

反少子化戦略に関する SD 人口モデルの意義と政策科学への貢献

講演論文

Contributions of System Dynamics to Demography and Policy Sciences

小林 秀徳 (Hidenori Kobayashi)

中央大学

kobaken0@fos.chuo-u.ac.jp

Abstract :

One hundred Adams and another hundred Eves be as 200 babies there. They grow up and have their own children subject to the order of birth law, while they die subject to the order of death law. Their sons and daughters follow their parents' behavior and have grand children to Adams and Eves along with the cohort made up in each year. This is the genesis of the System Dynamics Model of Demography. That is why their macro behavior obeys the order of exponential delay. An exposition is present here in the paper. Population policy is one of the most interesting research fields of policy sciences today, so that SD/ST applications to them might improve the real policymaking practices in the near future.

キーワード： 人口動態 出生秩序 死亡秩序 少子化 指数遅れ

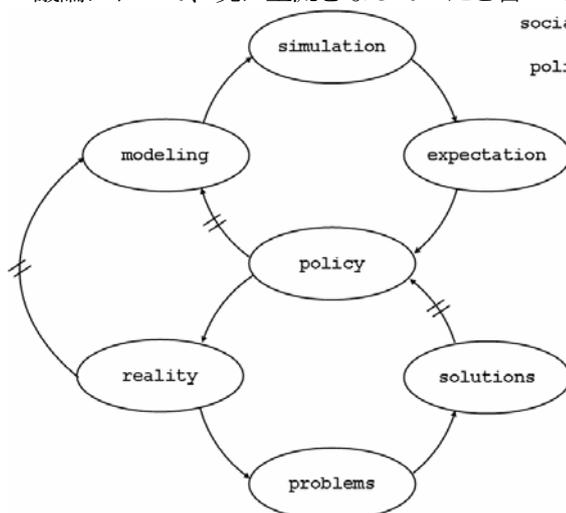
要旨：

システムダイナミクスによる人口モデルを構築し、シミュレーション結果を分析することにより、人口動態の研究にも、少子高齢化に対する政策改善にも裨益し得る、SD 独自の貢献の存する処を明かにする。それは現実の政策決定を改善することを目的とした政策研究に方法的基礎を与え、政策過程に新たな良循環を導入する。

1. 政策決定改善に対するシステムダイナミクスの意義

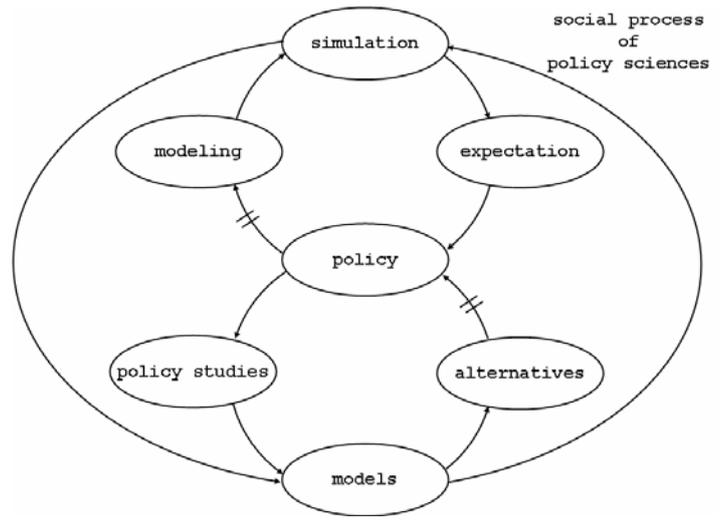
公共政策の決定を改善するための研究は、経営学研究と並んでシステムダイナミクスの応用フィールドとして注目を集めてきた。公共政策を専門とする領域=政策科学=が成立するに際して、その方法論研究とシステムダイナミクスとの関係が取り沙汰されることはなかったが、本稿では、反少子化戦略を例にとり、この問題関心を俎上に載せようと思う。

モデリング&シミュレーションが、現実の政策決定において当然のように受け容れられるようになったのは1970年代以降のことである。とは言うものの、社会保険や公的年金等のように、将来人口に関するシミュレーション抜きでは制度設計を論じることに意味がない、と広く諒解される政策領域は、19世紀以降の近代的社会政策の議論において、既に主流をなしていたと言っても過言ではない。そこでは左図のような社会プロセスを措定することが



ことができる。上半分のループを時計回りに読み、政策決定は相互作用を媒介とした社会プロセスからの帰結として定まる、つまり社会的相互作用としてのモデリングとシミュレーションが、未来に対する共有化された予想を形成し、その予想に基づき政策が決まると考えるのである。社会的学習を通して、修正されたメンタル・モデルもまた共有される。同時に政策の実施は現実に変化をもたらすから、長い遅れを経て当初のモデリングの改訂を促す。一方、下半分の反時計回りのループをたどって、もっと直截に、政策は現実的諸問題を引き起こし、それへの現実的解答が弥縫策を生み出し、溜まった弥縫策は遅れを経て、政策を変化させる。社会的政策決定はこの意味でシステムダイナミック過程になっている。

上図の社会プロセスはそこに含まれる長い遅れのために、政策を固定させるような期待の安定化をもたらす、モデリングとシミュレーションの権威付けが必要とされ、現実を直視したモデリングの改訂要求=社会科学的研究は、時として弾圧される傾向にさえあった。そのことがもたらす政策改善の隘路を解消し、現実の変化と固定された政策が引き起こす諸問題を乗り越えるべく、20世紀の半ば過ぎから興った政策科学の運動は、上図の下半分の社会プロセスを右図のような、政策研究の多様な展開を促進する社会制度で置き換えることにより、多様なモデルの形成と、それに導かれる多様な代替案の提示を促すものであった。それら代替案がたとえ政策の変更をもたらさなくとも、外側の大回りのループによって、多様なモデルが社会的なシミュレーションとの間にフィードバックを持つことができ、それが人々の未来予想を改善し、そこから政策を改善する志向が引き出されると期待されるのである。



社会的シミュレーションと多様モデルとの直結を実施可能にしたものは、正しく20世紀末のIT革命である。その故に、以上のコンテキストにおいて、図の政策研究のパーツをSD/STで置き換えても違和感はない。

以下では人口政策を例として取り上げ、従来の人口モデルがシミュレーションの固定化を生み、社会的に共有される単一の未来予想が反少子化戦略の代替案を狭めているという現状を、高次指数遅れ現象の定式化というシステムダイナミクス手法を導入して、代替的な出生-死亡モデルを提出することによって例示しよう。

2. 人口動態学とシステムダイナミクス

2.1 人口動態統計

以下では厚生労働省の所管にかかる人口動態統計を専ら用いる。確定版では最近平成18年より、遡って各年、平成9年までが、同省ホームページから検索可能である。それ以前については印刷されたものが出版されているので、昭和45年まで(1970~1997年)の分を筆者においてデータ化したものを用いる。

死亡秩序についてのデータは『人口動態統計』中巻・死亡・第4表「死亡数、性・年齢(各歳)・都道府県(13大都市再掲別)」を、出生秩序については同・中巻・出生・第7表「出生数、性・母の年齢(各歳)・出生順位・嫡出子-嫡出でない子別」を参照した。

2.2 死亡秩序

年齢別の死亡数を1970年~2006年まで表にしたものが図1である。

年齢は0歳から114歳までであるから、ここに掲載されている死亡者は、最古1856年(安政三年)生まれということになる。すなわち過去150年間にわたる歴史を背負った日本近代化の過程をそこに読み取ることができる。人口動態学が社会科学・政策科学の実証研究において果たす役割と意義が、たった一枚の表を参照するだけで、自ずから明らかとなること、そして長期変動を理論的に取り扱う研究方法としてのシステムダイナミクスがもたらす貢献が、これから発見されるものも含めて甚大であろうことが、この図によって諒解されるのである。

年	昭和45年 1970	昭和46年 1971	昭和47年 1972	昭和48年 1973	昭和49年 1974								
年齢	総数	男	女	総数	男	女	総数	男	女	総数	男	女	総数
0	25412	14747	10665	24905	14292	10513	23773	13840	9933	23693	13698	9995	2186
1	3115	1760	1355	3032	1633	1399	2993	1609	1384	3193	1796	1407	294
2	1885	1089	796	1739	1031	768	1840	1080	750	1853	1089	784	181
3	1349	786	563	1354	808	546	1448	875	573	1471	898	573	134
4	1118	703	415	1052	643	409	1212	748	464	1149	737	412	106
5	1057	641	416	895	538	347	962	613	349	998	616	382	97
6	913	592	321	889	562	327	792	496	296	858	524	334	77
7	716	442	274	718	450	268	741	468	273	662	414	248	60
8	598	392	216	601	391	240	600	392	219	614	405	209	47
9	525	327	198	492	309	183	504	309	195	492	299	193	44
10	475	275	200	479	275	204	421	256	165	427	252	175	38
11	491	309	182	399	256	143	429	279	150	435	273	162	36
12	539	357	182	465	298	177	442	268	174	407	271	136	36
13	537	344	193	473	289	184	494	316	178	485	289	196	42
14	583	367	216	527	328	199	530	350	180	499	308	191	44
15	742	490	252	706	465	241	596	404	192	648	430	218	64
16	1167	853	314	1243	977	266	1130	898	262	1037	791	256	106
17	1542	1148	394	1487	1143	344	1345	1021	324	1377	1061	306	107
18	1618	1157	461	1511	1155	356	1362	989	373	1278	926	352	112
19	1857	1315	542	1659	1163	496	1563	1103	460	1395	892	413	122
20	2159	1435	724	1962	1250	612	1721	1199	522	1600	1120	480	132
21	2355	1576	779	1963	1291	672	1899	1284	615	1714	1163	551	145
22	2410	1622	788	2290	1506	774	2048	1363	685	1857	1240	617	154
23	2041	1262	759	2324	1497	827	2270	1469	801	2056	1313	743	174
24	1415	898	517	2010	1335	675	2271	1482	809	2231	1430	822	194
25	1784	1123	661	1468	924	544	2074	1312	762	2163	1394	769	204
26	2036	1277	759	1666	1065	601	1495	968	527	1897	1212	685	206
27	2144	1369	779	1999	1226	773	1683	1073	610	1344	842	502	184
28	2207	1369	838	2019	1282	737	2031	1299	732	1662	1054	608	124
29	2200	1365	835	2032	1270	762	2000	1259	741	1985	1184	781	153
30	2129	1370	759	2098	1289	816	2175	1342	833	1937	1190	747	184
31	1655	1154	701	2033	1264	769	2160	1332	828	2172	1346	826	164
32	2294	1408	886	1978	1244	734	2047	1259	788	2160	1311	849	207

図1 データ画面

以下ではこの表を出発点として死亡秩序について実証的・理論的検討を加えることとする。

図1の各歳別死亡数のうち2006年の総数のコラムをグラフにしたものが図2である。

図2のグラフは、この年(2006年)に横軸の各年齢にあたる人が何人亡くなったかを横軸の目盛りに合わせて高さで示す点を、折れ線で結んだものである。これは一時点の言わばクロスセクション・データであるから、折れ線で結んでも余り意味はないが、これを基に死亡年齢の分布を求めることが本節の狙いである。図2は114あるすべてのコホート(生年別隊)の死亡数の経年変動をその隊の年齢にしたがってグラフ化したものの右端を拾い集めて線で結んだ結果になっている。このことは図3で見ると分かりやすい。

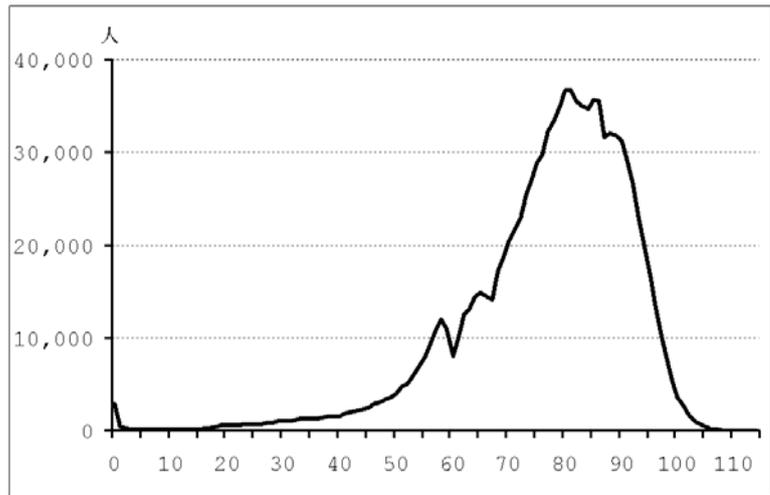


図2 2006年 各歳 死亡数 総数

ここで三角形のマークを付したものが各隊の経年変動の終点(右端)を線で結んだ図2のグラフである。コホート別の折れ線は、各々個々にダイナミックな変動を、年齢という、全コホート共通の横軸の上に重ね合わせたものである。

図3は図1の表を図4のように並べ替えることによって初めて得られる。図3の各グラフは図4のセルの要素をロウ方向に繋いだものにほかならない。

図1から図4への変換はエクセルの通常の組み込み関数にはなく、ダイナモのマクロにも用意されていないので、VBAを用いて新たにプログラムした。

これは図1の原表のセルを斜めに繋ぐシリーズをグラフにしたり、合計をとったり、カット&コピーしたりする表計算機能がなければ必要のない作業であるが、あるいは初心者悲しきで便利な機能があるのを知らないだけかも知れない(専門家の御教示を俟つ)。

いずれにせよ、図4に見られるような生まれ年を同じくする隊が、年齢を経るにしたがってどのように死亡数を変化させて行ったかを、時系列として見るためには、公表されている統計の表が採用している縦横(行列)の儘ではなく、斜滑降的なセルのセレクトが要る。これに基づいて初めて図3の各隊の死亡数の経年変動を各隊の年齢にしたがって表すグラフ群ができあがるのである。

ところで、各コホートの出生時における母数すなわち出生数は、1892年(明治25年)から2006年(平成18年)までをグラフにしてみると、図5に見られるようになかなか大きな変動性を示している。ただし、実際のデータは1899年以前が欠けていたので左

