

(12) 地球環境と人口変化の係わりに関する二、三の検討

Some analyses on Global Environment and Population Change

松 岡 譲[†]・森 田 恒 幸^{††}

Yuzuru MATSUOKA[†], Tsuneyuki MORITA^{††}

Abstract - World population growth is charged with the most fundamental driving force of global environmental deterioration. Usually, demographic factors are considered as externals of environmental systems, and treated as given conditions. Their impacts and sensitivity on environment as well as the mechanism of demographic evolution may closely linked with environmental change, however, quantitative study on the relation and their separability has been seldom conducted. In our study, a cohort-component model was developed in order to connect and interfacing the global demographic and environmental trends. Coupling with the model with comprehensive global environmental model which we have developed already, the implication of global population growth and its spatial distribution were quantitatively analyzed.

Keywords: Global Environment, Global Population Change, Internal Migration

1. 論文のあらまし

この論文は、地球環境の見通しを行う際に重要となる人口の将来推計とその将来環境に及ぼす影響を数理モデルをベースとして検討したものである。検討は大きく二つの部分からなる。その第一は、世界人口の変化と二酸化炭素排出量増加の関連に関するものである。第二は、一国内での人口流動と環境との係わりを解析するものである。これらの主題を検討する道具として、人口推計モデルを準備し、排出モデルと組み合わせることによって、環境への汚染負荷の長期的な見通しを算定した。そうしたプロセスを通じ、前者については、二酸化炭素排出量の将来見通しとして、「現状推移シナリオ」(IPCC, 1992)を達成するのでさえ、かなりの人口抑制努力を前提としなければならないこと、また、世界人口増加の抑制のみでは、二酸化炭素排出量の安定・削減を期待することは出来ないことなどを示している。また、後者については、中国の二酸化硫黄排出量地域分布を取り上げ、現状の人口都市化傾向は、来世紀中ごろには、人口移動が無いときに比べ二倍程度の暴露濃度をもたらすであろうことを推測している。

このように、人口の増加あるいはその国土内の分布は、環境を変化させる大きな原因力の一つである。しかし、環境分野においてはこれを所与のものとするのが通常であって、いくつかの発見的なアプローチを除き、これを取り込んだ取り扱いを行って来なかった。その態度は、この論文においても同じであり、ここではマクロ的な観点から所与としての人口学的な条件設定が将来環境をどのように左右するかを、モデルを使った感度解析的な手法により検討するにとどめている。しかし、既往のモデルメカニズムを模写していると言う意味において、通俗的、保守的ではあるが手堅い人口サブモデルを環境予測モデルの一部として包含し、

人口要因と環境の関連を探ることは、より広い視野に立った将来環境の見通しを得る上で、大変有用なことであると考えている。

2. 人口推計モデル

2.1. モデルの概容

本研究で作成・使用したモデルは、コーホート要因法に基づくものである。この方法は、国連人口部、世界銀行などの国際機関あるいは多くの諸国で採用しているものであり、人口推計法としてはもっとも代表的なものである。この方法では、平均寿命変化、出生力変化、人口移動の各シナリオを外生変数として与えることによって、計算開始年の年齢別人口分布、モデル生命表、出生率年齢パターンモデル表、出生性比から、任意年後の年齢別人口分布を算定する。作成したモデルでは、推計の時間ステップを5年とし、これに従って、取り扱う年齢分布も5歳毎に0~4歳、5~9歳、...、75~79歳、80歳以上と17段階に分けている。モデル生命表としては、Coale・Demeny(1966)によるeast, north, west, southモデル表、国連人口部によるUN general, Latin American, Chilean, South Asian, Far Easternモデル表を準備している。出生率年齢パターンモデル表としては、国連人口部(U.N., 1992)が取りまとめている各国別のパターン表及び世界銀行1990年推計に使用した合計特殊出生率(TFR)別の3つのパターン表(Bulataoら, 1990)を準備した。また、人口流入の年齢パターンとしては外生的に与える方法以外に、計算期間の始めと終わりの性・年齢分布の平均とするもの及びRogersモデル(Rogers, 1984)のオプションを準備した。

[†] 京都大学工学部衛生工学教室、^{††} 国立環境研究所地球環境研究グループ

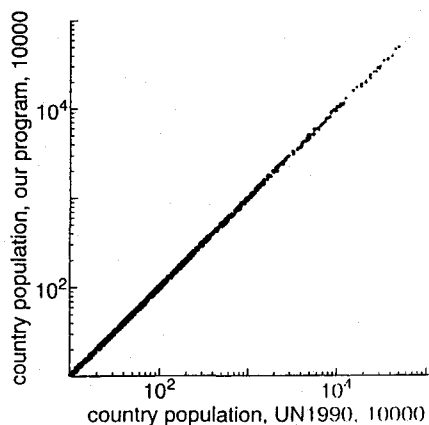


図1 本モデル推計値と国連人口推計値の比較,
国・地域人口, 1955~1985

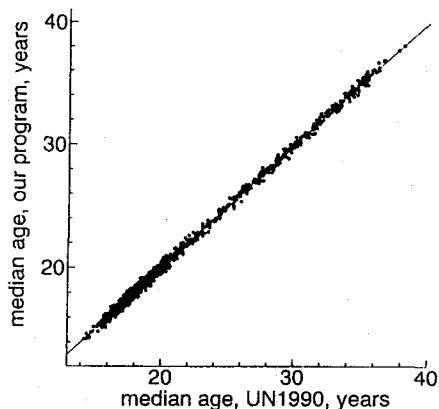


図2 本モデル推計値と国連人口推計値の比較,
国・地域平均年齢, 1955~1985

2.2. 各国人口の推計

本モデルは、必ずしも国レベルあるいは世界レベルの人口推計を目したのではなく、むしろ、第4節に示すような地域間での人口流動の環境への影響算定などに効力を発揮すべく構築したものであるが、世界各国人口の推計にも適用できることは言うまでもない。国単位の人口学的諸パラメーターに関しては、国連人口部が精力的に整備しており、その入手も容易である。そこで、開発モデル・プログラムの整合性チェックなどを兼ね、世界各国人口の推計計算を行ってみた。但し、実装したプログラムは、将来推計のみを行うようになっているため、国連人口統計の開始年である1950年での各国別の性・年齢別人口分布を初期値として前

