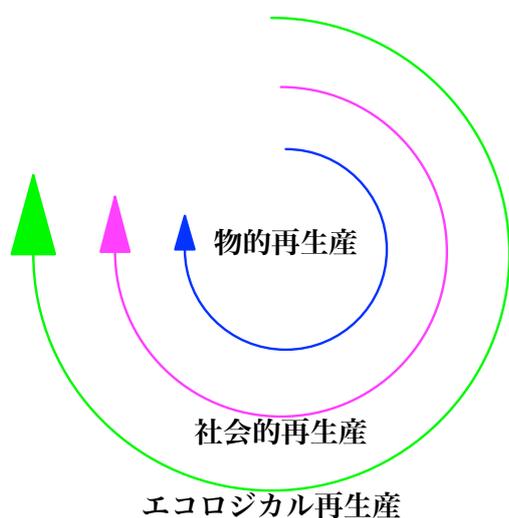


サステナブル
持続可能な社会を考えるガイドンス

システムダイナミクスによる
環境モデリング入門&ワールド3モデル



日本未来研究センター

システムダイナミクスグループ

山口 薫

ドラフト版バージョン 1.1 (無断複写禁止)

2023年8月24日

はしがき

日本未来研究センターは、2002年4月に設立されたNPO法人で、以下の3つのミッション（使命）を遂行し、日本および世界の未来の持続可能な発展 (Sustainable Development) に貢献すべく、微力ながら10年以上にわたり活動に取り組んできました。

- システムダイナミックスの普及
- 未来ビジョンが交換・学習できる交流の場（フォーラム）の提供
- 持続可能な地球モデル村および未来博物館の建設・運営

すなわち、未来をコンピュータ・シミュレーションの手法を用いてデザインし、コンピュータではデザインできない場合には私たちの頭脳を用いてデザインし、それらに立脚しつつ持続可能な地球村、社会を建設してゆきたいというのが私たちのミッションです。

その最初の普及ミッションであるシステムダイナミックス (System Dynamics) とは、ストック、フロー、変数、矢印の4つのアイコンを組み合わせることにより、企業の経営戦略、政府・自治体の公共政策、地球環境問題等々多岐にわたる複雑なシステムをお絵かき感覚でモデリングし、その構造をシミュレーション分析する手法で、1950年代にMIT（マサチューセッツ工科大学）のジェイ・フォレスター教授によって開発されたものです。4つのアイコンを組み合わせるといった簡単なモデリング手法のために、米国ではK-12（初等・中等）教育にもシステムダイナミックスが普及しています。

本書はこのシステムダイナミックスのモデリング手法をフルに発揮して、持続可能な社会の条件を、一歩ずつ段階的に考察してゆきます。システム思考・システムダイナミックスの有用性及びそのパワーを実感していただけると確信しています。

NPO 法人日本未来研究センター
理事長 山口 薫, Ph.D.
2016年5月

謝辞

システムダイナミックスの創始者、MITのジェイ・フォレスター教授に初めてお会いしたのは、1998年にカナダのケベックで開催された第16回国際システムダイナミックス学会でした。それ以来ほぼ毎年、同学会でフォレスター教授に励まされ続けてきて今年で18年が経ちました。同教授が開発したワールドダイナミック（ワールド2）モデル、彼の弟子が拡張したワールド3モデルはこれまでズーと私にとってモデリング研究の指針となってきました。今回、念願のワールドダイナミックス（ワールド2）及びワールド3のモデリング手法を本書で日本の読者に紹介することができることになりました。ここに同教授に深く感謝の気持ちを表したいと存じます。



MITの研究室にてジェイ・フォレスター教授と、2005年9月14日

さて、本書で取り上げたシステムダイナミックスを用いた再生産モデル、会計システムダイナミックスによる太陽光発電モデル及びワールド3モデルについて、受講生から多くの知見をいただきました。同志社大学大学院総合政策科学研究科 技術・革新的経営（TIM）専攻で「環境戦略モデリング」を受講された皆さん、同大学院ビジネス研究科 グローバルMBAコースで”Sustainable Business Modeling”を受講された皆さん、岐阜大学大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻^{*1}で「環境エネルギー経済学」を受講された皆さんにそれぞれ感謝します。岐阜大学での集中講義の機会をお与えいただきました工学研究科の守富 寛 教授 及び電力中央研究所の横山 隆壽 元研究員にも併せて感謝します。

山口薫, Ph.D. (経済学博士)

2016年6月

^{*1} 2017年度から、自然科学技術研究科エネルギー工学専攻、科目名「システムダイナミックス」に改組。

目次

はしがき	i
第 I 部 持続可能性とマクロ経済成長	1
第 1 章 持続可能性とは何か	3
1.1 持続可能性の定義	3
1.2 マクロ経済成長モデルの作成手順	4
1.3 マクロ経済成長モデル	5
1.4 マクロ成長モデル式	6
1.5 シミュレーション	7
1.6 持続可能性の検証	8
第 2 章 持続可能なマクロ経済成長	9
2.1 恒常的成長経路	9
2.2 マクロ経済成長モデル (mpc)	10
2.3 マクロ成長モデル式	11
2.4 シミュレーション	12
2.5 持続可能性の検証	12
第 II 部 物的再生産	13
第 3 章 物的再生産モデル	15
3.1 物的再生産モデル解題	15
3.2 物的再生産モデル	16
3.3 物的再生産モデル式	17
3.4 シミュレーション	18
3.5 持続可能性の条件	20
第 4 章 物的再生産（再生不可能資源）モデル	21
4.1 物的再生産（再生不可能資源）モデル解題	21
4.2 物的再生産（再生不可能資源）モデル	22
4.3 物的再生産（再生不可能資源）モデル式	23
4.4 シミュレーション	25
4.5 持続可能性の条件	26
第 5 章 物的再生産（代替資源）モデル	29
5.1 物的再生産（代替資源）モデル解題	29
5.2 物的再生産（代替資源）モデル	30
5.3 物的再生産（代替財資源）モデル式	31
5.4 シミュレーション	32

5.5	持続可能性の条件	33
第 III 部 社会的再生産		35
第 6 章	社会的再生産モデル	37
6.1	社会的再生産モデル解題	37
6.2	社会的再生産モデル	38
6.3	社会的再生産モデル式	39
6.4	シミュレーション	41
第 7 章	社会的再生産 (人口フィードバック) モデル	43
7.1	社会的再生産 (人口フィードバック) モデル解題	43
7.2	社会的再生産 (人口フィードバック) モデル	44
7.3	社会的再生産 (人口フィードバック) モデル式	45
7.4	シミュレーション	47
7.5	持続可能性の条件	48
第 IV 部 エコロジカル再生産		49
第 8 章	エコロジカル再生産モデル	51
8.1	エコロジカル再生産モデル解題	51
8.2	エコロジカル再生産モデル	52
8.3	エコロジカル再生産モデル式	53
8.4	シミュレーション	56
8.5	持続可能性の検証	57
第 9 章	エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル	61
9.1	エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル解題	61
9.2	エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル	62
9.3	エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル式	63
9.4	シミュレーション	67
9.5	持続可能性の条件	70
9.6	持続可能な社会へのガイダンス：まとめ	71
第 V 部 代替生産—太陽光発電—モデル		73
第 10 章	会計システムダイナミックス	75
10.1	持続可能性と市場経済における収益性	75
10.2	会計システムダイナミックスによる複式簿記	76
10.3	財務 3 表簡素モデル	79
第 11 章	太陽光発電モデル	83
11.1	代替資源—太陽光発電—モデル解題	83
11.2	太陽光発電モデル	84
11.3	太陽光発電モデル式	86
11.4	シミュレーション	89
11.5	太陽光発電モデルの拡張及び応用モデル挑戦	94

第 VI 部 成長の限界：ワールド 3 モデル	97
第 12 章 ワールド 3 モデルの作成	99
12.1 ワールド 3 モデルについて	99
12.2 サブモデル 1：世界の人口	102
12.3 サブモデル 2：合計出生率	110
12.4 サブモデル 3：残留性汚染	115
12.5 サブモデル 4：再生不可能資源	119
12.6 サブモデル 5：食料生産	124
12.7 サブモデル 6：土地収穫量	129
12.8 サブモデル 7：土地開発・肥沃度	134
12.9 サブモデル 8：工業生産	139
12.10 サブモデル 9：サービス生産	142
12.11 サブモデル 10：雇用数	146
12.12 サブモデル 11：人間的豊かさ指標	149
第 13 章 ワールド 3 モデルのシナリオ分析	153
13.1 シナリオ 1：参照シミュレーション	153
13.2 シナリオ 2：再生不可能な資源が 2 倍あった場合	155
13.3 シナリオ 3：シナリオ 2 + 汚染除去技術	159
13.4 シナリオ 4：シナリオ 3 + 土地の収穫率改善	162
13.5 シナリオ 5：シナリオ 4 + 土地侵食軽減の技術	165
13.6 シナリオ 6：シナリオ 5 + 資源の効率改善の技術	168
13.7 シナリオ 7：シナリオ 2 + 人口増加の抑制政策	171
13.8 シナリオ 8：シナリオ 7 + 工業生産の抑制政策	174
13.9 シナリオ 9：シナリオ 6 + シナリオ 8	177
13.10 シナリオ 10：シナリオ 9 を 20 年早く導入	180
13.11 全シナリオの比較分析	183
13.12 持続可能な社会 vs 資本主義社会	186
	187

第1部

持続可能性とマクロ経済成長

第 1 章

持続可能性とは何か

1.1 持続可能性の定義

持続可能性、持続可能な社会とは何か？ 一般によく用いられる代表的な定義によると、以下のようになります。

Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. [?, p.43, 1987].

持続可能な開発とは、未来世代が自らのニーズを満たす能力を損なうことなく、現代のニーズを満たすような開発のことである（筆者訳）。

著名な「成長の限界」では以下のように定義されています。

The simplest definition is: A sustainable society is one that can persist over generations, one that is far-seeing enough, flexible enough, and wise enough not to undermine either its *physical* or its *social* systems of supports. (イタリックは著者追加) [?, p.209, 1992].

最も簡潔な定義: 持続可能な社会とは、何世代にもわたって存続できる社会であり、**物的なまたは社会的なサポートシステムが損なわれることのないように、かなり先を展望でき、柔軟に対応でき、賢明に振る舞える社会のことである**（筆者訳）。

こうした代表的定義からも明白なように、私たちの社会が持続可能であるとは、生産と消費が繰り返し物的に継続され、人間社会とそれを支える動植物のエコロジー環境が未来永劫に持続されるような状態のことです。このように考えてくると、経済学的には、持続可能性とは資本、人口、資源が継続的に再生産されるということと同義であるということに、筆者はある日ふと思いつきました。

そこでこの再生産性の概念を用いて持続可能性を定義する方が、上で引用した持続可能性の定義よりもより科学的で厳密になるのではと世界未来研究連合学会の国際セミナーで提案しました [?, 1997]。そして、この考え方をシステムダイナミックスのモデリング手法を用いて一歩ずつ展開しながらモデルを具体的に構築してゆき、国際システムダイナミックス学会で報告しました [?, 2001]。その後、この論文は "Handbook of Sustainable Development Planning: Studies in Modelling and Decision Support" の第 3 章 [?, 2004]、及び第 2 版の第 4 章 [?, 2013] にそれぞれ "Long-Term Sustainability"

本書の第I部から第IV部までは、こうした研究成果に基づいています。

本節以下では「中高生から研究者・ビジネスマンまで学際的に学べるシステムダイナミクス - Vensim6 ユーザーズガイド (以下、Vensim ガイド)」第1章から第5章までの知識を前提とします。同時並行的に学習して行って下さい。同ガイドは、日本未来研究センターのサイト (www.muratopia.net) から無料ダウンロードできます。

というタイトルで収録され、出版されました。

こうしたこれまでの研究成果をもとに、本書では持続可能性とは以下の3つの再生産条件が満たされた状態であると定義します。

- 物的再生産 - 資本が維持され、生産活動が継続される状態。
- 社会的再生産 - 人口が維持され、社会生活が継続される状態。
- エコリジカル再生産 - 物的及び社会的再生産が継続され、かつ資源等のエコリジカル環境が再生され持続される状態。

そこで、こうした再生産性が満たされる条件を、一歩ずつ段階的に考察してゆくことにします。

1.2 マクロ経済成長モデルの作成手順

まず、持続可能性を再生産過程として考察するためには、簡単なシステムダイナミクス (SD) のマクロ経済成長モデルを構築して、そこから出発してゆくのが最善のアプローチとなります。以下は、初心者が SD マクロ経済モデルを作成する際に必要な一般的手順です。

手順1、モデルの境界 マクロ経済学の教科書から、マクロ経済成長に関連すると思われる次のようなモデル変数を拾い上げます：国内総生産、消費、貯蓄、投資、資本、生産関数、消費関数、貯蓄関数。

マクロ経済成長に直接関係のないような変数は思い切って捨棄します。例えば、財政支出、貿易、技術革新等々。

手順2、ストック・フローの峻別 拾い上げたモデル変数をストックとフローの変数に区別します。時間の流れが止まったある一時点でも計測できる変数がストックです。ある一定期間時間が流れないと計測できない変数がフローです。ここでは資本のみがストックで、他の変数は全てフローとなります。

そこで資本とは何か、なぜストックとなるのかをさらに深く考えて下さい。日本のマクロ経済における資本とは何でしょうか。国富でしょうか。その大きさはいくらぐらいで、どのように変動しているのでしょうか。

手順3、ストック・フロー図の作成 システムはストック変数の集まりで構成されます。ストックは、フローによってのみ変化します。資本のストックを変化させるフローは何かと考え、ストック・フロー図を作成します。

手順4、因果ループの作成 ストックやフローを含めた変数を因果関係の矢印で結んでゆき、因果ループ図を作成します。因果関係が明確でない場合、例えば消費関数や生産関数等は他の簡単な定数で置き換えてみましょう。

(企業モデルへの応用)

ストック1個からなるシステムは最小のシステムですが、この最小システムからなるモデルの応用例を考えて下さい。例えば、マクロ経済はミクロ経済における企業の生産活動の集合体ですので、企業の生産活動もマクロモデルと同様に考察できるはずで、具体的な企業の生産活動をイメージし、以上の手順を考えながら、企業モデルを作成してみてください。

1.3 マクロ経済成長モデル

図 1.1 は前ページの手順に従って作成されたマクロ経済成長モデル図です。この図を参照しながらお絵描きをし、モデル図を完成させて下さい。

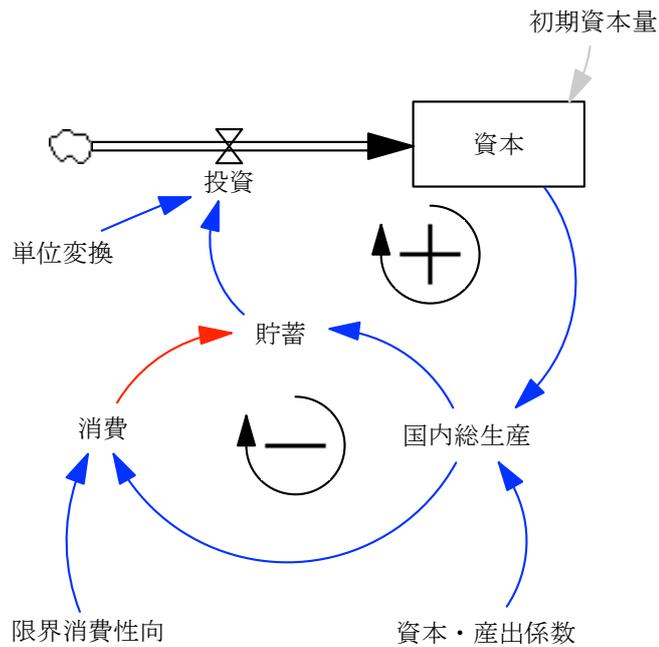


図 1.1 マクロ経済成長モデル

システム思考

資本から始まる因果ループ図を分析しなさい。ここでは正と負の因果ループが一つずつ観察されます。どちらのループが支配的になるかによって、国内総生産の振る舞いが異なってきます。その振る舞いの違いを、頭の中でシステム思考してください。

1.4 マクロ成長モデル式

マクロ経済成長モデルのお絵描きができたら、次にこのモデルにモデル式を入力してゆきます。

「Units: 機械」の後ろに追加されている [0, 800, 10] の数字は定数がシミュレーション実行中に取りうる範囲とその増分を表しています: [最小、最大、増分]。

資本のみを生産要素とする生産関数。

国内総生産に比例する消費関数。

Units: Dmnl は Dimensionless の略で、単位が無い、無次元であることを示しています。

初期資本量=400

Units: 機械 [0, 800, 10]

単位変換= 1

Units: 機械/食料

国内総生産=資本/資本・産出係数

Units: 食料/年

投資=貯蓄*単位変換

Units: 機械/年

消費=国内総生産*限界消費性向

Units: 食料/年

貯蓄=国内総生産-消費

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資, 初期資本量)

Units: 機械

資本・産出係数=4

Units: 機械/(食料/年) [0,8,0.01]

限界消費性向=0.8

Units: Dmnl [0.5,1,0.01]

1.5 シミュレーション

以下の自作グラフ及び自作表を作成し、シミュレーションを実行して下さい。

Vensim ガイド第 10 章の自作グラフ及び表を参照。

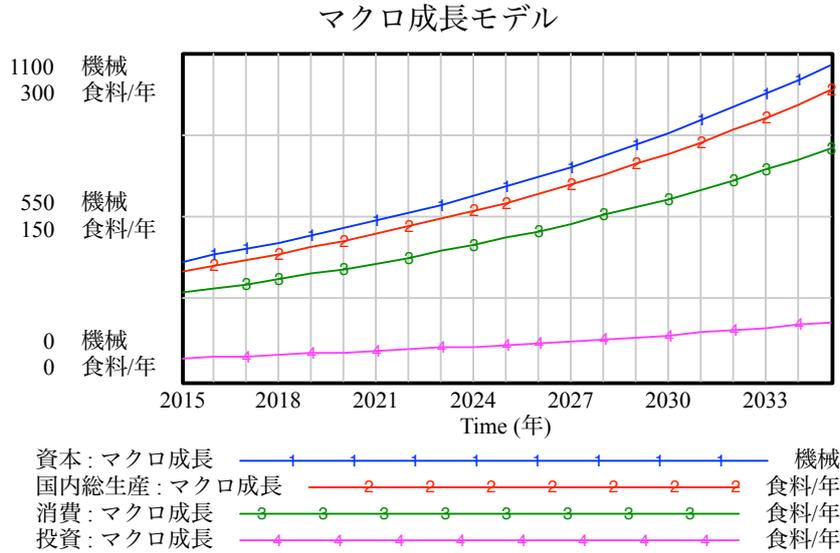


図 1.2 マクロ経済成長

Time (年)	資本	国内総生産	消費	投資
2015	400	100	80	20
2016	420	105	84	21
2017	441	110.25	88.2	22.05
2018	463.05	115.762	92.61	23.1525
2019	486.202	121.551	97.2405	24.3101
2020	510.513	127.628	102.103	25.5256
2021	536.038	134.01	107.208	26.8019
2022	562.84	140.71	112.568	28.142
2023	590.982	147.746	118.196	29.5491
2024	620.531	155.133	124.106	31.0266
2025	651.558	162.889	130.312	32.5779
2026	684.136	171.034	136.827	34.2068
2027	718.342	179.586	143.669	35.9171
2028	754.26	188.565	150.852	37.713
2029	791.973	197.993	158.395	39.5986
2030	831.571	207.893	166.314	41.5786
2031	873.15	218.287	174.63	43.6575
2032	916.807	229.202	183.361	45.8404
2033	962.648	240.662	192.53	48.1324
2034	1010.78	252.695	202.156	50.539
2035	1061.32	265.33	212.264	53.0659

図 1.3 マクロ経済成長モデルのシミュレーション表

シミュレーション課題1

SDモデルは全て、ストックの初期値から、順次計算が実行されてゆきます。2015年初頭の資本の初期値400のからスタートして、国内総生産、消費、貯蓄、投資がどのように決まり、2016年の資本ストックが蓄積されてゆくのかを、因果ループ図を追いながら手動で計算して求めてください。そして、前ページのシミュレーション表の結果と比べてください。できればこの作業を数年先ませ続行し、マクロ経済成長のプロセスの論理を確認してください。

シミュレーション課題2

マクロ経済の成長政策として一般的にどのようなものが考えられるかを議論しなさい。

Vensim ツールバーの「シミュレーションの準備」ボタンをクリックすれば、モデルのパラメータが全て浮かび上がってきます。

このマクロ経済成長モデルには以下の2つの定数（パラメータ）があります：資本・産出係数及び限界消費性向。これらの値が外生的に与えられれば、それ以外のマクロ経済変数は、全てシステムの内部で決まってゆきます。SDモデルでは、こうしたパラメータと政策とが密接に関係してきます。従って、SDモデルを構築して政策を論じる場合には、こうしたパラメータの値がシステムの振る舞いにどのように影響を及ぼすのかといったような分析に、政策論争がより具体化されてきます。逆に言うと、主観的な思いつき政策が排除され、万人が共有できる政策論争ができるようになります。すなわち、客観的な政策論争にはSDモデルが不可欠となります。SDモデルのない論争は単なる空中戦にすぎず、時間の徒労です。

「統合シミュレーションの実行」ボタンをクリックすれば、パラメータはスライダー付きの変数に変換され、リアルタイムでシミュレーションの実行ができます。ツールバーの「この実行結果の保存」ボタンをクリックして、新規ファイル名で保存してください。

そこで政策論として、資本・産出係数や限界消費性向といったパラメータを変更するとはどういう政策を実施することになるのかを、具体的に論じなさい。これらのパラメータの値を変動させれば、マクロ経済成長経路はどのように変更されるのかを、シミュレーション比較しなさい。具体的には、例えば限界消費性向が0.6, 0.7, 0.8と変化する場合に、それぞれのシミュレーションに対応する結果を、消費06、消費07、消費08といった別名のファイルで保存し、比較分析してください。

1.6 持続可能性の検証

このモデルでは、消費、投資、国内総生産（GDP）といったマクロ経済変数が全て順調に右肩上がり成長してゆきます。1960年代の先進諸国のマクロ経済はこのように順調に成長していったので、マクロ経済学の教科書では、ここで作成したようなマクロ経済成長モデルが支配的でした。その当時は、成長の限界や、環境問題など一切考える必要がありませんでした。

しかるに1971年のいわゆる「ニクソンショック」で、ドルと他の通貨の交換が停止され、また1972年には「The Limits to Growth 成長の限界 [?]」が出版され、世界経済の成長環境が一変しました。そこで、マクロ経済モデルがここで分析したような経済成長は持続可能かどうかを、上述の持続可能性の定義を参照しながら議論しなさい。

次に、このモデルの構造はそのままにして、持続可能なモデルに修正できるかどうかを議論しなさい。

第2章

持続可能なマクロ経済成長

2.1 恒常的成長経路

第1章では「持続可能とは、生産－消費が繰り返し行われ、人間社会とそれを支える動植物の環境が未来永劫に継続されるような状態のことです。経済学的には、資本、人口、資源が再生産されることです」と定義しました。そこで用いたマクロ経済成長モデルは、人口や資源を含まない簡単なシステム構造をしていました。では、そうした簡単な構造のもとで持続可能な成長経路を求めるとすれば、どうすればいいのでしょうか。マクロ経済学の成長理論では、持続的な成長経路を恒常的成長経路 (Steady state growth path) と呼ぶことがあります。より一般的には資本や人口、資源等が均等に成長してゆく (Balanced Growth Path) 経路のことです。

この簡単なマクロ経済モデルでは、資本を一定水準にとどめ、成長をゼロにする経路が持続可能な成長経路となります。資本を一定水準に維持するためには、投資をゼロにし、そのために貯蓄をゼロにしなければなりません。すなわち、国内総生産を全て消費に回し、投資しないということです。

そのためにここでは、経済成長の結果、国内総生産が増加するにしたがって、現在の消費水準も60%から徐々に増大してゆき、国内総生産が初期値の2倍になった時点で100%消費するように想定します。すなわち、現在の国内総生産(所得)が2倍になった時点が至福の状態、それ以上の成長を求めない状態が持続可能であると想定します。

こうした状態を達成するために、SDモデルでは表関数がよく利用されます。システムが内生的に変化してゆくに従って、パラメータ値も同時に内生的に変化するように設定できるのが表関数で、SDモデリング手法独特の重要な機能です。環境SDモデルではこうした表関数の利用が非常に有効的で多用されますので、この初期レベルのモデリング段階できちんと理解しておきましょう。

資本の減価償却を考慮すれば、より正確には純投資 (Net Investment) がゼロとなります。

2.2 マクロ経済成長モデル (mpc)

mpc は Marginal Propensity to Consume の略で、限界消費性向と一般に訳されています。

図 2.1 は、限界消費性向 (mpc) の表関数を組み込んだマクロ経済成長モデルです。この図を参照しながらお絵描きをし、モデル図を完成させて下さい。

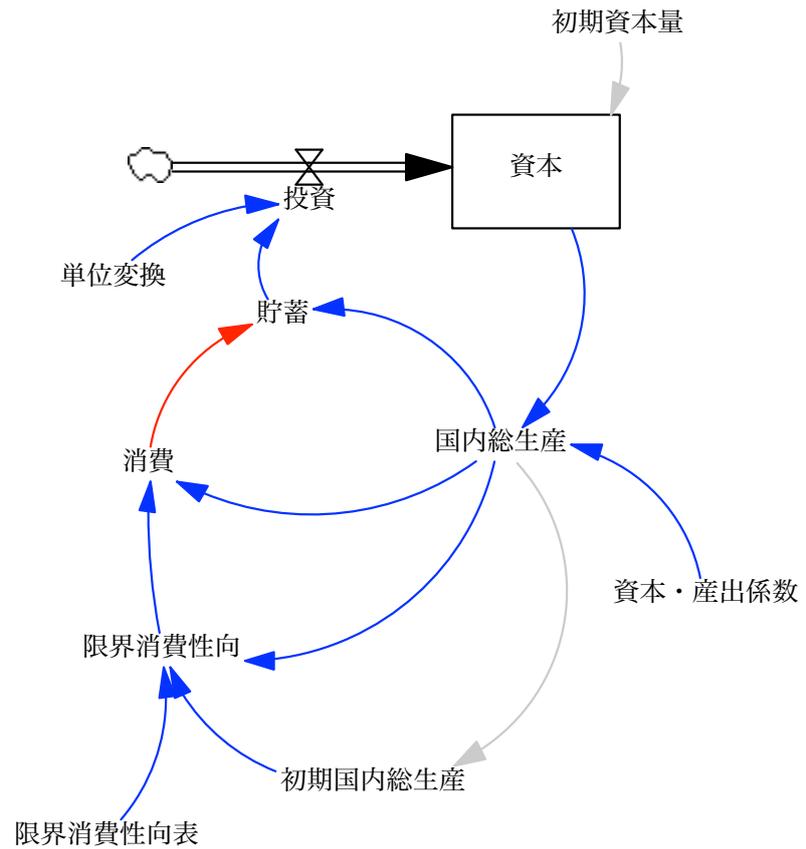


図 2.1 マクロ経済成長モデル (mpc)

2.3 マクロ成長モデル式

初期国内総生産= INITIAL(国内総生産)

Units: 食料/年

初期資本量=400

Units: 機械

単位変換= 1

Units: 機械/食料

国内総生産=資本/資本・産出係数

Units: 食料/年

投資=貯蓄*単位変換

Units: 機械/年

消費=限界消費性向*国内総生産

Units: 食料/年

貯蓄=国内総生産-消費

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資, 初期資本量)

Units: 機械

資本・産出係数=4

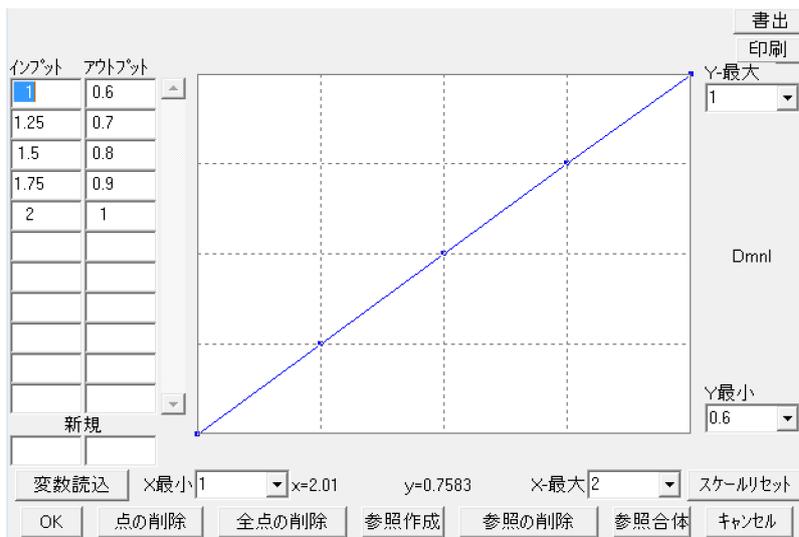
Units: 機械/(食料/年)

限界消費性向=限界消費性向表 (国内総生産/初期国内総生産)

Units: Dmnl

限界消費性向表 ([[1,0)-(2,1)], (1,0.6), (1.25,0.7), (1.5,0.8), (1.75,0.9), (2,1)])

INITIAL 関数は、引数の初期値（ここでは国内総生産）を記憶して、引き渡す関数です。スケッチツール「方程式」の変数タイプから「初期値」を選択して設定します。



限界消費性向表は、(始点 (x, y) - 終点 (x, y)) 各座標点 (x, y)・・・) を表しています。

図 2.2 限界消費性向表

2.4 シミュレーション

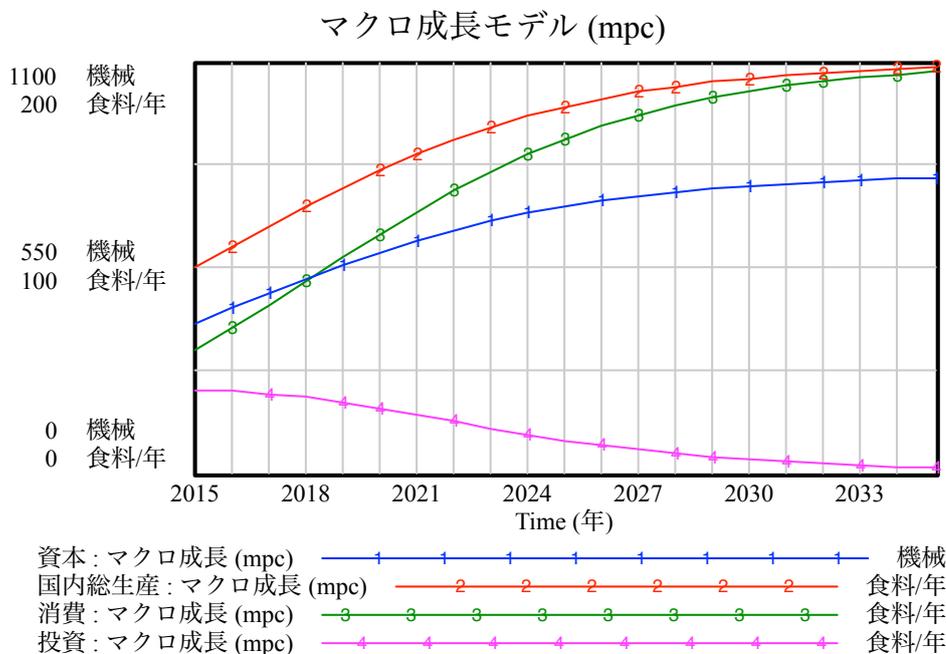


図 2.3 マクロ経済成長：限界消費性向

シミュレーション課題

「統合シミュレーションの実行」ツールバーをクリックし、ハイライトされた限界消費性向表をクリックすれば、限界消費性向表のグラフ入力画面が現れます。

国内総生産が100 (食料/年) から200 (食料/年) へと2倍に近づいてゆくと、消費水準もそれに接近してゆき、逆に投資がゼロになってゆくことを確認しなさい。限界消費性向表のグラフのパターンを変更し、それらが消費等の成長経路にどのように影響を与えるかを分析しなさい。

2.5 持続可能性の検証

恒常的成長経路をここでは持続可能な状態が実現された状態とみなしました。この簡単なマクロ経済成長モデルによる持続可能性分析の限界点を議論しなさい。

第 II 部

物的再生産

第3章

物的再生産モデル

3.1 物的再生産モデル解題

さて、本章からは第1章で考察したマクロ経済成長モデルをベースにして、持続可能なモデル作成に挑戦してゆくことにしましょう。マクロ経済成長モデルを用いて物的再生産の条件を考察してゆけば、以下の2つの点がモデルから欠落していることに気づきます。

1. 資本が減耗するにもかかわらず、その点が考慮されていない。

2. 生産は資本のみでは不可能で、同時に石油や石炭等のエネルギー消費、一般的には再生不可能資源の消費が不可欠となりますが、その点が考慮されていない。

伝統的なマクロ経済学のテキストでは、生産は、資本、労働、土地のいわゆる生産の3要素によって行われれると説明しています。

$$\text{国内総生産} = F(\text{資本、労働、土地})$$

科学技術の進化とともに、これらの生産3要素に加えて、以下のようにエネルギーと情報が追加的な生産要素として不可欠となってきました。

$$\text{国内総生産} = F(\text{資本、労働、土地、エネルギー、情報})$$

そこで物的再生産を考察するには、これらの生産要素の中で、資本、土地及びエネルギーを最低限モデル化することが必要となります。より具体的には、土地からはハイテク生産に不可欠な非鉄金属のレアメタル（リチウム、チタン、パラジウム、白金等）、エネルギー源としては、石炭や石油等の化石燃料が不可欠となります。

物的再生産性の観点からは、こうした地下資源は、一旦消費されると再生産が不可能となる資源なので、再生不可能資源として捉えるのが適切となります。勿論、木材や風力、太陽光のような再生可能な資源も必要となります。さらに、情報は、資本（パソコン）と労働から二次的に生産されると考えれば、より根源的には、再生産性を考慮したマクロの生産関数は以下のように簡潔に定義できるようになります。

$$\text{国内総生産} = F(\text{資本、労働、再生不可能資源、再生可能資源})$$

そこで、まず物的再生産に必要な最小限の生産要素として、資本と再生産不可能資源を取り上げ、それらの再生産性を考察することから考えてゆくことにします。

3.2 物的再生産モデル

図 3.1 は、資本と再生不可能資源の2つのストックからなる物的再生産モデルです。このモデルのお絵描きは、第1章のマクロ経済モデルを開いて、それを「物的再生産モデル」というファイル名で「別名で保存」し、その保存モデルを修正してゆくことで、変数の重複入力を回避し、より簡単に作成できます。

ここでは資本ストックが灰色の背景色になって強調されています。

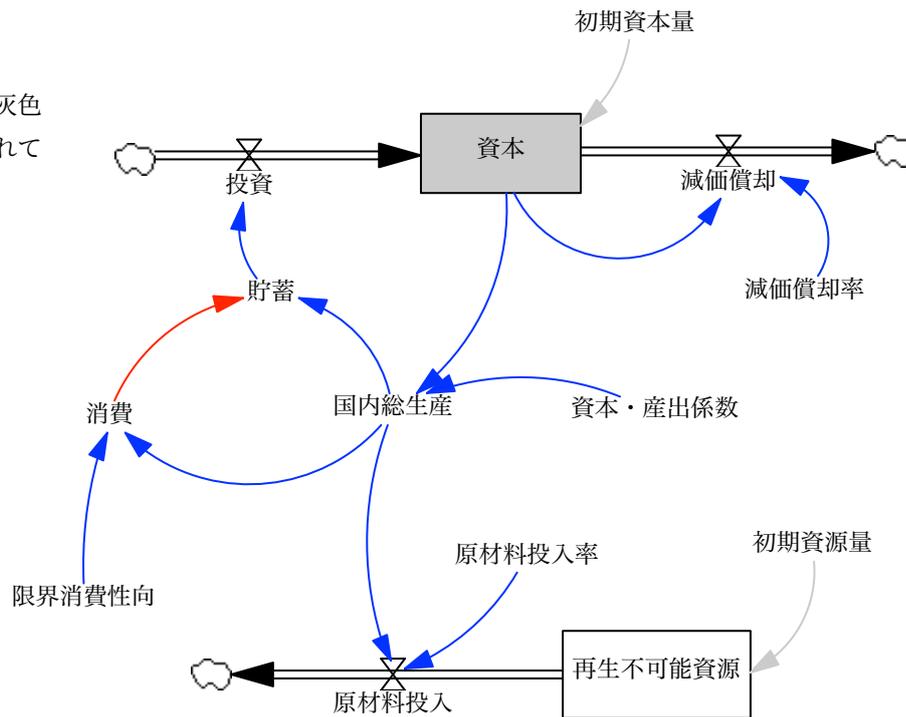


図 3.1 物的再生産モデル

3.3 物的再生産モデル式

物的再生産モデルのお絵描きができたら、次にこのモデルにモデル式を入力してゆきます。

再生不可能資源= INTEG (- 原材料投入, 初期資源量)

Units: 億トン

初期資本量=400

Units: 機械

初期資源量=1000

Units: 億トン [1000,2000,100]

単位変換= 1

Units: 機械/食料

原材料投入=国内総生産*原材料投入率

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料 [0,0.15,0.01]

国内総生産=資本/資本・産出係数

Units: 食料/年

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

消費=限界消費性向*国内総生産

Units: 食料/年

減価償却= 資本*減価償却率

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年 [0,0.1,0.01]

貯蓄=国内総生産-消費

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本量)

Units: 機械

資本・産出係数=4

Units: 機械/(食料/年) [1,20,1]

限界消費性向=0.8

Units: 食料/食料 [0.5,1,0.01]

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照しながら、入力して行って下さい。

3.4 シミュレーション

図 3.2 から、このマクロ経済では、資本、国内総生産、消費、投資が順調に右肩上がりで成長していることがみてとれます。

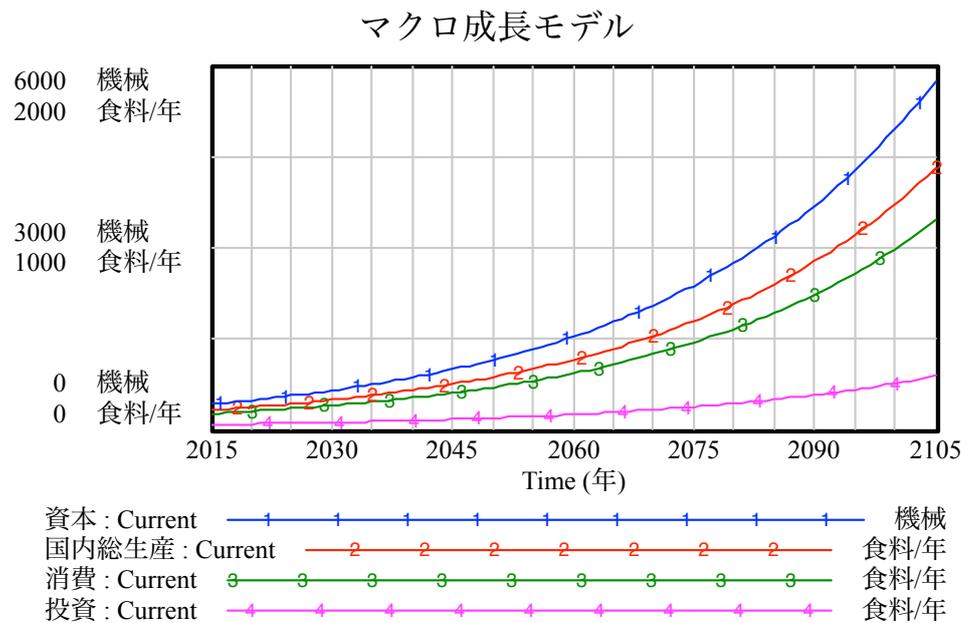


図 3.2 マクロ経済成長

しかしながら、この経済成長の背後で、再生不可能資源が枯渇していることに気づきます。図 4.4 によると、再生不可能資源は 2081 年には完全に枯渇してしまいます。

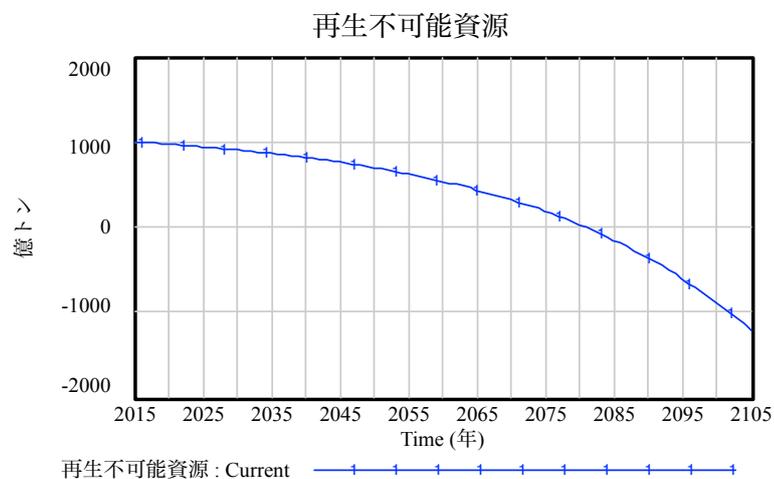


図 3.3 再生不可能資源

シミュレーション課題1

資本が再生産されるためには、投資と減価償却はどのような関係を満たす必要がありますか。減価償却率で表現すれば、どうなりますか。純投資（＝投資－減価償却）という概念を用いれば、どのように説明できますか。

シミュレーション課題2

再生産資源を枯渇させることなく、右肩上がりでも経済が成長できる成長経路はあり得るでしょうか。パラメータの値を色々と組み合わせながらシミュレーションをおこない、考えてみてください。

シミュレーション課題3

再生産資源を枯渇させることなく、持続可能な成長経路が見つかったとしましょう。この成長経路を22世紀まであと100年延長して考えれば、どうなるでしょうか。

国内総生産が再生不可能資源に依存している限り、私たちはいつかは必ず資源枯渇の問題に直面することになります。

このシミュレーションを実行するために、スケッチツールの「入出力オブジェクト」をクリックし、FINAL TIMEのスライダーを作成し、統合シミュレーションを実行するのが便利です。

3.5 持続可能性の条件

この物的再生産モデルに於ける持続可能性を検証してみましょう。このモデルに於けるストックは、資本と再生不可能資源の2つです。物的再生産が持続可能なためには、これら2つのストックが枯渇しないことが必要となります。

資本ストックの条件

資本ストックが減少しないこと、そのためには純投資（＝投資－減価償却）が非負となることが必要となります。より具体的には、以下のような条件が満たされなければなりません。

1. 減価償却率が5%を超えて大きくならないこと、すなわち、機械等の資本設備の維持管理を徹底し、長く使用できるようにする。
2. 資本・産出係数が1.0を超えるように資本の生産性を落とさないこと、すなわち、常に資本の生産性を高めるように技術革新を行ってゆく。
3. 限界消費性向が0.92を超えるような贅沢をしないこと、すなわち、常に消費を控えめにして貯蓄し、投資に回すようにする。

再生不可能資源ストックの条件

再生不可能資源が枯渇しないように、効率的に利用しなければなりません。

- 4 原材料投入率を0.2以下まで減らすようにすること、すなわち、再生不可能資源を効率よく利用し、ムダ使いしないと同時に、その効率利用の技術革新に努めるようにする。

しかしながら、たとえ原材料投入率を0.2以下にまで減らしたとしても、時間を22世紀まで延長すれば、必ずいつか石炭や石油等の再生不可能資源は枯渇する宿命にあります。これを回避するにはどうすればいいでしょうか。

この問題を考えるまえに、この物的再生産モデルは、重大な論理的欠陥を内包しているということに気づく必要があります。すなわち、国内総生産のために再生不可能資源が生産要素として不可欠であると想定しながら、それが枯渇し、マイナスになっても、経済成長が行われるという現実ではありえないモデル構造になっているのです。そこでまず、このシステム構造上の欠陥を修正しなければなりません。どうすればいいでしょうか、議論してください。

第4章

物的再生産（再生不可能資源） モデル

4.1 物的再生産（再生不可能資源）モデル解題

物的再生産モデルの論理的欠陥は、再生不可能資源が枯渇し始めるにもかかわらず、国内総生産はそれとは無関係になされているという不整合性です。再生産不可能資源の例として、石炭や石油等の化石燃料を考えてみましょう。化石燃料が枯渇し始めると、生産にどんな影響が出始めるでしょうか。化石燃料を利用する発電量が低下して電力不足となり、工場が生産縮小に追い込まれます。またガソリンがなくなってくれば、バスや乗用車の利用が次第に制限され、労働者が工場や職場に通えなくなったり、物流が滞るようになります。すなわち、生産活動が制限され、国内総生産が減少し始めます。

しかるに前章で作成した物的再生産モデルには、再生不可能資源の減少に伴う国内総生産へのフィードバック影響が全く考慮されていません。こうしたフィードバック影響をモデルで反映させるにはどうすればいいでしょうか。再生不可能資源が減少するにしたがって、生産性が減少し、国内総生産も減少するというフィードバックループを導入するので、具体的には、以下のようなフィードバックループを導入します。

再生不可能資源 → 生産性 → 国内総生産

環境問題を考える場合には、このように資源の減少がシステムの他の変数に影響を及ぼすフィードバックの構造を十分に考慮する必要があります。システムダイナミクスでは、こうしたフィードバックの関係を表関数を用いて表現します。こうしたフィードバック構造の導入が容易にできるのが、システムダイナミクスによるモデルの大きな特徴です。

このモデルでは生産性は、資本・産出係数で表されています。

4.2 物的再生産（再生不可能資源）モデル

図4.1は、再生不可能資源が国内総生産に及ぼすフィードバックを考慮したモデルです。前章の物的再生産モデルを別名で保存し、このフィードバックループを追加しなさい。

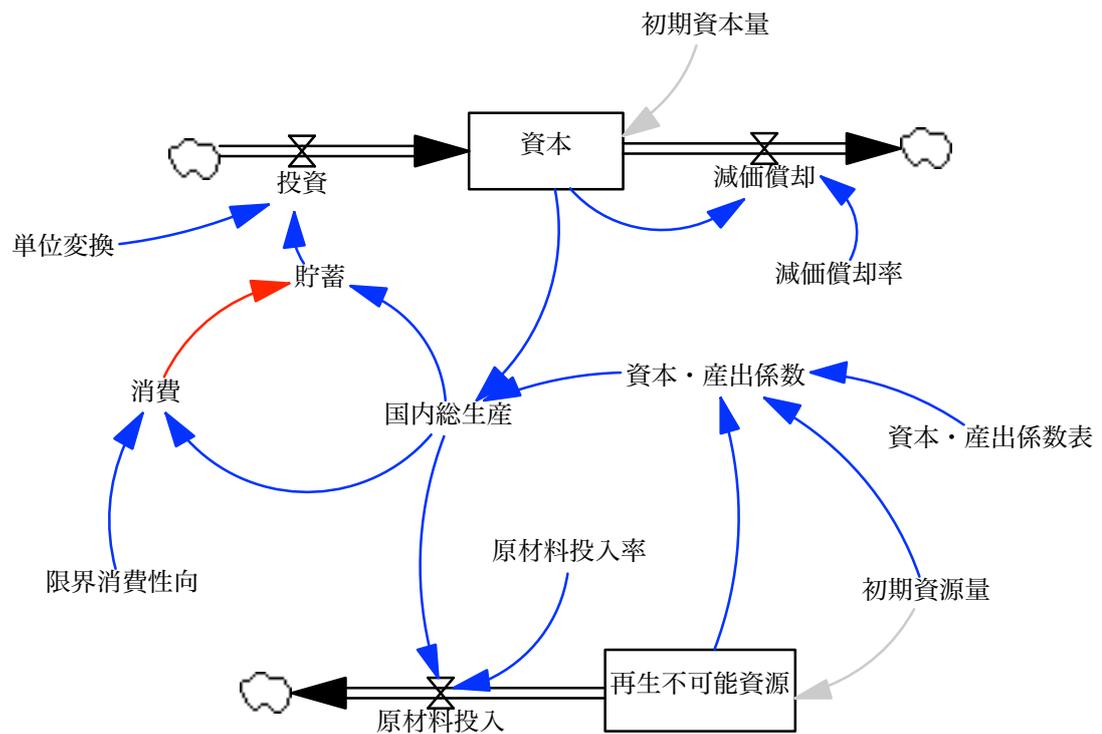


図 4.1 物的再生産（再生不可能資源）モデル

4.3 物的再生産（再生不可能資源）モデル式

物的再生産（再生不可能資源）モデルのお絵描きができたら、次にこのモデルにモデル式を入力してゆきます。

再生不可能資源= INTEG (- 原材料投入, 初期資源量)

Units: 億トン

初期資本量=400

Units: 機械 [0,800,10]

初期資源量=1000

Units: 億トン [0,2000,100]

単位変換= 1

Units: 機械/食料

原材料投入=原材料投入率 * 国内総生産

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料 [0,0.15,0.01]

国内総生産=資本/資本・産出係数

Units: 食料/年

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

消費=限界消費性向*国内総生産

Units: 食料/年

減価償却= 減価償却率 * 資本

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年 [0,0.08,0.01]

貯蓄=国内総生産-消費

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本量)

Units: 機械

資本・産出係数=資本・産出係数表 (再生不可能資源/初期資源量)

Units: 機械/(食料/年)

資本・産出係数表 ([[0,0)-(1,20)], (0,20), (0.1,16), (0.2,12), (0.3,8), (0.4,6), (0.5,5), (0.6,4), (1,4))

Units: 機械*年/食料

限界消費性向=0.8

Units: 食料/食料 [0.5,1,0.01]

資本・産出係数表の作成方法は、Vensim ガイド第8章「表関数の作成」を参照ください。

このように正規化することにより、再生不可能資源量の絶対量がデータのアップデート等で変化しても、その都度表関数を定義しなおす必要がなくなります。技術的には表関数の引数の次元が無次元 (Dmnl=Dimensionless) となり、単位チェックをした際の注意 (Warning) 表示を回避できます。

