


数理モデルから眺めた人口問題

1. 人口増加の実態
 - 有史以来の地球人口の推移
2. 数理モデルを用いた人口増加の予測
 - 簡単な個体群動態モデル
 - 年齢構造モデル
3. 地球はどれだけの人間を養えるか



1


新人口論－生態学的アプローチ

How many people can the earth support?
Joel E. Cohen

農文協 1998

地球人口の推定値

| | | | |
|-------|--------|----------|-------|
| 2002年 | 約 62 億 | | |
| 2000年 | 60 億 | | |
| 1986年 | 50 億 | | |
| 1974年 | 40 億 | 19 世紀半ば | 10 億 |
| 1960年 | 30 億 | 1600 年頃 | 5 億 |
| 1930年 | 20 億 | 紀元 0 年前後 | 2~3 億 |



2

現在の世界人口

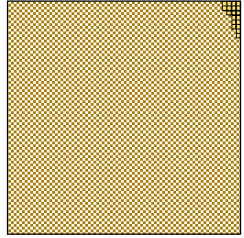
YOMIURI Web 版ニュースより



3

10 億人のイメージ

1 万平方メートル（サッカーグラウンド約 2 つ）の区画に
1 平方メートル毎に 10 万人を詰め込むと 10 億人になる



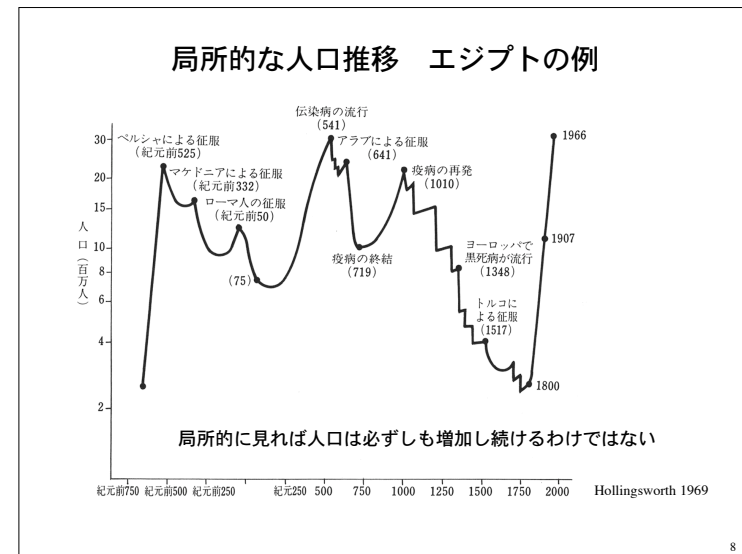
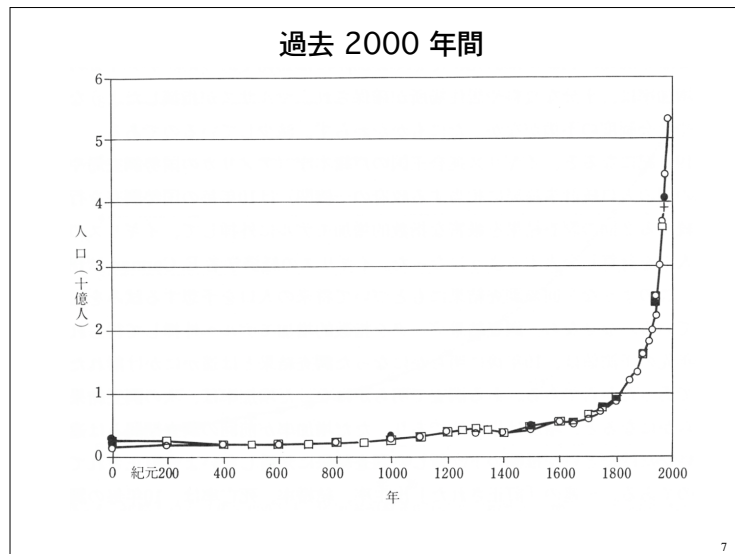
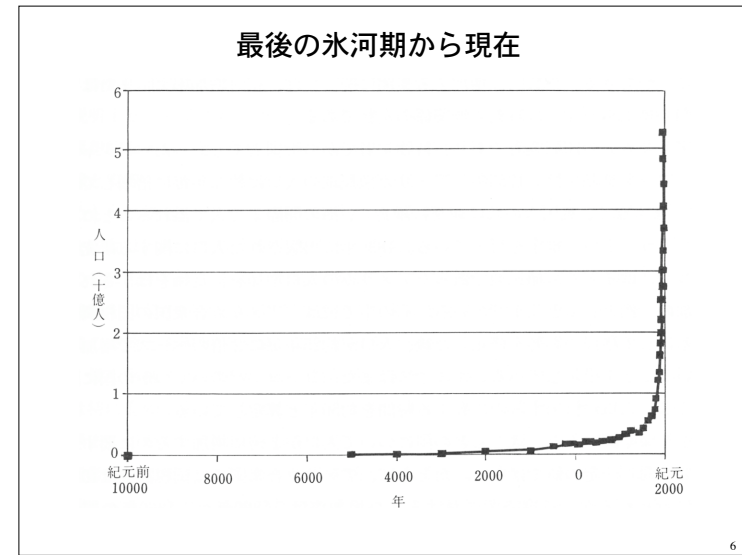
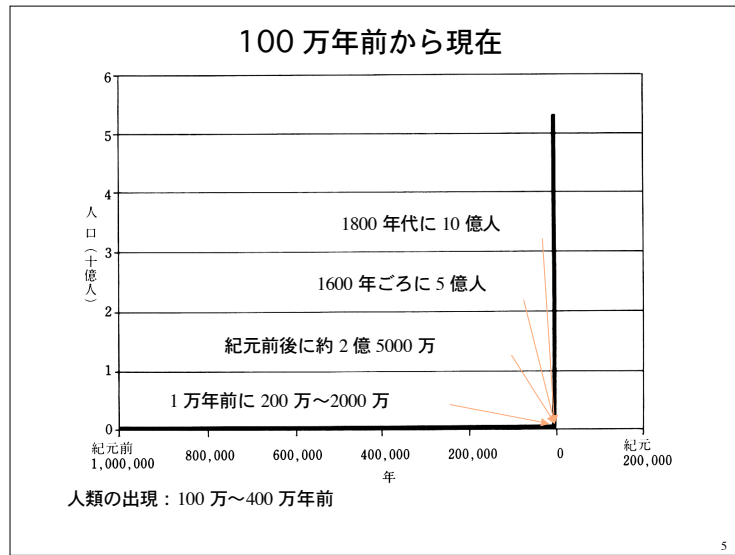
100 m

1 平方メートル

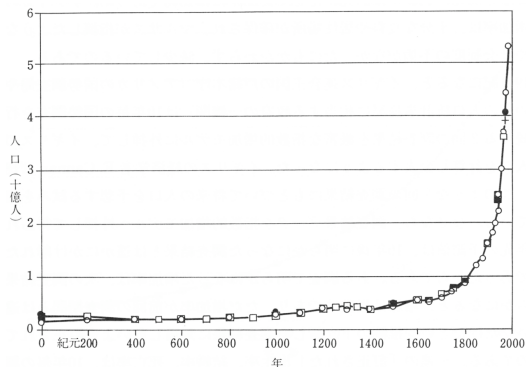
- 1990 年のアメリカ合衆国の人口：2 億 5 千万
- 1992 年の中国の人口：11 億 7 千万
- 1992 年のヨーロッパ諸国人口：5 億 1 千万
- 1992 年のインド人口：8 億 8 千万

