

ある有限な年齢の最大値とする。

成人死亡率のモデリングにあたっては、さらに、 $\lambda_{x,t}$  は各  $t$  について、 $x > x_0(t)$  の範囲で  $x$  について狭義単調増加であると仮定してよい。ここで、 $x_0(t)$  は各  $t$  について、 $\lambda_{x,t}$  が狭義単調増加関数となる  $x$  の下限値を示す。このとき、各  $t$  に対して、関数  $\lambda_t(x)$

$$\lambda_t: \tilde{X}_t \rightarrow Y, \quad \lambda_t(x) \stackrel{\text{def}}{=} \lambda_{x,t}$$

は  $x$  について単射である。ただし、 $\tilde{X}_t = [x_0(t), \omega]$  である。 $\tilde{Y}_t = \lambda_t(\tilde{X}_t)$  とすると、関数  $\lambda_t(x): \tilde{X}_t \rightarrow \tilde{Y}_t$  は各  $t$  について、 $\tilde{Y}_t$  上で定義される逆関数  $\nu_t(y): \tilde{Y}_t \rightarrow \tilde{X}_t$  を持つ。

そこで、 $Y_0$  を以下のように定義する\*1。

$$Y_0 \stackrel{\text{def}}{=} [y_0, y_1] \quad \text{ただし} \quad y_0 = \sup_{t \in T_0} \min \tilde{Y}_t, \quad y_1 = \inf_{t \in T_0} \max \tilde{Y}_t,$$

このとき、 $\nu_{y,t}: Y_0 \times T_0 \rightarrow X_0$  を

$$\nu_{y,t} \stackrel{\text{def}}{=} \nu_t(y)$$

により定義する。 $\nu_{y,t}$  は、時刻  $t$  における対数死力関数の値が  $y$  となるような年齢  $x$  を示している。

さらに、死亡モデルの微分型表示において用いる、(1) $\rho_{x,t}$ : 死力改善率と (2) $\tau_{y,t}$ : 年齢増加率を、以下の式によって定義する。

$$\rho_{x,t} \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{\partial \lambda_{x,t}}{\partial t} = -\frac{\partial \log \mu_{x,t}}{\partial t}$$

$$\tau_{y,t} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial \nu_{y,t}}{\partial t}$$

## 2.2 対数死亡曲面上の接ベクトル場を利用したモデル構築

1.2 節で述べた通り、リー・カーター・モデルのような低下型モデルは、年齢を固定した場合の対数死亡率の時間的変化を記述することによって死亡率の変化を表現する。一方、シフト型モデルは、対数死亡率値を固定した場合の年齢の時間的変化を記述するモデルと考えることができる。これらの事実を、対数死亡率曲面  $S$  上の接ベクトルを用いて表現しよう。

対数死亡率曲面  $S$  上で、年齢  $x_0$  を固定して移動した時に描かれる曲線  $C_{x_0}$  と、対数死亡率値  $y_0$  を固定して移動したときに描かれる曲線  $C_{y_0}$  を考える。このとき、 $C_{x_0}$  と  $C_{y_0}$  はそれぞれ、

$$(x_0, t, \lambda_{x_0,t})$$

$$(\nu_{y_0,t}, t, y_0)$$

\*1  $x_0(t)$  は必ずしも連続とは限らないため、 $\{\min \tilde{Y}_t | t \in T_0\}$  には最大値がない可能性もある。

とパラメータ表示されるから、これを  $t$  で微分して得られる以下の 2 つのベクトル

$$\rho(x_0, t_0, y_0) = (0, 1, -\rho_{x_0, t_0})$$

$$\tau(x_0, t_0, y_0) = (\tau_{y_0, t_0}, 1, 0)$$

は、 $S$  の接ベクトルとなる。

図 1 対数死亡率曲面と接ベクトルの例

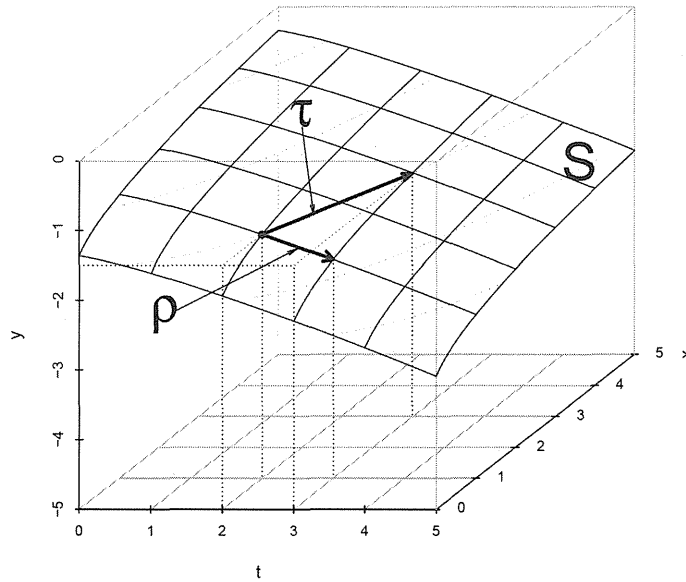


図 1 は、対数死亡率曲面  $S$  及びそれ上の接ベクトルの例を模式的に示したものである。対数死亡率曲面上の点  $(x, t, y) = (1, 2, -1.5)$  において、年齢を固定した方向への接ベクトルが  $\rho$ 、対数死亡率値を固定した方向への接ベクトルが  $\tau$  である。

このような接ベクトルは、 $S$  の任意の点で考えることができるから、各点にこの接ベクトルを対応させることにより、 $S$  上に 2 種類の滑らかな接ベクトル場を定義することができる。このように、対数死亡率の時間変化は接ベクトル場に対応させることができるが、逆に、各時刻・各年齢における死亡率の改善方向をベクトルで指定することによって、これを接ベクトル場として持つような対数死亡率曲面を構成することができる。したがって、各時刻・各年齢における死亡率改善方向をモデル化するという、接ベクトル場を利用した死亡モデルの新たな表現が得られる。

例えば、

$$\rho(x_0, t_0, y_0) = (0, 1, k'_t b_x)$$

とすれば、これが LC モデルを表現する接ベクトル場ということになる。

この死亡モデルの新たな表現を用いれば、各時刻・各年齢における改善方向をわが国の死亡状況に適合するようにモデリングできれば、好ましいモデルが構築できることになる。そこで、このようなアプローチに従って死亡率のモデリングを考えることとしよう。

## 2.3 シフト型モデルとしての線形差分 (LD) モデル

国立社会保障・人口問題研究所の「日本の将来推計人口（平成 18 年 12 月推計）」(国立社会保障・人口問題研究所 2007) の将来生命表作成にあたっては、現在国際的に標準的な方法とされるタリー・カーター・モデルを採用しつつ、これに対して世界の最高水準の平均寿命を示すわが国の死亡動向の特徴に適合させるため、新たな機構を加えた「年齢シフトモデル」により死亡率の投影を行った(石井 2008)。具体的には、過去の死亡率曲線にロジスティック曲線をあてはめて、その年齢シフト量と勾配に関するパラメータを推定し、これによる高齢死亡率の年齢シフトを考慮した上でリー・カーター・モデルを適用することによって、死亡率改善の著しいわが国の死亡状況に適合させるものである。

このようなモデルがわが国の死亡動向によく適合するのには、日本の近年の高齢死亡率改善が、死亡率曲線の垂直方向への低下よりも、水平方向にシフトするという見方がより実態に合っているということが背景にあった。そこで、対数死亡曲面上の接ベクトル場を利用したモデリングに応用しやすく、また、効率的に高齢死亡率を表現可能な「シフト」型モデルである線形差分 (LD) モデルを導入する。