図 4.2 は、上のモデル式から資本・産出係数表を作成したものです。この表関数の引数は、再生不可能資源／初期資源量と正規化 (Normalize) されています。表関数の引数は一般的にこのように正規化して用います。ここでは、再生不可能資源が初期値の 100% から 0% まで (1 から 0 まで) 減少するに従い、資本・産出係数が最初の 4 から 20 まで増大する関係を表しています。1 単位の食料を生産するのに最初は 4 単位の機械で行えたのですが、再生不可能資源が減少するに伴い、より多くの機械が必要になってくるという関係を表しています。すなわち、資本 1 単位あたりの国内総生産量が減少するということで、生産性の減少と同じことになります。

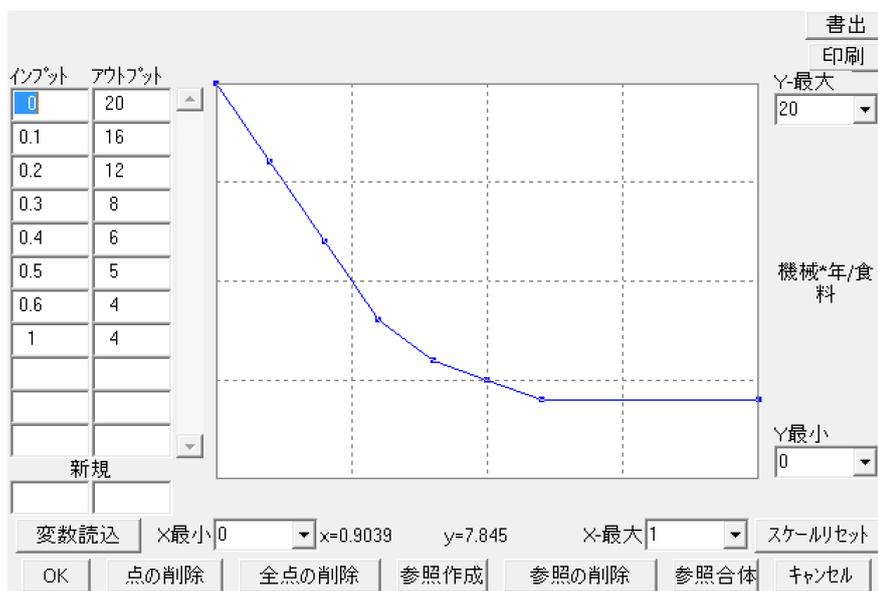


図 4.2 資本・産出係数表

4.4 シミュレーション

図 4.3 は、再生不可能資源から国内総生産へのフィードバックを導入した場合の、マクロ経済成長経路です。

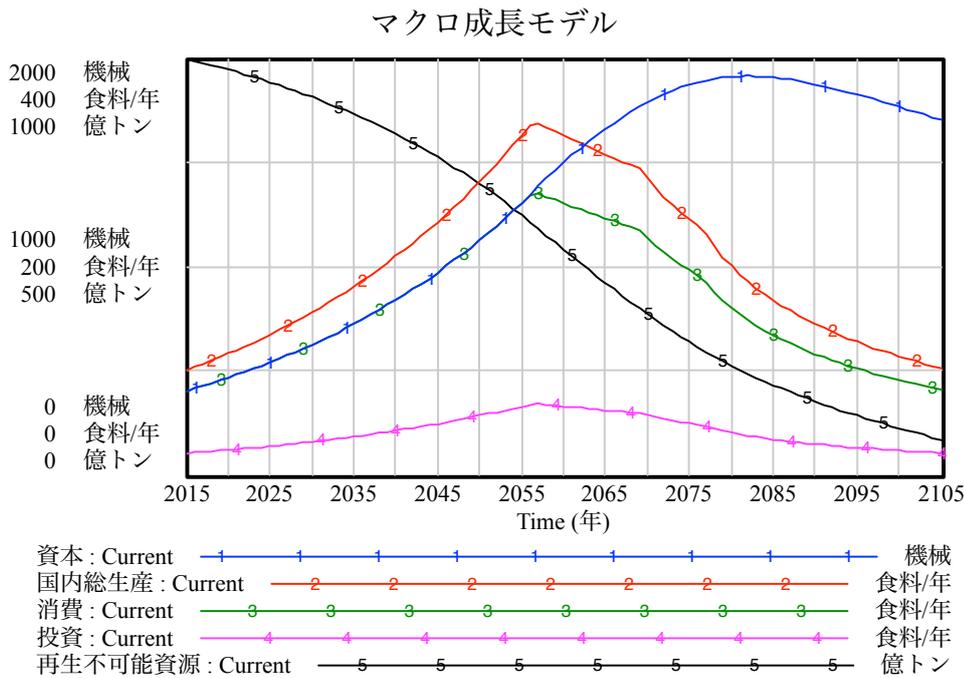


図 4.3 マクロ経済成長：再生不可能資源のフィードバック

図 4.4 は、フィードバックループの導入により再生不可能資源が緩やかに減少し、

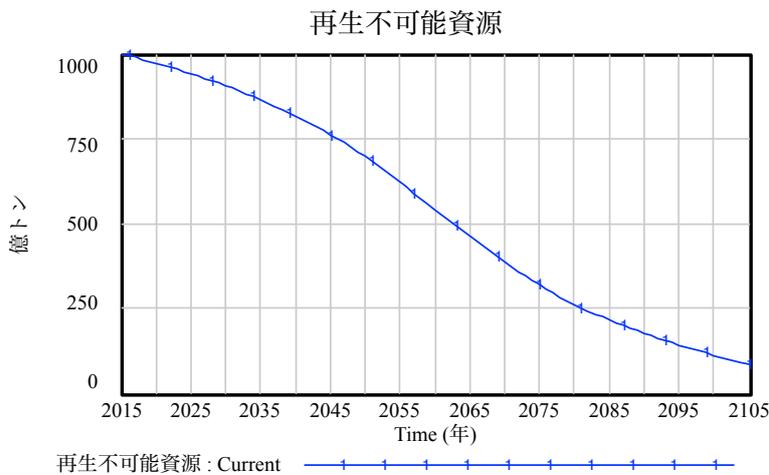


図 4.4 再生不可能資源の減少

資源の枯渇が回避されるようになることを図示しています。

シミュレーション課題1

資本・産出係数表の関数の形状を変化させることにより生産性が変化するので、再生不可能資源が国内総生産に及ぼす影響力の効果を変えることができます。再生不可能資源の例として、石油資源を考えてください。石油の埋蔵量が減少するにしたがって、それがどのようにマクロ経済活動に影響を与えるかを議論し、少なくとも2つのシナリオを考えなさい。そうしたシナリオを反映させるように、資本・産出係数表を変化させてシミュレーションし、それらのマクロ経済成長経路を比較分析しなさい。

統合シミュレーションを実行すれば、「資本・産出係数表」がハイライトされますので、それをクリックして関数の形状を変えてシミュレーション。

シミュレーション課題2

図4.3では資本蓄積が行われているにもかかわらず、国内総生産、消費、投資が資本より早くピークをむかえ、やがて減少し始めます。その理由を考えなさい。

シミュレーション課題3

このモデルで得られた増加と崩壊の成長経路が一般的に言われる「成長の限界」を示す経路となります。すなわち、成長経路がピークを迎えた時点が成長の限界となるのです。ここでのマクロ経済のシステム構造のままで、前章で考察した持続可能性の条件をもたらすパラメータを様々に変更することにより、この成長の限界を超えることはできるでしょうか。パラメータの値を色々と組み合わせてシミュレーションを実行し、その可能性を探求しなさい。

4.5 持続可能性の条件

この設定は第3章で得た持続可能性の条件4です。原材料投入率を0.5から0.2に下げるにはかなり革新的な省エネ技術が必要となります。

上のシミュレーション課題3で、持続可能な成長経路が見つかったでしょうか。一つの可能性として、再生不可能資源の効率的利用が考えられます。例えば省エネ技術の導入で、再生不可能資源の消費をできる限り抑え込み、原材料投入率を0.2とします。こうすると確かに国内総生産等は増大しますが、残念ながら成長の限界は超えられません。そこでさらに減価償却率を高めてを0.04とします。すると、経済は再び持続的に成長し始めます（図4.5）。

果たしてこの持続可能性は、22世紀にも継続されるのでしょうか。そこでこのシミュレーションを22世紀まで延長してゆきます。そうすると2126年をピークに22世紀前半から再び成長の限界が現れてきます（図4.6）。すなわち、国内総生産が再生不可能資源に依存している限り、いずれは「成長の限界」に直面し、それを超えることは不可能のように思われます。

「未来世代が自らのニーズを満たす能力を損なわない」ような持続可能な成長経路を満たす条件はないのではといった暗い気持ちにさせられます。私たちの持続可能性への挑戦は、早くもこの初期の物的再生産の段階で暗礁に乗り上げてしまいました。

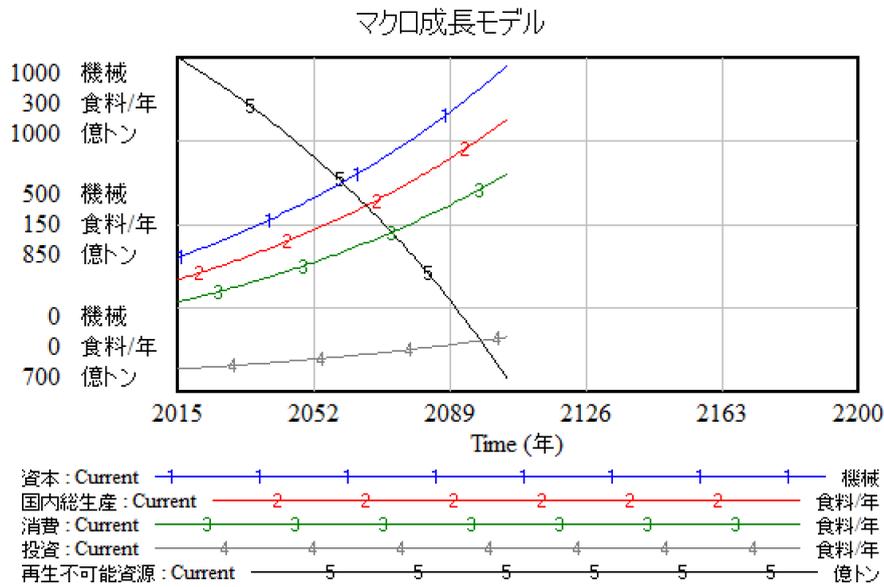


図 4.5 再生不可能資源フィードバックの持続可能性

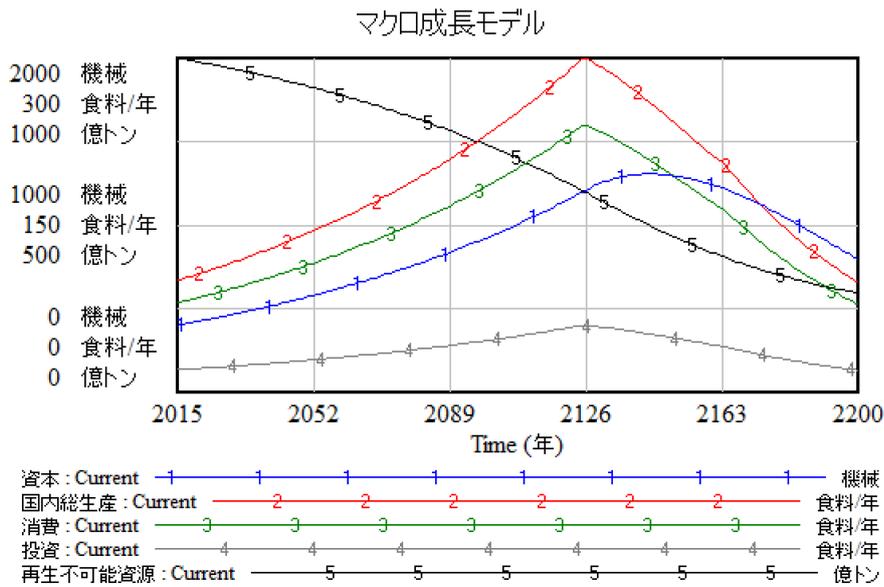


図 4.6 再生不可能資源フィードバックの持続不可能性

第5章

物的再生産（代替資源）モデル

5.1 物的再生産（代替資源）モデル解題

国内総生産が有限な再生不可能資源に依存する限り、たとえ省エネ技術等でその消費を節約し、効率利用に努めたとしても、長期的にはいつか必ず限界に直面します。前章の簡単な物的再生産モデルの分析から得られた結論です。それではそうした成長の限界を超えて、物的再生産性を達成するにはどうすればいいのでしょうか。再生不可能資源の有限性を考えれば、唯一の解決策はその代替資源を生み出すしかありません。例えば、石炭や石油、天然ガスといった再生不可能な化石燃料によるエネルギー資源に代わって、再生可能な自然エネルギー資源（太陽光、風力、地熱等）を開発、利用するのです。

そこでこうした代替資源の利用を考慮したモデルへとモデルを拡張してゆくことにします。拡張モデルへの考え方の一つとして、開発された代替資源は再生不可能資源への追加としてモデル化するということです。そして国内総生産に必要とされる原材料投入の一部を、代替資源で置き換えると考えます。もちろん、ミクロレベルでの具体的なモデルでは、例えば、太陽光発電パネルから発電される電気エネルギーを、化石燃料の消費から得られるエネルギーに換算して、その化石燃料相当分を、再生不可能資源に追加するといった、細かな変換作業が必要となりますが、ここでのマクロモデルではそうした点は捨象します。

さらに、代替資源の開発のために、貯蓄や投資のために確保された国内総生産から、その一部それらの開発・生産に必要ながふり向けることが必要となります。こうしてして修正された物的再生産の代替資源モデルへの拡張が、次ページの物的再生産（代替資源）モデルです。

5.2 物的再生産（代替資源）モデル

図 5.1 は、再生不可能資源を代替資源で補充するモデルです。物的再生産（再生不可能資源）モデルを別名で保存して、このモデルを作成してください。

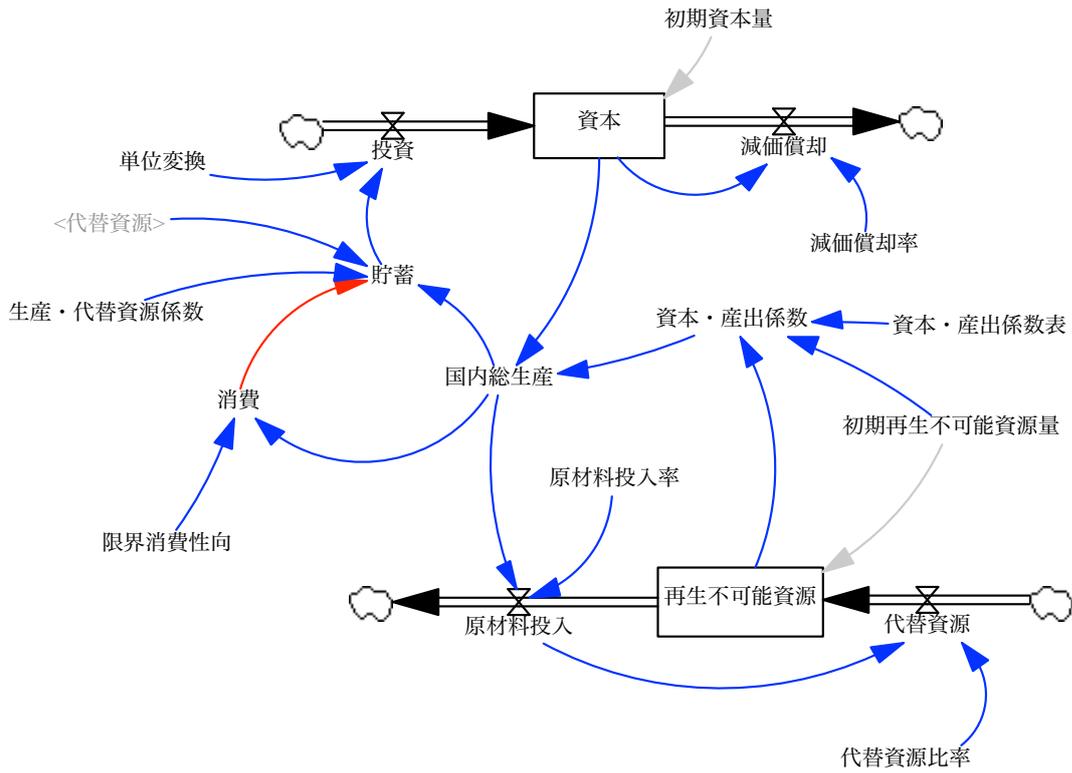


図 5.1 物的再生産（代替資源）モデル

5.3 物的再生産（代替財資源）モデル式

代替資源= 原材料投入*代替資源比率

Units: 億トン/年

代替資源比率=0

Units: Dmnl [0,1,0.1]

再生不可能資源= INTEG (-原材料投入 + 代替資源, 初期再生不可能資源量)

Units: 億トン

初期再生不可能資源量=1000

Units: 億トン [0,2000,100]

初期資本量=400

Units: 機械 [0,800,10]

単位変換= 1

Units: 機械/食料

原材料投入=原材料投入率 * 国内総生産

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料 [0,0.15,0.01]

国内総生産=資本/資本・産出係数

Units: 食料/年

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

消費=限界消費性向*国内総生産

Units: 食料/年

減価償却=減価償却率 * 資本

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年 [0,0.08,0.01]

生産・代替資源係数=1

Units: 食料/億トン [0,3,0.1]

貯蓄=MAX(0, 国内総生産-消費-代替資源*生産・代替資源係数)

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本量)

Units: 機械

資本・産出係数=資本・産出係数表 (再生不可能資源 / 初期再生不可能資源量)

Units: 機械/(食料/年)

資本・産出係数表 ([[0,0)-(1,20)], (0,20), (0.1,16), (0.2,12), (0.3,8), (0.4,6), (0.5,5), (0.6,4), (1,4))

Units: 機械*年/食料

限界消費性向=0.8

Units: 食料/食料 [0.5,1,0.01]

5.4 シミュレーション

図 5.2 は、代替資源比率=0.7 に設定した場合のマクロ経済成長経路です。代替資源の導入により再生不可能資源の減少が緩やかになり（曲線 5）、持続可能な経路が再び実現されました。

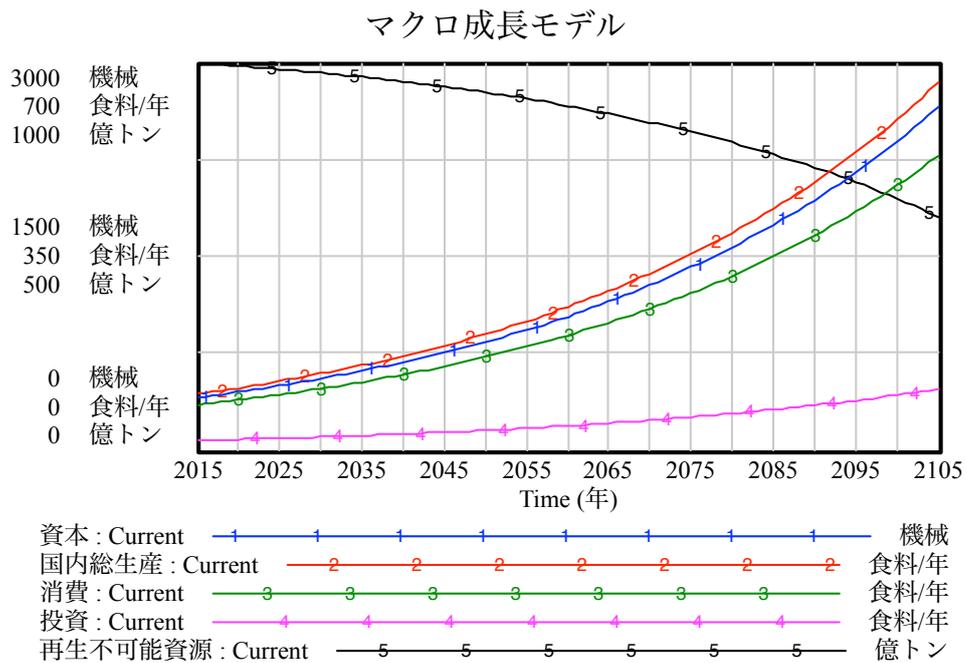


図 5.2 マクロ経済成長：代替資源

シミュレーション課題

代替資源比率= 0.7 とするという設定は、再生不可能資源からの原材料投入の7割を代替資源でまかなうということで、技術的にはかなり厳しい条件です。そこで代替資源比率を下げてでも持続可能な成長ができる経路があるかどうかを、その他のパラメータ値を色々と組み合わせながらシミュレーションを行い、さらに探求しなさい。

5.5 持続可能性の条件

第3章で得られた持続可能性の4つの条件に加えて、以下の条件が新たに必要となりました。

- 5 化石燃料やレアメタル等の再生不可能資源の代わりに代わる代替資源の開発を行ない、代替資源比率を0.7とする。

以上で、物的再生産を達成させるための5つの条件がすべて考察されました。そこで、次章からの社会的再生産の考察に入る前に、これまでの分析で得られた持続可能な5つの条件を、読者の便宜のために以下にまとめておきます。

勿論、前章で考察したように、シミュレーションの時間を22世紀にまで延長すれば、成長の限界が再び現れます。

物的再生産のための5つの条件

1. 減価償却率が5%を超えて大きくならないこと、すなわち、機械等の資本設備の維持管理を徹底し、長く使用できるようにする。
2. 資本・産出係数が1.0を超えるように資本の生産性を落とさないこと、すなわち、常に資本の生産性を高めるように技術革新を行ってゆく。
3. 限界消費性向が0.92を超えるような贅沢をしないこと、すなわち、常に消費を控えめにし貯蓄し、投資に回すようにする。
4. 原材料投入率を0.2以下まで減らすようにすること、すなわち、再生不可能資源を効率よく利用し、ムダ使いしないと同時に、その効率利用の技術革新に努めるようにする。
5. 化石燃料やレアメタル等の再生不可能資源の代わりに代わる代替資源の開発を行ない、代替資源比率を0.7とする。

第 III 部

社会的再生産

第6章

社会的再生産モデル

6.1 社会的再生産モデル解題

これまで考察してきた物的再生産のモデルを基礎にして、ここからは社会が持続的に存続してゆくための条件を考えてゆきます。そのために、社会を構成する人口のストックを、物的再生産（代替資源）モデルの資本と再生不可能資源のストックに追加します。すなわち、ストックが3つとなるモデルに拡張してゆきます。

そして、人口のうち生産人口が労働者として生産活動に従事するようにマクロ経済システムの生産関数を修正します。

$$\text{国内総生産} = F(\text{資本、労働、再生不可能資源})$$

社会が持続的に存続するためには、こうして生産された国内総生産で、憲法第25条が保障する「健康で文化的な最低限の生活を営む権利」を全ての人口が享受できるような消費水準が実現されなければなりません。

日本国憲法が保障する生活権とは以下のようになっています。

第25条1 すべて国民は、健康で文化的な最低限度の生活を営む権利を有する。

第25条2 国は、すべての生活部面について、社会福祉、社会保障及び公衆衛生の向上及び増進に努めなければならない。

社会的再生産とは、国内総生産の範囲内で、その社会のすべての人口が「健康で文化的な最低限の生活」を継続的にできる状態です。人口が衰退してゆくと、社会はやがて持続不可能となり、かといって人口が爆発すると、国内総生産で人口が支えきれなくなり、これまた社会が持続不可能となります。このように人口ストックをモデルに追加するだけで、持続可能性の議論がより複雑になってきますが、社会的再生産の基準は、あくまで緩やかに変動する人口が憲法が保障する健康で文化的な消費水準を満たすことができるということです。そうした状態が実現されれば、持続可能な社会が達成されることになります。

このモデルでは、簡単なレオンチェフ型生産関数を用います。

the minimum standards of wholesome and cultured living

ここでの議論は海外との貿易を無視しています。

6.2 社会的再生産モデル

図 6.1 は、社会的再生産を考察する基本モデルです。物的再生産（代替資源）モデルを別名で保存し、このモデルを作成してください。

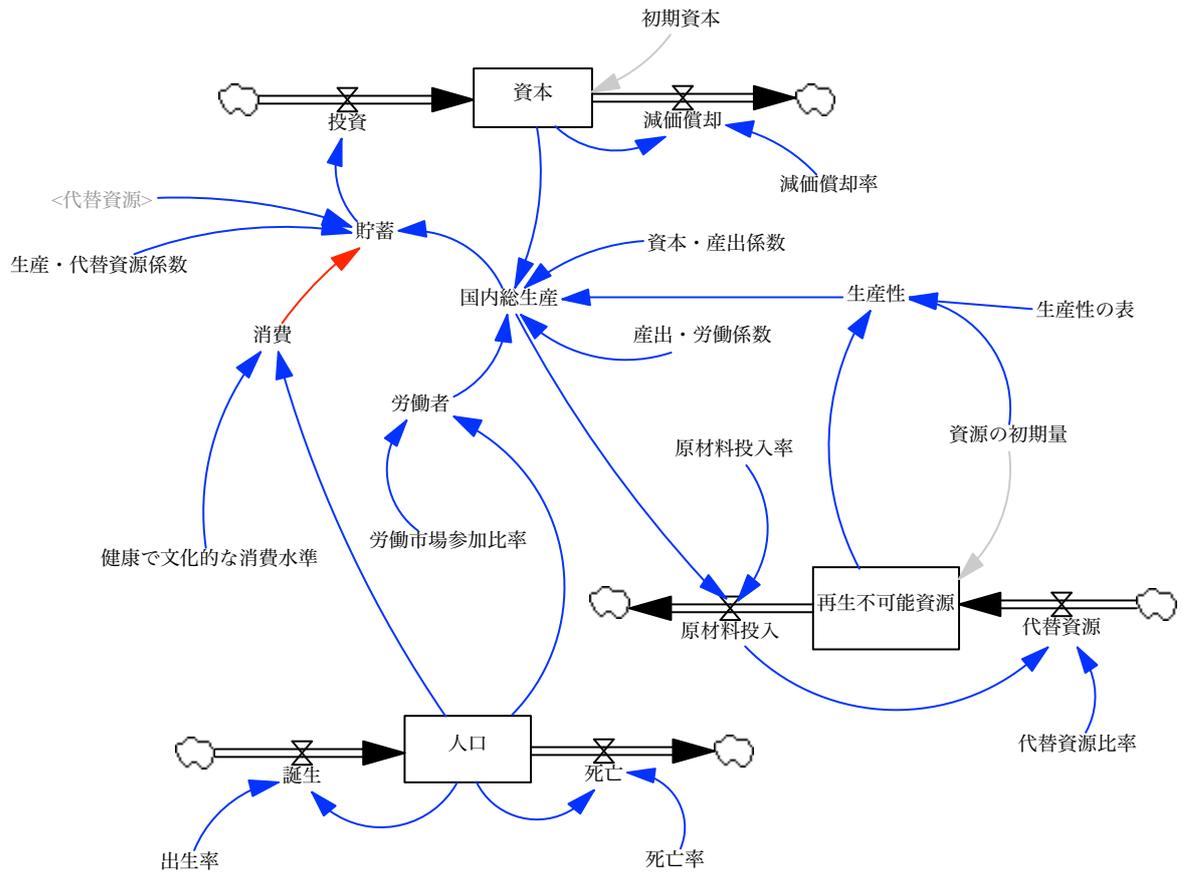


図 6.1 社会的再生産モデル

6.3 社会的再生産モデル式

人口= INTEG (誕生-死亡,500)

Units: 人

代替資源= 原材料投入*代替資源比率

Units: 億トン/年

代替資源比率=0

Units: Dmnl [0,1,0.1]

健康で文化的な消費水準=0.16

Units: (食料/年)/人

再生不可能資源= INTEG (-原材料投入 + 代替資源, 資源の初期量)

Units: 億トン

出生率=0.03

Units: (人/人)/年 [0,0.1,0.01]

初期資本= 381

Units: 機械

労働市場参加比率=0.6

Units: 人/人 [0.3,0.8,0.01]

労働者=人口*労働市場参加比率

Units: 人

単位変換= 1

Units: 機械/食料

原材料投入=原材料投入率 * 国内総生産

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料

国内総生産=MIN(資本/資本・産出係数, 産出・労働係数*労働者)*生産性

Units: 食料/年

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

死亡=死亡率 * 人口

Units: 人/年

死亡率=0.01

Units: (人/人)/年 [0,0.1,0.01]

消費=人口*健康で文化的な消費水準

Units: 食料/年

減価償却= 減価償却率 * 資本

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年

生産・代替資源係数=1

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

レオンチェフ型生産関数。資本と労働から別々に得られる生産額のうち、小さい値が国内総生産を決定するという関数です。

Units: 食料/億トン [0,2,0.01]
 生産性=生産性の表(再生不可能資源/資源の初期量)
 Units: Dmnl
 生産性の表 ([[0,0)-(1,1.2)], (0,0), (0.1,0.1), (0.2,0.2), (0.3,0.4),
 (0.4,0.6), (0.5,0.8), (0.6,1), (1,1))
 Units: Dmnl
 産出・労働係数=0.4
 Units: (食料/年)/人 [0.2,0.6,0.01]
 誕生=人口*出生率
 Units: 人/年
 貯蓄=MAX(国内総生産 - 消費 - 生産・代替資源係数*代替資源, 0)
 Units: 食料/年
 資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本)
 Units: 機械
 資本・産出係数=4
 Units: 機械/(食料/年)
 資源の初期量=1000
 Units: 億トン

図 6.2 は、生産性の表関数の入力図です。

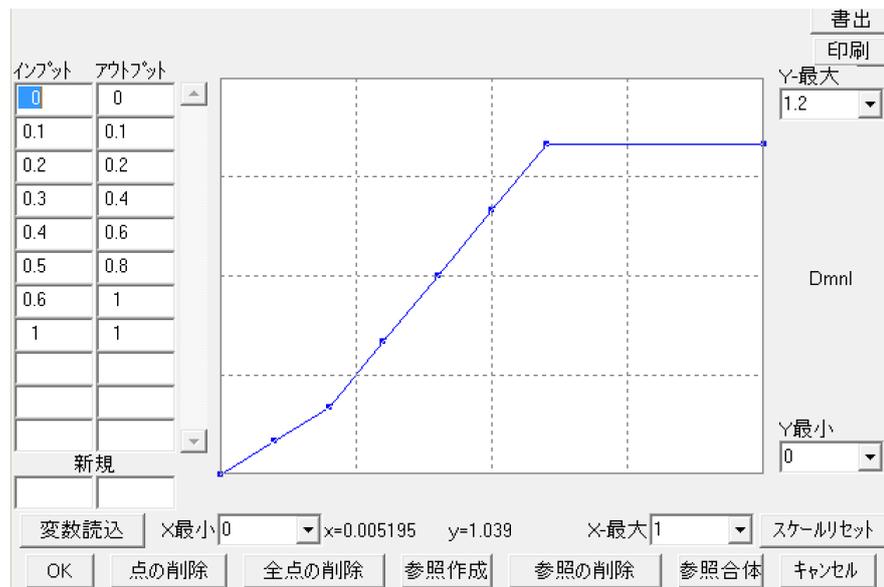


図 6.2 生産性の表

6.4 シミュレーション

図 6.3 は、代替資源比率=0 の場合に於ける社会的再生産成長経路です。

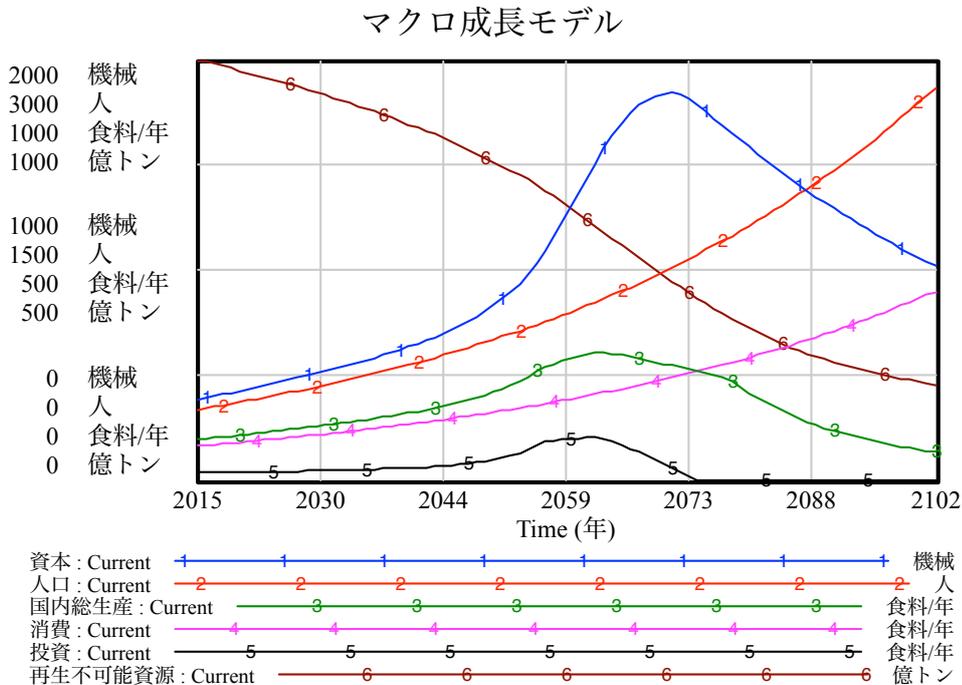


図 6.3 マクロ経済成長：社会的再生産

モデルの不整合性

この社会的再生産モデルは、モデルチェックや単位チェックをクリアしたモデルですが、図 6.3 のシミュレーションには、明らかなモデルの不整合性があります。曲線 2 は人口増加を表し、曲線 4 は、その人口が「健康で文化的な生活」ができるための消費水準を表しています。他方、国内総生産（曲線 3）は、2074 年から消費を下回ることになります。勿論その年から投資はゼロとなります（曲線 5）。その結果、減価償却分ずつ資本が減少し始めます（曲線 1）。

国内総生産を上回る消費は、輸入を考慮しないこのマクロ経済では、物理的に不可能です。従って、持続可能な社会的再生産条件を考察する以前に、このモデルの論理的な不整合性が修正される必要があります。どのように修正すればいいかを議論しなさい。

ところで現実には、このモデルのように消費が国内総生産を上回り、継続的な輸入に頼らざるをえない、すなわち社会的再生産が不可能な国があります。こうした国はいずれ持続不可能な国に転落する宿命にあります。どこの国でしょうか。議論してください。

シミュレーションモデルは、G I G O (Garbage-In, Garbage-Out)、すなわちゴミのような数値を入れてゴミのような結果を吐き出すといった論理矛盾に陥ることが多々あります。こうした不整合性は、コンピュータでは指摘してくれません。あくまでもモデルを作成、利用する人が検証しなければなりません。詳細は、Vensim ガイド第 14 章を参照ください。

第7章

社会的再生産 (人口フィードバック) モデル

7.1 社会的再生産 (人口フィードバック) モデル解題

前章で考察した社会的再生産モデルは、消費が国内総生産を上回るという物理的不整合性がありました。その理由は、すべての国民に健康で文化的な最低限度の生活を保障する消費レベルをモデルで優先させたからです。それでは社会的再生産モデルを整合的にするにはどうすればいいのでしょうか。

これまでは、国が生存権を保証するレベルの消費を優先させるようにモデルを作成してきましたが、現実には国内総生産を上回る消費は物理的に不可能です。そこでまず国内総生産を人口で割った一人当たりの消費量を計算し、これと健康で文化的な消費量とを比較して、少ない方で消費を我慢するというように修正します。

その場合、もし、一人当たりの消費量が健康で文化的な消費レベルを下回ればどうなるでしょうか。想定される可能性として、消費レベルが最低限度の生活を保障する水準に達しないということで、健康状態が悪化したり、最悪の場合には飢餓的生活を余儀なくされるようになり、その結果、死亡率が上昇し、やがて人口増加が抑制されるようになります。古典派経済学で学ぶマルサスの人口論（1826年）で展開されるような状態、すなわち人口は指数的に成長するがそれを支える食料の生産は算術級数的にしか増加せず、貧困が出現し、やがて人口が抑制されるようになるという状態です。

こうした2つの修正点を反映させるようにモデルを作成してゆきましょう。

7.2 社会的再生産 (人口フィードバック) モデル

図 7.1 は、消費が国内総生産制限され、1人当たり消費量が死亡率にフィードバックされるモデルです。社会的再生産モデルを別名で保存し、このモデルを作成してください。

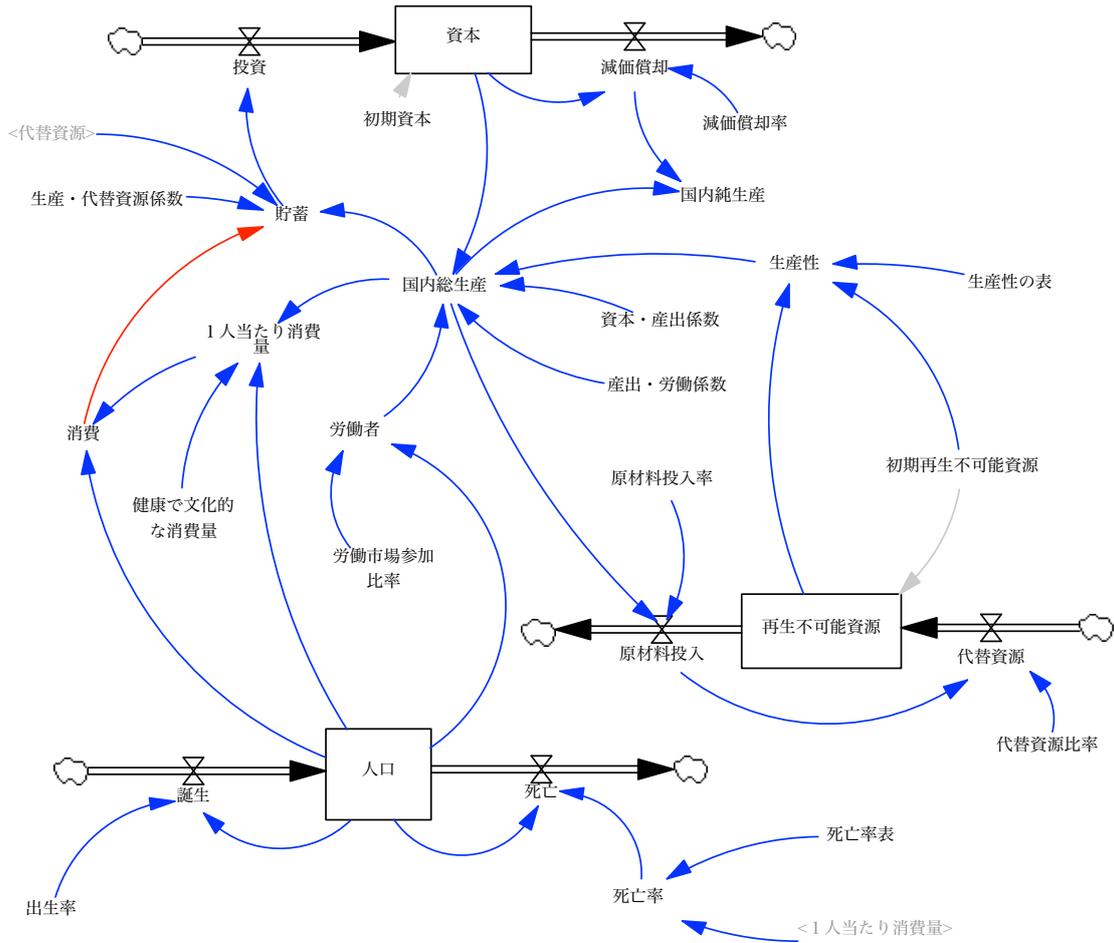


図 7.1 社会的再生産 (人口フィードバック) モデル

7.3 社会的再生産（人口フィードバック）モデル式

人口= INTEG（誕生-死亡,500）

Units: 人

代替資源= 代替資源比率 * 原材料投入

Units: 億トン/年

代替資源比率=0

Units: Dmnl [0,1,0.1]

健康で文化的な消費量=0.16

Units: (食料/年)/人

再生不可能資源= INTEG（代替資源 - 原材料投入, 初期再生不可能資源）

Units: 億トン

出生率=0.03

Units: (人/人)/年 [0,0.05,0.01]

初期再生不可能資源=1000

Units: 億トン

初期資本= 400

Units: 機械

労働市場参加比率=0.6

Units: 人/人

労働者=労働市場参加比率 * 人口

Units: 人

原材料投入=原材料投入率 * 国内総生産

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料

国内純生産=国内総生産 - 減価償却 /単位変換

Units: 食料/年

国内総生産=生産性 * MIN(資本 / 資本産出係数, 産出労働係数 * 労働者)

Units: 食料/年

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

死亡=死亡率 * 人口

Units: 人/年

死亡率=死亡率表（1人当たり消費量）

Units: 1/年

死亡率表（[(0.04,0)-(0.16,0.1)],(0.04,0.1),(0.06,0.07),(0.08,0.05),

(0.1,0.03),(0.12,0.02),(0.14,0.015),(0.16,0.01)）

Units: 1/年

消費=1人当たり消費量*人口

Units: 食料/年

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

減価償却= 減価償却率 * 資本

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年

生産・代替資源係数=1

Units: 食料/億トン

生産性=生産性の表 (再生不可能資源 / 初期再生不可能資源)

Units: Dmnl

生産性の表 ([[0,0)-(1,1)],(0,0),(0.1,0.1),(0.2,0.2),(0.3,0.4),
(0.4,0.6),(0.5,0.8),(0.6,1),(1,1))

Units: Dmnl

産出・労働係数=0.4

Units: (食料/年)/人

誕生=出生率 * 人口

Units: 人/年

貯蓄=MAX(国内総生産-消費-生産・代替資源係数*代替資源, 0)

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本)

Units: 機械

資本・産出係数=4

Units: 機械/(食料/年)

1人当たり消費量=MIN(健康で文化的な消費量, 国内総生産/人口)

Units: (食料/年)/人

図 7.2 は、死亡率の表関数の入力図です。

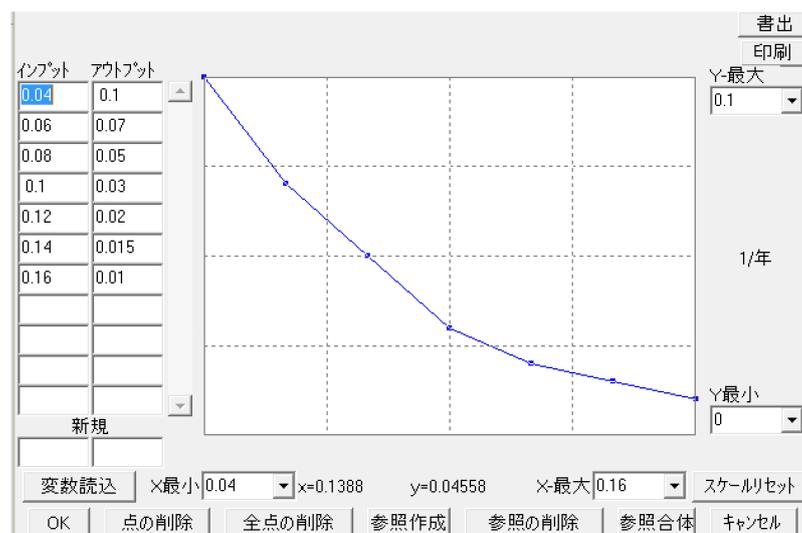


図 7.2 死亡率表

7.4 シミュレーション

図 7.3 は、代替資源比率=0 の場合に於ける社会的再生産のマクロ経済成長経路です。

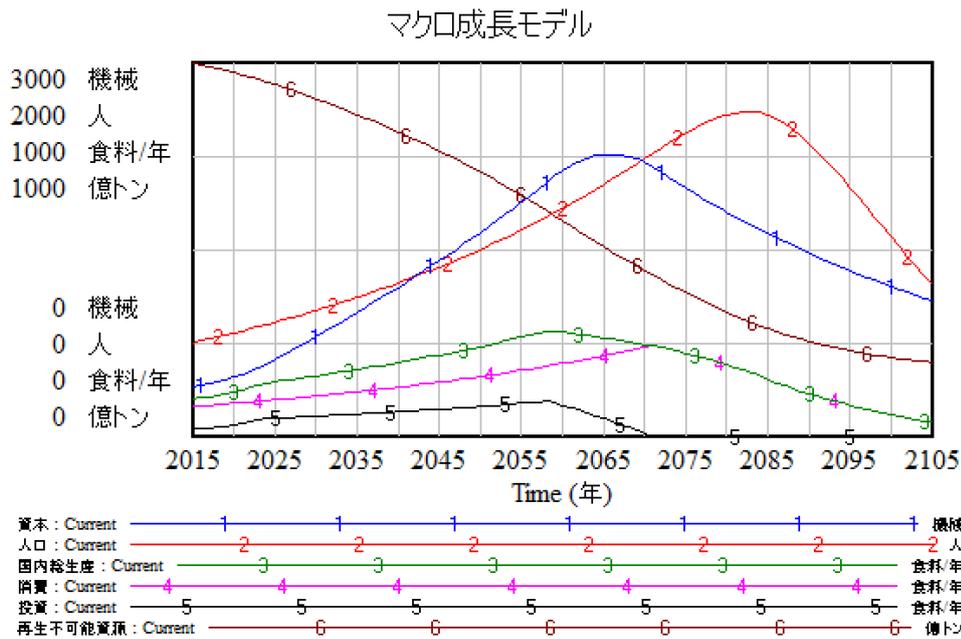


図 7.3 マクロ経済成長：社会的再生産（人口フィードバック）

シミュレーション課題 1

人口のフィードバックを導入した結果、消費（曲線 4）が国内総生産（曲線 3）を上回るといふ不整合性は解消されました。しかしながら、2071 年から 1 人当たりの消費水準が健康で文化的な消費水準 (=0.16) を下回ることになり、人口も減少し始め、社会が衰退してゆきます。このことをまず確認し、死亡率の表関数の形状を変えることにより、社会的再生産が実現できるかどうかシミュレーションしてください。

シミュレーション課題 2

死亡率表以外のパラメータを変更して、社会的再生産が達成されるかどうか、シミュレーション検証してください。

厳密にいうと、国内純生産 (= 国内総生産 - 減価償却) を上回らないことが必要になります。そうしなければ減価償却分も消費されることになり、資本が減少し始めるからです。こうしたさらなる修正は読者に委ねます。

7.5 持続可能性の条件

持続可能性（物的再生産性）条件5（前章）の代替資源比率(=0.7)を多少増大させて0.73とすれば、社会的再生産も達成されることが確認されます。図7.4は、代替資源比率を大幅に0.4まで下げた場合でも、出生率を1.5%にすれば、社会的再生産が達成される成長経路が存在することを示しています。勿論この場合には、第5章の物的再生産（代替資源）モデルで考察した、物的再生産も満たされます。すなわち、物的再生産も社会的再生産も同時に満たされるモデルが完成しました。

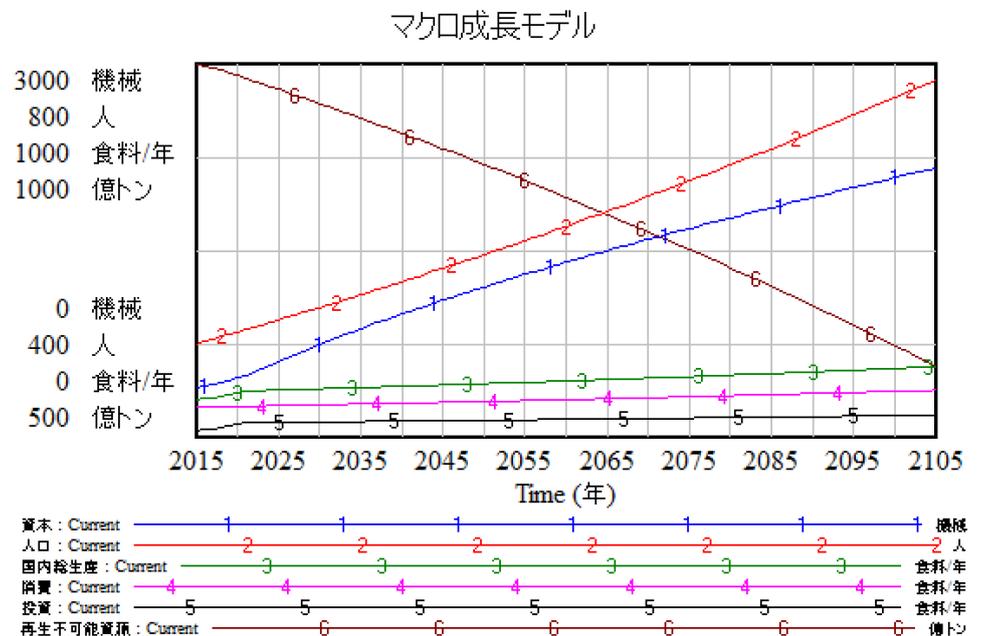


図 7.4 マクロ経済成長：物的・社会的再生産

社会的再生産のための条件

6 出生率を下げて人口増加を抑制し、消費を抑え、純投資がマイナスとならないようにする。そうすることにより、物的再生産の条件が緩和される。

7 労働市場参加比率を落として国内総生産を下げないようにする。そのためには、失業率を下げ、常に完全雇用の状態を保つようにする。

ただし、持続可能な社会は21世紀に於けるシミュレーション結果で、このモデルを22世紀にまで延長すれば、22世紀半ばで持続不可能な社会が再来します。このことを検証してください。

第Ⅳ部

エコロジカル再生産

第 8 章

エコロジカル再生産モデル

8.1 エコロジカル再生産モデル解題

物的再生産及び社会的再生産が可能になったとしても、それだけでは持続可能な社会は実現されません。なぜならば、こうした再生産活動で排出されるゴミが蓄積して地球環境を破壊し、やがてそうした再生産活動をも不可能にさせるようになる可能性があるからです。

