

研究レポート

数理モデルを用いた、 日本における携帯電話普及の分析と将来予測

広尾学園高等学校 2年 須田 隆太郎

9. 目的

携帯電話は、現代のIT社会を支えている必要不可欠なツールの一つである。携帯電話は、日常的なものからビジネスに至るまで、広く人々のコミュニケーションツールとして使用される。それに加えて、いわゆる「スマートフォン」の普及は、携帯電話の価値を高めただけでなく、ネット上に大きな市場が生まれる契機ともなった。携帯電話を介してのみ成立するビジネスにとって、携帯電話の利用者数の増減には大きな意味があるだろう。現在、日本における携帯電話の契約数は、日本の人口を超えてもなお増加し続けている。これから先、契約数がどう変化するかを予測することは、市場の将来を予測することにつながると考えられる。携帯電話の契約数を分析し、将来予測を行うことは、ビジネス的に意味がある。

同時に、本研究は、携帯電話市場が過度に活発化することで発生する問題の解決にも応用できると考える。例えば、携帯電話は新しい機種が次々に発表されており、定期的に端末を買い替えることを消費者に促している。新規契約者と機種変更者によって、携帯電話市場は活発化されていると言ってもよいだろう。一方で、それによって多くの廃棄物が発生していることも事実である。また、現在は、携帯電話の契約数は一定の増加を続けているため、さらなる携帯電話の製造を許容できるだけの収容力が市場には備わっている。しかし、将来的に市場の肥大化が止まったとき、現在と同じように携帯電話を製造し続けた場合、需要に対して供給が過度に増大してしまい、市場がうまく機能しなくなってしまうかもしれない。その際に発生する資源の浪費は、大きな経済的ダメージをもたらすであろう。実際のところ、一人当たりの携帯電話所有数には限度があるため、早かれ遅かれ、いずれは契約数の増加が抑制されることが考えられる。問題は、その時期である。

本研究の目的は、将来の市場を予測するだけでなく、その予測によってもたらされる利益と危険性の両方を考察することである。

9. 研究方法

1. 背景 – 普及過程の分析 –

まず、日本において携帯電話の普及が進んだプロセスを明らかにする必要がある。

Fig.1は、携帯電話の契約数^{※1}[1]の推移と、日本の総人口の推移[2]を表したグラフである。特徴的なのは、(1) 1990年代後半から2000年にかけて、加速度的に加入数が増加していることと、(2) 2011年に加入数が総人口を上まっても、契約数が増加し続けていることである。この2つの特徴から、契約数の推移を3つの期間（T1～T3）に分けて現象を分析した。

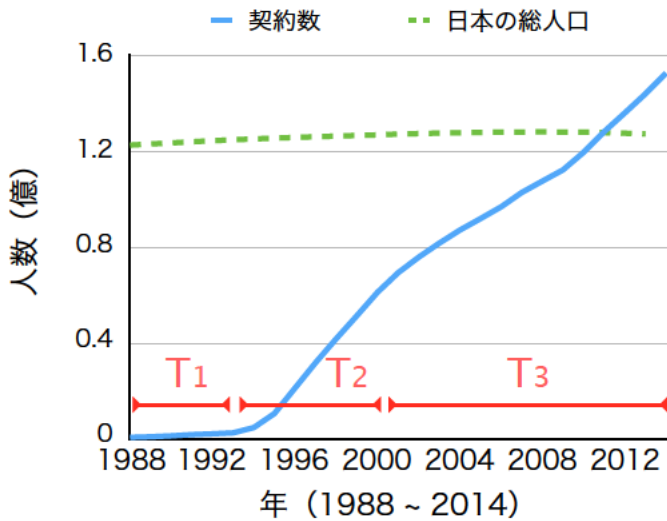
※1 … 「携帯電話の契約数」とは、総務省が定める電子通信サービスのうち、移動系通信における携帯電話の契約数のことを指す。

《 各期間の特徴 》

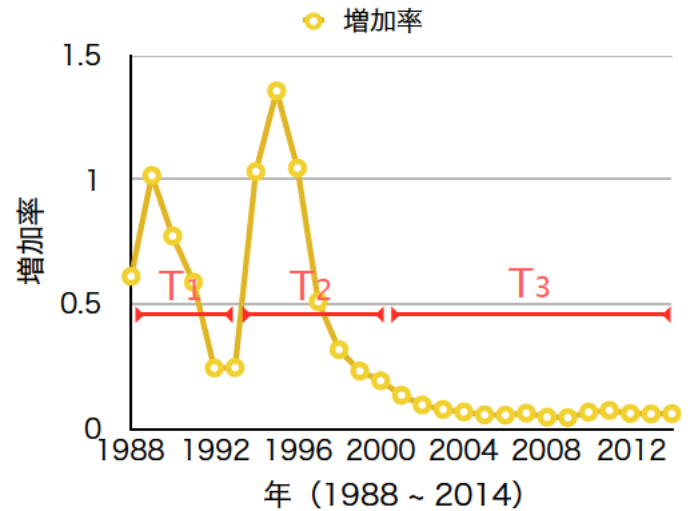
- ◆ **T1期** … 1988年～1993年。黎明期。携帯電話は発売されているが、利用は一般的ではないため、年ごとの増加率は比較的高いが（Fig.2）、契約数の総数は少ない。
- ◆ **T2期** … 1994年～2000年。普及加速期。1994年に携帯電話端末の自由化（売り切り制）が導入されたことにより、市場が自由競争化するとともに、契約数の爆発的な増加が始まった[3]。94年の契約数増加率は1を超えてから、4年間に渡って契約数が指数関数的に増加したことがわかる（Fig.2）。2000年の契約数は6千万台を超えており、この時期には人口の半数近くまで携帯電話が普及していたと予測される。
- ◆ **T3期** … 2000年以降。安定期（成熟期）。携帯電話は一般的なツールとなり、年ごとの増加率も10%未満に安定するようになった。2011年以降は、契約数が日本の総人口を超えているにも関わらず増え続けている。これは、一人複数台の携帯電話を所持している人が増加したことが大きな要因であると考えられる。

