

安定人口模型による少子・高齢化構造の解析

大泉嶺

1 はじめに

安定人口模型は、将来人口推計の最も基本となる数理モデルである。その中でも Leslie 行列は代表的なモデルであり、人口学の基本的な概念の多くを備えている。人口の転入・転出が無ければ、人口動態を決める変数は女性の年齢毎の出生率と死亡率のみである（男性の人口を付随的なものと見なせば）。最も基本的な Leslie 行列においてはこれらの変数は定数であり年ごとに変化はしない。日々変化する社会状況や自然環境を考えれば安定人口モデルによる将来推計は乱暴にも思えるが、現在のスナップショットといえる生命表や期間合計特殊出生率から得られる安定人口モデルを解析することには学術的意味がある。それは現在の人口動態をそのまま将来に投影したらどのような状況が起こりうるかという興味だけでなく、現在の人口構造が持つ特性を定量的に評価できるという点である。本稿はそうした安定人口モデルのもつ解析的な方法論を用いて、戦後・高度経済成長期・現在に至る人口構造の変化を考察し、このモデルの理論的発展の一つとして感度解析を紹介する。応用として、戦後の日本の出生数の増加、安定、減少を象徴する 1947 年、1970 年、2015 年にスポットを当て解析を行った。

2 Leslie 行列

安定人口モデルの最も基本となる Leslie 行列について、ここでは紹介する。時刻 t における年齢 a 歳の女性コーホートの人口を $P_t(a)$ とすると、このモデルを構成する基本的な過程はこのコーホートが持つ出生率 $m_a \geq 0$ を用いて表される再生産過程：

$$P_t(a) = \sum_{a=0}^{\alpha} m_a P_t(a) \quad (1)$$

と翌年までの生存率 $0 \leq p_a \leq 1$ とする生存過程：

$$P_{t+1}(a+1) = p_a P_t(a) \quad (2)$$

の二つで表される。このとき、 α は最大寿命である。このモデルは行列を用いて次のように書くことが出来る：

$$\mathbf{P}_{t+1} = \mathbf{L} \mathbf{P}_t \quad \mathbf{P}_t := (P_t(a))_{0 \leq a \leq \alpha}$$
$$\mathbf{L} := \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & \cdots & m_a & \cdots & m_\alpha \\ p_0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & p_{\alpha-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで行列 \mathbf{L} が Leslie 行列である。一般に定数行列モデルの人口構造の時間発展は、 \mathbf{L} が対角化可能である場合（通常この場合の方が多い）以下のようになることが知られている：

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{L}^t \mathbf{P}_0 = \sum_{k=0}^{\alpha} \lambda_k^t \frac{\langle \mathbf{U}_k, \mathbf{P}_0 \rangle}{\langle \mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k \rangle} \mathbf{V}_k \quad |\lambda_k| \geq |\lambda_{k+1}|.$$

λ_k は行列 \mathbf{L} の k 番目の固有値であり、 $\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k$ はその固有値に対応する左右固有ベクトルを表し、 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ はそれらの内積を意味する。特に、最大固有値 λ_0 と対応する左右固有ベクトルはそれぞれ、内的自然増加率 (intrinsic rate of natural increase), 繁殖価 (reproductive value), 安定年齢分布 (stable age distribution) と呼ばれ、人口学的にも生物学的にも特別な意味を持つ [1]。それは仮にこのシステムが十分時間が経過した時に、次のような漸近挙動を描く事による

$$\mathbf{P}_t \approx \lambda_0^t \frac{\langle \mathbf{U}_0, \mathbf{P}_0 \rangle}{\langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle} \mathbf{V}_0 \quad t \rightarrow \infty. \quad (4)$$

これは、ペロンフロベニウスの定理 (Perron-Frobenius theorem) とよばれ “非負・規約行列の支配的固有値は正の実数で単根である” という主張に基づく。つまり、支配的固有値 λ_0 は、この人口動態の本質的な人口増加率と見なすことができる。この時、年齢分布は右固有ベクトル \mathbf{V}_0 に収束していくため上記の名前で呼ばれることがある。左固有ベクトルと繁殖価については後述する。