進計算によって算定した。図1は、1955～1985年間の5年毎の世界182国・地域の人口について、本モデル算定値及び国連により推計されている人口値(U.N., 1990)を比較したものである。図中の実線は、回帰直線である。また、両者の統計的適合性を示す数値は、自然対数変換後にて、傾き 0.9993, 切辺 0.00268, 相関係数 0.9998, 標準誤差 0.00435であった。また、図2は平均年齢を比較したものである。この場合での適合性数値は、傾き 0.9983, 切辺 0.0485, 相関係数 0.9991, 標準誤差 0.2471であった。この計算においては、平均寿命、総再生産率、出生性比、純移動率について、各地域、各期間の報告・推定値(U.N., 1990)を使用しており、本計算値の恣意性としては、出生分布

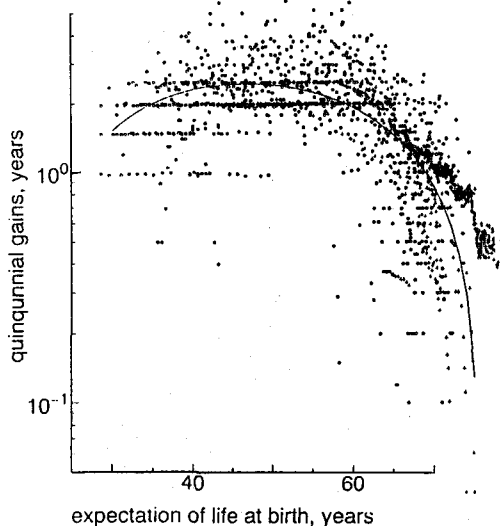


図3 平均寿命と寿命の伸び, 男性, 国・地域平均

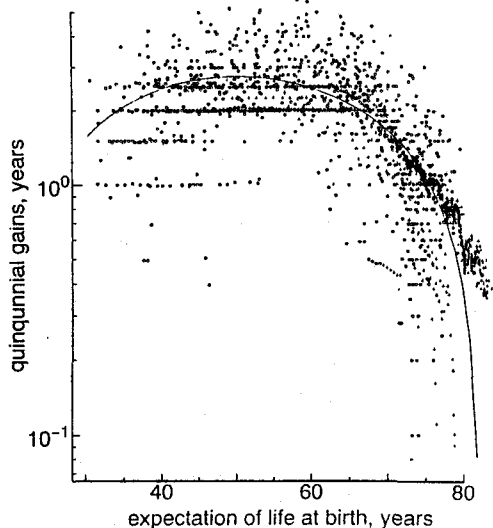


図4 平均寿命と寿命の伸び, 女性, 国・地域平均

モデルパターン、生命表パターンあるいは流出入年齢分布の採択に起因するものが考えられる。総人口値、平均年齢以外の人口統計的指標に関しても、同様の検討を繰り返した。それらの結果、本モデル・プログラムにより、各人口指標間の整合ある算定・推計が行われているものと判断し、以後の解析に使用するものとした。

3. 世界人口の将来推計とその地球環境へのかかわり

さて、将来人口の推計を行うにあたって、最も重要となる点は、死亡率、出生力、及び人口移動の見通しである。死亡率に関しては、その低下と平均寿命の伸長が、世界のどの国家、文化においても善とされており、従って、問題となるのは、その目標をどの程度到達できるかである。生活水準の上昇、医療技術の発展は具体的な手段であるが、その効果がどの程度見込めるかは不明な点が多い。こうした状況下にてしばしば用いられている方法は、次のようなものである。すなわち、既に高平均寿命となっている国・地域においては、今後それほど大きな寿命改善は見込まれず、低平均寿命の国・地域では大幅な改良が見込まれると想定する。実際、世界各国・地域にて 1950年から1985年の間の5年毎の7期間における期間当初の平均寿命と期間内の寿命の伸びをプロットしてみると、図3、4の○印のようになる。バラツキはあるものの上に述べたような傾向が観測される。国際連合あるいは世界銀行による人口予測においてもこうした作業仮説が使用されている。例えば⁺は、国連人口推計作業（U.N., 1990）が使用した2025年までの平均寿命伸長であり、実線は、世界銀行人口推計作業（Bulataoら、1990）が使用した関係式に基づいて導出したものである。これらのことから、平均寿命の変化に関しては、ひとまず、図3、4にその傾向が示されるような仮説を用いてよいと考えられる。

一方、出生力に関しては、大変、膨大な研究があるにも係わらず、確信ある見通しを得ることは困難な状況である。社会、経済的指標から統計的手法により回帰関係を想定し、それに基づいた出生力推定を行う試みは、何回も行われているが、批判も多い。世界規模の人口予測において、例えば国連人口推計作業あるいは世界銀行人口推計作業では、現状の出生力が、人口置き換え水準（世代間の人口の更新がちょうど可能となる状態）以上あるいは以下であるかによって国、地域を2分する。置き換え水準以上の場合には、ある将来の時点にて置き換え水準まで低下し、以後は安定すると考える。置き換え水準に到達する時期は専門家の総合的判断による。これを、家族計画実施状況、女子平均寿命、現状での出生率変化率などから回帰計算による推定の試みもなされているが、説明変数選択の