9. 研究方法

(Fig.1) 携帯電話の契約数と日本の人口の推移[1][2]



(Fig.2) 携帯電話契約数の増加率の変化



[1] 総務省「電子通信サービスの加入契約数等の状況」より作成

[2] 総務省統計局「日本の統計」第2章1節「人口の推移と将来人口」より作成

2. 現象を数理的に捉える – 微分方程式を用いた人口モデル –

日本における携帯電話の契約数推移の将来予測を、数理モデルを用いて行うことが本研究の目的である。目的達成のために、まずは既にデータが揃っている1988年から2014年までの期間における契約数の推移を表現できそうな数理モデルを探し、実際に数値シミュレーションを行った。

2-1. マルサスの人口モデル

背景でも述べた通り、1988年から2014年までを、T1-T3の3つの期間に区分したとき、T2期において指数関数の増加に似た変化が確認された。この時期の増加率が高い要因は、1つに技術的・制度的要因が考えられる。同時に、この時期は携帯電話における「流行」期であり、流行に乗りたいと考える人々の心理的影響も、増加率が高い要因の1つであったのではないだろうか。

すなわち、携帯端末の買取制度や市場の自由化に伴い、携帯電話がより庶民（とくに労働者）にとって比較的安価に手に入るようになったこと。さらに、携帯電話を持つ人の増加が、一種の流行現象となって、非保有者に新規購入を促す心理的な影響を与えたこと。この2つがT2期における指数関数的増加の要因になったと考えられる。

この現象を端的に言い換えると、「**所有者が増加すればするほど、新たに所有する人が増える**」となる。契約数の増加が、さらなる契約数の増加を促し、結果的に加速度的に増加が進むのである。これは、一般的に**ポジティブフィードバック**[4](Fig.3)と呼ばれる構造によって生じる現象である。

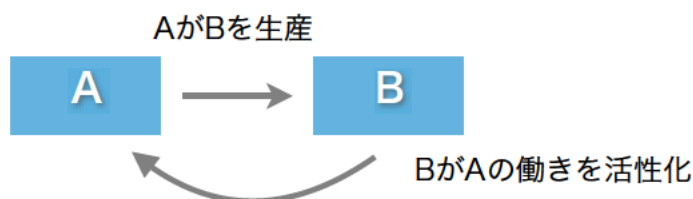


Fig. 3 ポジティブフィードバックの模式図

9. 研究方法

◆ マルサスモデルの微分方程式

これを数学的に表現すると、

「ある時刻 t における契約数 S の変化量（増加量）が、その時刻の契約数 S に比例する」

となり、比例定数を α と置いて、下のようによくすることができる。

$$\frac{dS(t)}{dt} = \alpha S(t)$$

契約数の初期値を $S(0)$ とし、定数分離法を用いて方程式を解く [5] と

$$S(t) = S(0) \cdot e^{\alpha t}$$

この微分方程式は、マルサス（Thomas Robert Malthus）が『人口論』で述べたモデルと同様のものである。 $\alpha > 0$ のとき、 $S(t)$ は指数関数のグラフを描くことが知られている。

自然対数をとると

$$\alpha = \frac{1}{t} \cdot \log_e \frac{S(t)}{S(0)}$$

(Table 1) α の決定

t	α	
1	0.7010	
2	0.6369	
3	0.5787	
4	0.4883	平均
5	0.4344	0.5679

より、 $S(t)$ に具体的な数値を代入すると α が求められる。T1期（1988年～1993年）までの増加の勢いが、T2期の増加の勢いを決定すると考え、1988年を $t = 0$ とし、 $t = 1 \sim 5$ （1989年～1993年）の各年における α を計算し、平均したものをシミュレーションで用いた（Table 1）。

◆ シミュレーション結果

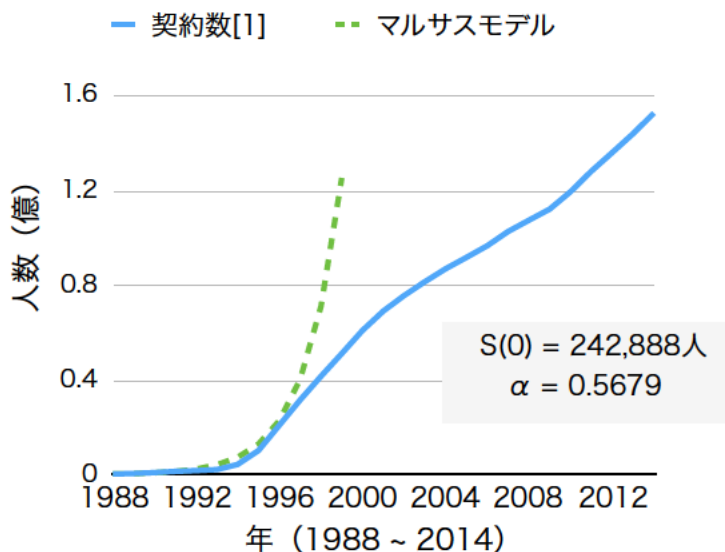
Fig.5とTable 2にシミュレーション結果のうち、1988年～1999年の抜粋を示した。Fig.5からも明らかだが、1997年以降に実際のデータとの誤差が顕著になる。1996年では約200万台だった誤差が、1997年には1000万台近くになり、1998年には3000万台、1999年には7000万台と、時間が経つごとに誤差は大きくなった。誤差の割合を調べると（Table 2）、Fig.5と同様に1998年、1999年の誤差が大きい。また、1993年と1994年も、実際の値の誤差は200万台程度と比較的小さいが、誤差の割合は大きかった。

