

環境科学概論

- ・理学部・化学生命環境学科
- ・環境科学コース・数理生命システム分野
- ・高須夫悟担当 10/10
- ・地球人口の推移と今後について概説する
 - ・第一部：人口動態の実態
 - ・第二部：数理モデル
 - ・第三部：地球が養える最大人口

1

人口動態の理解の重要性

過去 200年、地球人口はかつてないほどの速度で増加し続けている

しかし、一部先進国では少子高齢化が急速に進んでいる

人口構成の急激な変化は、社会・経済体制に甚大な影響を及ぼす

少子高齢化をもたらすメカニズムを理解することは、将来を見据えた対策を立案する上で不可欠



人口動態の実態を正しく理解する

数理モデルを用いて人口動態予測を行う方法を理解する

シミュレーション実験を通じて、効果的な少子高齢化対策を探る

2

環境問題の一つとしての人口問題



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
 - 齢構造モデル
3. 地球はどれだけの人間を養えるか

3

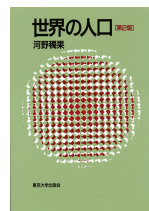
参考書

新人口論-生態学的アプローチ
重定 南奈子, 瀬野 裕美, 高須 夫悟 共訳 1998
農山漁村文化協会



"How many people can the earth support?"
Joel E. Cohen (1995). W. W. Norton & Company, New York.

世界の人口 第2版
河野稠果 2000
東京大学出版会



少子化の人口学 人口学ライブラリー 1
大淵寛, 高橋重郷 編著 2004
原書房



4

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 出版



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
1960 年	30 億
1930 年	20 億

19 世紀半ば	10 億
1600 年頃	5 億
紀元 0 年前後	2~3 億

地球人口の推移

トップ

国際

2014 年	72 億
2006 年	65 億
2003 年	63 億
2002 年	62 億
2000 年	60 億
1986 年	50 億
1974 年	40 億
1960 年	30 億
1930 年	20 億
19 世紀半ば	10 億
1600 年頃	5 億
紀元 0 年前後	2~3 億

世界の人口、最多の72億4400万人に

2014年11月18日 20時48分

ツイート 22

おぼえ 41

8+1 1

国連人口基金（UNFPA）は18日、2014年版「世界人口白書」を発表した。世界の人口は前年から約8000万人増え、最多の72億4400万人となった。



日本は1億2700万人で、12年連続で10位だった。

白書によると、世界の若者（10～24歳）の人口は過去最高水準の約18億人。人口に占める若者の割合は、東ティモールが38%で最も高く、日本は14%だった。

白書はまた、「若者の89%が開発途上国で暮らしており、アフリカなどで急速に増加している」と指摘した。開発途上国では、若者の約6割が就学、就業をしていない。同基

金東京事務所の佐崎淳子所長は「各国政府が教育や保健などに適切な投資をしなければ、若者が社会の不安定要因になる」と述べ、社会の安定化には若者への投資が不可欠との見方を示した。

2014年11月18日 20時48分

Copyright © The Yomiuri Shimibun

現在の世界人口

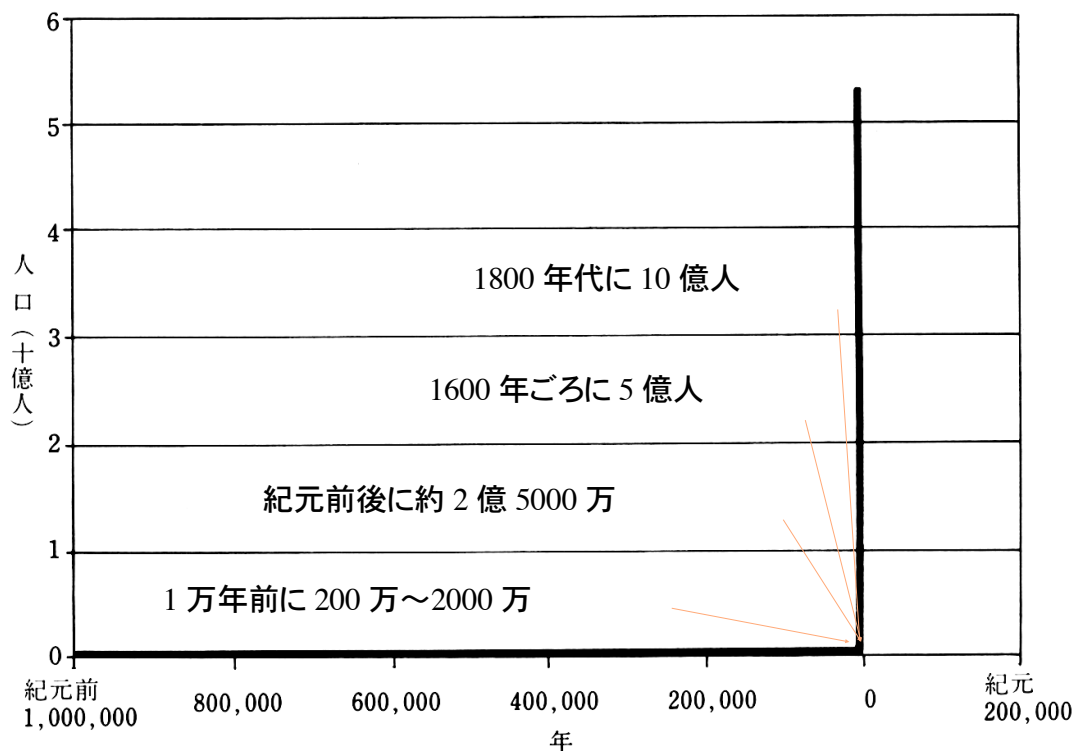
国際連合ウェブサイトより

TABLE I.1. POPULATION OF THE WORLD, MAJOR DEVELOPMENT GROUPS AND MAJOR AREAS, 1950, 1975, 2009 AND 2050, ACCORDING TO DIFFERENT VARIANTS

Major area	Population (millions)			Population in 2050 (millions)			
	1950	1975	2009	Low	Medium	High	Constant
World.....	2 529	4 061	6 829	7 959	9 150	10 461	11 030
More developed regions.....	812	1 047	1 233	1 126	1 275	1 439	1 256
Less developed regions.....	1 717	3 014	5 596	6 833	7 875	9 022	9 774
Least developed countries	200	357	835	1 463	1 672	1 898	2 475
Other less developed countries	1 517	2 657	4 761	5 369	6 202	7 123	7 299
Africa.....	227	419	1 010	1 748	1 998	2 267	2 999
Asia.....	1 403	2 379	4 121	4 533	5 231	6 003	6 010
Europe	547	676	732	609	691	782	657
Latin America and the Caribbean	167	323	582	626	729	845	839
Northern America	172	242	348	397	448	505	468
Oceania.....	13	21	35	45	51	58	58

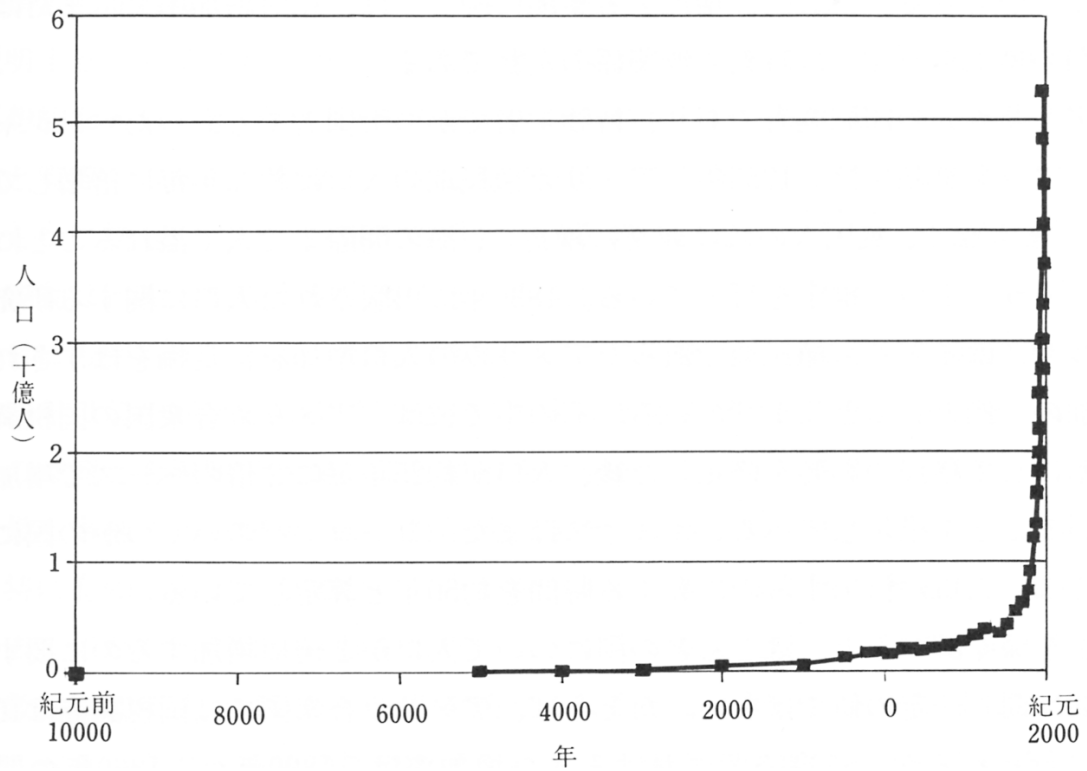
Source: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat (2009). *World Population Prospects: The 2008 Revision. Highlights*. New York: United Nations.