恣意性とか説明力が低いことなどの欠点が指摘されている（Demeny, 1985）。置き換え水準以下の国・地域については、各国の専門家が各国の特質を考慮してケースバイケースに推定する。超長期的には、置き換え水準にまで回復する場合を中位推定と想定するのが通常である。また、最近の世界銀行の推計方法（Bos and Bulatao, 1990）のように、人口転換段階に応じた出生力変化ルールをヒューリスティックな方法で作成し、それを適用せんと試みるものもあるが、いずれの方法においても、確信ある見通しを得ることが出来ないのが現状である。死亡率の低下が普遍的な善と見なされているのに比べ、出生率の社会的、倫理的意義は民族、国家などによって大きくばらつく。所得の増大、教育の普及などの社会経済の成熟と、各国、地域でさまざまな方向に向けて実施されている人口政策が絡み合い、複雑な状況を示しているのである。しかし、出生力変化の状況によって将来人口は大きく変化し、それにより、地球環境の将来見通しはきわめて大きく左右されるであろう。

本モデルにおいては、出生力を示す指標として、一人の女子が一生の間に生むと期待される子供数である合計特殊出生率（TFR）を、入力パラメータとしている。1950年～1985年間の世界各国・地域のTFR値（U.N., 1990）を縦軸に、横軸に一人あたり国民総生産高（世界銀行推計値）を取ってプロットしてみると、図5を得る。図中の○は、厚生省人口問題研究所推計によるわが国のTFR値の軌跡を1925年から1990年にわたり描いたものである。従来から繰り返し報告されている所得の増大に伴う出生力の低下傾向が見受けられる。いま、この図に示される社会・経済的活動レベルと出生力の依存性を次式によって表現してみる。

$$\Delta TFR = -\alpha \Delta \ln \left[\frac{GNP}{\text{capita}} \right] \quad (1)$$

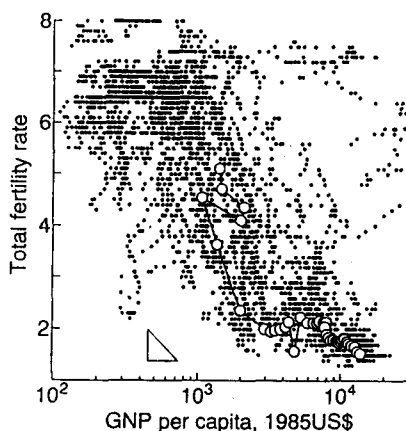


図5 TFRと一人あたり国民総生産高

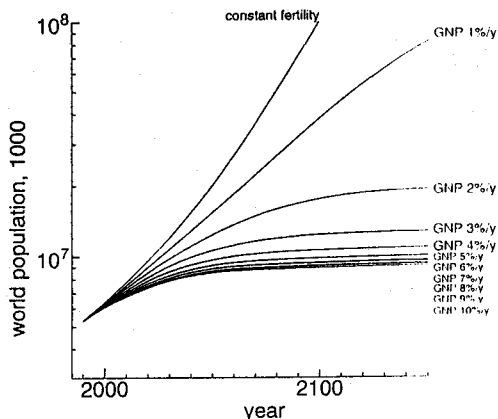


図6 一人あたり国民総生産高の伸びと世界人口の変化

ここに Δ はある一定期間内の変化量、 α は図5に示される傾きを示すパラメータであり、図左下の三角で示す傾きの場合、1.3程度である。そこで、将来においても、出生力に関するこの傾向が持続され、さらに、図3、4に示される平均寿命改善効果が継続されると想定すれば、経済成長率を独立変数とした将来人口の動向を算定することができる。図6がその結果である。これは、1985年を計算開始年とし、世界182国・地域におけるTFRについて、置き換え水準以上の場合には、式(1)に従って変化し、置き換え水準以下の場合には、2040年に置き換え水準にまで復元し、以後、そのレベルを維持すると想定したものである。経済成長率は各国、地域によらず一定とし、一人あたりのGNP成長率を0~10%/年の範囲で変化させている。また、置き換え水準となるTFR値の算定には、以下の近似式(Bos and Bulatao, 1990)を使用した。

$$TFR_{NRR-1} = 6.702 - 0.1107e_f + 0.006592e_f^2 \quad (2)$$

ここに e_f は女子平均寿命である。また、簡単のために国際間人口流動は0としている。対象とした182国・地域の総人口は、1985年にて48.52億人であり、そのときの世界総人口は国連データ(U.N., 1990)では48.54億人であったから、ほぼ世界全地域をカバーすると考えてよい。大変広い範囲にわたる結果が得られている。このうち、constantとは、経済成長率0%/yに相当し、置き換え水準以上の地域の出生力を1985年時点で固定し平均寿命のみを漸増させるシナリオである。10%/yのときは1年あたり0.13のTFR減少があり、これはほぼ人口転換期にしばしば観測される値である(Bos and Bulatao, 1990)。もっとも激しい伸びを示すconstantケースでは、2000年に64億人、2100年にて1026億人、2150年には7142億人となる驚くべき増加を示す。これは、例えば1980~1990年に観測されている世界年平均人口増加率である1.74%/yが2150年まで続くと

して得られる値である821.8億人に比べ1桁高く、人口爆発の重要性を改めて喚起すると共に、この問題を世界平均値で取り扱ってはならないことを教えてくれる。10%/yケースでは2000年に60億人、2100年に87億人それ以降では2150年に89億人とほぼ定常人口に落ちつく。このケースでは、現在、もっとも出生力が高いアフリカ地域においても、今後50年の間に過半の国が置き換え水準に達することになり、それ以降の人口増の主原因は、漸变的な年齢分布及び死亡率変化となっている。中間の経済成長率にあつては、0~3%/y程度までは人口増加と高い依存性を示すが、それ以上の成長率での感度は低い。