ゴミは3つの再生産活動から排出されます。まず、不要になった機械等の資本は減価償却されますが、その過程でダンピングされます。次に、生産活動に伴い、不要になった投入・産出物は、産業廃棄物として排出されます。最後に、消費者の消費活動から常にゴミがはき出されます。こうした廃棄物は焼却処分されたり、地中に埋められたり、また地表に投棄処分されます。ここでは、こうした廃棄物は全て「ゴミ源」というストックに蓄積されるとします。

ゴミ源に堆積したゴミは、一部はリサイクルされて資源化され、またバクテリア等によって分解され、資源とし再び自然界へ還元されてゆきます。土壌、水、森林、魚等はこうして再生される「資源」ストックの例です。こうした再生可能な資源は、再生不可能資源と同じように、生産活動に利用されてゆきます。

しかしながら、ゴミ源からのリサイクルや自然界への還元速度が遅ければ、やがて地球環境はゴミで溢れかえり、物的再生産や社会的再生産自体を脅かすことになるでしょう。さらに、水や森林等の再生可能な資源といえども、その使用速度が資源の再生速度を上回れば、やがて枯渇してゆきます。再生可能資源が枯渇してくれば、第 II 部の物的再生産で考察「再生不可能資源」の枯渇と同様の持続不可能性に直面することになります。

従って、再生可能な資源が枯渇することなく生産活動が順調に継続されることがエコロジカル再生産の状態となります。持続可能な社会には不可欠な再生産の条件となります。

ここでは再生可能資源を単に資源と表現します。

8.2 エコロジカル再生産モデル

図 8.1 は、こうしたエコロジカル再生産を考慮したモデルです。前章の社会的再生産（人口フィードバック）モデルを別名で保存し、このモデルを作成してください。

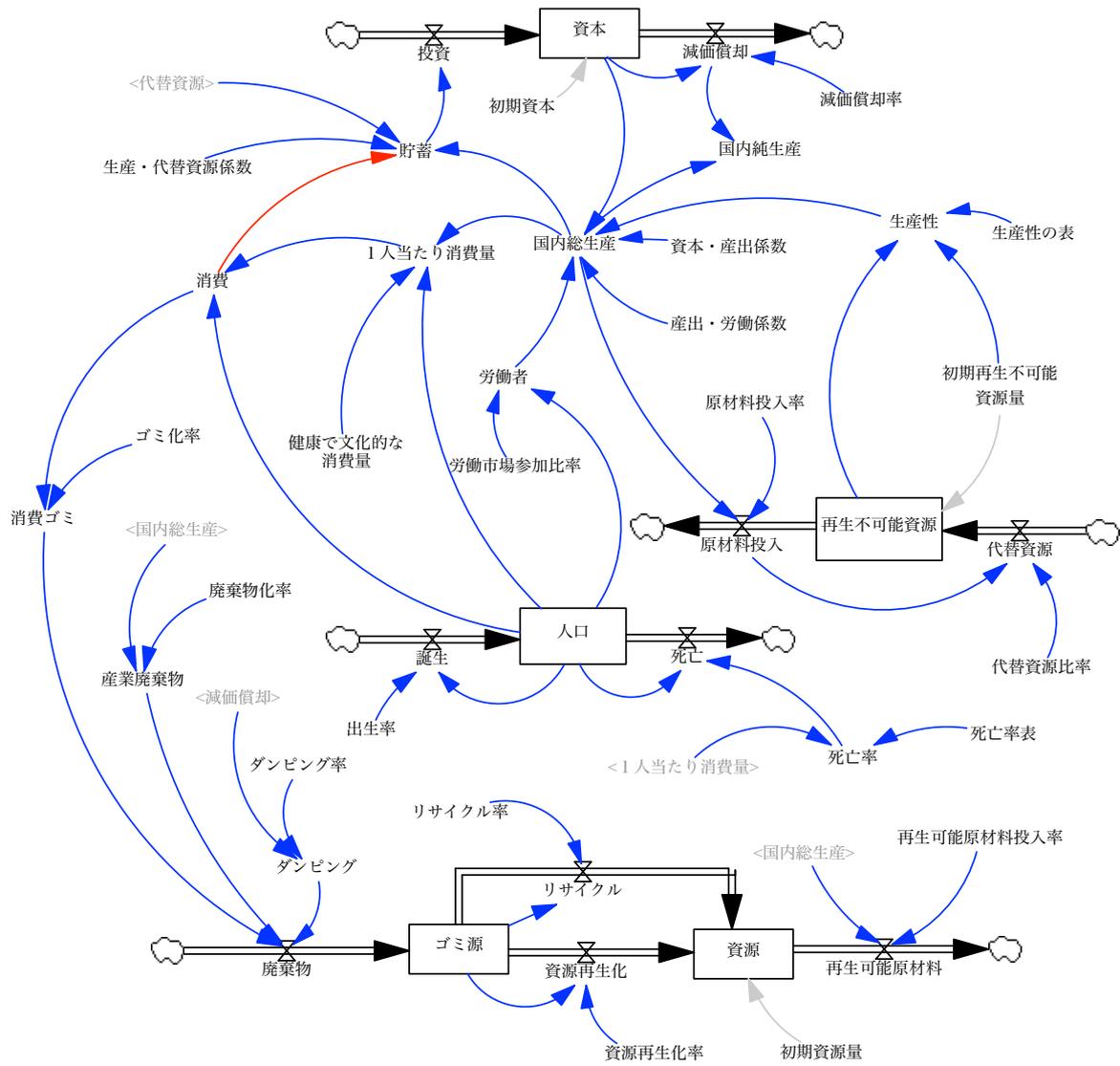


図 8.1 エコロジカル再生産モデル

8.3 エコロジカル再生産モデル式

ゴミ化率= 0.5
 Units: 資源/食料 [0,0.7,0.01]

ゴミ源= INTEG (廃棄物 - 資源再生化 - リサイクル,300)
 Units: 資源

ダンピング=ダンピング率 * 減価償却
 Units: 資源/年

ダンピング率=0.5
 Units: 資源/機械

リサイクル=リサイクル率 * ゴミ源
 Units: 資源/年

リサイクル率=0.05
 Units: 1/年 [0,0.2,0.01]

1人当たり消費量=MIN(健康で文化的な消費量, 国内総生産/人口)
 Units: (食料/年)/人

人口= INTEG (誕生-死亡,500)
 Units: 人

代替資源= 代替資源比率 * 原材料投入
 Units: 億トン/年

代替資源比率=0
 Units: Dmnl

健康で文化的な消費量=0.16
 Units: 食料/(年*人)

再生不可能資源= INTEG (代替資源 - 原材料投入, 初期再生不可能資源量)
 Units: 億トン

再生可能原材料=再生可能原材料投入率 * 国内総生産
 Units: 資源/年

再生可能原材料投入率=0.6
 Units: 資源/食料

出生率=0.03
 Units: (人/人)/年

初期再生不可能資源量=1000
 Units: 億トン

初期資本= 400
 Units: 機械

初期資源量=3000
 Units: 資源

労働市場参加比率=0.6
 Units: Dmnl

労働者=労働市場参加比率 * 人口

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

Units: 人

単位変換= 1

Units: 機械/食料

原材料投入=原材料投入率 * 国内総生産

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料

国内純生産=国内総生産 - 減価償却 / 単位変換

Units: 食料/年

国内総生産=生産性 * MIN(資本 / 資本産出係数, 産出労働係数 * 労働者)

Units: 食料/年

廃棄物=消費ゴミ + 産業廃棄物 + ダンピング

Units: 資源/年

廃棄物化率=0.1

Units: 資源/食料

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

死亡=死亡率 * 人口

Units: 人/年

死亡率=死亡率表 (一人当たり消費量)

Units: 1/年

死亡率表 ([(0.04, 0) - (0.16, 0.1)], (0.04, 0.1), (0.06, 0.07), (0.08, 0.05),
(0.1, 0.03), (0.12, 0.02), (0.14, 0.015), (0.16, 0.01))

Units: 1/年

消費=一人当たり消費量 * 人口

Units: 食料/年

消費ゴミ= ゴミ化率 * 消費

Units: 資源/年

減価償却= 減価償却率 * 資本

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年

生産・代替資源係数=1

Units: 食料/億トン

生産性=生産性の表 (再生不可能資源 / 初期再生不可能資源量)

Units: Dmnl

生産性の表 ([(0, 0) - (1, 1)], (0, 0), (0.1, 0.1), (0.2, 0.2), (0.3, 0.4),
(0.4, 0.6), (0.5, 0.8), (0.6, 1), (1, 1))

Units: Dmnl

産出・労働係数=0.4

Units: 食料/(年*人)

産業廃棄物=廃棄物化率 * 国内総生産

Units: 資源/年

誕生=出生率 * 人口

Units: 人/年

貯蓄=MAX(国内総生産 - 消費 - 生産・代替資源係数 * 代替資源,0)

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本)

Units: 機械

資本・産出係数=4

Units: 機械/(食料/年)

資源= INTEG (資源再生化 + リサイクル - 再生可能原材料, 初期資源量)

Units: 資源

資源再生化=資源再生化率 * ゴミ源

Units: 資源/年

資源再生化率=0.15

Units: 1/年 [0,0.3,0.01]

8.4 シミュレーション

図 8.2 は、代替資源比率=0 の場合に於けるエコロジカル再生産の成長経路です。

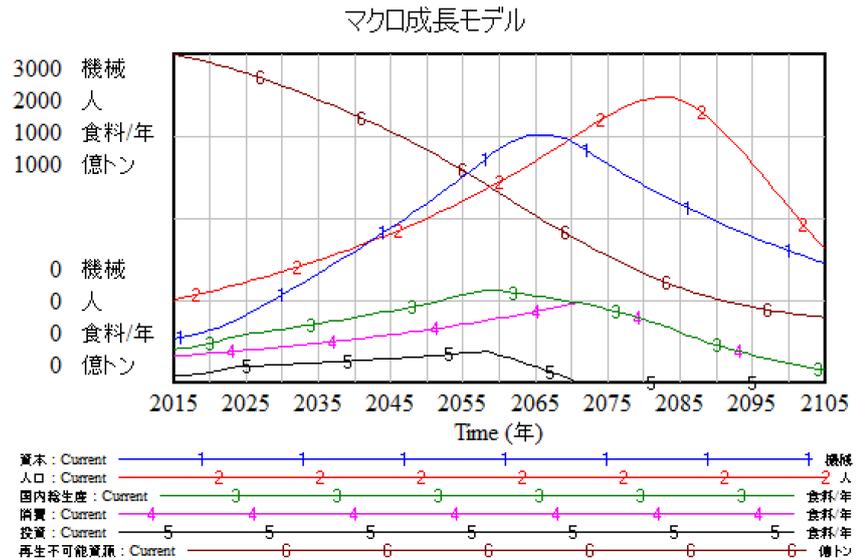


図 8.2 マクロ経済成長：エコロジカル再生産

図 8.3 は、ゴミ源、資源、再生不可能資源の残存経路です。

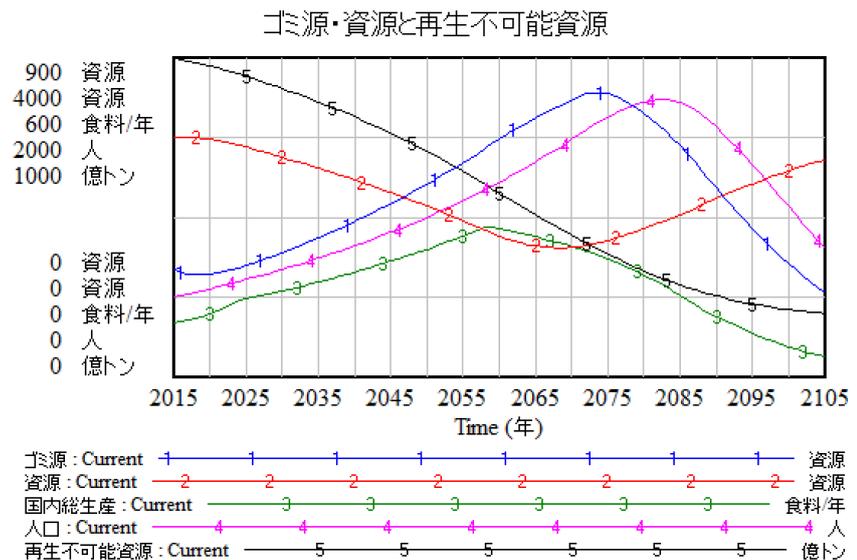


図 8.3 エコロジカル再生産：ゴミ源、資源、再生不可能資源

シミュレーション課題1

エコロジカル再生産モデルに於けるマクロ経済成長経路は持続可能ではありません。シミュレーションを実行しながら、持続可能な成長経路が実現される条件を探求しなさい。

シミュレーション課題2

課題1で求めた持続可能な経路は、ゴミ源、資源、再生不可能資源の持続可能性を同時に実現しているかどうかを検証しなさい。

シミュレーション課題3

資本や人口、消費、投資が一定となる恒常的成長経路があるかどうかを探求しなさい。

8.5 持続可能性の検証

第7章で議論したように、出生率を1.5%にし、代替資源比率を0.4に設定すれば、社会的再生産は実現されますが、それに加えてエコロジカル再生産を満たす持続可能なマクロ経済成長も確かに実現されるようになります。図8.4は、出生率を1.5%、代替資源比率を0.4とした場合に於けるエコロジカル再生産の成長経路です。

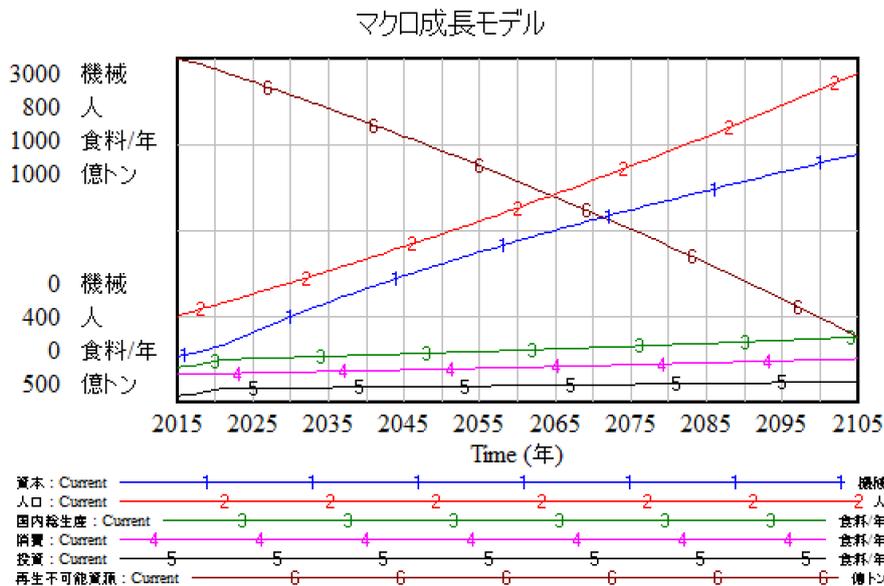


図 8.4 マクロ経済成長：エコロジカル再生産 2

図 8.5 は、この場合におけるゴミ源、資源、再生不可能資源の残存経路です。再生可能・不可能資源とも枯渇することなく、再生産活動が維持されているのがみてとれます。

第7章で同じく議論したように、出生率を変えなくても代替資源比率 = 0.73 に設定す

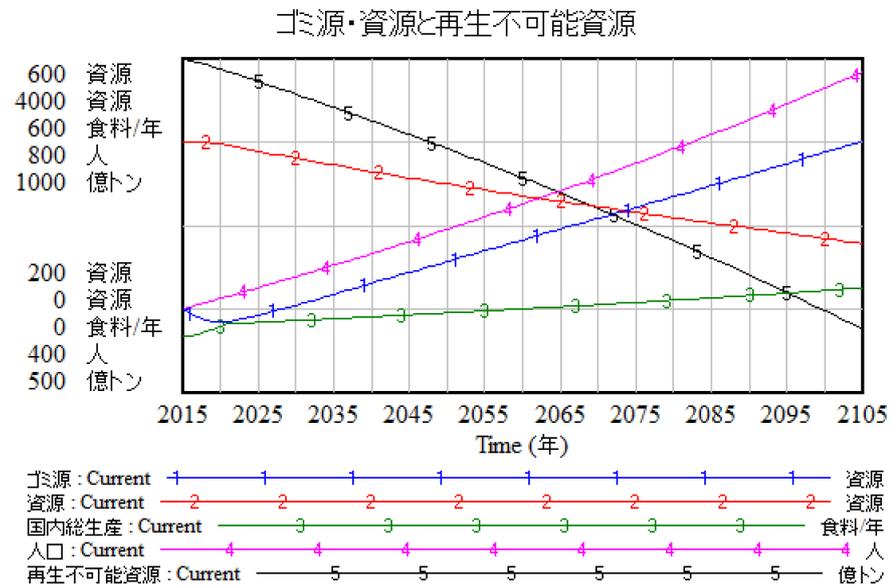


図 8.5 エコロジカル再生産：ゴミ源、資源、再生不可能資源 2

れば、社会的再生産が実現され、同時にエコロジカル再生産も達成され、持続可能なマクロ経済成長経路となります。図 8.6 は、代替資源比率=0.73 の場合に於けるエコロジカル再生産の成長経路です。

しかしながら、この場合には図 8.7 のように、資源が 2090 年で枯渇し始めます。

資源が枯渇し始めると、第 4 章で議論したように、生産活動に影響し始めるようになります。しかしながら、このエコロジカル再生産モデルでは、資源から国内総生産へのフィードバックループがありません。さらに、ゴミが地表に溜まり始めると環境が急激に悪化し、やがて出生率にも影響し始めることとなります。しかしながら、このモデルでは、ゴミ源から出生率へのフィードバックループがありません。すなわち、このエコロジカル再生産モデルは、さらなる修正が必要となります。

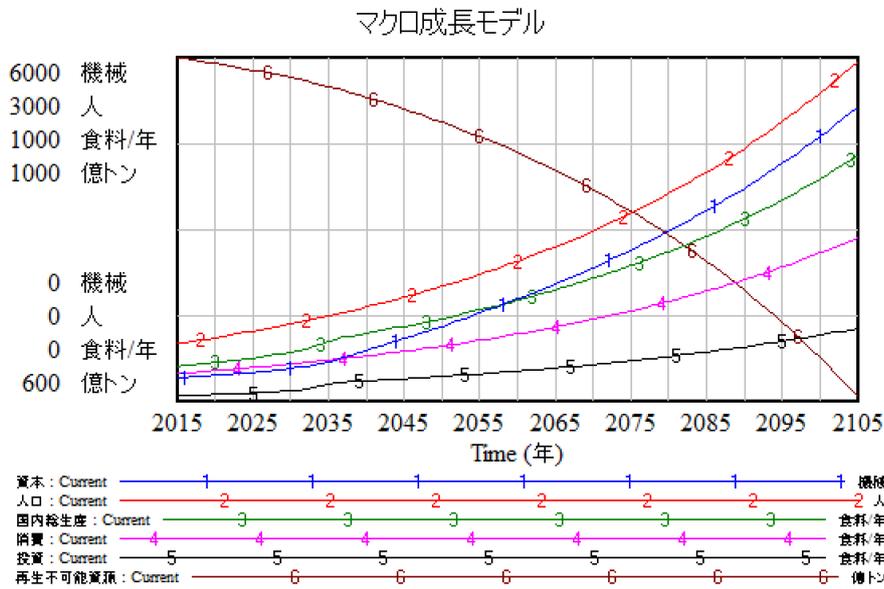


図 8.6 マクロ経済成長：エコロジカル再生産 3

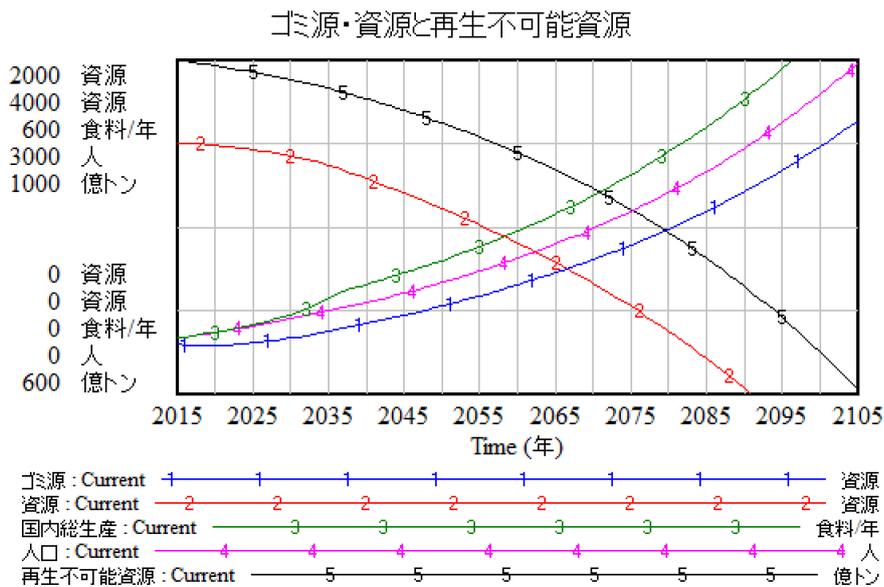


図 8.7 エコロジカル再生産：ゴミ源、資源、再生不可能資源 3

第9章

エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル

9.1 エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル解題

物的再生産、社会的再生産、エコロジカル再生産の条件がそれぞれ満たされれば、本書で探求している持続可能な社会は実現されます。そのために、前章でエコロジカル再生産モデルを作成したのですが、資源が枯渇するという不都合が発生しました。それを除去するためには、第4章で考察したと同様の以下のようなフィードバックループを導入しなければなりません。

(再生可能) 資源 → 生産性2 → 国内総生産

資源からの生産性2は生産性2表で表されます。同時に、第4章のモデルでは再生不可能資源からの生産性は、資本・産出係数表で表されていましたが、ここでは「生産性の表」として直接国内再生産に作動するように修正します。

次に、ゴミ源が増大してくれば、いずれ出生率に悪影響をもたらし始めますので、以下のようなフィードバックループも新たに導入しなければなりません。出生率は出生率表で表されます。

ゴミ源 → 出生率 → 誕生

さらに、国内総生産に用いられる再生可能資源の量は、その生産や消費から排出される排出物を上回っているという物理的な条件が考慮されなければなりません。

再生可能原材料投入率 \geq 廃棄物化率 + ゴミ化率

このモデルでは単純な等式で表現します。従って、ゴミ化率や廃棄物化率を下げるということは、同時に生産に必要な再生可能資源の利用を下げるということ、すなわち、資源を効率的に使用するという、あるいはそのような技術革新があるということと同義となります。

ダンピングはここでは考慮しないことにします。

9.2 エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル

図 9.1 は、ゴミ源や資源からのフィードバック等を考慮したモデルです。前章のエコロジカル再生産モデルを別名で保存し、このモデルを作成してください。

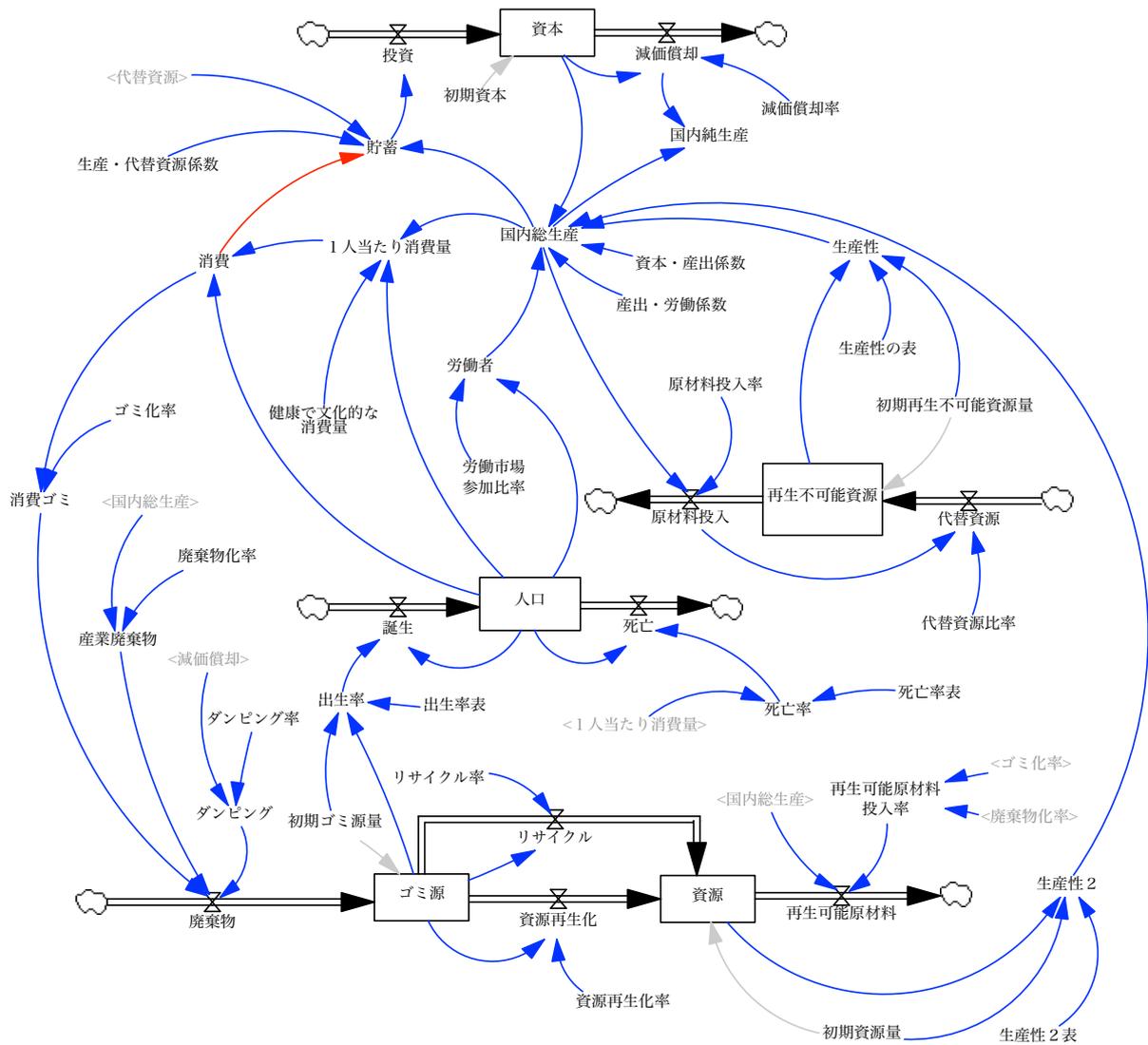


図 9.1 エコロジカル再生産 (資源フィードバック) モデル

9.3 エコロジカル再生産（資源フィードバック）モデル式

ゴミ化率=0.5

Units: 資源/食料 [0,1,0.1]

ゴミ源= INTEG（廃棄物-リサイクル-資源再生化, 初期ゴミ源量）

Units: 資源

ダンピング=ダンピング率 * 減価償却

Units: 資源/年

ダンピング率=0.5

Units: 資源/機械 [0,1,0.1]

リサイクル=リサイクル率 * ゴミ源

Units: 資源/年

リサイクル率=0.05

Units: 1/年 [0,0.5,0.01]

一人当たり消費量=MIN(健康で文化的な消費量, 国内総生産/人口)

Units: (食料/年)/人

人口= INTEG（誕生-死亡,500）

Units: 人

代替資源=代替資源比率 * 原材料投入

Units: 億トン/年

代替資源比率=0

Units: Dmnl

健康で文化的な消費量=0.16

Units: (食料/年)/人

再生不可能資源= INTEG（代替資源 - 原材料投入, 初期再生不可能資源量）

Units: 億トン

再生可能原材料=再生可能原材料投入率 * 国内総生産

Units: 資源/年

再生可能原材料投入率=廃棄物化率 + ゴミ化率

Units: 資源/食料 [0,4,0.1]

出生率=出生率表（ゴミ源/初期ゴミ源量）

Units: (人/人)/年

出生率表（[(0,0)-(10,0.06)],(0,0.05),(0.5,0.04),(1,0.03),

(2,0.02),(3,0.01),(4,0.008),(5,0.005),(10,0.003)）

Units: 1/年

初期ゴミ源量=300

Units: 資源

初期再生不可能資源量=1000

Units: 億トン

初期資本=400

Units: 機械

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。

初期資源量=3000

Units: 資源

労働市場参加比率=0.6

Units: Dmnl

労働者=労働市場参加比率 * 人口

Units: 人

単位変換=1

Units: 機械/食料

原材料投入=原材料投入率 * 国内総生産

Units: 億トン/年

原材料投入率=0.05

Units: 億トン/食料

国内純生産=国内総生産 - 減価償却 / 単位変換

Units: 食料/年

国内総生産=生産性*生産性2 * MIN(資本 / 資本産出係数, 産出労働係数 * 労働者)

Units: 食料/年

廃棄物=消費ゴミ + 産業廃棄物 + ダンピング

Units: 資源/年

廃棄物化率=0.1

Units: 資源/食料 [0,0.2,0.01]

投資=単位変換 * 貯蓄

Units: 機械/年

死亡=死亡率 * 人口

Units: 人/年

死亡率=死亡率表 (一人当たり消費量)

Units: 1/年

死亡率表 ([(0.04,0)-(0.16,0.1)], (0.04,0.1), (0.06,0.07), (0.08,0.05),
(0.1,0.03), (0.12,0.02), (0.14,0.015), (0.16,0.01))

Units: 1/年

消費=1人当たり消費量 * 人口

Units: 食料/年

消費ゴミ=ゴミ化率 * 消費

Units: 資源/年

減価償却=減価償却率 * 資本

Units: 機械/年

減価償却率=0.02

Units: 1/年

生産・代替資源係数=1

Units: 食料/億トン [0,1,0.1]

生産性=生産性の表 (再生不可能資源 / 初期再生不可能資源量)

Units: Dmnl

生産性の表 ([(0,0)-(1,1)], (0,0), (0.1,0.1), (0.2,0.2), (0.3,0.4),

$(0.4, 0.6), (0.5, 0.8), (0.6, 1), (1, 1)$

Units: Dmnl

生産性2=生産性2表（資源/初期資源量）

Units: Dmnl

生産性2表 $([(0,0)-(2,1.2)], (0,0), (0.1,0.1), (0.2,0.2), (0.3,0.4),$
 $(0.4,0.6), (0.5,0.8), (0.6,1), (1,1), (2,1.2))$

Units: Dmnl

産出・労働係数=0.4

Units: (食料/年)/人

産業廃棄物=廃棄物化率 * 国内総生産

Units: 資源/年

誕生=出生率 * 人口

Units: 人/年

貯蓄=MAX(国内総生産 - 消費 - 生産・代替資源係数 * 代替資源, 0)

Units: 食料/年

資本= INTEG (投資 - 減価償却, 初期資本)

Units: 機械

資本・産出係数=4

Units: 機械/(食料/年)

資源= INTEG (資源再生化 + リサイクル - 再生可能原材料, 初期資源量)

Units: 資源

資源再生化=資源再生化率 * ゴミ源

Units: 資源/年

資源再生化率=0.15

Units: 1/年 [0,0.5,0.01]

図 9.2 は、資源の残存量がもたらす生産性への影響を表す表関数です。

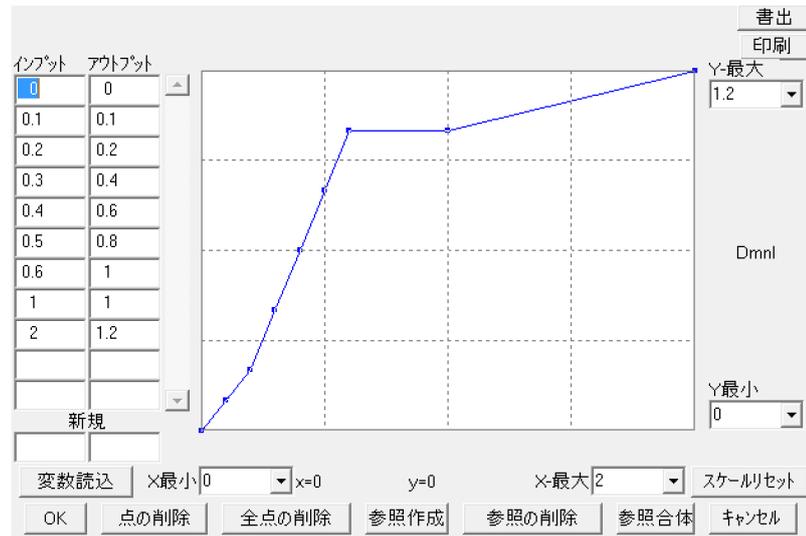


図 9.2 生産性 2 表

図 9.3 は、ゴミ源の増大が出生率にもたらす影響を表す表関数です。

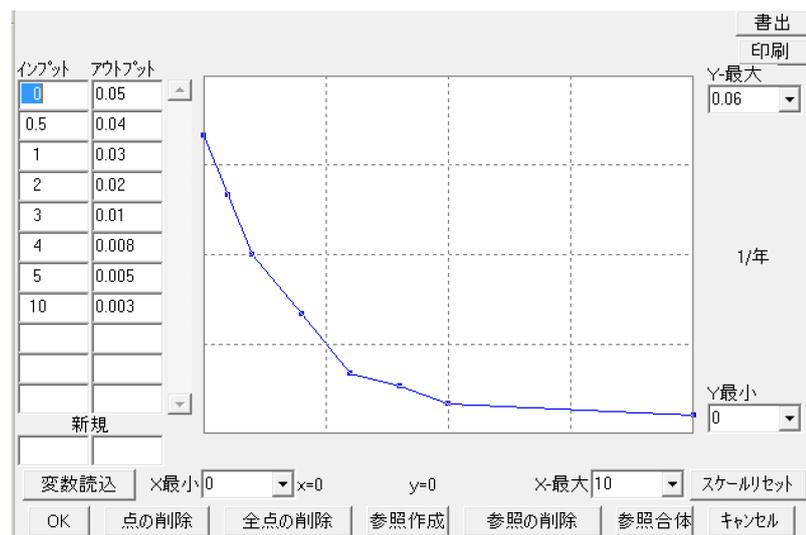


図 9.3 出生率表

9.4 シミュレーション

図 9.4 はゴミ化率が現状の 50% から 20% へと減少したり、80% に増大したりする場合のゴミ源と資源への効果を比較したシミュレです。ゴミが減少すれば、ゴミ源が減少し、増加すればゴミ源が増加するのがわかります。資源はこれとは逆の動きをします。あらかじめ予想された振る舞いとなり、ここでのモデル修正が妥当であることが確認されました。

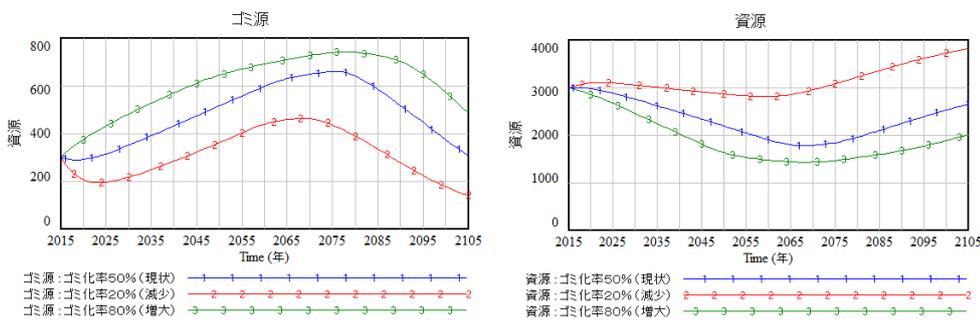


図 9.4 ゴミ化率の変化効果：ゴミ源と資源

図 9.5 はゴミ化率が現状から減少、増大する場合の国内総生産と人口への影響を比較したシミュレーションです。ゴミが減少すれば、国内総生産が増大し、増加すれば減少するのが観察されますが、意外にも 2083 年からこの変化が逆転します。人口への影響も同様に観察されますが、ここでも 2101 年から逆転が生じます。

線形思考ではとらえられない SD のダイナミックな振る舞いです。

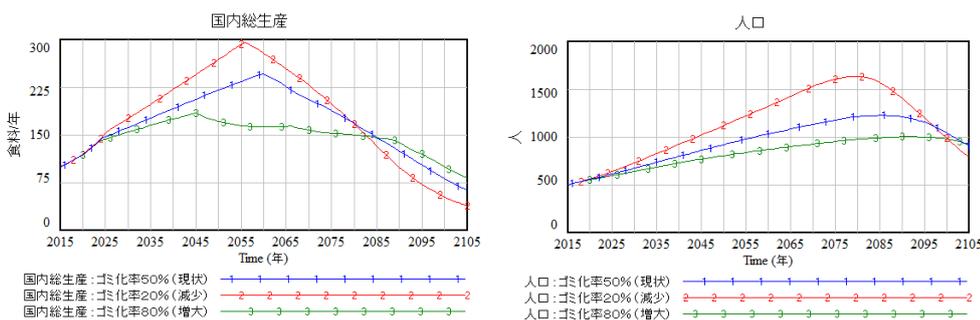


図 9.5 ゴミ化率の変化効果：国内総生産と人口

図 9.6 は、代替資源比率=0 の場合に於けるマクロ経済成長経路です。

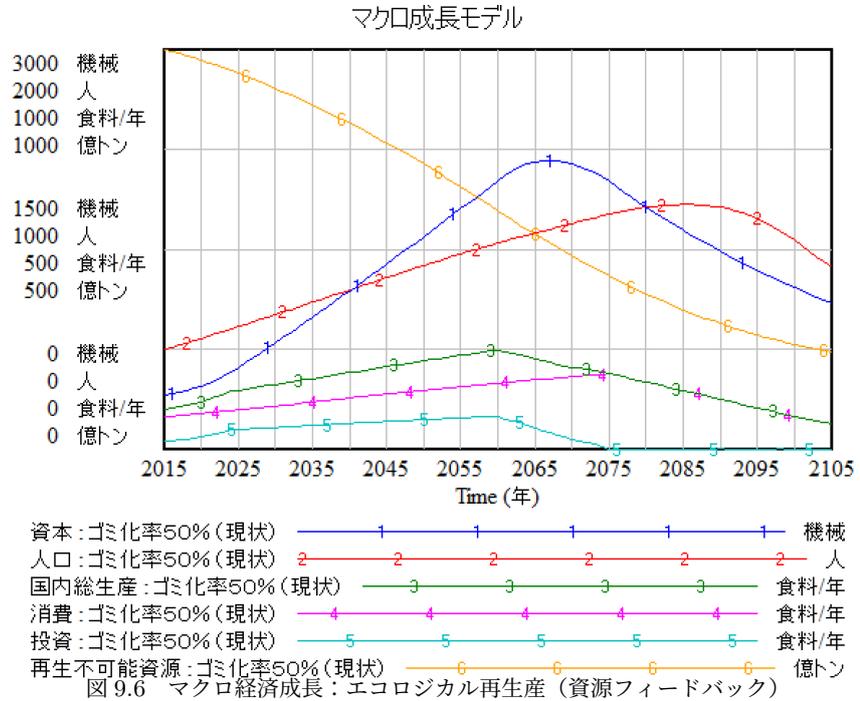


図 9.7 は、ゴミ源、資源、再生不可能資源の残存経路です。

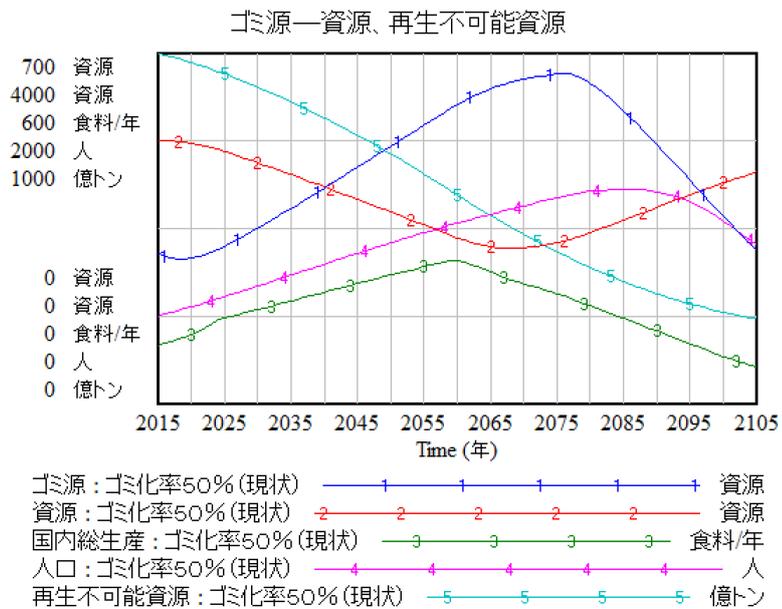


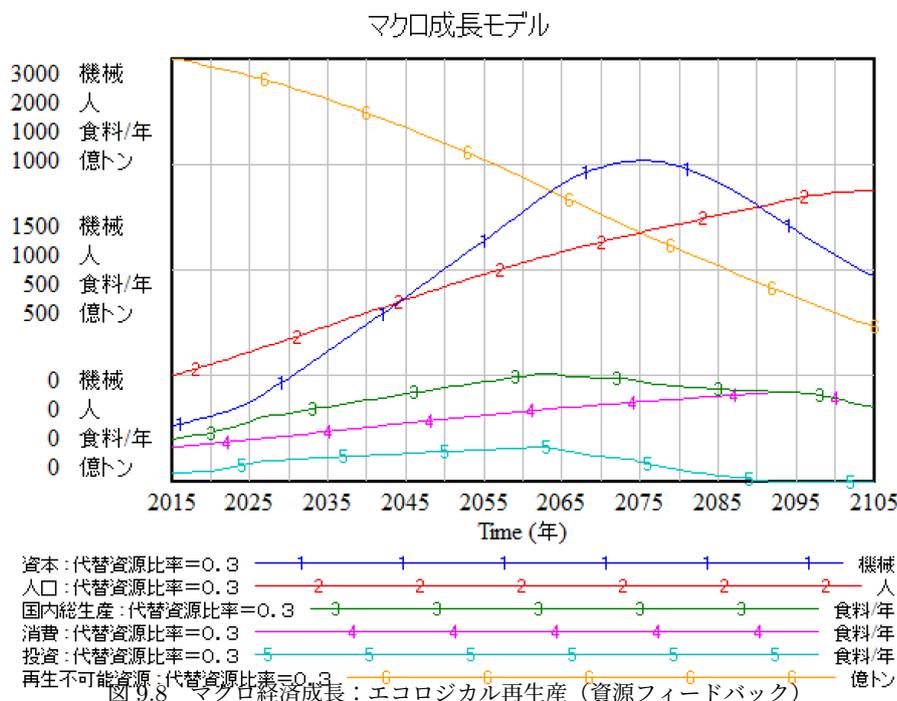
図 9.7 エコロジカル再生産: ゴミ源、資源、再生不可能資源

このシミュレーション結果から明らかのように、代替資源比率=0 の場合にはマクロ経

済成長経路は持続可能ではありません。しかしながら、前章で露呈した資源の枯渇というモデルの不斉合成は解消されました。

シミュレーション課題

それでは、このエコロジカル再生産（資源フィードバック）モデルを用いて持続可能性の経路を探求して行きましょう。図 9.8 は、代替資源比率=0.3 の場合に於けるエコロジカル再生産のマクロ経済成長経路です。人口は持続可能となりますが、資本は持続不可能のままです。その理由は、増大する人口が消費を膨らませ、投資に回すべき貯蓄が枯渇するからです。



このモデルでは表関数として出生率、死亡率、生産性の表、生産性2表の4つが使用されています。そこでまず、出生率や生産性等の表関数の形状が変化すれば、マクロ経済成長経路や資源がどのように変化するかを、シミュレーションで確認してください。

次に、こうした変化と従来のパラメータ値の変化を組み合わせ、エコロジカル再生産が達成できるかどうかをシミュレーションしてください。

第7章では出生率のパラメータ値を変化させましたが、ここでは出生率は表関数として内生化されていますので、その形状を変更することが必要となります。

9.5 持続可能性の条件

エコロジカル再生産モデルでは、ゴミ源と資源の2つのストックが新たに追加されました。エコロジカル再生産の条件とは、ゴミ源を増大させず、資源を維持するような政策や戦略となります。ゴミ源を減少さ、再生可能資源を増やすための条件を、以下考察してゆきます。

エコロジカル再生産のための条件

- 8 減価償却からのダンピングを減らすような資本の利用を考える。
- 9 生産に伴う産業廃棄物を減らす。
- 10 消費に伴うゴミを減らす。
- 11 ゴミ源のリサイクル利用を高める。
- 12 ゴミ源が宝の資源に変換される自然の循環の速度を高めるような工夫をする。
- 13 ゴミ源のリサイクル利用を高める。
- 14 資源の効率利用で、生産性を高める。

持続可能性の検証

これまで21世紀に於ける持続可能性を検証してきました。上のシミュレーション課題で挑戦していただいたように、21世紀までのシミュレーションでは持続可能な社会が実現されます。勿論、これは持続可能な一経路に過ぎません。他にも同様な経路があるはずですが、しかしながら、こうしたシミュレーションを22世紀に延長すれば、再び持続可能な経路が出現してきます。資本、国内総生産、人口等全て減少し始め、持続不可能となります。勿論200年も先の遠い未来のことなど、大多数の人には興味がないでしょう。しかしながら翻って過去を振り返れば、200年前の人々が（再生不可能）資源を大切に保存しておいてくれたおかげで、現在の私たちの豊かな暮らしがあるということにも想いを馳せるべきでしょう。私たちは、現在、原子力発電から得られるエネルギーを約40年間消費するために、核廃棄物という危険なゴミ源を、今後数百年、数千年にわたって未来世代に押し付けるという過ちを犯し続けています。

2世紀にわたるシミュレーションを実行することにより、私たち人類は常に持続可能な社会の条件を求めて、資源の無駄遣いをやめ、新技術を開発しながら、歩み続けていかなければならない宿命を背負っているのだということに気づかされることでしょう。

22世紀までのシミュレーションを実行するには、スケッチツールの「入出力オブジェクト」をクリックして定数のFINAL TIMEを選択し、その範囲を2015から2200に設定して、スライダーを作成。

9.6 持続可能な社会へのガイダンス：まとめ

エコロジカル再生産（資源フィードバック）モデルは、資本、再生不可能資源、人口、ゴミ源、資源の5つのストックからなるモデルです。持続可能な社会を考える際に最小限不可欠となるストックを用いた最も簡単なモデルです。このモデルを用いて持続可能な条件を考えるということは、システムダイナミックスの観点からは、こうしたストックの量を維持したり、減少させたりしながら、その振る舞いを安定化させるということです。

持続可能性の条件として、本書では以下の14の政策・戦略を導出できました。

1. 減価償却率が5%を超えて大きくならないこと、すなわち、機械等の資本設備の維持管理を徹底し、長く使用できるようにする。 以下、物的再生産条件
2. 資本・産出係数が10を超えるように資本の生産性を落とさないこと、すなわち、常に資本の生産性を高めるように技術革新を行ってゆく。
3. 限界消費性向が0.92を超えるような贅沢をしないこと、すなわち、常に消費を控えめにして貯蓄し、投資に回すようにする。
4. 原材料投入率を0.2以下まで減らすようにすること、すなわち、再生不可能資源を効率よく利用し、ムダ使いしないと同時に、その効率利用の技術革新に努めるようにする。
5. 化石燃料やレアメタル等の再生不可能資源の代わりに代わる代替資源の開発を行ない、代替資源比率を0.7とする。
6. 出生率を下げて人口増加を抑制し、消費を抑え、純投資がマイナスとならないようにする。そうすることにより、物的再生産の条件が緩和される。 以下、社会的再生産条件
7. 労働市場参加比率を落として国内総生産を下げないようにする。そのためには、失業率を下げ、常に完全雇用の状態を保つようにする。
8. 減価償却からのダンピングを減らすような資本の利用を考える。 以下、エコロジカル再生産条件
9. 生産に伴う産業廃棄物を減らす。
10. 消費に伴うゴミを減らす。
11. ゴミ源のリサイクル利用を高める。
12. ゴミ源が宝の資源に変換される自然の循環の速度を高めるような工夫をする。
13. ゴミ源のリサイクル利用を高める。
14. 資源の効率利用で、生産性を高める。

持続可能性を論じる本で提案されているほぼすべての条件が、レベルは抽象的ですが、網羅されていると思います。従って、ここでのエコロジカル再生産モデルを思考の中心に据えて、相互依存し合うシステムの振る舞いを理解することが、今後、持続可能な社会を建設してゆく際に私たちを導いてくれるSDガイダンスとなってくれることでしょう。

第Ⅴ部

代替生産—太陽光発電—モデル

第 10 章

会計システムダイナミックス

10.1 持続可能性と市場経済における収益性

ここまでの考察から、持続可能な社会を実現するためには、ゴミ源を増やさないといいたエコロジカル再生産可能条件も大事ですが、可能な限り再生不可能資源に依存しない社会を目指すしかないということが第一義的に重要であるということが明らかとなってきました。そのためには、再生不可能資源を効率よく利用して無駄使いしないことと、それに代わる代替資源、特に代替エネルギーの確保が非常に重要となります。そこでこの第 V 部では、その一例として太陽光発電で石油、石炭、天然ガス等の化石エネルギーを代替するモデルを考察してゆきます。

私たちの住んでいる社会は市場経済社会で、太陽光発電等の代替エネルギーは、こうしたミクロの市場経済社会で民間セクターが環境投資を行い、具体的に生み出して行く以外に方法はありません。そのためには、太陽光発電への投資費用が回収されなければ、その代替エネルギー投資プロジェクトは民間セクターでは実行されません。市場経済社会における生産活動が物的再生産及び社会的再生産を満たすようにするためには、そうしたプロジェクトや事業が収益や利益をもたらさなければならぬということです。

この物的・社会的再生産の概念を用いた持続可能性と市場経済における収益性の関連を筆者は、[?, 1997] で数式を用いて厳密に分析しました。そして以下のような簡潔な一般公式を得ました。