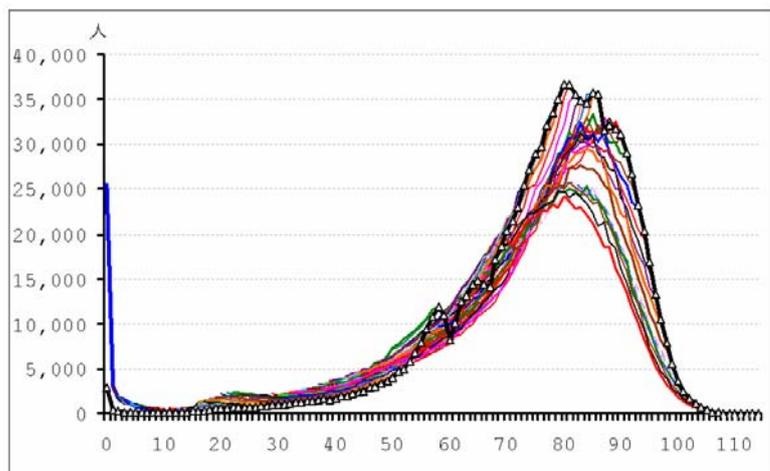


図3 各隊死亡数の経年変動を各隊年齢にしたがって表したグラフ群

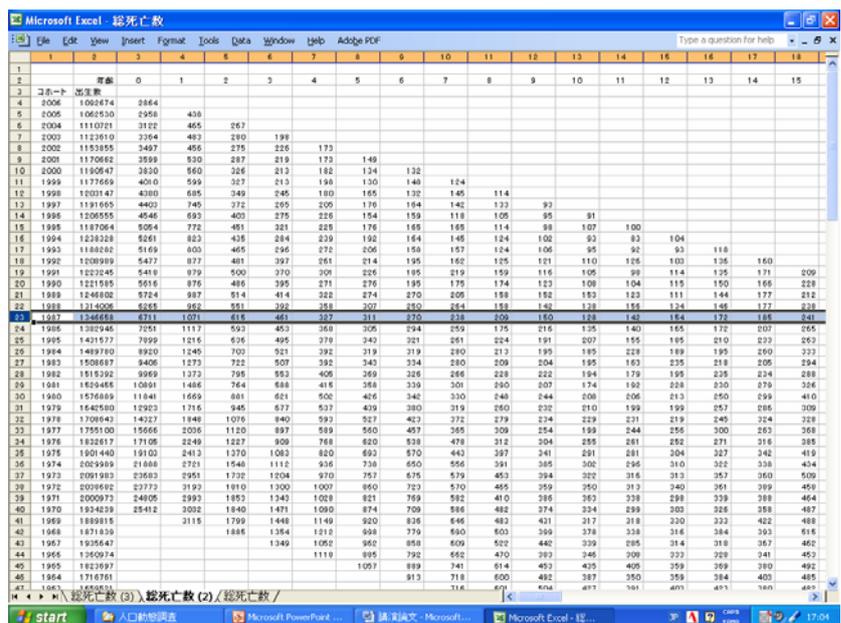


図4 全隊の経年変動を各隊年齢にしたがって表した表

と、図5に見られるようになかなか大きな変動性を示している。ただし、実際のデータは1899年以前が欠けていたので左

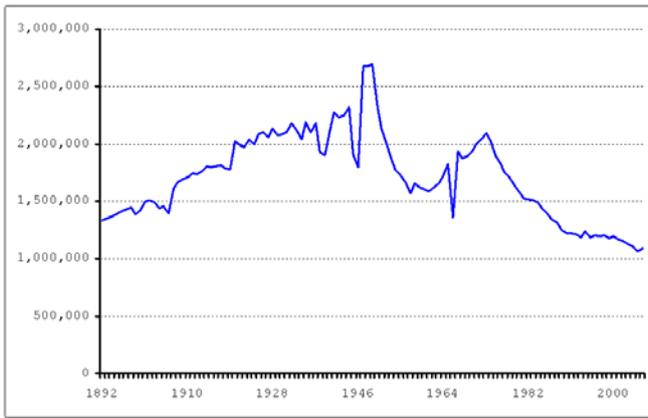


図5 出生数

端 8 個の数字は回帰直線による予測値である。

このグラフを観察するだけで、山ほどのコメントを垂れることができる。団塊世代と団塊ジュニア世代との出生数の山が、前者はタイト&トールで後者はその裾野を広くした分だけ頂が低くなっていることなどもそのひとつで、まさに指数遅れ現象の恰好の実例を解説することができよう。だとするならば第三の山はこれから来るのであり、右端がジリ貧に見えるからと云って一大事と騒ぐこともなく、単に時代が変わって平均遅れが長くなった結果だと総括することもできる。ただしこのような直感的解説に根拠があるかと問えば、答えは否である。

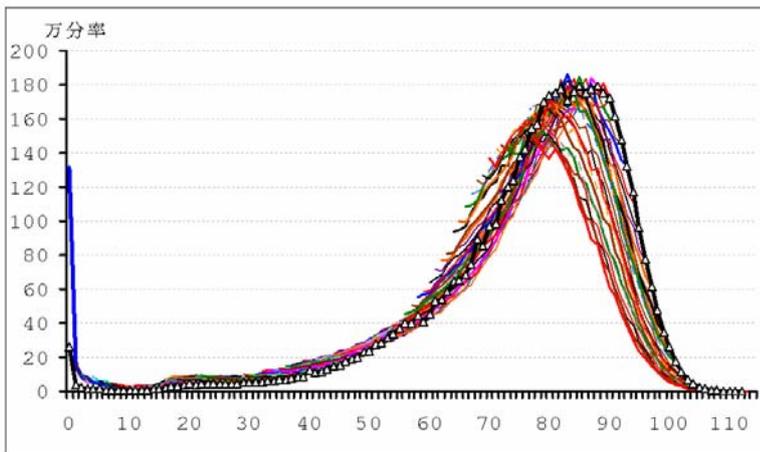


図6 各隊の死亡レイトの経年変動を各隊年齢にしたがって表したグラフ群

根拠のある解説をするのが本稿の主題であるから、以下のような分析を施す。

各コホートの死亡数を各出生時における母数で割って縦の比較が意味を持つようにしたものが図6である。

これは、図4の各列の死亡数を第二列の出生数で割って1万倍したものである。すなわちすべてのコホートが発発時において1万人であるとしたとき、それぞれ年々歳々何人ずつ亡くなって行ったかをグラフにして、死亡時の年齢を同じ横軸とするように重ね描きしたものである。一部の隊を抜き描きすると、(a)~(d)が得られる。

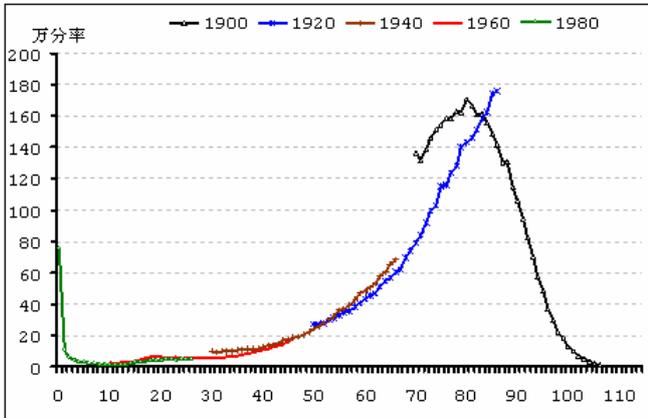


図6 (a) コホート1900~1980

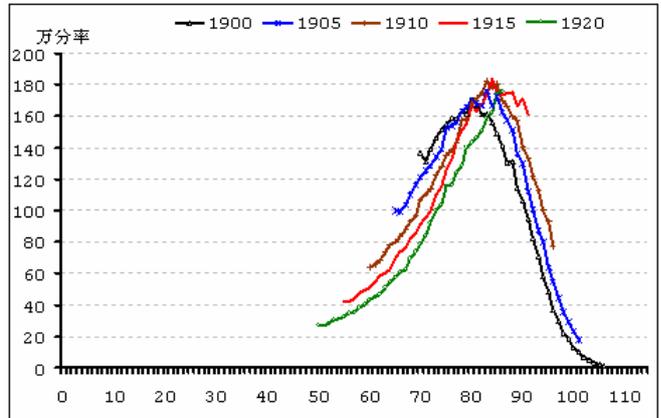


図6 (b) コホート1900~1920

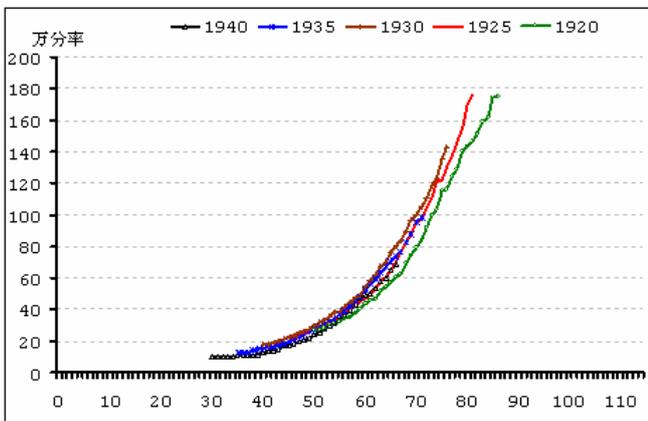


図6 (c) コホート1920~1940

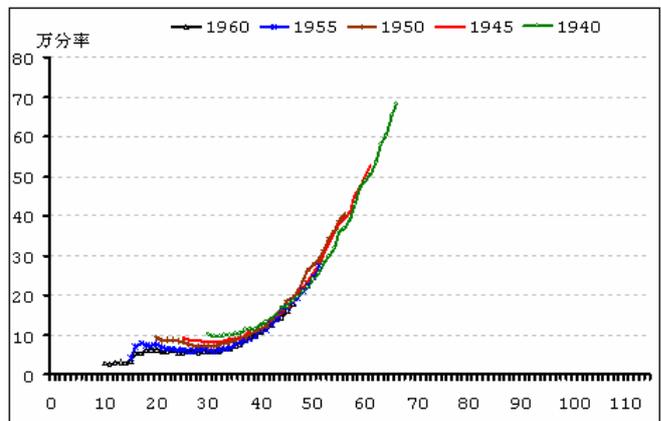


図6 (d) コホート1940~1960

図6および図6の(a)~(d)を見て気がつくことは、コホートによって死亡年齢の分布が大きく相違するということである。しかし相違するとは言うものの、そこには或る意味で顕著な傾向が見て取れるのであり、それによって死亡秩序について次のような仮説を立てることが可能になる。すなわち：

命題1 死亡レイトは出生レイトの高次の指数遅れである。

以下、この仮説の確からしさと意味とを明らかにしよう。

2. 3 システムダイナミクス・モデル

図6のコホート別の死亡レイトを各年齢毎に縦方向に平均すると、図7の全コホート平均と名付ける比較的滑らかな曲線が得られる。この曲線はその滑らかさにおいて、命題1の尤もらしさを或る程度裏付けている。

これを2006年の死亡数データに基づく各歳別死亡レイト(三角マーク)曲線と比較してみれば、一目瞭然、この曲線によって代表される死亡秩序を理論化することには、人口動態学上の意義が存すると期待される。

現実のデータを理論曲線に当て嵌めた結果ではなく、また近似のための収束計算によるものでもなく、生のデータを単純な一次変換のみを用いて加工した結果、これほどの滑らかさをもつ曲線に到達した例を、筆者は寡聞にして知らない(それほど大仰でもないが)。

ここに人口動態学上の理論法則が存するのであり、その原理を解明することにシステムダイナミクスが貢献し得るのであれば、以上の高度に労働集約的な作業も無駄ではなかったということになる。

図8の曲線はいかにもシステムダイナミクスのシミュレーション結果であるかのように見える。逆に言えば、このような出力結果を得るようなシステムダイナミクス・モデルを建てることができれば、そのモデルは人口動態学の原理と呼ぶべきものの一つの候補になっているということである。

人口現象をシステムダイナミクス・モデルで表すことは比較的簡単である。それは、次のレベル方程式に盡きるからである。

L 人口、K=人口、 $J+DT \times (\text{出生} - JK - \text{死亡})$

要はこの右辺の死亡レイトの決定がいかなるレイト方程式で表される時、図8の曲線と同じ変動曲線を出力するか、を検討すれば良いのである。

この推量に基づき、以下のようなモデリング&シミュレーションを展開することができる。

任意の一人の日本人がx歳で死亡する確率を $P(x)$ と書くと、図8は $P(x)$ のグラフであり、 $0 \leq P(x) \leq 1$ 、

かつ $\sum P(x) = 1$ である。ここで \sum は x の取り得るすべての値にわたって和をとるオペレータである。

これにより確率変数(死亡年齢)の平均値 m と標準偏差 s を求めると

$$\text{平均値: } m = \sum x P(x) = 73.44 \quad \text{分散: } s^2 = \sum (x - m)^2 P(x) = 331.56$$

を得る。すなわち、平均死亡年齢は73.44歳、標準偏差は18.21歳である。これは分布のモードが82歳であることを考えると、感覚的平均寿命よりもかなり低い値であると言わなければならない。

もし命題1が正しければ、死亡レイトの決定方程式は次のものであるから、ここで計算された平均値と分散によって、高次指数遅れの平均遅れと次数が推定される筈である。すなわち：

R 死亡、 $KL = \text{DELAYN}(\text{出生}, \text{平均遅れ}, \text{次数}, \text{初期値})$

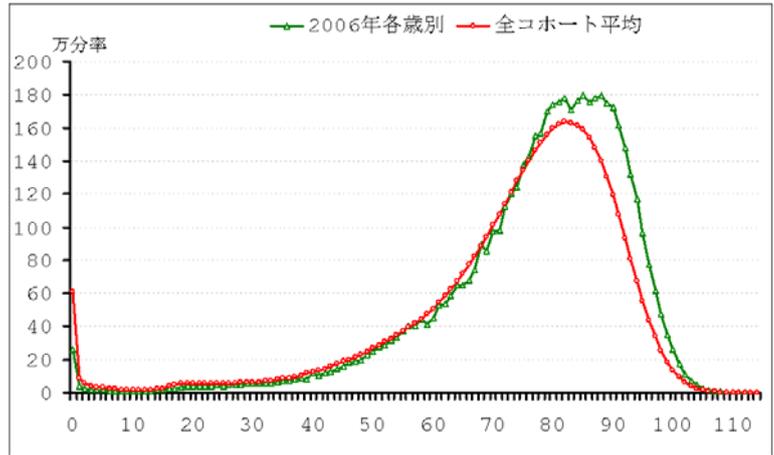


図7 全コホート平均死亡レイト曲線

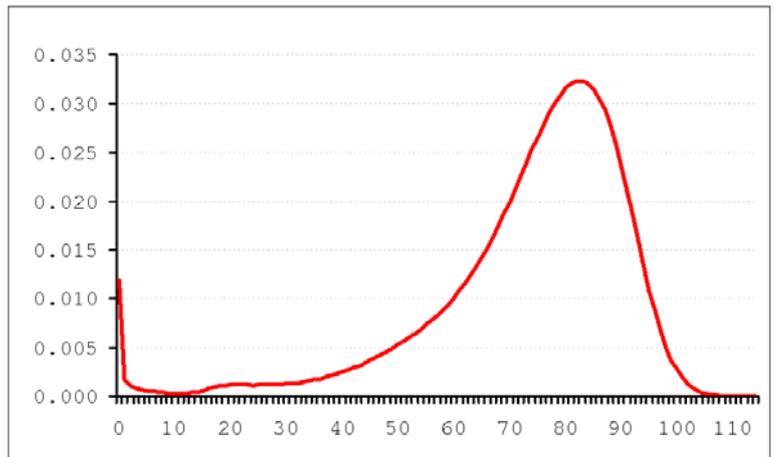


図8 死亡年齢の確率分布

である。なんとすれば期間 $[0, 0+dt]$ における高さ $1/dt$ のパルス・インフローに対する時刻 t における k 次の指数遅れアウトフローを $z_k(t)$ と書くと、

$$z_k(t) = (k\lambda)^k [t^{k-1} / (k-1)!] \exp(-k\lambda t)$$

であるから、 $\mu = 1/\lambda$ 、 $\sigma^2 = 1/(k\lambda^2)$ となることを利用して、 μ の推定値として m を用い、 σ^2 の推定値として標本分散 $ns^2/(n-1)$ を用い、平均遅れ $T=m$ と、次数 $k=(n-1)m^2/(ns^2)$ を適当にまるめた値とが計算されるからである。実際に計算してみると、 $T=73.44$ 、 $k=16$ となる。

出生レイトを、期間 $[0, 0+dt]$ における高さ $1/dt$ のパルス・インフローとするためのレイト方程式は次のようになる。パルスの高さは本来 ∞ であるが、たとえば $DT=0.25$ なら高さは 4 で、この値には実証的意味はない。

$$R \quad \text{出生} \quad KL=0 \qquad N \quad \text{出生} = 1/DT$$

この一組のダイナモ方程式モデルで表されるレベル変数人口は、単一のコホート人口の生残率曲線を描いて変動する。シミュレーション結果は図9のようになる。(a)の縦軸はスケールの maximum を恣意的に 1.2 にしているだけで、出生のパルスは座標軸の範囲外にハミ出しているものと見なすべきである。

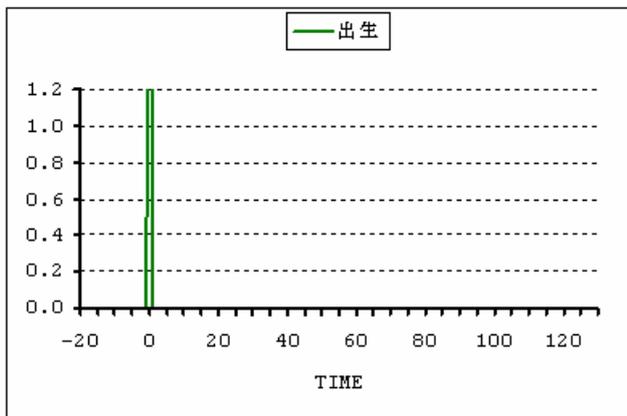


図9 (a)