100 万年前から現在



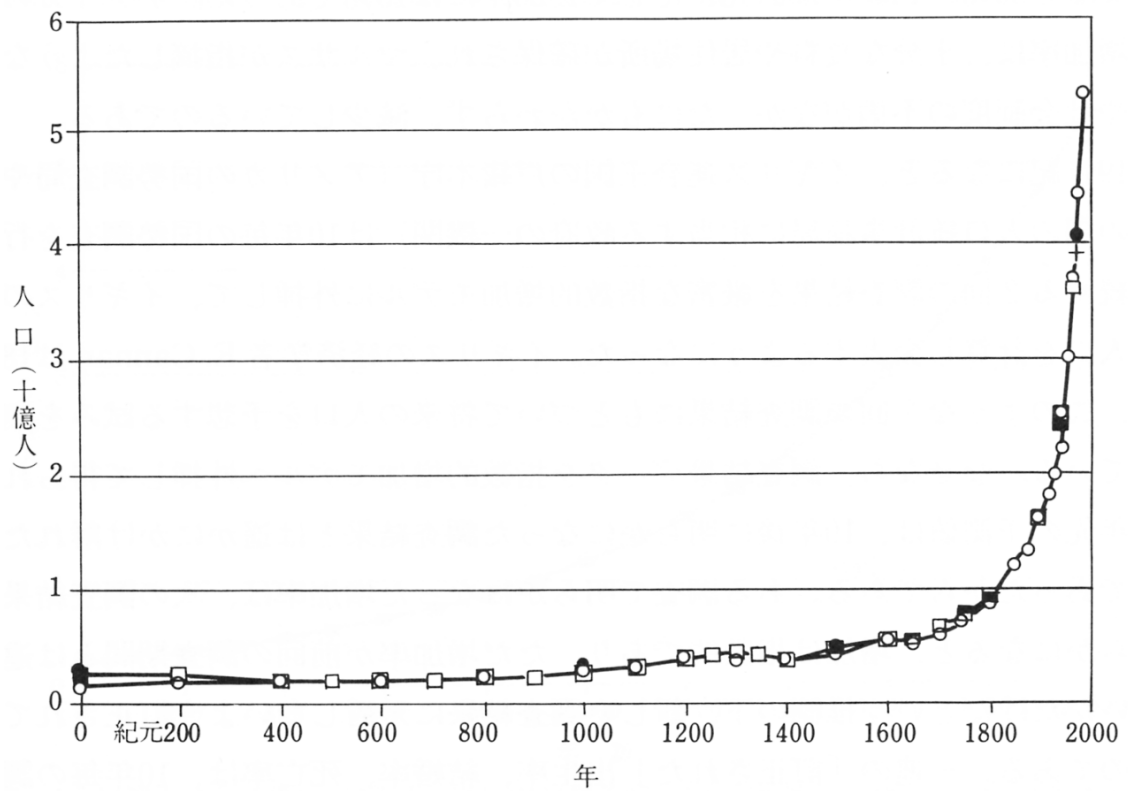
人類の出現：100 万～400 万年前

最後の氷河期から現在



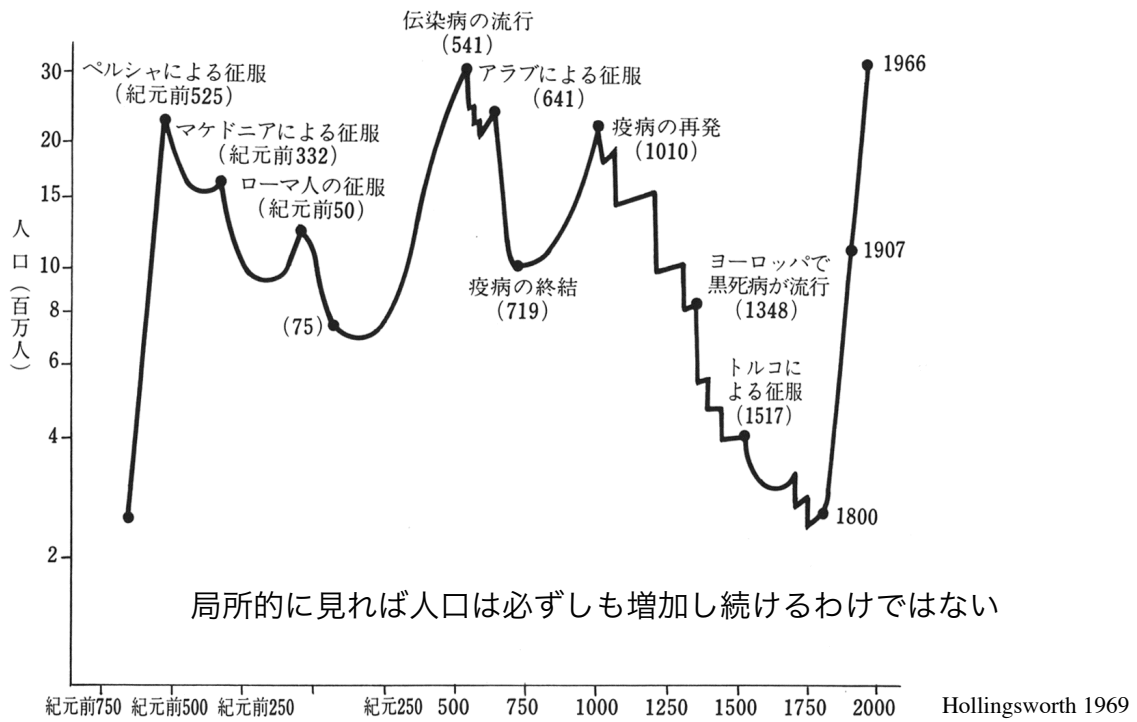
9

過去 2000 年間



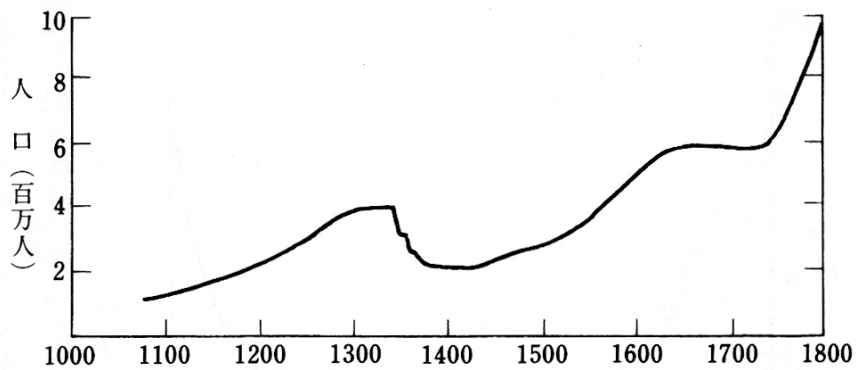
10

局所的な人口推移 エジプトの例



局所的な人口推移 イギリスの例

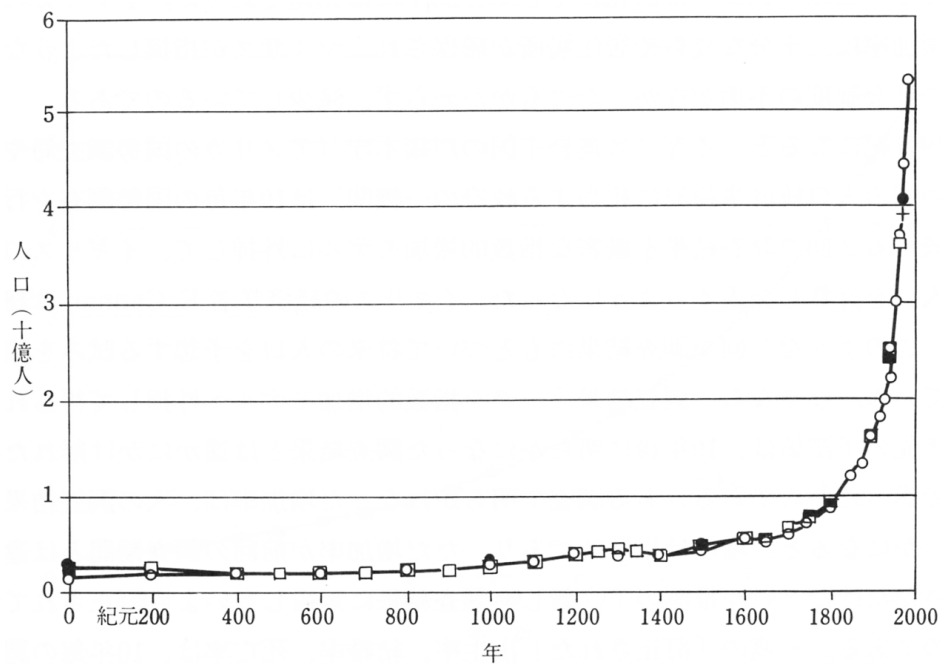
図4 11世紀から19世紀までのイギリス人口の推移



出所：Wrigley (1969).

世界の人口第2版 河野 2000 より

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？

13

人口の推定

古代

考古学的資料・遺跡からの推定

徴税・軍事的人員管理のために実施した記録文献からの推定

中世

教会・寺社の記録 (各国地域における断片的な部分総計)

1427年 トスカーナ地方の地籍図

1665年 カナダ・ケベック地方の人口調査

19世紀～

国勢調査などの国家的規模の人口調査

1790年 アメリカ合衆国の人口調査

1801年 イギリスの人口調査

1920年 日本で国勢調査始まる

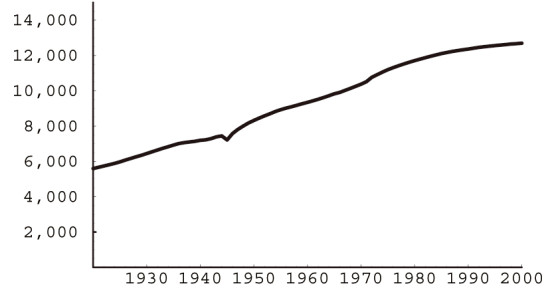
14

日本人口の推移（大正～）

第1表 男女別人口（各年10月1日現在） - 総人口（大正9年～平成12年），日本人人口（昭
Table 1. Population by Sex (as of October 1 of Each Year) - Total population (from 1920 to 2000), Ja

年次 Year	総人口 Total population			日本人人口 Japanese population		
	男女計 Both sexes	男 Male	女 Female	男女計 Both sexes	男 Male	女 Female
大正9年 1920 ⁰	55,963	28,044	27,919	-	-	-
10年 1921	56,666	28,412	28,254	-	-	-
11年 1922	57,390	28,800	28,590	-	-	-
12年 1923	58,119	29,177	28,942	-	-	-
13年 1924	58,876	29,569	29,307	-	-	-
14年 1925 ⁰	59,737	30,013	29,724	-	-	-
15年 1926	60,741	30,521	30,220	-	-	-
昭和2年 1927	61,659	30,982	30,678	-	-	-
3年 1928	62,595	31,449	31,146	-	-	-
4年 1929	63,461	31,891	31,570	-	-	-
5年 1930 ⁰	64,450	32,390	32,060	-	-	-
6年 1931	65,457	32,899	32,559	-	-	-
7年 1932	66,434	33,355	33,079	-	-	-
8年 1933	67,432	33,845	33,587	-	-	-
9年 1934	68,309	34,294	34,015	-	-	-
10年 1935 ⁰	69,254	34,734	34,520	-	-	-
11年 1936	70,114	35,103	35,011	-	-	-
12年 1937	70,630	35,128	35,503	-	-	-
13年 1938	71,013	35,125	35,888	-	-	-
14年 1939	71,380	35,226	36,154	-	-	-
15年 1940 ⁰	71,933	35,387	36,546	-	-	-
16年 1941	72,218	-	-	-	-	-
17年 1942	72,880	-	-	-	-	-
18年 1943	73,903	-	-	-	-	-
19年 1944	74,433	-	-	-	-	-
20年 1945 ⁰	72,147	-	-	-	-	-
21年 1946	75,750	-	-	-	-	-
22年 1947 ⁰	78,101	38,129	39,972	-	-	-
23年 1948	80,002	39,130	40,873	-	-	-
24年 1949	81,773	40,063	41,710	-	-	-
25年 1950 ⁰	83,200	40,812	42,388	82,672	40,514	42,158