我が国のように死亡率の改善や出生率の低下など社会的な変化が多様な国の場合は乱暴な近似になる。だが、冒頭にも書いたようにその年のスナップショットを解析することにはそうした時代の変化に潜むライフコースの違いを鮮明にする事ができるかもしれない。その方法の一つである感度解析を次章で紹介する。

3 左右固有ベクトルと感度解析

我が国では戦後・高度経済成長期・バブル崩壊と、社会・経済の変化と共に人口構造の変化を経験してきた。ベビーブームから少子・高齢化までの変化の要因を探る試みは、多くの文献と共に、一意的なものでは説明しにくいことを物語っている。ここでは数理人口学的な解析手法を用いて、出生・死亡の変化と人口動態の関連を考察したい。

安定人口モデルにおける人口動態は、前述の内的自然増加率はその規模の増減を決定する。数学的にはこの値は各出生・生存率の関数となっている。出生率と死亡率の変化が内的自然増加率にどの程度影響するかがわかれば、その時代の人口増減に関する構造的影響を定量的に評価できるであろう。しかし、日本人の最大寿命が 100 歳以上あることを考えれば、Leslie 行列も 5×5 以上になることは当然である。これは行列の固有値が満たす固有多項式が 5 次以上であることを意味する。要するに、ガロア理論などでお馴染みの 5 次以上の多項式に対し、一般的な解の公式は存在しないという問題に直面する。

そこで、これらの行列の成分が、支配的固有値に与える影響を数値的に示す感度解析 (sensitivity analysis) を導入しよう [2]。ここで考える感度とは各出生率、死亡率に関する内的自然増加率の応答: $\frac{\partial \lambda_0}{\partial m_a}$ と $\frac{\partial \lambda_0}{\partial p_a}$ である*1。

まず、線形代数における固有値と右固有ベクトルの基本的な関係の関係を考える:

$$\lambda_0 \mathbf{V}_0 = \mathbf{L} \mathbf{V}_0.$$

*1 ∂ (ラウンド記号) は偏微分を表す。

行列 \mathbf{L} の成分が微小に変化し、 $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}'$ となったしよう。その微小変化分を

$$\Delta \mathbf{L} := \mathbf{L}' - \mathbf{L}$$

とおけば、変化後の行列は元の行列 \mathbf{L} を用いて

$$\mathbf{L}' = \mathbf{L} + \Delta \mathbf{L}$$

と表すことができる。同様に \mathbf{L}' の支配的固有値 λ'_0 も差分形式

$$\lambda'_0 = \lambda_0 + \Delta \lambda_0, \quad \Delta \lambda_0 := \lambda'_0 - \lambda_0$$

で表すとする。これらの式を先ほどの固有ベクトルの関係式に代入する

$$\lambda_0 \mathbf{V}_0 + \Delta \lambda_0 \mathbf{V}_0 = \mathbf{L} \mathbf{V}_0 + \Delta \mathbf{L} \mathbf{V}_0.$$

両辺を整理し、左から左固有ベクトル \mathbf{U}_0 を作用させると下記を得る；

$$\Delta \lambda_0 \langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle = \mathbf{U}_0 \Delta \mathbf{L} \mathbf{V}_0$$

ここで、年齢 a の生存率のみに微小変化 Δp_a があったとする。このとき $\Delta \mathbf{L}$ は

$$\Delta \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \Delta p_a & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \ddots & 0 \end{bmatrix}$$

となる。これを元の式に代入すると左右固有ベクトルの成分

$$\mathbf{U}_0 = (u_0(a))_{0 \leq a \leq \alpha}^T, \quad \mathbf{V}_0 = (v_0(a))_{0 \leq a \leq \alpha}$$

を用いて*2

$$\Delta \lambda_0 \langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle = \Delta p_a u_0(a+1) v_0(a) \quad (5)$$