収益性 \implies 物的・社会的再生産

すなわち、収益性をもたらすビジネスとして成立する生産活動は、すべて物的・社会的再生産条件を満たしているということです。勿論、収益性は市場経済における持続可能性の必要条件にすぎず、十分条件ではありません。例えば、政府や自治体・NPO主導の物的・社会的再生産プロジェクトもありますが、こうしたプロジェクトは往々にして税金や助成金を投入したものであり、収益性が無視されています。市場経済の収益性が無視された環境プロジェクトは長続きしません。なぜならば、その負担に財政が耐え切れなくなり、やがて破綻に追い込まれるからです。

それでは、物的・社会的再生産の必要条件であるこうしたプロジェクトや事業の収益性はどのように分析できるのでしょうか。

10.2 会計システムダイナミックスによる複式簿記

広く一般的に利用されている会計原則 (Generally Accepted Accounting Principles) で収益性を分析する経営手法が、財務3表といわれる損益計算書 (P L)、貸借対照表 (B S)、キャッシュフロー計算書 (C S) による分析です。特に法人企業にはこうした財務3表の提出が法律で義務づけられており、そのために税理士や公認会計士が財務3表の作成作業に深く関わっています。さらに法人企業社内でも、経営戦略やプロジェクトの企画・立案に管理会計といわれる経営分析の手法が広く利用されています。

こうした財務3表の経営分析の基礎になっているのが、複式簿記という会計システムの考え方です。従って、市場経済における持続可能性を分析するためには、これまで用いてきたシステムダイナミックスによるモデリング分析だけでは十分ではなく、それに加えて複式簿記による財務3表の経営分析も不可欠となってきます。

筆者は、システムダイナミックスのストック・フローの概念を利用すれば、一般の人には複雑に見える複式簿記の仕分けや会計原則の仕組みを可視化して、誰もが簡単に統一的に理解できるようになる手法に思いつきました。そしてそのモデリング手法を「会計システムダイナミックス」という概念で体系化し、2003年のニューヨークでの第21回国際システムダイナミックス学会で研究報告しました [?, 2003]。会計が万人の必須知識となるための会計システムダイナミックスの誕生です。

会計システムダイナミックスの学習は、本書のメインテーマからは多少横道にそれるように思われるかもしれませんが、環境プロジェクトや企業戦略投資等の経営分析に必須のモデリング手法ですので、じっくり腰を落ち着けて学んでいただきたい。会計システムダイナミックスによるモデリングは、現在徐々に世界的にも普及しつつありますので、近い将来システムダイナミックスによるプロジェクト・投資戦略モデリング手法の主流・王道になるものと確信しております。

この用語は言葉通り、会計システムとシステムダイナミックスという2つのシステムを組み合わせて造語されました。会計システムは、中世イタリアのベニスの商人から始まる、複式簿記の原理を用いて決済を記述するという社会科学の基礎理論であり、また本書でこれまで利用してきたシステムダイナミックスは、数学的に換言すれば17世紀のニュートン力学から始まる微分方程式という自然科学の動学基礎理論です。こうして社会科学と自然科学の基礎理論を合体させたのが、会計システムダイナミックスというモデリングの方法論です。この方法に立脚して作成されるシステムのモデリングは、もっとも頑強で信頼できるシミュレーション分析の基礎を提供することになります。以下ではこの会計システムダイナミックスの考え方を簡単に説明します。詳しくは、[?, 2013] の第3章 "Accounting System Dynamics"、また日本語によるワーキングペーパー [?, 2014] をご覧ください。

会計システムの核心は複式簿記です。ではなぜ、中世のベニスの商人以来、複式簿記が必要とされてきたのでしょうか。それは資金の貸し手が貸出金を記録し、返済を管理する必要に迫られたからです。貸出金（借り手から見れば借金）を貸方と簿記し、借り手資産となる借金を借方と簿記したのです。さらに資金の借り手にとっても、借金を元手に商売を展開する過程で、借金の返済額や、利潤の概念、純資産がいくらあるのか等を管理する必要が出てきたからです。

こうした取引の簿記は、現金の決済を伴わない場合には単式簿記のキャッシュフロー計算書としては記録できないのです。複式簿記はこうした経過を辿って発展してき、近代資本主義の発展と共に完成化されてきたのです。かの文豪ゲーテは次のように複式簿記を賞賛しました。

商売をやってゆくのに、広い視野をあたえてくれるのは、複式簿記による整理だ。整理されていればいつでも全体が見渡される。細かいことでまごまごする必要がなくなる。複式簿記が商人にあたえてくれる利益は計り知れないほどだ。人間の精神が産んだ最高の発明の一つだね。Johann Wolfgang von Goethe (1747-1832), 「ヴィルヘルム・マイスターの修行時代、山崎章甫訳、岩波文庫 2001.1 上巻 pp.55」下線部筆者強調。

このように複式簿記は、「いつでも全体が見渡せる」「人間の精神が産んだ最高の発明の一つ」と賞賛されることになるのですが、実践的には複式簿記は非常に複雑で、会計の専門家以外は理解しがたいと思われています。誰でもが手軽に利用できるようにならなければ、人類に貢献する最高の発明とはなりません。このギャップを埋めるのが、筆者が提案するストック・フローの概念を用いた「会計システムダイナミクス」なのです。

複式簿記は、資産と、負債・純資産がバランスするように同じ取引を貸方・借方に分けて複式に記述する手法です。このようにして作成された会計簿を貸借対照表 (Balance Sheet) といいます。貸借対照表で用いられる資産、負債・純資産の具体的な勘定科目は、システムダイナミクスのストック・フローの概念を用いれば、全てストックとなります。そしてストックはすべて流入・流出フローによってのみ変動します。

図 10.1 は、会計システムダイナミクスによる貸借対照表の構造を示したもので、これを簡単に説明してゆきます。まず

$$\text{資産} = \text{負債} + \text{純資産}$$

と左右でバランスしています。Balance (貸借対照) している Sheet (表) と呼ばれる所です。ところが残念なことにこのバランスの意味を、 $\text{資産} - \text{負債} = \text{純資産}$ 、とバランスさせると説明している教科書が大半です。この説明だと、純資産はバランス (資産 - 負債) させる調整項目のように計算されることになると解釈され、誤解を生みます。一つの取引に対して資産と負債・純資産が同時に増減し、バランスするように貸方と借方に仕分けして簿記するというのが複式簿記の大原則です。ストック・フローを用いると、貸借対照表の左右が常にバランスするようにストック勘定科目にフローを描いてゆかなければならないということになります。以下、図 10.1 のフロー番号順に、このバランスするフローの流れを簡単に見てゆきます。

- ① 資産の増減。資産の増加を流入フローで、減少を流出フローで表します。
- ② 負債・純資産の増減。負債・純資産の増加を流入フローで、減少を流出フローで表します。
- ③ 資産の増加、負債・純資産の増加。両者の増加を流入フローで表します。
- ④ 資産の減少、負債・純資産の減少。両者の減少を流出フローで表します。

このように流入フロー、流出フローでバランスするようにモデル化してゆけば、貸借対照表は完成します。ストックの変動パターンは上の4つの組み合わせしかありません。実に簡単に複式簿記がモデル化できます。こうした手法のメリットは、とりわけ簿記・会計学の初学者が貸方、借方といった概念に煩わされることなく、お絵描きをしながら複式簿記の原理・原則が理解できるということです。

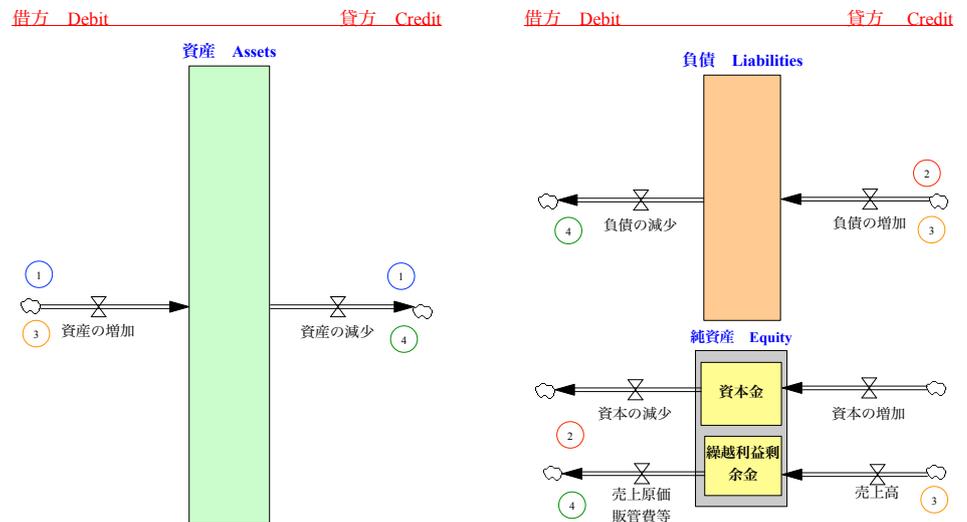


図 10.1 会計システムダイナミックスによる貸借対照表の基礎構造

参考までに、貸借対照表 (B/S) の代表的な勘定科目の具体例を以下に挙げておきます。これらの勘定科目は全てストックとなり、上のフローの4つの組み合わせパターンは、具体的にはこれらの個々のストックに対応して適応されます。

資産—流動資産 現金・預金、受取手形、売掛金、有価証券、商品、前払費用、繰延税金資産、貸倒引当金。

(このうち、現金・預金ストックのみを取り出して、その流入・流出フローを計算したものが、キャッシュフロー計算書となります。)

資産—固定資産—有形 建物、構築物、車両運搬具、工作器具備品、土地、建設仮勘定。

資産—固定資産—無形 ソフトウェア、その他無形固定資産。

資産—固定資産—投資等 長期貸付金、長期前払費用、差入保証金、貸倒引当金。

負債—流動負債 支払手形、買掛金、短期借入金、未払金、未払費用、未払法人税等、未払消費税等、預り金、賞与引当金。

負債—固定負債 長期借入金、退職給与引当金。

純資産—資本金

純資産—資本剰余金 資本準備金、その他資本剰余金。

純資産—繰越利益剰余金 利益準備金、別途積立金、当期末処分利益。

(この繰越利益剰余金の流入・流出フローが損益計算書の収入・支出となります。)

10.3 財務3表簡素モデル

上述の会計システムダイナミックスによるモデリング手法を用いて、財務3表モデルを作成する仕方を具体的に説明してゆきます。図 10.2 は、こうした手法で構築した財務3表簡素モデルです。環境NPOや企業等が資金を調達して、新規プロジェクトをはじめの場合に必要な資金の流れ、その運用を一般的に分かりやすく可視化したモデルです。ビジネスプロジェクトや事業は概ね以下のような流れで進行してゆきます。

資金の調達 どんな投資プロジェクトでも、自己資金で賄えない場合には、まず資金の調達から開始しなければなりません。新株を発行して資本金を調達したり銀行から借り入れをします。(社債等による資金調達は、新規ビジネス事業が確立してからの話である)。すなわち、資金はまず右側から財務諸表に流れ込むとイメージして下さい。

投資活動 こうして得た資金は、いったん現金・預金といった資産となり、それを用いて工場や機械等生産設備に投資してゆきます。ここでは現金・預金の資産が、有形固定資産に変形してゆくとイメージして下さい。具体的には、例えば次章で説明の太陽光発電プロジェクトでは、現金が太陽光発電パネルへの設置となります。

生産活動 次に生産に必要な原材料、商品を仕入れ、また労働者、従業員を雇用します。原材料等は買掛金で購入し賃金は現金で支払います。

マーケティング こうして商品が出来上がると、マーケティング等の販管費(販売費及び一般管理費)を計上しつつ販売活動を開始し、その経費は現金・預金から支払います。この段階では、調達した資金が、資産(現金・預金)や純資産の左右ストックから、減少してゆくとイメージして下さい。

売上 その結果、売上が実現し、その分、繰越利益剰余金が増加し、販売代金が売掛金として計上されます。ここで新たに右側から売上金というフローの資金が流れ込み、同時にそれが左から売掛金を増大させてゆくとイメージして下さい。

借金返済 売掛金が回収されれば現金・預金に入金され、そこから買掛金の支払いや借入金の元利返済額が支払われます。

減価償却 最後に、投資した有形固定資産を減価償却します(減価償却は、生産活動に起因する場合は在庫に上積みし、販売等その他に起因する場合は販管費から控除するといった2通りの処理方法があります)。そして法人税も支払います。

このように貸借対照表は右から資金が流入し、いったん左の現金・預金に貯めて、そこから投資や生産活動に使用し、また販売費及び一般管理費等の費用を支払い、売上が実現した段階で、また右から資金が流入するといった一連のダイナミックなお金の流れを記述するキャンパスとなっています。貸借対照表を資産や負債・純資産の勘定科目の数字として静態的に眺めるだけでは、こうした資金のダイナミックな動きが理解できません。会計システムダイナミックスの特徴は、このように資金のダイナミックな動きを可視化して捕らえられることにあります。

キャッシュフロー計算書(CS)は、こうした資金の流れの中でどのような位置を占めているでしょうか。現金・預金は、流動資産としていつも貸借対照表の資産のトップに鎮

複式簿記のモデリング原則は、B/Sの勘定科目(ストック)を変動させるフローの変数名は重複して用いるということです。重複するフロー変数名は、代行変数で代用したり、そのフローに矢印を結んで定義式で追加します。

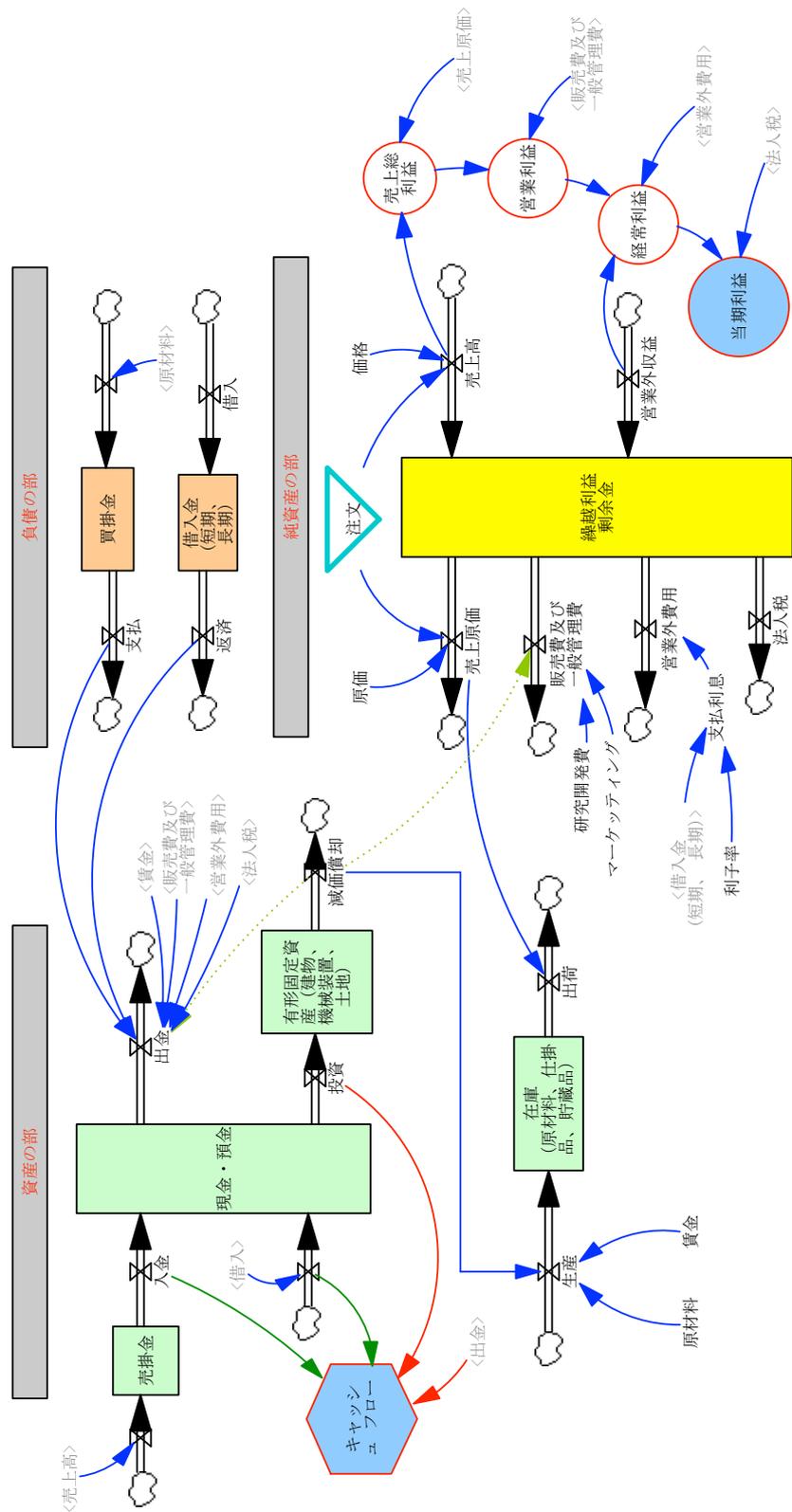


図 10.2 会計システムダイナミクスによる財務3表簡素モデル

座する勘定科目です。すでに上述したように貸借対照表の勘定科目は全てストックですので、現金・預金科目もストックです。これに流入フローや流出フローを追加すると、単式簿記では家計簿となり、貸借対照表ではキャッシュフロー計算書となります。よってネットキャッシュフローは、

$$\text{ネットキャッシュフロー} = \text{流入フロー} - \text{流出フロー}$$

と計算されます。これが会計の教科書で説明される直説法によるキャッシュフロー計算書です。このネットキャッシュフローがマイナスとなるとやがて現金・預金ストックが枯渇し、その時点で企業は倒産に追い込まれます。たとえ貸借対照表の純資産が黒字であっても、黒字倒産となります。従って、ネットキャッシュフローはプロジェクト成否の最も重要な指標となります。

次に損益計算書（PL）ですが、これは貸借対照表の純資産にある（繰越）利益剰余金というストックへの流入・流出フローとして、例えば、円/月といった単位をもつフロー値で、家計簿と同様に計算されます。収入として売上高、営業外収益等があり、支出として売上原価、販売費及び一般管理費、営業外費用等があります。単式の家計簿と違うのは、家計簿では現金が支払われた時点でキャッシュフローとして記帳されるのに対して、損益計算書ではこうした現金支払いの有無には直接関係なく、企業が受取を期待する収益や費用が発生した時点で簿記されるという点です。

経営分析でよく用いられる損益計算書の分析概念は次のようになります。

売上総利益＝売上高－売上原価

営業利益＝売上総利益－販管費

経常利益＝営業利益＋（営業外収益－営業外費用）

税引前当期利益＝経常利益＋（特別利益－特別損失）

当期利益＝税引前当期利益－法人税

このように貸借対照表の資産の側にはキャッシュフロー計算書が内包されており、純資産の側には損益計算書が内包されていますので、これら財務2表は貸借対照表とは常に不可分な関係にあります。すなわち、会計システムダイナミクスによるプロジェクト（ビジネス）モデルでは、財務3表が不可分な統合システムと捉えられるのです。このように図10.2の財務3表簡素化モデルは、簡素な形ですが財務3表が統合されるシステムのエッセンスを可視化しており、これによって資金の流れを理解することで会計のダイナミックな全体像が一瞬にして理解できるようになります。まさに文豪ゲーテが賞賛したように「広い視野を与えてくれるのは、複式簿記による整理だ。整理されていればいつでも全体が見渡される」ようになります。会計システムダイナミクスは、万人にいつでも全体が見渡せる視野を提供できるモデリング手法となるのです。次章では、この方法を用いて、太陽光発電モデルの作成に挑戦します。

税引前当期利益は、法人企業にとっては最も重要な経営判断指標となりますが、図10.2の簡素モデルでは省略されています。

第 11 章

太陽光発電モデル

11.1 代替資源—太陽光発電—モデル解題

再生不可能資源に代わる代替資源の一例として、太陽光発電投資の収益性をシミュレーションするモデルを考えてゆきます。筆者は1990年代、世界未来研究学会 (World Futures Studies Federation) を舞台に未来研究に没頭してきました。そうした研究活動の一環として、1995年から国生み伝説の淡路島にて地球環境に優しい未来のソーラー・エコ・ホームづくりに着手してきました。

図 11.1 は、1995年に淡路島で最初に設置した3Kwの太陽光発電パネルです。その当時の太陽光パネルの価格は630万円で、そのうち330万円の助成金をNEDO（新エネルギー開発機構）から得て、残りの300万円（プラス土手の工事費用等）は借入金で設置しました。未来研究学者としての矜持にかけても太陽光発電は地球環境に優しい家づくりに不可欠だとの思いが先行し、対費用効果を無視した投資となりました。



図 11.1 淡路島第1号の太陽光発電パネルを地元小学生が見学（2001年）。
<http://www.muratopia.org/Awaji/Live/EcoHome/index.html> 参照。

当時、屋根上ではなく土手にパネルを設置するという工法は非常に奇抜で珍しく、近くで直接手に触れて観察できるということで地元の小学生が理科の学習の一環として見学に来られました（2001年）。屋根にはパッシブなOMソーラーシステムを設置しました。

そこで本章では、環境プロジェクトモデリングの一例として、この太陽光発電モデルを会計システムダイナミックスの手法で作成して、その投資効果を分析してゆきます。

11.2 太陽光発電モデル

図 11.2 は、会計システムダイナミクスによる太陽光発電モデルです。前章で考察した資金の流れをイメージしながらこのモデルを作成してください。

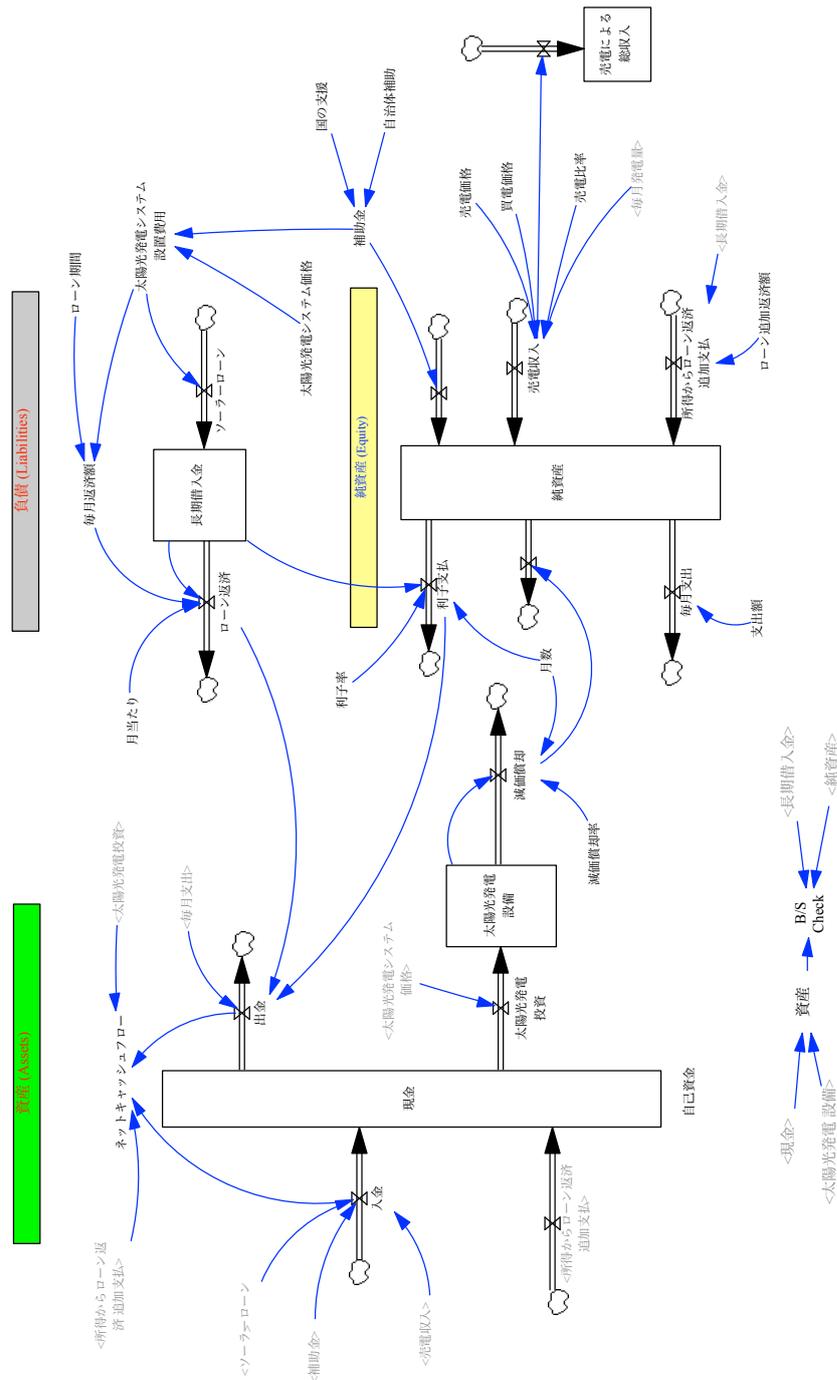


図 11.2 太陽光発電モデル

図 11.3 は、毎月の発電量を計算する太陽光発電サブモデルです。このモデルを作成してください。

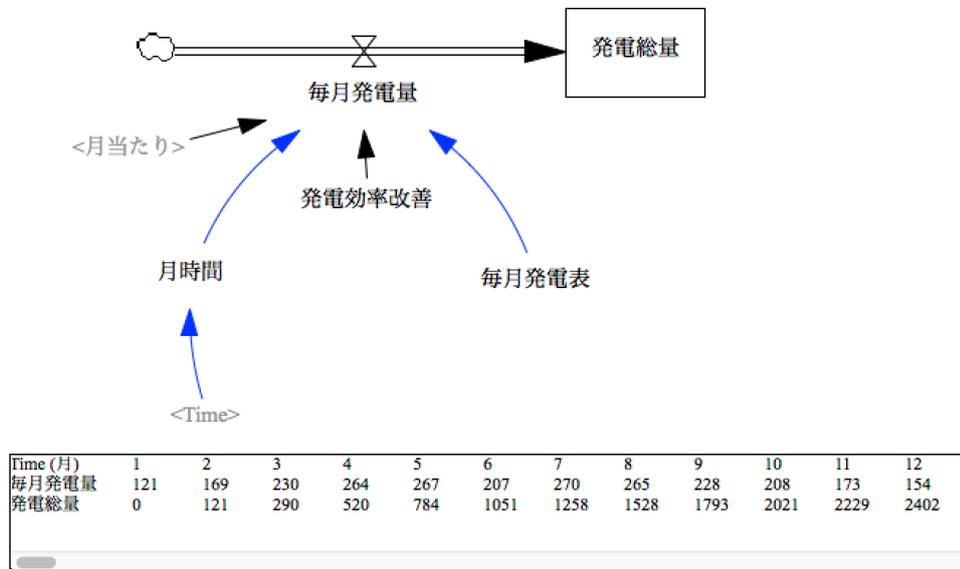


図 11.3 毎月発電量モデル

このサブモデルでは、1～300月の時間 (Time) の流れを1月～12月の年間ごとの月に変換して、月ごとの太陽光発電データを読み込まなければなりません。そのためにはちょっとした工夫が必要となりますが、詳細は以下の(28)式を参照ください。

会計システムダイナミクスによる応用モデルの雛形

前章の「会計システムダイナミクス」の議論をこのモデルを具体例としながら、再度学習してください。貸借対照表、キャッシュフロー計算書、損益計算書からなる財務3表はこのモデルではどのように作成されているのでしょうか。ここでのモデル例は、環境プロジェクトモデルのみではなく、企業の投資戦略モデル等の雛形としても広く応用できるものです。ぜひともこのモデル例を雛形として、今後、多種多様なプロジェクト・ビジネスモデルづくりに挑戦してってください。

ここでは方程式に通し番号を付けています。(02) から (05) までは、モデルにあらかじめ組み込まれている時間変数です。

PULSE(時点, 期間) は、ある時点からある期間 1 の値を引き渡し、それ以外の時点では 0 を引き渡す関数です。

11.3 太陽光発電モデル式

- (01) "B/S Check" = 資産 - 長期借入金 - 純資産
Units: 円
- (02) FINAL TIME = 300
Units: 月
- (03) INITIAL TIME = 1
Units: 月
- (04) SAVEPER = 1
Units: 月
- (05) TIME STEP = 1
Units: 月
- (06) ソーラーローン=太陽光発電システム設置費用*PULSE(1, 1)
Units: 円/月
- (07) ネットキャッシュフロー=入金 + 所得からローン返済追加支払
- 出金 - 太陽光発電投資
Units: 円/月
- (08) ローン期間=120
Units: Dmnl [0,240,1]
- (09) ローン返済=IF THEN ELSE(長期借入金*月当たり>=毎月返済額,
毎月返済額, 長期借入金*月当たり)
Units: 円/月
- (10) ローン追加返済額= 0
Units: 円/月 [0,100000,1000]
- (11) 入金=ソーラーローン + 補助金*PULSE(1, 1)+ 売電収入
Units: 円/月
- (12) 出金=ローン返済 + 利子支払 + 毎月支出
Units: 円/月
- (13) 利子支払=長期借入金*利子率/月数
Units: 円/月
- (14) 利子率=0.02
Units: 1/年 [0,0.05,0.001]
- (15) 国の支援=0
Units: 円/月 [0,1e+06,10000]
- (16) 売電による総収入= INTEG (売電収入, 0)
Units: 円
- (17) 売電価格=48
Units: 円/Kw [24,50,1]

- (18) 売電収入=毎月発電量*(売電価格*売電比率 + 買電価格*(1-売電比率))
Units: 円/月
- (19) 売電比率=0.6
Units: Dmnl [0,1,0.1]
- (20) 太陽光発電システム価格=2e+06
Units: 円/月 [1e+06,3e+06,10000]
- (21) 太陽光発電システム設置費用=太陽光発電システム価格-補助金
Units: 円/月
- (22) 太陽光発電投資=太陽光発電システム価格*PULSE(1, 1)
Units: 円/月
- (23) 太陽光発電設備= INTEG (太陽光発電投資-減価償却, 0)
Units: 円
- (24) 所得からローン返済追加支払=IF THEN ELSE(長期借入金<=0,
0, ローン追加返済額)
Units: 円/月
- (25) 支出額=0
Units: 円/月
- (26) 月当たり=1
Units: 1/月
- (27) 月数=12
Units: 月/年
- (28) 月時間=IF THEN ELSE(MODULO(Time, 12)=0,12,MODULO(Time, 12))
Units: 月
- (29) 毎月支出=支出額
Units: 円/月
- (30) 毎月発電表 ([(1,0) - (12,400)], (1,121), (2,169), (3,230), (4,264), (5,267), (6,207),
(7,270), (8,265), (9,228), (10,208), (11,173), (12,154))
Units: Kw/月
- (31) 毎月発電量=毎月発電表 (月時間*月当たり)*発電効率改善
Units: Kw/月
- (32) 毎月返済額=太陽光発電システム設置費用/ローン期間
Units: 円/月
- (33) 減価償却=太陽光発電設備*減価償却率/月数
Units: 円/月
- (34) 減価償却率=0.05
Units: 1/年 [0,0.1,0.01]
- (35) 現金= INTEG (入金 + 所得からローン返済追加支払 - 出金 - 太陽光発電投資,
自己資金)
Units: 円
- (36) 発電効率改善=1

MODULO(引数, 数字) は、ある引数を数字で割った余りの値を引き渡す関数です。MODULO(26, 12) = 2 のように。

- Units: Dmnl [1,2,0.01]
- (37) 発電総量= INTEG (毎月発電量, 0)
Units: Kw
- (38) 純資産= INTEG (補助金*PULSE(1,1) + 売電収入
+ 所得からローン返済追加支払 - 利子支払 - 減価償却 - 毎月支出, 自己資金)
Units: 円
- (39) 自己資金=0
Units: 円 [0,1e+06,10000]
- (40) 自治体補助=0
Units: 円/月 [0,1e+06,10000]
- (41) 補助金=国の支援 + 自治体補助
Units: 円/月
- (42) 買電価格=24
Units: 円/Kw [10,30,1]
- (43) 資産=現金 + 太陽光発電設備
Units: 円
- (44) 長期借入金= INTEG (ソーラーローン-ローン返済,0)
Units: 円

図 11.4 は、毎月の発電量の表関数です。1 2月の発電量は図では表示されていませんが、154 kw/月ですので補充ください。

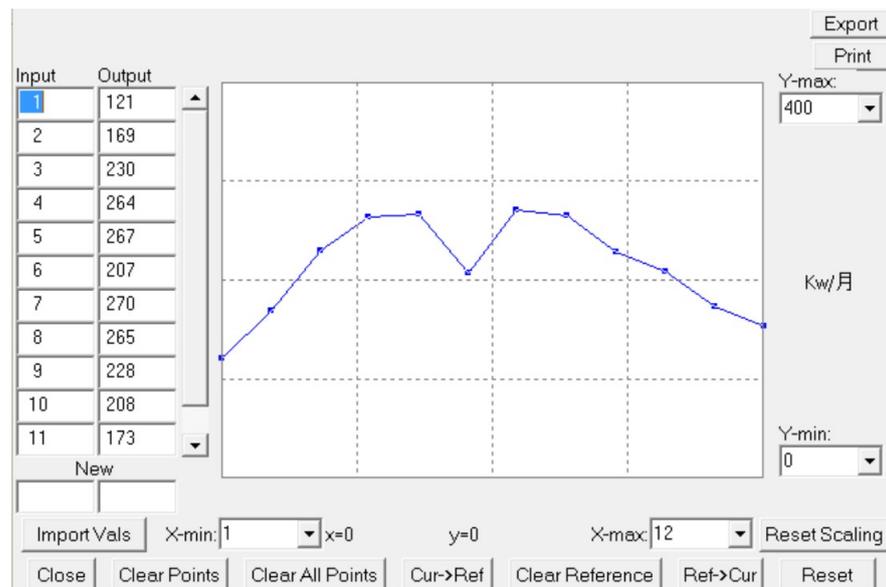


図 11.4 毎月の発電量データ

11.4 シミュレーション

図 11.5 は、太陽光発電モデルにおける貸借対照表のうち、資産（現金）と負債（長期借入金）を主に図示しています。現金が初期値のゼロ円に回復した時点で、太陽光発電への投資が回収されたこととなります。271ヶ月目で現金（曲線1）がそれまでのマイナスから5,947円へとプラスに転じます。

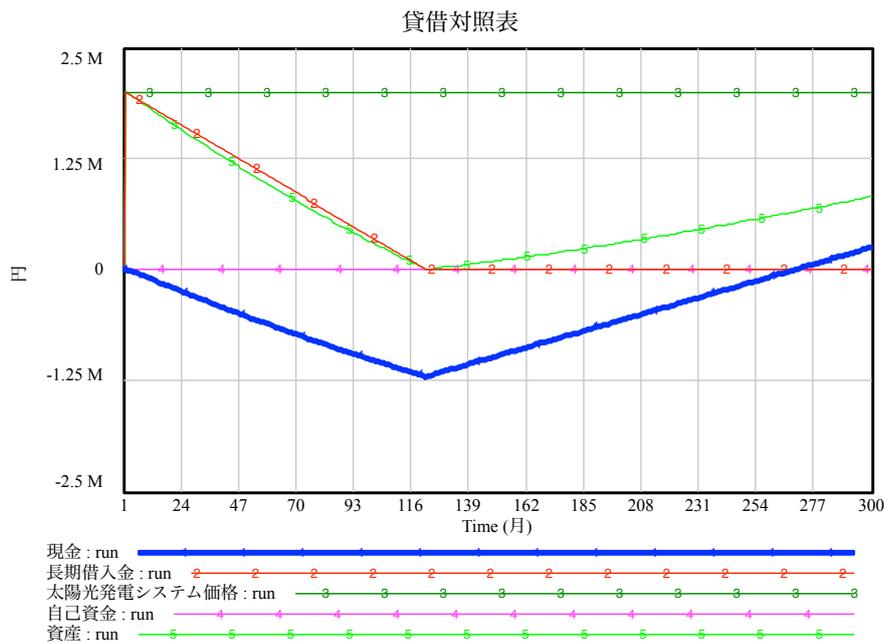


図 11.5 太陽光発電プロジェクトの貸借対照表

図 11.6 は、ネットキャッシュフロー（曲線1）を表しており、これがフローとなって、現金のストックが計算されます。長期借入金（曲線3）が完済され、ネットキャッシュフローが、プラスの6,488円に転じた122ヶ月目から、現金ストック（図 11.5 の曲線1）が増大し始めます。

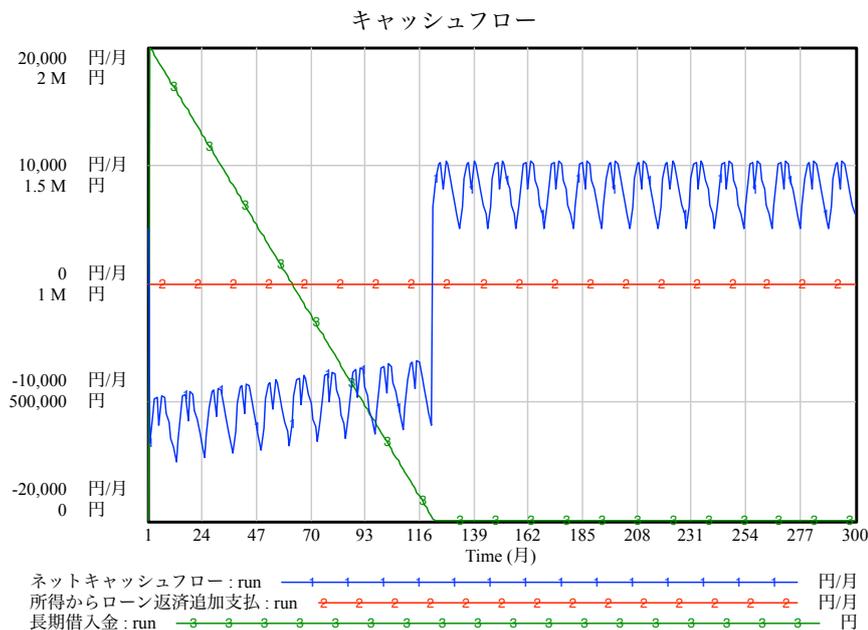


図 11.6 キャッシュフロー

企業が債務超過に陥ると、たちまち株式が紙くずとなり、倒産に追い込まれます。市場経済で唯一、債務超過の状態が許される例外的な組織があります。どんな組織でしょうか？。

図 11.7 は、貸借対照表のうち、純資産（曲線 1）を図示しています。純資産は 3 ヶ月目からマイナスの状態となり、201ヶ月目で 6,405 円とやっとプラスに転じ、その後次第に増大してゆきます。純資産がマイナスとなる状態を債務超過といいます。債務超過とネットキャッシュフローの関係を検証してください。

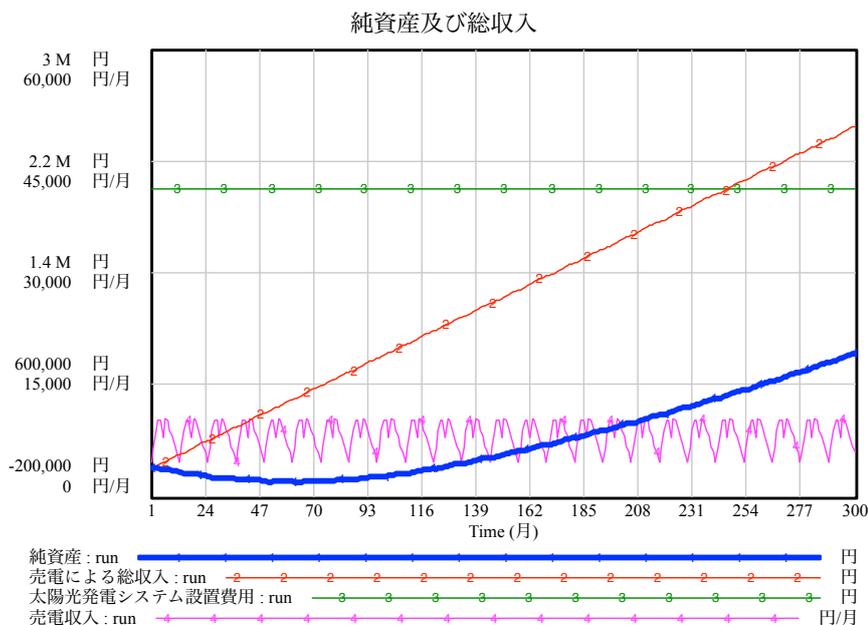


図 11.7 純資産及び総収入

曲線 2 は太陽光発電の売電による総収入額を表しています。総収入は直線的に増大し、

246ヶ月目には200万円を超え、太陽光発電システム設置費用の200万円を上回るようになります。

図11.8は、太陽光発電モデルをシミュレーションする際に用いるパラメータのスライダーです。これらのパラメータ値を変化させれば、太陽光発電の投資費用回収期間の長短がリアルタイムで瞬時にシミュレーション確認できます。

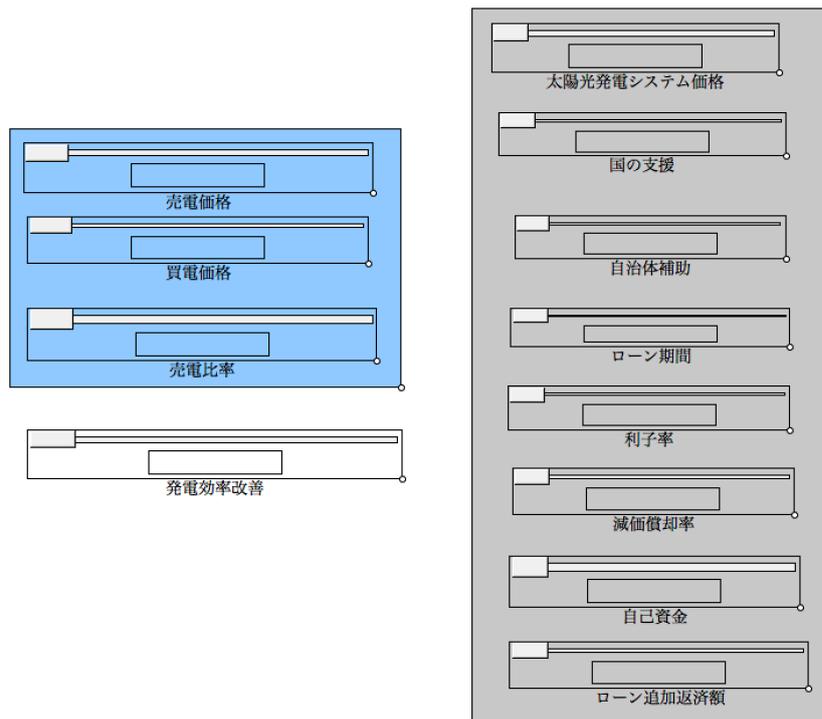


図 11.8 太陽光発電モデルのシミュレーションパラメータ

シミュレーション課題1

このモデルの太陽光発電システム設置費用はデフォルトで200万円としていますが、本章の第1節で述べたように1995年にこの3Kwのパネルを設置した時点では、価格は630万円で、そのうちNEDO（新エネルギー総合開発機構）からの補助金が330万円で、実際のパネル設置に伴う借入金は300万円でした。また売電比率は0.6となっていますが、当時は太陽光パネルによる発電量の全量買取制度ではなく、まず家庭で発電量を消費して残りを売電するシステムになっていました。現在では全量買取制度となっています。さらに売電価格も当時は1kwあたり48円でした。このような状態で、当時の淡路島での太陽光発電投資の費用300万円を回収するには何年かかるでしょうか。

さらに、売電価格、売電費用、利子率等を変動させて、投資回収年数がどのように増減するかをシミュレーションしなさい。また、太陽光発電の一般家庭での普及に必要な投資回収期間が当時240ヶ月（20年）であったと仮定すれば、国の支援や自治体の補助金はどのくらいの額でなければならないかをシミュレーションしなさい。

シミュレーション課題 2

このモデルでは現金の初期値をゼロとして、そのストックが再びゼロの初期値に回復した時点で投資費用が回収されたと判断できるようになっています。すなわち、現金ストックが負の値になることを黙認するモデルとなっています。同時にネットキャッシュフローが 121 ヶ月までマイナスとなることも黙認しています。ネットキャッシュフローがマイナスだから、現金ストックが減少し続けるのです。

しかるに現実の会社経営では、現金ストックがマイナスとなった時点で、例え純資産がプラスでも黒字倒産となります。その原因となるのが継続的なネットキャッシュフローのマイナスです。それゆえ、キャッシュフロー計算書は、財務諸表の中でも最も重要な位置を占めることとなります。現金ストックがマイナスになるのを回避するためには、ローンの追加返済額を、例えば給与所得から補填し続け、年間の平均ネットキャッシュフローをプラスにすることが必要となります。そのためには、パラメータのデフォルト値のもとで、毎月のローン追加返済額をいくらにすればいいかをシミュレーションしなさい。

勿論、毎月のローン追加返済を給与等から補填しなくても、最初から手元資金の蓄えがあれば、現金ストックがマイナスになるのを回避できます。そのためには現金の手元初期値がどのくらいなければならないかをシミュレーションしなさい。

さらに、現金の初期値と毎月のローン追加返済額を組み合わせ、現金ストックがマイナスとなるのを回避することもできます。どのような組み合わせの資金繰りが可能か、シミュレーションしなさい。

シミュレーション課題 3

図 11.9 は、銀行ローンの利子率の変動と投資費用回収期間の関係を表しています。利子率が 0% の場合、246 ヶ月目で現金が 3,365 円とプラスに転じます（曲線 1）。2% の 271 ヶ月の場合（曲線 2）に比べて、25 ヶ月（約 2 年）早く投資費用が回収できます。利子率が 5% の場合、308 ヶ月で現金が 8,267 円とプラスに転じます（曲線 3）。2% の場合に比べて 37 ヶ月（約 3 年）遅くなります。0% の場合に比べて実に 62 ヶ月（約 5 年）遅くなります。

上の課題 1 と同様にパネル設置投資が 300 万円となった場合に、この資金をすべてローンで調達すればその回収期間はどのように変動するのかを、利子率が 0%、2%、5% の場合についてそれぞれシミュレーションしなさい。さらに、投資費用が 200 万円の場合に比べて、回収期間がどのようになるのかを比較分析しなさい。

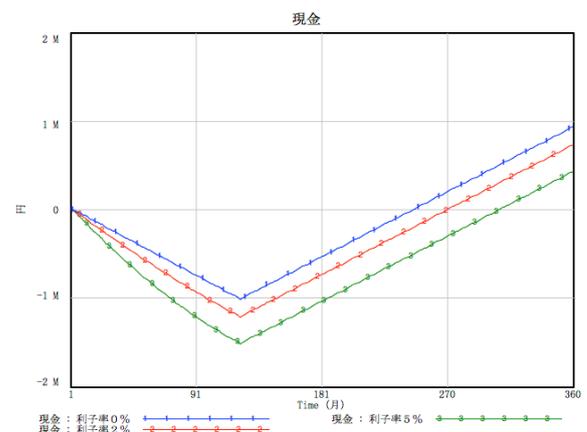


図 11.9 利子率と投資費用回収期間

注記 以上の分析から、太陽光発電のような環境プロジェクトは、長期的な観点から評価しないと短期的には投資費用が回収できないという特徴を持っていることが理解されます。従って、このような持続可能な長期の環境プロジェクトは、現行の短期間でハイリターンを追求する市場経済の金融システムの下ではなかなか推進されそうにありません。しかしながら、もし金利がゼロとなる公共貨幣が利用可能であれば、上例では明らかに2～5年も早く投資費用が回収されるのです。現行の利付き債務貨幣システムは、こうした意味で環境に優しい金融システムではありません。こうした意味で持続可能性の問題は、現行の金融システムとも深く関連してくるのです。筆者は、近著「公共貨幣 (PUBLIC MONEY)」[? , 2015] で環境に優しい公共貨幣システムにへの移行を提案しています。

シミュレーション課題4

1995年に淡路島で最初の太陽光発電を設置してから、早いもので20年間以上が経過しました。その間、太陽光発電をめぐる環境が激変しました。特に太陽光発電効率の劇的向上とパネル価格の下落が顕著となりました。さらに全量買取制度が導入され、売電価格も下落し、国や地方自治体の助成金も変動し続けました。

そこで太陽光発電のメーカーを1社選び、その発電量、パネル価格、売電価格等の最新データをネット等から拾って、太陽光発電モデルを最新の状況にアップデートしなさい。さらに、設置場所を具体的に選んで、国やその地域における自治体の助成金を確定し、ローン金利も入力して、最近の投資費用の回収期間がどのようになっているのかをシミュレーションしなさい。

次に、20年前と比べて、投資費用の回収期間がどのように改善されたかを比較検証してください。

11.5 太陽光発電モデルの拡張及び応用モデル挑戦

筆者は岐阜大学大学院工学研究科の環境エネルギーシステム専攻で「環境エネルギー経済学」の集中講義を8年間担当しました。その講義の一環として、本章で説明した太陽光発電モデルをさらに拡張したり、その応用モデルを開発するというグループモデル課題を毎年課しました。モデル開発期間は次週の集中講義が始まるまでの6日間。勿論、受講院生はSDのモデリングを学び始めてまだ2日目の初心者レベルですが、拡張・応用モデルに関する彼らの多様なアイディとそのモデリング学習能力に驚かされました。SDモデルの概要が理解でき、雛形モデルがあれば、その拡張・応用モデリングは以外と簡単であるという例証でもあります。以下は彼らが作成した拡張・応用モデルの一部概要です。読者の皆さんも是非チャレンジしてみてください。

SDの雛形モデルが利用できるというのがここでのキーポイントです。筆者の長年の教育経験からすると、無から新たにSDモデルを生み出すのは難産ですが、その拡張・応用は以外と簡単だといえます。この点をどう判断するかが、SDは簡単、いや難解であるといった相反する評価の分岐点となります。いずれにしろ、既存のSDモデルを理解し、拡張・応用するのは簡単であるということは、他の専門分野にない特徴で、初心者にも優しくそのアクセスが容易であるのがSDです。