(Table 2) マルサスモデルとの比較

年	契約数[1] (百万)	マルサスモデル (百万)	誤差※
1988	0.2	0.24	1.20
1989	0.49	0.43	0.88
1990	0.87	0.76	0.87
1991	1.4	1.3	0.93
1992	1.7	2.4	1.41
1993	2.1	4.2	2.00
1994	4.3	7.3	1.70
1995	10.2	13.0	1.27
1996	20.9	22.8	1.09
1997	31.5	40.2	1.28
1998	41.5	71.0	1.71
1999	51.1	125.3	2.45

※ 誤差 = (マルサスモデル) ÷ (実際の契約数)

(Fig.5) マルサスモデルとの比較



9. 研究方法

◆ 考察

今回の結果は、指数関数的増加が永久には続かないことを端的に示していた。Fig.2 より、1998年を境に、年毎の増加率が0.5を下回っていることから、1998年以降、携帯電話の流行は落ち着いてきたと推察することができた。

また、1993年と1994年の誤差については (Table 2 赤字)、この時点ではそもそも契約数の母体数が少ないので、許容できる範囲であると考えた。しかし、永久に増加し続けてしまうマルサスモデルでは、携帯電話普及の将来予測を行うことができない。マルサスモデルによる比較は、時間の経過とともに生じる流行の減衰を考慮した数理モデルの必要性を示唆していた。

2-2. ロジスティックモデル

マルサスモデルでは t が変化しても増加率は一定のため、指数関数的増加を続ける。しかし現実には、契約数がある一定まで増加すると、増加には抑制が掛かり、増加率は変化する。その最大の要因は、日本の人口には限りがあることである。携帯電話の所有者数が多くなることで飽和状態に近づき、新たに所有する人の母体数は減っていき、それによって増加率も減衰していくはずである。

そこで、ヴェアフルスト (P. F. Verhulst, 1837年) が提唱した、環境収容力を考慮する人口モデルを参考にし、それを応用したモデルを用いてシミュレーションを行った。

◆ ロジスティックモデルの微分方程式

ヴェアフルストは、ある地域における人口の増減において、その地域が収容できる人口限界値 (環境収容力) を考慮した人口モデル (以下: ロジスティックモデル) を考案した[6]。環境収容力には、例えば、土地の有限性や、食料生産の限界が考えられる。

ロジスティックモデルによる人口増加は、以下のように説明できる。初期段階では、環境に余裕があるため人口は指数関数的に増加する。しかし、人口が環境収容数の限界に近づくにつれ、人口増加を抑制する働きが生じ、やがて増減は無くなり、環境収容数の最大値で人口は収束する。

ここから、本研究では(1) 初期段階における指数関数的増と、(2) 後期には増加が抑制される、という2つの特徴に注目し、ロジスティックモデルを用いて携帯電話の契約数の推移をシミュレーションすることを試みた。よって、契約可能数の最大値を S_{∞} (Sインフィニティ) と置いて、変化量が、契約数 $S(t)$ と 残りの契約可能数に対する割合 $1 - S(t)/S_{\infty}$ に比例すると仮説を立てると

$$\frac{dS(t)}{dt} = \alpha S(t) \left(1 - \frac{S(t)}{S_{\infty}} \right)$$

と書くことができる。これは、本来のロジスティックモデルにおける「人口」を「契約数 $S(t)$ 」、「環境収容力」を「契約可能数の最大値 S_{∞} 」に置き換えたもので、式としての違いはない。ロジスティックモデルも、マルサスモデルと同様に、定数分離法を用いることで解くことができ[7]、一般解は下のようになる。

$$S(t) = \frac{S_{\infty}}{1 + [(S_{\infty}/S(0)) - 1] \cdot e^{-\alpha t}}$$

ここで、 S_{∞} について考える。

1人1台まで携帯電話を所有することができると仮定すると、 S_{∞} は日本の総人口 (約1億2,000万人) と等しくなると考えられる。しかし、2014年の内閣府による調査[8]によれば、小学生の携帯電話所持率は4割程度であり、小学生以下の児童の所持率は更に低いと考えられるので、現在約1,600万人いる年少人口 (0~14歳) のうち約1,000万人は携帯を所有する可能性がないと考えた。

9. 研究方法

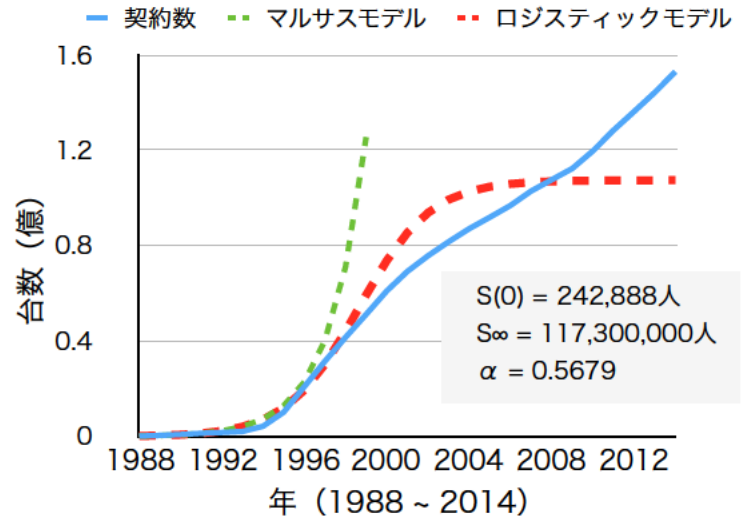
◆ シミュレーション結果 (Fig.6)