次にこの結果を従来から公表されている人口推計値と比較してみる。簡単のために世界人口のみを検討しよう。図7は最近の国連人口部(U.N., 1992)及び世界銀行(Bulataoら, 1990)による推計値と比較したものである。点線が本モデルの計算結果である。TFRを現状で固定した場合に、22世紀半ばにて1兆人近くとなる結果は、国連推計にも表れており、国連推計では、2150年にて6942億人となっている。国連推計のうち、high(高位)、medium(中位)、low(低位)とは、TFR値の長期的な漸近値を2.5、置き換え水準値及び1.7としたものであり、2000年にて64.2億人、62.6億人及び60.9億人、2100年にて191.6億人、111.9億人及び60.1億人、2150年に280億人、115.4億人及び43.0億人となるシナリオである。その他、Instant repl.TFRとは各国、地域のTFR値を1990年にて強制的に置き換え水準とするものである。

一方、世界銀行の長期推計は1ケースのみであるが、国連中位推計とほぼ同じ軌跡を示し、2000年にて62.0億人、2100年にて113.3億人、2150年には115.0億人となっている。このように、国連、世界銀行あるい

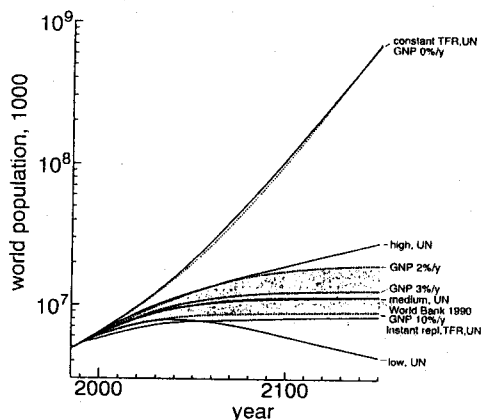


図7 国連、世銀推計による世界人口の変化と本モデル推計値

は本モデルは、細部のモデルあるいはパラメータにおいてかなり異なっているであろうが、世界人口に関してはほぼ同一の挙動結果を示している。国連及び世界銀行の中位推計シナリオは、本節計算に比べると、一人あたりGNPの伸びがほぼ3%/年程度の社会・経済環境の変化に対応する出生力低下を想定している。

それでは、こうした人口変化の地球環境への感度はどの程度か。その初歩的検討として、対象を二酸化炭素に限定し、経済成長と人口増加の相関を式(1)と簡単化してみよう。排出量算定モデルとしては、既報(松岡, 1990)のものを用いることにする。化石燃料起源CO₂のみを取り扱うことにし、人口、GNP以外のシナリオとしては、例えば、IPCCの標準シナリオであるIS92a(IPCC, 1992)に倣ったエネルギー資源、技術条件を設定してみる。但し、細部のパラメータは明かでないから、アグリゲート化した指標及び計算値を公表値と一致するように調整計算をして設定した。すなわち、人口に世界銀行1990年推計値を、GNP変化としてOECD地域にて年率1.7%、世界平均で2.3%とし、エネルギー資源量及びソーラーコストシナリオに関しIS92aと同じ設定値を与えたときに、2050年時点のCO₂排出量が132億tC/y、2100年時点のCO₂排出量が198億tC/yとなるようにエネルギー効率シナリオを設定しておく。そうした調整の後に、図5で見られたような経済成長と出生力低下の関係を用いて、二酸化炭素排出量を算出した。図8は、横軸に一人あたりのGNPの伸びを、縦軸に二酸化炭素排出量を取り、2050年及び2100年の計算値について記したものである。

トーン幅の上側は、式(1)を想定した場合である。下側は、TFRが置き換え水準以上の国、地域について、1年あたり0.13の低下を想定した場合を示す。これによれば、経済成長を0とした場合、2050年には、年74.7億tC及び30億tCの排出、2100年には年311億tC及び26.4億tCの排出となっている。両数値の差は人口変化に起因するものである。図中央の2つの

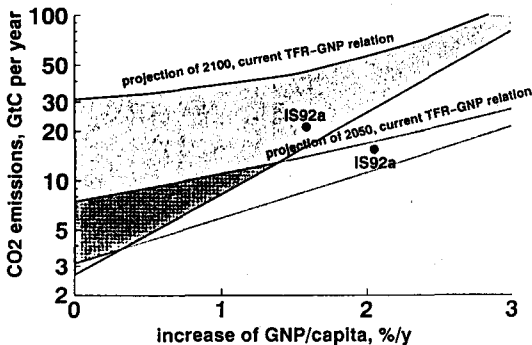


図8 一人あたり国民総生産高の伸びと二酸化炭素排出量

●は、IS92aの2050年及び2100年排出量である。二つある●のうち、上側が2100年排出量であるが、この値は本計算の一人あたり経済成長を0としたときの排出量である年311億tCよりも小さい。IS92aでは、2100年人口を113億人、経済成長率は2.3%/年程度と設定している。従って一人あたりのGNP増加率では、1.7%/年程度の想定である。一方、本計算の人口-経済成長の関係では、一人あたりの経済成長率を0としても、人口増により世界GNPで年率2.5%以上の増加がある。こうしたことが主因となり、IS92aは本節の計算値よりもかなり低い値となっているのであろう。言い替えるならば、来世紀のシナリオとしての世界人口110億人、経済成長率2~3%と言った設定はかなりの人口抑制努力のすえ実現できる値であって、このことは、地球環境の見通しを得るさいにも十分注意しておかなければならない。