2002 年の奈良県の人口：143 万
2002 年の奈良市の人口：36 万

4



地球全体の人口はほぼ一貫して増加し続けている



では、どのように人口は増加してきたのか？

9

指数増加モデル

1 個体が単位時間内に b 個体の子供を生み、生存確率が s の時、集団サイズ (個体数) $N(t)$ の時間変化は次のようになる

$$N(t+1) = \underbrace{bN(t)} + \underbrace{sN(t)} = \underbrace{(b+s)}N(t)$$

↑ ↑ ↑
 集団に新たに 生き残る 正味の増加率
 加わる個体数 個体数

$$N(t) = N(0)r^t \quad (r = b + s)$$

$r > 1$ の時、集団サイズは時間とともに増加 (指数増加)

$0 < r < 1$ の時、指数減少

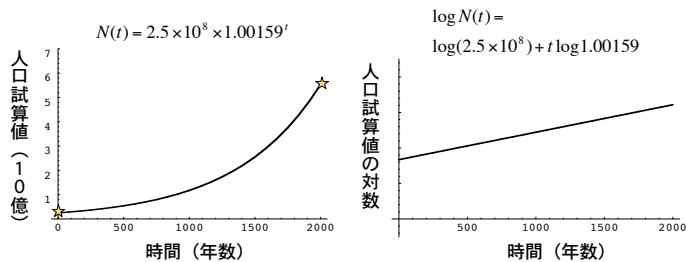
10

人口は指数増加してきたのか？

2000 年前の推定人口は 2.5 億。
 現在の人口が 60 億となる増加率 r を求めてみる

$$N(t) = N(0)r^t \quad N(2000) = 2.5r^{2000} = 60$$

$$r = (60/2.5)^{1/2000} = 1.00159 \quad (\text{年間 } 0.159\% \text{ の増加})$$



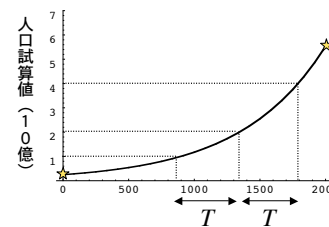
11

倍加時間

指数増加 $N(t) = N(0)r^t$ の倍加時間 T は

$$T = \log 2 / \log r = 0.693 / \log r$$

r が 1 に近い値の時 ($r > 1$)、 $\log r \sim r - 1$ と近似可能

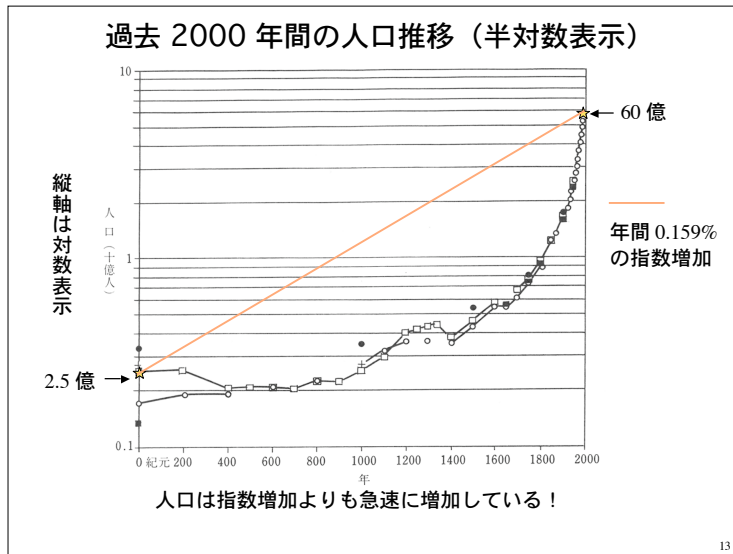


$r = 1.00159$ (年 0.159% の増加)

$T \sim 0.693 / 0.00159 = 436$ 年

人口が過去 2000 年間指数的に増加してきたとすると、436 年毎に倍増。

12



指数増加モデルの過ち

$$N(t+1) = (b+s)N(t)$$

b : 1 個体の出生率 (年間)
 s : 1 個体の生存率 (年間)


増加率 $r = b + s$ は実際には定数ではなく、時代もしくは社会情勢に左右される。従って出生率や生存率を定数と仮定する指数増加モデルは、過去の人口推移を正しく記述できない。