実際のデータよりも早い時期に収束が始まり、 S_{∞} に収束してしまった。

◆ 考察

一人一台しか所持しないという仮定が、シミュレーションの誤差に大きく影響していることは明らかであった。やはり、複数台所持することを考慮したモデルが必要である。

(Fig.6) ロジスティックモデルとの比較



3. より正確なモデル – 複数台所持を考慮した人口移動モデル –

ロジスティックモデルでのシミュレーション結果で、2000年以降に大きな誤差が生まれたのは、一人当たりの携帯電話所持数を1台までと仮定していたことが大きな要因だった。そこで、携帯電話を複数台所持する人の存在を考慮した人口移動モデルを考えた (Fig.7)。

$$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \dots$$

(Fig.7) 複数台所持の人口移動モデル

ここで、 S_n ($0 \leq n$) は携帯電話を n 台所持している人口を表す。0台目から1台目への移動における特徴、1台目から2台目への特徴、そして3台目以降について以下のように考えた。

ロジスティックモデルでのシミュレーション結果で、2000年以降に大きな誤差が生まれたのは、一人当たりの携帯電話所持数を1台までと仮定していたことが大きな要因だった。そこで、携帯電話を複数台所持する人の存在を考慮した人口移動モデルを考えた (Fig.7)。

ここで、 S_n ($0 \leq n$) は携帯電話を n 台所持している人口を表す。0台目から1台目への移動における特徴、1台目から2台目への特徴、そして3台目以降について以下のように考えた。

- ◆ $S_0 \rightarrow S_1 \dots$ 普及の初期～中期段階 (1988年から2000年 = T1期とT2期) には、携帯電話を所持する人の数が増えることで、携帯電話が一種の流行となり、非所持者を促す効果があると考えられる。すなわち、ポジティブフィードバックの効果が強いと考えられる。

一方、2000年以降では、1台以上所持している人が人口の大半を占めるようになり、流行による影響も小さくなる。同時に、新規で所持する人は所持者の総数に比べると少なく、変化量は抑制されると考えられる。また、1台目の所持者数は、総人口を最大値として捉えることができるので、非所持者の数が「 $S_0 \rightarrow S_1$ 」の変化量に影響すると考えられる。すなわち、台数ごとに人口移動を考えたことで、前節のロジスティックモデルにおける「環境収容力」を適切な方法でモデルに組み込むことができた。

9. 研究方法

- ◆ $S_1 \rightarrow S_2$ … 既に携帯電話を1台所持している人が、2台目を所持するようになるきっかけとして、会社などから支給される、法人向けの携帯が考えられる。業務用の携帯電話は、一部の人が必要に応じて所持するものであるため、2台目所持者の増加を、流行といった心理的な影響を用いて説明することは不適切である。むしろ、1台所持している人のうち、一定数が2台目を所持するようになると思えるほうが自然である。
- ◆ S_3 以降 … 現在においても3台以上を所持している人はごく少数であり、5年先程度の将来を考えても、この状況に大きな差はないと考えられる。電話という特徴、技術が発達し、より小型化されたとしても、公/私以外の使い分けで複数台所持することはないだろう。

さて、ここで少し視点を変え、次項からは「携帯電話の流行」と「感染症の流行」の類似性について考えてみたい。

◆ 感染症の拡大予測モデル

感染症の拡大を数学的に表現した古典的な数理モデルに、SIRモデルがある。SIRモデルは、伝染病の流行過程を記述するモデル方程式で、KermackとMcKendrickの二人によって20世紀に考案された[9]。SIRはそれぞれS (Susceptible: 感染可能者)、I (Infected: 感染者)、R (Recovered: 免疫保持者)の頭文字にちなむ。このモデルは、感染症の流行をS、I、Rの各段階に区分して、人口移動モデル的に感染症を捉えている(Fig.8)。また、SIRモデルは感染率、及び回復率を用いて、以下のように微分方程式化されている。ここに、感染症の流行過程と、携帯電話普及の流行過程における類似性が現れている。



(Fig. 8) SIRモデル

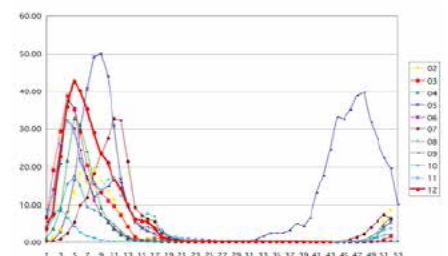
$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -\alpha S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \alpha S(t)I(t) - \beta I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \beta I(t) \end{aligned}$$

SIRモデルにおける、SからIへの人口移動と、IからRへの人口移動は、以下のように説明ができる。

- ◆ $S \rightarrow I$ … 感染症は、感染者が増加することによって流行の勢いも増加する。インフルエンザなどが良い例で、感染者がある一定にまで増加すると、その時点を境に指数関数的に感染が広がることがわかる(Fig.9)。やがて、感染者が一定の値まで増加すると、感染可能者数が減ったことと、回復者が増えることで感染の流行に抑制の動きが生じ、感染者は急激に減少する。すなわち、感染症の流行拡大期にはポジティブフィードバックの効果が顕著に見られることと、流行縮小期には抑制効果があることが言える。数式としては、 $\alpha \times S(t) \times I(t)$ がこれを表現している。初期段階においては、I(t)が増加することによって、変化量が大きくなる。やがて、S(t)の減少と、回復者増加によるI(t)の減少による影響が大きくなり、変化量は小さくなる。