拡張・応用モデル1

太陽光発電量に大きな影響を与える日照時間は、1年365日、日々変化し、季節にも大きく左右されます。またパネルの設置角度によっても発電量は異なります。気象庁等から関連するデータを収集して、こうした変化をリアルタイムでシミュレーションできるようにモデルを拡張します。そして、日照時間の変化を考慮しない場合と比べて、太陽光発電の投資費用回収期間がどのように変化するかをシミュレーションしました。

拡張・応用モデル2

国内や米国、中国の太陽光発電メーカーのパネル発電量を取り込み、それらのパネル購入価格を用いて、どのメーカーのパネルが投資費用の回収期間が最も短くなるかを比較シミュレーションしました。

拡張・応用モデル3

沖縄から北海道まで代表的自治体を5~8つ選び、それぞれの自治体の助成金、さらに各地の日照時間等も考慮して、どの地域の投資費用回収期間が最も少なく、有利となるかを比較シミュレーションしました。勿論、この結果は、自治体の助成金に大きく左右されます。魅了ある自治体にするには、こうした助成金による差別化も重要な要素となります。

拡張・応用モデル4

最近ヨーロッパでは、高速道路に太陽光パネルを敷き詰めて、発電するシステムが普及し始めています。もし、岐阜県の高速道路にパネルを設置するとすれば、いくらぐらいの面積に設置でき、そのコストはどのようなのだろうか。そして、そのコストを県民税で県民が負担するとすれば、1人あたりいくらの増税が必要となるのだろうか。その投資費用の回収期間は何年ぐらいになるのかをシミュレーションしました。

以上、受講院生が挑戦した太陽光発電モデルの拡張・応用モデル例の一部概要を紹介しました。上記以外にも、時間制約のために、アイデアの段階にとどまった拡張・応用モデルも多数ありました。それらの例を以下に概略します。読者の皆さんのオリジナルモデルとして、是非チャレンジしてみてください。

拡張・応用モデルのアイデア1

近年の太陽光発電への投資は、株や証券、国債等への金融投資を圧倒する人気を誇り、ソーラー投資ブームを引き起こしています。太陽光発電への投資額と同等の額を株や債券へ投資する場合のモデルを作成し、なぜ太陽光発電投資が比較優位になるのかを、売電価格、ローン条件等の色々なパラメータ値を変えながら、シミュレーション分析しなさい。金融投資の場合には、配当利回りが変動し、リスクとなりますが、それらを太陽光発電モデルと比較して、どのようにモデルに組み込むかがモデリングのキーとなります。

拡張・応用モデルのアイデア2

太陽光発電をEV車の中古バッテリーに蓄電し、夜も安定して電力が供給できるようなシステムを導入すれば、地域全体で電気エネルギーが自給できるようになります。ある世帯数の家庭の電力需要をまかなうために、中古のバッテリーを何個設置すれば、安定的な電力が供給できるようになるでしょうか。太陽光パネルや中古バッテリーの価格等を考慮した設置費用を計算し、それらの投資費用をローンでまかなうとすれば、投資費用は何年で回収できるでしょうか。勿論、バッテリーは減価してゆきますので、その更新やそのための費用も考慮する必要があります。

また、その設置費用を各世帯が負担するとすれば、その負担があまり大きくならないようにするためには、何世帯が必要となるでしょうか。果たして、こうした方法でその地域の電力は自給できるようになるでしょうか。

拡張・応用モデルのアイデア3

空き地、空き屋根、休耕田、池の水面、山裾等を利用して、ソーラーを設置し、メガ・ソーラーをビジネスとして成功させる例が近年急増しています。淡路島でもこうした空き地等へのソーラーパネル設置が急増しており、美しい瀬戸内海の島の景観を損なうのでこの危惧も高まってきています。

こうした空き地を借りて、メガ・ソーラー発電を行うベンチャービジネスを立ち上げるとして、メガ・ソーラーの規模をどのように決め、賃貸料や設置費用等をどのように設定し、銀行のローン条件をどのように交渉すれば、ビジネスとして成功できるのでしょうか。このソーラービジネスモデルを作成してその条件をシミュレーションしましょう。

その他、再生不可能な資源に依存する原子力発電や化石燃料発電に代替させる自然エネルギーの優位性を比較するモデリングの例は多数考えられます。今後、この分野におけるSDモデルの応用研究は急速に拡大してゆくことでしょう。

第 VI 部

成長の限界：ワールド 3 モデル

第 12 章

ワールド 3 モデルの作成

12.1 ワールド 3 モデルについて

ワールド 3 モデルは、今や持続可能性（サステナビリティ）を学ぶ人々にとって必須の学習モデルとなっています。このモデルは、システムダイナミクス創始者であるMITのジェイ・フォレスター教授によって最初に提案されました。イタリアのコモ湖で、ローマクラブ創設者のオーレリオ・ペッチェイに最初に出会ったのがきっかけで、フォレスター教授は、1970年にスイスのベルンで開催されたローマクラブの会合に招待されました。彼にとってこの会合がシステムダイナミクスの研究経歴で転換点となりました。帰路の機中で、ペーパーナプキンの上に、人口や生産、食料、汚染等のストックからなるワールドダイナミクスのモデルを鉛筆でスケッチし、それをワールド 1 モデルと呼びました。

帰国後、フォレスター教授はこのスケッチをもとにしたワールドダイナミクスのモデルを完成させ、これをワールド 2 モデルと呼びました。そして 1970年7月にMITで開催された、2週間にわたるローマクラブ役員会でこのモデルのシミュレーションを実演しました（World Dynamics [?, 1971] および [?, 2007, 148-176 pp.]）。その後彼は他のモデル作成で多忙となり、このモデルのさらなる開発をMITの彼の博士課程の院生、デニス・メドウズ等に委ねました。その9ヶ月後に、メドウズら4名のチームがワールド 2 モデルを拡張し、「成長の限界 The Limits to Growth」モデル（[?, 1972] および [?, 2007, 177-212 pp.]）を完成させました。そしてそのモデルは、ワールド 3 モデルと呼ばれました。

それから 20 年後の 1992 年に、Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future [?, 1992]（日本語訳「限界を超えて－生きるための選択」）というタイトルで、「成長の限界」の続編が出版されました。その本で用いられたのがワールド 3-91 という改定版モデルです。さらにその 12 年後の 2004 年に、Limits to Growth:

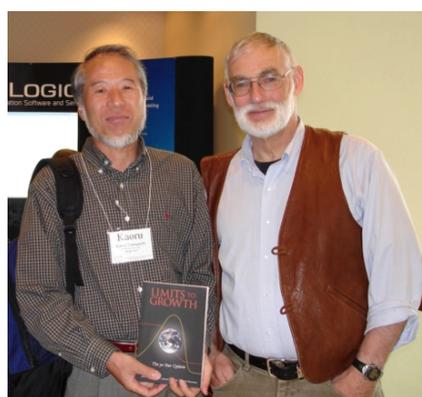


図 12.1 メドウズ博士と、30-Year Update 出版翌年の 2005 年 7 月 27 日、第 23 回国際システムダイナミクス学会、ボストンにて

The 30-Year Update [?, 2004] (日本語訳「成長の限界 人類の選択」) というタイトルで 30 年目のアップデートがなされました。その本で用いられたのがワールド 3-03 というモデルです。本章では、Vensim の Sample モデルに収録の World3-2003 Model および [?, 2007] の World model World3-03(Meadows) を参照しながら筆者が修正の日本語訳モデルをサブモデルごとに作成してゆき、シナリオ分析してゆきます。

成長の限界の著者の一人、デニス・メドウズは 2009 年に第 25 回日本国際賞を受賞されました。日本国際賞 (The JAPAN PRIZE FOUNDATION) のホームページよりその受賞理由の一部を以下に引用します。

デニス・メドウズ博士は、1972 年発表のローマクラブへの報告「成長の限界」のプロジェクトリーダーを務め、「ワールド 3」と呼ばれるシステムシミュレーションモデルを用い、資源・環境・土地などの地球の物理的容量の制約にもとづく要因が人口と経済の拡大との相克により放置すれば社会が危機的状況にいたること、これを抑制するために出来るだけ早く人口と物資消費のゼロ成長を実現することを提唱して、第二次大戦後成長を続けてきた世界に大きな衝撃を与えた。.....

また、故ドネラ夫人及び J. ランダース博士と共著で 1992 年、2004 年の 2 回に亘り「成長の限界」の続編ともいえるべき報告書を出版し、改良したモデルを用いて、「成長の限界」で警告した地球の物理的容量に基づく諸制約要因が更に厳しくなり、問題を解決するための時間的な余裕が一層少なくなっていることを指摘、人類が少しでも早く対応策を打つ必要があることを主張した。.....

この「成長の限界」に基盤をおくメドウズ博士が、30 数年前から終始一貫して持続可能な社会の形成への努力をモデル分析を通じて強く要請し、全世界へ大きなインパクトを与え続けていることは高く評価出来、博士は「自然と共生する持続可能な技術社会形成」への貢献を称える 2009 年日本国際賞にふさわしいと考える。

デニス・メドウズ博士のこの日本国際賞受賞により、ワールド 3 モデルが広く国内でも認知されるようになり、またそのモデリング手法であるシステムダイナミクスへの関心も高まってきました。近い将来、本書の出版を機会に、多くの大学、大学院等のカリキュラムに、システムダイナミクスが組み込まれるようになることを念願しています。

前ページで紹介した [?, 1992] と [?, 2004] の 2 著書のこと。

図 12.2 は、筆者の日本語訳（修正）ワールド3 - 2003 モデルのタイトルページです。このモデルは50個のストック変数、55個の表関数、74個の定数を含む302本の方程式からなっています。左にあるナビゲーションボタンをクリックすれば、それぞれのサブモデルに移動できるようになっています。以下の本章で、このモデルを11のサブモデルに分けて、順次作成してゆくことにします。

サブモデルにジャンプできるナビゲーションボタンの作成は、Vensim ガイド第12章を参照してください。Vensim PLE と PLE Plus には、この機能は対応していません。

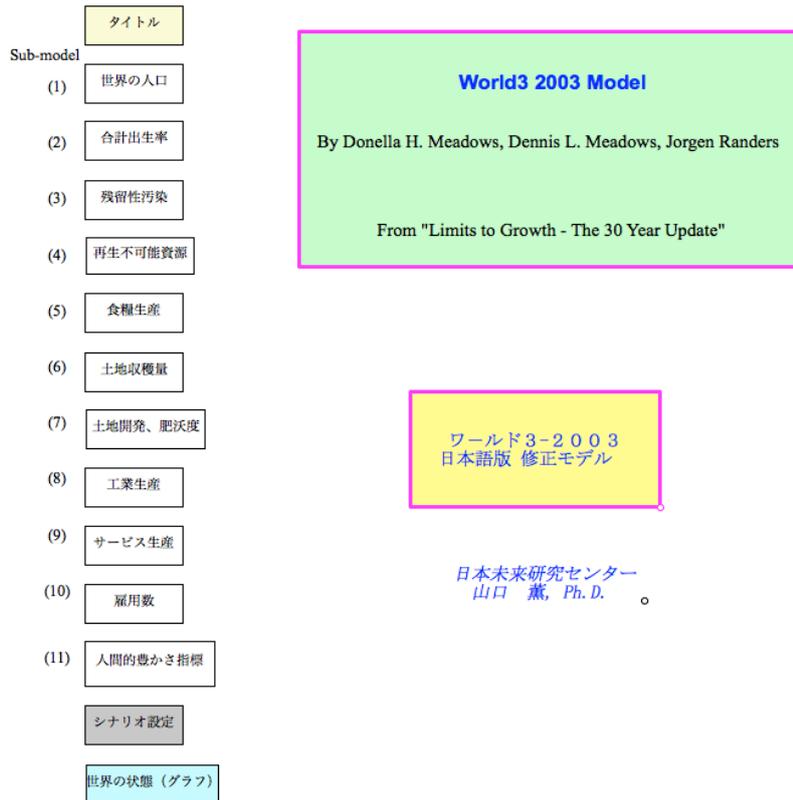


図 12.2 ワールド3モデルのタイトルとページ構成

12.2 サブモデル 1：世界の人口

図 12.3 は、世界の人口のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

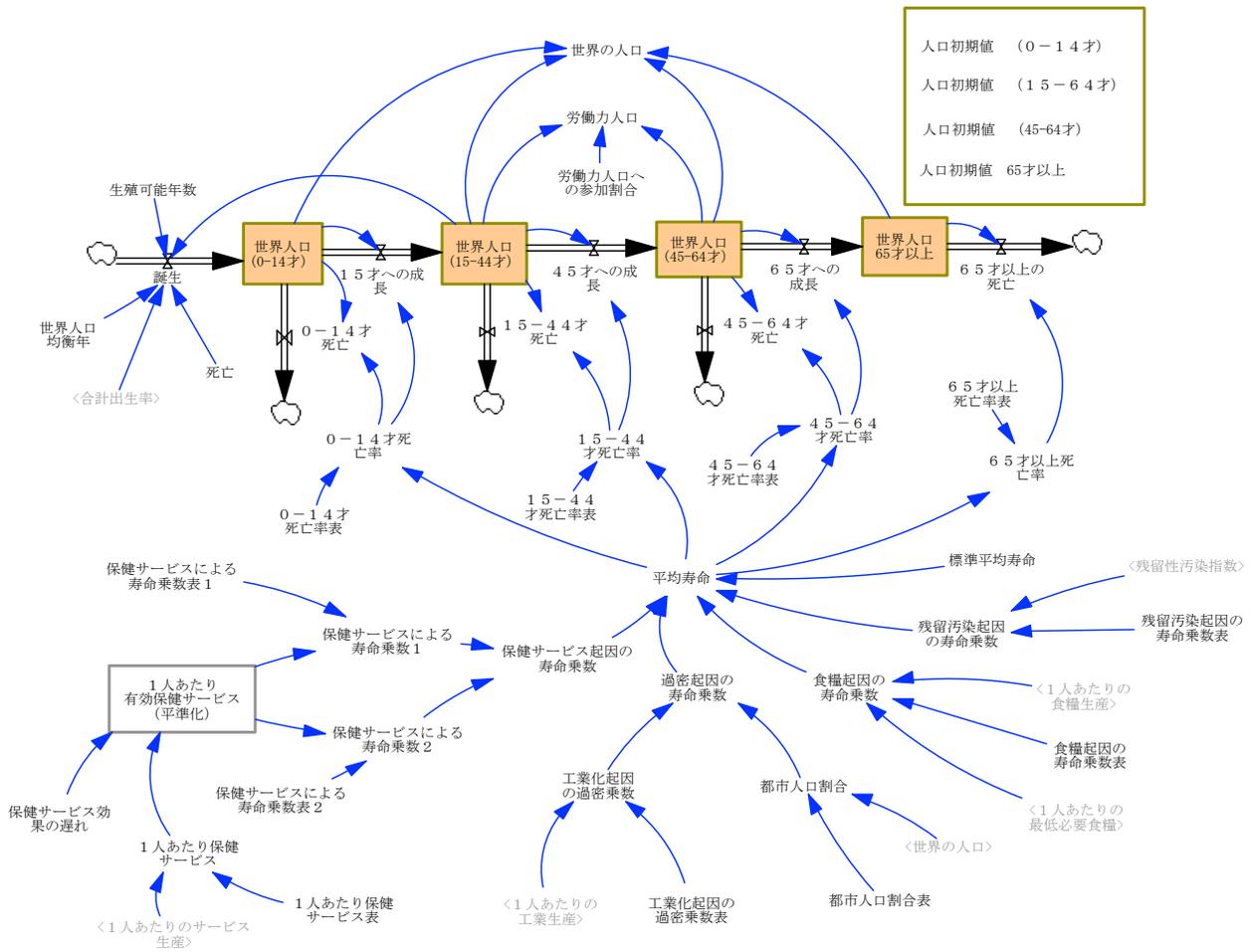


図 12.3 ワールド 3：世界の人口サブモデル

サブモデル1：世界の人口の式

```

"人口初期値 (45-64 才)"=1.9e+08
  Units: 人
世界の人口 = "世界人口 (0-14 才)" + "世界人口 (15-44 才)"
              + "世界人口 (45-64 才)" + 世界人口 65 才以上
  Units: 人
"世界人口 (0-14 才)"= INTEG ( ( 誕生 - 0 - 14才死亡 - 15才への成長 ),
                              人口初期値 (0 - 14才) )
  Units: 人
"世界人口 (15-44 才)"= INTEG ( ( 15才への成長 - 15 - 44才死亡
                              - 45才への成長 ), 人口初期値 (15 - 64才) )
  Units: 人
"世界人口 (45-64 才)"= INTEG ( ( 45才への成長 - 45 - 64才死亡
                              - 65才への成長 ), "人口初期値 (45-64 才)" )
  Units: 人
世界人口 65 才以上= INTEG ( ( 65才への成長 - 65才以上の死亡 ),
                              人口初期値 65 才以上)
  Units: 人
世界人口均衡年=4000
  Units: 年
人口初期値 65 才以上=6e+07
  Units: 人
人口初期値 (0 - 14 才)=6.5e+08
  Units: 人
人口初期値 (15 - 64 才)=7e+08
  Units: 人
保健サービスによる寿命乗数表1 ( (0,1), (20,1.1), (40,1.4), (60,1.6), (80,1.7), (100,1.8))
  Units: Dmnl
保健サービスによる寿命乗数表2 ( (0,1), (20,1.5), (40,1.9), (60,2), (80,2), (100,2))
  Units: Dmnl
保健サービスによる寿命乗数1=保健サービスによる寿命乗数表1 (
                              1人あたり 有効保健サービス (平準化) )
  Units: Dmnl
保健サービスによる寿命乗数2=保健サービスによる寿命乗数表2 (
                              1人あたり 有効保健サービス (平準化) )
  Units: Dmnl
保健サービス効果の遅れ = 20
  Units: 年
保健サービス起因の寿命乗数=IF THEN ELSE ( Time > 1940,
                              保健サービスによる寿命乗数2 , 保健サービスによる寿命乗数1 )
  Units: Dmnl
労働力人口 = ( "世界人口 (15-44 才)" + "世界人口 (45-64 才)" )
              * 労働力人口への参加割合
  Units: 人
労働力人口への参加割合= 0.75
  Units: Dmnl
工業化起因の過密乗数=工業化起因の過密乗数表 ( 1人あたりの工業生産 )
  Units: Dmnl
工業化起因の過密乗数表 ( (0,0.5), (200,0.05), (400,-0.1), (600,-0.08), (800,-0.02),

```

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代変数として入力して下さい。

```

(1000,0.05) ,(1200,0.1) ,(1400,0.15) ,(1600,0.2))
Units: Dmnl
平均寿命= 標準平均寿命 * 食糧起因の寿命乗数 * 保健サービス起因の寿命乗数
          * 残留汚染起因の寿命乗数 * 過密起因の寿命乗数
Units: 年
標準平均寿命= 28
Units: 年
死亡 = 0 - 14才死亡 + 15 - 44才死亡 + 45 - 64才死亡 + 65才以上の死亡
Units: 人/年
残留汚染起因の寿命乗数= 残留汚染起因の寿命乗数表 ( 残留性汚染指数 )
Units: Dmnl
残留汚染起因の寿命乗数表 ( (0,1) ,(10,0.99) ,(20,0.97) ,(30,0.95) ,(40,0.9) ,
                             (50,0.85) ,(60,0.75) ,(70,0.65) ,(80,0.55) ,(90,0.4) ,(100,0.2) )
Units: Dmnl
生殖可能年数=30
Units: 年
誕生 = IF THEN ELSE ( Time >= 世界人口均衡年 , 死亡 ,
                    ( 合計出生率 * "世界人口 (15-44才)" * 0.5 / 生殖可能年数 ) )
Units: 人/年
過密起因の寿命乗数=1 - ( 工業化起因の過密乗数 * 都市人口割合 )
Units: Dmnl
都市人口割合=都市人口割合表 ( 世界の人口 )
Units: Dmnl
都市人口割合表 ( (0,0) ,(2e+09,0.2) ,(4e+09,0.4) ,(6e+09,0.5) ,(8e+09,0.58)
                  ,(1e+10,0.65) ,(1.2e+10,0.72) ,(1.4e+10,0.78) ,(1.6e+10,0.8) )
Units: Dmnl
食糧起因の寿命乗数=食糧起因の寿命乗数表 ( 1人あたりの食糧生産
                                           / 1人あたりの最低必要食糧 )
Units: Dmnl
食糧起因の寿命乗数表 ( (0,0) ,(1,1) ,(2,1.43) ,(3,1.5) ,(4,1.5) ,(5,1.5) )
Units: Dmnl
0 - 14才死亡="世界人口 (0-14才)" * 0 - 14才死亡率
Units: 人/年
0 - 14才死亡率=0 - 14才死亡率表 ( 平均寿命 )
Units: 1/年
0 - 14才死亡率表 ( (20,0.0567) ,(30,0.0366) ,(40,0.0243) ,(50,0.0155) ,(60,0.0082)
                  ,(70,0.0023) ,(80,0.001) )
Units: 1/年
1人あたり 有効保健サービス (平準化) =SMOOTH ( 1人あたり保健サービス ,
                                              保健サービス効果の遅れ )
Units: ドル/(人*年)
1人あたり保健サービス=1人あたり保健サービス表 ( 1人あたりのサービス生産 )
Units: ドル/(人*年)
1人あたり保健サービス表 ( (0,0) ,(250,20) ,(500,50) ,(750,95) ,(1000,140) ,(1250,175) ,
                          (1500,200) ,(1750,220) ,(2000,230) )
Units: ドル/(人*年)
15才への成長=( ( "世界人口 (0-14才)" ) ) * ( 1 - 0 - 14才死亡率 ) / 15
Units: 人/年
15 - 44才死亡="世界人口 (15-44才)" * 15 - 44才死亡率
Units: 人/年
15 - 44才死亡率=15 - 44才死亡率表 ( 平均寿命 )

```

Units: 1/年

15 - 44才死亡率表 ((20,0.0266), (30,0.0171), (40,0.011), (50,0.0065), (60,0.004),
(70,0.0016), (80,0.0008))

Units: 1/年

45才への成長 = (("世界人口 (15-44才)")) * (1 - 15 - 44才死亡率) / 30

Units: 人/年

45 - 64才死亡 = "世界人口 (45-64才)" * 45 - 64才死亡率

Units: 人/年

45 - 64才死亡率 = 45 - 64才死亡率表 (平均寿命)

Units: 1/年

45 - 64才死亡率表 ((20,0.0562), (30,0.0373), (40,0.0252), (50,0.0171), (60,0.0118),
(70,0.0083), (80,0.006))

Units: 1/年

65才への成長 = (("世界人口 (45-64才)")) * (1 - 45 - 64才死亡率) / 20

Units: 人/年

65才以上の死亡 = 世界人口 65才以上 * 65才以上死亡率

Units: 人/年

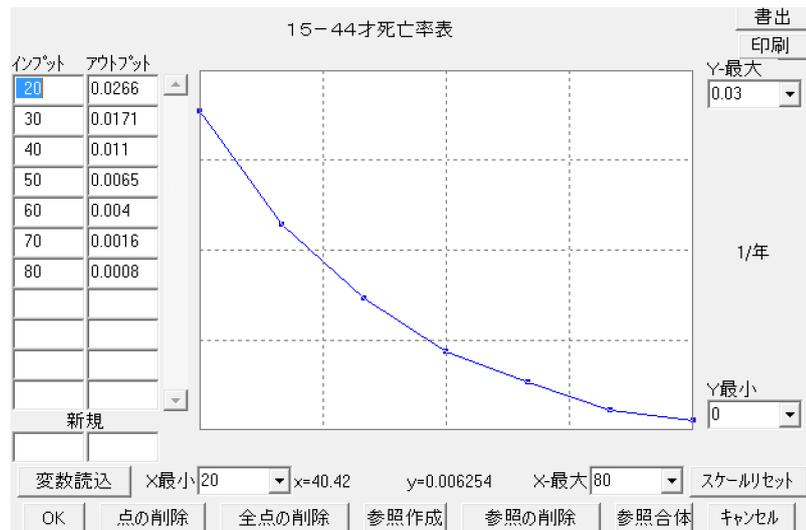
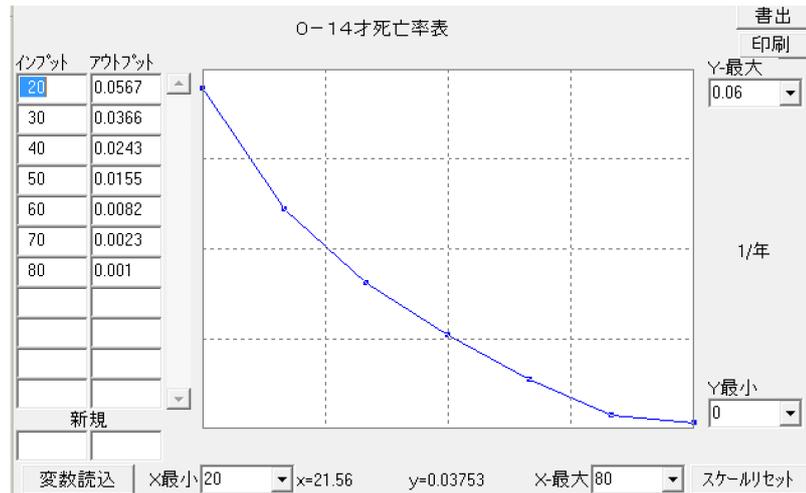
65才以上死亡率 = 65才以上死亡率表 (平均寿命)

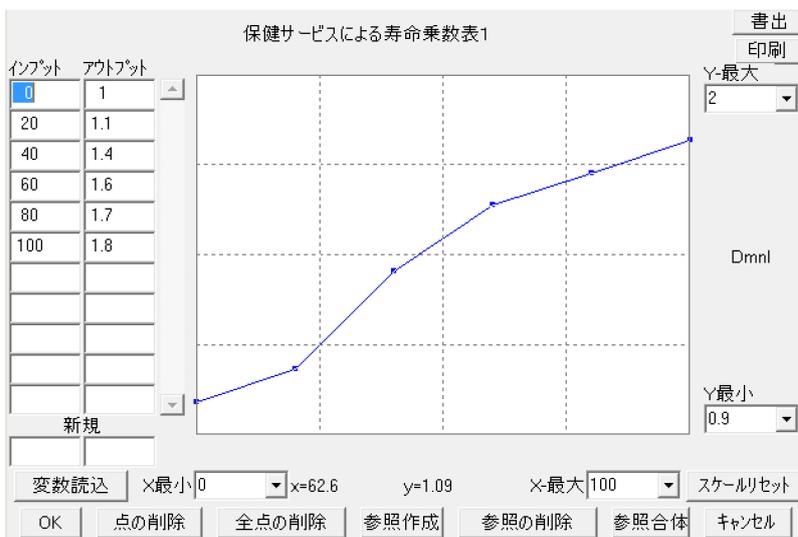
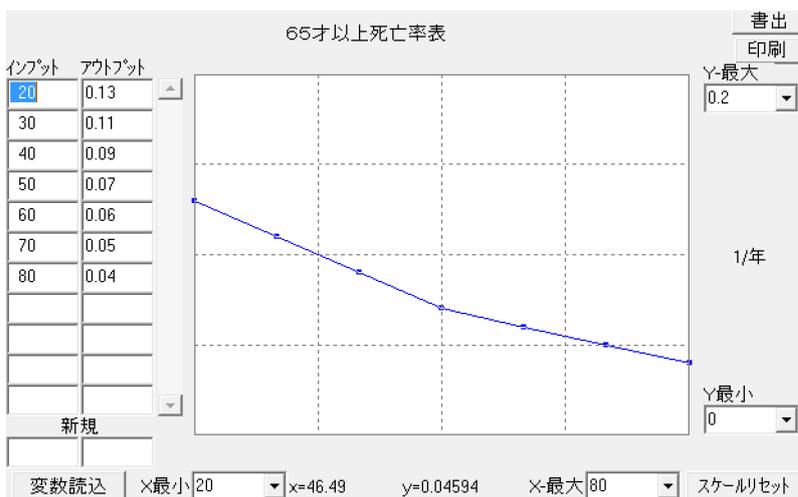
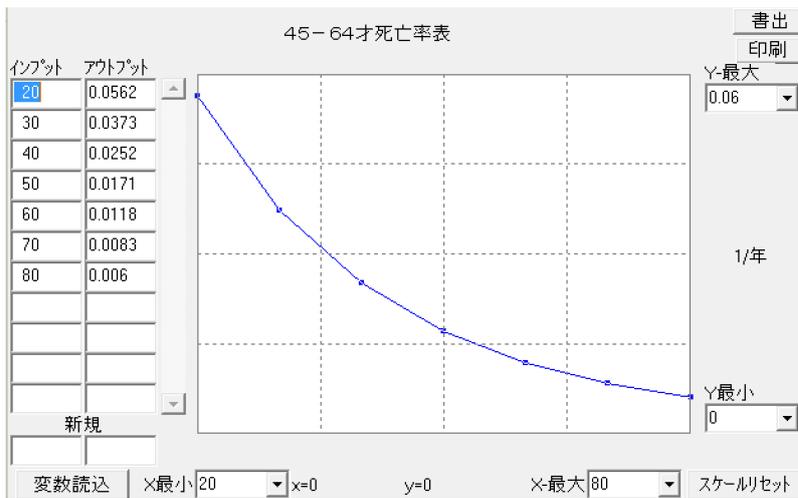
Units: 1/年

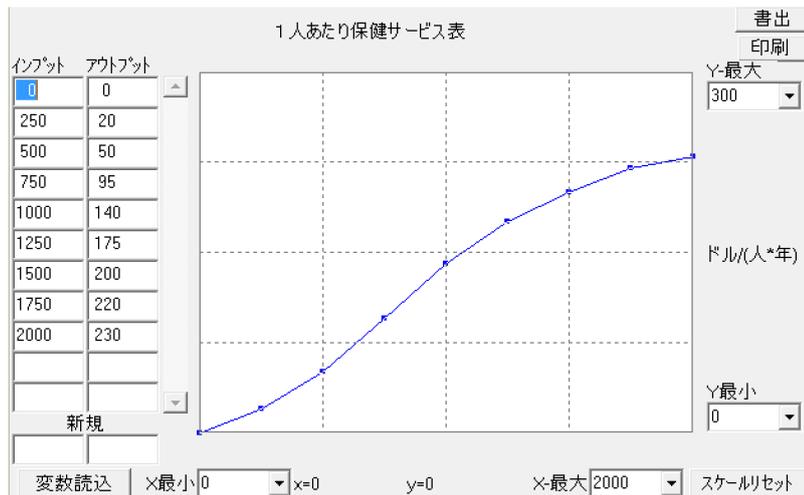
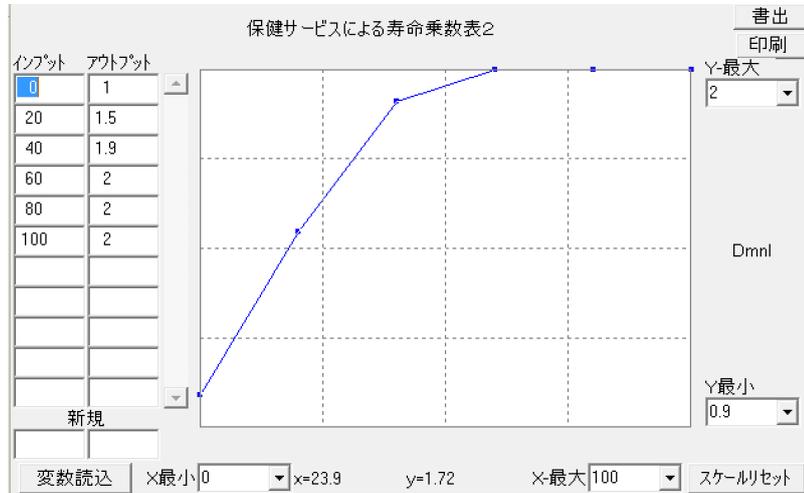
65才以上死亡率表 ((20,0.13), (30,0.11), (40,0.09), (50,0.07), (60,0.06), (70,0.05),
(80,0.04))

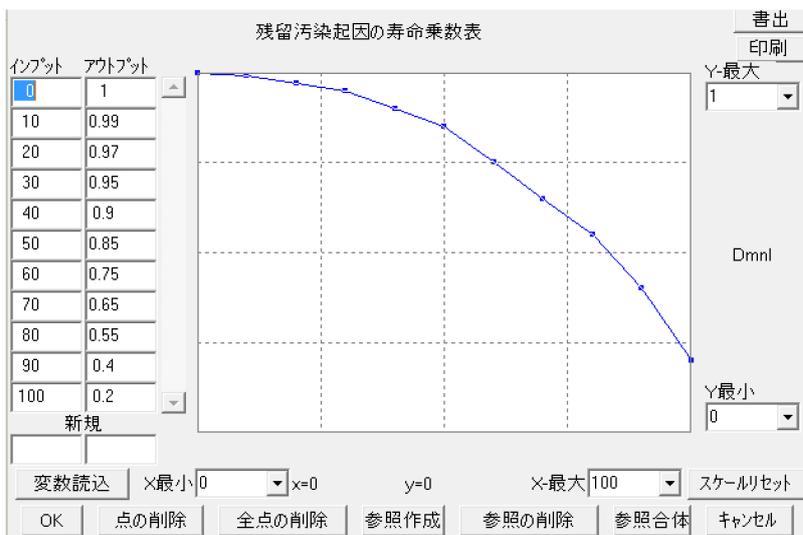
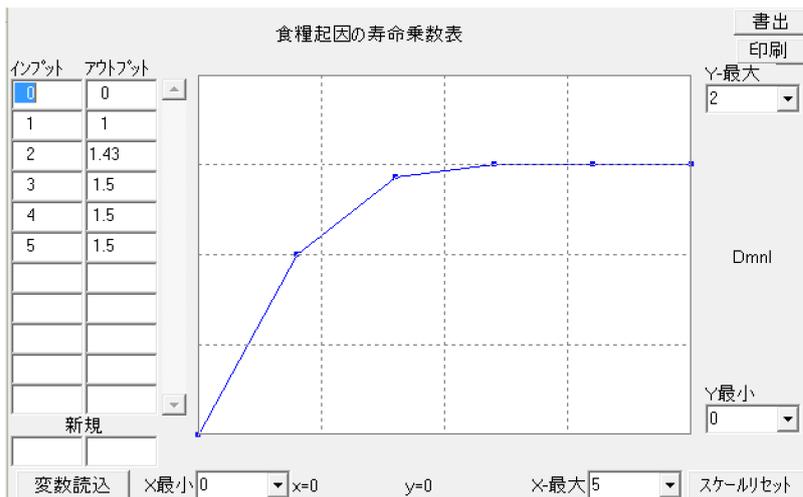
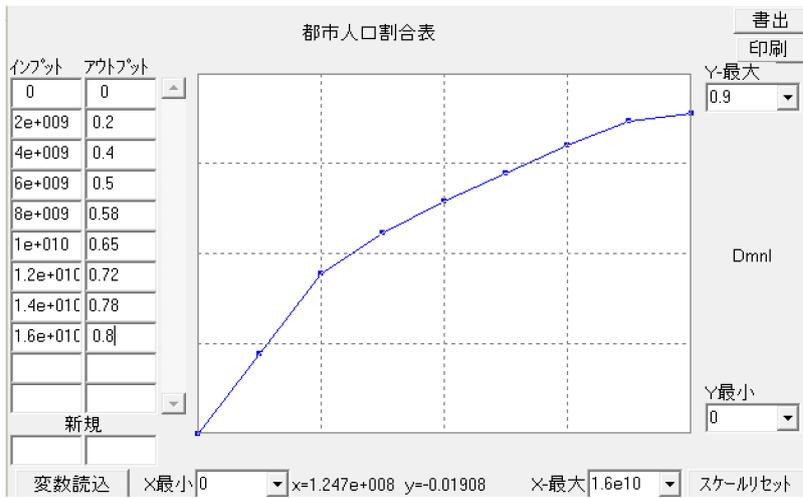
Units: 1/年

このサブモデルには、11個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。









12.3 サブモデル 2：合計出生率

図 12.4 は、合計出生率のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

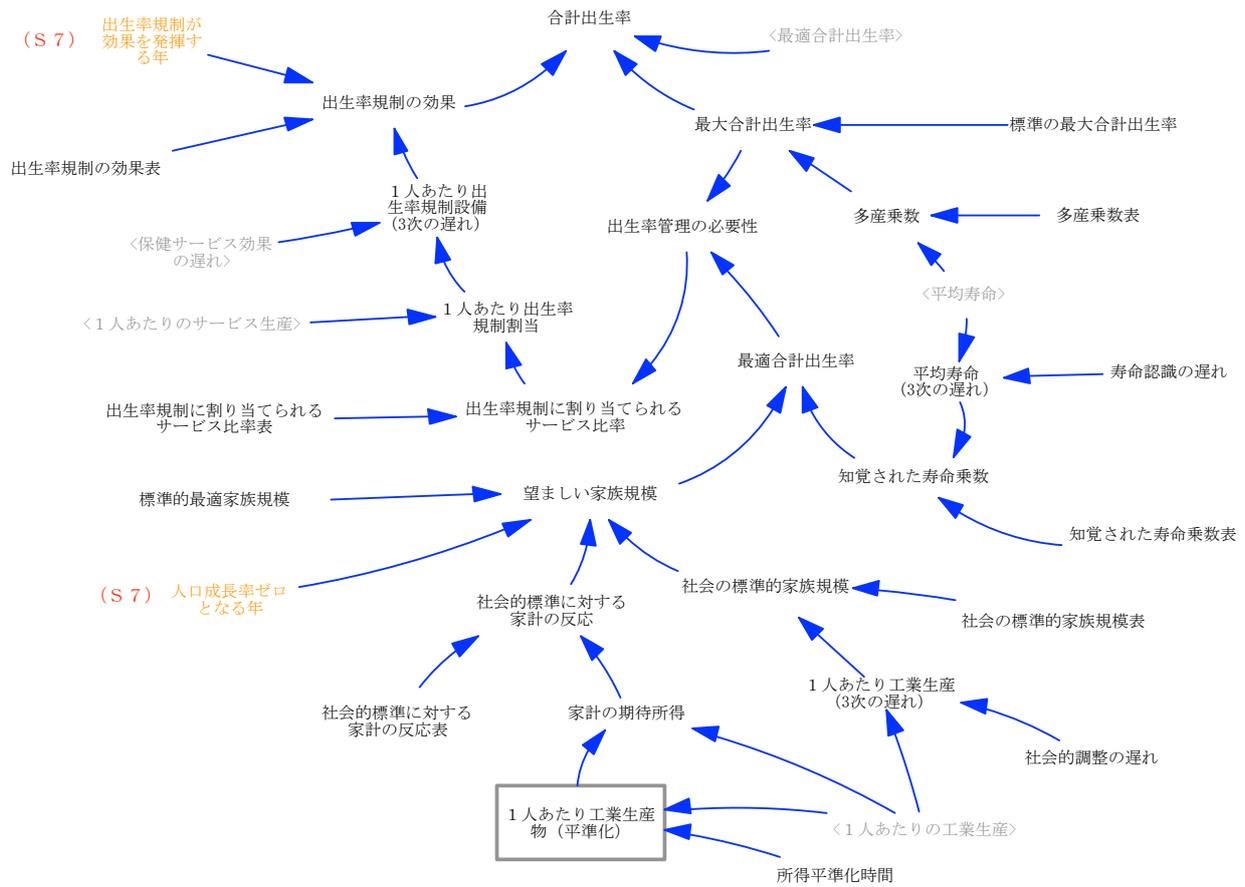


図 12.4 ワールド 3：合計出生率サブモデル

サブモデル2：合計出生率の式

人口成長率ゼロとなる年=2100

Units: 年

出生率管理の必要性=(最大合計出生率 / 最適合計出生率) - 1

Units: Dmnl

出生率規制が効果を発揮する年=2100

Units: 年

出生率規制に割り当てられるサービス比率=

出生率規制に割り当てられるサービス比率表 (出生率管理の必要性)

Units: Dmnl

出生率規制に割り当てられるサービス比率表 (

(0,0),(2,0.005),(4,0.015),(6,0.025),(8,0.03),(10,0.035))

Units: Dmnl

出生率規制の効果=IF THEN ELSE (Time >= 出生率規制が効果を発揮する年 , 1,
(出生率規制の効果表 (1人あたり出生率規制設備 (3次の遅れ))))

Units: Dmnl

出生率規制の効果表 ([(0,0)-(15,1)],(0,0.75),(0.5,0.85),(1,0.9),(1.5,0.95),
(2,0.98),(2.5,0.99),(3,1),(15,1))

Units: Dmnl

合計出生率=MIN (最大合計出生率 , (最大合計出生率 * (1 - 出生率規制の効果)
+ 最適合計出生率 * 出生率規制の効果))

Units: Dmnl

多産乗数= 多産乗数表 (平均寿命)

Units: Dmnl

多産乗数表 ((0,0),(10,0.2),(20,0.4),(30,0.6),(40,0.7),(50,0.75),(60,0.79)
,(70,0.84),(80,0.87))

Units: Dmnl

家計の期待所得=(1人あたりの工業生産 - 1人あたり工業生産物 (平準化))
/ 1人あたり工業生産物 (平準化)

Units: Dmnl

寿命認識の遅れ=20

Units: 年

平均寿命 (3次の遅れ) = SMOOTH3 (平均寿命 , 寿命認識の遅れ)

Units: 年

所得平準化時間=3

Units: 年

最大合計出生率=標準の最大合計出生率 * 多産乗数

Units: Dmnl

最適合計出生率=望ましい家族規模 * 知覚された寿命乗数

Units: Dmnl

望ましい家族規模=IF THEN ELSE (Time >= 人口成長率ゼロとなる年 , 2,
標準的最適家族規模 * 社会的標準に対する家計の反応
* 社会の標準的家族規模)

Units: Dmnl

標準の最大合計出生率=12

Units: Dmnl

標準的最適家族規模=3.8

Units: Dmnl

知覚された寿命乗数=知覚された寿命乗数表 (平均寿命 (3次の遅れ))

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

Units: Dmnl
 知覚された寿命乗数表 ((0,3), (10,2.1), (20,1.6), (30,1.4), (40,1.3), (50,1.2),
 (60,1.1), (70,1.05), (80,1))

Units: Dmnl
 社会の標準的家族規模=
 社会の標準的家族規模表 (1人あたり工業生産 (3次の遅れ))

Units: Dmnl
 社会の標準的家族規模表 ([(0,0)-(800,2), (0,1.25), (200,1), (400,0.9), (600,0.8),
 (800,0.75)], (0,1.25), (200,0.94), (400,0.715), (600,0.59), (800,0.5))

Units: Dmnl
 社会的標準に対する家計の反応=
 社会的標準に対する家計の反応表 (家計の期待所得)

Units: Dmnl
 社会的標準に対する家計の反応表 ((-0.2,0.5), (-0.1,0.6), (0,0.7), (0.1,0.85), (0.2,1))

Units: Dmnl
 社会的調整の遅れ=20

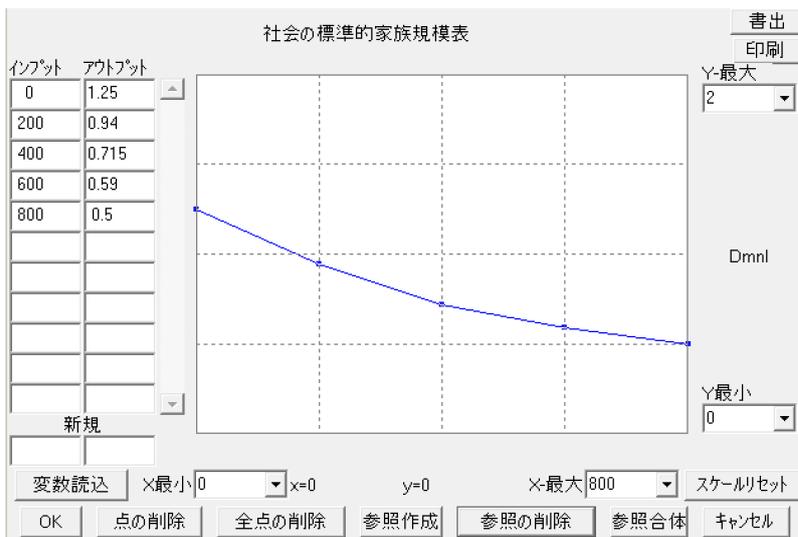
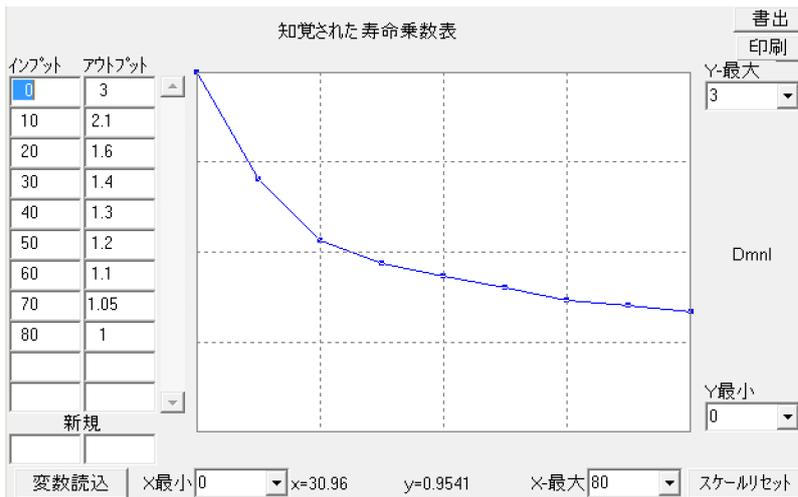
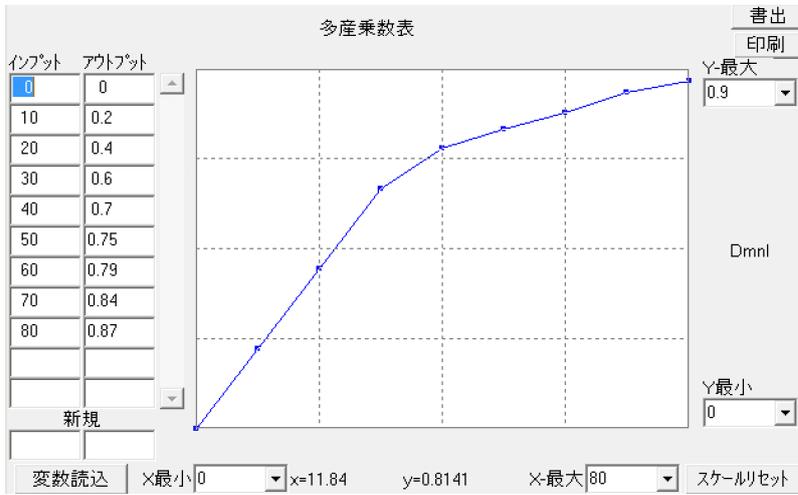
Units: 年
 1人あたり出生率規制割当=出生率規制に割り当てられるサービス比率
 * 1人あたりのサービス生産
 Units: ドル/(人*年)

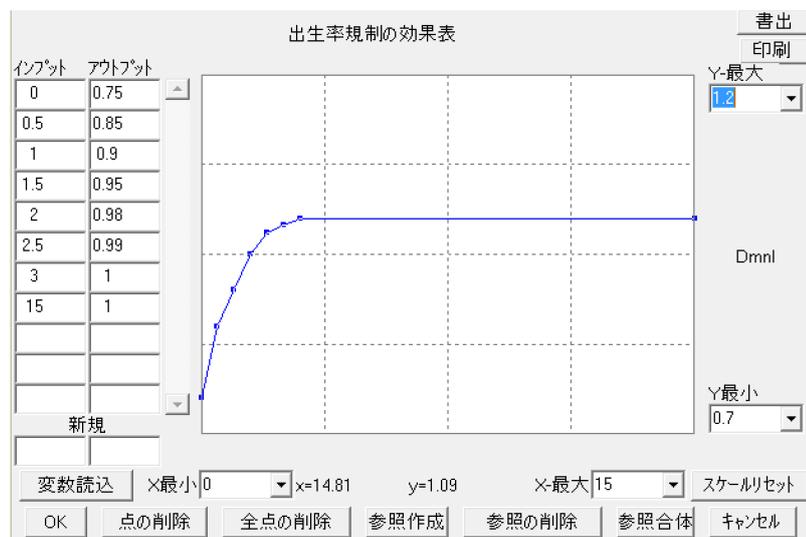
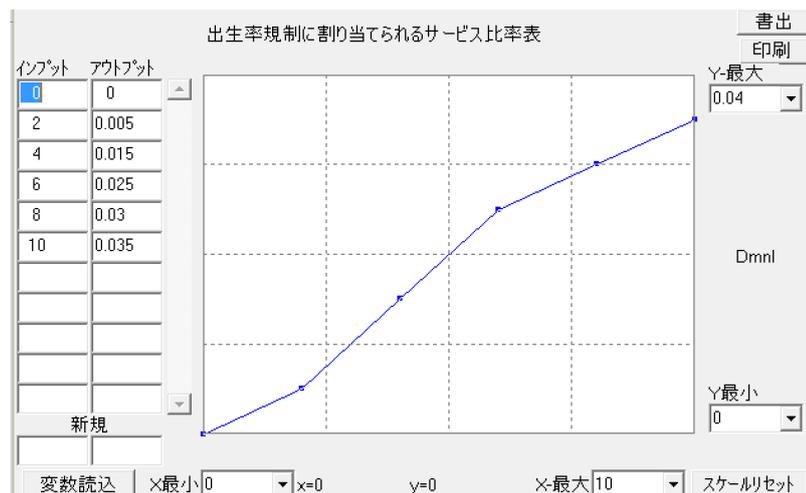
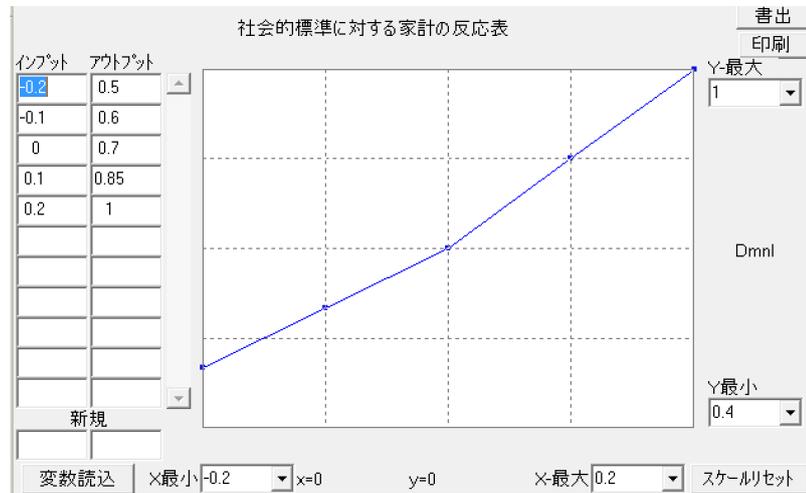
1人あたり出生率規制設備 (3次の遅れ) =SMOOTH3 (1人あたり出生率規制割当 ,
 保健サービス効果の遅れ)
 Units: ドル/(人*年)

