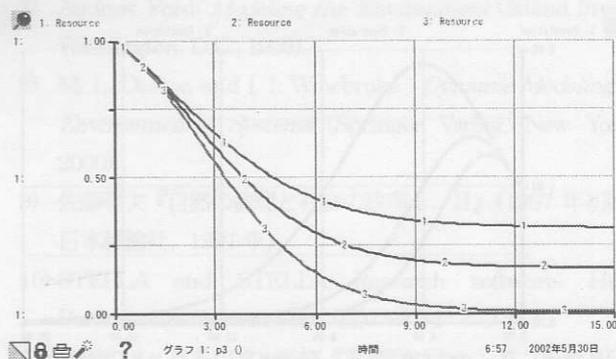


図3(c) 資源の時間変化

$$\tilde{C} = 0.1, 1: B = 0.2, 2: B = 0.3, 3: B = 0.4 = 1/2 - \tilde{C}$$

人口の時間変化を図3(b)に, 資源の時間変化を図3(c)に示す. 図3(b)では, 初期において人口が急激に増加していく様子が分かる. また, 人口はピークを過ぎると減少し始め, それ以降, 時間とともに急速にゼロに漸近して行く. これがオーバーシュート(over shoot)と破局(collapse)である. ところが, 図3(c)に示されているように, 資源がゼロに漸近して行くのは, (26)式の等号が成り立つときのみである. それ以外の場合, 資源がゼロに漸近して行くことはない. すなわち, 資源が十分に存在しても, 人口が消滅してしまう可能性があることを意味している.

次に, 出生率 B を固定し, 消費率 \tilde{C} を変動させた場合のグラフを図4に示す. 図3の場合と同じような傾向を示している. つまり, 消費率の値が小さいと人口は急激に増加するが, 消費率の値が大きくなるにしたがって人口の増加が抑制されることが分かる.

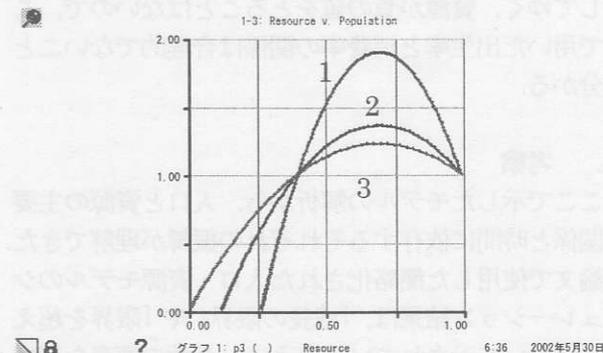


図4(a) 人口と資源の関係

$$B = 0.2, 1: \tilde{C} = 0.05, 2: \tilde{C} = 0.25, 3: \tilde{C} = 0.3$$

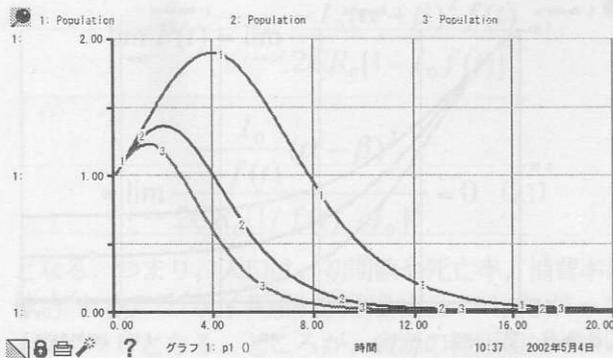


図4 (b) 人口の時間変化

$B = 0.2$, $1: \tilde{C} = 0.05$, $2: \tilde{C} = 0.25$, $3: \tilde{C} = 0.3 = 1/2 - B$

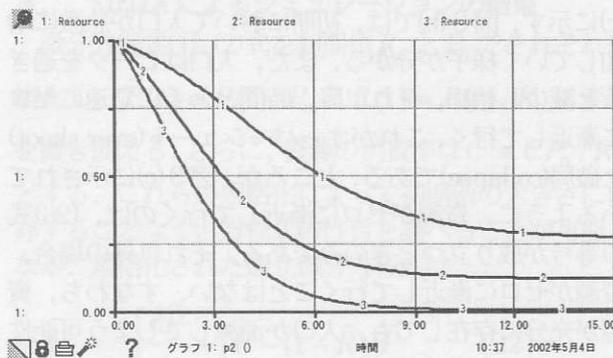


図4 (c) 資源の時間変化

$B = 0.2$, $1: \tilde{C} = 0.05$, $2: \tilde{C} = 0.25$, $3: \tilde{C} = 0.3 = 1/2 - B$

出生率と消費率の値が合理的なパラメータ領域の外側に存在する場合、人口と資源はどのような時間変化をするのであろうか。図5にそのときの計算結果を示す。人口はこれまで述べてきたように、オーバーシュートから破局への道筋をたどる。人口は、初期値やパラメータの値には関係せず、時間が経過するにしたがってゼロの値に漸近してゆく。ところが、資源は単調に減少しながらゼロの値を横切り、一定な負の値に漸近してゆく。資源が負の値をとることはないので、ここで用いた出生率と消費率の関係は合理的でないことが分かる。