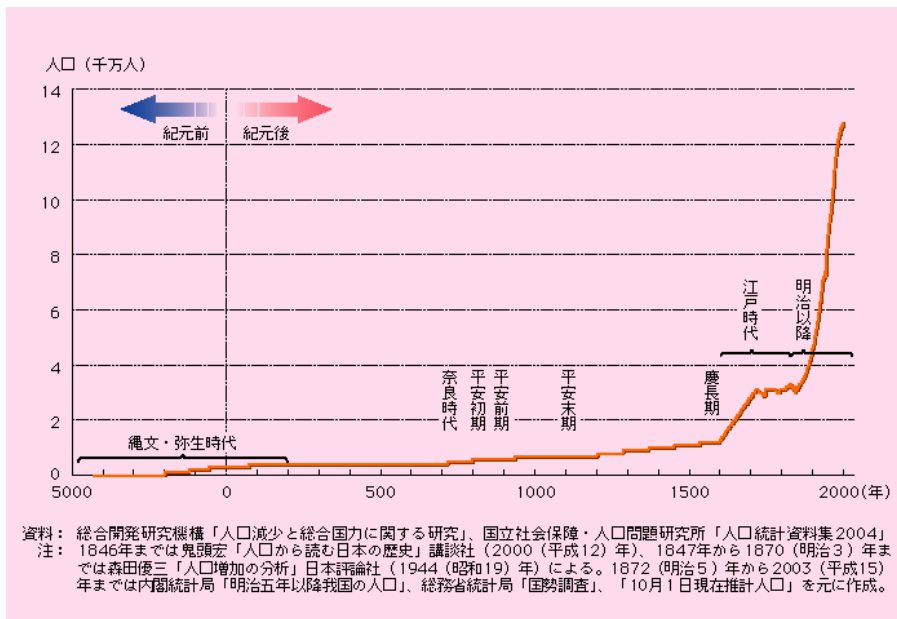
日本の人口(万人)



総務省統計局 長期時系列データ 我が国の推計人口 大正9年～平成12年

日本人口の推移（縄文弥生～）

平成16年版 内閣府 少子化社会白書より

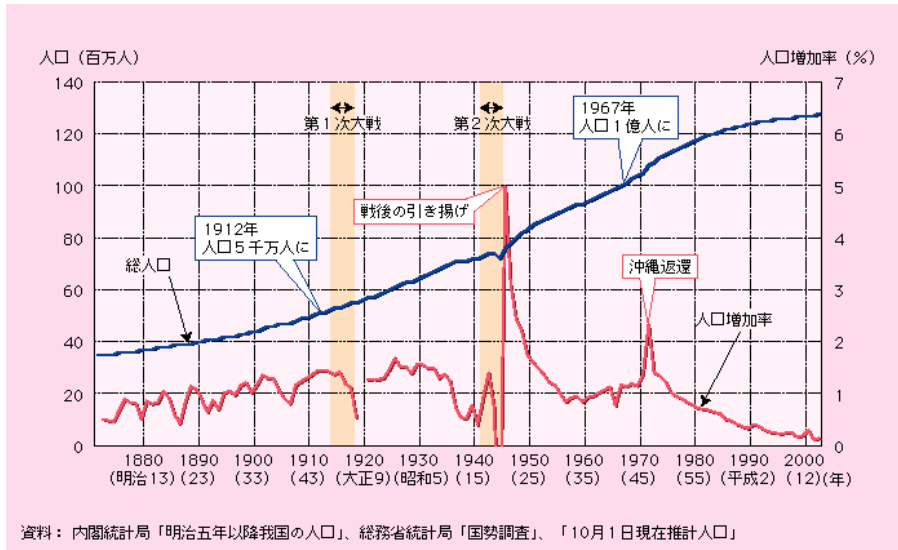


資料：総合開発研究機構「人口減少と総合国力に関する研究」、国立社会保障・人口問題研究所「人口統計資料集2004」
注：1846年までは鬼頭宏「人口から読む日本の歴史」講談社（2000（平成12）年）、1847年から1870（明治3）年までは森田俊三「人口増加の分析」日本評論社（1944（昭和19）年）による。1872（明治5）年から2003（平成15）年までは内閣統計局「明治五年以降我が国の人口」、総務省統計局「国勢調査」、「10月1日現在推計人口」を元に作成。

<http://www8.cao.go.jp/shoushi/whitepaper/w-2004/html-h/html/g1110030.html>

日本人口の推移（明治～）

平成16年版 内閣府 少子化社会白書より



<http://www8.cao.go.jp/shoushi/whitepaper/w-2004/html-h/html/g1110040.html>

$$\text{人口増加率 (\%)} = (\text{人口} / \text{前年の人口} - 1) \times 100$$

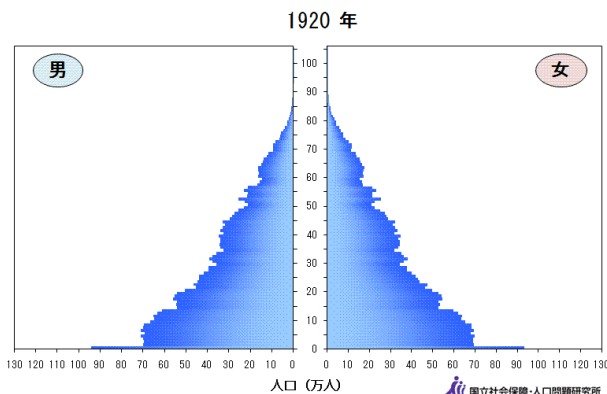
17

日本人口の年齢構成

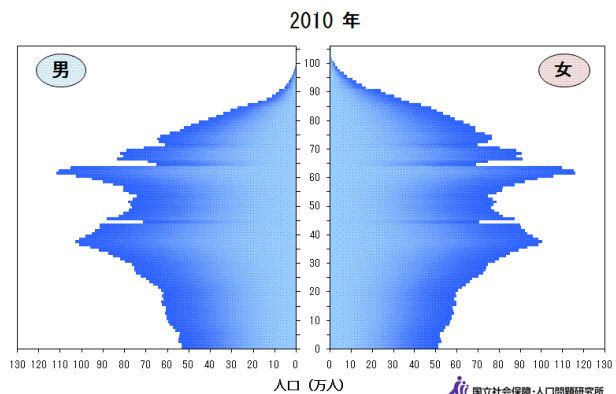
人口動態は年齢構成に強く影響される

1920年

2010年



資料：1920～2010年：国勢調査、推計人口、2011年以降：「日本の将来推計人口（平成24年1月推計）」。



資料：1920～2010年：国勢調査、推計人口、2011年以降：「日本の将来推計人口（平成24年1月推計）」。

国立社会保障・人口問題研究所 より

<http://www.ipss.go.jp/>

18

基礎用語

出生率 女性が産む子供の数の指標。年齢に依存

合計特殊出生率 total fertility rate, TFR

一人の女性が生涯に産む子供の数の指標
日本女性の TFR は 1.41 (2012年)

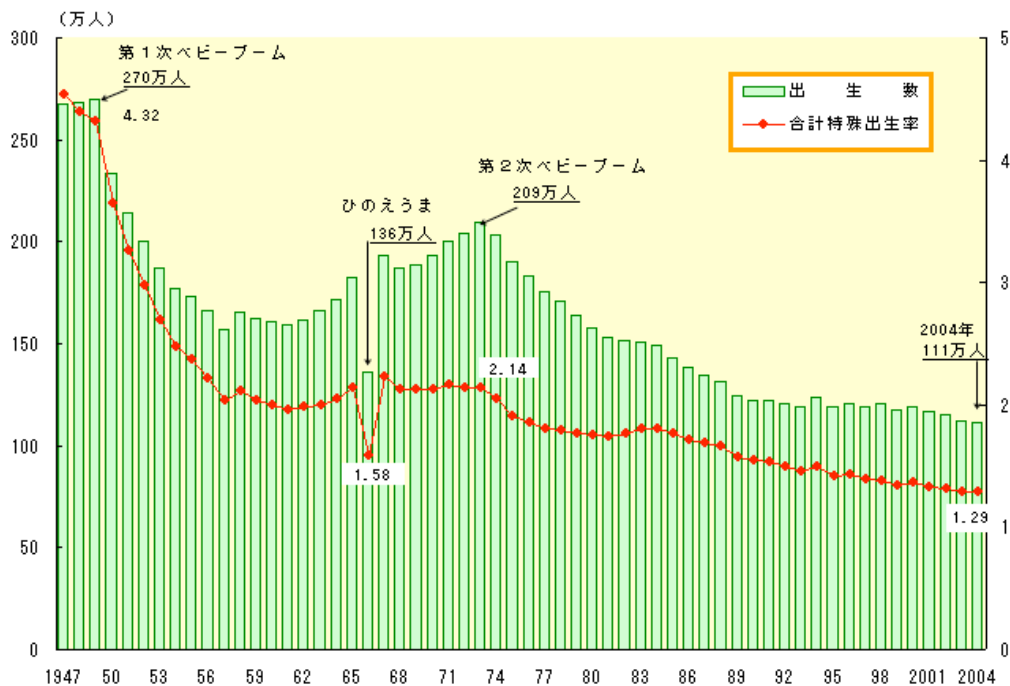
人口の置換水準、置換率

人口が増えも減りもしない状態を維持するために必要な
合計特殊出生率のこと

死亡率が高ければ置換水準も高くなる。
死亡率が十分低い先進諸国では概ね 2.1 程度

19

日本女性の合計特殊出生率



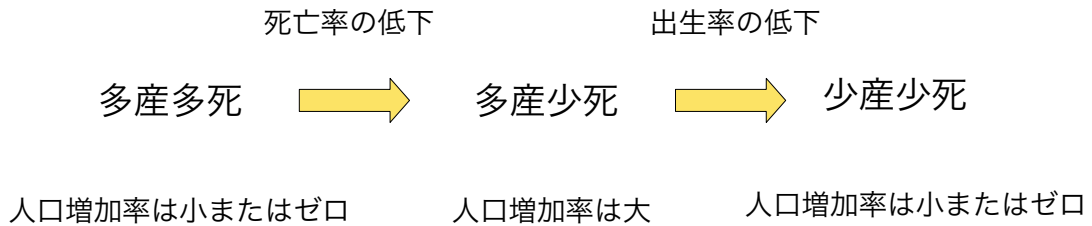
国立社会保障・人口問題研究所 少子化情報ホームページより

<http://www.ipss.go.jp/syoushika/seisaku/html/111b1.htm>

20

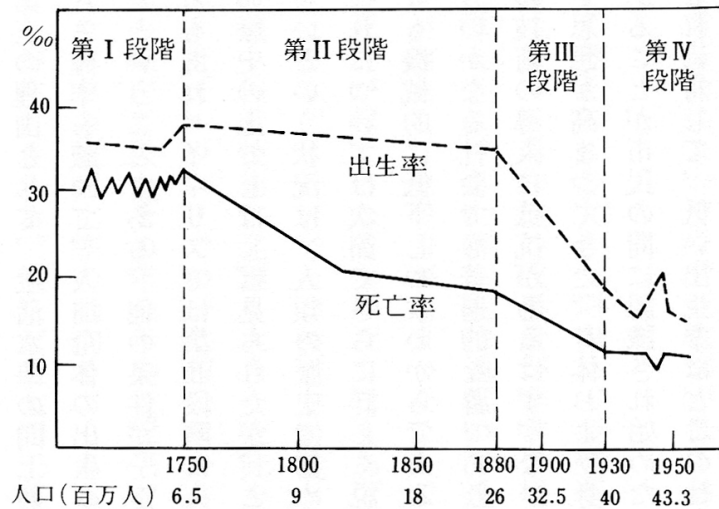
人口転換

欧米先進諸国において、
18～19世紀の死亡率低下と19～20世紀の出生率低下がもたらした人口増加パターンを人口転換 demographic transition と呼ぶ



人口転換の例

図5 イギリスの人口転換



出所：Political and Economic Planning (1955).