と表すことができる。整理すれば

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial p_a} = \frac{u_0(a+1) v_0(a)}{\langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle}, \quad \frac{\Delta \lambda_0}{\Delta p_a} \rightarrow \frac{\partial \lambda_0}{\partial p_a} \quad (6)$$

が得られる。これが、内的自然増加率の生存率に関する感度である。同様に、出生率に関する感度も Δm_a を考えることで

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial m_a} = \frac{u_0(0) v_0(a)}{\langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle} \quad (7)$$

となる。これらを一般化すると行列モデルの支配的固有値に関する感度を直積記号 \otimes を用いて

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{U}_0 \otimes \mathbf{V}_0}{\langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle} \quad (8)$$

全ての成分に対して書くことができる。この行列を感度行列 (sensitivity matrix) と呼ぶ。この行列の行と列の成分が、それぞれ対応する安定人口モデルの行と列の成分の内的自然増加率に対する感度となっている。このように、安定人口モデルにおけるコーホートの出生・死亡の人口増減に関する寄与度は、行列モデルの固有ベクトルを用いて表す事が出来る。つまり左右固有ベクトルの組成が分かれば、本稿の目的であるライフコースと人口動態の関連を解析出来るのである。

*2 左固有ベクトルは横ベクトルである。

4 安定年齢分布と繁殖価

前項では感度分析の概要を述べてきた。ここでは、さらにデータ解析に迫るために Leslie 行列の左右固有ベクトルの具体的なかたちを導く。

4.1 安定年齢分布（右固有ベクトル）の導出

まずは、安定年齢分布と呼ばれる支配的な固有値の右固有ベクトルから導出を試みる。前出の固有値との関係

$$\lambda_0 \mathbf{V}_0 = \mathbf{L} \mathbf{V}_0,$$

から各成分は次の関係を持つ

$$\lambda_0 v_0(a) = p_{a-1} v_0(a-1).$$

これを逐次的に解くけば以下のように右固有ベクトルが得られる

$$v_0(a) = \lambda_0^{-a} l_a v_0(0), \quad l_a := \begin{cases} \prod_{x=0}^{a-1} p_x & 0 < a \\ 1 & 0 = a \end{cases}. \quad (9)$$

ここで、 l_a は年齢 a までの生残率であり、 $v_0(0)$ は任意定数である。

因みに、これらの成分を Leslie 行列の 1 行目に当たる再生産過程に代入すると

$$\lambda_0 v_0(0) = \sum_{a=0}^{\alpha} m_a \lambda_0^{-a} l_a v_0(0)$$

となって、これを整理すれば

$$1 = \sum_{a=0}^{\alpha} \lambda_0^{-a-1} m_a l_a,$$

が得られる。これは固有多項式である Euler-Lotka 方程式そのものである：

$$1 = \sum_{a=0}^{\alpha} \lambda^{-a-1} m_a l_a. \quad (10)$$

今後簡単のために、 $v_0(0) = 1$ とする。右固有ベクトルは前出のペロン-フロベニウスの定理にも分かるとおり、十分時間が経過したときの年齢構造となるため、安定年齢分布と呼ばれているのである。

4.2 繁殖価（左固有ベクトル）の導出

右固有ベクトルは、以下の関係を持つ

$$\lambda_0 \mathbf{U}_0 = \mathbf{U}_0 \mathbf{L}.$$

これは転置 \top を取ることで次のように書き換える事が出来る

$$\lambda_0 \mathbf{U}_0^\top = \mathbf{L}^\top \mathbf{U}_0^\top$$

この関係から左固有ベクトルの成分同士は次の方程式を満たす事が分かる

$$\lambda_0 u_0(a) = u_0(0) m_a + p_a u_0(a+1)$$

この漸化式も右固有ベクトルと同様に $u_0(a)$ について逐次的に解くことが出来、次の結果を得る:

$$u_0(a) = u_0(0) \sum_{x=a}^{\alpha} \lambda_0^{-(x-a+1)} m_x \frac{l_x}{l_a}. \quad (11)$$