1人あたり工業生産 (3次の遅れ) = SMOOTH3 (1人あたりの工業生産 , 社会的調整の遅れ)
 Units: ドル/(人*年)

1人あたり工業生産物 (平準化) =SMOOTH (1人あたりの工業生産 , 所得平準化時間)
 Units: ドル/(人*年)

このサブモデルには、6個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。





12.4 サブモデル3：残留性汚染

図 12.5 は、残留性汚染のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

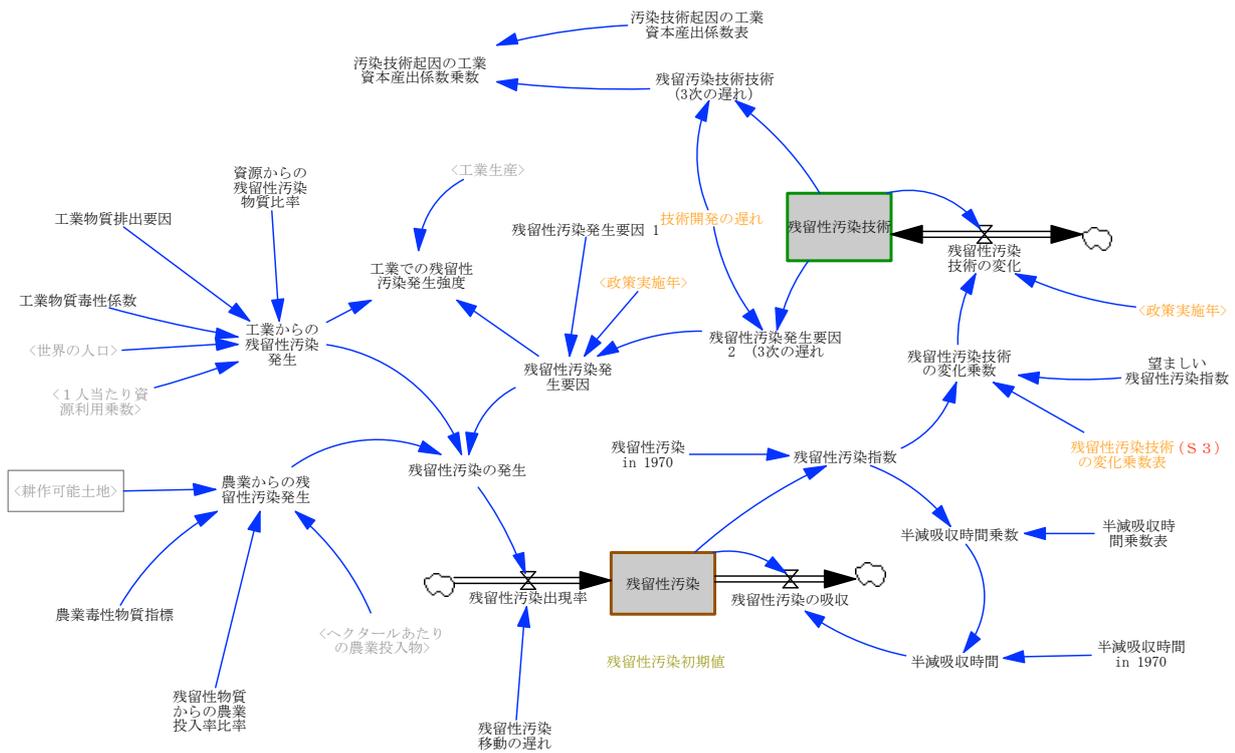


図 12.5 ワールド3：残留性汚染サブモデル

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

サブモデル3：残留性汚染の式

ヘクタールあたりの農業投入物=農業投入物 * (1- 土地保全のための農業投入物比率)
/ 耕作可能土地

Units: ドル/(年*ヘクタール)

半減吸収時間=半減吸収時間 in 1970 * 半減吸収時間乗数

Units: 年

半減吸収時間 in 1970=1.5

Units: 年

半減吸収時間乗数=半減吸収時間乗数表 (残留性汚染指数)

Units: Dmnl

半減吸収時間乗数表 ([(0,0)-(1001,60)], (0,1), (1,1), (251,11), (501,21), (751,31), (1001,41))

Units: Dmnl

単位時間= 1

Units: 年

工業からの残留性汚染発生=1人当たり資源利用乗数 * 世界の人口 * 資源からの残留性汚染物質比率

* 工業物質排出要因 * 工業物質毒性係数

Units: 汚染単位/年

工業での残留性汚染発生強度=工業からの残留性汚染発生 * 残留性汚染発生要因 / 工業生産

Units: 汚染単位/ドル

工業物質排出要因=0.1

Units: Dmnl

工業物質毒性係数=10

Units: 汚染単位/資源単位

技術開発の遅れ=20

Units: 年

政策実施年=2002

Units: 年 [1980,2020,1]

望ましい 残留性汚染指数=1.2

Units: Dmnl

残留性汚染= INTEG ((残留性汚染出現率 - 残留性汚染の吸収), 残留性汚染初期値)

Units: 汚染単位

残留性汚染 in 1970=1.36e+08

Units: 汚染単位

残留性汚染の吸収=残留性汚染 / (半減吸収時間 * 1.4)

Units: 汚染単位/年

残留性汚染の発生=(工業からの残留性汚染発生 + 農業からの残留性汚染発生)
* (残留性汚染発生要因)

Units: 汚染単位/年

残留性汚染出現率=DELAY3 (残留性汚染の発生 , 残留性汚染移動の遅れ)

Units: 汚染単位/年

残留性汚染初期値=2.5e+07

Units: 汚染単位

残留性汚染技術= INTEG (残留性汚染技術の変化, 1)

Units: Dmnl

残留性汚染技術の変化=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,

残留性汚染技術 * 残留性汚染技術の変化乗数 , 0)

Units: 1/年

残留性汚染技術の変化乗数=残留性汚染技術の変化乗数表 (

 1 - 残留性汚染指数/ 望ましい 残留性汚染指数)

 Units: 1/年

残留性汚染技術の変化乗数表 ([(-1,-0.04)-(0,0)], (-1,0), (0,0))

 Units: 1/年

残留性汚染指数=残留性汚染 / 残留性汚染 in 1970

 Units: Dmnl

残留性汚染発生要因=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年,

 残留性汚染発生要因 2 (3 次の遅れ, 残留性汚染発生要因 1)

 Units: Dmnl

残留性汚染発生要因 1=1

 Units: Dmnl

残留性汚染発生要因 2 (3 次の遅れ= SMOOTH3 (残留性汚染技術 , 技術開発の遅れ)

 Units: Dmnl

残留性汚染移動の遅れ=20

 Units: 年

残留性物質からの農業投入率比率=0.001

 Units: Dmnl

残留汚染技術技術 (3 次の遅れ) =SMOOTH3(残留性汚染技術, 技術開発の遅れ)

 Units: Dmnl

汚染技術起因の工業資本産出係数乗数=汚染技術起因の工業資本産出係数表 (

 残留汚染技術技術 (3 次の遅れ))

 Units: Dmnl

汚染技術起因の工業資本産出係数表 ((0,1.25), (0.1,1.2), (0.2,1.15), (0.3,1.11),

 (0.4,1.08), (0.5,1.05), (0.6,1.03), (0.7,1.02), (0.8,1.01), (0.9,1), (1,1))

 Units: Dmnl

資源からの残留性汚染物質比率=0.02

 Units: Dmnl

農業からの残留性汚染発生=ヘクタールあたりの農業投入物 * 耕作可能土地

 * 残留性物質からの農業投入率比率 * 農業毒性物質指標

 Units: 汚染単位/年

農業毒性物質指標=1

 Units: 汚染単位/ドル

12.5 サブモデル4：再生不可能資源

図 12.6 は、再生不可能資源のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

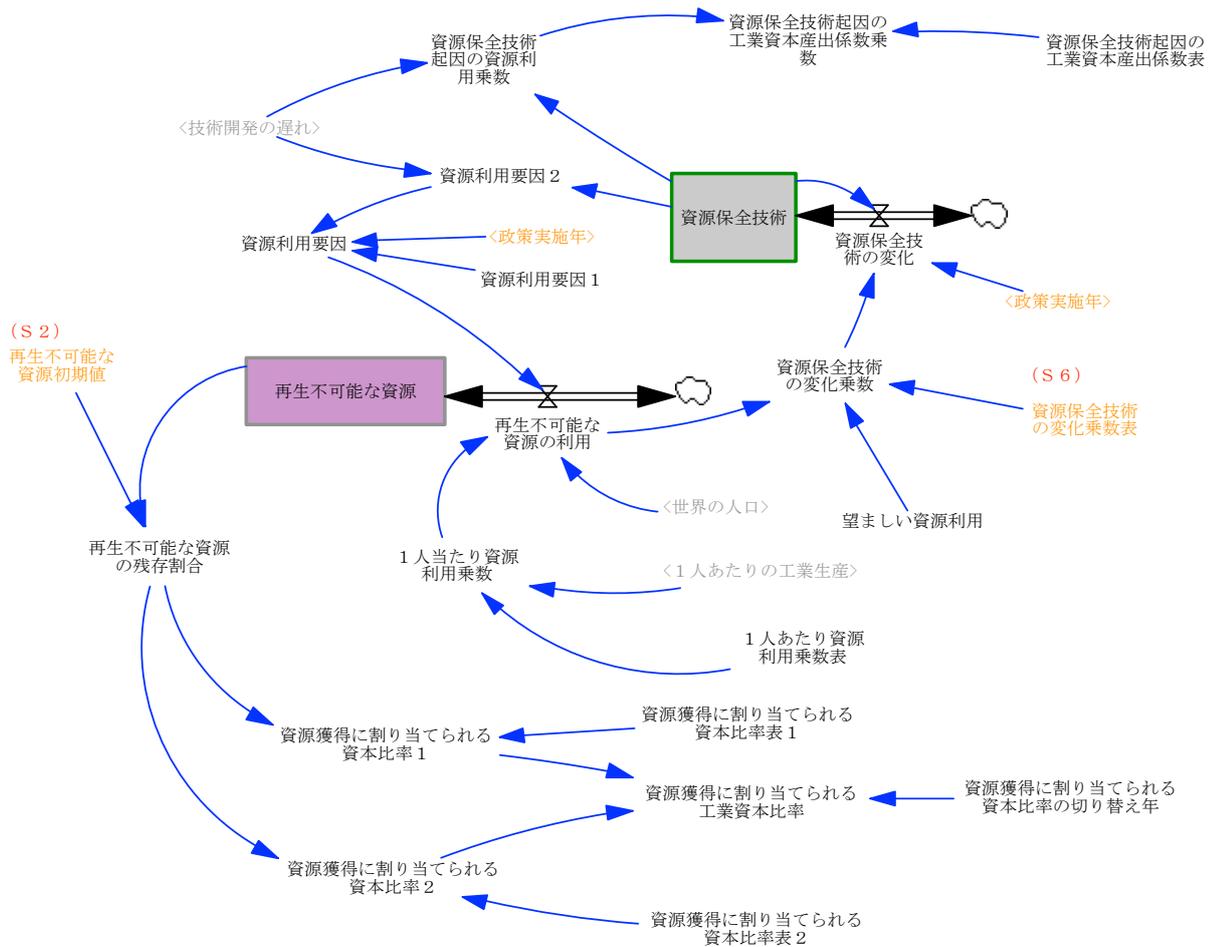


図 12.6 ワールド3：再生不可能資源サブモデル

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

サブモデル4：再生不可能資源の式

```

再生不可能な資源 = INTEG( ( - 再生不可能な資源の利用 ) ,
                           再生不可能な資源初期値 )
Units: 資源単位
再生不可能な資源の利用= ( ( ( 世界の人口 ) ) * ( 1人当たり資源利用乗数 ) )
                           * ( 資源利用要因 )
Units: 資源単位/年
再生不可能な資源の残存割合=再生不可能な資源
                           / 再生不可能な資源初期値
Units: Dmnl
再生不可能な資源初期値=1e+12
Units: 資源単位 [1e+12,2e+12,1e+12]
政策実施年=2002
Units: 年 [1980,2020,1]
望ましい資源利用=4.8e+09
Units: 資源単位/年
資源保全技術= INTEG( 資源保全技術の変化,1)
Units: Dmnl
資源保全技術の変化=IF THEN ELSE ( Time >= 政策実施年 ,
                                   資源保全技術 * 資源保全技術の変化乗数 , 0)
Units: 1/年
資源保全技術の変化乗数= 資源保全技術の変化乗数表 (
    1- 再生不可能な資源の利用 / 望ましい資源利用 )
Units: 1/年
資源保全技術の変化乗数表 [(-1,-0.04)-(0,0)],(-1,0),(0,0)
Units: 1/年
資源保全技術起因の工業資本産出係数乗数=
資源保全技術起因の工業資本産出係数表 ( 資源保全技術起因の資源利用乗数 )
Units: 年
資源保全技術起因の工業資本産出係数表 (
    (0,3.75),(0.1,3.6),(0.2,3.47),(0.3,3.36),(0.4,3.25),(0.5,3.16)
    ,(0.6,3.1),(0.7,3.06),(0.8,3.02),(0.9,3.01),(1,3)
)
Units: 年
資源保全技術起因の資源利用乗数=SMOOTH3(資源保全技術, 技術開発の遅れ)
Units: Dmnl
資源利用要因=IF THEN ELSE ( Time >= 政策実施年 , 資源利用要因2 ,
                             資源利用要因1 )
Units: Dmnl
資源利用要因1=1
Units: Dmnl
資源利用要因2=SMOOTH3 ( 資源保全技術 , 技術開発の遅れ )
Units: Dmnl
資源獲得に割り当てられる工業資本比率=
IF THEN ELSE ( Time >= 資源獲得に割り当てられる資本比率の切り替え年,
               資源獲得に割り当てられる資本比率2 ,
               資源獲得に割り当てられる資本比率1 )
Units: Dmnl
資源獲得に割り当てられる資本比率の切り替え年=4000
Units: 年

```

資源獲得に割り当てられる資本比率表1 (

(0,1), (0.1,0.9), (0.2,0.7), (0.3,0.5), (0.4,0.2), (0.5,0.1), (0.6,0.05)
, (0.7,0.05), (0.8,0.05), (0.9,0.05), (1,0.05))

Units: Dmnl

資源獲得に割り当てられる資本比率表2 (

(0,1), (0.1,0.2), (0.2,0.1), (0.3,0.05), (0.4,0.05), (0.5,0.05)
, (0.6,0.05), (0.7,0.05), (0.8,0.05), (0.9,0.05), (1,0.05))

Units: Dmnl

資源獲得に割り当てられる資本比率1 =

資源獲得に割り当てられる資本比率表1 (再生不可能な資源の残存割合)

Units: Dmnl

資源獲得に割り当てられる資本比率2 =

資源獲得に割り当てられる資本比率表2 (再生不可能な資源の残存割合)

Units: Dmnl

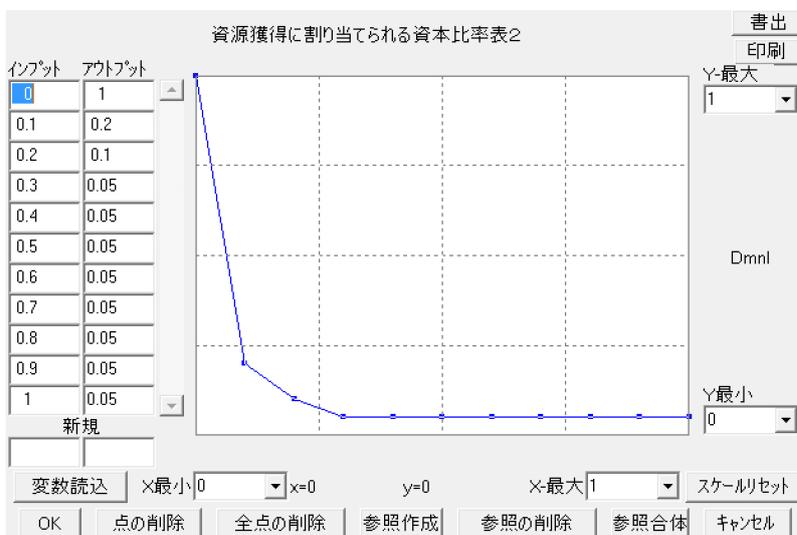
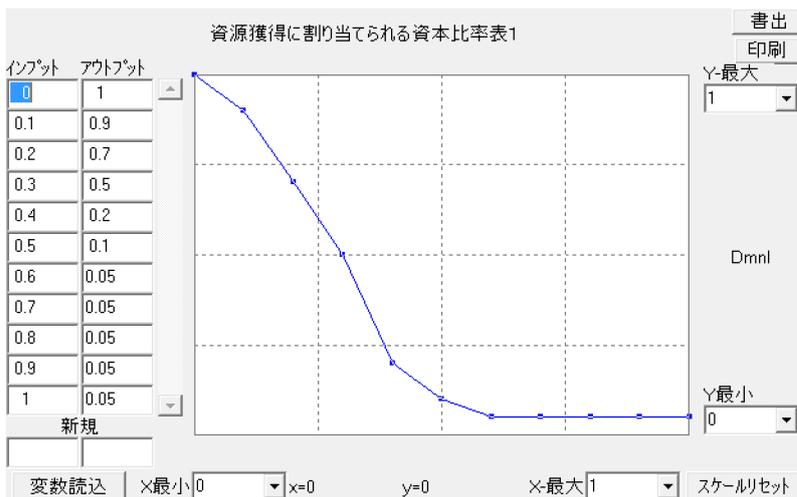
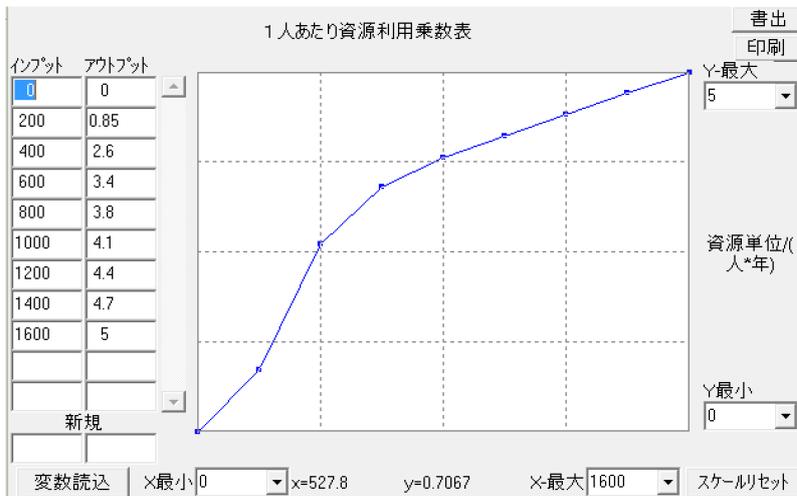
1人あたり資源利用乗数表 (

(0,0), (200,0.85), (400,2.6), (600,3.4), (800,3.8), (1000,4.1),
(1200,4.4), (1400,4.7), (1600,5))

Units: 資源単位/(人*年)

1人あたり資源利用乗数=1人あたり資源利用乗数表 (1人あたりの工業生産)

Units: 資源単位/(人*年)



12.6 サブモデル 5：食料生産

図 12.7 は、食料生産のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

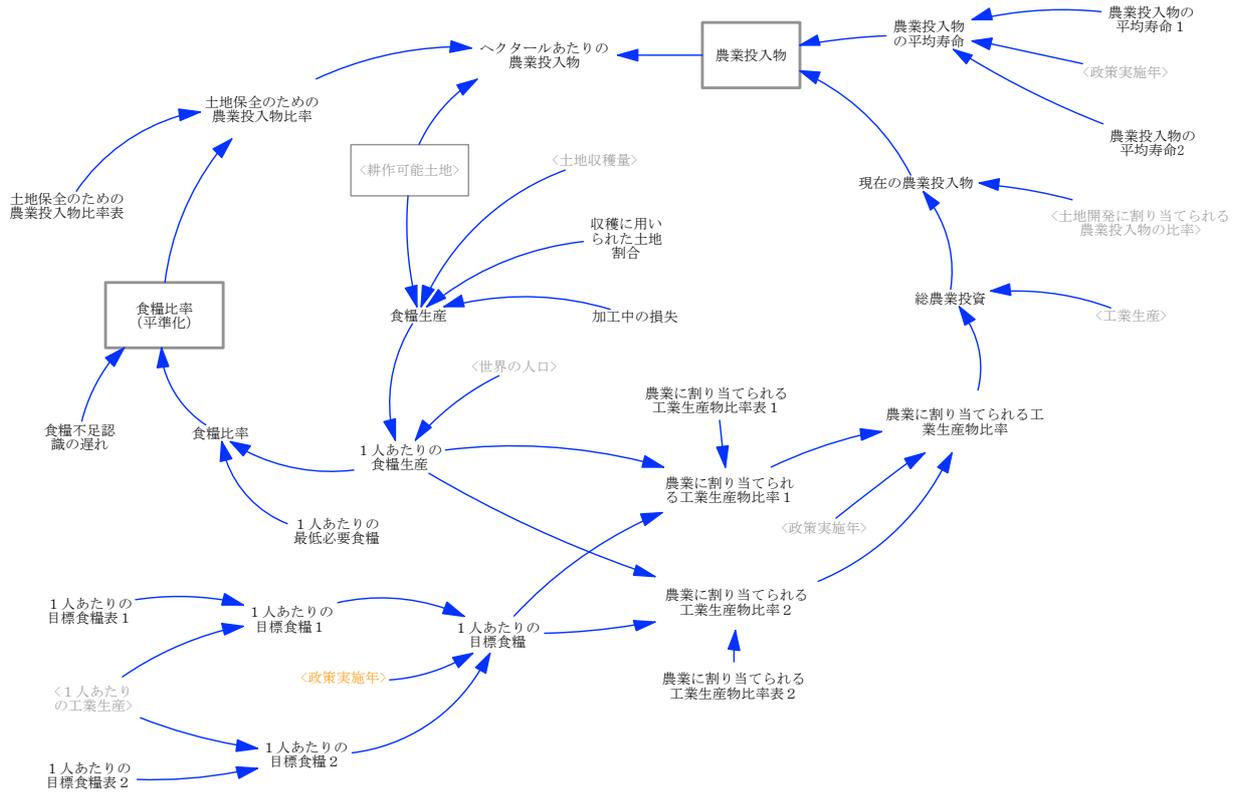


図 12.7 ワールド 3：食料生産サブモデル

サブモデル5：食料生産の式

ヘクタールあたりの農業投入物=農業投入物 * (1- 土地保全のための農業投入物比率)
 / 耕作可能土地
 Units: ドル/(年*ヘクタール)

加工中の損失=0.1
 Units: Dmnl

収穫に用いられた土地割合=0.7
 Units: Dmnl

土地保全のための 農業投入物比率表 ((0,0), (1,0.04), (2,0.07), (3,0.09), (4,0.1))
 Units: Dmnl

土地保全のための農業投入物比率=
 土地保全のための 農業投入物比率表 (食糧比率 (平準化))
 Units: Dmnl

土地収穫量=土地の肥沃度*技術起因の土地収穫量乗数 * 資本起因の土地収穫量乗数
 * 大気汚染起因の土地収穫量乗数
 Units: 野菜相当 Kg/(ヘクタール*年)

政策実施年=2002
 Units: 年 [1980,2020,1]

現在の農業投入物= ACTIVE INITIAL (総農業投資
 * (1- 土地開発に割り当てられる農業投入物の比率),5e+09)
 Units: ドル/年

総農業投資=工業生産 * 農業に割り当てられる工業生産物比率
 Units: ドル/年

農業に割り当てられる工業生産物比率=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
 農業に割り当てられる工業生産物比率2 ,
 農業に割り当てられる工業生産物比率1)
 Units: Dmnl

農業に割り当てられる工業生産物比率表1 ([(0,0)-(2.5,0.6)],(0,0.4),(0.5,0.2),(1,0.1),(1.5,0.025),(2,0),(2.5,0))
 Units: Dmnl

農業に割り当てられる工業生産物比率表2 ([(0,0)-(2.5,0.6)],(0,0.4),(0.5,0.2),(1,0.1),(1.5,0.025),(2,0),(2.5,0))
 Units: Dmnl

農業に割り当てられる工業生産物比率1=
 農業に割り当てられる工業生産物比率表1 (1人あたりの食糧生産
 / 1人あたりの目標食糧)
 Units: Dmnl

農業に割り当てられる工業生産物比率2=
 農業に割り当てられる工業生産物比率表2 (1人あたりの食糧生産
 / 1人あたりの目標食糧)
 Units: Dmnl

農業投入物=SMOOTH (現在の農業投入物, 農業投入物の平均寿命)
 Units: ドル/年

農業投入物の平均寿命=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
 農業投入物の平均寿命2 , 農業投入物の平均寿命1)
 Units: 年

農業投入物の平均寿命2=2
 Units: 年

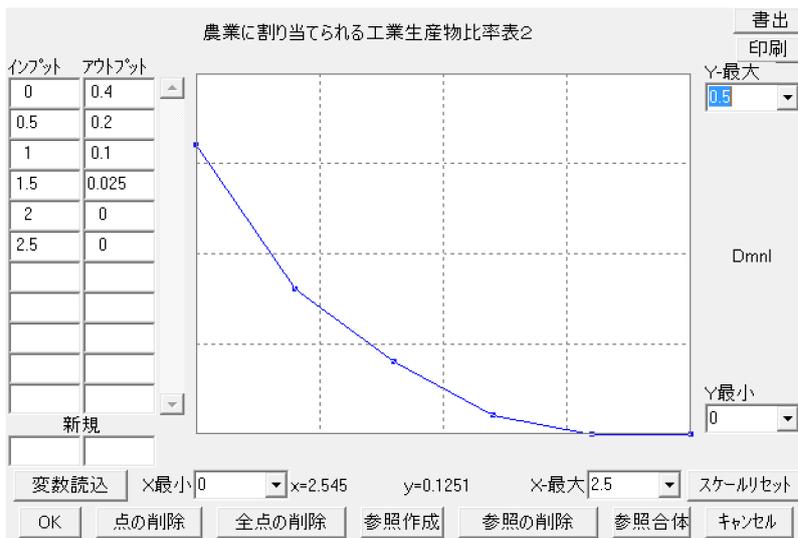
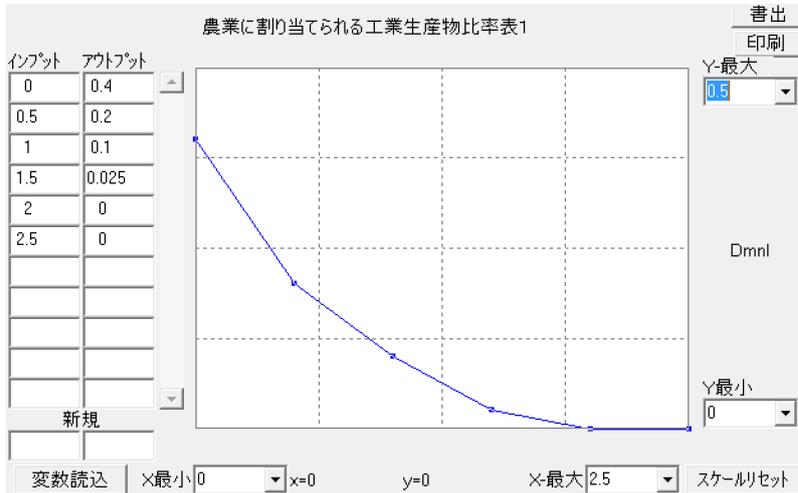
農業投入物の平均寿命1= 2

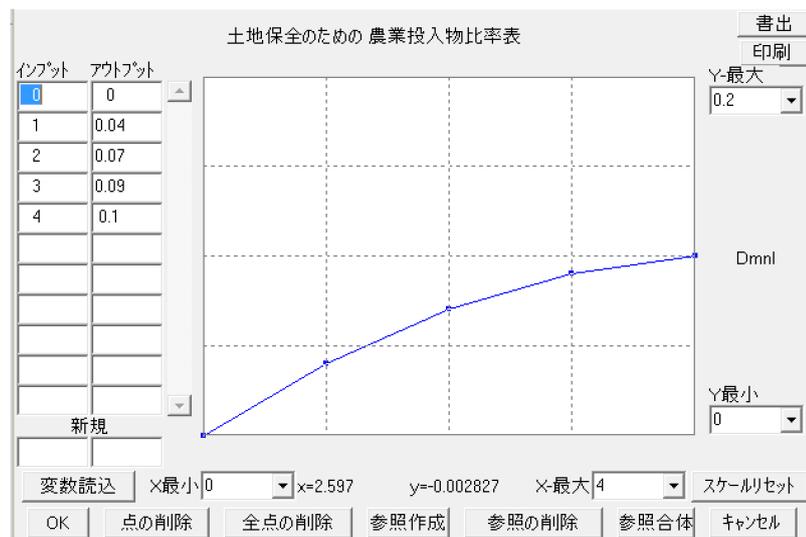
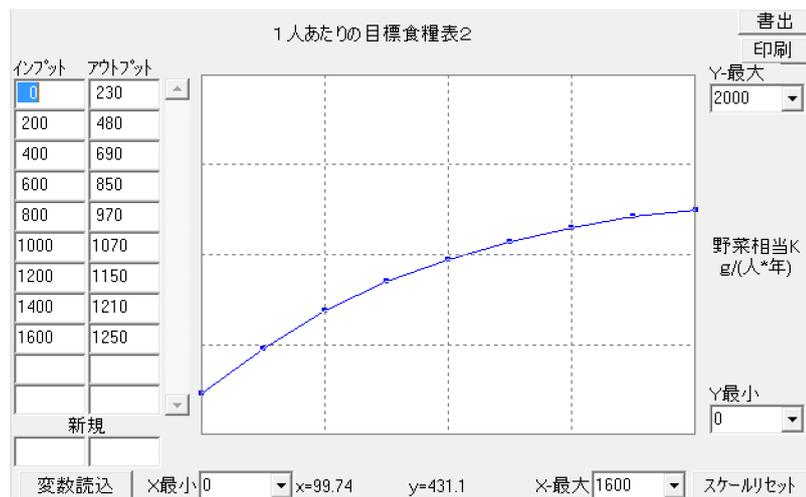
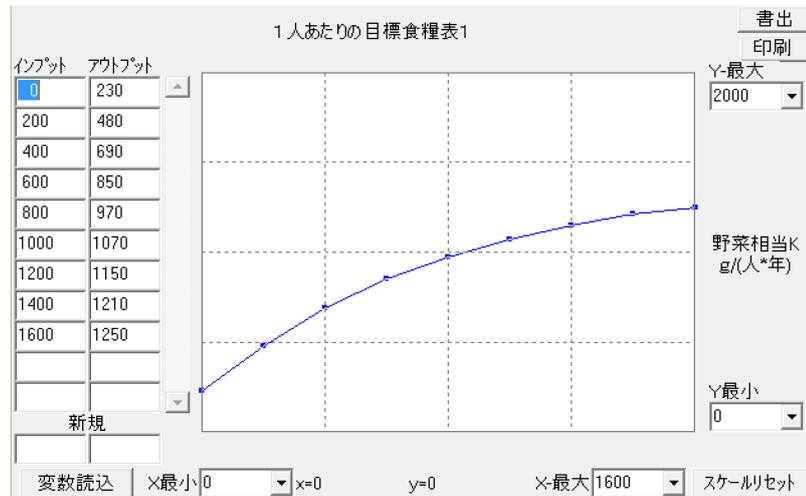
スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代替変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代替変数として入力して下さい。

Units: 年
食糧不足認識の遅れ=2
Units: 年
食糧比率= ACTIVE INITIAL (人あたりの食糧生産 / 1人あたりの最低必要食糧,1)
Units: Dmnl
食糧比率 (平準化) =SMOOTH (食糧比率, 食糧不足認識の遅れ)
Units: Dmnl
食糧生産= 土地収穫量 * 耕作可能土地 * 収穫に用いられた土地割合
* (1 - 加工中の損失)
Units: 野菜相当 K g /年
1人あたりの最低必要食糧=230
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたりの目標食糧=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
1人あたりの目標食糧2 , 1人あたりの目標食糧1)
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたりの目標食糧表1 ((0,230), (200,480), (400,690), (600,850), (800,970), (1000,1070),
(1200,1150), (1400,1210), (1600,1250))
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたりの目標食糧表2 ((0,230), (200,480), (400,690), (600,850), (800,970), (1000,1070),
(1200,1150), (1400,1210), (1600,1250))
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたりの目標食糧1=1人あたりの目標食糧表1 (1人あたりの工業生産/1人あたり国内総生産単位)
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたりの目標食糧2=1人あたりの目標食糧表2 (1人あたりの工業生産/1人あたり国内総生産単位)
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたりの食糧生産=食糧生産 / 世界の人口
Units: 野菜相当 K g / (人*年)
1人あたり国内総生産単位=1
Units: ドル/人/年

このサブモデルには、5個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。





スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代変数として入力して下さい。

サブモデル6：土地収穫量の式

ヘクタールあたりの農業投入物=農業投入物 * (1- 土地保全のための農業投入物比率)
/ 耕作可能土地

Units: ドル/(年*ヘクタール)

固有の土地肥沃度=600

Units: 野菜相当 Kg/(年*ヘクタール)

土地収穫量=土地の肥沃度 *技術起因の土地収穫量乗数 * 資本起因の土地収穫量乗数
* 大気汚染起因の土地収穫量乗数

Units: 野菜相当 Kg/(ヘクタール*年)

土地収穫量技術= INTEG (土地収穫量技術の変化, 1)

Units: Dmnl

土地収穫量技術の変化=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
土地収穫量技術 * 土地収穫量技術の変化乗数 , 0)

Units: 1/年

土地収穫量技術の変化乗数=土地収穫量技術の変化乗数表 (望ましい食糧比率 - 食糧比率)

Units: 1/年

土地収穫量技術の変化乗数表 ([(0,0)-(1,0.04)], (0,0), (1,0))

Units: 1/年

土地収穫量技術起因の工業資本産出係数乗数=

土地収穫量技術起因の工業資本産出係数乗数表 (技術起因の土地収穫量乗数)

Units: Dmnl

土地収穫量技術起因の工業資本産出係数乗数表 (

(1,1), (1.2,1.05), (1.4,1.12), (1.6,1.25), (1.8,1.35), (2,1.5))

Units: Dmnl

土地収穫量要因1=1

Units: Dmnl

土地収穫量要因2=SMOOTH3 (土地収穫量技術 , 技術開発の遅れ)

Units: Dmnl

土地収穫量起因の土地寿命乗数1=土地収穫量起因の土地寿命乗数表1 (土地収穫量
/ 固有の土地肥沃度)

Units: Dmnl

土地収穫量起因の土地寿命乗数2=土地収穫量起因の土地寿命乗数表2 (土地収穫量
/ 固有の土地肥沃度)

Units: Dmnl

土地収穫量起因の土地寿命乗数表1 (

(0,1.2), (1,1), (2,0.63), (3,0.36), (4,0.16), (5,0.055), (6,0.04)
, (7,0.025), (8,0.015), (9,0.01))

Units: Dmnl

土地収穫量起因の土地寿命乗数表2 (

(0,1.2), (1,1), (2,0.63), (3,0.36), (4,0.29), (5,0.26), (6,0.24)
, (7,0.22), (8,0.21), (9,0.2))

Units: Dmnl

大気汚染起因の土地収穫量乗数=IF THEN ELSE (Time >= 大気汚染防止政策実施年 ,
大気汚染起因の土地収穫量乗数2 , 大気汚染起因の土地収穫量乗数1)

Units: Dmnl

大気汚染起因の土地収穫量乗数1=大気汚染起因の土地収穫量乗数表1 (工業生産
/ 工業総生産量 in 1970)

Units: Dmnl

大気汚染起因の土地収穫量乗数2=大気汚染起因の土地収穫量乗数表2 (工業生産

/ 工業総生産量 in 1970)

Units: Dmnl

大気汚染起因の土地収穫量乗数表1 ((0,1),(10,1),(20,0.7),(30,0.4))

Units: Dmnl

大気汚染起因の土地収穫量乗数表2 ((0,1),(10,1),(20,0.98),(30,0.95))

Units: Dmnl

大気汚染防止政策実施年= 4000

Units: 年

工業総生産量 in 1970=7.9e+11

Units: ドル/年

技術起因の土地収穫量乗数=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
土地収穫量要因2 , 土地収穫量要因1)

Units: Dmnl

技術開発の遅れ=20

Units: 年

政策実施年=2002

Units: 年 [1980,2020,1]

望ましい食糧比率=2

Units: Dmnl

資本起因の土地収穫量乗数=
資本起因の土地収穫量乗数表 (ヘクタールあたりの農業投入物)

Units: Dmnl

資本起因の土地収穫量乗数表 (

(0,1),(40,3),(80,4.5),(120,5),(160,5.3),(200,5.6),(240,5.9)

, (280,6.1),(320,6.35),(360,6.6),(400,6.9),(440,7.2),(480,7.4)

, (520,7.6),(560,7.8),(600,8),(640,8.2),(680,8.4),(720,8.6)

, (760,8.8),(800,9),(840,9.2),(880,9.4),(920,9.6),(960,9.8)

, (1000,10))

Units: Dmnl

資本起因の限界土地収穫量乗数=
資本起因の限界土地収穫量乗数表 (ヘクタールあたりの農業投入物)

Units: ヘクタール/ドル

資本起因の限界土地収穫量乗数表 (

(0,0.075),(40,0.03),(80,0.015),(120,0.011),(160,0.009),(200,0.008)

, (240,0.007),(280,0.006),(320,0.005),(360,0.005),(400,0.005)

, (440,0.005),(480,0.005),(520,0.005),(560,0.005),(600,0.005))

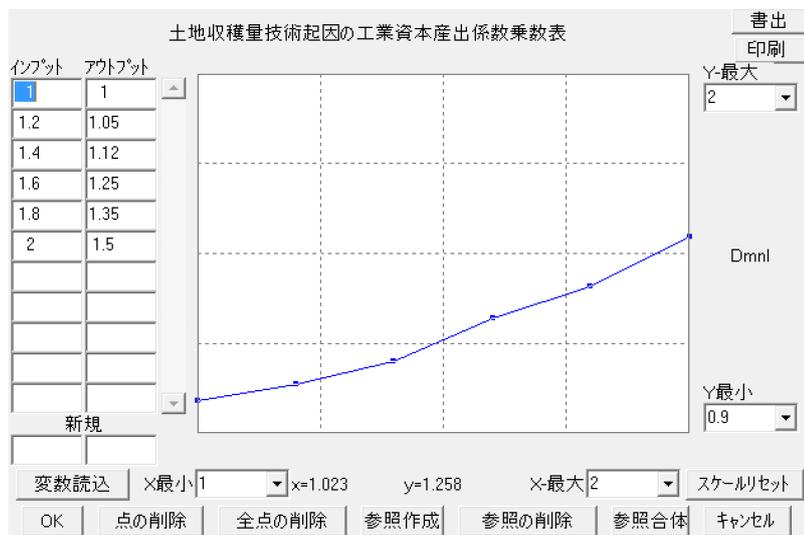
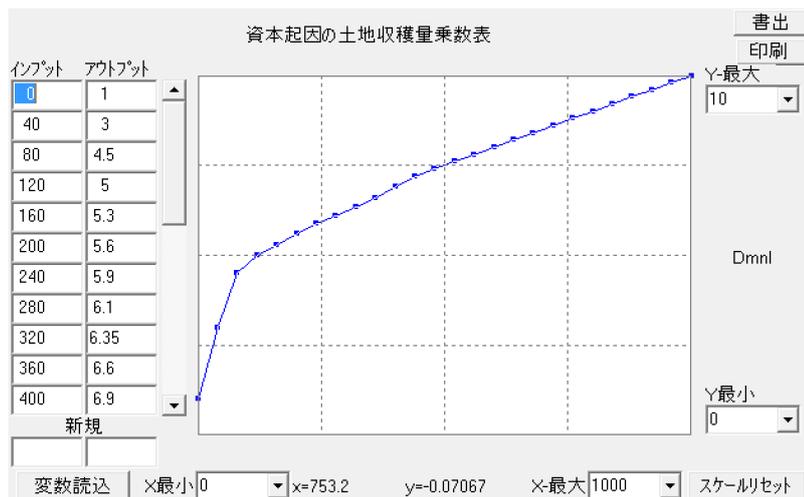
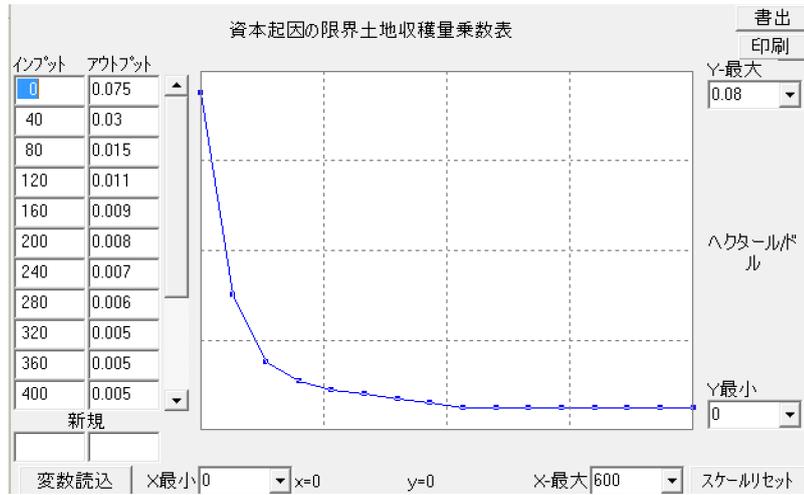
Units: ヘクタール/ドル

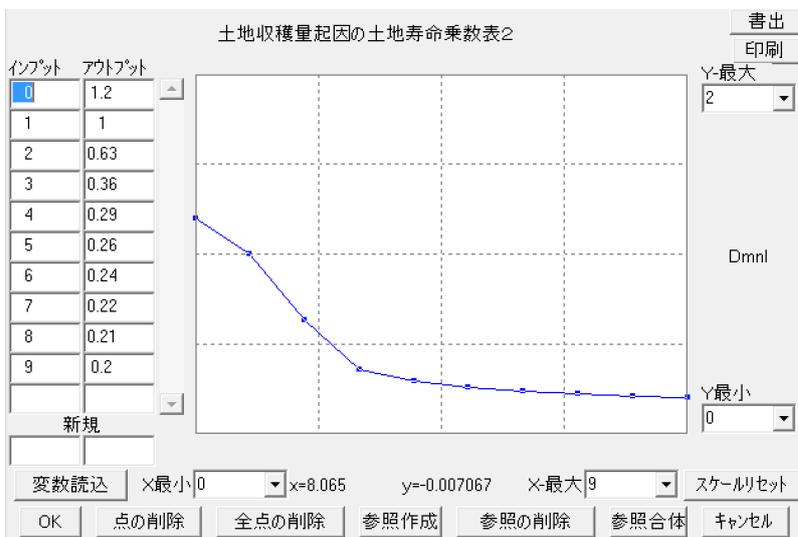
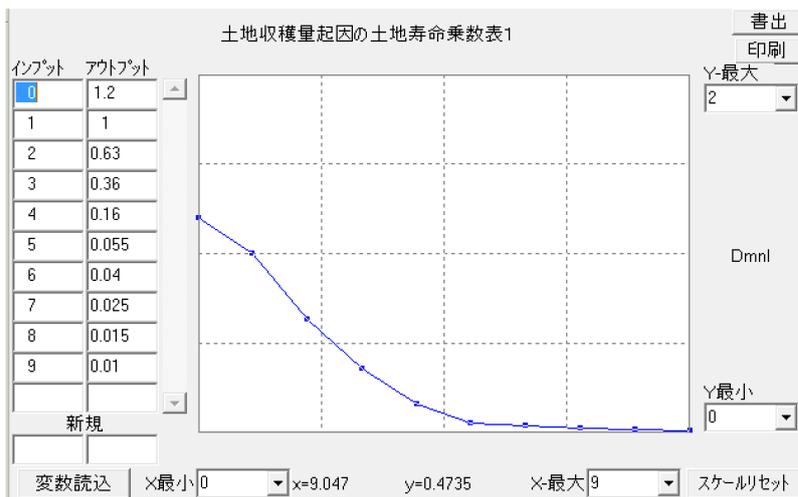
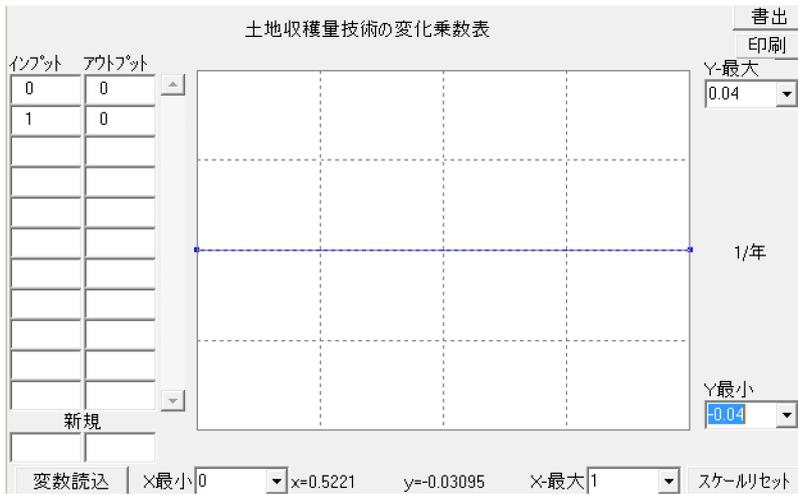
農業投入物の 限界生産性=農業投入物の平均寿命 * 土地収穫量

* 資本起因の限界土地収穫量乗数 / 資本起因の土地収穫量乗数

Units: 野菜相当 K g/ドル

このサブモデルには、6個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。





12.8 サブモデル 7：土地開発・肥沃度

図 12.9 は、土地開発・肥沃度のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

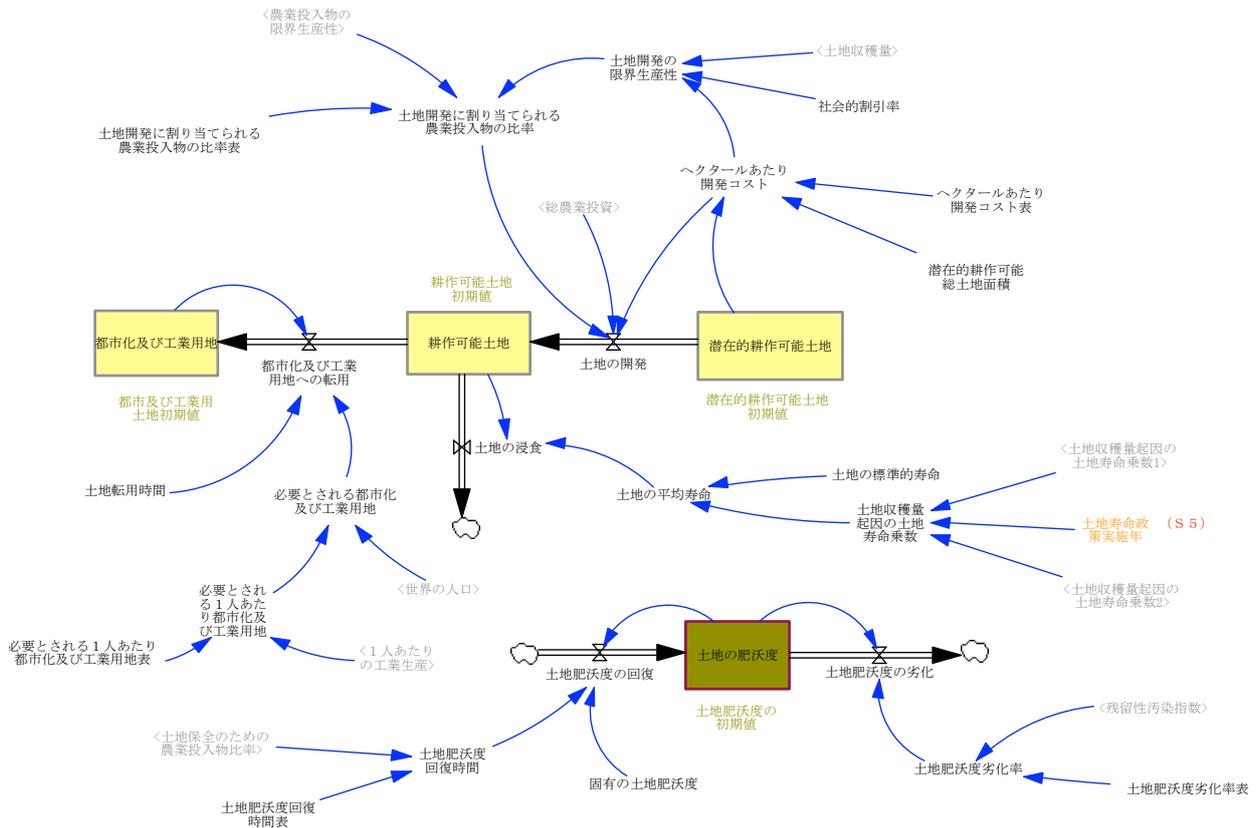


図 12.9 ワールド 3：土地開発・肥沃度サブモデル

サブモデル7：土地開発・肥沃度の式

ヘクタールあたり開発コスト=ヘクタールあたり開発コスト表（潜在的耕作可能土地 / 潜在的耕作可能 総土地面積）

Units: ドル/ヘクタール

ヘクタールあたり開発コスト表（

(0,100000), (0.1,7400), (0.2,5200), (0.3,3500), (0.4,2400), (0.5,1500), (0.6,750), (0.7,300), (0.8,150), (0.9,75), (1,50))