ただし部分的変更を加えた。

世界の人口第2版 河野 2000 より

日本の人口転換

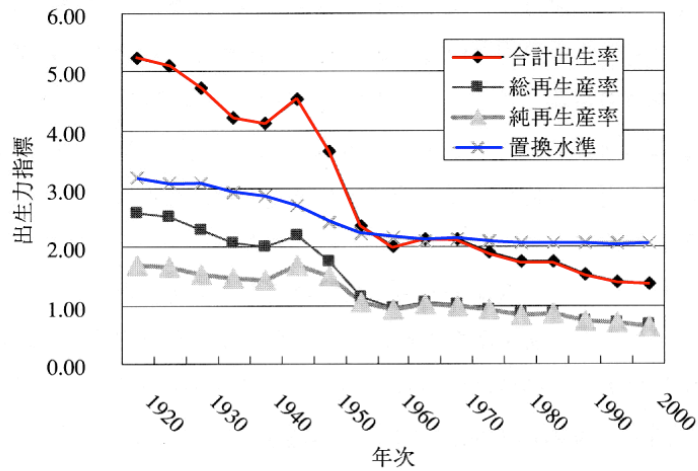


図 P-2 日本の各種出生力指標 (1920~2000年)

- (注) 1: 置換水準は合計出生率に対応する。
 2: 1920年および1935年の諸指標は上記資料で得られないので、筆者の計算によるハテライト指数に基づいて前後の年次の数値とリンクさせて推計した。また、1945年の数値も存在しないので、その位置には1947年の値が当てられている。

(資料) 国立社会保障・人口問題研究所『人口統計資料集』2004年版。

少子化の人口学 大淵寛, 高橋重郷 編著 2004 より

死亡率の低下

経済発展による生活水準の向上・医療技術の発展が主な要因

食料生産の増加、栄養状態の向上、衛生状態の改善、伝染病治療の確立

死亡率低下は全ての人の願い。世界各地域で低下傾向

表 6 世界の主要地域別粗死亡率の推移：1950-2000 (%)

主要地域	1950-55	1960-65	1970-75	1980-85	1985-90	1990-95	1995-2000
世界	19.7	15.6	11.6	10.3	9.6	9.3	8.9
先進地域	10.2	9.4	9.4	9.6	9.6	10.1	10.1
途上地域	24.2	18.2	12.4	10.5	9.6	9.1	8.6
アフリカ	26.6	22.8	19.2	16.3	14.4	14.4	13.9
アジア	23.9	17.6	11.4	9.6	8.8	8.3	7.7
東部アジア	23.3	15.7	6.4	6.6	6.6	7.1	7.0
ヨーロッパ	10.6	9.7	10.1	10.7	10.5	11.3	11.3
ラテンアメリカ・カリブ	15.6	12.4	9.9	7.9	7.2	6.7	6.5
北部アメリカ	9.4	9.3	9.0	8.5	8.6	8.6	8.3
オセアニア	12.3	10.5	9.6	8.1	7.9	7.5	7.7

出所：UN (1999a).

平均寿命の拡大

表7 世界主要地域および主要国の男女合計平均寿命の推移：1950-2000 (歳)

地域・主要国	1950-55	1960-65	1970-75	1980-85	1985-90	1990-95	1995-2000
世界	46.5	52.4	58.0	61.3	63.1	64.1	65.4
先進地域	66.6	69.8	71.2	73.0	74.1	74.1	74.9
途上地域	40.9	47.7	54.7	58.6	60.5	61.9	63.3
アフリカ	37.8	42.1	46.1	49.5	51.3	51.1	51.4
アジア	41.3	48.4	56.3	60.4	62.5	64.5	66.3
東アジア	42.9	51.4	64.2	67.7	68.2	69.5	71.0
ヨーロッパ	66.2	69.8	70.8	71.9	73.0	72.6	73.3
ラテンアメリカ・カリブ	51.4	56.8	60.9	64.9	66.7	68.1	69.2
北アメリカ	69.0	70.1	71.5	74.7	75.2	75.9	76.9
オセアニア	60.9	64.6	66.6	70.1	71.3	72.9	73.8
日本	63.9	69.0	73.3	76.9	78.3	79.5	80.0
フランス	66.5	71.0	72.4	74.7	76.0	77.1	78.1
ドイツ	67.5	70.3	71.0	73.8	74.8	76.0	77.2
イタリア	66.0	69.9	72.1	74.5	76.2	77.2	78.2
スウェーデン	71.8	73.5	74.7	76.3	77.3	77.9	78.5
イギリス	69.2	70.8	72.0	74.0	75.0	76.2	77.2
米国	69.0	70.0	71.3	74.5	74.9	75.7	76.7
ロシア	67.3	69.0	68.2	67.6	69.2	66.5	66.6
エチオピア	32.9	36.9	41.0	42.0	44.6	45.2	43.3
エジプト	42.4	47.4	52.1	56.6	61.0	63.9	66.3
ナイジェリア	36.5	40.5	43.5	46.4	48.2	49.6	50.1
中国	40.8	49.5	63.2	66.6	67.1	68.4	69.8
バングラデシュ	36.6	40.6	44.9	49.7	52.8	55.6	58.1
インド	38.7	45.5	50.3	54.9	57.6	60.3	62.6
インドネシア	37.5	42.5	49.3	56.2	60.2	62.6	65.1
サウジアラビア	39.9	45.9	53.9	62.6	67.5	69.6	71.4
キューバ	59.3	65.2	70.7	73.4	74.1	74.9	75.7
メキシコ	50.6	58.3	62.4	67.5	69.6	71.2	72.2
ブラジル	51.0	55.8	59.6	63.1	64.6	65.7	66.8

出所：UN (1999a).

死亡率の低下は
平均余命（寿命）の拡大をもたらす

世界の人口第2版 河野 2000 より

年齢別死亡率

死亡率は年齢に依存

一般に乳幼児、老人の死亡率は高い

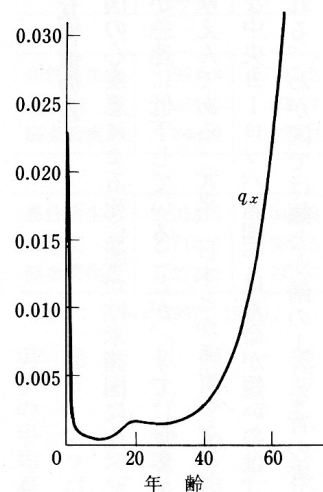
衛生状態の向上 → 乳幼児死亡率の低減

介護体制の整備 → 老人死亡率の低減

生存率 = 1 - 死亡率

年齢別死亡率をまとめた生命表は
人口動態予測の基礎データとなる

図17 オーストラリア男子1961年の年齢別死亡率



世界の人口第2版 河野 2000 より

死亡率低下と平均寿命の伸び

表 15 日本人女子の平均寿命の伸びに対する年齢別死亡率低下の寄与

観察期間	平均寿命 の 伸 び	年齢別死亡率の寄与率 (%)					
		0 歳	1-4 歳	5-14 歳	15-39 歳	40-64 歳	65 歳以上
1891-98/1947	17.10 歳	46.4	13.7	10.8	16.9	8.7	3.5
1947-70	20.70	20.9	19.7	5.8	26.9	16.7	9.9
1955-60	2.45	27.6	18.6	6.9	26.3	21.4	-0.8
1960-65	2.73	29.6	10.5	5.2	20.2	21.6	12.9
1970-75	2.23	9.5	2.4	2.2	10.3	29.5	46.1
1975-80	1.88	8.9	2.5	2.0	10.1	24.7	51.8
1980-85	1.72	7.0	2.4	1.4	4.8	18.5	65.9
1985-90	1.42	5.2	1.0	0.6	4.5	19.6	69.1
1990-95	0.95	2.7	0.4	-0.6	2.9	6.3	88.3
1970-95	8.19	7.3	1.9	1.4	7.2	21.7	60.4

出所：国立社会保障・人口問題研究所(1999).

世界の人口第2版 河野 2000 より

27

出生率の低下

死亡率の低下と異なり、出生率の低下は自明ではない

出生率の低下は、必ずしも倫理・道徳的な善ではない

出生と言う行為は、社会的・経済的・文化的な要因に強く影響される

産業社会では、少数の子供に十分な投資（教育など）を施すことが求められる、などといった説

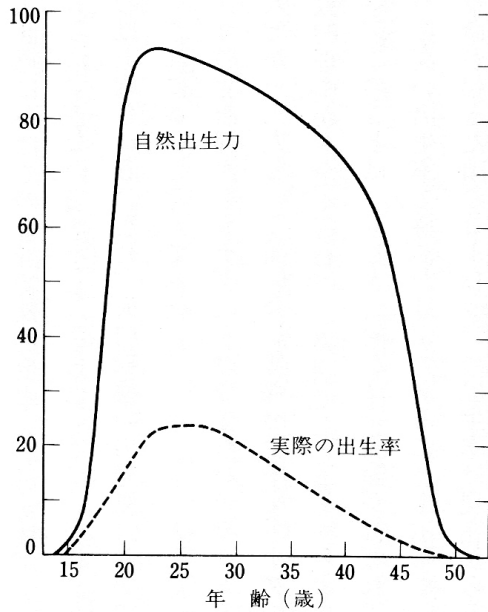
出生率の低下が少子化の原因

なぜ出生率が下がるのか？

28

年齢別出生率

図7 仮説的な自然出生力モデルと
72カ国平均の年齢別出生率



世界の人口第2版 河野 2000 より

出産可能な年齢は生物学的に限られている

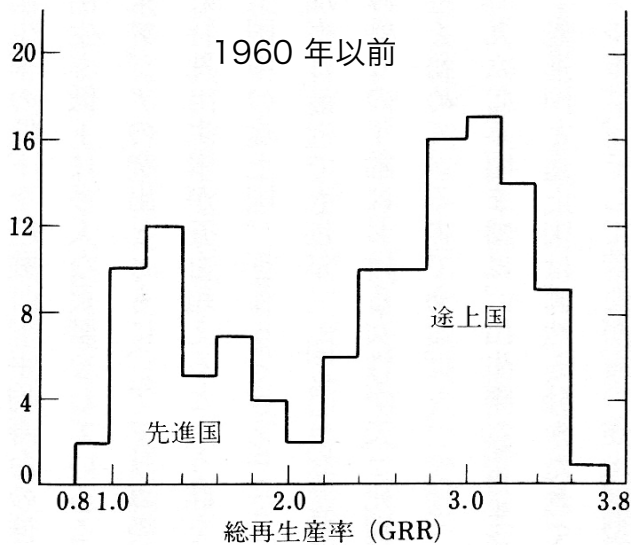
自然出生力 =
産児制限や中絶などの人為的抑制がない
自然のままの出生率

実際の出生率は自然出生力よりも
かなり小さい

出生率の指標として
合計特殊出生率 TFR がある

国別 TFR の分布

図8 125カ国の総再生産率の度数分布



出所：UN (1965).