このとき $u_0(0)$ は任意定数である。この指標は、年齢 a の女性コーホートが今後出生に与える寄与率と考えられる事から繁殖価と呼ばれている。この指標は、Leslie 行列とは別の文脈から、生物統計学の父とも呼ばれている R.A.Fisher (1890~1962) によって導入された。注目すべき点は年齢 a から年齢 x 迄の純再生産率 $m_x \frac{l_x}{l_a}$ の各年代 x に対して内的自然増加率のべき数の重み $\lambda_0^{-(x-a+1)}$ が加わる事である。つまり、人口が増加局面 $1 < \lambda_0$ にあるのか、減少局面 $\lambda_0 < 1$ にあるのかによって、出生に対する寄与度が異なる事を意味する。

5 固有ベクトルの内積と感度の公式

数値解析を行う前に最後に Eq.(9) と Eq.(11) から左右固有ベクトルの内積を計算しておこう

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{U}_0, \mathbf{V}_0 \rangle &= \sum_{a=0}^{\alpha} u_0(a) v_0(a) \\ &= u_0(0) \sum_{a=0}^{\alpha} \sum_{x=a}^{\alpha} \lambda_0^{-(x+1)} m_x l_x \\ &= u_0(0) \sum_{x=0}^{\alpha} \sum_{a=0}^x \lambda_0^{-(x+1)} m_x l_x \\ &= u_0(0) \sum_{x=0}^{\alpha} x \lambda_0^{-(x+1)} m_x l_x \\ &= u_0(0) \sum_{a=0}^{\alpha} a \lambda_0^{-(a+1)} m_a l_a \end{aligned} \quad (12)$$

これらから Eqs.(6), (7) はそれぞれ

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial p_a} = \frac{\sum_{x=a+1}^{\alpha} \lambda_0^{-x} m_x l_x}{p_a \sum_{a=0}^{\alpha} a \lambda_0^{-(a+1)} m_a l_a} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial m_a} = \frac{\lambda_0^{-a} l_a}{\sum_{a=0}^{\alpha} a \lambda_0^{-(a+1)} m_a l_a} \quad (14)$$

となる。こうして、感度の具体的な形を得ることが出来た。死亡率の感度を見てみると次年齢以降の重み付き純再生産率 $\lambda_0^{-x} m_x l_x$ の和が最大になる年齢の死亡率の改善が最も影響を及ぼすことが分かる。ベビーブームなどの新生児が増加していた時代、つまり $1 < \lambda_0$ となる時代ではこの値は高齢コーホートほど減少するので、単純により若い世代の死亡率の改善が重要である事が分かる。そして最も大きな感度は年齢 0 からの和になるので、“戦後の乳児死亡率の低下こそが人口増加率に影響を与えた”という広く一般に考えられている説を理論的に裏付けるものとなる。

一方、出生率の感度は右辺分子を見ると単純に安定年齢分布そのものである事から、その最も人口が多くなる世代の出生率の変化が人口動態に影響を及ぼすことを意味している。同様にかつての人口増加局面 $1 < \lambda_0$ では、生残率 l_a と重み λ_0^{-a} が年齢に関して単調減少である事から、安定年齢分布はピラミッド型になる。従って、より若い世代の出生率の変化が最も大きな感度を持つことを意味する。

これまで見てきたように Leslie 行列は非常に扱いやすく、左右固有ベクトルに関しても陽に導出出来るとてもシンプルなモデルである。ここで、強調しておきたい点は、各細別の出生率と生命表から導ける点である。実際の感度の値が戦後・高度経済成長期・バブル崩壊後とどのように変遷していったか次項でデータを用いて検証する。