Units: ドル/ヘクタール

固有の土地肥沃度=600

Units: 野菜相当 K g / (年*ヘクタール)

土地の平均寿命=土地の標準的寿命 * 土地収穫量起因の土地寿命乗数

Units: 年

土地の標準的寿命=1000

Units: 年

土地の浸食=耕作可能土地 / 土地の平均寿命

Units: ヘクタール/年

土地の肥沃度= INTEG ((土地肥沃度の回復 - 土地肥沃度の劣化), 土地肥沃度の初期値)

Units: 野菜相当 K g / (ヘクタール*年)

土地の開発=総農業投資 * 土地開発に割り当てられる農業投入物の比率 / ヘクタールあたり開発コスト

Units: ヘクタール/年

土地保全のための農業投入物比率=土地保全のための 農業投入物比率表（食糧比率（平準化））

Units: Dmnl

土地収穫量起因の土地寿命乗数=IF THEN ELSE (Time >= 土地寿命政策実施年 , (0.95 ^ ((Time - 土地寿命政策実施年)/単位時間))

* 土地収穫量起因の土地寿命乗数 1

+ (1 - 0.95 ^ ((Time - 土地寿命政策実施年)/単位時間))

* 土地収穫量起因の土地寿命乗数 2 ,

土地収穫量起因の土地寿命乗数 1)

Units: Dmnl

土地寿命政策実施年=2100

Units: 年

土地肥沃度の初期値=600

Units: 野菜相当 K g / (ヘクタール*年)

土地肥沃度の劣化=土地の肥沃度 * 土地肥沃度劣化率

Units: 野菜相当 K g / (ヘクタール*年*年)

土地肥沃度の回復=(固有の土地肥沃度 - 土地の肥沃度) / 土地肥沃度回復時間

Units: 野菜相当 K g / (ヘクタール*年*年)

土地肥沃度劣化率=土地肥沃度劣化率表（残留性汚染指数）

Units: 1/年

土地肥沃度劣化率表（(0,0), (10,0.1), (20,0.3), (30,0.5)）

Units: 1/年

土地肥沃度回復時間=土地肥沃度回復時間表（土地保全のための農業投入物比率）

Units: 年

土地肥沃度回復時間表（(0,20), (0.02,13), (0.04,8), (0.06,4), (0.08,2), (0.1,2)）

Units: 年

土地転用時間=10

Units: 年

土地開発に割り当てられる農業投入物の比率=

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

土地開発に割り当てられる農業投入物の比率表 ((土地開発の 限界生産性 / 農業投入物の 限界生産性))

Units: Dmnl

土地開発に割り当てられる農業投入物の比率表 (

(0,0), (0.25,0.05), (0.5,0.15), (0.75,0.3), (1,0.5), (1.25,0.7)
, (1.5,0.85), (1.75,0.95), (2,1))

Units: Dmnl

土地開発の 限界生産性=土地収穫量 / (ヘクタールあたり開発コスト * 社会的割引率)

Units: 野菜相当 Kg/ドル

必要とされる都市化及び工業用地=必要とされる1人あたり都市化及び工業用地

* 世界の人口

Units: ヘクタール

必要とされる1人あたり都市化及び工業用地=

必要とされる1人あたり都市化及び工業用地表 (1人あたりの工業生産)

Units: ヘクタール/人

必要とされる1人あたり都市化及び工業用地表 (

(0,0.005), (200,0.008), (400,0.015), (600,0.025), (800,0.04), (1000,0.055)
, (1200,0.07), (1400,0.08), (1600,0.09))

Units: ヘクタール/人

残留性汚染指数=残留性汚染 / 残留性汚染 in 1970

Units: Dmnl

潜在的耕作可能 総土地面積=3.2e+09

Units: ヘクタール

潜在的耕作可能土地= INTEG ((- 土地の開発), 潜在的耕作可能土地 初期値)

Units: ヘクタール

潜在的耕作可能土地 初期値=2.3e+09

Units: ヘクタール

社会的割引率=0.07

Units: 1/年

耕作可能土地= INTEG (土地の開発 - 土地の浸食 - 都市化及び工業用地への転用,
耕作可能土地 初期値)

Units: ヘクタール

耕作可能土地 初期値=9e+08

Units: ヘクタール

農業投入物の 限界生産性=農業投入物の平均寿命 * 土地収穫量

* 資本起因の限界土地収穫量乗数 / 資本起因の土地収穫量乗数

Units: 野菜相当 Kg/ドル

都市化及び工業用地= INTEG ((都市化及び工業用地への転用), 都市及び工業用地初期値)

Units: ヘクタール

都市化及び工業用地への転用=(必要とされる都市化及び工業用地 - 都市化及び工業用地)

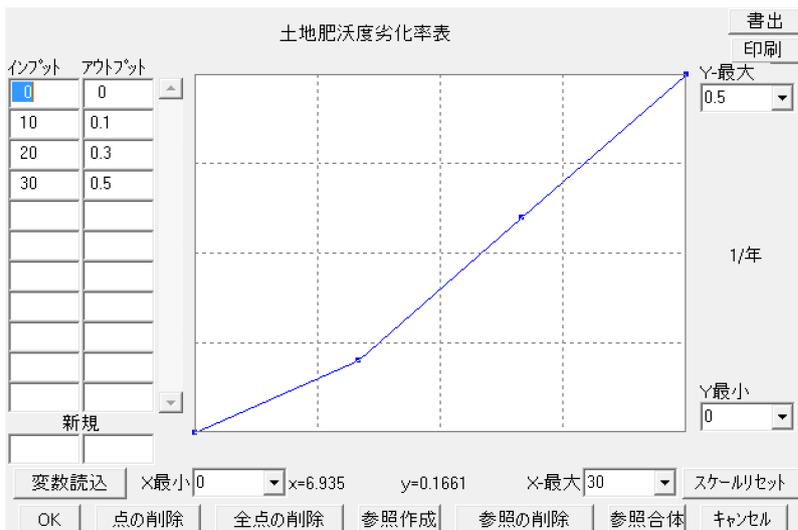
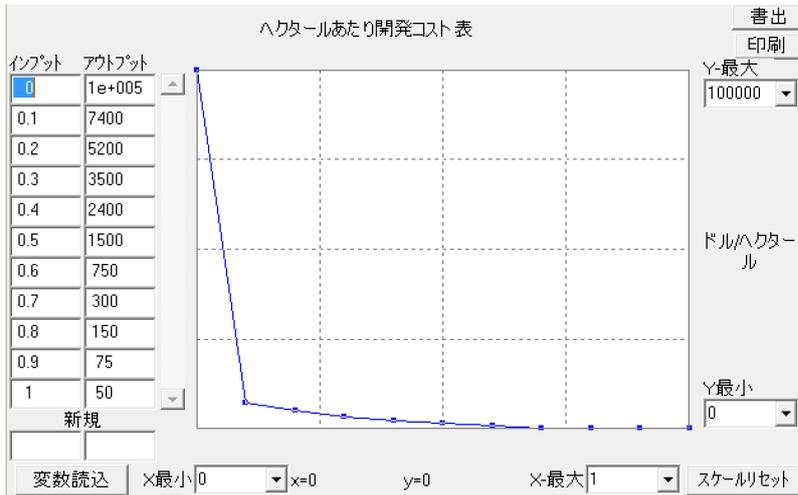
/ 土地転用時間

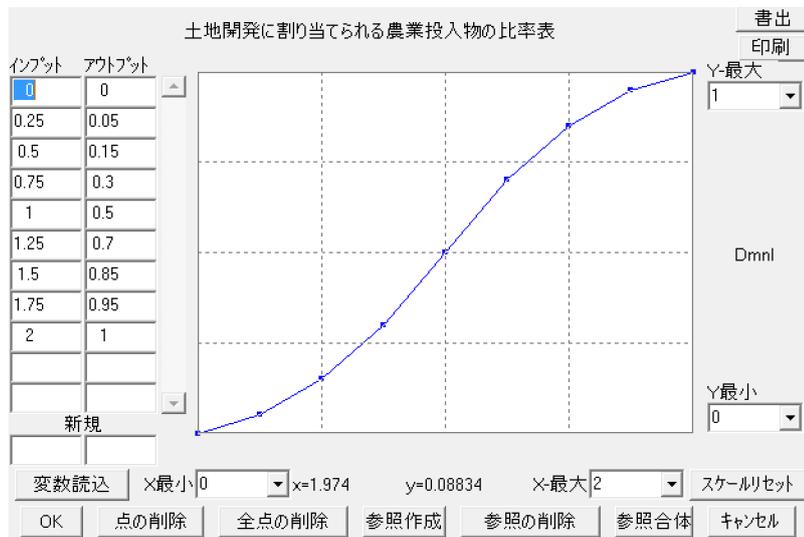
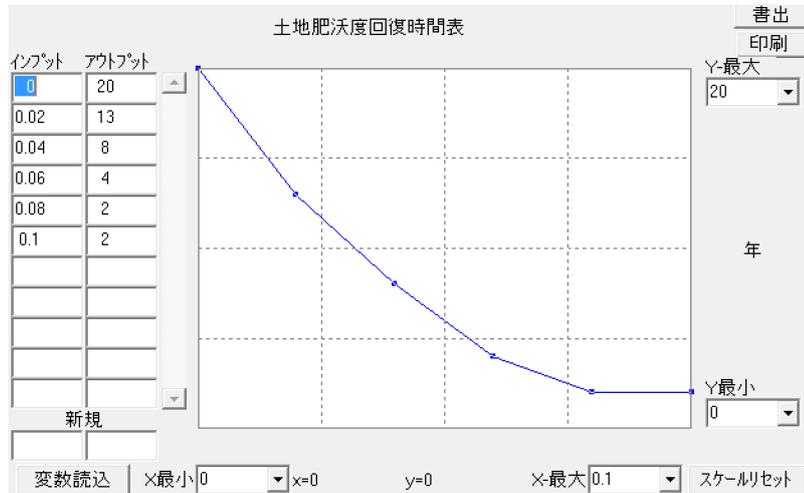
Units: ヘクタール/年

都市及び工業用地初期値=8.2e+06

Units: ヘクタール

このサブモデルには、5個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。





スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

サブモデル8：工業生産の式

工業生産= (((工業資本)) * (1 - 資源獲得に割り当てられる工業資本比率)) * (資本稼働率) / 工業資本産出係数
Units: ドル/年

工業資本= INTEG ((工業資本の投資 - 工業資本の減耗) , 工業資本初期値)
Units: ドル

工業資本の平均耐用年数= IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 , 工業資本の平均耐用年数 2 , 工業資本の平均耐用年数 1)
Units: 年

工業資本の平均耐用年数 1=14
Units: 年

工業資本の平均耐用年数 2=14
Units: 年

工業資本の投資= ((工業生産)) * (投資に割り当てられる工業生産物比率)
Units: ドル/年

工業資本の減耗=工業資本 / 工業資本の平均耐用年数
Units: ドル/年

工業資本初期値=2.1e+11
Units: ドル

工業資本産出係数=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 , 工業資本産出係数 2 , 工業資本産出係数 1)
Units: 年

工業資本産出係数 2= 資源保全技術起因の工業資本産出係数乗数 * 土地収穫量技術起因の工業資本産出係数乗数 * 汚染技術起因の工業資本産出係数乗数
Units: 年

工業資本産出係数 1=3
Units: 年

投資に割り当てられる工業生産物比率=(1 - 農業に割り当てられる工業生産物比率 - サービスに割り当てられる工業生産物比率 - 消費に割り当てられる 工業生産物比率)
Units: Dmnl

政策実施年=2002
Units: 年 [1980,2020,1]

消費された工業生産=工業生産 * 消費に割り当てられる工業生産物比率
Units: ドル/年

消費定数に割り当てられる 工業生産物の割合定数)=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 , "消費定数に割り当てられる工業生産物比率 2" , "消費定数に割り当てられる工業生産物比率 1")
Units: Dmnl

消費に割り当てられる工業生産物比率=IF THEN ELSE (Time >= 工業社会均衡年 , 消費変数に割り当てられる工業生産物比率 , 消費定数に割り当てられる 工業生産物の割合))
Units: Dmnl

消費変数に割り当てられる工業生産物比率=消費変数に割り当てられる工業生産物比率表 (1人あたりの工業生産 / 1人あたり最適工業生産)
Units: Dmnl

"消費定数に割り当てられる工業生産物比率 1 "=0.43
Units: Dmnl

"消費定数に割り当てられる工業生産物比率 2 "=0.43

Units: Dmnl

消費に割り当てられる工業生産物比率表 (

(0,0.3), (0.2,0.32), (0.4,0.34), (0.6,0.36), (0.8,0.38), (1,0.43)
 , (1.2,0.73), (1.4,0.77), (1.6,0.81), (1.8,0.82), (2,0.83))

Units: Dmnl

工業社会均衡年=2100

Units: 年

資本稼働率表 ([(0,0)-(11,1)], (0,1), (1,1), (3,0.9), (5,0.7), (7,0.3),
 (9,0.1), (11,0.1))

Units: Dmnl

1人あたりの工業生産=工業生産 / 世界の人口

Units: ドル/(人*年)

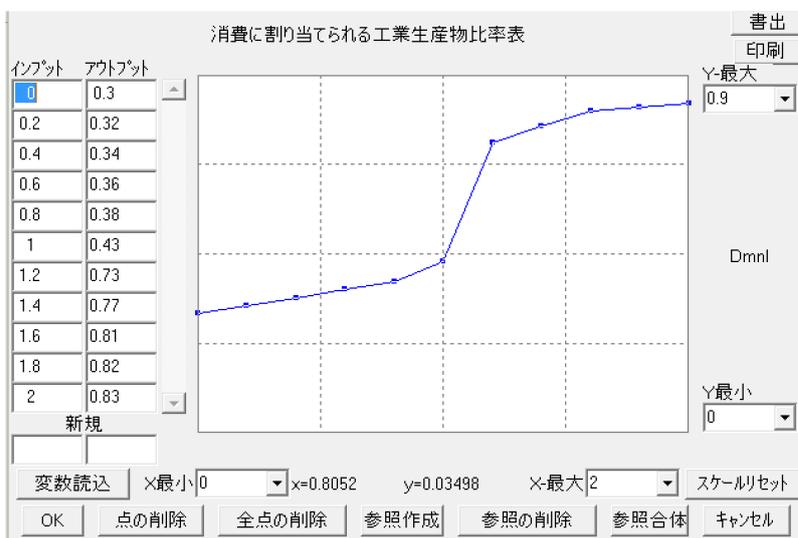
1人あたりの工業生産消費=消費された工業生産 / 世界の人口

Units: ドル/(人*年)

1人あたり最適工業生産= 400

Units: ドル/(人*年)

このサブモデルには、1個の表関数があります。以下はそのグラフ入力図です。これを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。



12.10 サブモデル 9：サービス生産

図 12.11 は、サービス生産のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

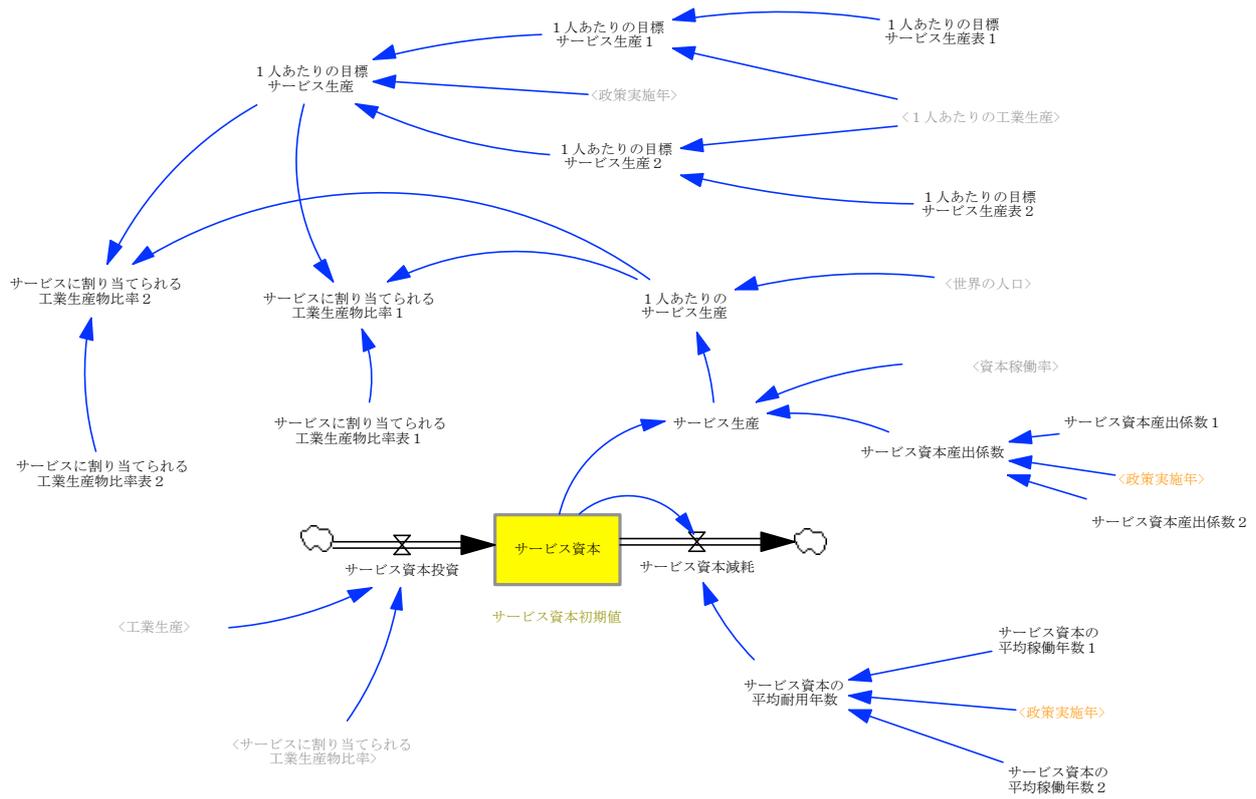


図 12.11 ワールド 3：サービス生産サブモデル

サブモデル9：サービス生産の式

サービスに割り当てられる工業生産物比率表1 ((0,0.3), (0.5,0.2), (1,0.1),
(1.5,0.05), (2,0))
Units: Dmnl

サービスに割り当てられる工業生産物比率表2 ((0,0.3), (0.5,0.2), (1,0.1),
(1.5,0.05), (2,0))
Units: Dmnl

サービスに割り当てられる工業生産物比率1 =
サービスに割り当てられる工業生産物比率表1 (1人あたりのサービス生産
/ 1人あたりの目標サービス生産)
Units: Dmnl

サービスに割り当てられる工業生産物比率2 =
サービスに割り当てられる工業生産物比率表2 (1人あたりのサービス生産
/ 1人あたりの目標サービス生産)
Units: Dmnl

サービス資本 = INTEG((サービス資本投資 - サービス資本減耗) , サービス資本初期値)
Units: ドル

サービス資本の平均稼働年数1=20
Units: 年

サービス資本の平均稼働年数2=20
Units: 年

サービス資本の平均耐用年数=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
サービス資本の平均稼働年数2 , サービス資本の平均稼働年数1)
Units: 年

サービス資本減耗 = サービス資本 / サービス資本の平均耐用年数
Units: ドル/年

サービス資本産出係数1= 1
Units: 年

サービス資本産出係数2= 1
Units: 年

サービスに割り当てられる工業生産物比率=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
サービスに割り当てられる工業生産物比率2 ,
サービスに割り当てられる工業生産物比率1)
Units: Dmnl

サービス生産 = ((サービス資本)) * (資本稼働率) / サービス資本産出係数
Units: ドル/年

サービス資本初期値=1.44e+11
Units: ドル

サービス資本投資 = ((工業生産)) * (サービスに割り当てられる工業生産物比率)
Units: ドル/年

サービス資本産出係数=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
サービス資本産出係数2 , サービス資本産出係数1)
Units: 年

政策実施年=2002
Units: 年 [1980,2020,1]

1人あたりのサービス生産=サービス生産 / 世界の人口
Units: ドル/(人*年)

1人あたりの目標サービス生産=IF THEN ELSE (Time >= 政策実施年 ,
1人あたりの目標サービス生産2 , 1人あたりの目標サービス生産1)

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して下さい。ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

Units: ドル/(人*年)

1人あたりの目標サービス生産表 1 (

(0,40), (200,300), (400,640), (600,1000), (800,1220), (1000,1450)
, (1200,1650), (1400,1800), (1600,2000))

Units: ドル/(人*年)

1人あたりの目標サービス生産表 2 (

(0,40), (200,300), (400,640), (600,1000), (800,1220), (1000,1450)
, (1200,1650), (1400,1800), (1600,2000))

Units: ドル/(人*年)

1人あたりの目標サービス生産 1 =

1人あたりの目標サービス生産表 1 (1人あたりの工業生産)

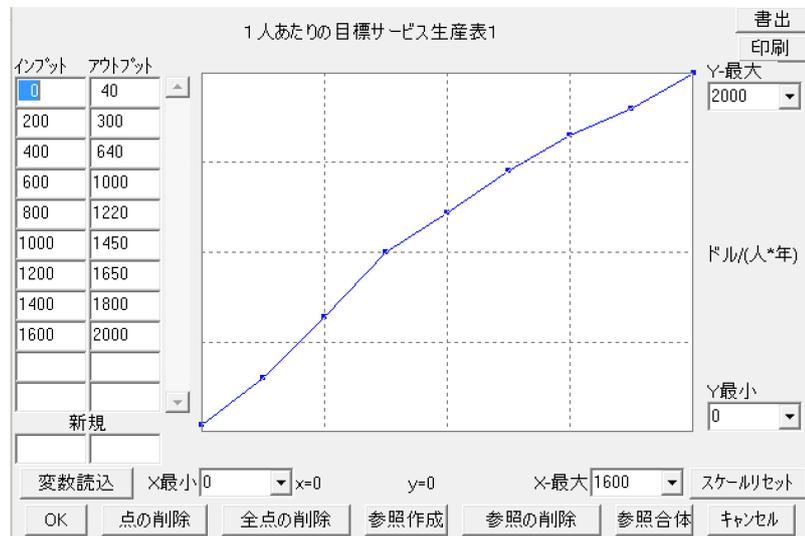
Units: ドル/(人*年)

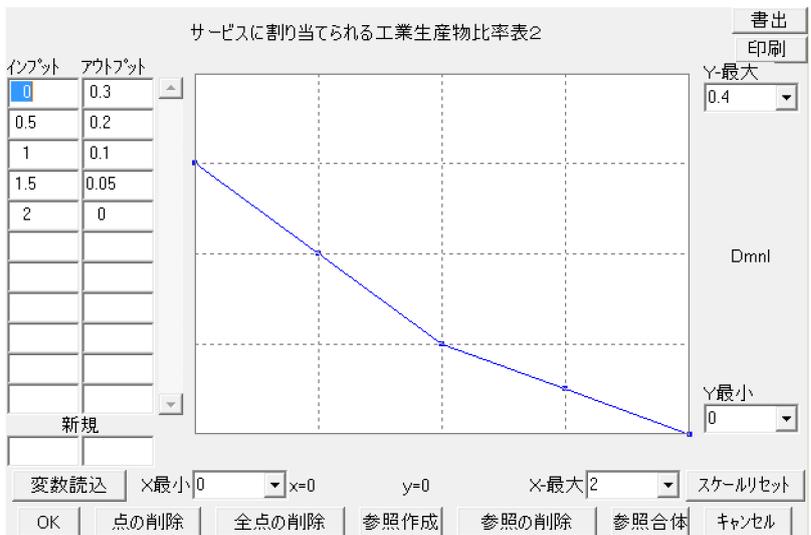
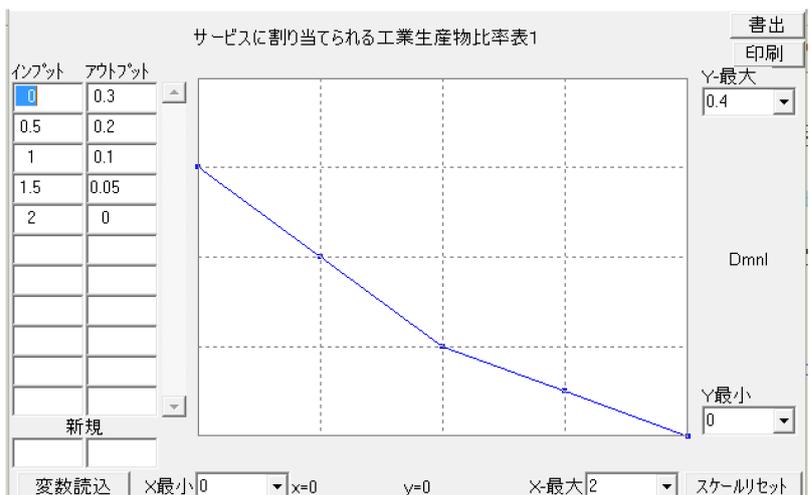
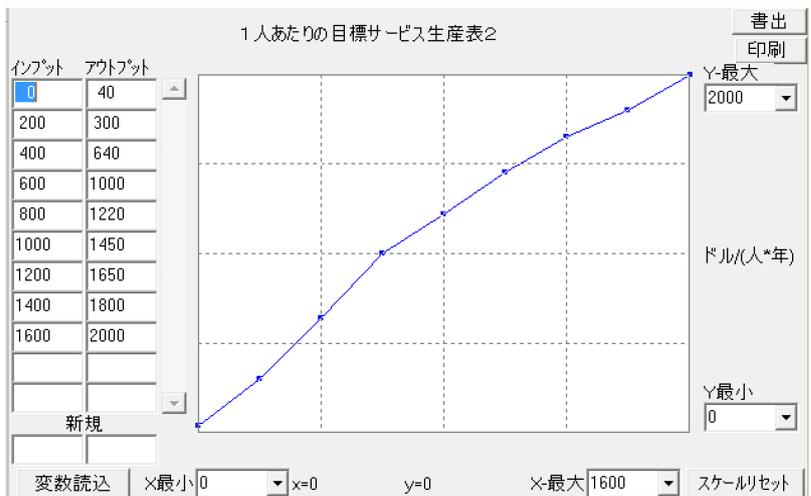
1人あたりの目標サービス生産 2 =

1人あたりの目標サービス生産表 2 (1人あたりの工業生産)

Units: ドル/(人*年)

このサブモデルには、4個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。





12.11 サブモデル 10：雇用数

図 12.12 は、雇用量のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

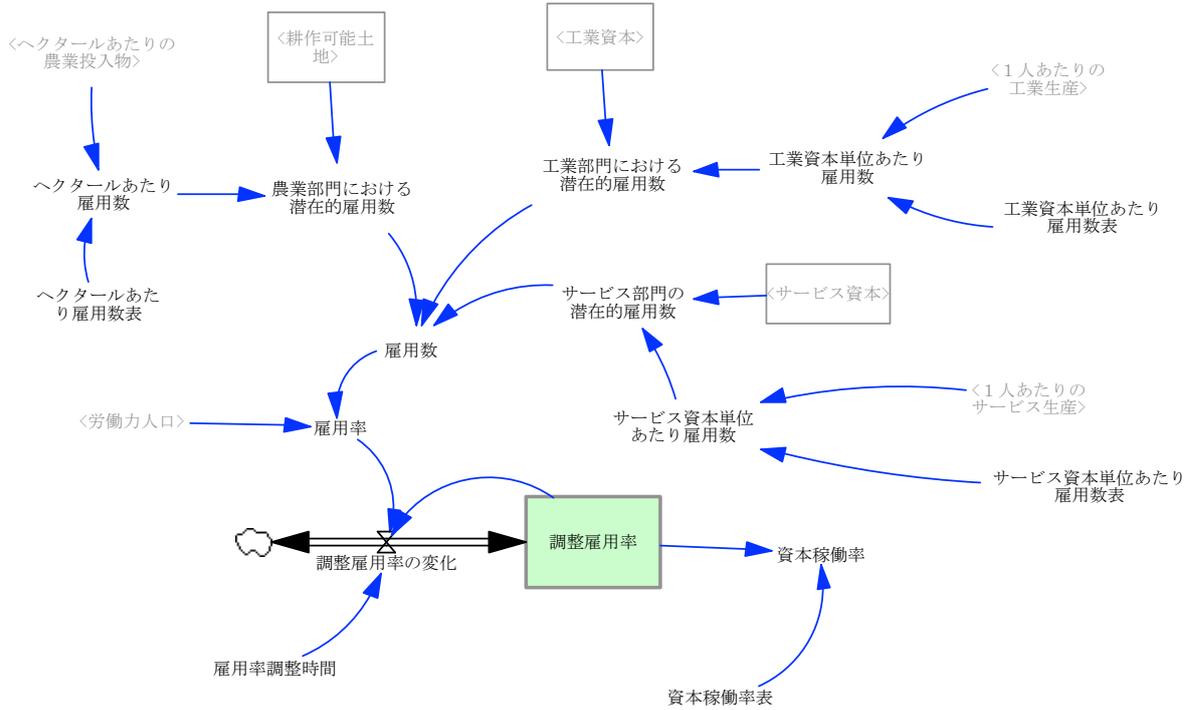


図 12.12 ワールド 3：雇用数サブモデル

サブモデル10：雇用数の式

サービス資本単位あたり雇用数=
 (サービス資本単位あたり雇用数表 (1人あたりのサービス生産)) * 0.001
 Units: 人/ドル

サービス資本単位あたり雇用数表 (
 (50,1.1), (200,0.6), (350,0.35), (500,0.2), (650,0.15), (800,0.15))
 Units: 人/ドル

サービス部門の潜在的雇用数=((サービス資本)) * (サービス資本単位あたり雇用数)
 Units: 人

ヘクタールあたり雇用数=
 ヘクタールあたり雇用数表 (ヘクタールあたりの農業投入物)
 Units: 人/ヘクタール

ヘクタールあたり雇用数表 (
 [(0,0)-(450,2)], (2,2), (6,0.5), (10,0.4), (14,0.3), (18,0.27), (22,0.24),
 (26,0.2), (30,0.2), (60,0.1), (450,0))
 Units: 人/ヘクタール

工業資本単位あたり雇用数=(工業資本単位あたり雇用数表 (1人あたりの工業生産))
 * 0.001
 Units: 人/ドル

工業資本単位あたり雇用数表 (
 [(0,0)-(800,0.6)], (10,0.5), (50,0.37), (200,0.18), (350,0.12),
 (500,0.09), (650,0.07), (800,0.06))
 Units: 人/ドル

工業部門における潜在的雇用数=工業資本 * 工業資本単位あたり雇用数
 Units: 人

調整雇用率= INTEG (調整雇用率の変化,1)
 Units: Dmnl

調整雇用率の変化=(雇用率-調整雇用率)/雇用率調整時間
 Units: 1/年

資本稼働率=資本稼働率表 (調整雇用率)
 Units: Dmnl

資本稼働率表 (
 [(0,0)-(11,1)], (0,1), (1,1), (3,0.9), (5,0.7), (7,0.3), (9,0.1), (11,0.1))
 Units: Dmnl

農業部門における潜在的雇用数=((ヘクタールあたり雇用数)) * (耕作可能土地)
 Units: 人

雇用数=工業部門における潜在的雇用数 + 農業部門における潜在的雇用数
 + サービス部門の潜在的雇用数
 Units: 人

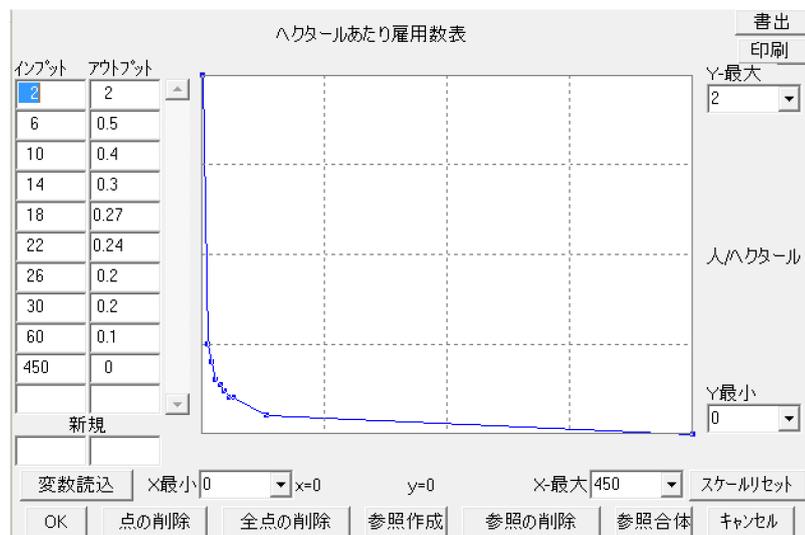
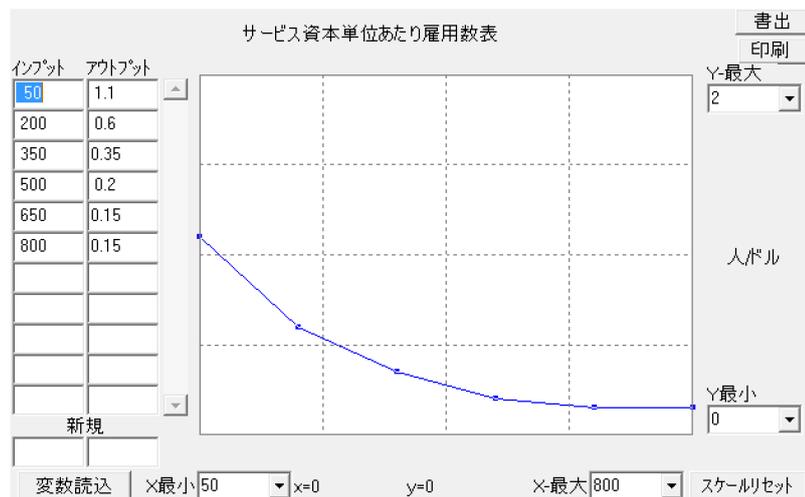
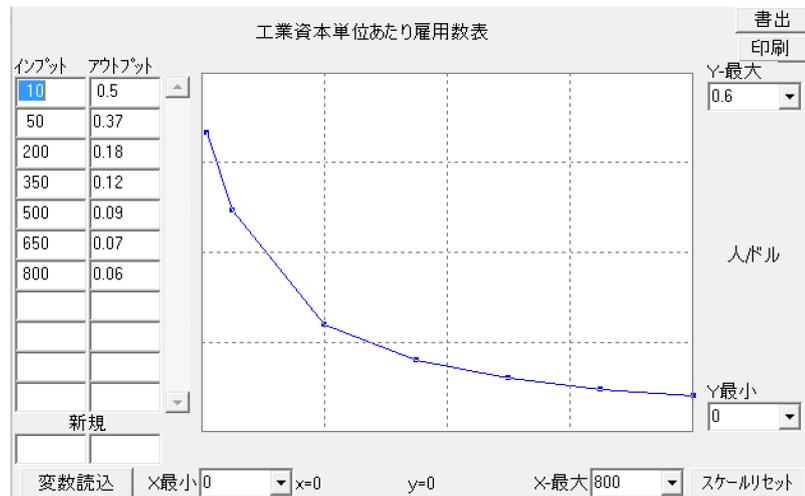
雇用率=雇用数 / 労働力人口
 Units: Dmnl

雇用率調整時間=2
 Units: 年

このサブモデルには、3個の表関数があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。



12.12 サブモデル 1 1：人間的豊かさ指標

図 12.13 は、人間的豊かさ指標のサブモデルです。この図を参照しながら、サブモデルを作成して下さい。

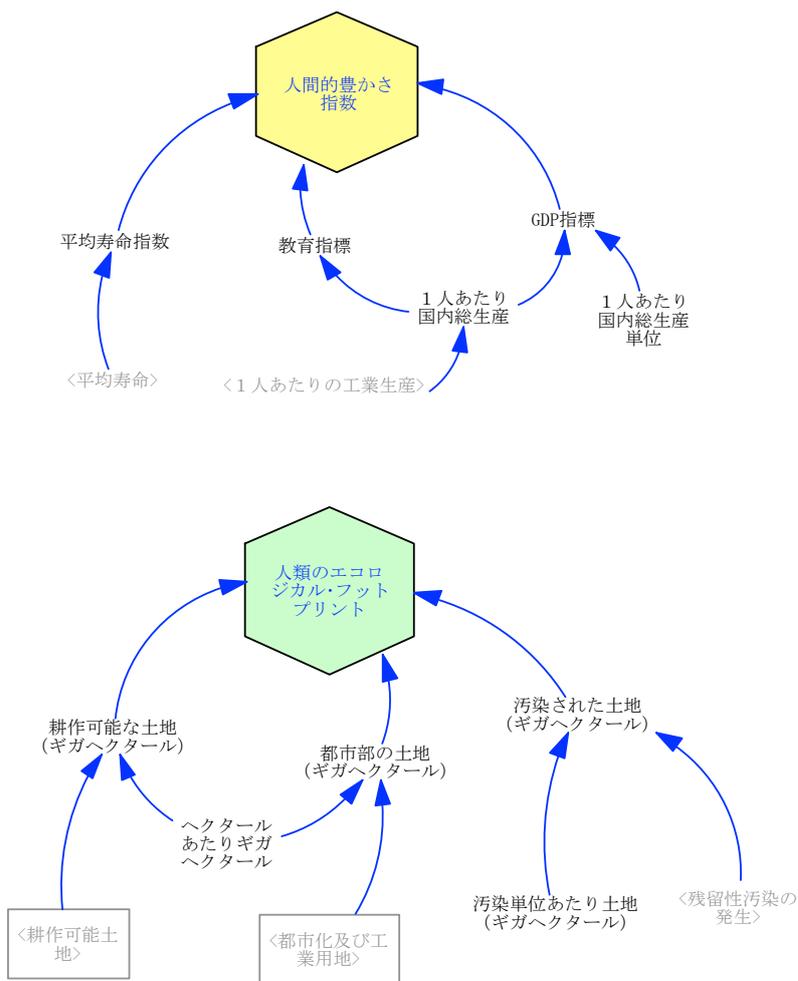


図 12.13 ワールド 3：人間的豊かさ指標サブモデル

スケッチツールの「方程式」をクリックすれば、未定義のモデル変数が黒色の背景色でハイライトされます。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。それらの変数の式をこのページのモデル式を参照して、入力して行って下さい。

ただし、角カッコで囲まれた代行変数は、そのオリジナル変数が使用されるサブモデルでまず定義して下さい。その後このページに戻ってきて、代行変数として入力して下さい。

WITH LOOKUP の表関数の入力方法は、Vensim ガイド第 8 章を参照ください。

サブモデル 1 1：人間的豊かさ指標の式

ヘクタールあたりギガヘクタール=1e-09

Units: ギガヘクタール/ヘクタール

GDP 指標=(LOG(1人あたり国内総生産/1人あたり国内総生産単位,10)-LOG(24,10))
/(LOG(9508,10)-LOG(24,10))

Units: Dmnl

人間的豊かさ指数=(教育指標+GDP 指標+平均寿命指数)/3

Units: Dmnl

人類のエコロジカル・フットプリント=(汚染された土地 (ギガヘクタール)
+ 耕作可能な土地 (ギガヘクタール) + 都市部の土地 (ギガヘクタール))/1.92

Units: ギガヘクタール

平均寿命指数= WITH LOOKUP (平均寿命,

([(25,0)-(85,1)],(25,0),(35,0.16),(45,0.33),(55,0.5),(65,0.67),
(75,0.84),(85,1))

Units: Dmnl

教育指標= WITH LOOKUP (1人あたり国内総生産,

([(0,0)-(8000,1)],(0,0),(1000,0.81),(2000,0.88),(3000,0.92),(4000,0.95),
(5000,0.98),(6000,0.99),(7000,1))

Units: Dmnl

汚染された土地 (ギガヘクタール) =

残留性汚染の発生 * 汚染単位あたり土地 (ギガヘクタール)

Units: ギガヘクタール

汚染単位あたり土地 (ギガヘクタール) = 4e-09

Units: ギガヘクタール/(汚染単位/年)

耕作可能な土地 (ギガヘクタール) =耕作可能土地 * ヘクタールあたりギガヘクタール

Units: ギガヘクタール

都市部の土地 (ギガヘクタール) =都市化及び工業用地 * ヘクタールあたりギガヘクタール

Units: ギガヘクタール

1人あたり国内総生産= WITH LOOKUP (1人あたりの工業生産,

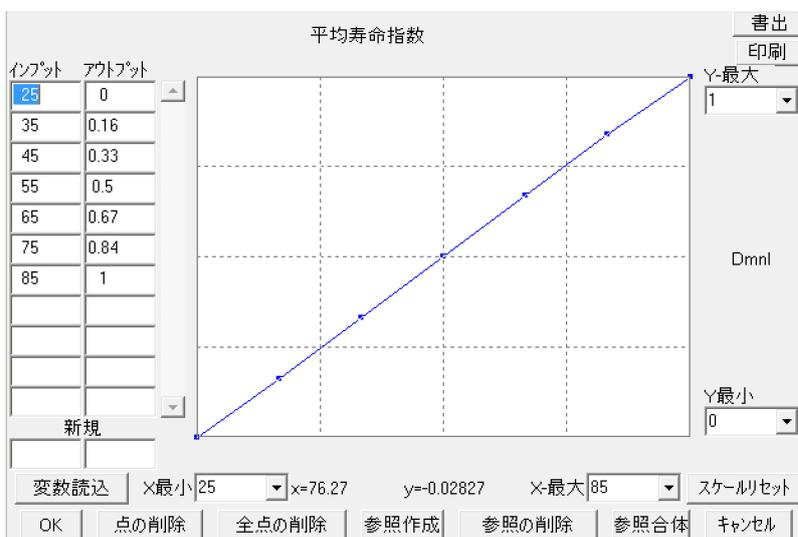
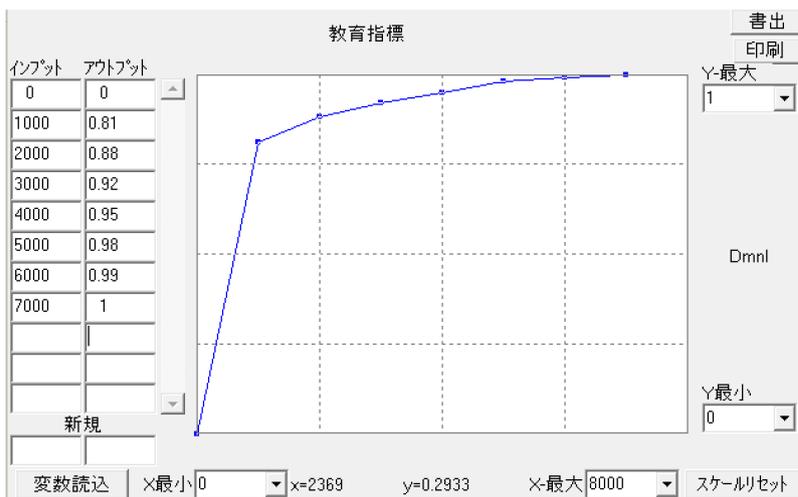
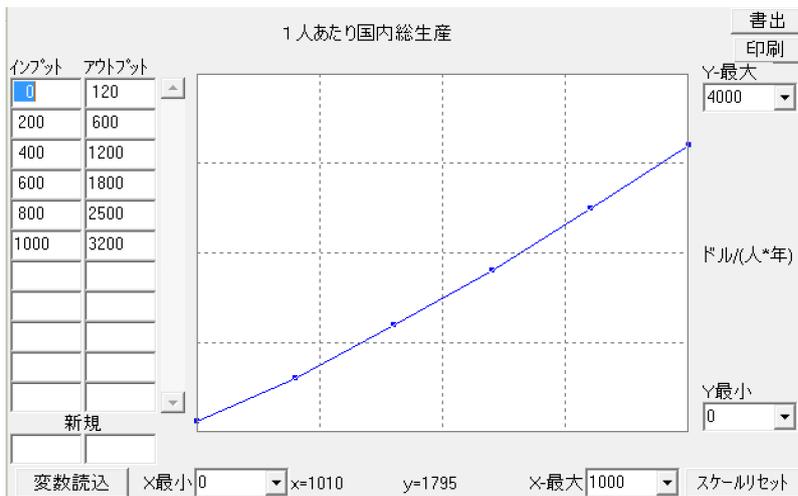
([(0,0)-(1000,4000)],(0,120),(200,600),(400,1200),(600,1800),
(800,2500),(1000,3200))

Units: ドル/人/年

1人あたり国内総生産単位=1

Units: ドル/人/年

このサブモデルには、3個の表関数 (WITH LOOKUP) があります。以下はそれらのグラフ入力図です。これらを参照しながら、表関数を作成して行って下さい。



第 13 章

ワールド 3 モデルのシナリオ分析

13.1 シナリオ 1：参照シミュレーション

本章では、ワールド 3 モデルを用いて、Limits to Growth（成長の限界 人類の選択）[?, 2005] で説明されている 10 のシナリオを作成してゆきます。読者の混乱を回避するために、以下のシナリオの説明や図示はできるだけ同書日本語訳に即して進めてゆきますが、変数名等一部変更されていますので、日本語訳を参照しながら読み進める場合には、ご注意ください。本章での引用は全て成長の限界（2005 年）日本語訳からのものとします。

それではシナリオ 1 から見てゆきましょう。シナリオ 1 のみ、成長の限界から引用します。

世界は、20 世紀のほぼ全期間に追求されてきた政策からあまり大きく変更せず、これまでと同じように進んでいる。人口と工業生産は成長を続けるが、再生不可能な資源がしだいにアクセスしにくくなることで、成長が止まる。資源のフローを維持するために必要な投資が加速度的に増え、最終的に経済の他部門への投資資金が欠乏することから、工業製品とサービスの生産が減り始める。それとともに、食糧や保険サービスも減退し、期待寿命が低下し、平均死亡率が上昇する。（214 ページ）

図 13.1 は、シナリオ 1 で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさ とエコロジカル・フットプリントを図示したものです。成長経路は全て持続不可能な状態になっているのが観察されます。

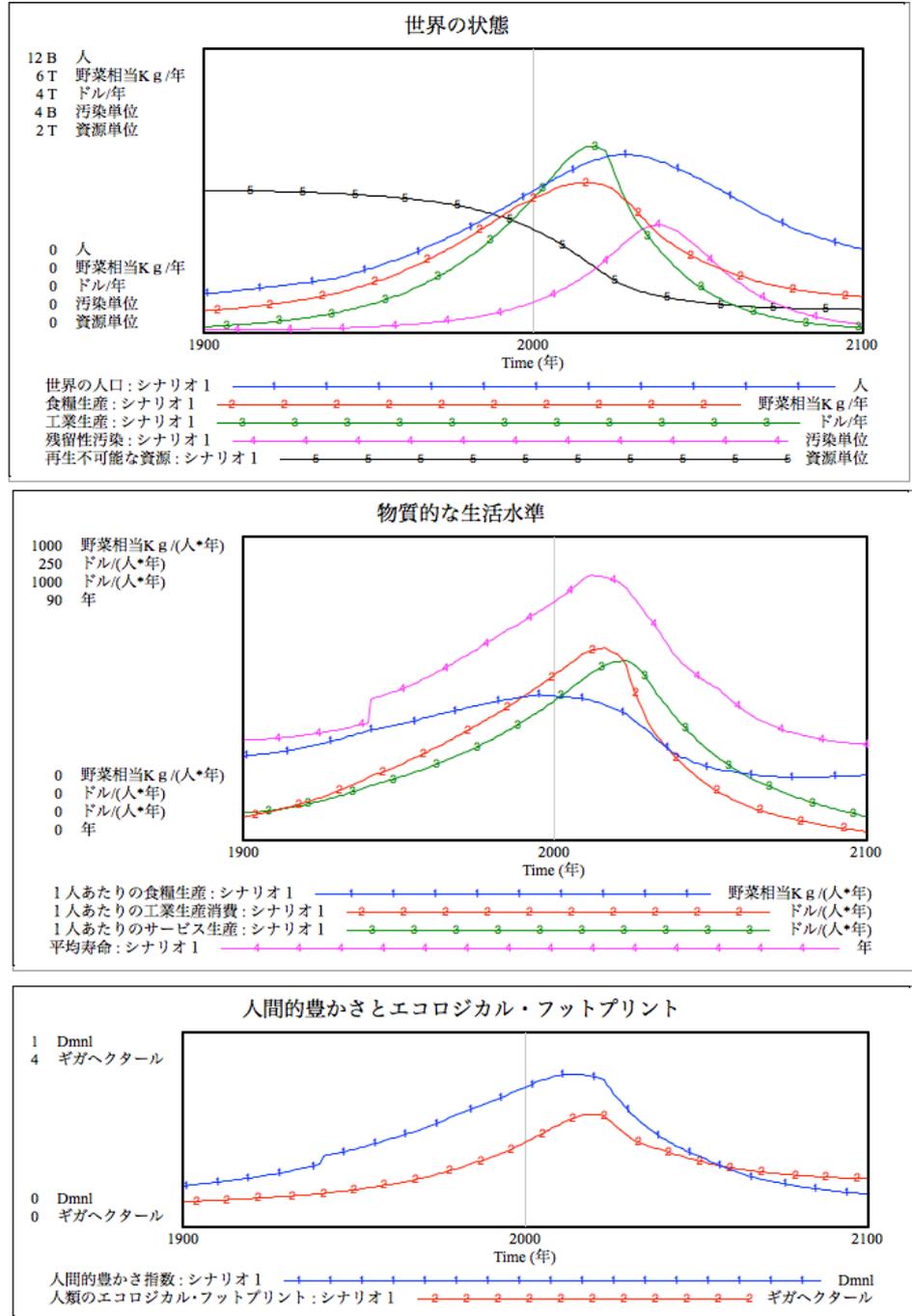


図 13.1 シナリオ 1 : 参照シミュレーション

13.2 シナリオ2：再生不可能な資源が2倍あった場合

持続可能な経路を達成するためにまず最初に考えられるのは、石油やレアメタル等の再生不可能資源がより豊富にあれば、持続可能になるのではないかという予想です。そこで、シナリオ2では、この予想に基づき再生不可能な資源初期値を以下のように2倍にしてみます。