世界の人口第2版 河野 2000 より

1950 ~ 1960 年の途上国
における人口爆発の構図

総再生産率 =
女兒だけの合計特殊出生率

世界地域別出生率の推移

表 16 世界の主要地域別出生率の推移：1950-2000

地 域	粗 出 生 率 (%)						合 計 特 殊 出 生 率					
	1950 -55	1960 -65	1970 -75	1980 -85	1990 -95	1995 -2000	1950 -55	1960 -65	1970 -75	1980 -85	1990 -95	1995 -2000
世 界	37.3	35.2	30.9	27.4	23.9	22.1	4.99	4.95	4.48	3.58	2.93	2.71
先 進 地 域	22.0	19.6	16.1	14.5	12.3	11.2	2.77	2.67	2.11	1.84	1.68	1.57
途 上 地 域	44.4	41.8	36.3	31.4	27.1	24.9	6.16	6.01	5.43	4.15	3.27	3.00
ア フ リ カ	48.2	48.5	46.6	44.8	39.9	38.0	6.58	6.78	6.60	6.37	5.47	5.06
ア ジ ア	42.8	39.5	33.9	28.4	24.1	21.9	5.90	5.62	5.09	3.70	2.85	2.60
ヨ ー ロ ッ パ	20.9	19.0	15.6	14.4	11.5	10.3	2.56	2.56	2.14	1.87	1.57	1.42
ラテンアメリカ・カリブ	42.0	40.9	35.4	30.2	25.1	23.1	5.89	5.97	5.03	3.86	2.97	2.69
北 部 ア メ リ カ	24.6	22.2	15.7	15.6	15.3	13.8	3.47	3.34	2.01	1.80	2.02	1.94
オ セ ア ニ ア	27.7	26.8	23.9	19.8	19.1	17.9	3.84	3.95	3.21	2.58	2.50	2.38

注：粗出生率・合計特殊出生率は5カ年の平均年率である。

出所：UN (1999a)。

世界の人口第2版 河野 2000 より

31

人口転換説

社会・経済の発展により、人口は4つの段階を経て推移すると考える説

人口統計学的事実に基づく経験則であるが、多くの事例を包括的に説明

死亡率低下が始まる時期、出生率低下が始まる時期は、国や地域が置かれた経済的・政治的・文化的状況に強く依存する

少産少死の段階に至った後、人口はどのように推移するのか？

少子高齢化の根本問題

少子化 = 合計特殊出生率が人口置換率を下回る状況

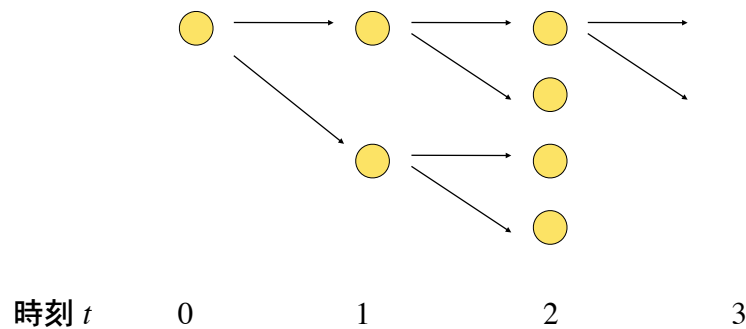
32

人口動態のモデル

モデル：複雑な現象をより良く理解するための理想状況

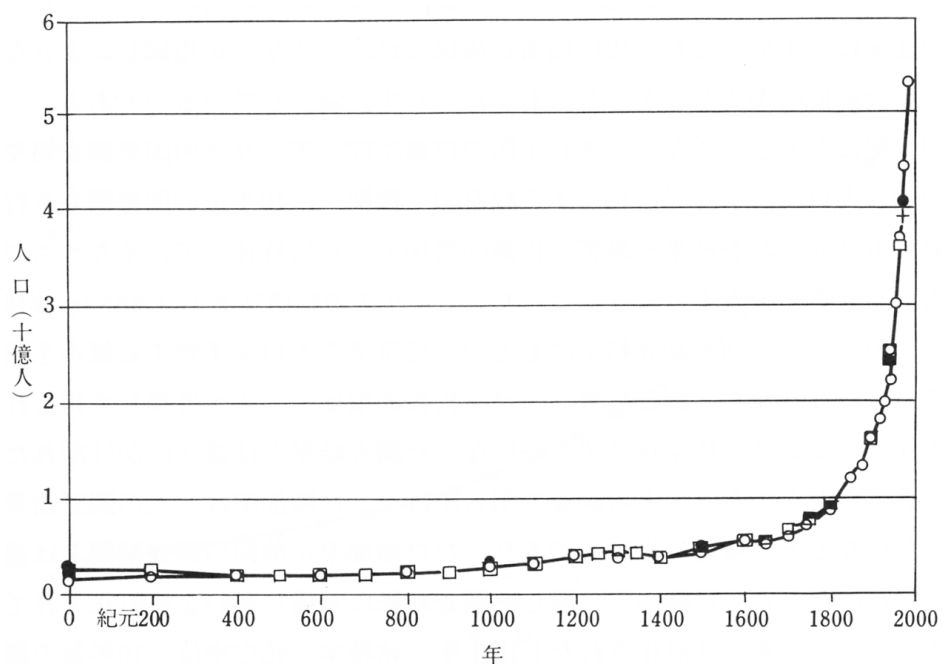
数理モデル：理想化された状況を数式で記述したもの

各個体が一定の時間間隔毎に同期して分裂して2個体になる過程を繰り返す
仮想的な生物集団



33

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？

34

個体数の時間変化

時刻 t での個体数を N_t と書くと、単位時間に 1 個体は 2 個体に分裂

$$N_{t+1} = 2N_t$$

単位時間内に同期して 2 個体に分裂するという仮定に基づくモデル

初期個体数が N_0 のとき、 $N_t = N_0 2^t$

より一般的に、1 個体が単位時間に r 倍に増殖すると仮定すれば、

$$N_{t+1} = rN_t \quad N_t = N_0 r^t$$

個体数～個体密度

厳密には生物の個体数は非負の整数値。

単位面積あたりの個体密度を考えればゼロもしくは正の実数。

個体密度に注目したダイナミクスを考える。

単位時間後の個体密度 N_{t+1} が前年の密度 N_t の関数で決まる場合

$$N_{t+1} = f(N_t)$$

生き物の増え方に依存して関数 f の概型は異なる

指数モデル

単位時間内に各個体が b 個体の子供を生み、生存確率 s で生き延びる仮想的な生物集団

$$N_{t+1} = \underbrace{bN_t}_{\substack{\uparrow \\ \text{集団に新たに} \\ \text{加わる個体数}}} + \underbrace{sN_t}_{\substack{\uparrow \\ \text{生き残る} \\ \text{個体数}}} = \underbrace{(b+s)}_{\substack{\uparrow \\ \text{正味の増加率}}} N_t$$

$$N_t = N_0 r^t \quad r = b + s \quad r: \text{マルサス係数}$$

$r > 1$ 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

37

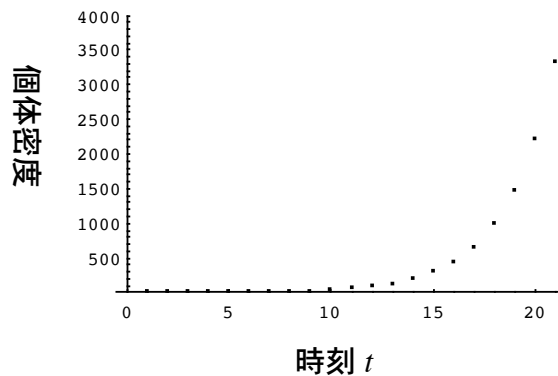
指数モデルの例

$r = 1.5, N_0 = 1$ の場合

$$N_t = N_0 r^t$$

$$N_t = 1.5^t$$

{1, 1.5, 2.25, 3.375, 5.0625, 7.59375, 11.3906, 17.0859, 25.6289, 38.4434, 57.665, 86.4976, 129.746, 194.62, 291.929, 437.894, 656.841, 985.261, 1477.89, 2216.84, 3325.26}



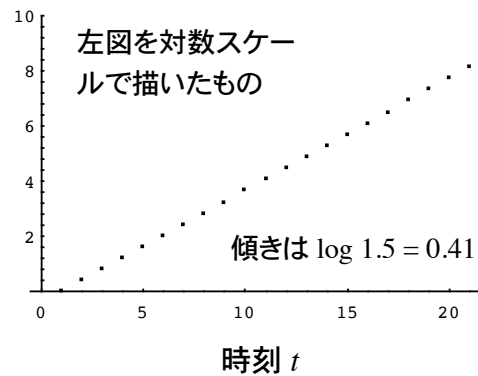
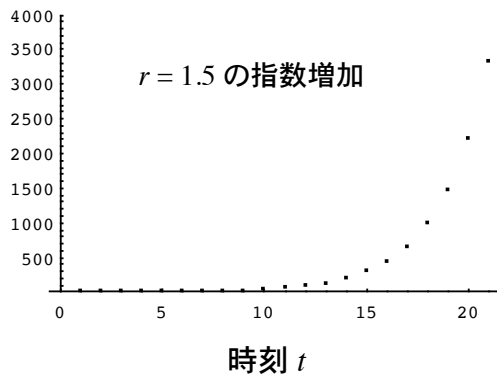
38