ここで、携帯電話普及における「 $S_0 \rightarrow S_1$ 」と同様のプロセスによって流行が進んでいることに注目したい。

- ◆ $I \rightarrow R$ … 感染者の生存率が高い感染症の場合、ある一定期間が経過すると、多くの感染者は免疫を獲得して回復する。すなわち、一定割合で、感染者が回復者へと移動していると考えられる。数式としては、 $\beta \times I(t)$ の部分がそれを表現しており、一定数のI(t)が常にR(t)に移動している。この移動は、要因こそ異なるものの、一定の割合で人口が移動する、という点においては「 $S_1 \rightarrow S_2$ 」の移動と同様の数学的構造を持っている。



(Fig. 9) インフルエンザ感染者数の推移[10]

9. 研究方法

◆ SIRモデルを携帯電話普及モデルに応用する

前項で述べたように、携帯電話を所持台数ごとに分類した人口移動モデルと、感染症流行の人口移動モデルには、人口移動のプロセスに類似性が見られた。よって、携帯電話の普及モデルを、SIRモデルに則って数式化した。

$$\frac{dS_0(t)}{dt} = -\alpha S_0(t)S_1(t) \quad \dots (1)$$

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = \alpha S_0(t)S_1(t) - \beta S_1(t) \quad \dots (2)$$

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = \beta S_1(t) \quad \dots (3)$$

ただし、S3以降はごく少数であるため、数理モデルではS3以降を切り捨てた。

◆ 一般解を求める

以下、(6)までは、SIRモデルの原著[8]を参考に、(6)以降は『常微分方程式論[11]』を参考にした。

(2)を(1)で割って

$$\frac{dS_1(t)}{dS_0(t)} = \frac{\beta}{\alpha S_0(t)} - 1$$

$$\int \frac{dS_1(t)}{dS_0(t)} dS_0(t) = \int \left(\frac{\beta}{\alpha S_0(t)} - 1 \right) dS_0(t)$$

両辺をS0(t)で積分する。

$$S_1(t) = -S_0(t) + \frac{\beta}{\alpha} \log_e S_0(t) + C \quad (C \text{ は積分定数})$$

ここで、t=0 のとき、S2(0) = 0 と考えられるので、 $S_0(0) + S_1(0) = N$ (Nは総人口)

よって、t=0 のとき $C = N - \frac{\beta}{\alpha} \log_e S_0(t)$

$$\therefore S_1(t) = N - S_0(t) + \frac{\beta}{\alpha} \log_e \left(\frac{S_0(t)}{S_0(0)} \right) \quad \dots (4)$$

また、 $S_2(t) = N - S_0(t) - S_1(t)$ であることから

$$S_2(t) = -\frac{\beta}{\alpha} \log_e \left(\frac{S_0(t)}{S_0(0)} \right)$$

対数を開いて整理して

$$\therefore S_0(t) = S_0(0) e^{-\frac{\alpha S_2(t)}{\beta}} \quad \dots (5)$$

(5) から、 $\frac{dS_2(t)}{dt} = \beta S_1(t) = \beta \{ N - S_0(t) - S_2(t) \} = \beta \left\{ N - S_0(0) e^{-\frac{\alpha S_2(t)}{\beta}} - S_2(t) \right\}$

この式から、S2(t)の正確な値を求めることは不可能だが、 $\left| \frac{-\alpha S_2(t)}{\beta} \right|$ が1よりも小さいとき、マクローリン展開を用いることができる。

《マクローリン展開》

自然対数の底 e の x 乗について、 $x < 1$ のとき、 $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$ と展開できる。

9. 研究方法

いま、 $\left| \frac{-\alpha S_2(t)}{\beta} \right| < 1$ と仮定する。

マクローリン展開したときの3乗以降の項は、影響がない程度まで小さいと考えられるので

$$\begin{aligned} \frac{dS_2(t)}{dt} &= \beta \left\{ N - S_0(0) \left(1 - \frac{\alpha}{\beta} S_2(t) + \frac{\alpha^2}{2\beta^2} S_2(t)^2 \right) - S_2(t) \right\} \\ &= \beta \left\{ -\frac{\alpha^2}{2\beta^2} S_0(0) S_2(t)^2 + \left(\frac{\alpha}{\beta} S_0(0) - 1 \right) S_2(t) + N - S_0(0) \right\} \quad \dots (6) \end{aligned}$$

(6)は $S_2(t)$ についての正規形の微分方程式で、これは2次式であるため、特殊な場合を除いて求積法で一般解を求めることができないことが知られている。しかし、特殊解が得られたとすると、一般解を求めることができる[11]。

(6)を簡略化して

$$y' = Py^2 + Qy + R \quad \dots (7)$$

ただし、

$$\begin{cases} P = -\frac{\alpha^2}{2\beta} S_0(0) \\ Q = (\alpha S_0(0) - \beta) \\ R = \beta(N - S_0(0)) \end{cases}$$

いま、(7)が $y = k$ を特殊解に持つとすると、 $k' = Pk^2 + Qk + R$ となり、 k は定数なので $k' = 0$ あるから、

$$Pk^2 + Qk + R = 0$$

$$\therefore k = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P}$$

ここで、新たな未知変数 z を $z = y - k$ と定めると

$$\begin{aligned} z' &= y' \\ &= Py^2 + Qy + R \\ &= P(z+k)^2 + Q(z+k) + R \\ &= Pz^2 + (2Pk + Q)z + Pk^2 + Qk + R \end{aligned}$$