4. 考察

ここで示したモデルの解析から、人口と資源の主要な関係と時間に依存するそれぞれの振舞が理解できた。本論文で使用した簡略化された人口・資源モデルのシミュレーション結果は、「成長の限界」や「限界を超えて」において示されているように、多数の要素を可能な限り含めて構成された人口・資源のシミュレーション結果と同じような傾向を示した。つまり、人口変動におけるオーバーシュートと破局さらには資源の枯渇という特性が、出生率や死亡率、消費率というパラメータにどのように依存するかを明らかにした。

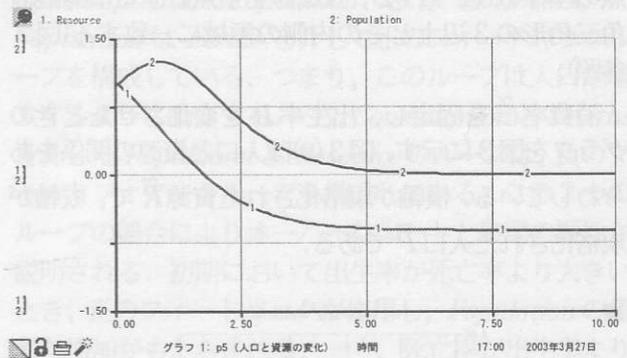


図5 人口と資源の時間変化

出生率と消費率が合理的なパラメータ領域（三角形）の外側（ $B = 0.5$, $\tilde{C} = 0.5$ ）に存在するとき

本論文において、出生率は時間に依存しないと仮定したが、実際にはいろいろな環境変数が複合的に関連するかたちで出生率に影響を与えている。例えば、GDPが大きくなると出生率は下がる傾向にあることは良く知られており、栄養水準や保健サービス、教育などの改善が出生率に与える影響も大きい。また、このモデルには人間の成長過程や社会的な影響がモデル化され組み込まれていない。つまり、成人に達した段階で生産に携わり資源を生み出すというフィードバック機構が存在しない。さらに、消費率も一定であるため、資源は時間と共に単調に減少してゆく結果となっている。

5. おわりに

この論文では、Deaton 達が示した人口・資源モデルを定性的に考察し、モデル化された連立微分方程式から厳密解を導出した。さらに、モデルが合理的に振舞うパラメータ領域を同定し、解の性質を明らかにした。また、システムダイナミクスで利用されている汎用ソフト STELLA による数値シミュレーションの結果から、出生率と死亡率に依存する人口や資源の時間変化、オーバーシュートと破局の振舞を明らかにした。

今後、循環型社会やゼロ・エミッション社会¹¹あるいは持続可能な社会^{12,13}の構築を目指したシミュレーションが行われるようになるだろう。そのためには、社会システムや環境システムさらには地球生態システムなどをリンクした大規模システムのプロジェクト開発が必要となる。システムダイナミクスが本領を発揮できる魅力ある課題である。

6. 謝辞

この論文をまとめるにあたり、箕輪利彦 君にデータ整理と図作成に関しご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) D.H.メドウス, D.L.メドウス, J.ランダース, W.W.ヘアラ
ンズ三世, 大来佐武郎(監訳), 『成長の限界』(ダイヤモンド
社, 1972年)
- 2) 島田俊郎編『システムダイナミックス』(日科技連, 1995年)
- 3) D.H.メドウス, D.L.メドウス, J.ランダース, 茅陽一(監修),
松橋隆治, 村井昌子(訳)『限界を超えて』(ダイヤモンド社,
1992年)
- 4) W. Lutz, W. Sanderson, and S. Scherbov: *The end of
population growth*, Nature, Vol. 412, 2 August, pp.543
(2001).
- 5) L.R.ブラウン, 浜中裕徳(監訳)『地球白書 1998~99』(ダイ
ヤモンド社, 1998年)
- 6) J.E.ラブロック『地球生命圏』-ガイアの科学(工作舎, 1984
年)
- 7) Andrew Ford: *Modeling the Environment* (Island Press,
Washington, D.C., 1999).
- 8) M. L. Deaton and I. I. Winebrake : *Dynamic Modeling of
Environmental Systems* (Springer Verlag, New York,
2000).
- 9) 佐藤聰夫『自然の数理と社会の数理 I, II』(1987年初版,
日本評論社, 1991年)
- 10) STELLA and STELLA Research software: High
Performance Systems, Inc. (株)パーシティウェブ
- 11) 植田和弘, 喜多川進 監修『循環型社会ハンドブック』(有
斐閣, 2001年)
- 12) 林智, 西村忠行, 本谷勲, 西川栄一『サステイナブル・ディ
ベロップメント』(法律文化社, 1991年)
- 13) 宮本憲一『日本社会の可能性-維持可能な社会へ』(岩波書
店, 2000年)