人間集団には様々な年齢の個体が存在。若齢者が多い集団とそうでない集団では当然、個体数 (人口) の変化も異なるはず。

より現実に即した数理モデル解析が必要。

14

Thomas Malthus



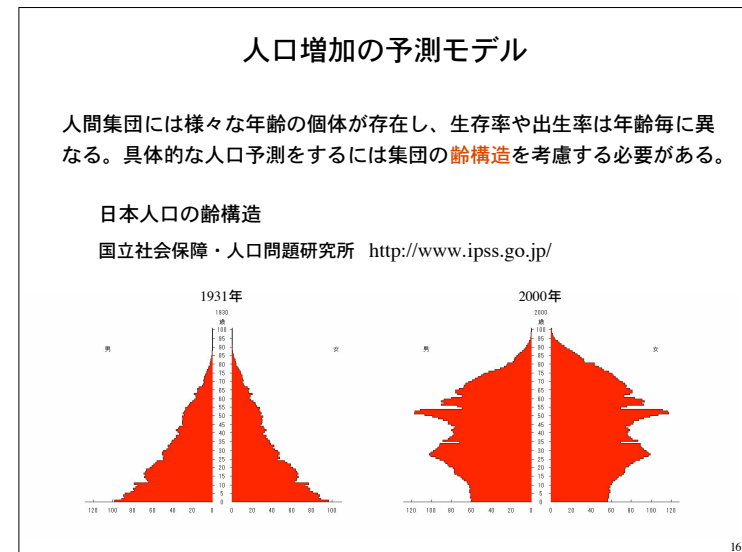
マルサス (1766-1834)

An Essay on the Principle of Population
(人口原理) で有名な政治経済学者

肖像画は <http://www.ac.wvu.edu/~stephan/malthus/malthus.0.html> より

人口は幾何級数的 (指数的) に増えるが、食料生産は算術級数的でしか増加しないため、いずれ困難な時代が訪れる。

15



2002年8月30日のウェブ新聞より <http://www.yomiuri.co.jp>

17

年齢構造モデル

x 歳の個体は 1 年後、生存率 P_x で $x+1$ 歳になる (時間の単位は年)

x 歳の個体が産む子供のうち 1 歳まで成長する数は f_x

年齢 i の人口を n_i とする ($i = 1, 2, 3, \dots$)

全人口は $n_{total} = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_{\omega}$ で与えられる

18

単位時間後の年齢クラス i の人口 n_i' は

$$n_i' = P_{i-1}n_{i-1} \quad (i = 2, 3, \dots, \omega) \quad P_i \text{ は年齢クラス } i \text{ に属する個体の単位時間内の生存率}$$

$$n_{\omega}' = P_{\omega-1}n_{\omega-1} + P_{\omega}n_{\omega}$$

単位時間後の年齢クラス 1 (新しく産まれた個体) の人口 n_1' は

$$n_1' = f_1n_1 + f_2n_2 + f_3n_3 + \dots + f_{\omega}n_{\omega}$$

$$= \sum_{i=1}^{\omega} f_i n_i \quad f_i \text{ は年齢クラス } i \text{ に属する個体の出生率}$$

| | |
|---|---|
| $\begin{bmatrix} n_1' \\ n_2' \\ n_3' \\ \vdots \\ n_{\omega}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \dots & f_{\omega} \\ P_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{\omega-1} & P_{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_{\omega} \end{bmatrix}$ | <p>年齢構造モデル</p> $\mathbf{n}' = \mathbf{A}\mathbf{n}$ <p>\mathbf{n}: 人口ベクトル \mathbf{A}: レスリー (Leslie) 行列</p> |
|---|---|

19

年齢構造モデルの性質

生存率 P_i および出生率 f_i が定数である場合、行列 \mathbf{A} は定数行列となり

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{A}\mathbf{n}(t-1)$$

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{n}(t-2) = \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{n}(t-3) = \dots$$