よって、ここから z に関する新たな方程式 (8) を得る。

$$z' - (2Pk + Q)z = Pz^2 \quad \dots (8)$$

(8)はベルヌーイの微分方程式の1つであり、以下のようにして1階線形微分方程式に帰着できる[11]。

定数 h に対し $g = z^h$ と置くと、 $g' = hz^{h-1} \cdot z'$ となるので、(8)の両辺に hz^{h-1} をかけると

$$hz^{h-1} \cdot z' + h(2Pk + Q)z^h = hPz^{h+1}$$

ここで、 $h = -1$ ととると、(8)は1階線形微分方程式

$$g' - (2Pk + Q)g = -P$$

に帰着するので、定数変化法を用いて、一般解を求められる。

$$\therefore y = z + k = \frac{e^{-\int (2Pk+Q)dt}}{-\int P \cdot e^{-\int (2Pk+Q)dt} + C} + k \quad (C \text{ は積分定数})$$

いま、 $y = S_2(t)$ であり、 $t = 0$ のとき携帯電話を2台所持している人はごく少数であると考えられるので、

$y = S_2(0) = 0$ をもちいて積分定数を定めると、一般解は以下ようになる。

$$S_2(t) = \frac{e^{(2Pk+Q)t}}{1 - e^{(2Pk+Q)t}} - \frac{1}{(2Pk+Q)P - k}$$

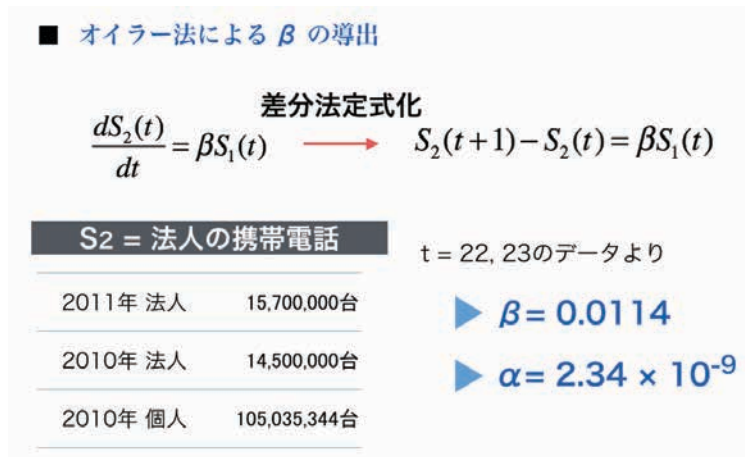
9. 結果

得られた $S_2(t)$ の一般解を用いてシミュレーションを行った。このとき、ロジスティックモデルのときと同様に、携帯電話を所持する可能性がある人口を N と定めた。シミュレーション結果をFig.10に示す。

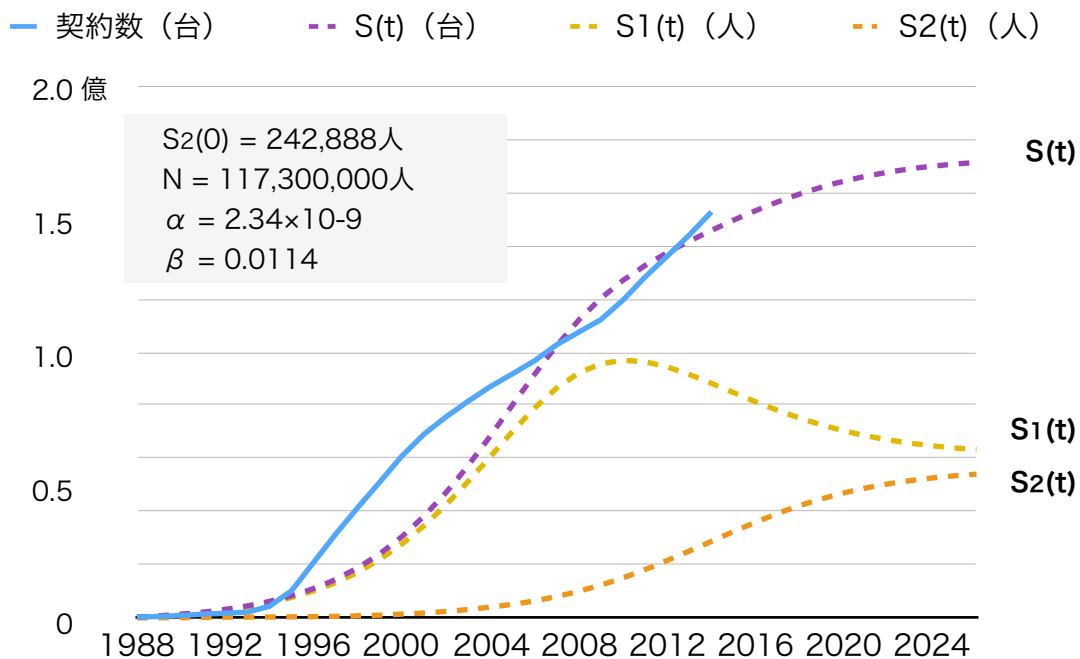
なお、定数は、式(3)をオイラー法を用いて書き換え、 β を求めた。 $S_2(t)$ は職務用に所有する人が多いと考えられるので、法人携帯電話の契約数の調査資料[12]から $t=22, 23$ の値を定め、オイラー法を適用した。