対数スケール

両辺の対数をとって $N_t = N_0 r^t$ $\log N_t = \log N_0 + t \log r$

指数増加の場合、個体密度の対数は時間 t に比例して増加

対数スケールのグラフは直線となり、傾きは $\log r$



39

大腸菌の増殖例

個体密度が指数的に変化しているかどうかを見るには、対数スケールに注目する。指数的に変化するなら直線になるはず。

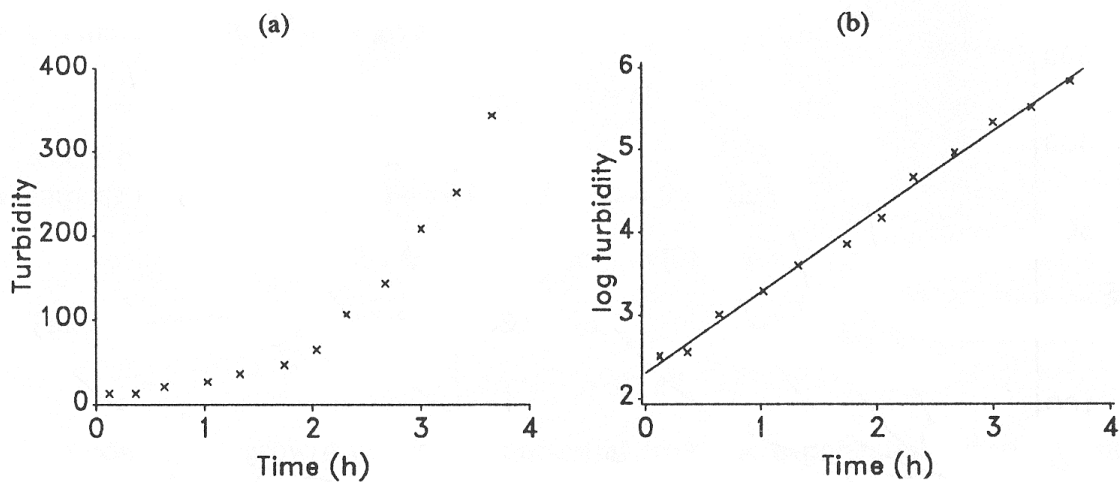
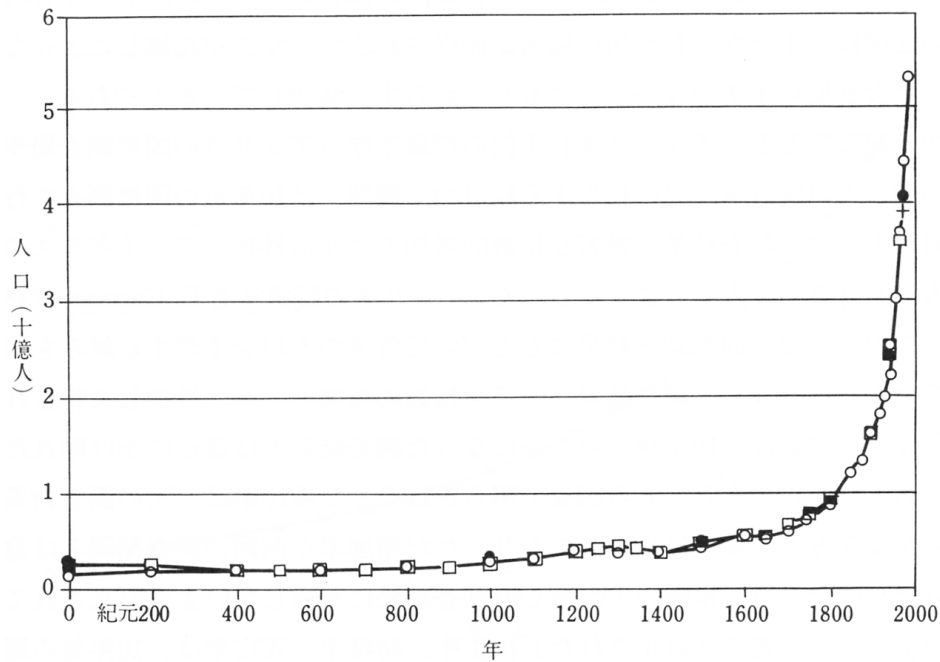


Figure 1.3 Exponential growth in the bacterium *E. coli*. (a) Increase in turbidity; (b) increase in log turbidity showing fitted straight line of exponential growth with rate constant $r = 0.84 \text{ h}^{-1}$. A turbidity of 100 units corresponds to approximately 10^8 cells/ml.

Brown and Rothery 1993

40

地球全体の人口増加



では、どのように人口は増加してきたのか？

41

地球人口は指数モデルに従うか

2000 年前の推定人口は 2.5 億。

現在 (2000 年時) の人口が 60 億となる増加率 r は？

毎年 r 倍に指数増加するモデル解

$$N(t) = N(0)r^t$$

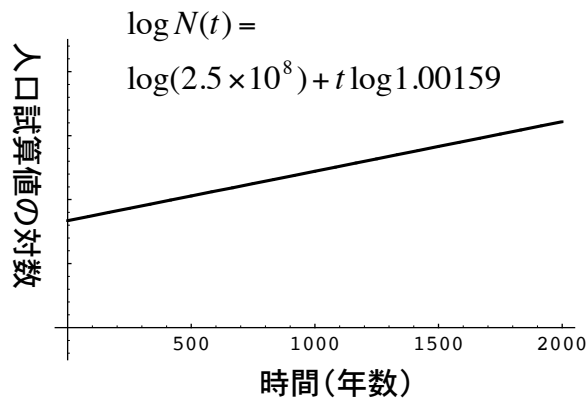
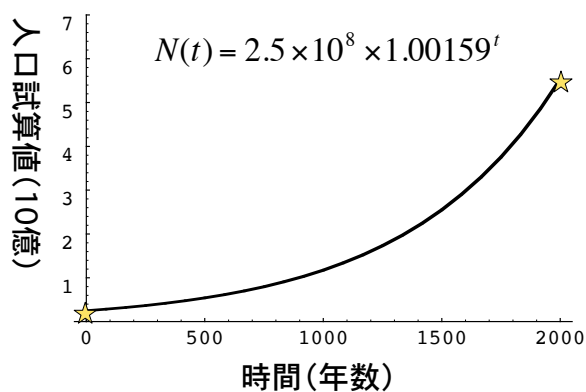
$$N(2000) = 2.5r^{2000} = 60$$

$$r = (60/2.5)^{1/2000} = 1.00159$$

年間 0.159% の増加を 2000年間継続すれば 60億に達する

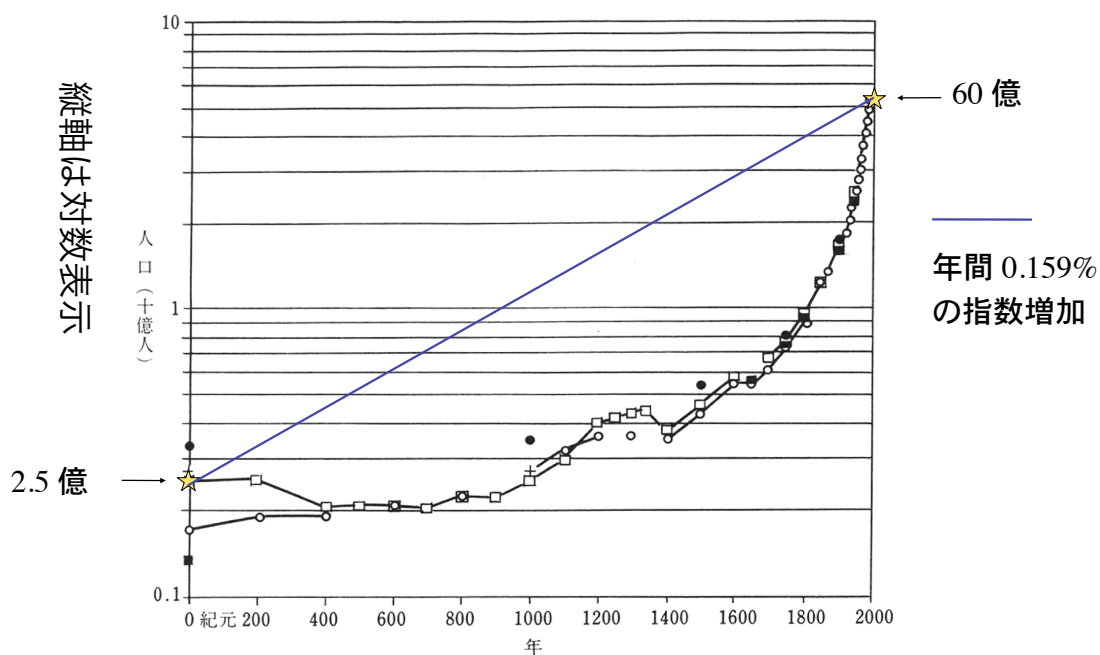
42

2000 年前に 2.5 億人、現在 60 億人に当てはめた指数モデル



43

過去 2000 年間の人口推移 (半対数表示)



過去2000年間人口は指数増加よりも急速に増加している！

44

倍加時間 Doubling Time

指数増加モデルで、個体密度が 2 倍に増加するのに要する時間を
倍加時間 (Doubling Time) と呼ぶ。

倍加時間を T_d とすると定義から $N_{t+T_d} = 2 N_t$

$N_t = N_0 r^t$ を代入して、 $N_0 r^{t+T_d} = 2 N_0 r^t$

結局、 $r^{T_d} = 2$ となり、 $T_d = \log 2 / \log r$

$r = 1.05 / \text{year}$ の場合、 $T_d = \log 2 / \log 1.05 = 14.2 \text{ years}$

$r = 1.005 / \text{year}$ の場合、 $T_d = \log 2 / \log 1.005 = 139.0 \text{ years}$

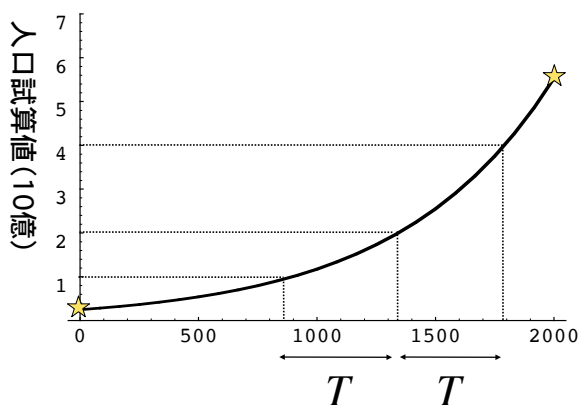
45

人類が指数増加した時の倍加時間

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

$\sim 0.693 / 0.00159 = 436 \text{ 年}$

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。

46

ロジスティックモデル

マルサス係数 r が一定であれば指数増加 ($r > 1$)

$$N_{t+1} = rN_t$$

マルサス係数 r が個体密度 N_t に比例して減少する場合
(食料不足・環境悪化等が原因)

$$N_{t+1} = r(1 - aN_t)N_t$$

この時、個体密度はロジスティック成長 logistic growth を示す

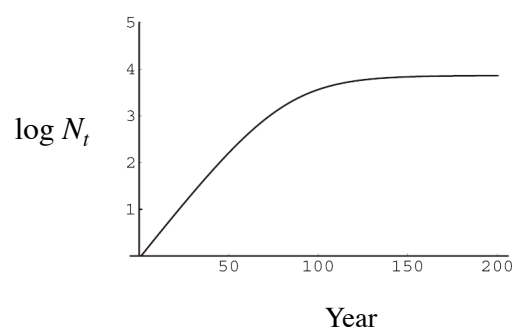
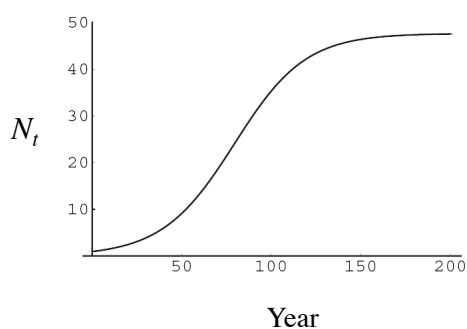
47