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{A}^t \mathbf{n}(0)$$

この式は解析的に解ける (線形代数)

$$\mathbf{n}(t) = c_1 \mathbf{e}_1 \lambda_1^t + c_2 \mathbf{e}_2 \lambda_2^t + \dots + c_{\omega} \mathbf{e}_{\omega} \lambda_{\omega}^t$$

λ_i は行列 \mathbf{A} の固有値、 \mathbf{e}_i は固有ベクトル、 c_i は初期分布 $\mathbf{n}(0)$ で決まる定数 ($i = 1, 2, 3, \dots, \omega$)

20

$$\mathbf{n}(t) = c_1 \mathbf{e}_1 \lambda_1^t + c_2 \mathbf{e}_2 \lambda_2^t + \dots + c_\omega \mathbf{e}_\omega \lambda_\omega^t$$

十分時間が経つと ($t \rightarrow \infty$),

$$\mathbf{n}(t) \sim c_1 \mathbf{e}_1 \lambda_1^t \quad \lambda_1 \text{ は行列 } A \text{ の最大固有値 (実数)}$$

年齢構造モデルにおいて Leslie 行列 A が定数行列であれば、十分時間が経った後の総個体数は、単位時間に行列 A の最大固有値 λ_1 倍になる。

最大固有値 $\lambda_1 > 1$ なら、指数的に増加
 最大固有値 $\lambda_1 < 1$ なら、指数的に減少

その時の年齢分布は、最大固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{e}_1 で与えられる。

21

年齢構造モデル

年齢 i の人口を $n_i(t)$ 年齢 i の個体の翌年までの生存率を P_i
 年齢 i の個体の出生率を f_i ($i = 1, 2, 3, \dots, \omega$)

Leslie 行列 A を用いて、翌年の人口は

$$\mathbf{n}(t+1) = A\mathbf{n}(t) \quad \text{と書ける。}$$

$$\mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ n_3(t) \\ \vdots \\ n_\omega(t) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \dots & f_\omega \\ P_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{\omega-1} & P_\omega \end{bmatrix}$$

A が定数行列の時、
解析的に解ける。

22

日本の人口動態のシミュレーション

初期状態は国立人口問題研究所配布の 2000 年の人口分布。
 生存率 P は、1~5 才は 0.95、6~20 才は 0.98、21~50 才は 0.99、51~100 才は 0.98、101 才以上は 0.8 である仮想の状況を考える。
 性比は 1:1 に保たれるとして、女性の人口のみに注目する。