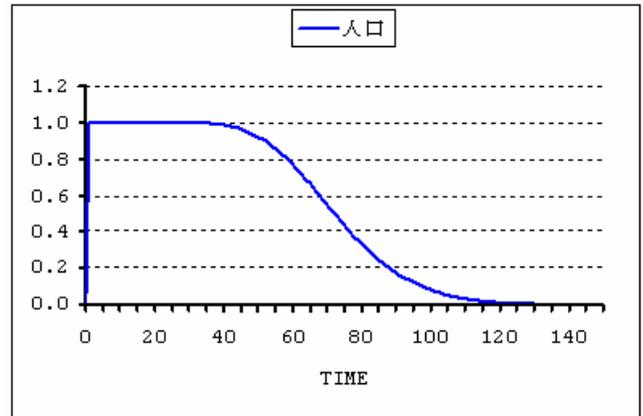


図9 (b)

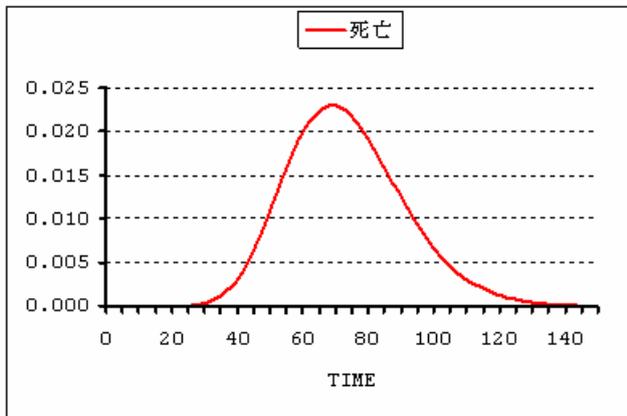


図9 (c)

時刻0におけるパルス変動が図9(a)に示されているような出生のインフローになると、レベル人口の値がゼロから一気に1に増大する。これが時間が経つにつれてコホートの生残率曲線を描いて減少してゆく様子が図9(b)に見て取れる。この時アウトフローとなる死亡の変動は図9(c)のような形状をなし、平均遅れの回りに死亡年齢の確率分布にしたがって散らばる様子が観察される。

図9(c)が図8の死亡年齢の確率分布をシミュレートしていると言えるであろうか。一答えは否である。

したがって仮説は棄却され、命題1は成り立たないと言えるかという、それも否である。

図9の結果は恣意的に推定した平均値と分散に基づくものである。それはこの命題を成立させる代替的なパラメータの推定方法を些かも排除するものではない。代替案のうちの一つを以下において例示する。

図10に平均遅れを等しくする1次から120次までの指数遅れを描かせてみた。全体として図8の死亡年齢の確率分布を導き出すために用いた図6のグラフ群によく似ていることに気付かれるだろう。図8は図6のすべてのグラフの縦方向の平均値を繋いだものであったことを思い出すならば、そして、どのグラフも定義域がずれていて、年齢によって平均値の計算に組み入れられるコホートの組み合わせが異なることを考慮に含めるならば、観察の上から最も尤もらしく思われる仮説は次の命題に纏めることができる。

命題2 死亡年齢の確率分布は高次指数遅れの凸結合によって表される。

すなわち、所与のウェイト ω_k ; $0 \leq \omega_k \leq 1, \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_k + \dots = 1$ に対して、 x 歳で死亡する確率は

$$P(x) = \int_{x-1}^x f(t) dt \quad \text{但し} \quad f(t) = \sum_k \omega_k (k\lambda)^k [t^{k-1} / (k-1)!] \exp(-k\lambda t), \quad x=1, 2, 3, \dots \text{で表される。}$$

ここで $P(x)$ は離散量の確率変数に対する確率を表し、 $f(t)$ は密度関数を表している。またダイナモ方程

式で定義されるレイト変数の値は、単位時間当たりの流率であり、DT ごとに変化する離散量 t の関数である。これは密度関数に相当するもので、 $P(x)$ と比較するためには1歳ごとに各期累積をとらなくてはならない。

すなわち死亡年齢の確率分布に相当するのは、初期の出生 $1/DT$ に対する死亡レイトのブック方程式である。¹

それは次の式で表される。

- L 累積 K=累積 J+DT×(死亡 JK-更新 JK)
- R 更新 KL=PULSE(累積 K, 1, 1)
- N 累積=0

この累積の TIME =1.0, 2.0, 3.0, … における値が、 $x=1, 2, 3, …$ に対する確率に相当するのである。

図11に図8の死亡年齢の確率分布と指数遅れの凸結合との比較を示してある。

図中にコホート平均として三角マークを付してあるのが死亡年齢の分布である。

+マークが1次の指数遅れ、丸マークが1~30次の指数遅れの平均、×マークが5~80次の指数遅れの平均、菱形マークが120次の指数遅れである。

これによりほぼ明らかとなるのは、命題2は、いくつかの年代に分割することを許せば（たとえば青壮年代の15~60歳まで、老年代の75~90歳までという具合に一生を年代に区分することができれば）、区分的にユニークなウェイト $\{\omega_k\}$ を決定できる、ということである。

システムダイナミクスの検証手続きに従う（シミュレーション結果を目で見比べて比較する）限り、命題2は間違いなく成立する。重要なのはその因果の解釈である。恐らく、1コホートと雖も、人口は様々な次数を持つ指数遅れにしたがって死亡する人々のサブ集合からなっているのであろう。そのヴァリエーションは必ずしも生まれた年を等しくする集団=コホート=の属性によって決まるものではなく、同じ平均寿命に対しても異なる遅れパターンを示す部分集合として区別されるのである。各サブ集合のサイズによって加重和をとることにより、1コホートの特定の年代における死亡レイトが決定される。各隊を同一次数をもつものの集団へと組み換えることが可能であれば、そのことを唯一のクラリフィケーションとして命題2が、したがって命題1が成り立つ。

人の生き死にに関わる、こうした差別は容認できない、という説も成り立つ。

しかし、シミュレーション結果はこの論に対する次のような回答も用意している。

ゼロ歳の死亡率が飛び抜けて高い理由は、生後一年間は全員の死亡確率に区別はなく、すべて一次の指数遅れに従うからである。すなわち、生まれてやがて年を経て死んで行くのが人間の自然であるが、その過程において徐々に指数遅れの次数が増加するのである。そこでは発育・成熟環境の差によって様々の次数へと分化が生じる。最初の出発点（出生時）ではすべて等しく一次の指数遅れであった平等な人間が、1次から30次、5次から80次へと分化して行くのは、まさに社会的なプロセスである。120年という比較的長いスパンで見れば、夭折するものから長寿ギネスに載るものまでのヴァリエーションが生じる。どこまでが神の摂理かは俗物たる筆者の知るところではないが、ここに人口変動の死亡秩序を見るのである。

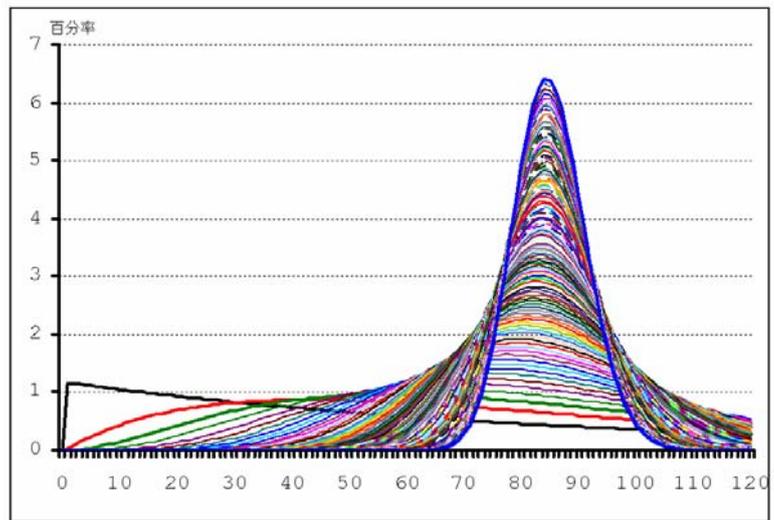


図10 平均遅れを等しくする1次から120次までの指数遅れ

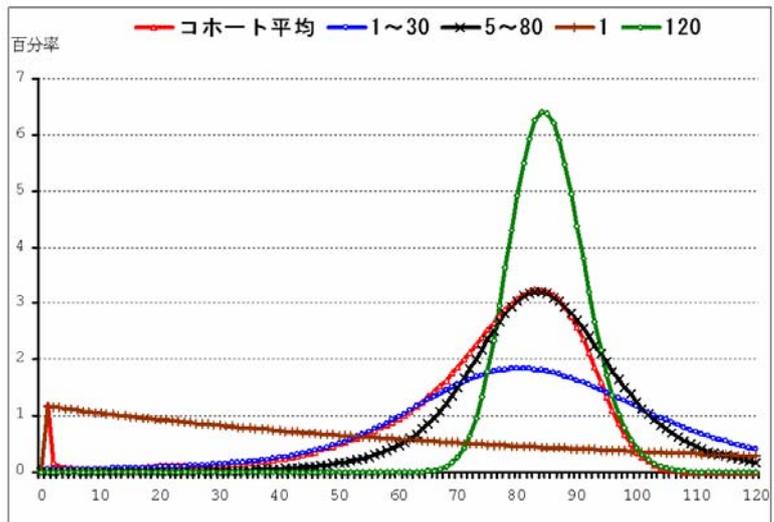


図11 死亡年齢の確率分布との比較

¹ 拙稿「期間分析と連続分析を繋ぐ環としてのSDの方法」『JSD学会誌システムダイナミクス』第7号 2008年. 参照。

2. 4 出生秩序

死亡秩序の分析においては、出生は天から与えられるものと仮定されていたが、もちろんそれは分析上の便宜であるに過ぎない。出生ももちろん人口現象の一つの帰結であり、ここに因果がループするフィードバックの環が存在している。出生の傾向を云々する際に屢々用いられるものに合計特殊出生率という概念があるが、それは

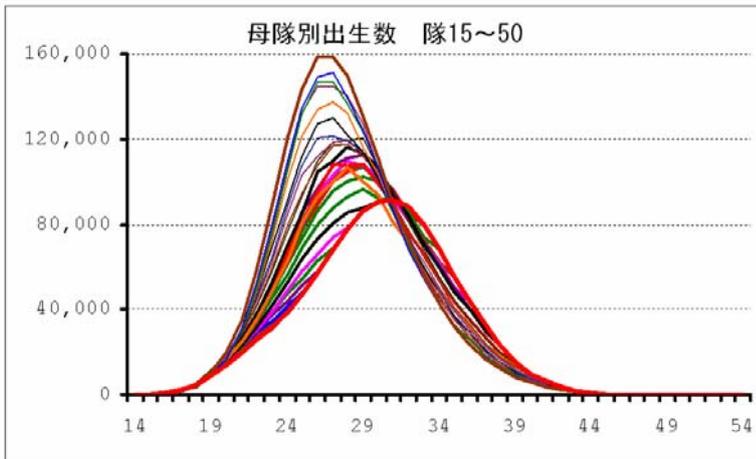


図12 母親のコホート別・各歳出生数

図12は平成5年(1993年)から平成18年(2006年)までの人口動態調査の数字を用いたものである。したがって、隊15~隊50というのは、平成18年に15歳であった女性(1991年生まれ、現在17歳)の人口によって構成されるコホートから、平成18年に50歳であった女性(1956年生まれ、平成5年には37歳、現在52歳)の人口によって構成されるコホートまで、1歳違い宛に隊をとって、2006年現在における各年齢を隊名として並べたものである。同じ年に生まれた女性たちが、一生の間に何歳でどれほどの子供を持つかを追跡するグラフであると言っても良い。

隊毎に、また年毎にコホートの構成メンバーの数(コホート人口)は異なるので、各出生数を対応するコホート人口で割って隊別出生率とし、相互比較可能にしたものが図13である。一番左側にある曲線を見ると、26歳のところにモードを持ち、単峰型の、左に偏した、右側に長く裾野を引く山になっている。

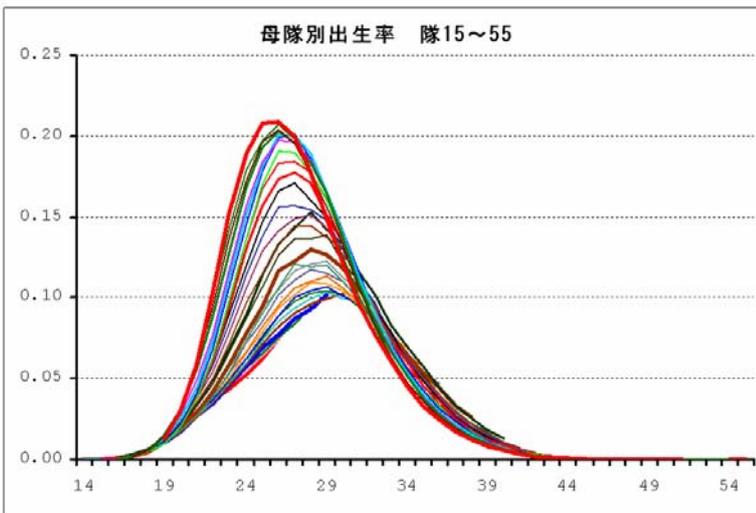


図13 母親の隊別出生率

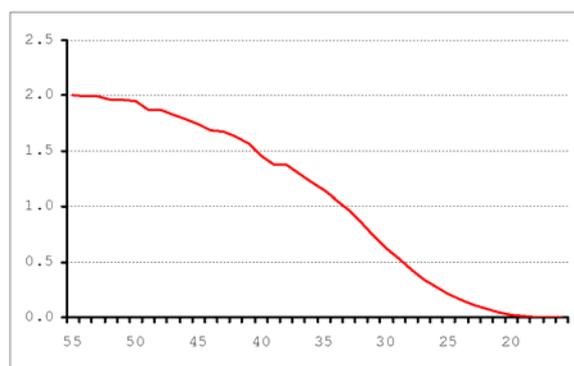


図14 合計出生率の推移

図12の曲線群の内、一番右側のものを使って求められる。一年間に生まれた子供の数を、その母親が属するコホート毎に集計して、各コホートの年齢毎にプロットしたものが図の曲線群であるが、その右端を繋いだ曲線がそれで、最近年の各母親年齢別出生数を、コホート横断的に線で結んだものである。ここではその意味は問わない。

これは隊55のコホートで、1951年生まれ、現在57歳の女性たちの各歳における出生率である。彼女たちは26歳のときにその内の21%が子供を産み、これをピークに人生の後半期を迎え、各々子供達を立派に成人させて、今から老境に入るという人達である。この出生率を横に合計すると、隊55のコホートの平均的一人の女性は、一生の間に何人の子供をもったかが計算される。実際に合計をとってみると、約2人で、この値は隊名が降るにしたがって小さくなる傾向を示している。隊名の降順にしたがってこの「合計出生率」をプロットしてやる

と図14のようになって、最後には子供が一人もいなくなってしまう。これは、隊55より若いコホートはまだ生産年齢の真つ直中にあり、コホートの寿命を完結していないにも拘わらず、合計をとるという乱暴なことをした結果で、こんな事態は勿論起こらない。

図12の右端を結んだ線を各歳人口で割って横に合計した「合計特殊出生率」も、これと同じ誤りを含んでいる。

一人の女性が一生の間に何人の子供を持つかは、成熟途上の若いコホートが、これからどのような出生率変動を描いて行動するかにのみ依存している。それは百パーセント将来予測に関わることであり、誤てる情報に基づく将来予

測は必ず不幸な結果を導く（結果オーライということはあるけれども、それに期待して政策決定をなすこと自体が不幸である）。システムダイナミクスを役立てないならば日本の人口政策は必ず失敗する、と再三指摘して来られた故島田俊郎教授の炯々たる眼力に思いを馳せるものである。

注目すべきは図13の一番内側の6本の曲線である。現在27～32歳の女性達（隊25～隊30）は、合計特殊出生率の計算基礎になる出生率曲線とは別のピークを目指しているかのように見える。