さらに、 $t=22$ のとき、式(5)に β を代入して α を求めた。

また、シミュレーションによる契約数全体の予測値 $S(t) = S_1(t) + S_2(t) \times 2$ である。

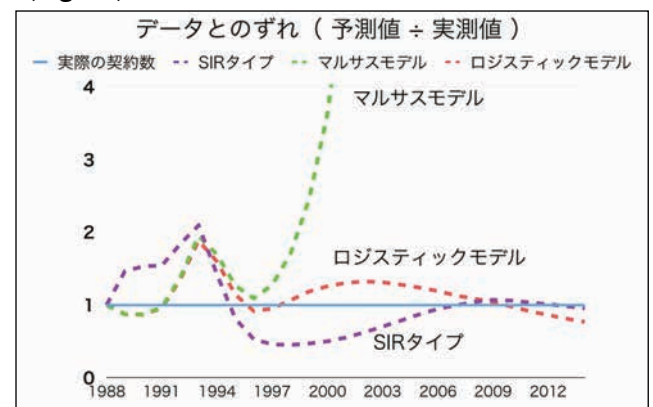


(Fig.10) SIRモデルを応用した人口移動モデルによるシミュレーション



シミュレーションによると、携帯電話の契約数は、2016年頃以降から収束方向への傾きが強まり、最終的に約1億7千万台に収束した。しかし、1990年代~2000年代にかけては、実データから大きく外れている。予測値を実データで割った、データとのずれを調べると (Fig.11)、SIRタイプの結果は、ロジスティックモデルと比較すると、むしろ予測精度が落ちている。

(Fig.11)



◆ モデルの修正「初期値ずらし」

そこで、改めて実データの増加率に着目したところ、原因は、1988年～1995年までの増加率のばらつきにあるのではないかと考えられた。この期間は契約数の母数も少なく、増加率も安定していない。

このことから、扱うデータの範囲を修正し、増加率が安定する1995年以降（T₂期以降）に限定して、再度シミュレーションを行った（Fig.13）。なお、パラメータ α 、 β の決定方法は前回と同様にした。

また、1995年以降のデータのみを見ると、直線的な近似を用いた予測も可能ではないかと考えられたため、参考として、最小二乗法によって導出した線形近似も加えた。

(Fig.12) 初期値ずらし

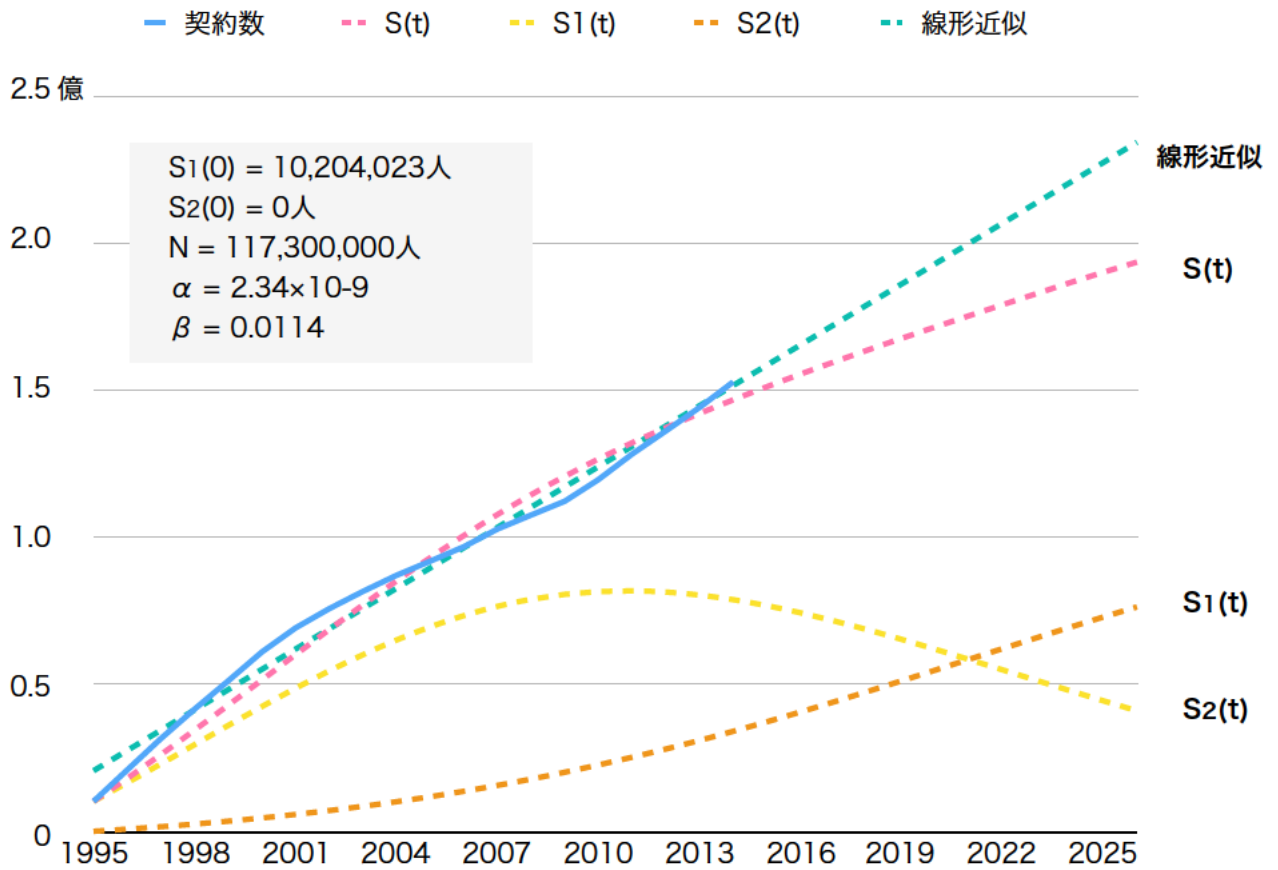


Fig.13

◆ 「初期値ずらし」の結果は、2025年に1億9000万台

初期値を1995年に設定してシミュレーションを行った結果、全体を通して、前回よりも実データにフィットした結果を得られた。このシミュレーションによれば、2025年には約1億9000万台の携帯電話が契約されているという予測が出た。さらに、その後の契約数はゆるやかに増加していき、2040年頃には、現日本人口の2倍である、2億3000万台が契約されている予測となった。