まず、LD モデルが高齢死亡率を効率的に表現可能であるという理論的背景について述べる。高齢部の死亡率を表すパラメトリックなモデルに関してはこれまで多くのものが提案されている。このようなものの中から、Thatcher et al. (1998) は、13 カ国の 80~120 歳の高齢死亡率データに対し、6 種類のパラメトリックモデルを当てはめ、モデル間の比較検討を行っている。ここで比較対象となったモデルは、

1. Gompertz:  $\mu_x = ae^{bx}$
2. Weibull:  $\mu_x = ax^b$
3. Helligman & Pollard:  $q_x = \frac{ae^{bx}}{1+ae^{bx}}$
4. Quadratic:  $\ln(\mu_x) = a + bx + cx^2 \quad (c < 0)$
5. Logistic:  $\mu_x = \frac{ae^{bx}}{1+ae^{bx}} + c$
6. Kannisto:  $\mu_x = \frac{ae^{bx}}{1+ae^{bx}}$

であるが、この中で、もっともパフォーマンスが高かったものは、Logistic と Kannisto のロジスティックモデルであり、特に、Kannisto は、2 パラメータロジスティックモデルとも呼ばれ、2 つだけのパラメータで高齢死亡率をよく表現できるという利点があるとされている。また、このモデルは、Human Mortality Database の高齢部分のあてはめにも用いられており、先進諸国の高齢死亡率の表現に有効であることがわかる。したがって、このモデルが時系列的に変化する時に持つ特性を抽出して、死亡率改善方向に翻訳するこ

とができれば、接ベクトル場を利用しつつ、高齢死亡率を表現する上で好ましい性質を備えたモデルの構築が可能となることになる。

以下の命題は、2パラメータロジスティックモデルの  $\tau_{y,t}$ : 年齢増加率が持つ特性であり、LDモデルの考え方の基礎を示すものである。

**命題 1.** 2パラメータロジスティックモデル

$$y = \lambda_{x,t} = \log \frac{\alpha_t \exp(\beta_t x)}{1 + \alpha_t \exp(\beta_t x)} = \log \alpha_t + \beta_t x - \log(1 + \alpha_t \exp(\beta_t x))$$

において、 $\tau_{y,t}$  は各  $t$  において  $x$  の線形関数である。すなわち、

$$\tau_{y,t} = f'_t + g'_t x$$

が成立する。

*Proof.*

$$e^y = \frac{\alpha_t \exp(\beta_t x)}{1 + \alpha_t \exp(\beta_t x)}$$

$$\Leftrightarrow \alpha_t \exp(\beta_t x) = \frac{e^y}{1 - e^y}$$

$y$  を固定したまま両辺を  $t$  で微分することにより、

$$\alpha'_t \exp(\beta_t x) + \alpha_t \exp(\beta_t x) \left( \beta'_t x + \beta_t \frac{\partial x}{\partial t} \right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{\alpha'_t}{\alpha_t \beta_t} - \frac{\beta'_t}{\beta_t} x$$

□

したがって、 $\tau_{y,t}$  が  $x$  の線形関数となる場合、2パラメータロジスティックモデルの年齢増加率が持つと同じ性質を持つことになる。そこで、年齢増加率が実際にこの条件を満たすモデルとしてLDモデルを定義する。すなわち、LDモデルは、年齢増加率が以下のように表されるモデルである。

$$\tau_{y,t} = f'_t + g'_t x$$

これは微分型表示であり、両辺を  $t$  で積分することにより、以下の通常型表示を得る。

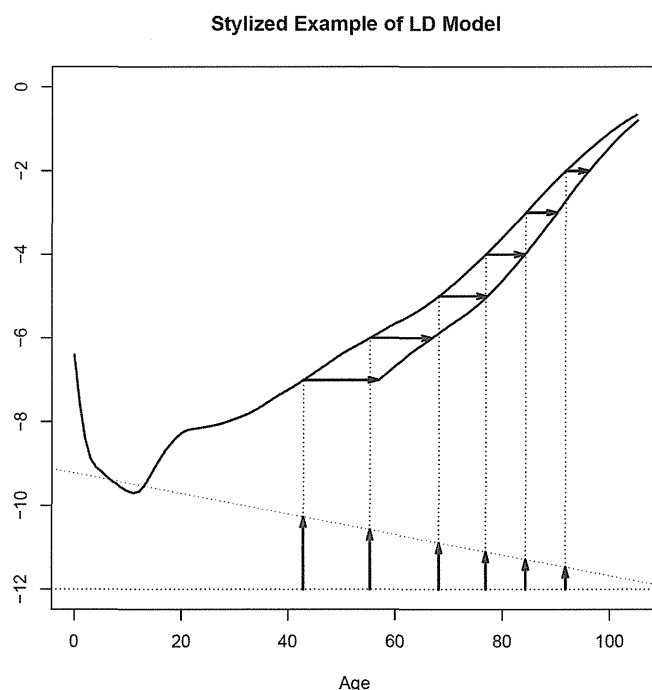
$$\nu_{y,t} = f_t + g_t x + a_y$$

ここで、 $a_y$  は対数死亡率の逆関数に関する標準的なパターンを表す。

図2は、LDモデルの考え方を模式的に表したものである。図は、左側にある対数死亡率曲線の成人死亡率部分が、死亡率改善により右側へシフトした状況を示している。ここで、水平方向右向きの矢印が各年齢におけるシフト量、すなわち、年齢増加率を表す。この矢印を反時計回りに90度回転させ、始点を揃えてグラフの下側に配置した。矢印の終

点が一直線上に並んでいるが、これが年齢増加率が年齢の線形関数になることを意味している。LD モデルとは、この矢印の終点が常に直線上に並ぶモデルであるということができる。

図2 LDモデルの模式的例



LD モデルは、成人死亡率のみを表現するモデルであり、全年齢の死亡率を必要とする将来生命表の作成に単独で用いることができない。一方、LC モデルは全年齢の死亡率をモデリングすることが可能である。そこで、若年層に対しては LC モデルの改善方向を持ちつつ、高齢層に対しては LD モデルの改善方向を持つようなベクトルを構成し、これを接ベクトル場として持つような対数死亡率曲面として全年齢死亡率モデルを構築することが考えられる。次節以降において、このような方法を実際のわが国の死亡率に適用し、将来生命表に応用することについて考察する。

### 3 わが国の死亡率への適用

#### 3.1 実績値によるモデル評価・構築

本研究において基礎とする死亡率データは、国立社会保障・人口問題研究所「わが国の長寿化の要因と社会・経済に与える影響に関する人口学的研究」プロジェクトにおいて作成された「日本版死亡データベース」とし、昭和 45(1970)～平成 22(2010) 年の死亡率を用いた。「日本版死亡データベース」とは、国際的な死亡データベースである Human Mortality Database の方法論を基礎としつつ、わが国の死亡状況にあわせて改良を行っ