隊25、26、27、28のコホートは各々の20代後半に、出生率の増加カーブを上を反らせるという、未曾有のビヘイビアを示した。隊29、30はそれに釣られたかのように、三十路を目前にしてサチュレート態勢にあった出生率カーブを上昇に転じたのである。

勿論彼女達自身は気付いていないだろうが、これが確率的事象が集計化された結果もたらされる全体変動の帰結であることを知れば、コホート内での同士の共感がヨリ的を射たものとなるであろう。

この観測は出生総数で見るとよりも、出生順位別出生数で見るとの方がヨリははっきりしてくる。図16 (a)～(h) によつて、第1子～第4子の出生順位別出生数を各コホート人口で割った出生率の変動を一覧することができる。

図(b)で隊30の出生率が山を越えているのは、この年齢で出産を迎える女性の多くが既に子供を持っており、第1子として生まれる子の割合が低くなった結果である。このことは図(d)以降に見るとおりである。

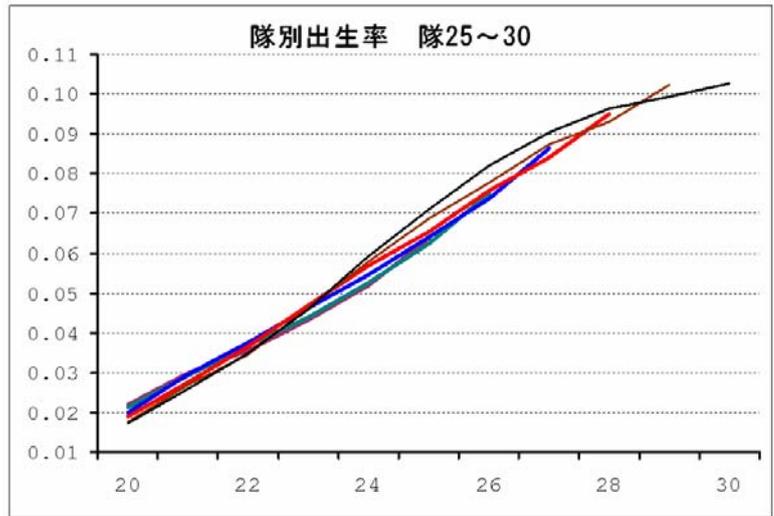


図15 27～32歳女性の出生行動

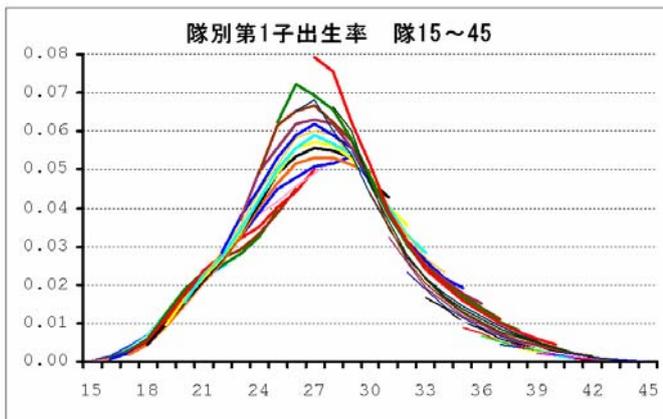


図16 (a) 第1子出生率

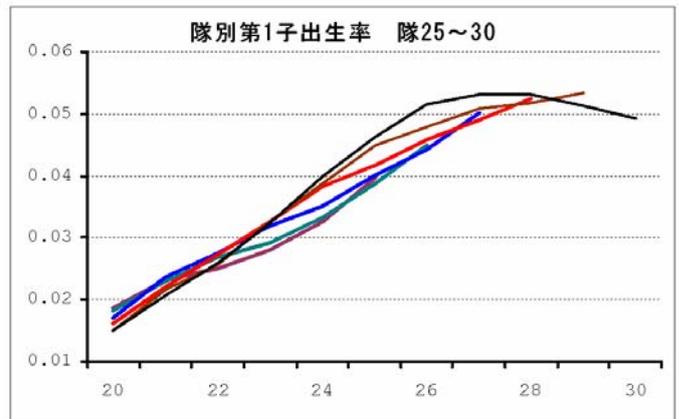


図16 (b) 第1子出生率 隊25～30

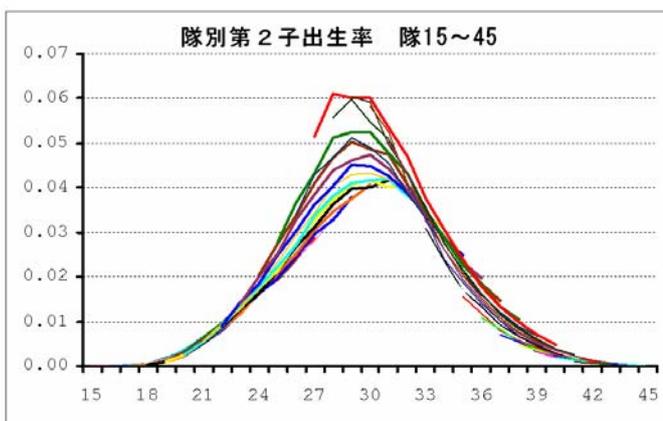


図16 (c) 第2子出生率

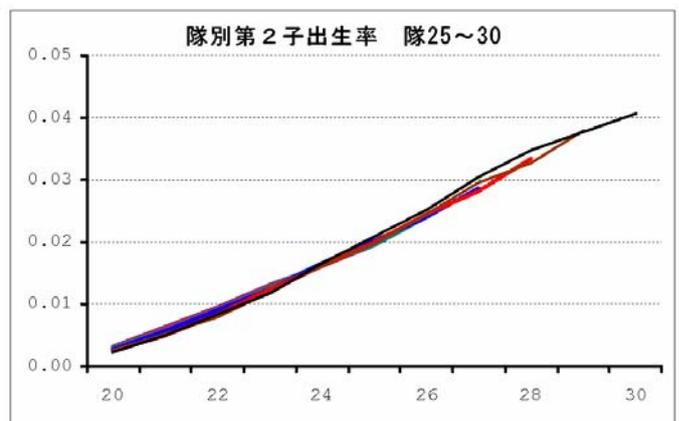


図16 (d) 第2子出生率 隊25～30

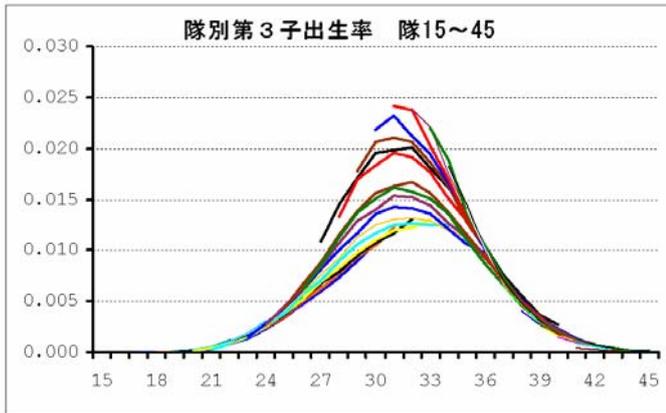


図 16 (e) 第 3 子出生率

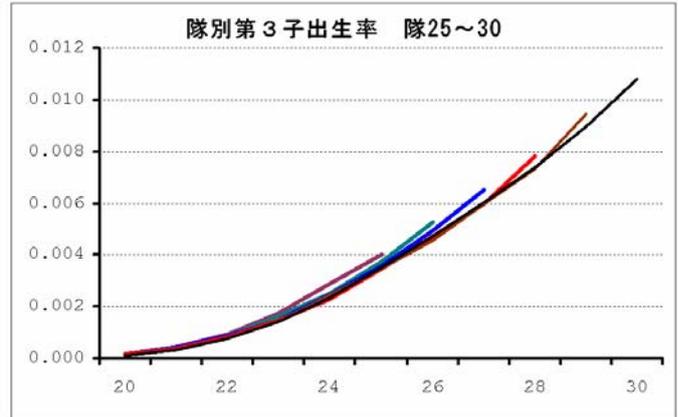


図 16 (f) 第 3 子出生率 隊 25~30

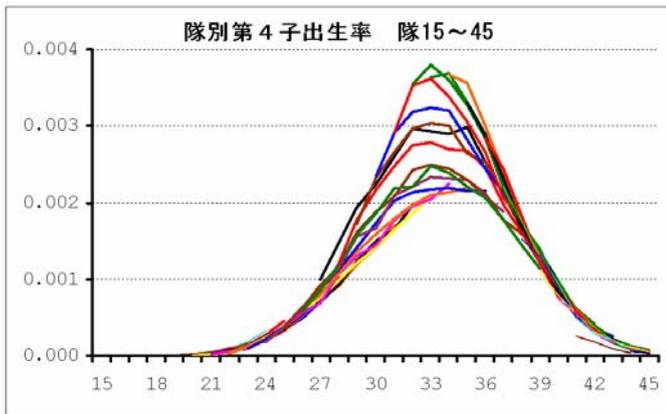


図 16 (g) 第 4 子出生率

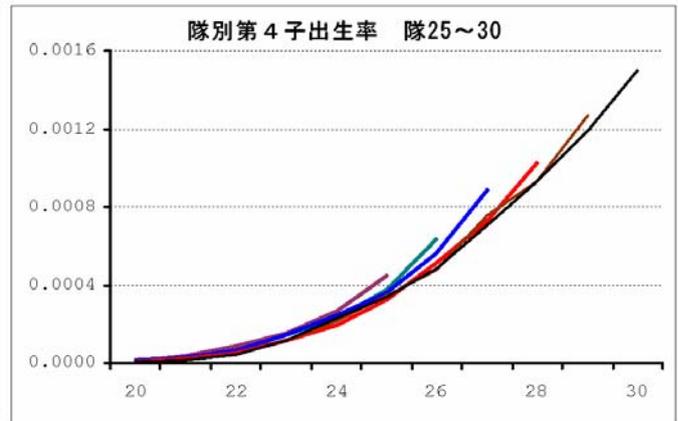


図 16 (h) 第 4 子出生率 隊 25~30

全体の傾向は見ての通りである。図(g)で、隊 45 が第 4 子の出生に頑張っているのは御愛嬌とも言えるが、図(h)において、20 代の女性達が第 4 子を出産する率を力強く上昇させている様子は感動的ではあるだろう。

このことを理解するならば、「近頃の若い女性は子供を産まなくなってきた」という物言いは、不当な言い懸かりであることが分かる。仮に少子化の原因が女性達の子供を産まないという意思決定の結果であるとしても、それは現在 27~32 歳の女性達ではなく、それより年上の既にピークを過ぎたコホートの女性達が、子供を多く産まなかった所為なのである。ただしこの誹謗も不当であることが後に明らかにされる。いずれにせよ、このような変化が何によってもたらされたかを動学理論的に明らかにすることがここでの目的である。妙齢の(隊 25~30 がそれに当たる)レディー・パワーが団結して頑張った結果などでは勿論ない。

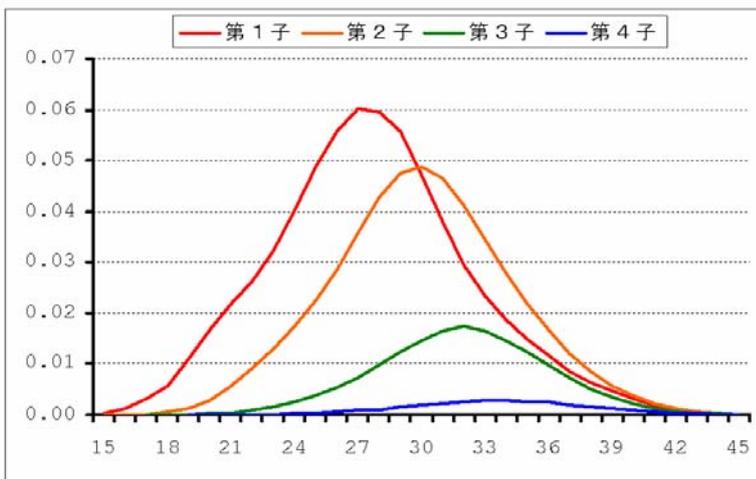


図 17 出生順位別出生率のコホート平均

上で見た出生順位別の母隊平均を同じスケールでグラフに表すと、図 17 が得られる。当然のことながら個々の女性にとって第 2 子誕生は第 1 子誕生より後でなければならないから、第 1 子→第 2 子→第 3 子→第 4 子と母親の各歳別出生率のモードも右に順にズレて行くことになる。

これは指数遅れ現象にはかならないから、コホートの出産行動というダイナミックな全体変動は、システムダイナミクス・モデルでシミュレーション可能であると推量される。以下では、ダイナモ方程式を用いて出生秩序をモデル化することにより、すでにできている死亡秩序のモデルと結合することを考えよう。これにより出生死亡秩序結合モデルの準備としたい。

これは指数遅れ現象にはかならないから、コホートの出産行動というダイナミックな全体変動は、システムダイナミクス・モデルでシミュレーション可能であると推量される。以下では、ダイナモ方程式を用いて出生秩序をモデル化することにより、すでにできている死亡秩序のモデルと結合することを考えよう。これにより出生死亡秩序結合モデルの準備としたい。

2. 5 システムダイナミクス・モデル Part II

図17は各コホートの各歳コホート人口に対する出生率を縦に平均したものであって、それ自体には意味がなかった。死亡レイトの場合とはその点が異なることに注意が必要であるが、そこで見たのは、第 $j+1$ 子出生率よりも第 j 子出生率の方がより左に偏した分布になっているということである。これを指数遅れ現象のひとつと考えれば、次のようなシステムダイナミクス・モデルを仮設することが可能である。

母として子を産むためには先ず自分自身が生まれていなくてはならないから、第1子を産むための潜在的母親人口は次のようなレベル方程式で表される。第1子出産により潜在母親は顕在母親となって潜在母親0のレベルを卒業するのである。

L 潜在母親0. $K = \text{潜在母親0. } J + DT \times (\text{母出生. } JK - \text{第1子出産. } JK)$

これを出発点として、第 $j+1$ 子を産むための潜在的母親人口を順次定義する。

L 潜在母親 j . $K = \text{潜在母親}j. J + DT \times (\text{第}j\text{子出産. } JK - \text{第}j+1\text{子出産. } JK)$

前と同様にして初期における高さ $1/DT$ のパルスを発生させるには次のレイト方程式を用いる。

$$N \quad \text{母出生} = 1/DT \qquad R \quad \text{母出生. } KL = 0$$

第1子出産は母出生の n 次の指数遅れである。

R 第1子出産. $KL = \text{DELAYN}(\text{母出生. } JK, \text{第1子出産年齢, } n, 0)$

第 $j+1$ 子出産は第 j 子出産の m 次の指数遅れである。

R 第 $j+1$ 子出産. $KL = \text{DELAYN}(\text{第}j\text{子出産. } JK, \text{遅れ, } m, 0)$

最後に顕在化率を乗じて第 j 子出生率 第 j 子 を求める。

A 第 j 子. $K = \text{顕在化率}j \times \text{第}j\text{子出産. } JK$

シミュレーション結果は図18のようになる。これは確かに図17と似ているが、それだけの意味しかないことを指摘して置かねばなるまい。フィッティングのためには、モードと頂上の高さ、および遅れの次数という3つの条件を推定してやるだけで良い。ただし、図17の出生率は各歳の母親のコホート人口に対する比率であり、このモデルの出生率は母親の初期時点における人口=母親自身の出生数=に対する比率であることに留意する必要がある。

この点はこれ以上詮索しない。その訳は、図17が合計特殊出生率と同じ誤りを含むものだからである。また、出生レイトはフローであるから、年間の出生数を求めるためにはブック方程式を用いて積分しなければならないが、ここではその議論も割愛する。

また上で定義した潜在母親の人口は、当然、死亡秩序に従って減少していくものである。レベル方程式には、死亡によるアウトフローを敢えて書かなかった。これを付け加えるのには、既に前節で見た結果を知っていることを前提として、何の障りもないことが諒解されるだろう。コホート年齢15歳から55歳までの潜在的母親人口の死亡レイトは低位に安定していて、1次から30次の指数遅れの平均が適用されることは既に見たとおりである。