23

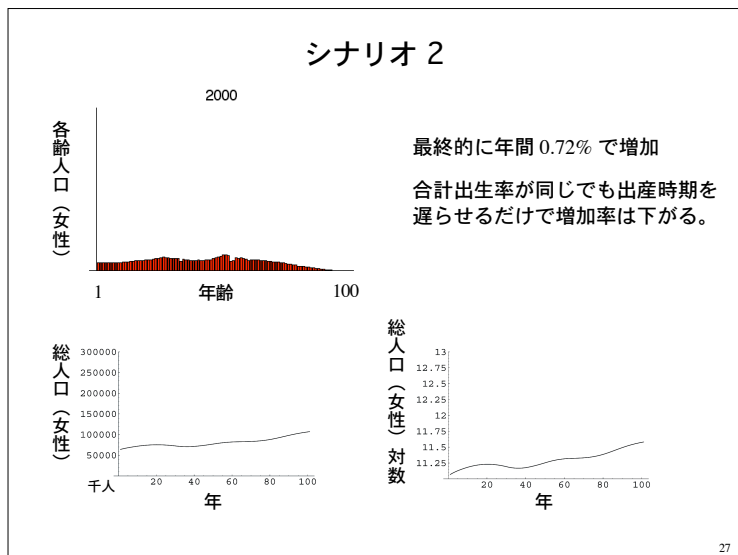
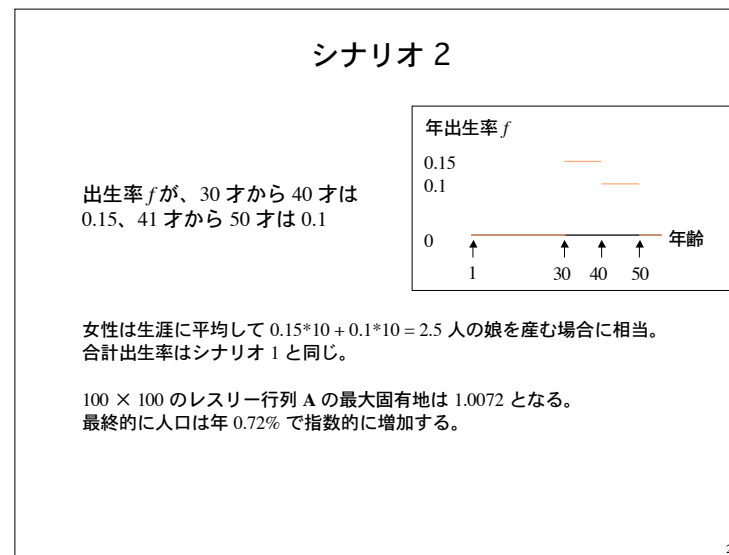
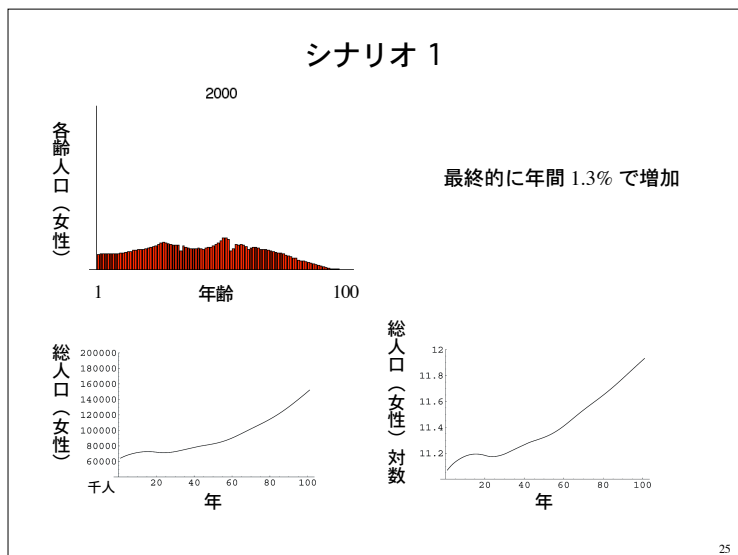
シナリオ 1

出生率 f が、20 才から 30 才は 0.15、31 才から 40 才は 0.1

女性は生涯に平均して $0.15 \times 10 + 0.1 \times 10 = 2.5$ 人の娘を産む場合に相当。
 各年齢クラスの出生率を合計したものを **合計出生率** と呼ぶ。

100 × 100 のレスリー行列 A の最大固有値は 1.013 となる。
 最終的に人口は年 1.3% で指数的に増加する。

24



出生率と生存率は時代とともに変化する

レスリー行列 A の各要素は決して定数ではない!

生存率 P_i の変化 :

- 医療の発達による乳幼児死亡率の低下
- 公衆衛生や栄養状態の改善による死亡率低下
- 食生活の変化による死亡原因の変化

出生率 f_i の変化 :

- 生活様式の変化に伴う少子化・晩婚化
- 経済状態の変化
- 政策・文化的背景 (家族計画の普及など)