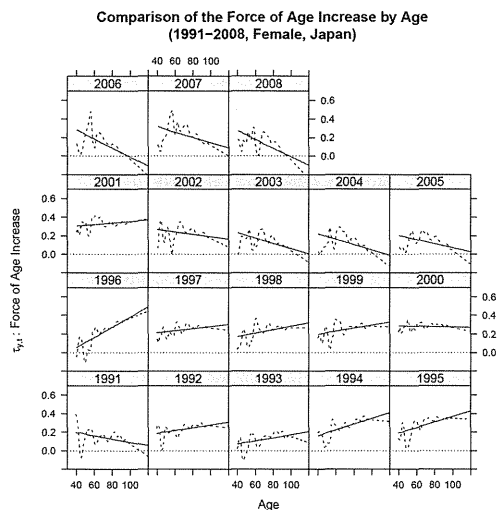
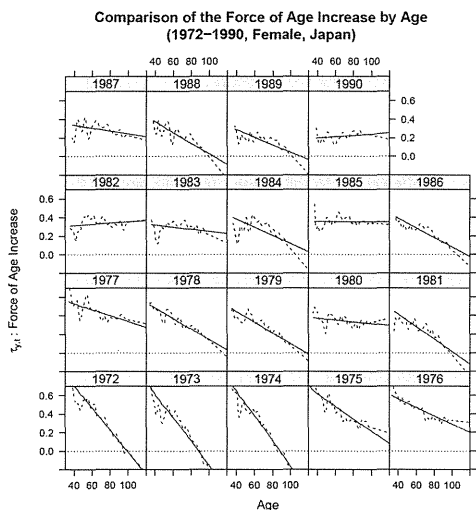
て構築した、日本の生命表のデータベースである。

本節では、標準パターンの基準となる年次を 1970~2010 年の全期間とし、実績値へのあてはめに基づくモデルの評価・構築について論じる。なお、本節では、女性の死亡率への適用結果を述べる。

さて、2.3 節において、LD モデルを、2 パラメータロジスティックモデルの  $\tau_{y,t}$  が  $x$  の線形関数であるという理論的背景に基づいて導入したが、これが実際のデータにもよく適合する点を確認しておこう。図 3 と 4 は、 $\tau_{y,t}$  の実績値と LD モデル値を示したものである。 $\tau_{y,t}$  の算定にあたっては、統計的な安定性の観点から、当該年次の前後 2 年分の年齢増加分を 4 で割ることにより算出している。これを見ると、実績値は年齢の線形関数として比較的良好に近似できることが観察され、LD モデルによる推計結果もこれによくあてはまっていることがわかる。

図 3 年齢増加率（実績値と LD モデル, 1972~1990 年）

図 4 年齢増加率（実績値と LD モデル, 1991~2008 年）



次に、LC モデルと LD モデルを高年齢死亡率にあてはめた場合の比較を行う。図 5 は 1970~2010 年の 10 年おきの実績と LC モデルによる対数死亡率 (60~100 歳) を示したものの、図 6 は実績値とモデル値の差を示したものである。また、図 7、8 は同様に LD モデルについて示したものである。両者を比較すると、年齢が若いところでは LC モデルのあてはまりがややよい一方、高年齢層では LD モデルがよくあてはまっていることが観察できる。

さらに、このパフォーマンスの違いを統計的観点から比較するため、以下のような方法により検証を行った。

1. 真の死亡率がモデルによって推定された率であると仮定する。
2. 死亡数は二項分布  $B(N_{x,t_c}, p_{x,t_c})$  に従うものとする。ただし、 $N_{x,t_c}$ 、 $p_{x,t_c}$  は、 $x$

図 5 Mortality Rates (Actual and Model, LC)

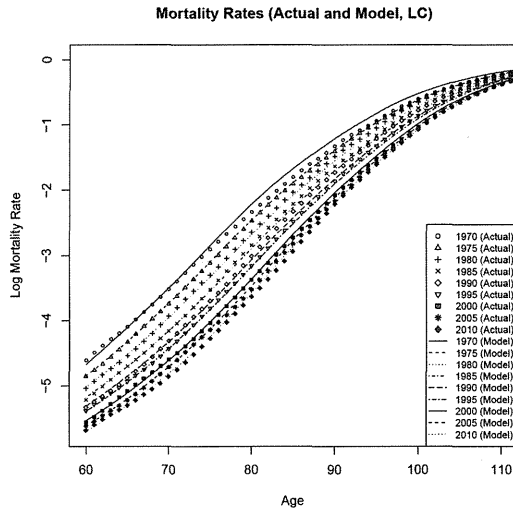


図 6 Difference of Mortality Rates (Actual and Model, LC)

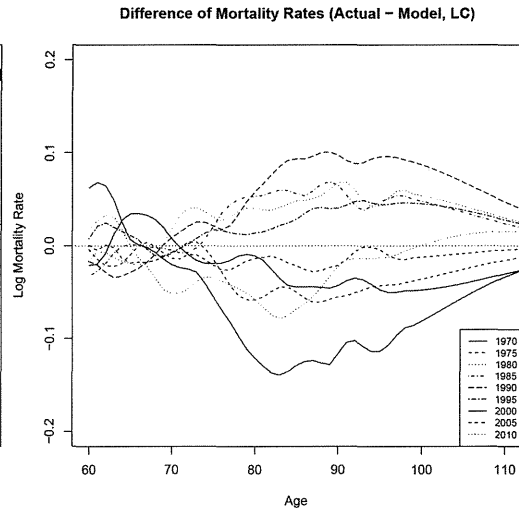


図 7 Mortality Rates (Actual and Model, LD)

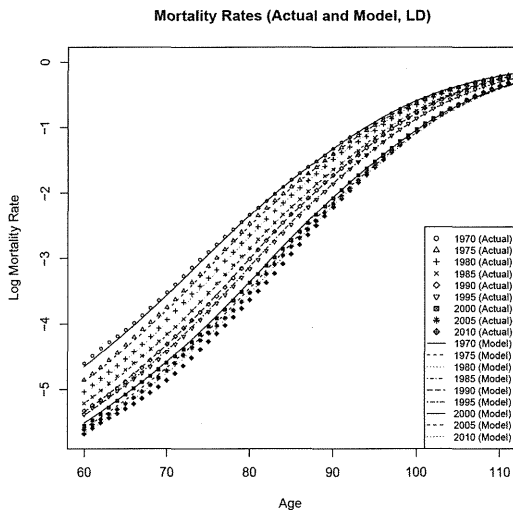
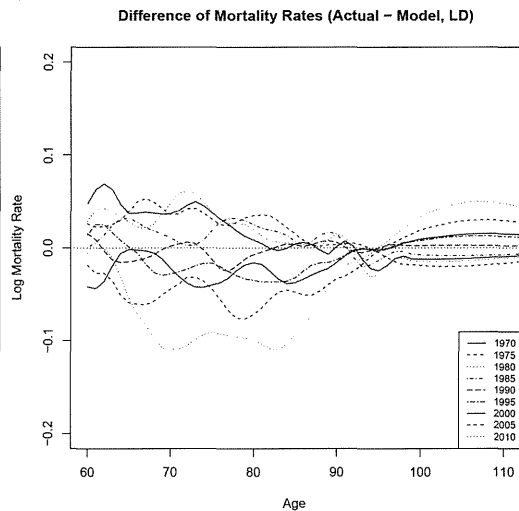


図 8 Difference of Mortality Rates (Actual and Model, LD)