ここで認識論上重要な点は、子供の出生という現象を母親の出生の高次の指数遅れとして把握する場合には、統計上のマクロの変動に合致させた計量モデルを作ることよりも、社会学的なミクロの仮説を積み上げた行動論モデルに注目した方が良からう、ということである。

確かに、一人の女性が一生の間に何時子供を生むかは確率事象であるから、第 j 子を産んでから第 $j+1$ 子を産むまでの年数は指数分布にしたがう確率変数となるが、子供を一人多く持つための条件整備には社会制度的な制約が重層的に負荷される結果、潜在母親のレベルが多段階構造を持つことになる。指数遅れの次数が高くなると、平均遅れの回りに出産時期がより小さな分散で集中する結果、早期の生起確率が減少する。第 $j+1$ 子出産が遷延されると高々二三十年の潜在母親任期中に持ち得る子供の数は限られてくることになる。

このことは、重層化の程度が低い原始的社会における「子沢山」に対して、社会制度が複雑化した高度文明社会における「少子化」という、人類学的社会法則を理論的に説明する論拠となり得る。

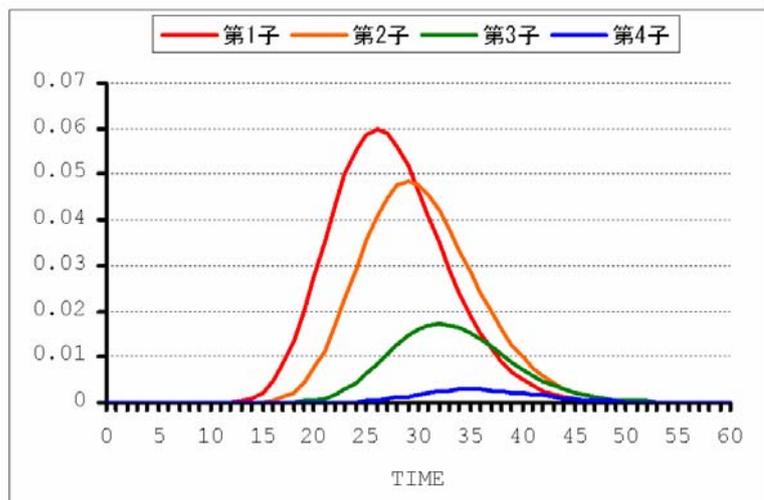


図18 シミュレーション結果

3. モデリング&シミュレーション

3. 1 出生死亡秩序結合モデル

以上の人口動態統計と指数遅れに関する考察によって、SD 人口モデルを定式化する準備が整った。

女性のみからなる1コホートの一生をシステムダイナミクス・モデルで記述することから始めよう。

最初に断り書きして置きたいのは、以下の筆致から、筆者はアンチ・フェミニストならざるやの疑いを招く恐れがあることである。女性は、間違いなく、子供を生む存在であるが、決してその役割を社会的に強制しようとする一党に与するものではない。モデリングの必要上、以下ではイデアルティプスとしての女性コホートの一生を取り扱うが、それは同時に平均的一女性の生涯モデルでもある。ただし、「イデアル」「平均的」「モデル」といった概念には、「正しい」とか「そうあるべき」といった評価判断を些かも付加するつもりはない。

(1) 女性コホートの編成

1コホートは同一年間に生まれた女性人口であるから、出生レイトを1年間積分して年末に一括して幼少女児のレベルへと引き渡すブック方程式で記述される。

L 新生女児. $K = \text{新生女児. } J + DT \times (\text{出生. } JK - \text{新生児死亡. } JK - \text{新参. } JK)$

R 新参. $KL = \text{PULSE}(\text{新生女児. } K, 1, 1)$

新生児の死亡レイトは一次の指数遅れで表される、という前節の検討結果をそのまま用いよう。

R 新生児死亡. $KL = \text{新生女児. } K / \text{平均寿命}$

L 幼少女児. $K = \text{幼少女児. } J + DT \times (\text{新参. } JK - \text{幼少児死亡. } JK - \text{成熟. } J)$

ここで新参レイトとは耳慣れない言葉であるが、この世に生まれて最初のハードル＝高い新生児死亡率＝を超えて目出度く幼少児の仲間入りをするという「新参＝デビュー」の意味と、そのことを寿ぎ、産土神に報告する「宮参り」の気持ちとが、このネーミングには込められている（これは余談）。

(2) 成熟化プロセス

幼少女児のレベルは子供から大人へと成熟化してゆくプロセスであり、新参をインフローとする高次の指数遅れアウトフロー成熟で推移するものであるが、全員が成熟する訳ではなく途中で亡くなってしまふ者もいる。

R 幼少児死亡. $KL = \text{幼少女児. } K \times \text{死亡率. } K$

R 成熟. $KL = \text{幼少女児生残率. } K \times \text{高次指数遅れ成熟. } JK$

A 幼少女児生残率. $K = \text{幼少女児. } K / \text{総新参数. } K$ 但し 総新参数=0 なら 幼少女児生残率=0

L 総新参数. $K = \text{総新参数. } J + DT \times \text{新参. } JK$

N 総新参数=0

R 高次指数遅れ成熟. $KL = \text{DELAYN}(\text{新参. } JK, \text{幼少期. } 10, 0)$

ダイナモ方程式で変数同士の割り算を定義する場合には分母がゼロになる場合を除外する工夫が必要である。特に幼少女児生残率のように、未だ新参が発生しないシミュレーション初期の1年間においては0/0の不定になることが予めわかっている場合には、スイッチ関数で分母がゼロの場合の然るべき値を与えておく必要がある。

(3) 潜在母親人口

成熟した女性は子供を生む可能性が在るという意味で潜在母親のレベルに流入する。

L 潜在母親 0. $K = \text{潜在母親 0. } J + DT \times (\text{成熟. } J - \text{第1子出産. } JK - \text{死亡 0. } JK - \text{退役 0. } JK)$

R 第1子出産. $KL = \text{潜在母親 0. } K / \text{平均遅れ 1}$

R 死亡 0. $KL = \text{潜在母親 0. } K \times \text{死亡率. } K$

R 退役 0. $KL = \text{潜在母親 0. } K / \text{現役期間 1}$

L 潜在母親 1. $K = \text{潜在母親 1. } J + DT \times (\text{第1子出産. } JK - \text{第2子出産. } JK - \text{死亡 1. } JK - \text{退役 1. } JK)$

潜在母親のレベルからのアウトフローは、基本的には、子供を産んで潜在母親となることによって決定されるが、この他には死亡によるものと退役によるものがある。死亡は前に見たのと同じ死亡率の変動曲線に従うが、死亡せずに潜在母親としての現役期間を終えて、第1子出産を迎えることなく退役する人もいる。

第1子出産レイトは一次の指数遅れで表される。これはまさに潜在母親になってしまえば何時第1子を産んでも不思議はなく、1年当たりの出生数がポワソン分布にしたがう確率事象に還元されるからに他ならない。

一つのレベルから相異なる平均遅れの長さを持つ数種類の指数遅れを流出させる場合、レベルがゼロになるまでの期間をとれば、このレベル方程式によつて、抛って置いても、各々のアウトフローの積分が各々の遅れの長さの逆数の比と等しくなるように配分される。遅れの長さの調和平均を平均遅れとする単一のアウトフローで流出する別のレベルを作ると、すべての時点において、二つのレベルの値は一致する。

第1子を出産した母親は直ちに第2子を出産する可能性を持つことは経験により明らかであるから、潜在母親

0 から第 1 子出産によって潜在母親 1 のレベルへの移行が生じる。

同様に、任意の j について次のレベル方程式が成り立つ。

L 潜在母親 j . $K = \text{潜在母親 } j \cdot J + DT \times (\text{第 } j \text{ 子出産 } JK - \text{第 } j+1 \text{ 子出産 } JK - \text{死亡 } j \cdot JK - \text{退役 } j \cdot JK)$

R 第 $j+1$ 子出産. $KL = \text{潜在母親 } j \cdot K / \text{平均遅れ } j$

R 死亡 j . $KL = \text{潜在母親 } j \cdot K \times \text{死亡率 } K$

R 退役 j . $KL = \text{潜在母親 } j \cdot K / \text{現役期間 } j$

(4) 合計特殊出生率

初期出生人口 1 に対して生まれる子供の数はそのまま人口に対する出生数の比率を表しているが、母親の年齢別（各歳）出生率は女性の各歳人口に対する比率であるから、出生率は次の式で求められる。

A 出生数. $K = \text{第 1 子出産 } JK + \text{第 2 子出産 } JK + \text{第 3 子出産 } JK + \dots + \text{第 } j \text{ 子出産 } JK + \dots$

A 出生率. $K = \text{出生数 } K / \text{生残数 } K$

この出生率を積分して合計出生率を計算する。

L 合計出生率. $K = \text{合計出生率 } J + DT \times \text{出生率 } J$

N 合計出生率 = 0

現実の統計における合計特殊出生率は、任意の暦年におけるコホート横断的な出生率の合計であるが、ここでは 1 コホートの一生の間に一人の女性が平均的に何人の子供を持つかを計算している。言葉の正しい意味において、その時系列的変動を問題にするのであれば、こちらの方が女性一人当たり生涯子供出産数を能く表すものと言える。コホート横断的合計特殊出生率は、第 1 子出生の時期が遷延される傾向にある時代には、その値が小さくなって実態を見誤る元となるが、それでは実態はどうなのか、をこの定式化によって示そうというのである。

(5) 死亡率

このモデルは 1 コホートの女の一生を定式化しているので、シミュレーション期間中には TIME が年齢と同時に進行する。そこでは単一の出生死亡秩序が反映され、死亡率は任意の時点において単一の数値でなければならぬ。

それは前節で検討したように、区分的に表 1 のような次数をもつ高次指数遅れの平均になっている。これをそのままモデルに組み込むために次の工夫が施された。

年齢区分	指数遅れ次数
歳	次
0 ~ 0	1 ~ 1
1 ~ 2	1 ~ 10
3 ~ 4	1 ~ 20
5 ~ 52	1 ~ 30
53 ~ 57	5 ~ 30
58 ~ 64	10 ~ 30
65 ~ 69	20 ~ 30
70 ~ 71	30 ~ 40
72 ~ 86	30 ~ 50
87 ~ 90	50 ~ 50
91 ~ 94	60 ~ 90
95 ~ 98	80 ~ 80
99 ~ 120	90 ~ 90

R 死亡レイト. $KL = \text{TABXL}([\text{リンク先セル}])$

L 生残数. $K = \text{生残数 } J + DT \times (\text{出生 } JK - \text{死亡レイト } JK)$

N 生残数 = 0

A 死亡率. $K = \text{死亡レイト } JK / \text{生残数 } K$ (生残数 = 0 なら死亡率 = 0)

ここで TABXL は DYNAMOP 特有のテーブル関数で、モデルのサブセクタを表現した他のスプレッド・シートにリンクさせて、シミュレーション実行時に DT 毎に相互に値を受け渡す。本稿における死亡レイトの決定のようにモデルの実行領域が非常に大きくなると、精々 256 列までしか範囲をとることができないエクセルのワークシートではオーバーロードになる。ここでは 90 次までの指数遅れを発生させているが、これにはレベル変数だけで 4,095 個の列を消費する。各レベルに 1 個宛レイトが付随するので、とても 1 枚の表には納まりきらない。そこで、死亡レイトを計算するための 90 個のサブセクタを設けて、相互にリンクすることとした。結果は以下に見るとおりである。

(6) 年間死亡数と年間出生数

レイト変数の値は DT 毎に変化するので、PRTPER 毎の各時点における出力結果は 1 年ごとの統計上の数値とは一般に一致しない。こと人口動態学に関する限り統計こそがそのハートランドとなっているので、システムダイナミクスのシミュレーション結果をプレゼンする場合には注意が必要である。ここでもブック方程式が役に立つ。すなわち：

L 年間死亡数. $K = \text{年間死亡数 } J + DT \times (\text{死亡レイト } JK - \text{転記 } 1 \cdot JK)$

R 転記 1. $KL = \text{PULSE}(\text{年間死亡数 } K, 1, 1)$

L 年間出生数. $K = \text{年間出生数 } J + DT \times (\text{第 1 子出産 } JK + \text{第 2 子出産 } JK + \dots + \text{第 } j \text{ 子出産 } JK + \dots - \text{転記 } 2 \cdot JK)$

R 転記 2. $KL = \text{PULSE}(\text{年間出生数 } K, 1, 1)$

である。一年間に生まれた子供の数、一年間に亡くなった人の数、を年末に集計して統計表に転記するのである。

1 コホートに関する出生死亡秩序結合モデルの概要は以上のとおりである。これを基本的なコンポーネントとして人口モデルを構築するのが次の作業であるが、その前に、シミュレーションによりこの部品のワーキングを確かめておくこととしよう。

3. 2 単一コホートモデルのシミュレーション結果

単一コホートモデルのシミュレーション結果を図19 (a)~(e) に示す。

(a)には第1子から第10子までの出生数を、(b)にはその合計を示してある。ここで、縦軸はいずれも人数になっている。シミュレーションのための初期出生人口(母親)を100としてあるので、図の(a)は、例えば、このコホートが25歳になった年に第1子として生まれる子は3人である、と読む。第2子以降として生まれる子の数を加えると全部で8人になる。モデルには母の年齢別出生率のような外生変数による変動のガイドは一切加えられていないことに注目して欲しい。指数遅れ現象だけで子供の出生率の変動を説明することが目的だからである。

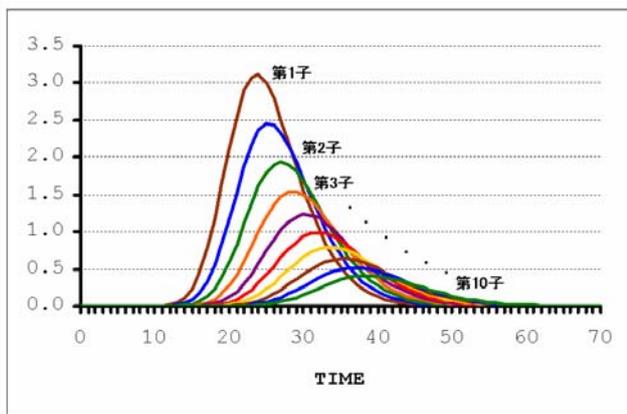
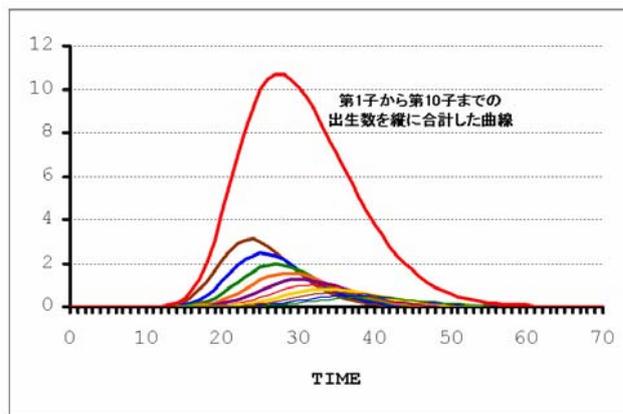