ロジスティック成長

$$N_{t+1} = r(1 - aN_t)N_t \quad r = 1.05, a = 0.001$$

$$N_0 = 1.0$$

{1, 1.04895, 1.10024, 1.15398, 1.21028, 1.26926, 1.33103, 1.39572, 1.46346, 1.53439, 1.60864, 1.68635, 1.76768, 1.85278, 1.94182, 2.03495, 2.13235, 2.23419, 2.34066, 2.45194, 2.56823, 2.68971, 2.8166, 2.9491, 3.08743, 3.23179, ..., 47.619}



48

ロジスティック成長の上限

$N_{t+1} = r(1 - aN_t)N_t$ に従う数列の極限

$$N_{t+1} = N_t = N^* \quad N^* = r(1 - aN^*)N^*$$

$$N^* = \frac{r-1}{ra} = K \quad \text{環境収容量}$$

$$N_{t+1} = r \left(1 - \frac{r-1}{rK} N_t \right) N_t$$

$$= N_t + (r-1) \left(1 - \frac{N_t}{K} \right) N_t$$

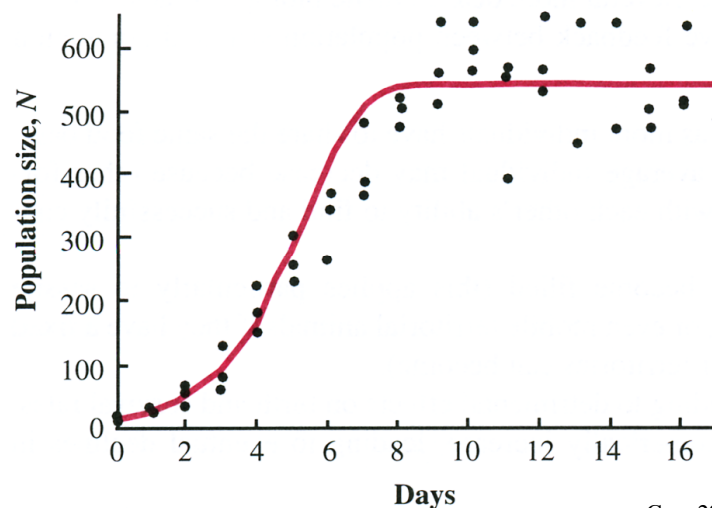
年間変化 $N_t = K$ の時ゼロ

49

ロジスティック成長の実例

ゾウリムシの個体群動態

Paramecium aurelia



Case 2000 より

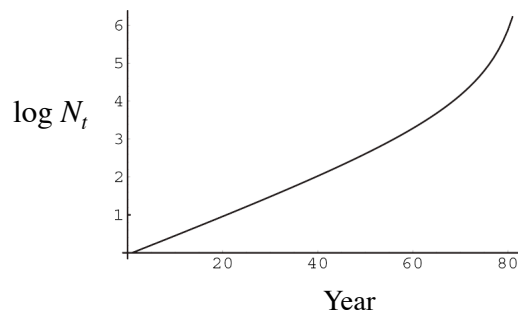
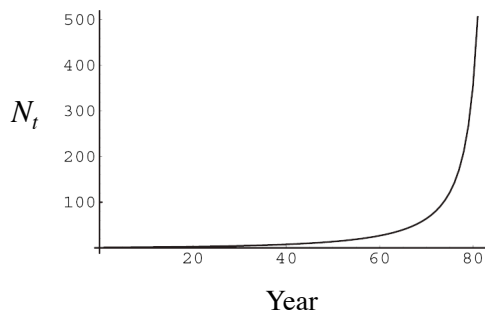
50

最後の審判日モデル

マルサス係数 r が個体密度 N_t に比例して増加する場合

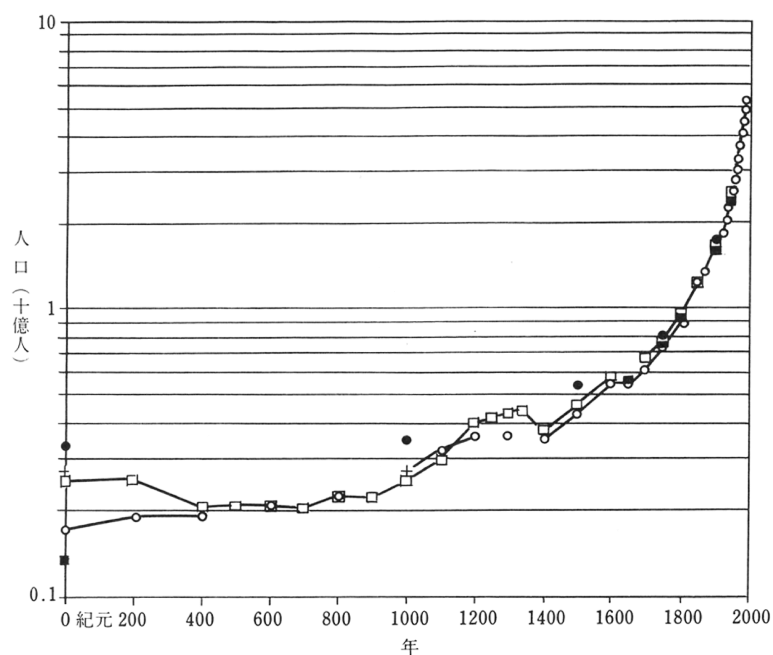
$$N_{t+1} = r(1 + aN_t)N_t \quad r = 1.05, a = 0.001 \quad N_0 = 1.0$$

{1, 1.05105, 1.10476, 1.16128, 1.22076, 1.28337, 1.34926, 1.41864, 1.49168, 1.5686, 1.64962, 1.73495, 1.82486, 1.9196, 2.01945, 2.12471, 2.23568, 2.35271, 2.47616, 2.60641, 2.74386, 2.88896, 3.04217, ... }



有限時間で個体密度は発散

人間の数の増加



「新人口論—生態学的アプローチ」
農山漁村文化協会 1998
Joel E. Cohen著 重定・瀬野・高須共訳

地球人口は指数増加よりも急激に増加している！

モデルの検討

指数増加モデル $N_{t+1} = N_t + (r - 1)N_t$

マルサス係数 r は定数ではなく、時代もしくは社会情勢に左右される。

ロジスティックモデル $N_{t+1} = N_t + (r - 1) \left(1 - \frac{N_t}{K}\right) N_t$

成長の限界である環境収容量はどれだけか不明

最後の審判日モデル $N_{t+1} = N_t + (r - 1)N_t + raN_t^2$

有限時間で人口は発散

人間集団には様々な齢の個体が存在。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。上記モデルは齢構造を無視

53

Thomas Malthus

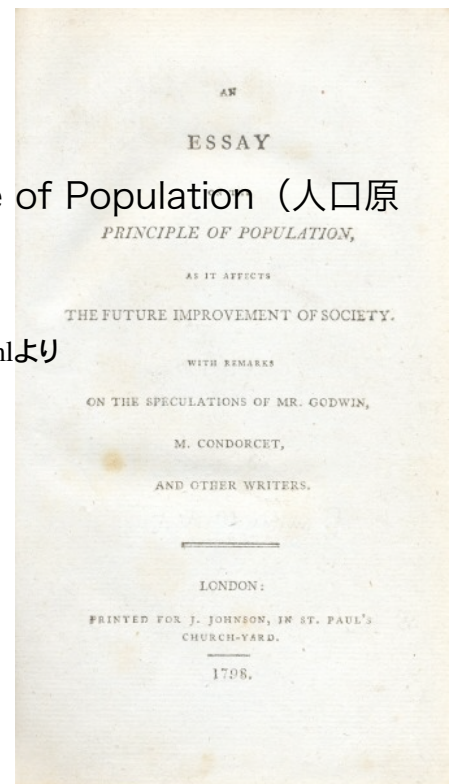


マルサス (1766-1834)

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。



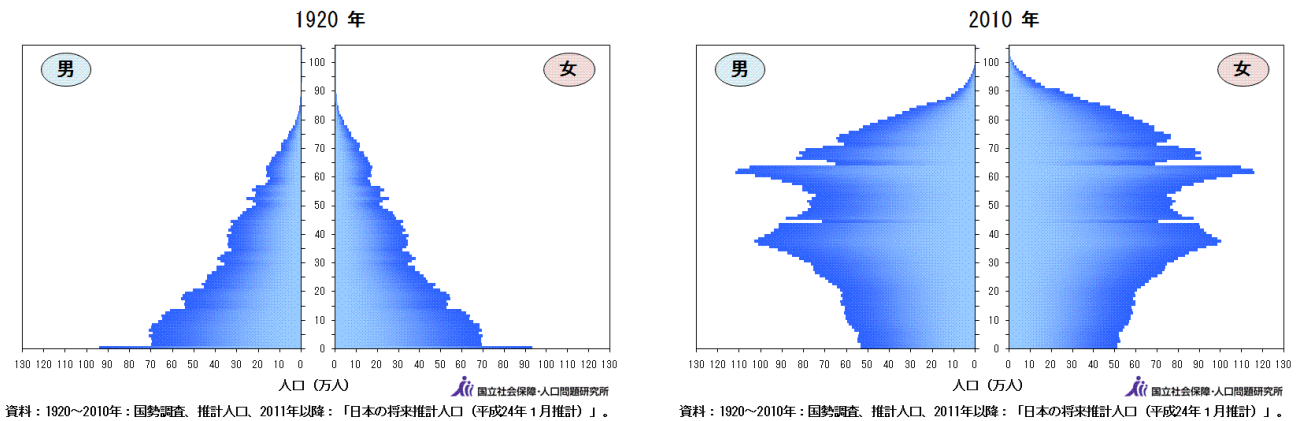
54

人口増加の予測モデル

人間集団には様々な年齢の個体が存在し、生存率や出生率は年齢毎に異なる。具体的な人口予測をするには集団の**年齢構造**を考慮する必要がある。

日本人口の年齢構造

国立社会保障・人口問題研究所 <http://www.ipss.go.jp/>



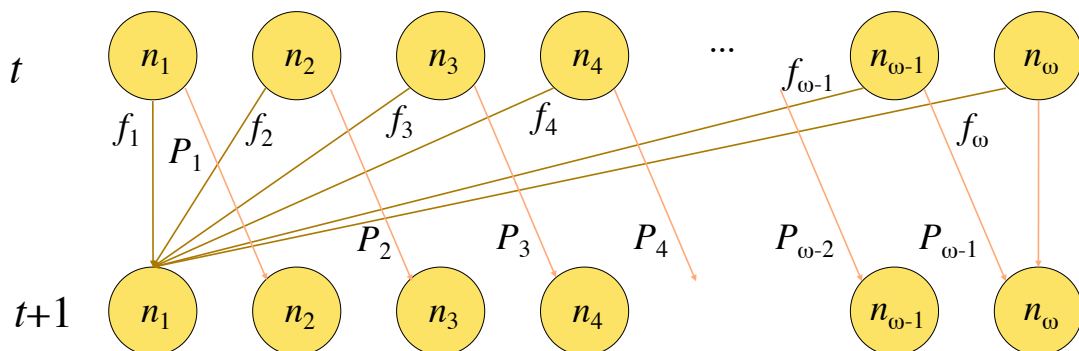
55

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

56

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

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

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

$$\begin{bmatrix} n_1' \\ n_2' \\ n_3' \\ \vdots \\ \vdots \\ n_\omega' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \cdot & \cdot & f_\omega \\ P_1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & P_{\omega-1} & P_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ n_\omega \end{bmatrix}$$