歳、暦年  $t_c$  における人口及び死亡率を表す。

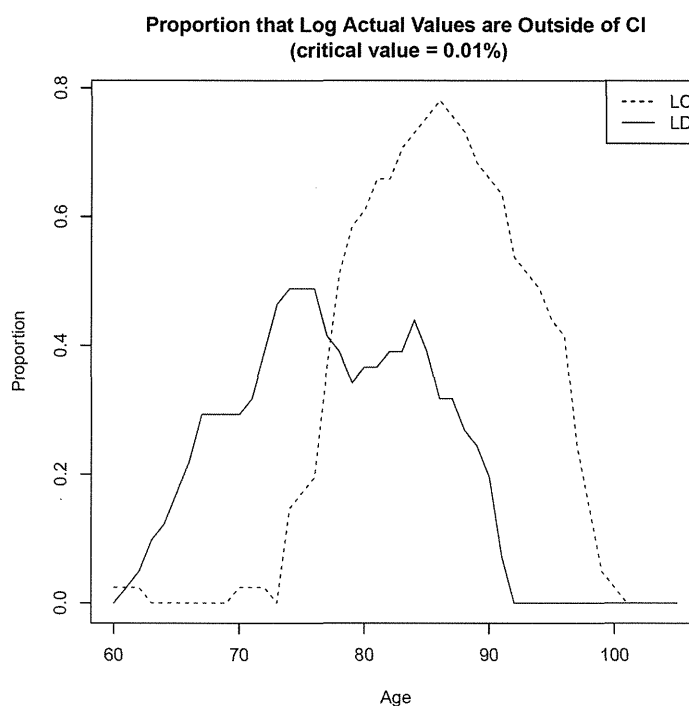
- $N_{x,t_c}$  は、死亡リスクに曝される生存述べ年数  $E_{x,t}$  に最も近い整数により近似する。

なお、 $N_{x,t_c}$  は大きい値をとり、通常の信頼区間の算定で用いられるような危険率では多くの実績値が信頼区間の外に出て、有効な比較とならない可能性があることから、信頼区間の算定にあたっては、0.01% という極めて低い危険率を設定することとした。

図 9 に、各年齢について対数死亡率の実績値がその (100 - 0.01)% 信頼区間の外側に

出る割合を示した。したがって、このグラフが低い値を取るほど、パフォーマンスがよいことを示している。これによれば、低い年齢層では LD モデルの方が割合が高い部分は若干あるものの、高齢層では LD モデルのパフォーマンスが LC モデルを上回っており、わが国の高齢死亡率は低下型よりもシフト型の改善をしていることがわかるとともに、若年齢層では LC モデル、高齢層では LD モデルを用いることが望ましいことが示されたことになる。

図9 Proportion that Log Actual Values are Outside of CI (critical value = 0.01%)



そこで、実際にこれらを用いて全年齢死亡率モデルを構成しよう。LC, LD モデルの推定結果に基づいて、両モデルに対応する2つの接ベクトル場  $\rho$  と  $\tau$  が推定できる。これらは、模式的に表した図10のLC, LDと書かれた実線の矢印に対応している。

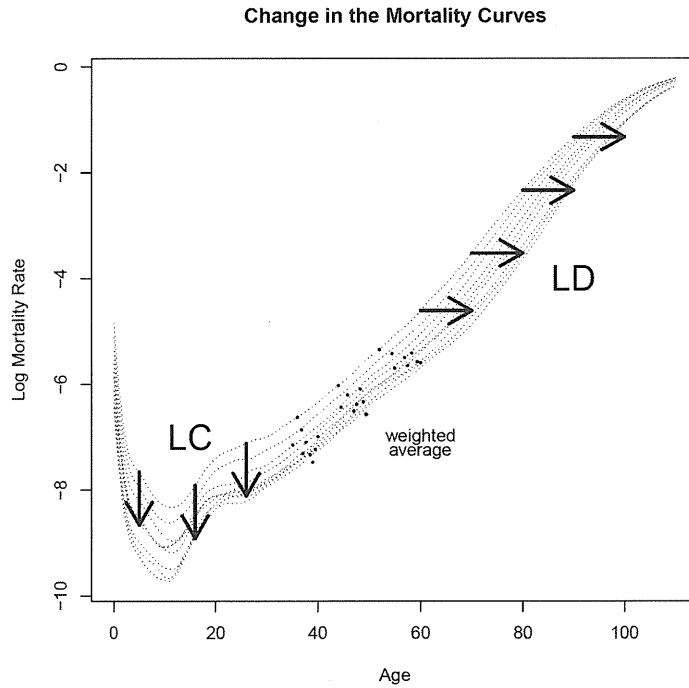
ここで、図10における点線の矢印で表される中間的な年齢層に対しては、両者のベクトル場に属するベクトルを、一定のウエイトを用いてベクトルレベルで加重平均することにより、LCモデルからLDモデルへと連続的につながるようなベクトル場を定義することが可能である。ここでは、ウエイト  $w(x, t)$  を線形関数を用いて以下の式で定義することとした。

$$w(x, t) = \begin{cases} 0 & (x < x_0(t) = 40) \\ \frac{x - x_0(t)}{x_1(t) - x_0(t)} & (x_0(t) \leq x < x_1(t)) \\ 0 & (x \geq x_1(t)) \end{cases}$$

ただし、 $x_1(t)$  は、基準年次の中央において  $x_1(t_{bp}) = 70$  とし、その他の年については、



図 10 Stylized Example of Mortality Model



$\lambda_{x,t} = \lambda_{70,t_{bp}}$  を満たす  $x$  を  $x_1(t)$  とした。そして、この線形結合、

$$(1 - w(x, t))\rho(x, t, y) + w(x, t)\tau(x, t, y)$$

が各点における死亡率改善を示すベクトルとなる接ベクトル場を持つような対数死亡率曲面を構成することにより、全年齢死亡モデル (以下、TVF モデルと呼ぶ) を定義することができる。これをレキシス平面に射影したものが図 11 である。

また、TVF モデルと LC モデルによる実績値の内挿テストとして、両モデルによる平均寿命を実績値と比較したものが図 12 である。このみ、男性の結果も併せて示している。これによれば、男性の平均寿命については両者に大きな違いは見られないものの、女性の平均寿命については TVF モデルの方があてはまりがよいことがわかる。

図 11 Construction of a Tangent Vector Field

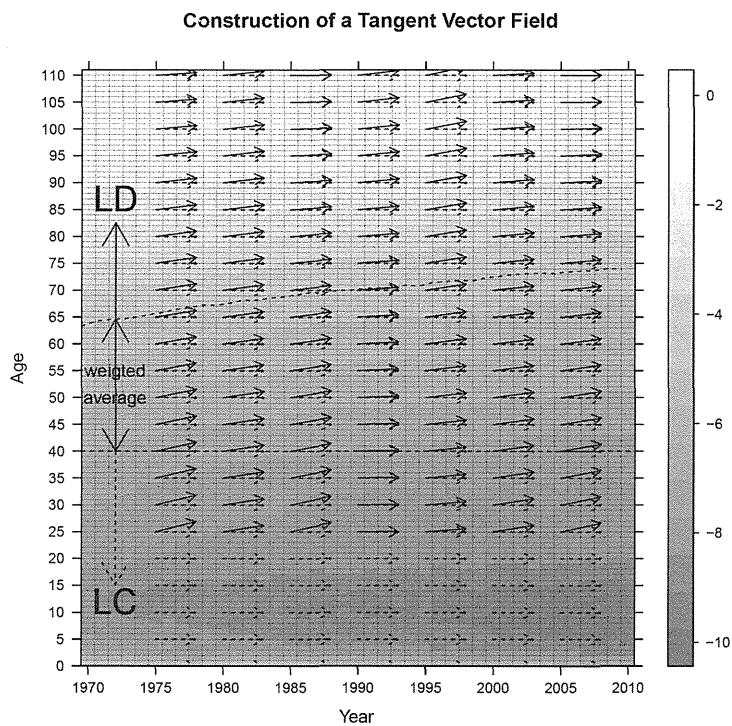
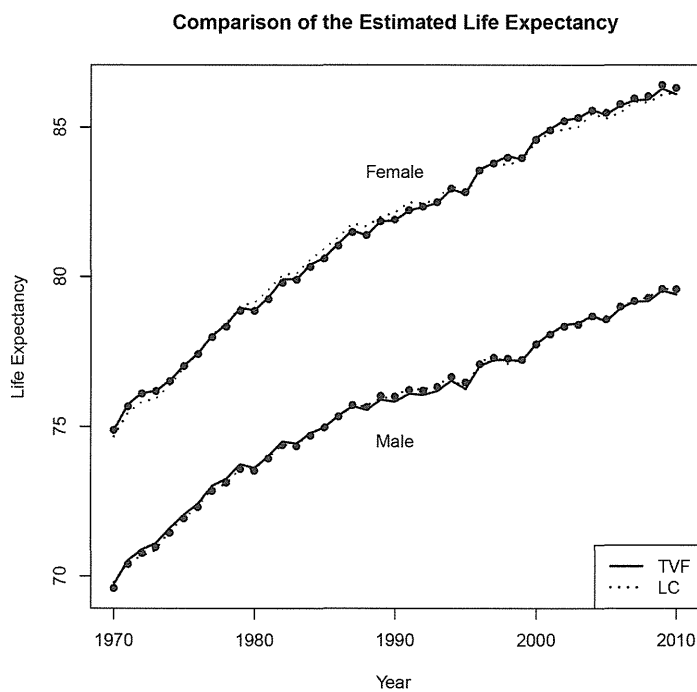