6 時代ごとの感度の違い

この項では前項までに導いた感度の公式を用いて実際のデータを用いて検証する。死亡率については厚生労働省「完全生命表」を用い、出生率及び出生性比については国立社会保障・人口問題研究所「2017年人口統計資料集」より各歳別の期間出生率に出生性比を掛けたものを用いる。対象とする年次は第一次ベビーブームが起こった1947年、出生率が人口置換水準を下回る前の1970年、そして最新のものである2015年とする。これらの年代の内的自然増加率を Eq.(10) を用いて支配的固有値 λ_0 を数値的に計算するとそれぞれ1947年: $\lambda_0 \approx 1.02$, 1970年: $\lambda_0 \approx 1.00$, 2015年: $\lambda_0 \approx 0.99$ となっている。1970年はより下の桁において若干1よりは大きいものの概ね1と見なすこととする。Eq.(4) が示すように、 λ_0 が1より大きいか小さいかによって、集団規模の増加および減少が決定される。これらの内的自然増加率を見て分かるように、第一次ベビーブーム世代においては1を超えており、人口増加の局面であった事がこの方法においても覗える。一方、1970年の場合は概ね1である事から人口はこの構造であれば安定した水準に収束するものと見られる。更に少子高齢化を迎えている直近2015年においては1を下回っており、ここでも出生数・出生率減の影響も見て取る事が出来る。つまりこの三つの年代の生存率および出生率の各歳毎の影響を見ることで、ライフコースが人口増、安定、減少と時代と共にどのように人口動態に影響を及ぼしてきた分析する事が出来るのである。

6.1 1947年の生存率と出生率の感度

ここでは、人口が増加局面にあった1947年の各年齢における生存率と出生率の感度を紹介する。図1が示す様に、若い世代の生存率と出生率の感度が高い事が見て取れる。この時代の人口増加が、死亡率の改善と現在よりも婚期が早かった事に依るものであるという従来の解釈に数学的な根拠を与えるものである。この解析で、特に注目すべき点は、20代までの女性の出生率よりも生存率の改善の感度が大きい点である。これらは本来比べられるものではないが、数学的には同じパラメータでしか無いので、このような見方が出来るのである。

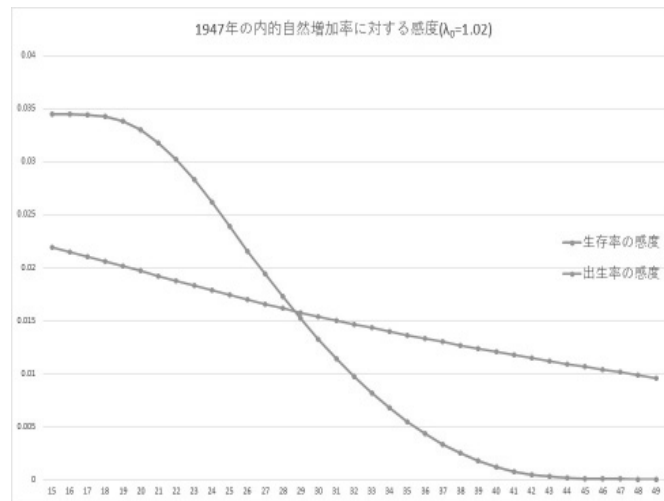


図 1

この結果は 20 代までの生存率が出生率の高さよりも重要な要因である事を示している。これは、若い世代の出生率の高さがそのように見せているのである。矛盾しているように聞こえるかもしれないが、もう一度生存率と出生率の感度の公式を見てみよう。生存率の感度 Eq.(13) は分母を定数と見ると、分子は出生率と生残率そして内的自然増加率のべきの和に依存している。若い世代の出生率が高い場合以下の関係が起こるので

$$\lambda_0^{-a} l_a \leq \sum_{x=a+1}^{\alpha} \lambda_0^{-x} m_x l_x$$

生存率の改善が、出生率の高さの影響を上回る。

ここで、感度とは何であったかを思い出すと、内的自然増加率に対する行列モデルの成分による偏微分である。つまり他の成分に変更が無かった時、ある一つの成分に微小な変化が生じたときの内的自然増加率の傾きを表す。感度の高い年齢の生存率や出生率の改善は人口増加率をより大きく変化させる事を意味する。1947 年のような内的自然増加率 1 を超えている場合に若い女性の健康面の改善と出生率の上昇が続いていたとしたら人口増加に更に拍車を掛けていたに違いない。