TFR低下には、所得の増大、教育の普及、乳幼児の死亡率低下、女性の地位向上等に加え、家族計画の推進と普及が大きく寄与する。これらの効果が、将来の世界人口をどのように左右するかについての予測(Bongaartsら, 1990)によれば、途上国地域の2100年人口は、標準シナリオで100億人、家族計画を行わない場合には146億人、家族計画を強化した場合には78億人となっている。先進国人口は2100年に10~15億人程度であるから、家族計画強化シナリオによって世界人口はかなり低下するにしろ、図8のトーン幅の下側には達しない程度の効果である。二酸化炭素排出量削減のみに限って言えば、問題解決のきめ玉にはならないことになる。

4. 人口の流動と環境との係わり

人口の増加は、環境の見通しを得るうえで基礎的かつ重大な因子であるが、一方、都市化などの国土内での人口集中も、環境の将来見通しに大きく係わる。国内の人口流動、とくに都市への人口集中は、近年、途上国の大きな問題である。1985年時点の都市化率は、世界全域で41%であったが、先進国では72%、途上国にて32%であった。都市化速度(一年あたりの都市化率の変化/都市化率)は、国際間の人口流出入が大きくないときには、都市への純流入率(一年あたりの純流入人口/都市人口)と都市内での自然人口増加率の和から国、地域全体の人口増加率を引いたものであるが、後2者の効果は、通常、相殺しあい本論文で取り扱う程度のマクロ解析では無視しうる(U.N., 1980)。この

作業仮定を用いて、1950年から1985年間の各5年毎の農村から都市への純移動率(一年あたりの純移動人口/国・地域人口)を国連人口統計から算出し、各期間の平均都市化率(U.N., 1991)を横軸にとって世界各国、

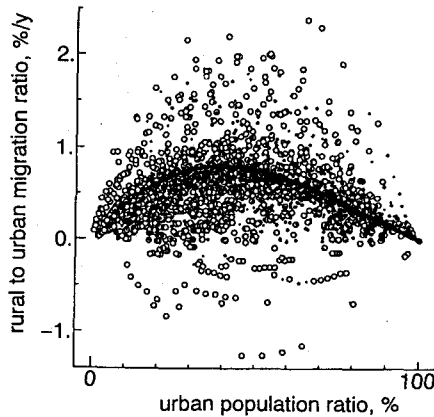


図9 農村から都市への純移動率と都市化率

地域についてプロットしてみると図9の○をえる。パラッキは大きい、都市化率50%程度を頂点とした上に凸の関係が見られる。これは例えば、Ogawa(1985), Pernia(1988)が主張するurbanization cycle hypothesisと一致する。国連が行っている都市化の将来推計でもこの考え方が採用されており、例えば、1990年に行われた将来推計値(U.N.,1991)から、2025年までの純移動率を逆算したものが、図9の小黑丸である。この図にて、特に2020~2025年の期間については上下のパラッキが収斂した1つの曲線を想定しており、これを例えば(0,0)及び(100,0)を通過する三次曲線で近似するならば、 $4.54 U_R \left[1 - U_R \right] \cdot \left[1 - 0.674 U_R \right]$ となる。ここに、 U_R は都市化率(-)である。この式型は、都市と農村の人口増加率の差が、都市化率と線形的な関係を持つと仮定することによっても導出できる。しかし、図9からもわかるように、都市化の速度をこのような簡略的な関係で表現することは問題が多い。特に、都市と農村の人口増加率差が減少傾向にあるとの想定に立つ、上に述べてきたような推計作業は、多くの国で誤りをもたらすことも指摘されている(Findley,1993)。

さて、都市化率は、国土内の総括的な人口集中を示すパラメータであるが、人口の空間的な分布に関しては異なった指標が必要となる。いま、ある一国の人口密度の分布を示す関数として、次のような $f(p)$ を取り上げよう。 p を人口密度、 Δp を p 軸上の微小量としたときに、 $(p, p+\Delta p)$ の間にはいる国土面積の割合が $f(p)\Delta p$ になるような関数 $f(p)$ を考える。つまり、 $f(p)$ は人口密度のちらばりを表す関数である。 $f(p)$ を実際の観測値に基づいて同定するには、人口の空間的な張り付き状況に関する詳細な情報と作業の表章単位に対する依存性を知ることが必要となる。図10, 11はその作業例である。図10は、中国及びアメリカの例である。中国の場合、市、区、県を表章単

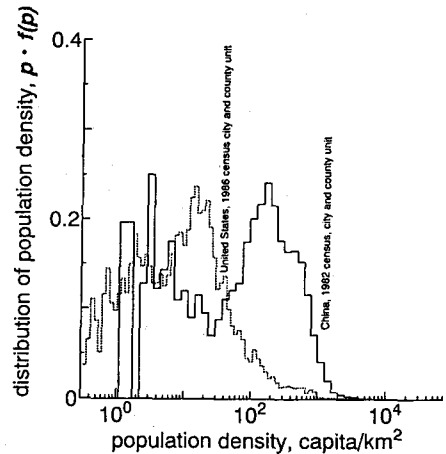


図10 中国、アメリカ合衆国の人口密度分布関数

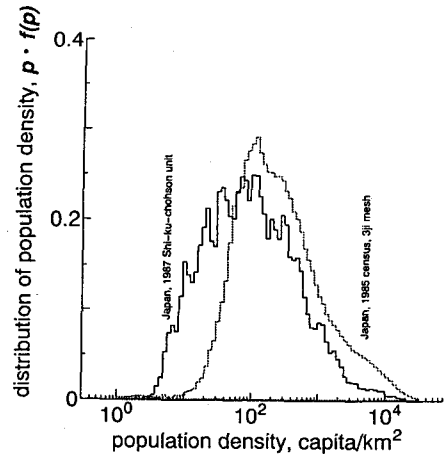


図11 わが国の人口密度分布関数

位とした2374地域、アメリカの場合、市、郡を表章単位とした3139地域のデータから算出した。また、この図では、グラフと p 軸で囲まれる面積が、国土面積の割合と比例するように、縦軸に $p \cdot f(p)$ 、横軸に $\log(p)$ を取っている。図11はわが国の例である。実線は、市区町村を表章単位としたもの、点線は3次メッシュ(ほぼ 1 km^2)を表章単位としたものである。図11から $f(p)$ 算定形の、表章単位への依存性は明かであり、 $f(p)$ を考えるさいの問題点となる。しかし、そうした欠点を前提とした上でも、例えば、中国人口の国土への張り付きには、 $200 \text{ 人}/\text{km}^2$ 及び $3 \text{ 人}/\text{km}^2$ 程度の人口密度帯に2つの山があること、高人口密度帯はわが国のそれと同じ程度の密度帯にあり、アメリカではずっと低くなることなどが推定できる。