図 12 平均寿命の内挿テスト (TVF モデルと LC モデル)



### 3.2 TVF モデルを用いた将来推計

次に TVF モデルを用いた生命表の将来推計について述べる。将来推計を行う際には、実績値と将来推計値の連続性の観点から、標準パターンの基準となる年次が推計開始時点に近い方が好ましいことから、基準年次は 2006～2010 年としている。生命表の将来推計のためには、モデル内部で用いられているパラメータの動向を将来に投影し、これを用いて対数死亡率を投影する。

図 13 LC モデルのパラメータ ( $a_x, b_x$ )

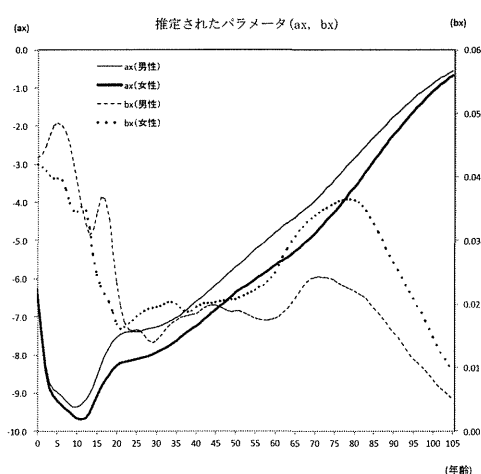
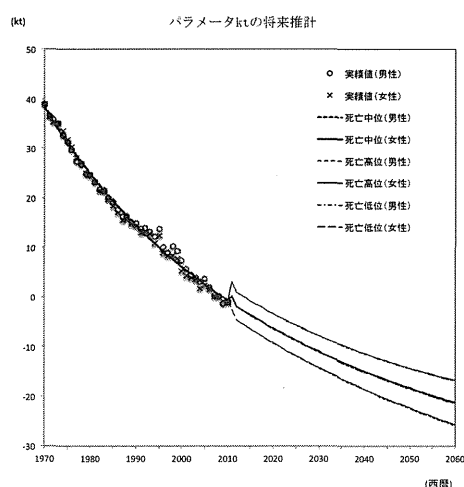


図 14 LC モデルのパラメータ ( $k_t$ )

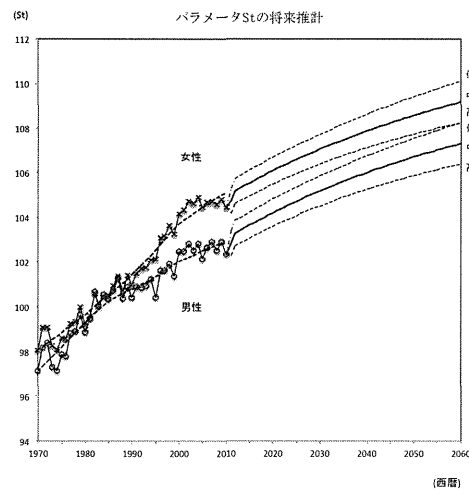
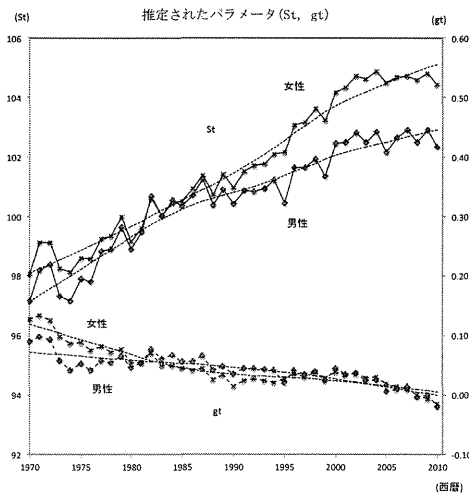


まず、LC モデルのパラメータの投影について述べる。LC モデルでは、 $a_x, b_x, k_t$  という 3 種類のパラメータが推定されている。図 13 はこのうち、 $a_x, b_x$  の推定結果を示したものである。LC モデルの将来推計にあたっては、通常、この 2 つのパラメータは将来に向けて固定されるので、本研究においてもこれを固定する。一方、 $k_t$  は死亡指数として死亡の時系列水準を表すパラメータとなることから、これを将来に向けて投影することにより生命表の投影が行われる。図 14 はこれを示したものである。死亡指数  $k_t$  の将来推計にあたっては、近年、徐々に緩やかになっている死亡水準の変化を反映させるために、関数あてはめを行って補外することにより推計を行った。推計のための関数としては、小松 (2002) 及び石井 (2008) において用いられている関数 (指数関数と対数関数の平均) がわか国の死亡指数の推移をよく表現しているとの観察に基づき同じ関数を用いた。また、男女の死亡率をより整合的に推計する観点から、男女の死亡指数を組み合わせた行列に特異値分解を行い、第一特異値に対応する項の時系列変化に対して関数あてはめを行った後、男女別の死亡指数を推計した。なお、近年の死亡水準の改善は従来の理論の想定を超えた動向を示しつつあることから、今後の死亡率推移ならびに到達水準については不確実性が高いものと考えられる。このため、死亡指数の将来の動向に複数の仮定を与えること

によって、将来の死亡水準に一定の幅を示すこととした。具体的には、標準となる死亡率推移の死亡指数パラメータ（死亡中位と表す）の分散をブートストラップ法等により求め、これを用いて死亡指数が一定の確率で存在する区間を推定し、その上限及び下限を推移する場合を高位仮定・低位仮定として追加して3通りの死亡水準を示した。ここでは、死亡指数が確率99%で存在する区間を推定して複数の仮定を示している。

図 15 LD モデルのパラメータ ( $S_t, g_t$ )