この結果は、通常のSIRモデルの結果とも一致する。すなわち、「全員が1度は感染するが、やがて全員回復する」という感染症が発生した場合、十分に時間が経過すると、全員がSIRでの「R」に移行するが、それと同様に、全人口がS₂に移行した、ということになる。

9. 考察及び結論

数値シミュレーションを行った結果、この人口移動モデルを導入することによって、

(1) 普及の流行期における、契約数の指数関数的増加

(2) 契約数が日本の人口を上まわった後も増加を続ける

という2つの特徴を同時に表現することができた。

しかし、Fig.13での結果「やがては日本国民全員が携帯電話を2台持つ」は、妥当とは考えにくい。また、日本人口は（移民を増やさない限り）に減少に転じる予測も出ており[13]、2040年までには1000万人以上の差が生まれるため、この影響を無視することはできない（Fig.14）。

さらに、近年発達が著しい情報端末が、今後何十年も同様の形態を保つことも考えにくい。おそらく、スマートフォンの登場によって携帯電話の概念が変わってしまったように、今後数年で、携帯電話の概念と形態は大きく変化すると考えられる。その際、このSIRを応用したモデルが、そのまま当てはまることはないだろう。

よって、本モデルによって有効な予測は、短期間、最大でも2020年頃までであるとするのが、もっとも妥当であると考えられる。

今後の研究では、このモデルを、他国、特に今後急速に携帯電話が普及していくであろう発展途上国の携帯電話市場の予測に応用した。また、携帯電話の製造量や、機種買い替えによって生じる廃棄物の量などから、携帯電話市場が地球環境に与える影響を分析したい。これにより、携帯電話の契約数の収束を考慮した場合と、増加すると考えて携帯電話を製造し続けた場合での、自然環境へのリスク評価を行うことができ、それを軽減させるための対策を検討することができると思われる。

9. 謝辞

本研究を進めるにあたり、数学的・経済的な視点からさまざまな指摘を頂いた、指導教官の林先生に感謝いたします。また、SIRモデルの研究をしている長島氏と高橋先輩からは多くのインスピレーションを受けました。ありがとうございました。

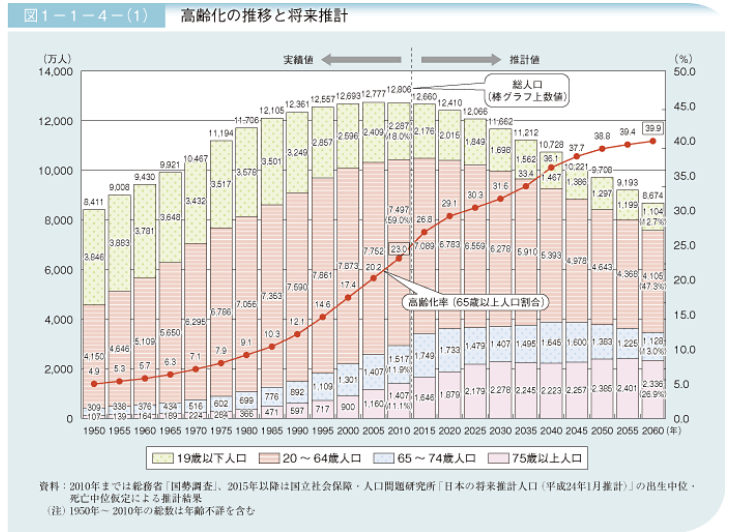


Fig.14 日本人口の将来予測[13]

9. 参考文献

- [1] 総務省『電子通信サービスの加入契約数等の状況』<http://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/tool/tokeisiryo/idoutai_nenbetu.html> 10/5閲覧
- [2] 総務省統計『日本の統計』第2章1節「人口の推移と将来人口」<<http://www.stat.go.jp/data/nihon/02.htm>> 10/5閲覧
- [3] 森島 光紀『移動通信端末・携帯電話技術発展の系統化調査』国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第6集（平成18(2006)年3月31日）
- [4] 中岡 慎治『ポジティブフィードバックをもつ生物系モデルの解析』数理解析研究所講究録 第1637巻（2009年176-188）
- [5][7] デヴィット・バージェス/モラグ・ポリ（著）、垣田 高夫（訳）『微分方程式で数学モデルを作ろう』第1章 序論、日本評論社 1990年 p 7-9
- [6] P. F. Verhulst (1838), Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. Correspondance Mathématique et Physique Publiée par A. Qu´etelet 10: 113-121.
- [8] 内閣府 政府統計『平成26年度 青少年のインターネット利用環境実態調査』<http://www8.cao.go.jp/youth/youth-harm/chousa/h26/net-jittai/pdf/kekka_g1.pdf> 10/5閲覧
- [9] W. O. Kermack and A. G. McKendrick, "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics," Proc. Roy. Soc. of London. Series A, Vol. 115, No. 772 (Aug. 1, 1927), pp. 700-721
- [10] 国立感染症研究所『インフルエンザ感染者数の推移』 定点当たりの報告数・週報：2002-2012
- [11] 柳田英二・栄伸一郎 著『常微分方程式論』2. 初頭解法 朝倉書店（2002年01月20日）
- [12] 株式会社シード・プランニング プレスリリース『携帯電話、法人市場の成長予測』（2012/09/26）<<https://www.seedplanning.co.jp/press/2012/2012092601.html>> 10/5閲覧
- [13] 内閣府『平成24年版 高齢社会白書（完全版）』（2）将来推計人口でみる50年後の日本 <http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2012/zenbun/s1_1_1_02.html>