さて、 $f(p)$ の時間的な変化は、年齢分布の影響を捨象するならば、次式によって考察することができる。

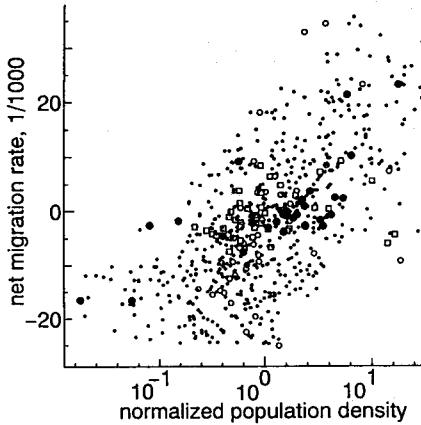


図12 サブリージョンレベルの人口密度と純流入率

$$\frac{\partial f(p)}{\partial t} + \frac{\partial V \cdot f(p)}{\partial p} = 0, \quad V = u_B + u_D + u_M \quad (3)$$

ここで u_B は出生率、 u_D は死亡率、 u_M は純流入率である。 u_M は、国際間流動成分 u_{OM} 及び国内流動成分 u_{IM} の和であるが、国内流動成分のみを考えるならば、

$$\int_0^{\infty} u_{IM} f(p) dp = 0$$

が成立しなければならない。

u_{IM} はどのような特性をもっているであろうか。

図12は、国内サブリージョンレベル (principal administrative division) の人口変化データを入手した東アジア、南アジアを中心とする26カ国について、横軸にサブリージョンの人口密度を、縦軸に u_{IM}/p をとりプロットしたものである。ここで、 u_{IM} を算出するにあたっては一国内の人口自然増加率は一定であり、年齢に関する依存性はないと仮定している。なお、図中の●は中国省単位の1982~1987年の値、○はわが国都道府県単位の1970年、□は同じく1990年のデータである。また、横軸の人口密度は国平均人口密度で除して正規化している。この図によれば、人口の流動は、およそ低人口密度地域から高人口密度地域の方角に発生しており、国平均の5~10倍の人口密度地域では2~3%/年程度である。しかしバラツキは大きくわが国のように流出しているところもある。

図9あるいは図12に示されるような国土内の人口集中は、地球・地域環境にどのような効果をもたらすであろうか。特に、開発途上国を中心とする過剰都市化がもたらす環境劣化については、現在、重要な問題となっている。さらに、こうした開発途上国においては、21世紀前半にかけて化石燃料を中心としたエネルギー消費の著しい伸長が予想され、大気汚染公害などを通じ近隣の住民に大きな被害を与える恐れが強い。

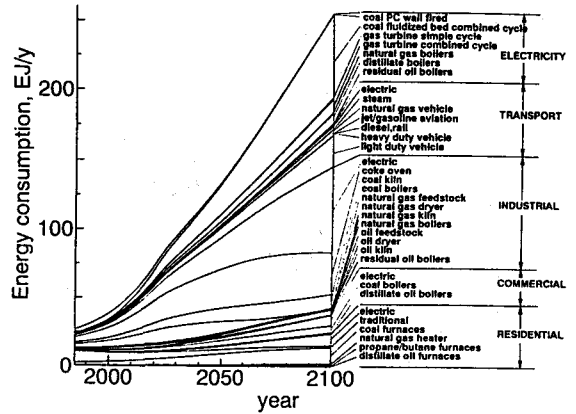


図13 中国のエネルギー消費見通し試算例

人口集中は、このようなシナリオに大きな影響を及ぼす。そこで、その影響の定量的な見通しを得るため、下のような検討を行った。

まず図13に示すものは、中国における今後のエネルギー消費の見通しである。これは、既報の地球規模硫黄酸化物排出・影響モデル (松岡, 1992) を用い算出したものである。人口シナリオとしては、1985年に10.4億人、TFRは2.35であったものが、2000年には置き換え水準に達すると想定する。経済成長率は2025年までは5.3%/年、それ以降は3.9%/年と設定し、民生部門電気サービス原単位の増加 (来世紀初頭に3.5%/年)、旅客交通需要の増加 (来世紀前半までに一人あたり自動車台数30倍、サービス要求量2000人km/(人・y))、産業製品の増大 (来世紀前半には一人あたり生産量2.5倍) などを想定する。こうしたエネルギーサービス需要の増大は、計算初期年である1985年の25EJ/年のエネルギー消費量を2050年には170EJ/年に、2100年には250EJ/年に押し上げる。しかし、この値は、一人あたりの消費量としては、現在のOECD諸国の75%程度である。なお、2100年の人口は16.6億人となっており、国連の長期推計 (U.N., 1992) の中位値14.1億人よりも若干多く、世界銀行の推計値16.7億人 (Bulataoら, 1990) とほぼ等しい。