6.2 1970 年の感度

では、内的自然増加率がほぼ 1 である 1970 年ではどのような変化が起こったのかを見てみよう。図 2 を見ると、20 代の生存率の感度と出生率の感度との間に大きな差は見られなくなっている。出生率の感度に至っては、どの世代に関しても大きな差は無い、これは内的自然増加率が概ね 1 であること、15~49 歳で各年齢で生残率にあまり差が無いことが相まって安定年齢分布が一樣になった事による。

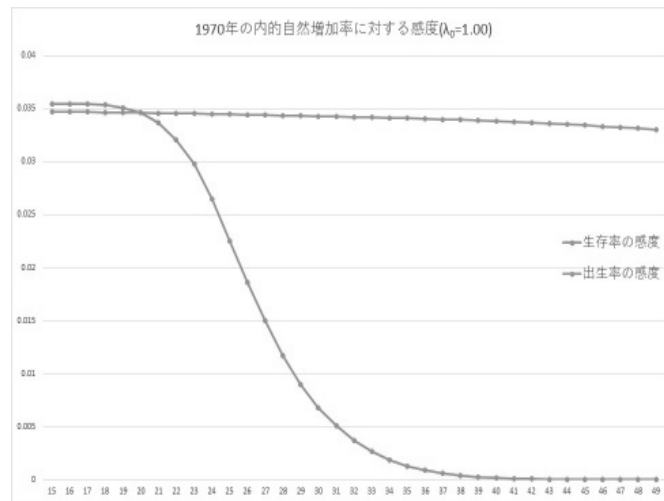


図 2

このように、人口動態が安定する構造では若い世代における女性の健康状態の改善や出生率の変化は人口の増減に及ぼす影響は 1947 年のそれほどではない。安定した人口動態では、感度に（特に出生率に関して）世代間の特徴的な偏りが無いのである。これが、人口増減の少ない安定的な人口構造の特徴と言えよう。

6.3 2015 年現在の感度

これまで、人口が増加および安定する人口構造の感度を見てきた。誤解を避けるために解説しておこう。人口の増加や安定とは人口の規模に関わらず、期間生存率と期間合計特殊出生率が全て一定という仮定から計算される“長期的な目で見たと”人口増加率の水準のことである。実際、我が国の国勢調査を見ても、2010 年まで人口は増加し続けた。これは高齢者の生存率の改善や、国際人口移動、出生率が低くとも母親となる女性の母数が多ければ出生数は増加するため、人口は一定期間増加することが出来るのである。