年齢構造モデル

$$\mathbf{n}' = \mathbf{A}\mathbf{n}$$

\mathbf{n} : 人口ベクトル

\mathbf{A} : レスリー (Leslie) 行列

57

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 ($i = 1, 2, 3, \dots, \omega$)

58

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

十分時間が経つと ($t \rightarrow \infty$),

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

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。

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

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

$$\mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ n_3(t) \\ \vdots \\ n_\omega(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \cdot & \cdot & f_\omega \\ P_1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & P_{\omega-1} & P_\omega \end{bmatrix}$$

A が定数行列の時、
解析的に解ける。

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

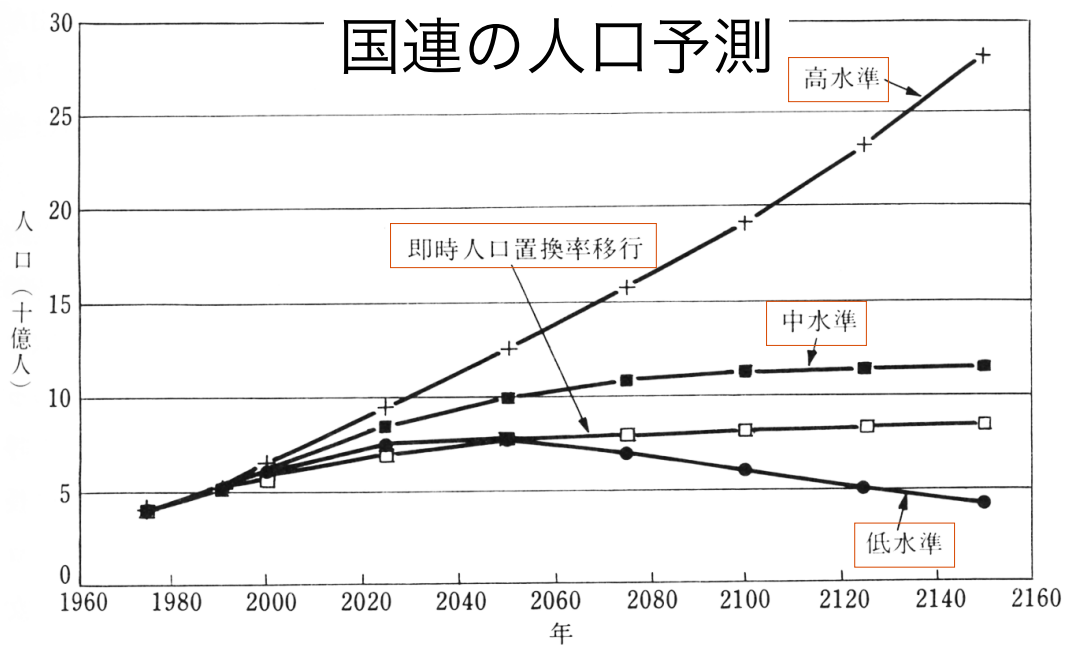


高出生率・低死亡率 = 高成長率



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。



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）

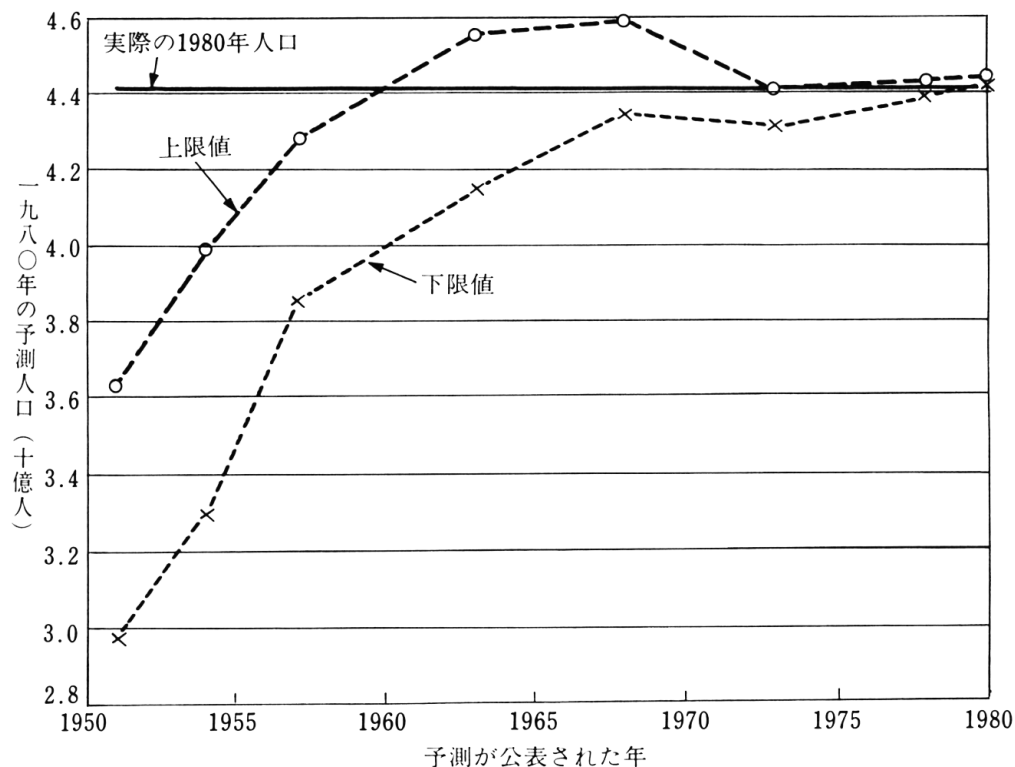
中水準：出生率が 2100 年に人口置換率 2.06 人まで緩やかに減少する場合

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

人口予測の困難さ



63

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しては不可能。

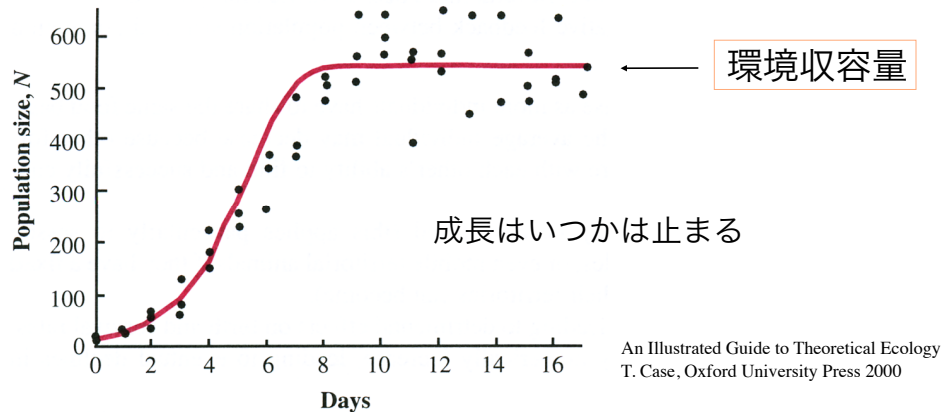
64

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



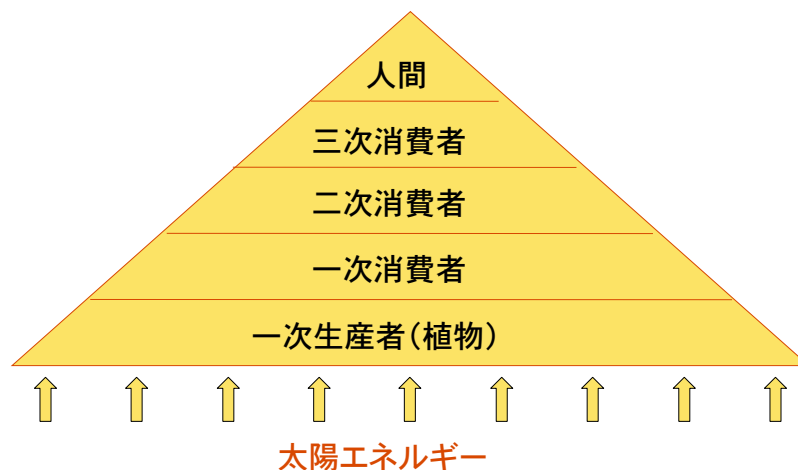
65

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



66

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 ⁽¹⁾ (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) ⁽²⁾	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)	1人当たり 面積(m ²)	人口 (億人)	
列1	2	3	4	5	6	7	8	9
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

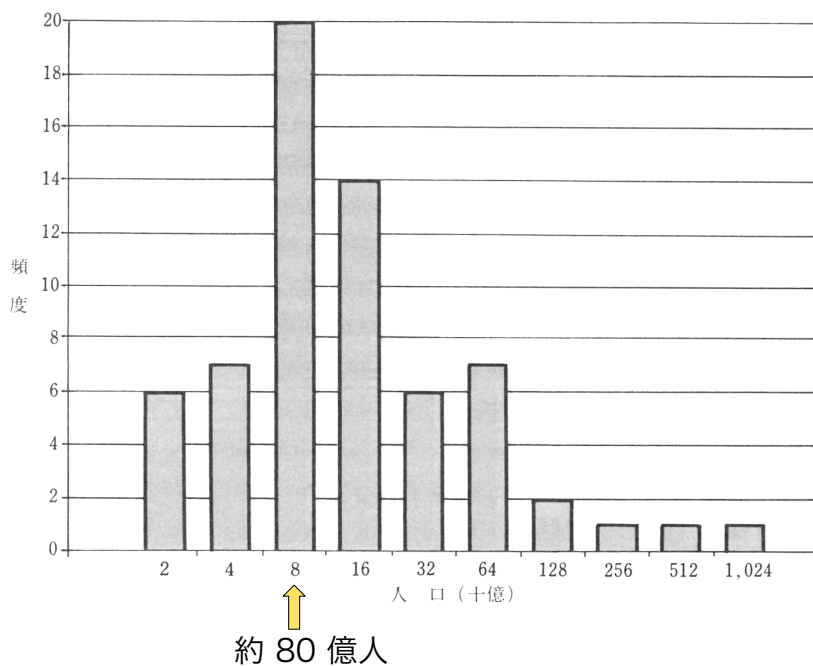
光合成以外の制限要因

- 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（感染症対策）
- 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。

69

最大地球人口の試算値の頻度分布



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

70

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**が持続可能性**。

目の前の獲物を獲れるだけ獲る（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。



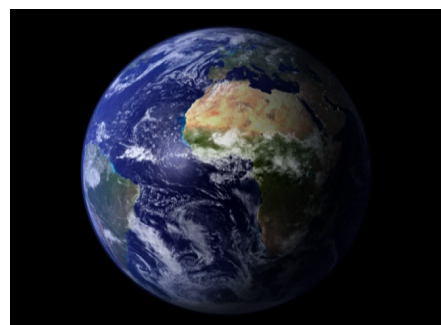
複雑適応形の1つであるエコシステムが、どのように進化し、維持されているのかを一般向けに解説した書籍

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

71

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

72