こういった要因を考慮して生存率と出生率の将来変化を予想し、将来の人口動態を試算しなければならない。

28

出生率の低下

2004年6月10日のウェブ新聞より
<http://www.yomiuri.co.jp>

29

シナリオ 3

最初の5年間だけ
 出生率 f は、20才から30才は0.2、31才から40才は0.1
 合計出生率 3 (女性)
 最大固有地は 1.021

その後は
 出生率 f は、20才から30才は0.1、31才から40才は0.05
 合計出生率 1.5 (女性)
 最大固有地は 0.9957

30

シナリオ 3

最終的に年間 0.43% の減少

31

人口問題研究所による日本の人口動態予測

厚生労働省人口問題研究所では、人口動態に関する資料の開示や、日本の人口動態の予測シミュレーションを行っている。

1930~2050年の人口動態シミュレーション <http://www.ipss.go.jp/>

32

人口転換の概念

出生率と死亡率（生存率）は社会の発展につれて変化するという経験則

高出生率・高死亡率 = 低成長率

↓

高出生率・低死亡率 = 高成長率

↓

低出生率・低死亡率 = 低成長率

これらの転換がいつ起こるのかを正確に予測することは困難。
 国毎にどの段階にあるかまちまち（経済状況・政治体制等の違い）なので、地球全体の人口の将来予測は極めて困難。

33

国連の人口予測

即時人口置換率移行：出生率が今すぐに死亡率とつりあう水準に減少する場合（合計出生率が 2.06 の時）

中水準：出生率が 2100 年に人口置換率 2.06 人まで緩やかに減少する場合

高水準：出生率が 2100 年に人口置換率を 5% 上回る場合

低水準：出生率が 2100 年に人口置換率を 5% 下回る場合

人口増加の慣性

34

人口予測の困難さ

35

人口増加の予測とは？

人口増加の予測とは、各年齢クラスの出生率や生存率の変化について、幾通りかのシナリオ（仮定）を設定し、このシナリオの下で人口がどのように増えるのかを計算機でシミュレートした結果に他ならない。

前提となるシナリオ（仮定）が成り立たなければシミュレーション結果は意味を失う。予測が現実のものとなるとは限らない。

出生率や生存率は、公衆衛生や社会体制や制度等に大きく影響される。これらの影響を正確に推し量って人口増加を予測するのは困難。

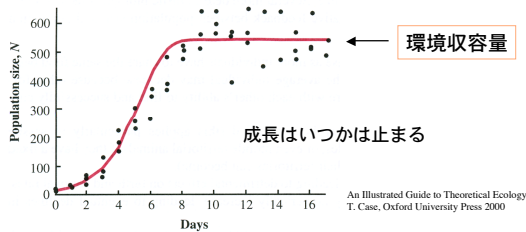
計算機を用いた将来予測は、我々の生きる道を探る選択肢を示してくれる。詳細なモデル解析はコンピュータなくては不可能。