これらの結果から、既報 (松岡, 1992) の方法に基づき、二酸化硫黄の地域的排出強度 (面積あたりの排出負荷) とその環境下にある累積人口 (下に示す $P(L, t)$) を、省を表章単位として求めたものが図14である。この図は、初期年の人口分布と排出強度分布に、全人口と全排出量の変化倍率を乗じて得られたものであり、国内の人口流動あるいは排出強度分布の変化を考慮していない。次に、国内の人口流動が想定した場合として、初期年での空間的な排出強度分布特性が、その後の人口分布変化によってのみ補正されなが

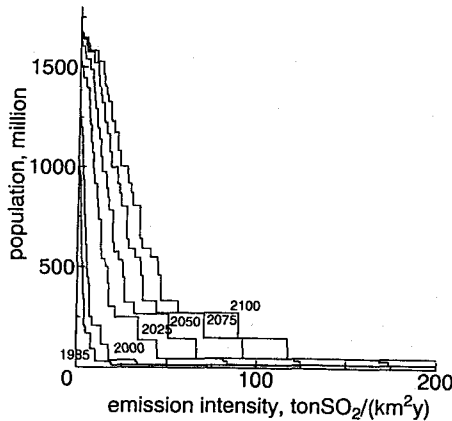


図14 二酸化硫黄排出強度とその環境下に居住する人口、人口移動を考慮しない場合

ら継承される場合を想定してみよう。すなわち、 t 年に p (人口密度) 軸上で、 $(p, p+\Delta p)$ の間に入る排出量の割合が $w(p, t)\Delta p$ となるように定めた排出強度分布関数 $w(p, t)$ ($\int_0^\infty w(p, t)dp = 1$ とする) を考える。これを、人口密度分布 $f(p, t)$ と初期年の排出強度分布である $w(p_0, 0)$ とから、次式により推計する。

$$w(p, t) = \frac{F(p, p_0)}{\int_0^\infty F(p, p_0)dp}, \quad F(p, p_0) = \frac{f(p, t) \cdot w(p_0, 0)}{f(p_0, 0)} \quad (4)$$

ここに、 $(0, p_0)$ 及び (t, p) は、 $dp/dt = V$ で表される式(3)の特性曲線のうち、同一線上に存在すると想定している。この $w(p, t)$ を使用すれば、排出強度が L 以上の地域に居住する人口 $P(L, t)$ は、次式によって求めることができる。

$$P(L, t) = A_T \int_0^\infty \left[\frac{W_T(t)w(p, t)}{A_T f(p, t)} - L \right] p f(p, t) dp \quad (5)$$

ここで、 A_T は国土面積、 $W_T(t)$ は全排出負荷量、また $H(x)$ はHeavisideの関数である。実際には、人口流動とは独立した産業分布の変化要因なども考慮する必要があるが、簡単のために、ここでは無視している。

図15は、図12に示される移動特性を $u_{IM} = \alpha \ln(p) + b$ (a, b は定数) として表現し、 $\alpha = 0.013$ (人口密度が10倍変化したときの流入率の差が約3%/y、 b は国全体の流入入収支が合うように定める) として算出したものである。

さて、これらの計算結果から以下のことが推測できる。まず、1985年における排出強度環境は、最大でも $72 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ 程度であり、半分の人々の住む地域(以下50%地域と称する)では $2.5 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ 以

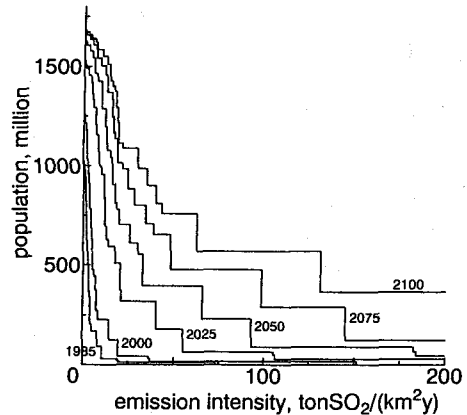


図15 二酸化硫黄排出強度とその環境下に居住する人口、人口移動を考慮した場合

下である。人口流動の効果を考慮しなかった場合、2050年には最大値は $200 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ を越えるが、50%地域(人口8.1億人に対応)では $20 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ であり、2100年(8.2億人に対応)では $30 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ 程度となっている。一方、人口流動効果を考えた場合、50%地域の排出強度はあまり変化しないが、それより高い排出強度地域にて著しい伸びが見られる。例えば、縦軸が2.5億人である排出強度は、1985年には $4 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ であったが、2050年には、人口流動がない場合 $50 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ 、人口流動を考慮した場合には $70 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ と1.5倍程度の違いが生じ、2075年には $70 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ 及び $170 \text{ tSO}_2/(\text{km}^2\text{y})$ と2倍程度の差となる。

図15は、流入入に関する係数を0.013とした場合であったが、この値のバラツキは大きい。そこで、この数値を0~2倍に変化させ、その感度を調べたものが図16である。この図は、横軸に α を、縦軸にはその値より高い排出強度の地域に住む人々の割合が、全人口の10%(実線)及び90%(点線)となる排出強度の軌跡を記したものである。先の図で示した $\alpha = 0.013$ 程度を境として、人口流入入の効果は高排出強度地域にては増大を加速し、低排出強度地域にては一定から減少傾向を示すように働いている。

中国の都市化率は、1990年に33%である。現在のところ年5.2%の率で伸長しているが、今後もこの高率が続くと考えられず、2025年頃までの長期的な増加率としては2~3%/年程度と考えられている(U.N., 1991)。一方、 $\alpha = 0.013$ とは、仮に都市人口密度と国平均人口密度の比を5~10倍程度とみると2~3%/年程度の都市化率の増大に相当するから、人口流動の長期的見通しとしても、同程度を想定しておけばよいことになる。すなわち、人口流動の影響は、時間とともに深刻化し、特に、2025年以降に顕著にあ