図19 (a) 出生順位別出生数 第1子~第10子



(b) 合計出生数

合計出生率の変動が図19(c)に示されている。これが所謂合計特殊出生率の代替案である。

コホートの生涯を終える120歳までの間に、このコホートに属する一人の女性は平均的に2人の子供を持つことになる。

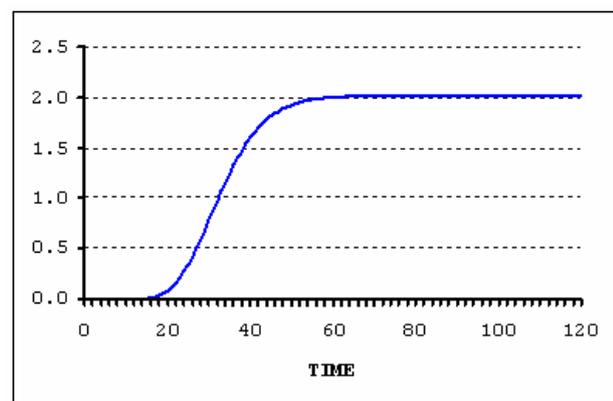
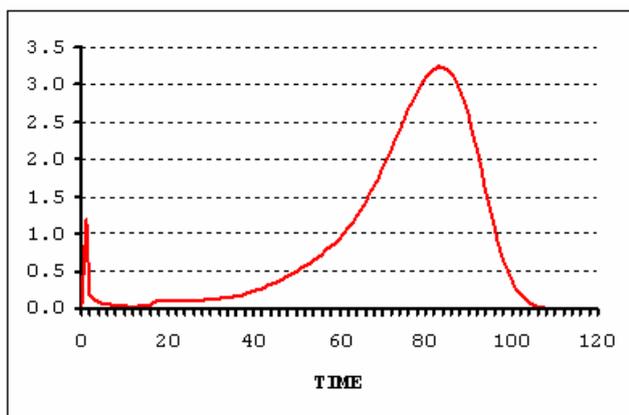


図19 (c) 合計出生率

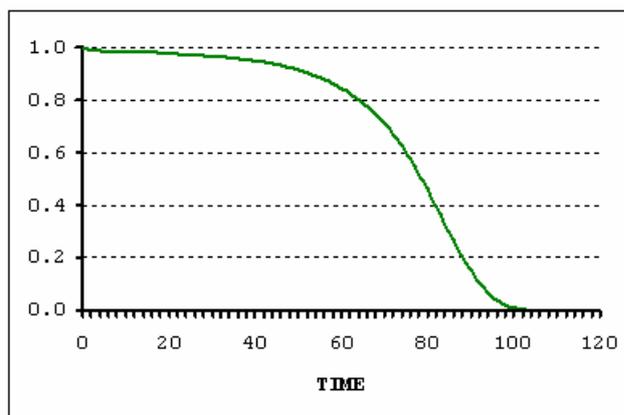
シミュレーション結果がいかにも都合の良い水準への収束性を示しているのは、勿論そのように仕組んだからであって、将来そうだと予測している訳ではない。仕組みは以下のパラメータによる：

平均寿命は85歳、初期出生人口は100、幼少期は15年、第1子をもつまでの平均遅れは12年、第2子以降は、各2年宛、現役期間は潜在母親0が40年、潜在母親1以降は各10年である。

平均として、15歳で成熟し、27歳で第1子を産み、以後2年ごとに第2子、第3子と生み続けるが、退役する人、亡くなる人等により、潜在母親のレベルは55歳ぐらいまでに尽きてしまうので、以上の結果を得るのである。



(d) 死亡レイト



(e) 生残率

勿論、すべての女性がこのスケジュールで第10子まで産み続けるのではないし、退役は必ずしも強制的なものではない。1年間に子供を産む人の数はポワソン分布に従う確率変数なので、産みたくとも子だからに恵まれな女性もいる。現役年限とは、軍隊用語で、プロモーション(進級)カリタイア(退役)かを階級毎に設けられた年限にしたがつて選ばなければならないという、実役停年制度に適用される用語を借用したものである。比較

的長い現役期間に設定してあるのは、近年になって、かつての高年齢出産が特別のことではなくなってきたという現況に対応している。

パラメータに対する感度を検討するために、第1子出産までの平均遅れ1を変化させてみると、合計出生率の収束水準が図20(a)のように9年辺りに極値を持つ山型の変化を示すことが観察される。第1子を早い時期に産むことを闇雲に奨励しても返って逆効果になる場合があることを、この結果は示していると言えよう。

これとは逆に、第1子の出産を待つ潜在母親0の現役期間1は長いほど良い。ただし増加傾向は逡減的であり、特に30年を超える辺りから、その効果もかなり小さくなってしまふ。

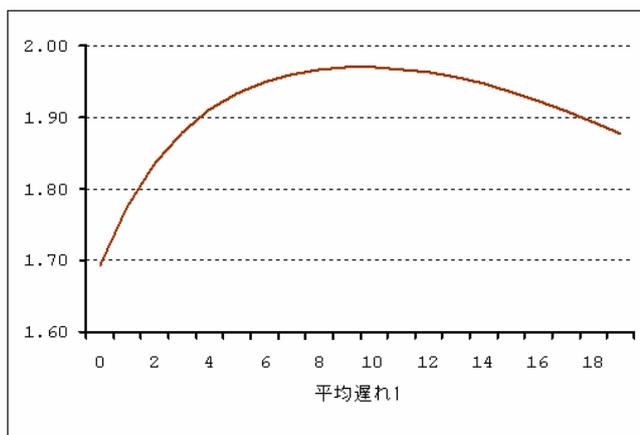
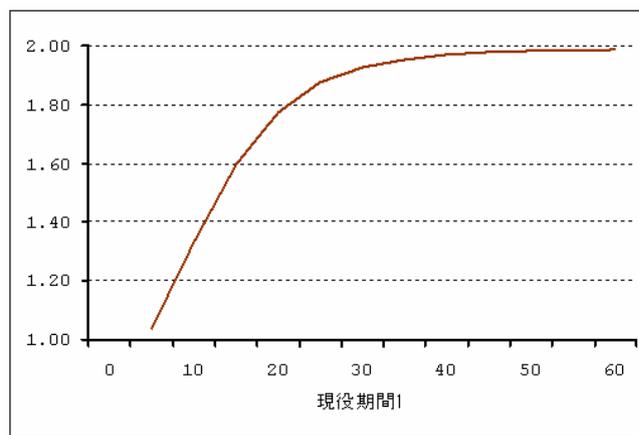


図20 (a) 平均遅れ1に対する合計出生率の感度



(b) 現役期間1に対する合計出生率の感度

平均遅れを短くすることによる合計出生率の増大効果は、第2子に対するものが最も大きい。それは図20(c)および(d)によって観測される。傾きが最も急になっているのが平均遅れ2に対する合計出生率の変化で、以下平均遅れ3, 4, 5の順で勾配が緩やかになる。このことは現役期間を長くする場合についても当て嵌まる。

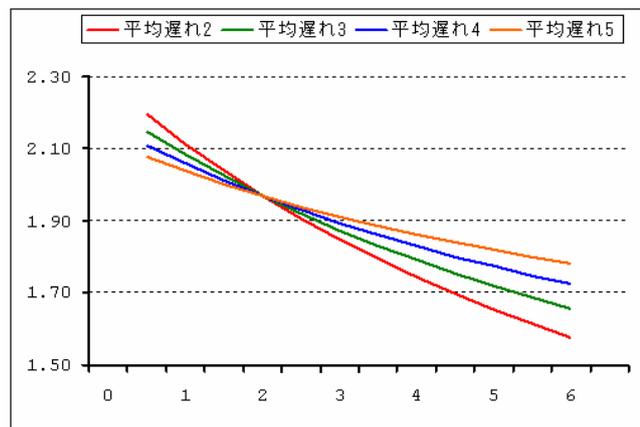
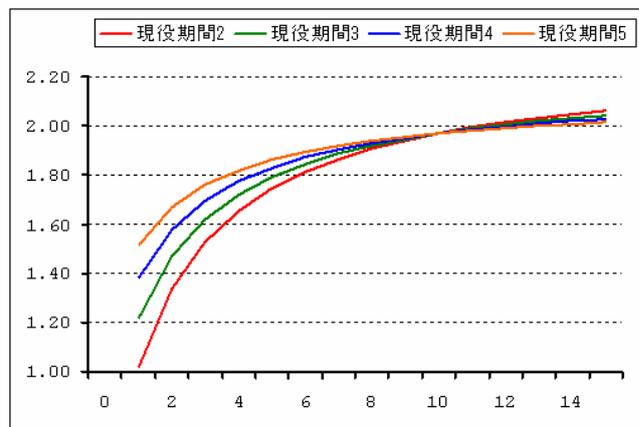


図20 (c) 平均遅れ2~5に対する合計出生率の感度



(d) 現役期間2~5に対する合計出生率の感度

以上のことから、既に第1子を持ち子育てに勤しんでいる母親に対して第2子出産への誘因を与えるような、子育て中の出産を支援する政策を工夫することが、早期に第1子を設けることへの税優遇政策や、子沢山を奨励する児童手当政策よりも、合計出生率を大きく高める効果を発揮するであろうことが、見て取れるのである。

3.3 人口モデルの構成

単一コホートが各年齢において出産した子供たちは生まれた年毎に各々別のコホートを作る。母親が子供を何歳から何歳まで産むことができるかは、法令によって決まるのではなく、生理的な自然制約によって決まるのではなく、所与の平均遅れの回りに分布する指数遅れ現象であるというのが、ここでのモデリング上の立場であるから、現実よりも少し長い期間をとって、これを0歳から100歳までとした。すなわち親世代の単一コホートは、コホートが生きている100年間の間に、子の世代として100コホートを生成することになる(勿論第1コホート隊0~第16コホート隊15ぐらいまでと隊60以降とは空で、それらのコホート人口は全てゼロであろう)。

子世代の各コホートは、親世代から生まれた出生人口を初期値として、親コホートと同様の死亡秩序にしたがつて減衰し、かつ親コホートと同様の出生秩序にしたがつて子を産む。生まれた子供は最初の親コホートから見れば孫にあたるが、孫世代のコホートは、子世代の各コホート1つについて100宛在るから、全部で100²を数え

ることになる。親、子、孫の三世代は通常の人口構成において同じ時期に共棲し得るものであるから、単一コホートモデルと雖もそれを人口モデルに構成するためには、 $(100^2+100+1)$ コホートの出生-成熟-死亡を取り扱わなくてはならない。当に鼠算式と言われるのは、本来、このことを指しているのであろう。

この高齢社会にあっては曾孫の顔を見ることは珍しくないから、この数は更に増える。曾孫、玄孫、来孫、昆孫、仍孫、雲孫の代のコホートの数まで数え上げれば1億を超える。任意の時点における総てのコホートの生存数の合計がその時点の人口に他ならないが、時間とともに世代交代が生じるので、任意の合計時点において相続く世代5つを除いては、ほとんどのコホートのエントリはゼロ、またはそれに近い値になっているので、図21(a)および(b)に見られるように、人口爆発は起こらず、然るべき水準の回りに定常化するのである。

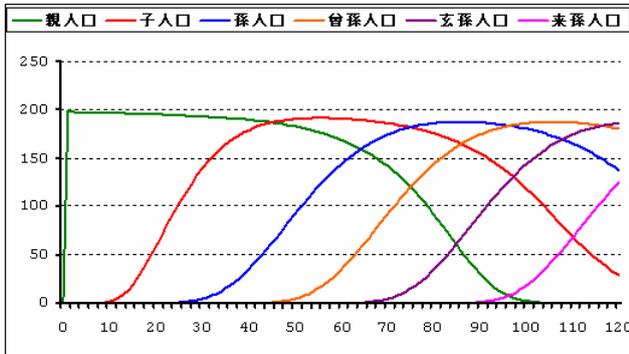
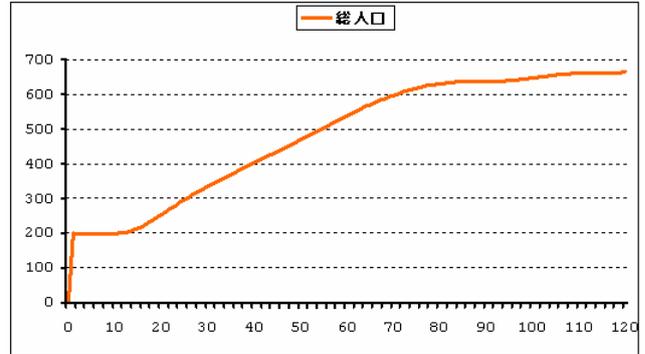


図21 (a) 世代別人口の推移



(b) 総人口=世代別人口の和の推移

図21は単一コホートから出発して閉じた体系を時間展開しただけの結果であることを強調して置きたい。時点0から最初の1年間に100人のアダムと100人のイヴが赤児として生まれた。この人口200人のコホートからは毎年死亡秩序にしたがって亡くなるものが出て、約100年後には誰もいなくなる親人口の減衰曲線を描いて推移したが、イヴ達は図21(c)の出生秩序にしたがってその年齢に相応しい年間出生数で子供を産んだ。

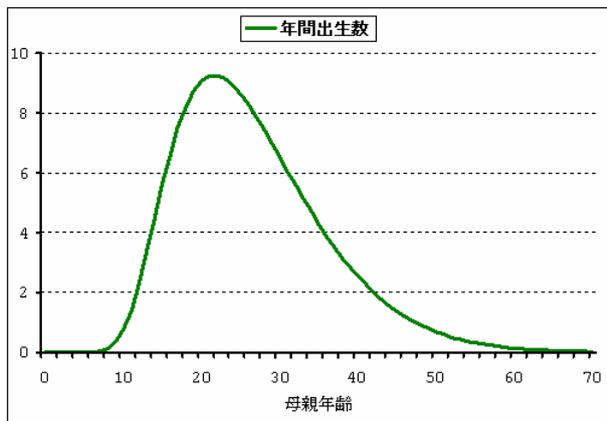


図 (c) 母年齢別年間出生数

元々100人しかいない潜在母親達であるから、年間に生まれる子供の数は、ピーク時においてさえ精々9人、乙女であった最初の10年間で60歳以後の老後にはほとんど子供は産んでいない。

それでも子供世代の人口は毎年1つのコホートを付け加え、子隊10~子隊21の左端を繋ぐように総人口の成長を導き出す。やがては子隊22~子隊44の左端を繋ぐように子の世代の人口増加はまだ続いても増分は年ごとに小さくなって行く時期を迎え、親人口と子人口の合計値は TIME = 55 を境に減少に転じるのである。

子のコホートすべては図21(d)と(e)に見られるように減衰カーブを描くが、同時に、親の世代と同様に、次々と孫世代コホートを作り出して行く。

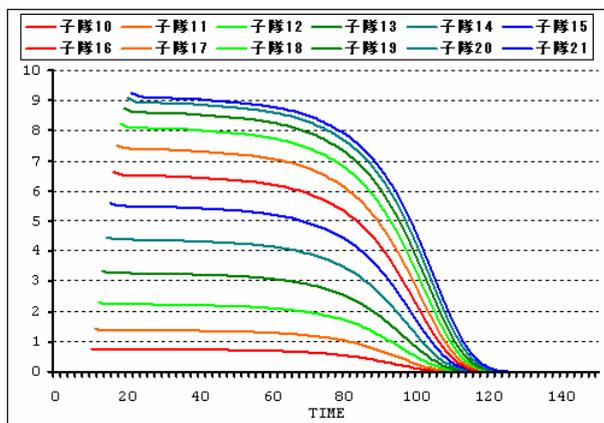


図 (d) 子世代コホート隊10~隊21

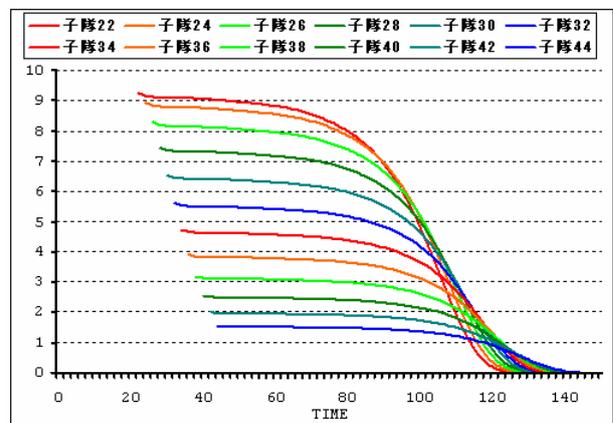


図 (e) 子世代コホート隊22~隊44

図22の(a)と(b)に見るように孫が一人もできなければアダム&イヴ一家は絶滅する種となる運命にある。そ

れがそうはならず地球上に安定した勢力を扶植するのは、子が子を産み子々孫々にいたるまで、毎年新しいコホートを付け加えていくからである。その結果は図 2 1 (a), (b)において既に見たとおりである。