図 16 パラメータ  $S_t$  の将来推計



次に、LD モデルのパラメータの投影について述べる。LD モデルは通常型表示では、 $\nu_{y,t} = f_t + g_t x + a_y$  と表され、実績値へのあてはめにおいては最小二乗法により  $f_t$  と  $g_t$  を直接推定できる。後述する通り  $g_t$  については直近の値を将来的に向けて固定することによって投影が可能であるが、 $f_t$  は年齢増加率の切片  $f'_t$  を積分して得られるものであり、 $f'_t$  が  $g'_t$  の変動の影響を受けることから、このパラメータ自体を直接将来に向けて投影することは難しい。そこで、死亡率曲線全体の大局的な位置を表す新たなパラメータ  $S_t$  を、2パラメータロジスティック曲線の変曲点に相当する年齢（死亡率の値が0.5となる点）により定義し、 $S_t$  を投影することとした。そして、 $S_t$  が将来推計されれば、

$$f_t = (1 - g_t)S_{t_1} - S_{t_0}$$

により  $f_t$  を求めることができる。ただし、 $t_0$  は基準年次の中央であり、 $f(t_0) = g(t_0) = 0$  と仮定している。

$S_t$  と  $g_t$  の実績値の推移を示したものが、図 15 である。 $S_t$  については1970年以降増加を続けているが、この15年間については死亡指数の推移と同様、ややその速度が緩やかになっている。一方、 $g_t$  は当初減少基調にあったが、近年では増減をあまりせず推移してきている。そこで、 $S_t$  については過去15年間の死亡指数に対する変化率を用いて将来推計し、 $g_t$  については直近の平均値（過去5年分）を将来に向けて固定することとした。 $S_t$  の将来推計を示したものが図 16 である。死亡指数  $k_t$  について3通りの推計値が

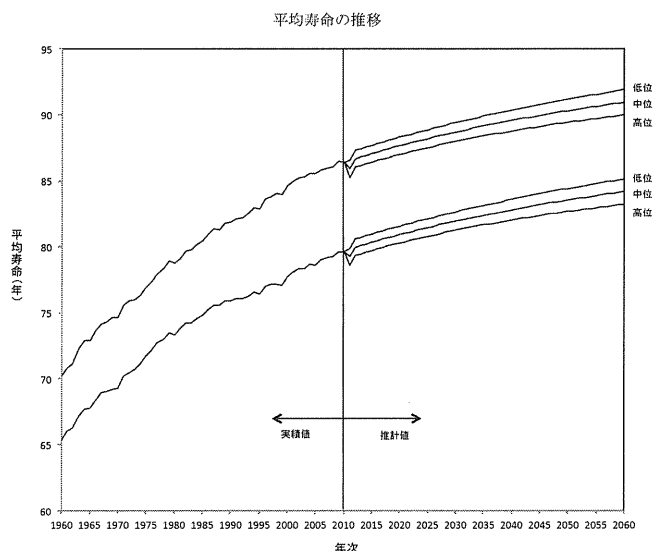
あることに対応し、 $S_t$  についても 3 通りの推計値が示されている。

### 3.3 将来推計結果とその評価

3.2 節において述べた方法により求められたパラメータと変数から平成 72 (2060) 年までの死亡率を男女別各歳別で算出し、TVF モデルを用いた将来生命表を推計した\*2。

平均寿命の将来推計結果を示したものが図 17 である。標準的な中位仮定に基づくと、平成 22(2010) 年に男性 79.64 年、女性 86.39 年であった平均寿命は、平成 32(2020) 年に男性 80.93 年、女性 87.65 年、平成 42(2030) 年に男性 81.95 年、女性 88.68 年となり、平成 72(2060) 年には男性 84.19 年、女性 90.93 年となる。また、死亡高位の仮定では、中位仮定に比べて死亡率が高めに、したがって平均寿命は低めに推移する。その結果、この仮定においては、平均寿命は平成 42(2030) 年に男性 81.25 年、女性 87.97 年となり、平成 72(2060) 年には男性 83.22 年、女性 89.96 年となる。一方、死亡低位の仮定では、中位仮定に比べて死亡率が低めに、したがって平均寿命は高めに推移する。その結果、この仮定においては、平均寿命は平成 42(2030) 年に男性 82.65 年、女性 89.39 年となり、平成 72(2060) 年には男性 85.14 年、女性 91.90 年となる。

図 17 平均寿命の推移



次に、TVF モデルによって得られた死亡率の年齢パターンの特徴を LC モデルのものと比較しよう。図 18 は、1970～2010 年の対数死亡率 (女性) の基準年次に対する相対的水準をグラフに表したものである。死亡率は年次推移に従って改善することから、相対的

\*2 平成 23(2011) 年については、東日本大震災が発生したことから、人口動態統計の死亡数、及び警察庁、岩手・宮城・福島県警察による被害状況データを用い、震災の影響を織り込んだ生命表を別途算定したものをを用いている。

水準のグラフも上から下の方向に推移してくることとなる。ただし、高齢部分をよく観察すると、単に垂直的な改善だけではなく、改善の大きい部分が次第に高齢の方向にシフトしてきていることがわかる。

図 18 対数死亡率の相対的水準（実績値）

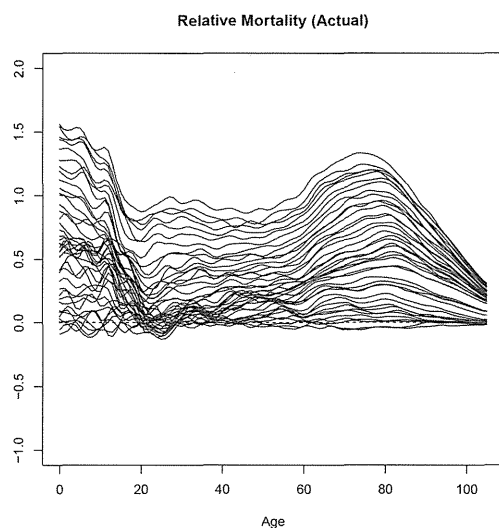


図 19 対数死亡率の相対的水準（LC モデル）

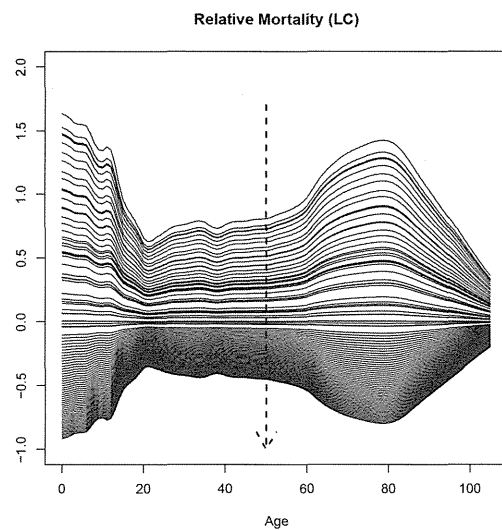
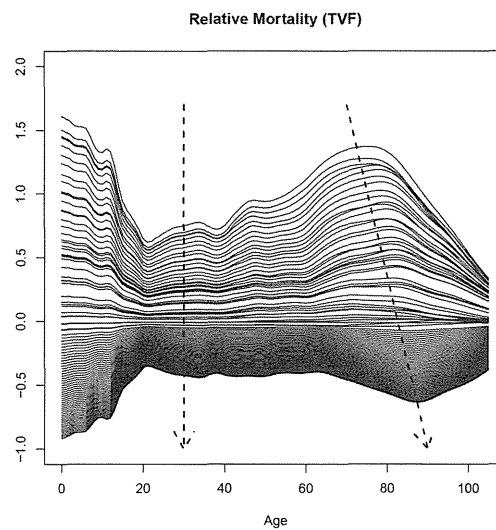