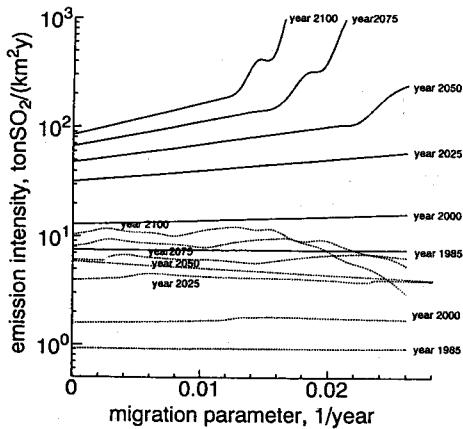


図16 純流入率に係る係数と影響人口率の関係、実線は10%, 点線は90%の軌跡である。

られ、2050年以降になると2億人以上の人々が現在の上海(100 tSO₂/(km²·y)程度, 科学技術庁, 1992)以上の激烈な環境に置かれることが推測できるのである。

国土内の人口配置が、一国の経済発達とどのように係わりあっているかと言ったテーマは古くから論じられてきた。環境との係わりにおいても、深くかつ錯綜した関係が存在しよう。ここで取り上げているような受動的な係わりの他に、例えば、人口配置のマクロ的な様相が、交通エネルギー消費量の大きさとか農業・食糧産品の内包エネルギー量と高い相関をもつことなどが、最近の実証的な研究で明かにされつつある(松岡・森田・有村, 1992, Jones, 1991)。こうした事実の集積と、それが環境にどのような影響と効果をもたらすであろうかと言った検討は、今後の地球環境を考える上で必須であると考えている。

5. おわりに

本論文では、人口変化の地球環境にもたらす影響についてモデル解析により、その程度の検討を行った。検討のために開発・使用したモデルはコーホート要因法に基づくものであり、シナリオを同じくした場合には、国連人口推計などを再現できることを確認した。その上で、現在、巷間に言われている人口変化の見通しについて、その設定と幅が地球環境に及ぼす影響を検討した。検討はマクロのかつ皮相的な段階にとどまり、因果メカニズムにまで立ち入ったものではない。そうした段階までに踏み込むには、より詳細な情報とメカニズムの準備立てが必要であるし、それらを目指すならば、ここで取り上げているような超長期的なスケールとの整合性も大きな問題となる。また、ここで取り上げたモデルのみでは、アプローチの幅あるいは時間的、空間的スケールに大きな制限がある。しかし、より多面的なレベルの検討が必要なのは言うまでもなく、今後、それらの整備が完了した段階で、いっそ

う深化した検討を行ってみたいと考えている。

最後に、本論文の一部は、環境庁地球環境研究総合推進費「アジア太平洋地域における温暖化対策モデル(AIM)の構築に関する研究」及び文部省科学研究費重点領域研究「人間環境系」No.36, No.37の援助を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- Bongaarts, J., Mauldin, W.P. and Phillips, J.F., 1990, The demographic impact of family planning programs, *Studies in Family Planning*, 21(6), 299-310.
- Bos, E and Bulatao, R.A., 1990, Projecting Fertility for All Countries, Policy, Research, and External Affairs Working Paper, WPS500, World Bank.
- Bulatao, R.A., Bos, E., Stephens, P.W. and Vu, M.T., 1990, World Population Projections 1989-90 Edition, The Johns Hopkins University Press.
- Coale, A.J. and Demeny, P., 1966, Regional model life tables and stable populations, Princeton University Press.
- Demeny, P., 1985, Review of World population projections 1984 : Short- and Long-Term Estimates by Age and Sex with Related Demographic Statistics, *Population and Development Review*, 11, 562-564.
- Findley, S.E., 1993, The third world city, (in) *Third World Cities, Problems, Policies, and Prospects*, (eds.) J.D. Kasarda, and A.M. Parnell, Sage Pub.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992, Climate Change 1992, World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme.
- Jones, D.W., 1991, How urbanization affects energy-use in developing countries, *Energy Policy*, September, 621-630.
- 科学技術庁科学技術政策研究所編, 1992, アジアのエネルギー利用と地球環境, 大蔵省印刷局.
- 松岡 謙, 1990, 温暖化現象の総合化モデルとそれによる温室効果ガス濃度と上昇温度の将来推定について, *環境システム研究*, 18, 82-87.
- 松岡 謙, 1992, 人為起源の硫酸酸化物による地球規模的な環境影響について, *環境システム研究*, 20, 142-151.
- 松岡 謙・森田恒幸・甲斐沼美紀子, 1992, 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析, *土木学会論文集*, 449/IV-17, 1-16.
- 松岡 謙・森田恒幸・有村俊秀, 1992, 都市構造及び都市配置と地球温暖化, *都市計画論再考*, *環境研究*, 86, 51-65.
- Ogawa, N., 1985, Urbanization and internal migration in selected ASEAN countries : Trends and prospects, (in) *Urbanization and Migration in ASEAN Development*, (eds.) Hauser, P.M., Suits, D.B., and Ogawa, N., University of Hawaii Press, 83-107.
- Pernia, E.M., 1985, Urbanization and spatial development in the Asian and Pacific region : Trends and Issues, *Asian Development Review*, 6(1), 86-105.
- Rogers, A., 1984, Urbanization and spatial population dynamics, Westview Press.
- United Nations, 1980, Patterns of Urban and Rural Population Growth, Population Studies No.68, ST/ESA/SER.A/68.
- United Nations, 1990, World Population Prospects 1990, Population Division, Department of International Economic and Social Affairs, U.N.
- United Nations, 1991, World Urbanization Prospects 1990, ST/ESA/SER.A/121.
- United Nations, 1992, Age Patterns of Fertility 1990-1995, The 1992 Revision.