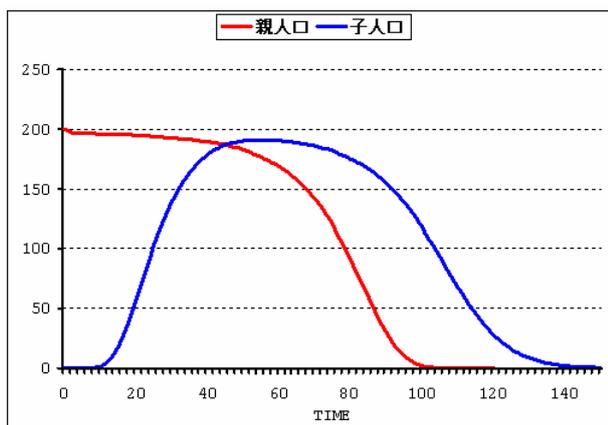
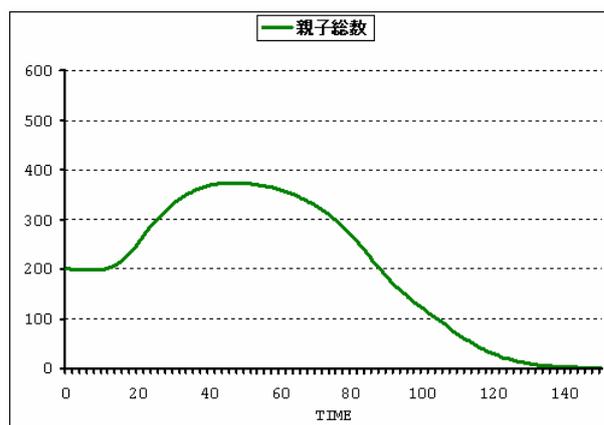


図 2 2 (a) 親人口と子人口



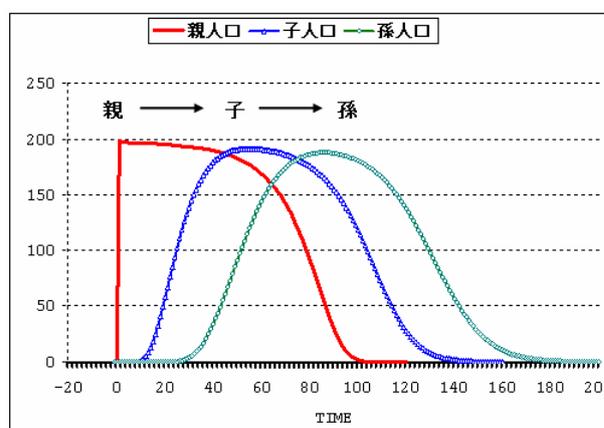
(b) 親人口と子人口の和の推移

図 2 2 の(a)を見て子人口のカーブが少し歪んだベル型を呈していることに気が付かれるだろう。

孫人口に至れば更に均整がとれてくる (図(c)を見よ)。むしろ親世代が異常なのであって、アダムとイヴのような物語を創作しないと、そもその原始世代を語る事ができなかつた。この無理の所為で子世代人口はまだ少し歪みを残しているのであるが、代が下るにつれて左側の傾斜が緩くなり、美しいベル型へと移行して行くという法則性を示す。このことは図(c)に見るとおりである。

ただし、創世神話が無理だと言っても、親世代の人口曲線は、孫であれ曾孫であれ、すべての単一コホートが共通に描くものであって、いつの時代にもありふれて存在する実証可能現実であることを指摘せねばなるまい。

この世代人口曲線の親→子→孫への移行が人口現象の本質を顕している。正しくそれは指数遅れ現象なのであり、システムダイナミクスが解明する社会自然的プロセスの好例をここに見るのである。



(c) 親人口→子人口→孫人口

4. 従来の人口モデル—マクロ分析アプローチ

前節までに展開したモデルにおいては、死亡は1コホート内の高次指数遅れ現象であり、出生は潜在母親の多段階レベルにおける待機によって生じる、という仮説にしたがってシミュレーションが計画され、その結果から現実の人口動態を解明しようとしてきた。その故に、各歳死亡率および母年齢別出生率は先験的に与えられるものではなく、逆にシミュレーション結果として計算されるものであった。その結果と人口動態統計から導かれる死亡率・出生率を対照することによって、仮説の成立可能性を議論するのが本筋である。この行き方は年齢構造に関するマクロのアプローチとは方向を異にしている。従来の各歳死亡・出生率による年齢構造モデルを、ここで、システムダイナミクス・モデルとして定式化しておくことは、結果を比較対照する上で便利であるばかりでなく、この代替補完関係にある二つのモデルの相違する点を明らかにする上でも重要であろう。

0歳から n 歳までの女性各歳人口を $n+1$ 個のレベル方程式で表す；

L 0歳女性数. $K=0$ 歳女性数. $J+DT \times (\text{女性出生. } JK-0 \text{ 歳女性死亡数. } JK-0 \text{ 歳から進級. } JK)$

L i 歳女性数. $K=i$ 歳女性数. $J+DT \times (i-1 \text{ 歳から進級. } JK-i \text{ 歳女性死亡数. } JK-i \text{ 歳から進級. } JK)$ for $i=1, \dots, n$

1年経過すると1歳年をとり一つ上のレベルへと進級するので、これを次のレイト方程式で表す；

R i 歳から進級. $KL=i$ 歳女性数. K for $i=0,1, \dots, n$

$n+1$ 個の各歳女性死亡率をパラメータとしてレイト方程式を作る；

R i 歳女性死亡数. $KL=i$ 歳女性死亡率 $\times i$ 歳女性数. K for $i=0,1, \dots, n$

15~45歳を生産年齢とし、31個の各歳女性出生率を用いて積和を作り女性出生のレイトを決定する；

R 女性出生. $KL=15$ 歳女性出生率 $\times 15$ 歳女性数. $K + \dots + 45$ 歳女性出生率 $\times 45$ 歳女性数. K

以上で閉じた体系ができ上っている。

シミュレーションの初期値を決定するために、初期においてシステムは定常状態にあるものとして、この体系を解いてみよう。 $n+1$ 本の方程式；

$$\begin{aligned} & \text{女性出生} - 0 \text{歳女性死亡数} - 0 \text{歳から進級} = 0 \\ & i-1 \text{歳から進級} - i \text{歳女性死亡数} - i \text{歳から進級} = 0 \quad \text{for } i=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

が同時に成り立たなくてはならない。

他方、

$$\begin{aligned} & \text{女性出生} = 15 \text{歳女性出生率} \times 15 \text{歳女性数} + \dots + 45 \text{歳女性出生率} \times 45 \text{歳女性数} \\ & i \text{歳から進級} = i \text{歳女性数} \\ & i \text{歳女性死亡数} = i \text{歳女性死亡率} \times i \text{歳女性数} \end{aligned}$$

であるから、女性出生を x 、 i 歳女性数を y_i 、 i 歳女性死亡率を ξ_i 、 i 歳女性出生率を ρ_i と書くことにすると、 $k=15, 16, \dots, 45$ についての 31本の方程式；

$$(1+\xi_0) \times (1+\xi_1) \times (1+\xi_2) \times \dots \times (1+\xi_k) \times y_k = x = \rho_{15} \times y_{15} + \rho_{16} \times y_{16} + \dots + \rho_{45} \times y_{45}$$

が満たされなくてはならない。 $j=15, 16, \dots, 45$ に対して 31×31 行列 $\mathbf{A} = \{a_{jk}\}$ を；

$$a_{jk} = \rho_j / [(1+\xi_0) \times (1+\xi_1) \times (1+\xi_2) \times \dots \times (1+\xi_k)]$$

で定義し、31個の $y_{15}, y_{16}, \dots, y_{45}$ を縦に並べたベクトルを \mathbf{y} で表すことにすれば、

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{y}$$

を得る。31個の 1 を対角線上に並べ他の要素はすべてゼロの単位行列を \mathbf{I} と書くとき、 $(\mathbf{I}-\mathbf{A})$ が逆行列を持てば \mathbf{y} はゼロベクトル以外に解をもたない。 \mathbf{y} が正の解をもてば、その一つをとって女性出生 x を計算し、残りの $n-30$ 個の y_i にはこれを 1 プラス死亡率の積で割り戻して与えてやると、定常解が定まることになる。

人口動態調査のデータを使って、実際に、各歳の女性の死亡率と出生率を求めてみると図 2 3 の数値が得られる。これは各年の系列を用いて平成 9 年 (1997 年) から平成 18 年 (2006 年) までとって平均した値である。

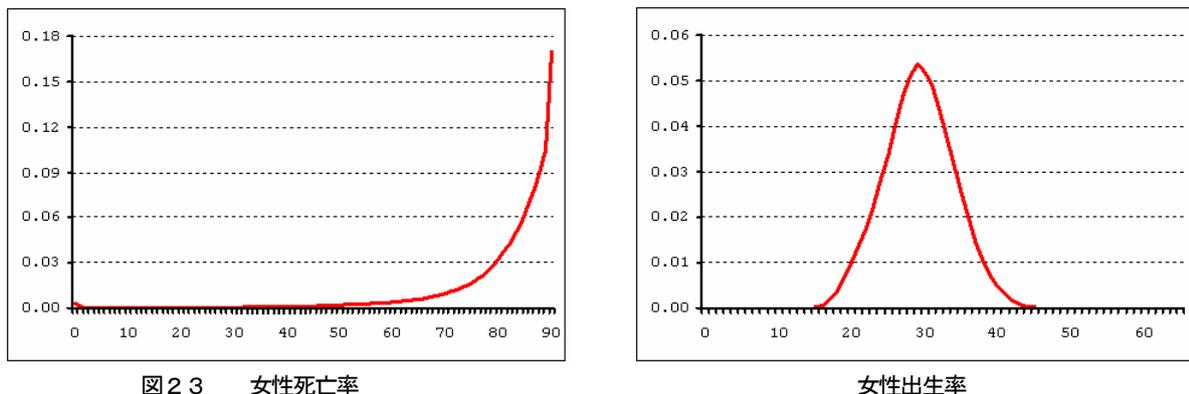


図 2 3 女性死亡率

女性出生率

この数字を使って行列 \mathbf{A} を作り、固有値を λ とし、 $(\lambda\mathbf{I}-\mathbf{A})$ の行列式をゼロと置いて λ について解くと、 $\lambda = 0.626133 < 1$ となるので、このままの死亡率と出生率で行く限り、日本の女性人口はゼロの定常水準へ向けて一途下降する運命にあることが分かる。本当にそうなるかどうかをシミュレーションで確かめてみても余り意味はないが、このシステムダイナミクス・モデルの良い処は、任意の時点の女性人口を初期値として与えてやれば、何年先の年齢構造でも立ち所に出力する点である。但しそのためには上に書いたモデルでは不十分で、若干の手直しが要る。これは SD の本質に関わる事柄で島田先生も最後まで腐心されておられた問題である。

ダイナモ方程式：

$$\begin{aligned} \text{L} \quad & i \text{歳女性数} \text{ K} = i \text{歳女性数} \text{ K} + \text{DT} \times (i-1 \text{歳から進級} \text{ JK} - i \text{歳から進級} \text{ JK}) \\ \text{R} \quad & i \text{歳から進級} \text{ KL} = i \text{歳女性数} \text{ K} \end{aligned}$$

は一見そうは見えないが 1 単位時間 (この場合 1 年) を平均遅れの長さとする一次の指数遅れになっている。したがって DT は 1 よりも有意に小さく設定しなければならない。そうしないと定義的に面妖なことになる。しかし、ここで DT を 1 に設定しないと、1 年毎に 1 歳宛年をとるという抑もの約束に反するのである。

このディレンマを解消する途は二つある。

ひとつは理論的に正しいことのみを追求する方向で、概ね次の理屈を掲げる：

抑も全員が TIME に合わせて一斉に年をとるとするのは数へ歳の考え方で、旧弊であるばかりでなく人為的に過ぎる。12 月に生まれた子供が 1 ヶ月後に亡くなった場合、これを 1 歳児死亡率の分子に加えるのは合理的

ではなかろう。すべて満年齢で年をとるものと考えれば、1年中新たに生まれるインフローに対して、正しく、1年中各個に1年経過する毎に先に生まれたものから進級して行くアウトフローが発生する。したがって1次の指数遅れは平均遅れが1年なら $DT=0.25$ あるいはそれよりもっと小さく設定して、スムーズにフローが流れることだけを期待すれば宜しい。前の定式化に変更を加える必要は全くない。

この理屈は尤もであるが、それにより理論的には正しい予測が与えられて手にするものは次の結果である。

このダイナモ方程式に2006年の女性人口を初期値として与えて10年後の年齢構造を出力させると図24の(b)のようになる。ここで $DT=0.25$ としている。平滑化が横方向にも生じて、2006年には59歳の処に屹立していた団塊世代と40歳の処で落ち込む丙午、それに続く団塊ジュニアといった特徴的な構造が見え難くなり、終いには消え失せてしまうことが分かる。さこそ正しき年齢構造なれとするのがディレンマ解消の第一代替案である。



図24 (a) 2006年の女性年齢構造



図24 (b) 2016年の女性年齢構造

しかし、われわれが欲しいのは実は(c)のような結果ではないだろうか。団塊だ丙午だと言った議論が科学的でないとしても、既に慣れ親しんでいる(a)の構造図形の将来が知りたいのである。団塊世代も70歳を目前にしてこれから迎える同級生達の急激な他界による急下降線を谷底を覗くように見据えて、日本の来し方行く末に思いを致す、それを図24(b)はただの思い過ごしに過ぎないと嘲笑うかのようである。

縦しそれがシステムダイナミクスによる反直感的変動の認識であるとしても、初老の団塊世代の感傷にすぎないとしても、人口学的年齢構造の分析に違和感なく提出できる(c)を出力するモデリングが求められる。

それは次のようにして達成される。そして、これがもう一つのディレンマ解消の方途なのである。

人は満年齢で年をとるとしても、任意の時点で任意の人は連続量で量られる年齢(例えば23.47952歳等)を持つだろうから、人数を合計する場合には区間(例えば23.0歳以上24.0歳未満等)を設けて集計することになる(例えば23歳女性数等)。年齢構造を検討する場合にはこの区間幅を1年とすることになっている。したがって前の進級のレイト方程式は次のように書き直されなければならない。すなわち：

$$R \quad i \text{ 歳から進級 } KL = \text{PULSE}(i \text{ 歳女性数 } K, 0, \text{区間幅}) \quad C \quad \text{区間幅} = 1$$

である。

これは例のブック方程式に他ならない。出生の流入および死亡の流出は連続時間にしたがうフローであるが、進級は区間幅毎にパルスの次に区間に移るのである。或る1年間に生まれる女性はDT毎に0歳女性数のレベルに蓄えられて行くが、その間にも0歳女性死亡数となって流出して行く。1年経った時点で残っている人数を集計量として記帳して、これを年末における0歳女性数とすれば、出生数と0歳児人口との差は明らかだろう。この定式は統計実務と整合的であり、上図(c)はこのように変更されたモデルのシミュレーション結果である。

ところで、図(b)でも(c)でも0歳女性数は傾向的に低下している。これは前に見たとおり、図23の死亡率と出生率を用いる限り人口の定常水準はゼロであって、それへ向けての下方調整が続いているからである。この儘で行くとどうなるかについてシミュレーション結果を図示しておくことには意味があると思われる。蓋し何年先の年齢構造でも立ち所に描くことができるのがシステムダイナミクスの最大の利点だからである。