36

地球が養える最大人口はどれだけか？

人口増加が無限に続くことは物理的に不可能。
 人口増加につれて、食料・資源の不足、過密による環境悪化等の影響で、増加率は小さくなると思われる（密度依存効果）。

ゾウリムシ *Paramecium aurelia* の個体数増加 Gause 1934

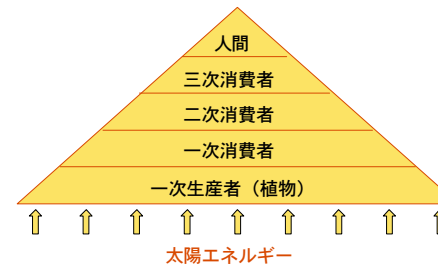


最大人口の試算

人間が生きるために必要な消費エネルギーの観点から考える

エネルギーの流れ

太陽光（光合成）=>炭水化物=>食物連鎖網=>人間



De Wit の試算

光合成が制限要因である場合の地球の最大人口の試算

地球の最大人口 P の算出方法

$$P = \frac{\text{生産面積} \times \text{単位面積あたりのエネルギー生産量}}{\text{一人が必要とする栄養量}}$$

一人の人間が必要とするエネルギーは、年間 100 万キロカロリー（1日 2,740 kcal）

地表面単位面積あたりに光合成により生産されるエネルギー（緯度によって異なる）を求めて P を試算する。

De Wit の推定値

表10-4 地球の炭水化物生産能力と扶養可能人口に関する De Wit の推定(1967)。炭水化物生産は光合成にのみ依存すると仮定してある。

| 北緯緯度 ^(度) | 土地面積 (億ha) | 気温が10度以上の月数 | 炭水化物量/年/ha (千キログラム) ^(a) | 生活を維持するために必要な1人当たりの面積 | | 農地比率 | | |
|---------------------|------------|-------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------|----|
| | | | | 都市機能および余暇施設を含めない場合 | 都市機能および余暇施設として1人当たり750平方メートルを考慮した場合 | 1人当たり面積 (m ²) | 人口 (億人) | |
| 70 | 8 | 1 | 12 | 806 | 100 | 1,556 | 50 | 52 |
| 60 | 14 | 2 | 21 | 469 | 300 | 1,219 | 110 | 38 |
| 50 | 16 | 6 | 59 | 169 | 950 | 919 | 170 | 18 |
| 40 | 15 | 9 | 91 | 110 | 1,360 | 860 | 180 | 13 |
| 30 | 17 | 11 | 113 | 89 | 1,510 | 839 | 200 | 11 |
| 20 | 13 | 12 | 124 | 81 | 1,050 | 831 | 160 | 10 |
| 10 | 10 | 12 | 124 | 81 | 770 | 831 | 110 | 10 |
| 0 | 14 | 12 | 116 | 86 | 1,210 | 836 | 170 | 10 |
| -10 | 7 | 12 | 117 | 85 | 870 | 835 | 90 | 10 |
| -20 | 9 | 12 | 123 | 81 | 1,120 | 831 | 110 | 10 |
| -30 | 7 | 12 | 121 | 83 | 880 | 833 | 90 | 10 |
| -40 | 1 | 8 | 89 | 113 | 90 | 863 | 10 | 14 |
| -50 | 1 | 1 | 12 | 833 | 10 | 1,583 | 10 | 53 |
| 合計 | 131 | | | | 10,220 | | 1,460 | |

10,220 億人

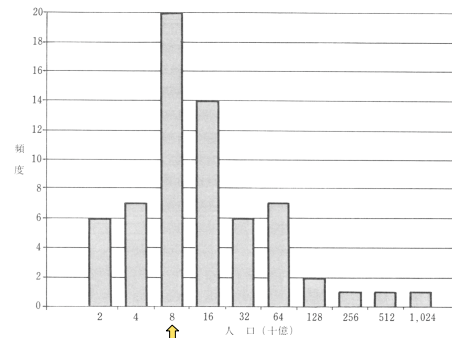
1,460 億人

光合成以外の制限要因

- 穀物生産に必要な肥料、灌漑施設、水資源
- 高次消費者（いわゆる高級食物材）の問題
- 住環境・公衆衛生の維持
- 石油等の社会活動に必要な資源
- 社会システムの制限

こういった制限要因を総合して、地球の最大人口を試算する必要がある。

最大地球人口の試算値の頻度分布



約 80 億人

どのような制限要因を考えるかで試算値は異なってくる

持続可能性という考え方

漁業・農業・エネルギー採掘などが、将来にわたって長期安定して維持可能かどうか**持続可能性**。

目の前の獲物を獲るだけ獲る（根こそぎ収穫）は、短期的な利益をもたらすが、持続可能ではない。

社会制度（経済システム・社会保障制度など）の制定にも持続可能性という概念が求められる。地球の最大人口もどのような持続可能な社会を築くのかに大きく依存。



複雑適応形の1つであるエコシステムが、どのように進化し、維持されているのかを一般向けに解説した書籍

Simon Levin 著 重定南奈子・高須夫悟訳
文一総合出版 2003年 2,800円

地球の最大人口は、

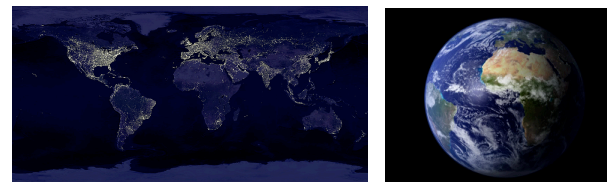
我々人類が地球上で

どのような生活を営むのか、

どのような経済を発展させるのか、

どのような社会を築くのか、

に依存する。



将来は我々の選択しだい