図 20 対数死亡率の相対的水準（TVF モデル）

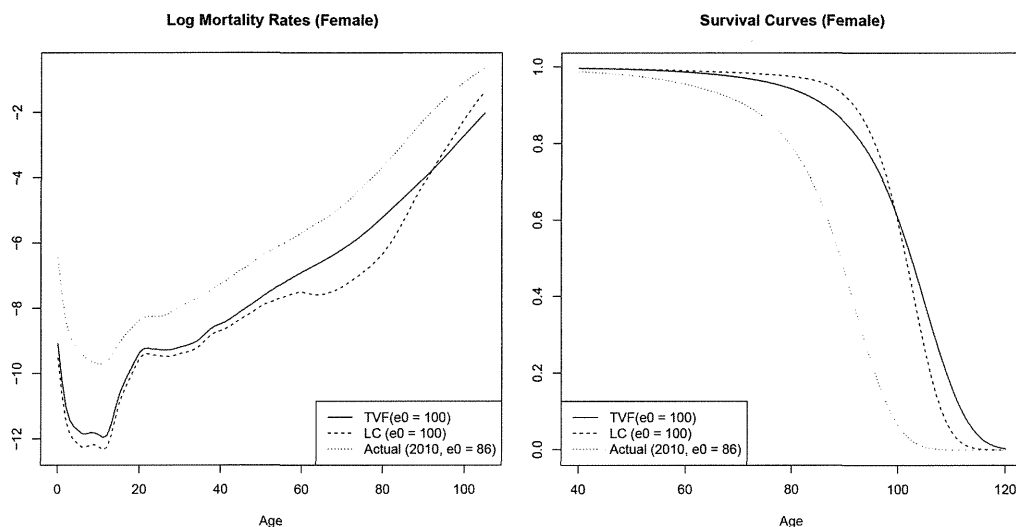


一方、LC モデル及び TVF モデルの対数死亡率の相対的水準を示したものが図 19、20 である。LC モデルは低下型モデルであり、死亡率改善を垂直的に表現することから、図 19 においても、実績値で観察されたような、改善の大きい部分のシフトは見られず、下半分の将来投影値についても同様の傾向が観察される。

一方、図 20 の TVF モデルによる相対的水準では、高齢部分が LD モデルを用いてモデル化されていることから、実績値で観察されたシフトが表現されているとともに、将来投影値についても同様の傾向が観察される結果となっている。

図 21 対数死亡率曲線の比較

図 22 生存数曲線の比較



次に、死亡率改善が非常に進んだ仮想的な状況において、両モデルの生命表関数がどのような様相を示すのか比較してみよう。図 21 は、LC モデルと TVF モデルによって  $e_0$  が概ね 100 年前後となった場合に、どのような対数死亡率曲線となるかについて仮想的な試算を行ったものである。点線は 2010 年の実績値であり、これに対して、LC モデルを破線、TVF モデルを実線で示している。 $e_0$  が 100 年前後となった場合、LC モデルによる対数死亡率曲線は、60 歳前後で一旦たんだ後、80 歳以降で逆に急激に上昇するような不自然な年齢パターンを示している。これは、LC モデルでは年齢別死亡率の改善を表す  $b_x$  が固定されており、 $b_x$  は図 13 にある通り高齢部でピークを持つ山形の形状をしていることから、このパターンに従って死亡率改善が継続すると仮定すると、山形のピーク部分に対応する年齢層のみが著しく死亡率改善し、このような不自然なパターンが導き出されるのである。一方、実線で示した TVF モデルによる対数死亡率曲線にはこのような不自然な年齢パターンは見られない。このように、TVF モデルを用いて、高齢死亡率を LD モデルでモデル化することによって、自然な年齢パターンを持つ対数死亡率曲線の投影を行うことが可能である。

同様に生存数曲線を試算したものが図 22 である。これによれば、破線で示された LC モデルによる生存数曲線は、2010 年の生存数曲線と比較した場合、生存数曲線の右上のカーブが張り出して矩形化が進んでいることがわかる。一方、TVF モデルによる生存数曲線は全体が右側にシフトするような形で死亡率改善が進んでおり、わが国の近年の死亡率改善が、死亡の遅延と見られる動きと整合的な結果となっていることがわかる。

## おわりに

本研究では、外国人人口受け入れによる将来人口の変化に関するシミュレーションの実行を行うための前提として、現状の傾向が続くとした場合の死亡動向の分析、モデリング及び将来見通しに関する研究が必要との観点から、わが国の死亡動向に適した柔軟性の高い数理モデルを開発するとともに、わが国の将来生命表への応用について研究を行った。

最初に、死亡率モデルと将来推計の考え方についてまとめを行った。死亡の年齢パターンのモデルについては、大きく分けて、数学的関数によるモデル、数表によるモデル、リレーショナルモデルの3種類の考え方がある。そして、これをさらに死亡の年齢・時系列パターンのモデルに拡張した場合、リレーショナルモデルでは標準的なパターンは常に一定であることから、リレーショナルモデルを用いた対数死亡率のモデリングとは、「対数死亡率の時間変化のモデリング」に相当することを見た。そして、このような対数死亡率の時間変化をより一般化し、こある時刻におけるある年齢の対数死亡率が、年齢も対数死亡率も異なる新たな方向へと変化していくという考え方も可能であることを述べた。このような死亡率曲線の自由な方向への変化を数理モデルによって表現するためのフレームワークとして、対数死亡率曲面上の接ベクトル場を利用が有効であり、このようなモデリングに応用しやすく、効率的に高齢死亡率を表現可能な「シフト」型モデルである線形差分(LD)モデルを導入した。

この方法論を利用し、わが国の死亡率実績値によるモデル評価・構築を行い、これを用いた将来推計を実行した。実績値にLC、LDの両モデルをあてはめたところ、年齢が若いところではLCモデルのあてはまりがややよい一方、高年齢層ではLDモデルがよくあてはまっている点を確認できた。また、このパフォーマンスの違いについて統計的観点からの比較を行い、低い年齢層ではLDモデルのパフォーマンスがやや上回る部分があるものの、高年齢層ではLDモデルがLCモデルを上回っており、わが国の高齢死亡率は低下型よりもシフト型の改善をしていることが確認されたとともに、若年層ではLCモデル、高年齢層ではLDモデルを用いることの有効性が示された。このような観察に基づき、両者のベクトル場に属するベクトルを一定のウェイトを用いて加重平均して、LCモデルからLDモデルへと連続的につながるようなベクトル場を定義し、全年齢死亡モデルであるTVFモデルを定義した。次に、TVFモデルに含まれるパラメータを将来投影することにより将来生命表を作成して、その評価を行った。TVFモデルによる対数死亡率の相対的水準の観察からは、LCモデルでは表現できなかった、死亡率改善が大きい部分が高齢側へシフトする動きが表現されているとともに、将来投影値についても同様の傾向が反映されるものとなっている。また、死亡率改善が非常に進んだ仮想的な状況を考察し、TVFモデルではLCモデルで現れたような対数死亡率曲線の不自然な年齢パターンは生じず、生存数曲線もわが国の近年の死亡動向と整合的なものとなっていた。このように、TVFモデルによる将来推計は、LCモデルによるものと比較して、様々な有効性があることが明らか



かとなった。

本研究の成果は、基本的には日本人の将来の死亡動向を投影したものであるが、わが国の独特な死亡状況を鑑みれば、外国人人口の受け入れのシミュレーションにおいても、この成果を基礎として行うことが必要である。今後、実際のシミュレーションに向けて、日本人と外国人の死亡レベルの違いなどをどのように反映するかなどについて、さらなる検討を行っていくことが課題である。