図24 (c) 2016年の女性年齢構造

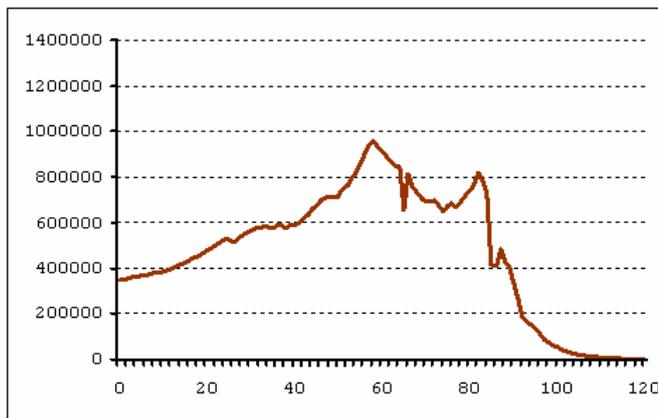


図 2.4 (d) 2031 年の女性年齢構造

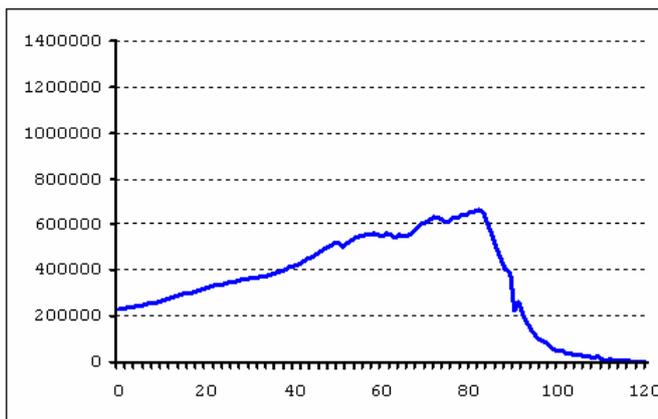


図 2.4 (e) 2056 年の女性年齢構造

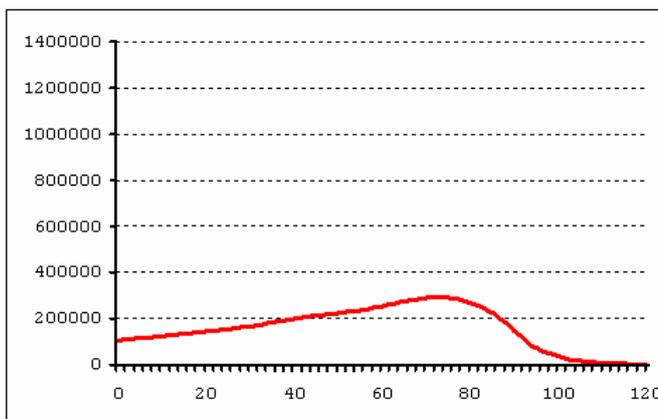


図 2.4 (f) 2106 年の女性年齢構造

図 2.4 (d)~(f) に 25 年後、50 年後、100 年後の女性人口の年齢構造を図示した。いずれも一つのシミュレーションから得られる結果である。

2031 年ではジュニア世代に逆転されながらも、まだ団塊世代のプレゼンスが残存している。この時の総人口は約 1 億 1,300 万人で、少子化は更に進んだと言いつつも、現在と然程変わらない規模を維持している。

2056 年では、もう団塊世代の存在は微々たる痕跡を留めるに過ぎず、ジュニア世代が人口ピークを示して日本史上に有終の美を飾っている。この時の総人口は約 8,300 万人で、昭和 25 年 (1950 年) 頃の人口規模に相当する。あの頃も十分に人口は多かった。

2106 年ではベビーブームは痕跡を全く留めず、人口減少国の運命を静かに受け容れている状態になっている。この時でも総人口は約 3,800 万人もあって、これは明治 17 年 (1884 年) の人口とほぼ同じである。今から 100 年かけて 120 年前の人口に無理なく戻るのであるなら、これも天の配剤としてあり得べきことであろう。ただし、すべて 1997 年から 2006 年までの各歳死亡率と母の年齢別出生率の平均を固定して未来に投影した結果であることを忘れてはならない。

死亡率はそれほど大きく変動することはないが、出生率は短期的にも変化が著しい。それは同一年齢の女性のうち何パーセントが今年中に子供を産むかという率を各歳毎に並べたものであるから、年齢構造も率自体も比較的容易に変わり得るし、これまでも史実として変化し続けてきたことを知らなければならない。

図 2.5 が昭和 45 年 (1970 年) 以降の母親の年齢別出生率のグラフである。これを見ると、昭和 47 年にはモードの 26 歳女性数の内、約 12% が女の子を出産している。これに対し、平成 18 年のモード 30 歳女性数の内、女の子を出産した女性の割合は 5% である。これが 8.5% 程度まで引き上げられる可能性はなきにしもあらずと言えないだろうか。この値 8.5% は固有値 λ で出生率を割ったものである。同じ割合で年齢別出生率すべてを図 2.6 のように調整すると、シミュレーション結果は図 2.4 (f) が図 2.7 (a) のように替わり、100 年後以降の人口は定常約 1 億 1,000 万人に安定化する。

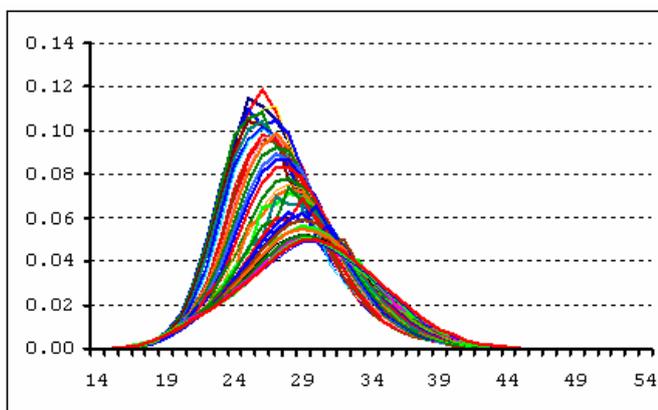


図 2.5 母親年齢別 (各歳) 女性出生率 1970 年~2006 年

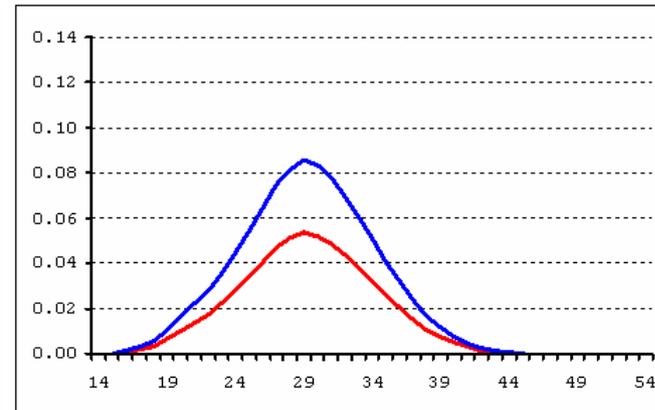


図 2.6 母親年齢別 (各歳) 女性出生率の調整

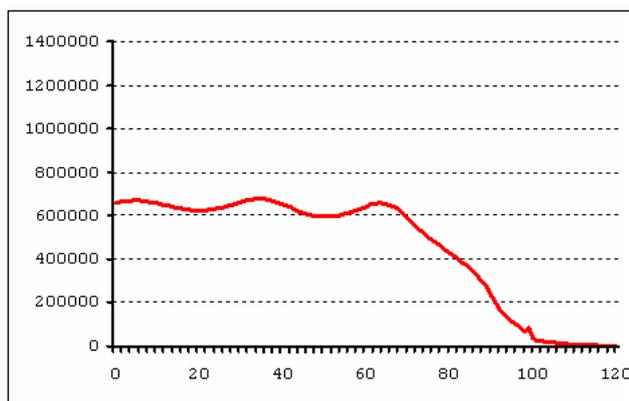


図 2.7 (a) 2106 年の女性年齢構造

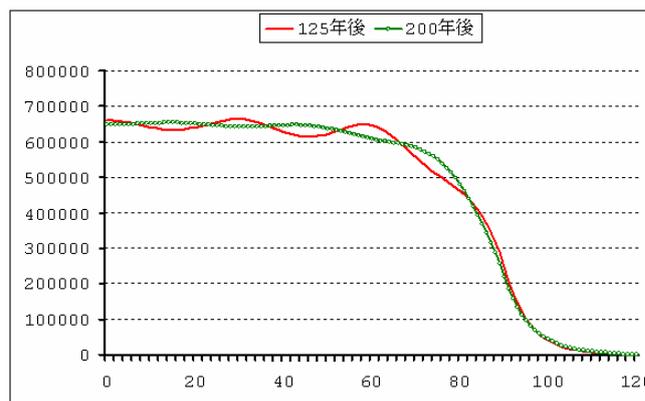


図 2.7 (b) 2131 年と 2206 年の女性年齢構造

図 2.7 (a) の 99 歳の処が角のように小さく突出しているのは、変更された出生率を 2006 年以降にいきなり当て嵌めたことによつて生じる第 3 次ベビーブームの成れの果てである。それは、図 2.7 (c) の 10 年後の年齢構造のグラフを見れば分かる通り、第 1 次ベビーブーム (団塊世代) の出現にも似た大きな崖をつくる。そしてまた、図 2.7 (d) の 50 年後の年齢構造に見られるとおり、ジュニア世代の山となって次代へと連なるのである。

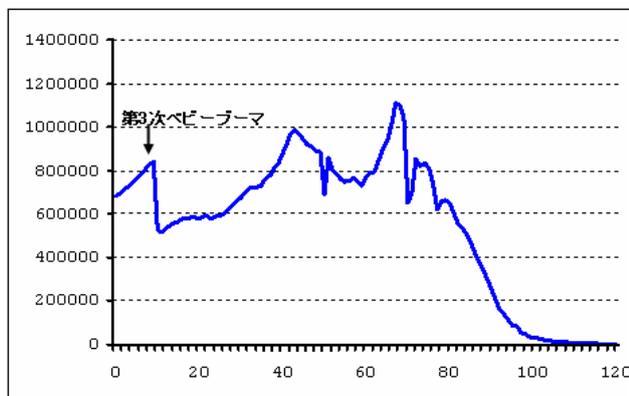


図 2.7 (c) 2016 年の女性年齢構造

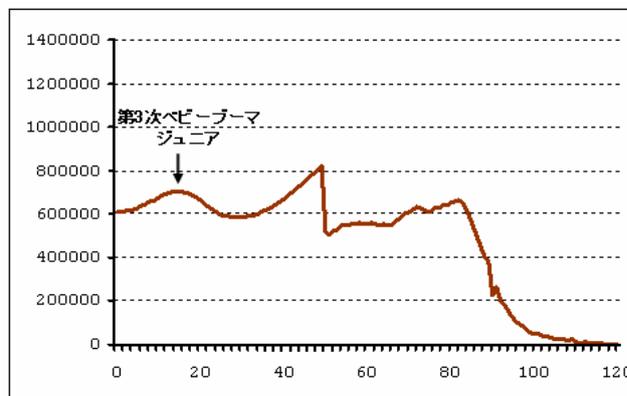


図 2.7 (d) 2056 年の女性年齢構造

思えば日本の人口 1 億 2 千万は団塊とジュニアとがあつての 1 億 2 千万である。この水準をキープするためには、60 年周期で繰り返し団塊とジュニアとが現れなければならない、としても奇異ではなからう。

しかし図 (d) から読み取られるように、ジュニアの出現は団塊のもたらず指数遅れ現象であるから、唯一求められるのはベビーブーム・ショックであるという結論に達する。更にそのことは長期的な出生率の低下傾向をもたらずフィードバックの環をなし、少子化・高齢化をも繰り返し発生させることのダイナミックな帰結でなければならない。このループした因果法則の解明は、本節のマクロ・モデルよりも、ミクロ的フレームワークの中での更なる検討＝出生率決定の因果論的説明＝を通してなされる時、ヨリ稔りの多い成果を上げることだろう。と、ここでは予想を述べるに止め、以後の展開を残された課題とする。

われわれは本節の定式化において、ブック方程式を導入することにより指数遅れとなる年齢進行を排除したが、それでも尚、出生・死亡秩序を通して、正しく指数遅れ現象がマクロ行動の帰結として出現することを見た。このことは、前節までのミクロ・モデルの展開によつて示された「ミクロの行動が集計されることによつて生じる全体変動の法則」が、逆に「集計化された変量間に成立するマクロ的關係」の解明からも、同じ結論として導き出されることを意味し、システムダイナミクス研究の意義と貢献をそこに見出すことができるのである。

5. 年齢構造モデル vs 高次指数遅れモデル

前節で見たマクロ・モデルから引き出される政策的インプリケーションは、図 2.6 の母親年齢別出生率の上方への調整という、いわば結果変数を直接コントロールすることを戦略代替案にするものである。これは必勝の信念とか、婦徳の涵養とか、かつて日本帝国が陥った政策無能力を精神主義でカバーする、必敗の思考方法と軌を一にするものである。

このワンパターンに嵌る理由は、長い間慣れ親しんできた年齢構造モデルとそのシミュレーションが、人々の期待を固定化し、社会的学習を通してメンタル・モデルの共有化現象をもたらしたことにある。本稿で年齢構造

モデルに替わる高次指数遅れモデルを示したのは、多様なモデルがあり得ること、多様なモデルからは多様な代替案が開発されること、またそれらのモデルは直截に社会的シミュレーションに供し得ること、そこから人々の間で共有される期待を改訂し得ること、それが政策改善の唯一の途であること、等々を示したかったからである。

人間の死亡は寿命を平均遅れの長さとする高次指数遅れ現象である。女性の出産行動は第 k 子出生を待つ待機時間を平均遅れの長さとする指数遅れに従う。という二点だけで人口モデルを構成したのが本稿である(これを、*durability-servitude model* と呼んでも良い)。これは、人は1年間に1歳宛歳をとっていくものであり、人口は年齢別死亡率と母親年齢別出生率にしたがって増減する、という年齢構造モデル(これを、*aging model* と呼んでも良い)とは、いくつかの点で決定的に違っている。もちろん、どちらのモデルもシステムダイナミクス・モデルであり得、コホート・モデルであり得る。準拠するデータは同じ人口動態統計である。パラメータは同じ外生的攪乱要因に従って変化するだろう。それでもなお二つのモデルの定式化上の差異は決定的である。当然のことながら、予測される未来は二つのモデルで異なるのである。

実証主義科学の見地から、二つのモデルのいずれが正しいかを議論するのはアカデミッシュに任せて、システムダイナミクスと政策科学者は、これを別の議論に展開することができるはずである。またそうすることが望ましいという立場=*post-positivistic view*=に筆者は立つものであるが、残念ながらこれを仔細に論じるには紙幅が足りない。ただ、実証主義科学者として科学研究のプログラムを立てることと、政策科学者として政策改善のプログラム立てることとは同じではなく、システムダイナミクスはどちらのプログラムにおいても有望な助力を提供できると指摘するに止め置く。

本稿で明らかにしたことを以下に列挙して、講演を締め括ることとする。

1. コホート・モデルを定式化するためには、人口動態統計の表を並べ直すソフトウェアが必要である。
2. 死亡秩序は高次指数遅れの凸結合で表すことができる。
3. コホート横断的に母親年齢別出生率を足し合わせた合計特殊出生率には意味がないが、だからと言って成熟途上のコホートの生涯出産行動を予測する一般的な方法はない。
4. 単一コホート・モデルから出発しても世代交代が完了するまでに用意すべきコホートの数は玄孫まででエクセルのワークシートの制限を超える。
5. 出生順位別出生率を手がかりにして、コホート横断的合計特殊出生率に替わる女性の出産行動のモデルとして第 k 子出生待機からの進級・退役を指数遅れ現象として記述するモデルを構成することができる。
6. 人口ピラミッドとして親しまれてきた年齢構造モデル (*aging model*) をダイナモ方程式で表し、100年先までシミュレーションすると、定常人口を達成するにはベビーブームの再来が要ることが判る。
7. 定常人口が達成されない場合には零水準へ向かっての縮小均衡が生じる。ただし100年後においても日本の人口は3,800万人程度を維持できるので、これを多いと見るか少ないと見るか、移民受け入れを含む別の政策議論を展開する政策分析においては、本モデルが必要不可欠な情報提供源となろう。
8. 2と5を一緒にした高次指数遅れモデル (*durability-servitude model*) は年齢構造モデルに替わるものとして、代替的未来を予測する。
9. 高次指数遅れモデルの平均遅れパラメータに対する感度分析から、反少子化戦略の代替案を開発することができる。年齢構造モデルから得られる代替案の手詰まりを脱却するには、代替的モデルの開発が有望であることが判る。
10. 故島田俊郎先生の残された人口モデルの継承としては、まだまだ学会としてなすべきことが残されている。以上である。