少子化が進んでいるとされる 2015 年における感度は図 3 のようになる。

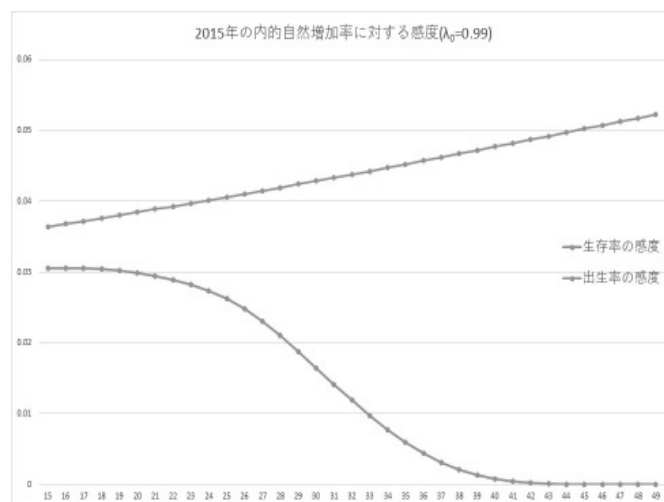


図 3

1947年と比べれば対照的な結果である。生存率の改善の感度と出生率の感度との間には差が開き、出生率の変化の方が重要になっている。この結果で注目すべきは、年齢が上がる毎に出生率の感度が上がっている点である。これは若い世代の出生率の改善よりも高齢の女性の出生率の改善の方が人口増加率への寄与が大きい事を意味している。つまり、少子化を食い止めようとするならば、20代の出生を期待するより30代以降の出生に期待せよという意味になるのだが、少子化の原因を晩婚化・晩産化としてきた一般的な解釈と矛盾するように思われるかもしれない。しかし、長期的な視点に立てば、これは（いくつか生物学的な制約を除けば*3）正しい主張である。少子化が危惧され始めた第2次ベビーブーム以降1970年代半ばから、ほぼ、出生数は単調に減少している事に答えがある。つまり、少子化が続く社会では、人口のボリュームが年齢が上がる毎に増える。

そのため、20代の出生率が10%上がるより、30代の出生率が10%上がる方が母親の数が違うため、出生数の増加分が大きくなるのだ。少子化が続いているとされる現状で、もし、“短期的に”出生数の増加を狙うのであれば、今の時代は高齢出産対策をすることが効果的であろう。この“短期的に”については、まとめて議論する。

7 まとめ

完全生命表や期間合計出生率といった統計量は、日々変動する人口動態のスナップショットである。飛んでいる鳥や、泳ぐ魚の写真を見て、彼らがどこへ向かうかを言い当てる事が難しいように人口動態もそのときどきのデータから将来を正確に言い当てる事は出来ない。安定人口モデルは人口動態がまるで等速直線運動のように出生率も死亡率も変化しない時にのみ当てはまるモデルである。人口増加が加速していた1947年、出生率がほぼ人口置換水準に落ちついていた1970年、そして、少子高齢化と人口減少を共に経験している2015年以降のこの人口動態は、全て連続的な過程の一部である。今回紹介した感度解析は、人口の盛衰の速度を写真判定する装置のようなものである。2015年のデータから割り出した感度から、筆者は「“短期的に”出生数の増加を狙うのであれば、今の時代は高齢出産対策をすることが効果的」と書いたがここで言う短期的とはこの意味である。高齢出産対策が効果を出せば前述のように出生数の増大幅は若い世代のそれよりも大きい。しかし、出生数が増加する事や生存率が変化することは、スナップショットの被写体が変わる事を意味する。そのため、その新しい構造に関して異なる感度が出てくるので、今度はその感度に関して別の政策を考える必要が出てくるかもしれない。人口の安定化を目論むなら1970年の人口構造は一つの指標になるだろう。

この感度解析を用いた分析や政策提言は日本における人口学分野ではあまり行われていない。しかし、生態学や保全生態学など生物学分野では40年近くの歴史を持つよく知られた手法である。

例を挙げると、1980年代アメリカ、ジョージア州にある離島においてアカウミガメの絶滅危惧があった。自治体やボランティアなどは孵化・放流事業を通して個体数回復を図ったが成果を上げることが出来なかった。そこで、野外調査から生育段階毎に作った行列モデルを用いて感度解析を行ったところ、（孵化・放流事業の対象となる）稚亀の生存率の感度より年齢のいった若い亀の生存率の方が高い事が分かった。その後、若い亀の生存率を脅かす原因の一つに定置網に掛かることによる窒息死である事がわかったのである。以後、条例が制定されその地域の定置網は亀の脱出口を設ける事が義務づけられ、個体数回復に繋がったという話である [3]。

*3 晩産に伴う受精率の低下や身体的負担など。

この例のように全ての事例に対して、本稿で用いた感度分析が効果的な役割を果たすと言い切ることは出来ないが、少子・高齢化問題を理解する上で有効な方法の1つとなり得るだろう。

参考文献

- [1] Matrix population models, Caswell, H., Wiley Online Library, 2006
- [2] H. Caswell, A general formula for the sensitivity of population growth rate to changes in life history parameters, *Theoretical population biology* 14 (2) (1978) 215–230.
- [3] D. T. Crouse, L. B. Crowder, H. Caswell, A stage-based population model for loggerhead sea turtles and implications for conservation, *Ecology* 68 (5) (1987) 1412–1423.