## 参考文献

- Bongaarts, J. (2005) “Long-range Trends in Adult Mortality: Models and Projection Methods”, *Demography*, Vol. 42, No. 1, pp. 23–49.
- Brass, W. (1971) “On the Scale of Mortality”, in W. Brass ed. *Biological Aspects of Demography*: Taylor and Francis Ltd, pp. 69–110.
- Coale, A. J. and P. Demeny (1983) *Regional Model Life Tables and Stable Populations, 2nd Edition*, New York: Academic Press.
- Gompertz, B. (1825) “On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 115, pp. 513–583.
- Human Mortality Database. University of California, Berkeley (USA) and Max Planck Institute for Demographic Research (Germany). Available at [www.mortality.org](http://www.mortality.org) or [www.humanmortality.de](http://www.humanmortality.de).
- 石井太 (2006) 「わが国の平均寿命の動向と死亡率推計モデルの検討」, 『人口問題研究』, 第 62 巻, 第 3 号, pp.21–30.
- (2008) 「近年のわが国の死亡動向に適合した 将来生命表推計モデルの研究-年齢シフトモデルの開発-」, 『人口問題研究』, 第 64 巻, 第 3 号, pp.28–44.
- 国立社会保障・人口問題研究所 (2007) 『日本の将来推計人口—平成 18 年 12 月推計—』, (財) 厚生統計協会.
- 小松隆一 (2002) 「リレーショナル・モデルによる日本の将来生命表作成の試み」, 『人口問題研究』, 第 58 巻, 第 3 号, pp.3–14, 9 月.
- Lee, R. and L. Carter (1992) “Modeling and Forecasting U.S. Mortality”, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 87, No. 419, pp. 659–675.
- Thatcher, A. R., V. Kannisto, and J. W. Vaupel (1998) *The Force of Mortality at Ages 80 to 120*: Odense University Press.

## 10 初婚過程および結婚経験構成の推定と出生力への影響

岩澤 美帆  
金子 隆一

### 1. はじめに

日本における出生のほとんどが婚姻した夫婦から発生しており、配偶関係行動の見直しは出生動向に大きく関わっている。以下では、出生率仮定設定に必要な女性の初婚過程と年齢別結婚経験構成に関する実績データと将来仮定値の作成手順について説明する。

初婚過程と結婚経験構成に必要な実績データは、年齢別初婚率、年齢別離婚率、年齢別再婚率、年齢別既婚者に占める死別割合である。初婚、離婚、再婚については人口動態統計から求め、死別は、国勢調査の結果を用いる。以下でそれぞれの求め方を示す。また、求められた配偶関係の変化が出生力の変動に反映されるモデルを構築し、結婚経験構成の変化による出生力引き下げ効果の推定を行う。

### 2. 年齢別発生率の推定

年齢別初婚率、年齢別離婚率、年齢別再婚率、年齢別既婚者に占める死別割合は、以下のように算出した。

#### 1) 年齢別初婚率

推計システムでは、日本人女性の初婚仮定を表現する年齢別初婚率が必要となる。事象は当該年中に発生した日本人女性による初婚、分母は日本人女性の生存延べ年数（平均人口）である。なお、初婚は、しばしば同居発生から婚姻届け提出までに時間が空くことがある。しかしながら、出生過程の先行指標としては、届出よりも同居開始を起点としたほうが整合的であるとの観点から、届出が遅れた婚姻を同居時期に割り振る補正を行った（届出遅れ補正）。また、直近の初婚数についても、過去の届出遅れのパターンを用いて、同居年別の初婚数を推定している。

#### 2) 年齢別離婚率

結婚経験構成を特定するためには、初婚率のほか、年齢別の離婚や再婚、死別の動向が必要となる。離婚についても、日本人女性による離婚を事象とし、別居年の翌年以降に届出が出されたものについて、別居年に割り振る、届出遅れ補正を行う。

#### 3) 年齢別再婚率

初婚率と同様、届出遅れを補正した年齢別婚姻率を求め、初婚率との差として年齢別再婚率を求めた。

#### 4) 年齢別既婚者に占める死別者割合（死別係数）

国勢調査の日本人の配偶関係構造から、年齢別に既婚者（有配偶者、離別者、死別者）にしめる死別者割合を算出し、それをを用いる。これを死別係数とする。

### 3. 結婚経験構成の推定方法

国勢調査の定義に合わせ、年齢別の未婚、有配偶、死別、離別の構成比を求める。さらに、再婚の状況を勘案して、有配偶者を妻再婚（夫再婚含む）、夫再婚、初婚どうし夫婦に分類することを行った。これを以下では結婚経験構成と呼ぶ。なお、初婚に比べ離婚、再婚過程は繰り返し経験されるといった複雑さを有しているが、推計結果の安定性を重視し、仮定を置くことによって配偶関係形成過程の簡素化を試みた。簡素化のための仮定は以下である。

- ① 初婚と再婚の離婚確率は同じとし、初離婚と再離婚の再婚確率は同じと仮定する。
- ② 50歳未満については、死別は初婚から発生し、死別後の再婚・離婚はないと仮定する。
- ③ 50歳までの離婚は2回を上限、再婚も2回（全3回の婚姻）を上限としている。
- ④ 夫のみの再婚夫婦の割合は妻再婚割合と同じとする（出生動向基本調査の実績を見ると、妻のみ再婚よりも夫のみの再婚のほうが多い。この仮定は妻のみ再婚・夫妻再婚の合計が夫のみ再婚の割合と同等と仮定していることになり、実績に整合的）

結婚経験構成は、初婚、離婚、再婚に関する年齢別発生率を求め、そこから、一結婚あたりの再婚と死別、離婚確率を求める。それらをつかって全女性に占める経験割合を求める。

#### 1) 年齢累積発生率の算出

年齢別初婚率、年齢別離婚率、年齢別再婚率から、年齢別累積初婚率(FM)、年齢別累積離婚率(D)、年齢別累積再婚率(RM)、年齢別累積婚姻率(AM(FM+RM))を算出する。

#### 2) 一結婚あたりの事象発生確率の算出

上記の年齢累積発生率を用い、再婚係数(RM/AM)（一結婚あたりの再婚確率）、離婚係数(D/AM)（一結婚あたりの離婚確率）を求め、死別係数(既婚者に占める死別者割合＝一結婚あたりの死別確率)は、すでに述べたように国勢調査の結果から算出する。

#### 3) 全女性に占める経験割合の算出

結婚経験者割合と各係数によって、結婚経験者(FM)、再婚経験者(FM\*再婚係数)、離婚経験者(FM\*離婚係数)、死別経験者(FM\*死別係数)を算出する。

#### 4) 結婚経験構成の算出

最後に、以下の手順で、結婚経験構成を算出する。

a.未婚(1-FM)

b.死別(FM\*死別係数=死別者割合)

c.妻再婚(再婚経験者×(1+再婚係数)-(再婚経験者×離婚係数))

d.離別(離婚経験-妻再婚)

e.夫のみ再婚(妻再婚と同レベルと仮定)

f.初婚どうし(FM-死別-妻再婚-離別-夫のみ再婚)

人口動態統計に基づく結婚経験構成(未婚、有配偶、死別、離別の配偶関係)を国勢調査と比較するため、各年齢時点の構成を、国勢調査と同じ10月1日時点、完結年齢別に変換し、国勢調査と比較したのが図1である。比較対象となる国勢調査は日本人女性の配偶関係で配偶関係不詳を除く構成比である。最近の国調年次ほど、人口動態ベースの配偶関係のほうが未婚者割合が低く、有配偶者割合が低く、離別者割合が高い。この理由としては

- ① 人口動態ベースの推定で仮定している2回以上の離婚の割合が現実よりも低い(より多くの離婚が離婚経験者から発生している)
- ② 高年齢になるほど、実際には事実婚が多いが、人口動態ベースの推定で十分に反映されていない
- ③ 国勢調査において、配偶関係によって回収率が異なり、離別者の回収率がとくに低い
- ④ 国勢調査において、離別者の一部が未婚あるいは有配偶と回答している

といった可能性が考えられる。離婚を2回以上経験する割合がどの程度を占めるのかといった点について、標本調査等を用いて実態を確認する作業が今後必要であると考えられる。