再生不可能資源初期値：1兆資源単位 ⇒ 2兆資源単位

その結果、シナリオ1で観察された、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさとエコロジカル・フットプリントはどのように変更されるでしょうか。システムを構成している諸変数は相互依存しているので、たとえ1つのパラメータが変化した場合でも、システムのほぼすべての変数に影響を及ぼします。そこでそれら変数の変化を網羅的にすべて観察するのが理想的ですが、変数の数が多くなるとそれらすべての変化を大脳がとらえることは不可能です。そこで、シナリオ1で観察した11個の変数のうち、次の5個を選び、それらの変数がシナリオ1に比べてどのように変化したのかを観察することにしてゆきます。

**世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、
人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリント**

図 13.2 は、これら6変数がシナリオ2でどのように変化したかをシナリオ1と比較した図です。再生不可能資源が倍増すれば、工業生産は増大し、人間的豊かさも増大します。その反面、残留性汚染レベルが急増し、その結果、エコロジカル・フットプリントも急増し、環境への負荷が増大するのが観察されます。

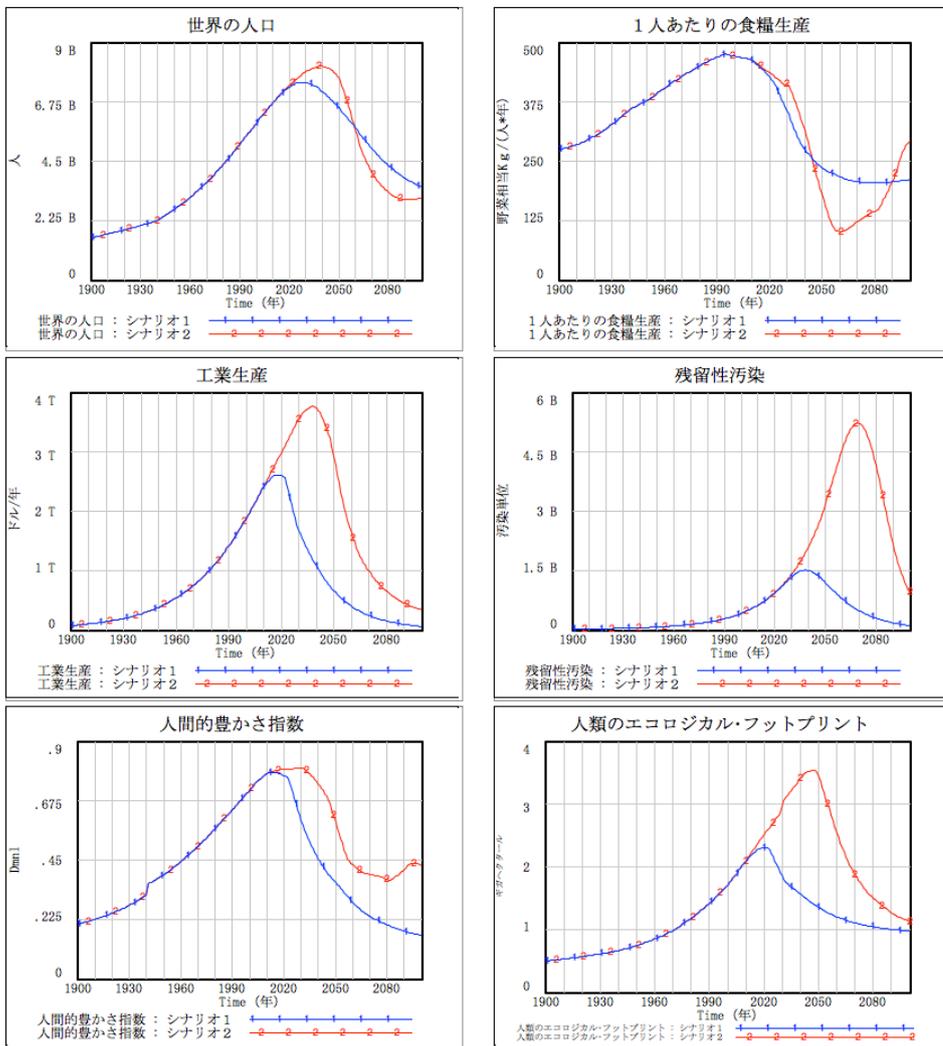
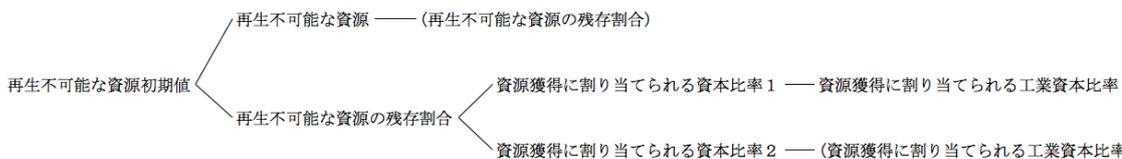
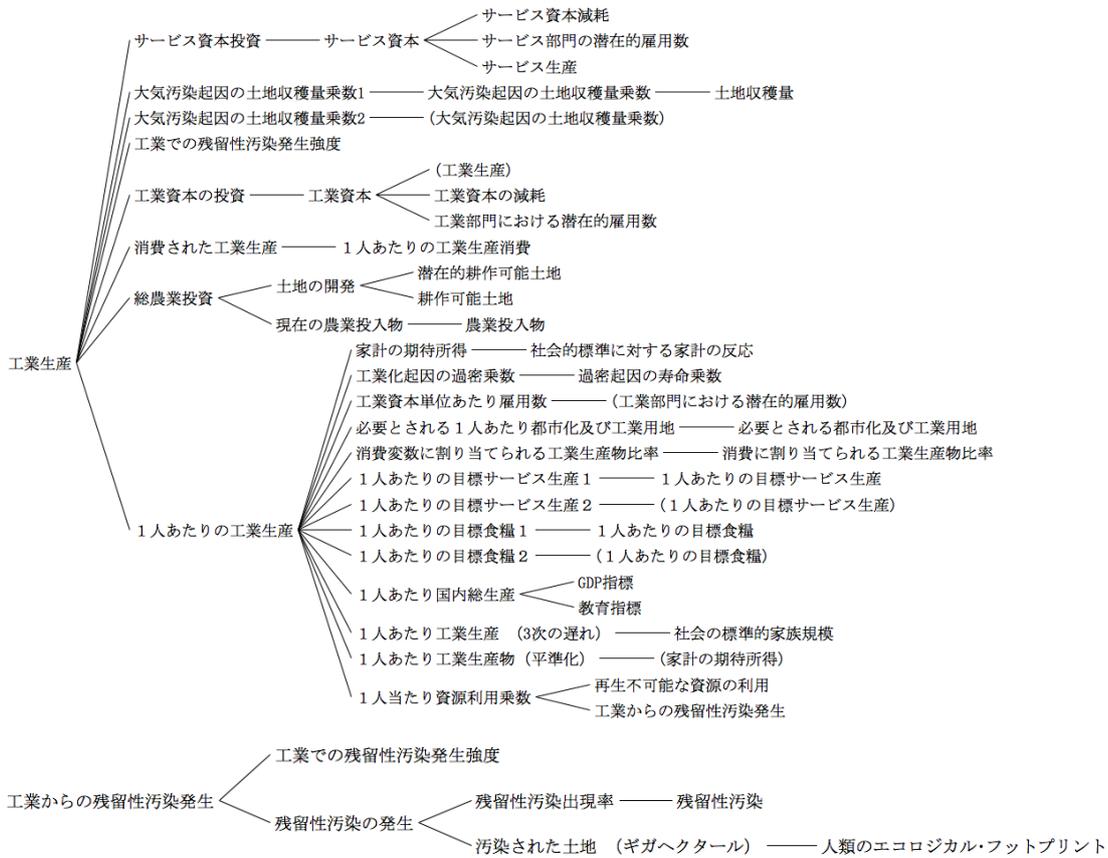


図 13.2 シナリオ 1 からシナリオ 2 へ

分析ツールの波及ツリーを利用します。Vensim DSS や Professional では、右ボタンクリックで、波及階層を 9 層まで選択できます。

そこで一つの思考実験として、再生不可能資源初期値 → 人類のエコロジカル・フットプリントに至る経路を、線形思考的に求めてみましょう。線形思考は、システム思考ではできるだけ回避すべきですが、システム境界のパラメータ（ここでは再生不可能資源初期値）が変化した場合、それがシステム全体のパフォーマンス評価（ここでは人類のエコロジカル・フットプリント）にどのような経路をたどって影響を与えるのかを考える際には、一つの可能性として有効となる場合があります。以下の波及ツリーを用いてこの経路を探索してゆきます。





シミュレーション課題

この波及ツリーをたどって、1つずつ変数をグラフで図示しながら、その変化の様子を分析しなさい。

図 13.3 は、シナリオ 2 で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさとエコロジカル・フットプリントを図示したものです。再生不可能資源が倍増すれば、その分工業生産は増大するが、それと比例するように残留性汚染レベルが急増し、グラフの天井を突き抜けるようになります。

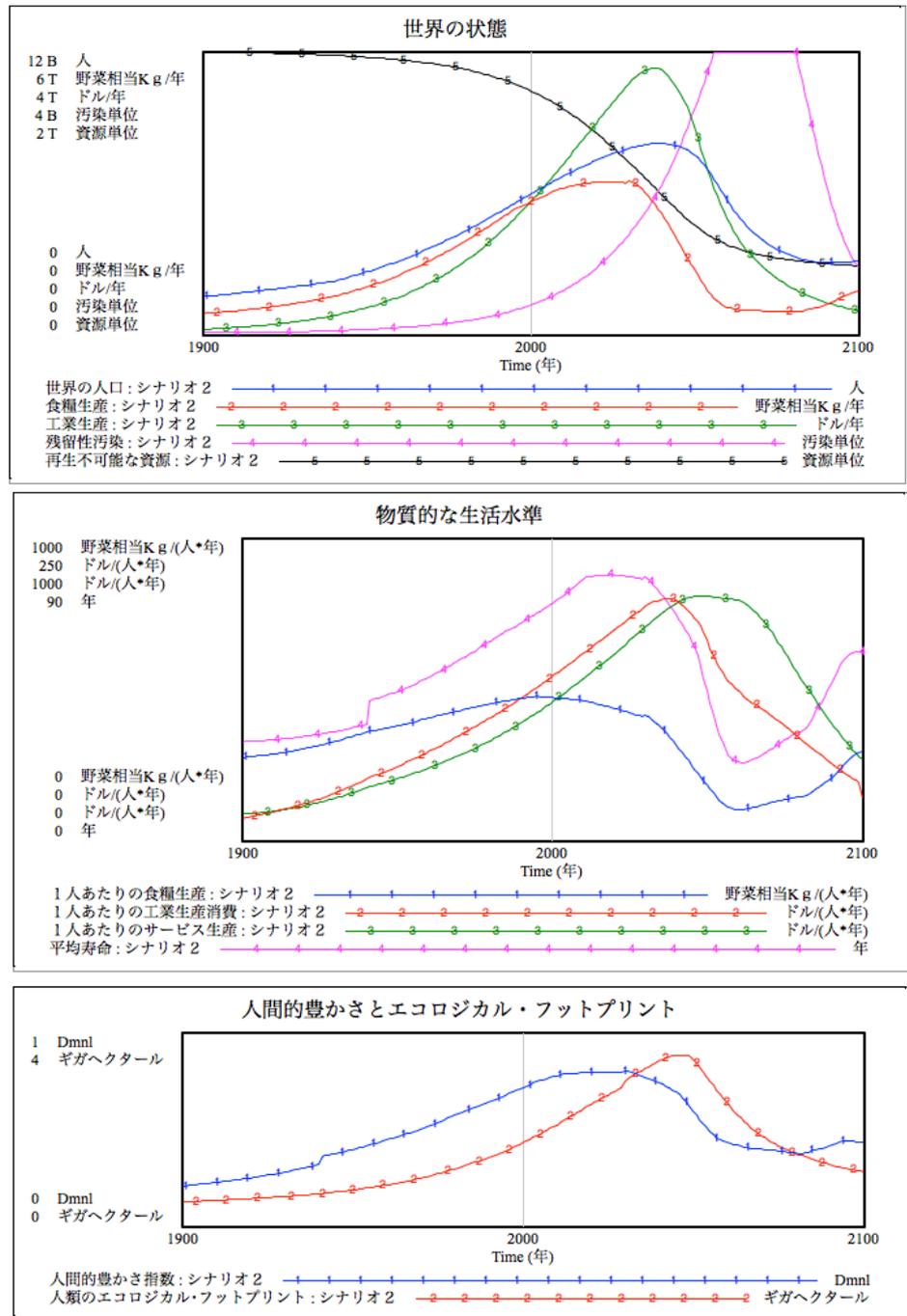


図 13.3 シナリオ 2 : 再生不可能な資源が 2 倍あった場合

13.3 シナリオ3：シナリオ2 + 汚染除去技術

シナリオ3では、シナリオ2で増大した残留性汚染を抑え込むために、汚染除去技術を導入します。すなわち、生産単位あたりの汚染を政策実施年の2002年から年4%まで削減できると仮定します。そのために、残留性汚染技術の変化乗数表を以下のように変更します。

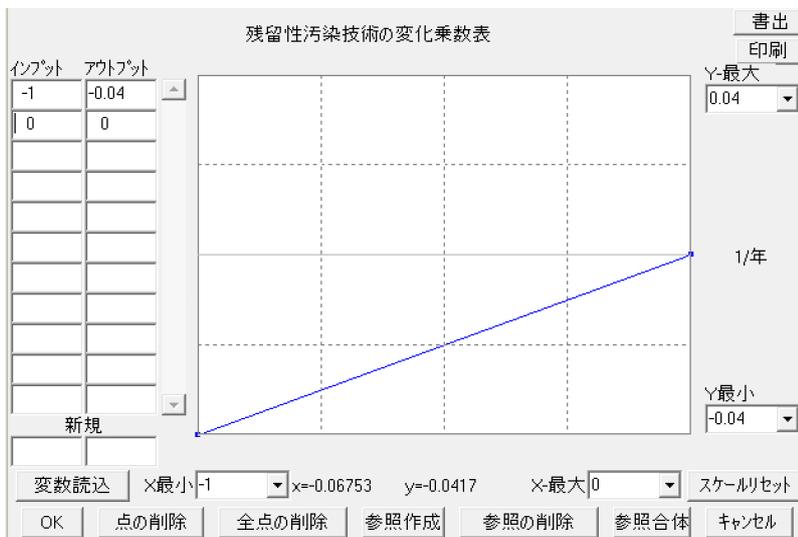


図 13.4 シナリオ3：残留性汚染技術の変化乗数表

図 13.5 は、世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの6変数がシナリオ3でどのように変化したかをシナリオ2と比較した図です。残留性汚染レベルが減少し、その結果、エコロジカル・フットプリントも減少し、環境への負荷が低減するのかが観察されます。

シミュレーション課題

残留性汚染技術の変化乗数表から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いて探求し、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図 13.6 は、このシナリオ3で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさ、エコロジカル・フットプリントを图示したものです。残留性汚染は明らかに削減されましたが、持続不可能な経路はそのままです。

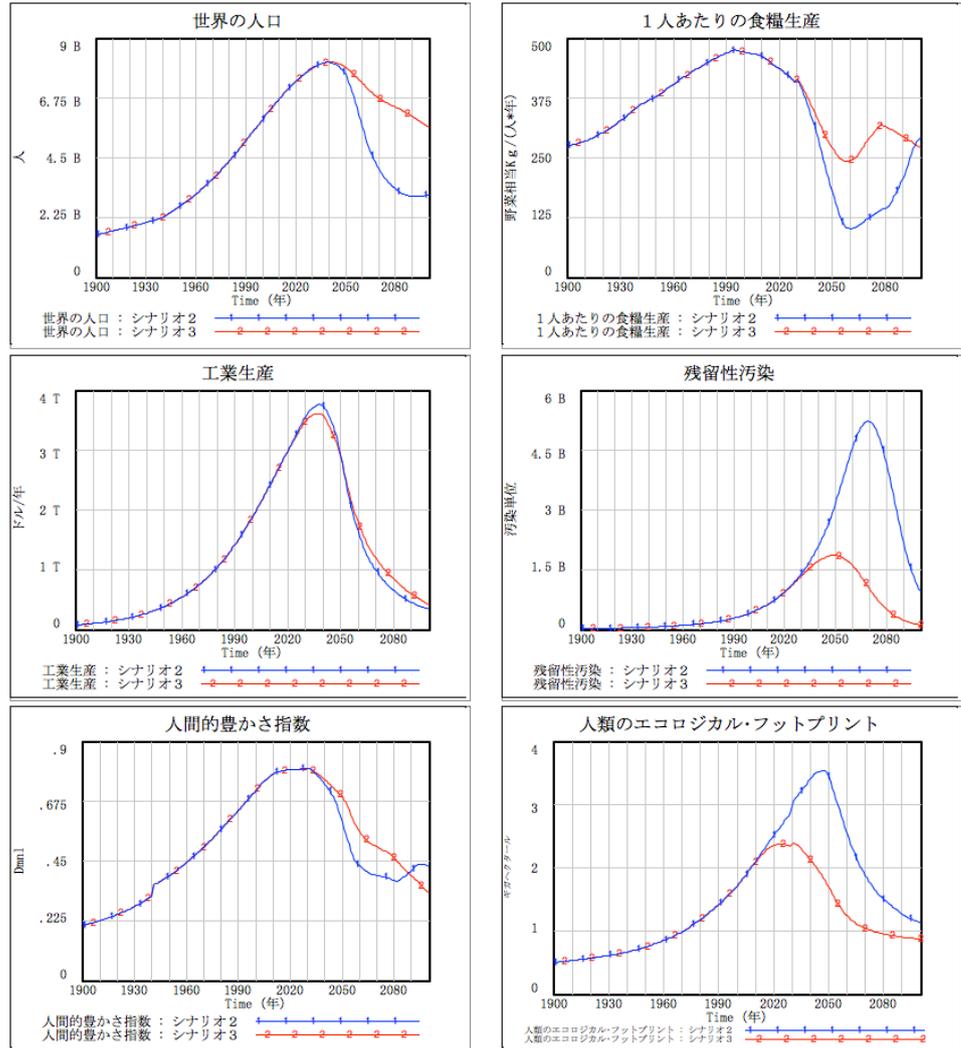


図 13.5 シナリオ 2 からシナリオ 3 へ

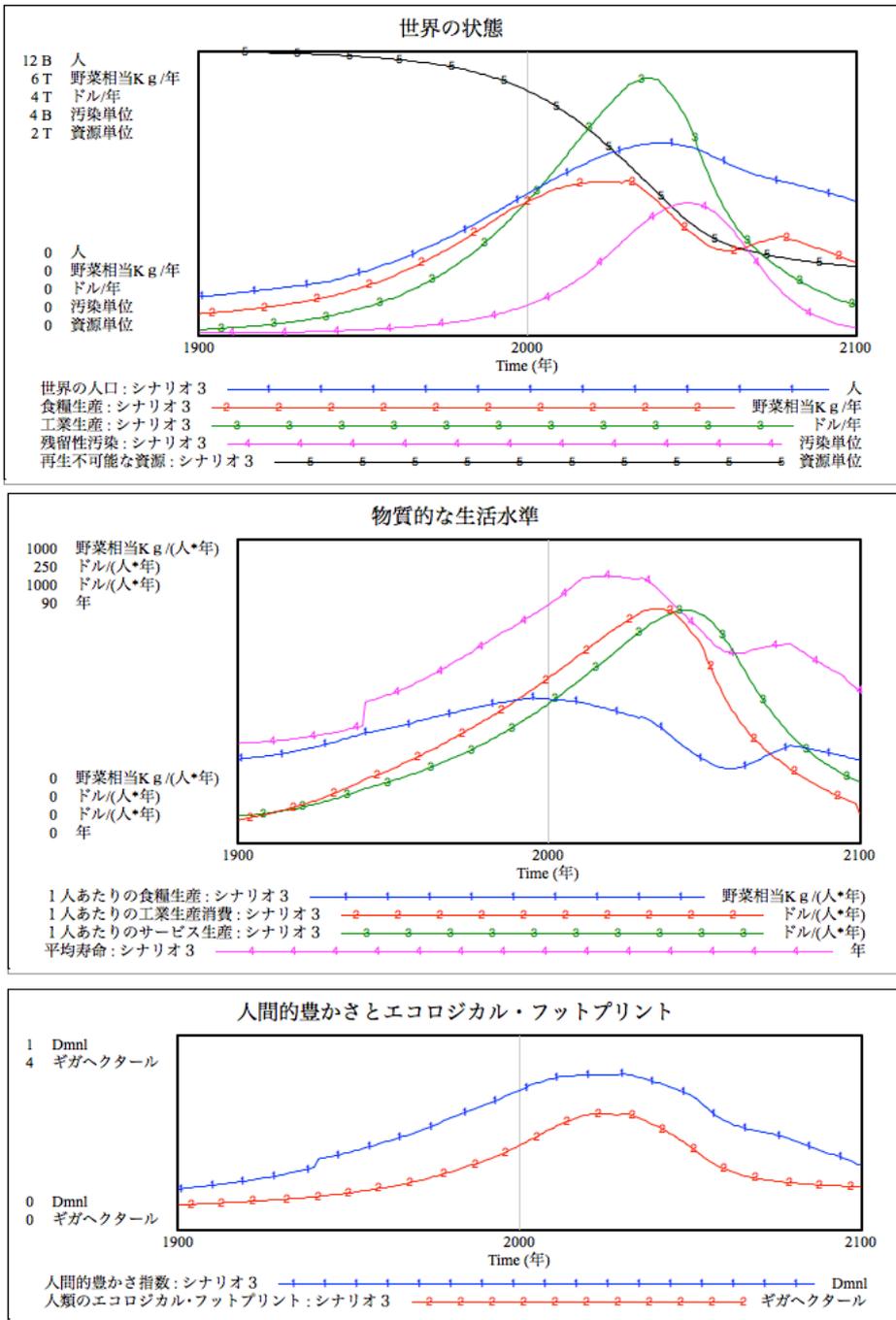


図 13.6 シナリオ3：シナリオ2+汚染除去技術がある場合

13.4 シナリオ 4：シナリオ 3 + 土地の収穫率改善

シナリオ 4では、汚染除去技術に加えて、土地面積当たりの収穫率を大きく改善する一連の技術を導入します。すなわち、収穫率を政策実施年の 2002 年から年 4%まで増大できると仮定します。そのために、土地収穫量技術の変化乗数表を以下のように変更します。

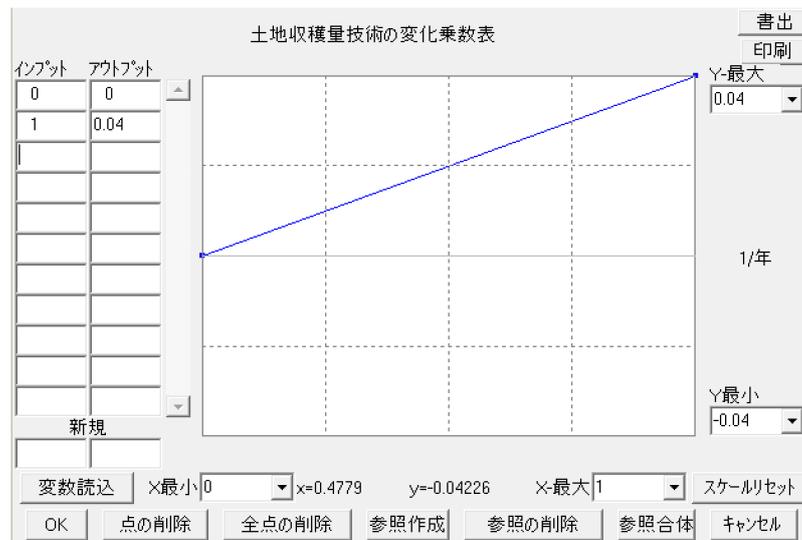


図 13.7 シナリオ 4：土地収穫量技術の変化乗数表

図 13.8 は、世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの 6 変数がシナリオ 4でどのように変化したかをシナリオ 3と比較した図です。1人あたりの食糧生産が改善され、また、エコロジカル・フットプリントも減少し、環境への負荷が低減するのが観察されます。

シミュレーション課題

土地収穫量技術の変化乗数表から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いて探求し、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図 13.9 は、このシナリオ 4で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさ、エコロジカル・フットプリントを図示したものです。持続不可能な経路はそのままです。

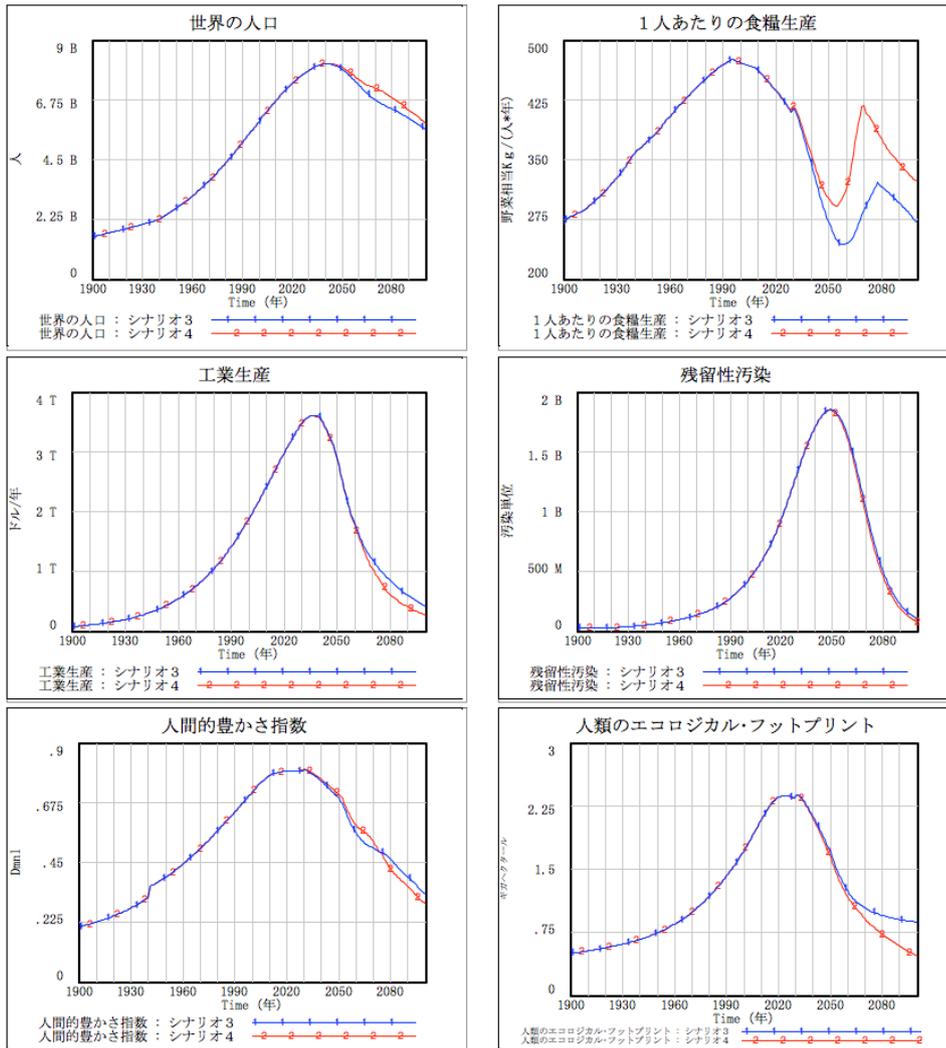


図 13.8 シナリオ3からシナリオ4へ

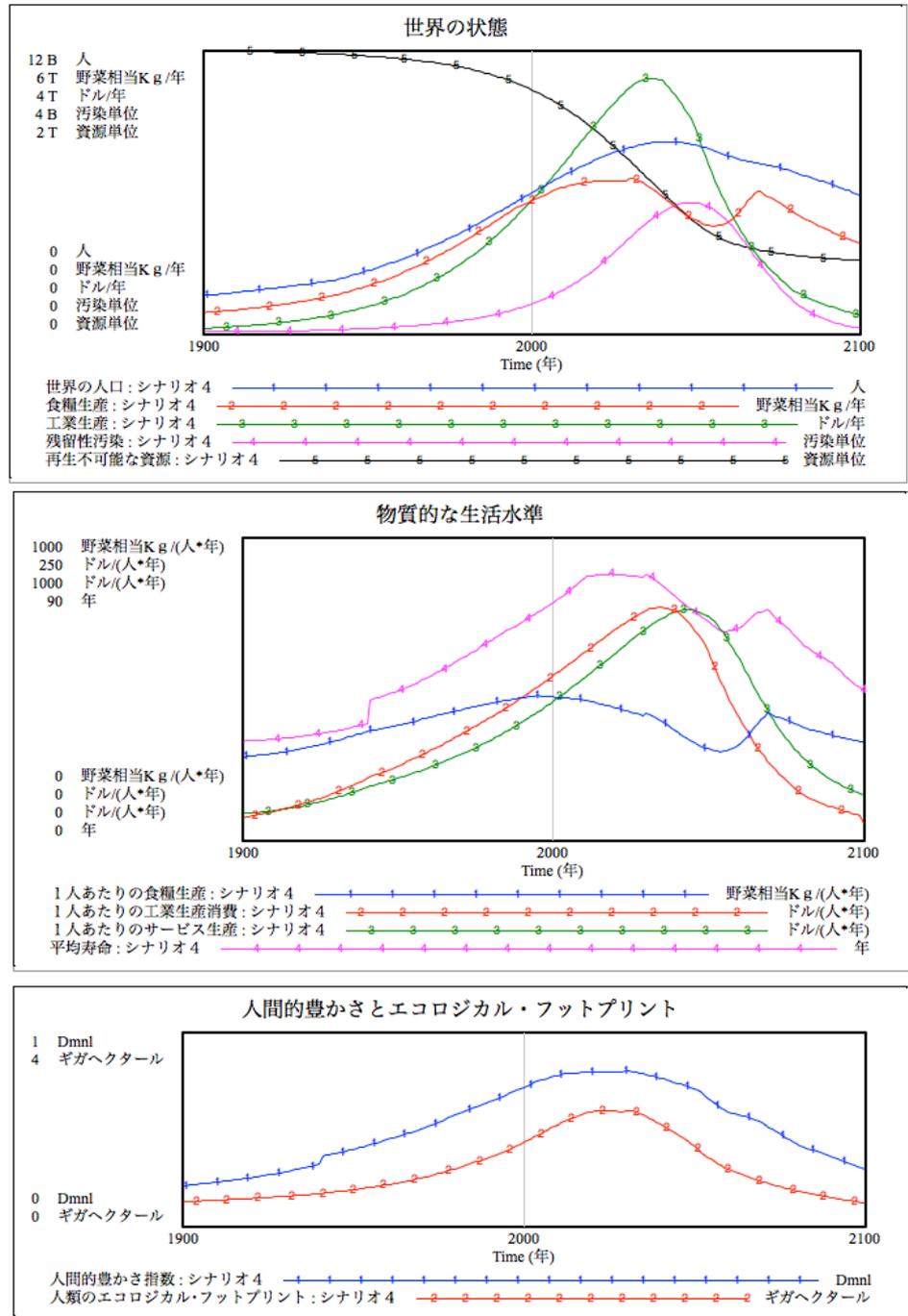


図 13.9 シナリオ 4：シナリオ 3 + 土地の収穫率改善の技術がある場合

13.5 シナリオ5：シナリオ4＋土地侵食軽減の技術

土地侵食を軽減するために、土地寿命政策の実施年を以下のように早めると想定します。

土地寿命政策実施年：2100年 ⇒ 2002年

図 13.10 は、世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの6変数がシナリオ5でどのように変化したかをシナリオ4と比較した図です。1人あたりの食糧生産が比較的改善され、また、エコロジカル・フットプリントも減少し、環境への負荷が低減するのが観察されます。

シミュレーション課題

土地寿命政策実施年から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いてそれぞれ探求し、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図 13.11 は、このシナリオ5で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさ、エコロジカル・フットプリントを図示したものです。持続不可能な経路はそのままです。

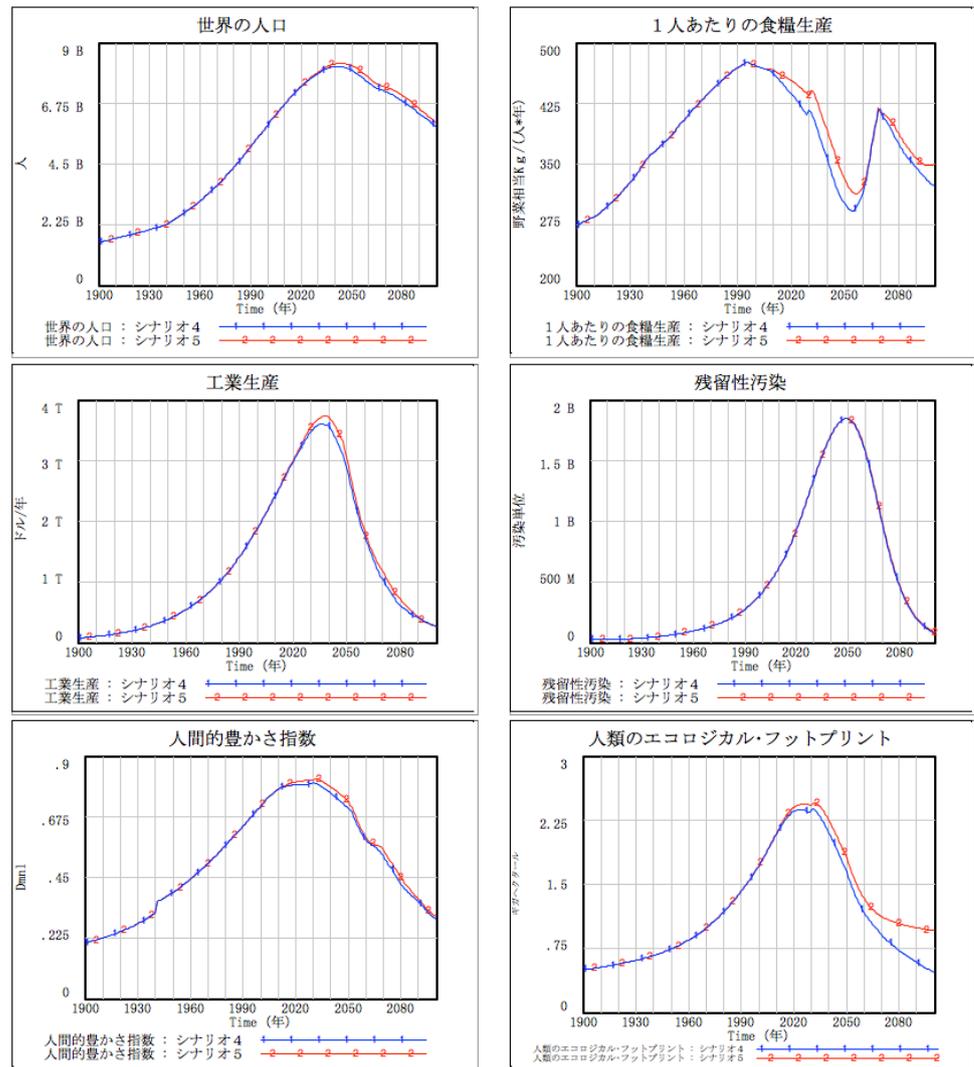


図 13.10 シナリオ 4 からシナリオ 5 へ

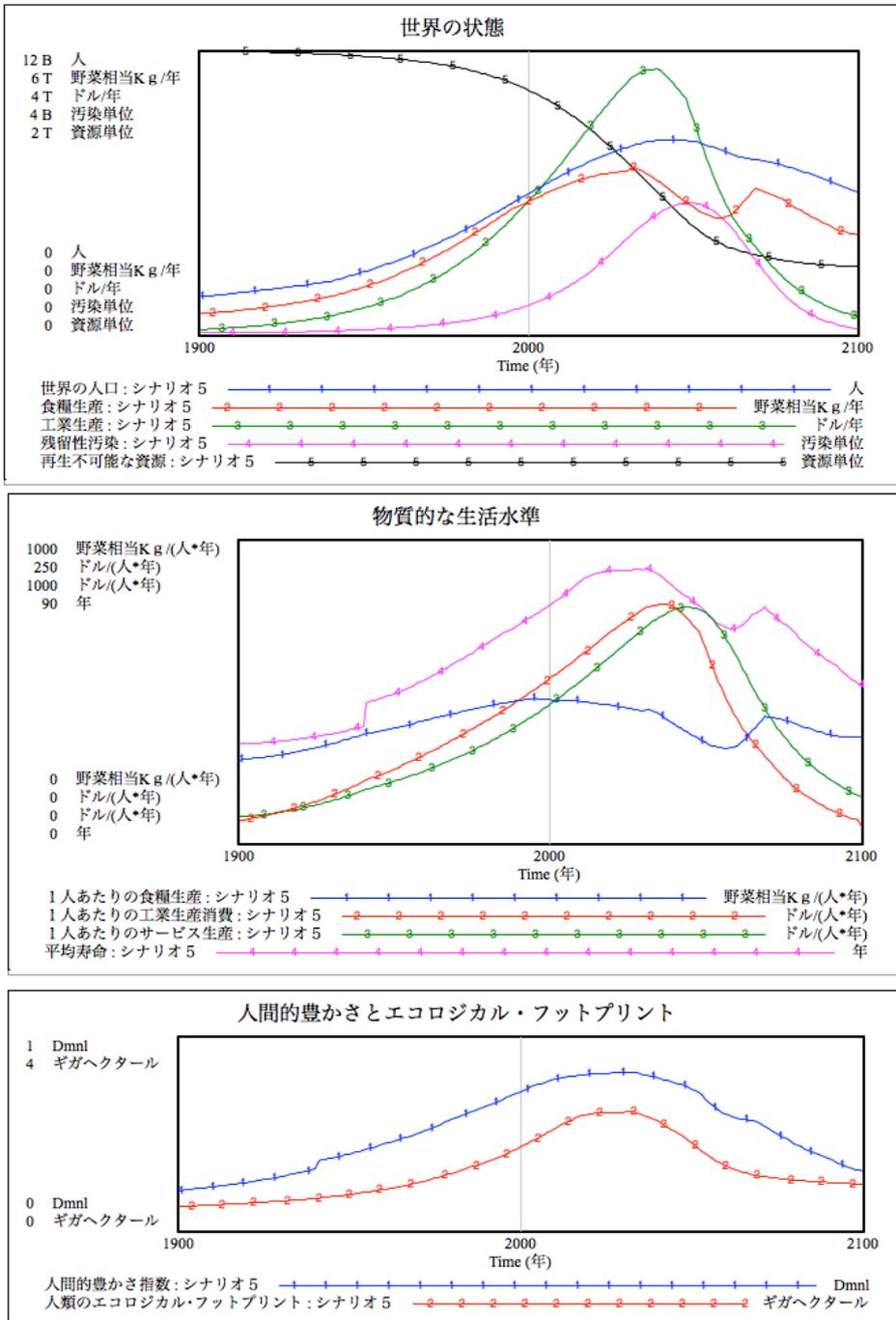


図 13.11 シナリオ5：シナリオ4+土地侵食軽減の技術がある場合

13.6 シナリオ 6：シナリオ 5 + 資源の効率改善の技術

シナリオ 6 では、シナリオ 5 に加えて資源の効率改善の技術を導入します。すなわち、資源保全を政策実施年の 2002 年から年 4% まで改善できるようにします。そのために資源保全技術の変化乗数表を、以下のように変更します。

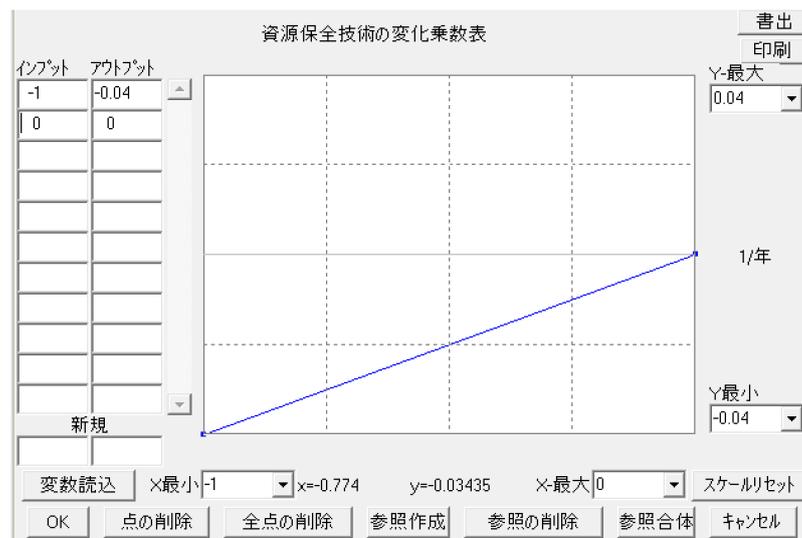


図 13.12 シナリオ 6：資源保全技術の変化乗数表

図 13.13 は、世界の人口、1 人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの 6 変数がシナリオ 6 でどのように変化したかをシナリオ 5 と比較した図です。世界の人口が安定し、工業生産や 1 人あたりの食糧生産が比較的改善され、それに伴って、人間的豊かさの増大するのが観察されます。

シミュレーション課題

資源保全技術の変化乗数表から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いてそれぞれ探求し、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図 13.14 は、このシナリオ 6 で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさやエコロジカル・フットプリントを図示したものです。このシナリオ 6 は、考える技術的要因を全て導入したのですが、持続不可能な経路はそのままです。

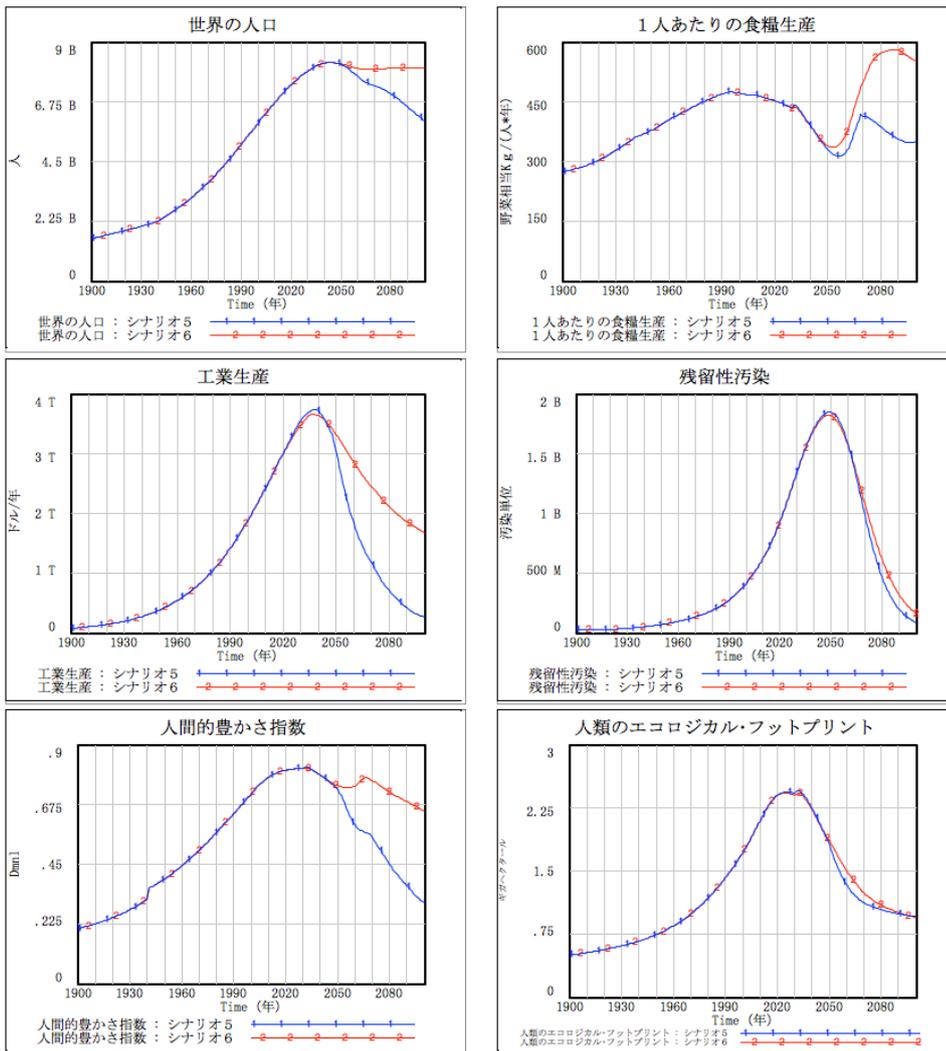


図 13.13 シナリオ5からシナリオ6へ

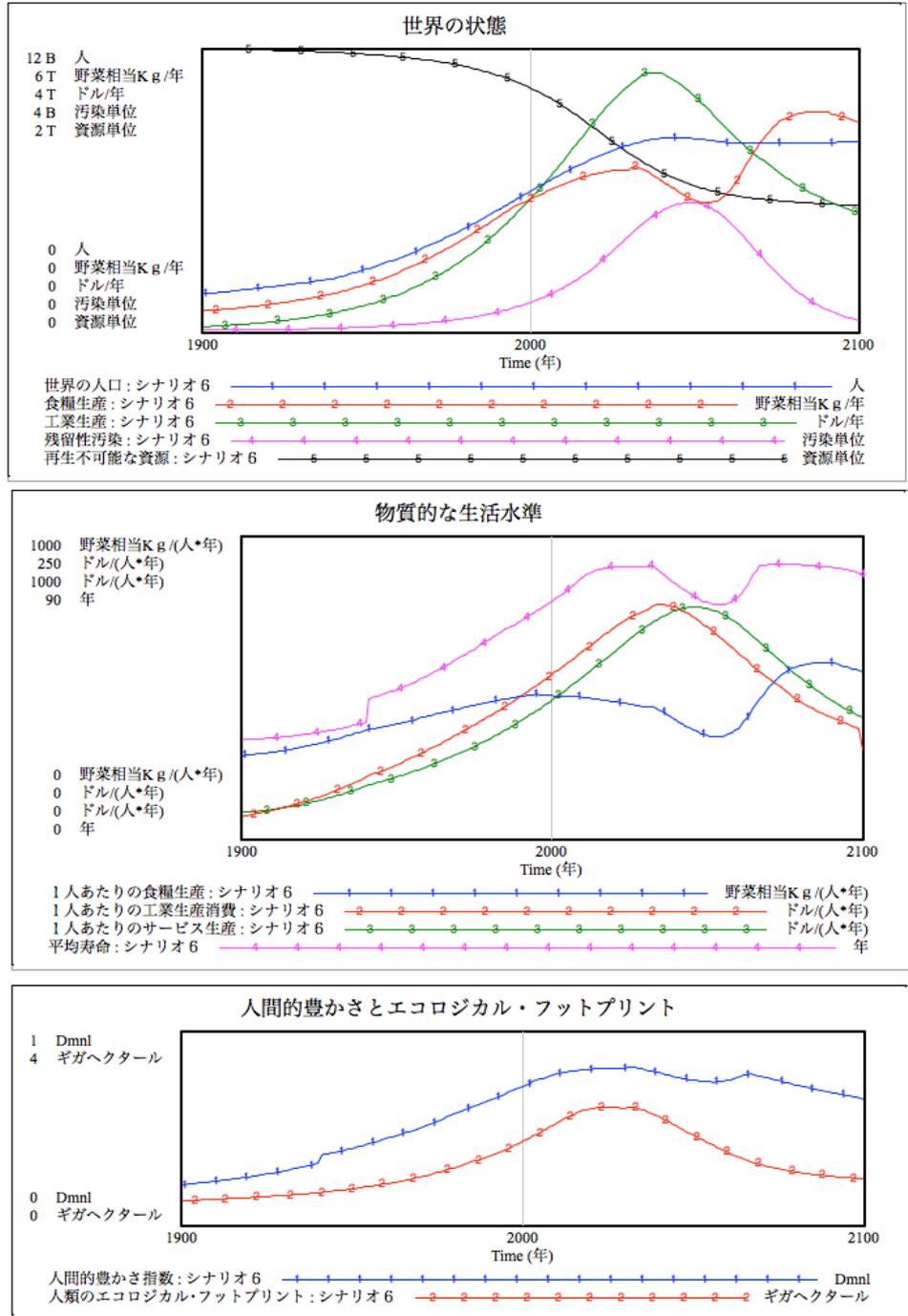


図 13.14 シナリオ 6: シナリオ 5 + 資源の効率改善の技術がある場合

13.7 シナリオ7：シナリオ2＋人口増加の抑制政策

シナリオ7では、これまで考察してきた技術的要因に依存しないで社会的政策で持続可能な経路が実現出来るかどうかを考えます。そのためにまず合計出生率を2002年から2に近づけるように以下のようにします。

出生率規制が効果を発揮する年：2100年 ⇒ 2002年

次に望ましい子供の数を2002年から2人とするように、以下のようにします。

人口成長率ゼロとなる年：2100年 ⇒ 2002年

図13.15は、世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの6変数がシナリオ7でどのように変化したかをシナリオ2と比較した図です。世界の人口が多少減少し、その結果、1人あたりの食糧生産が比較的改善されるのが観察されますが、ほとんど変化が見られないようです。

シミュレーション課題

出生率規制が効果を発揮する年、または人口成長率ゼロとなる年から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いてそれぞれ探求し、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図13.16は、シナリオ7で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさ、エコロジカル・フットプリントを図示したものです。人口は確かに抑制され始めますが、シナリオ2で発生した残留性汚染の増大はそのままです。

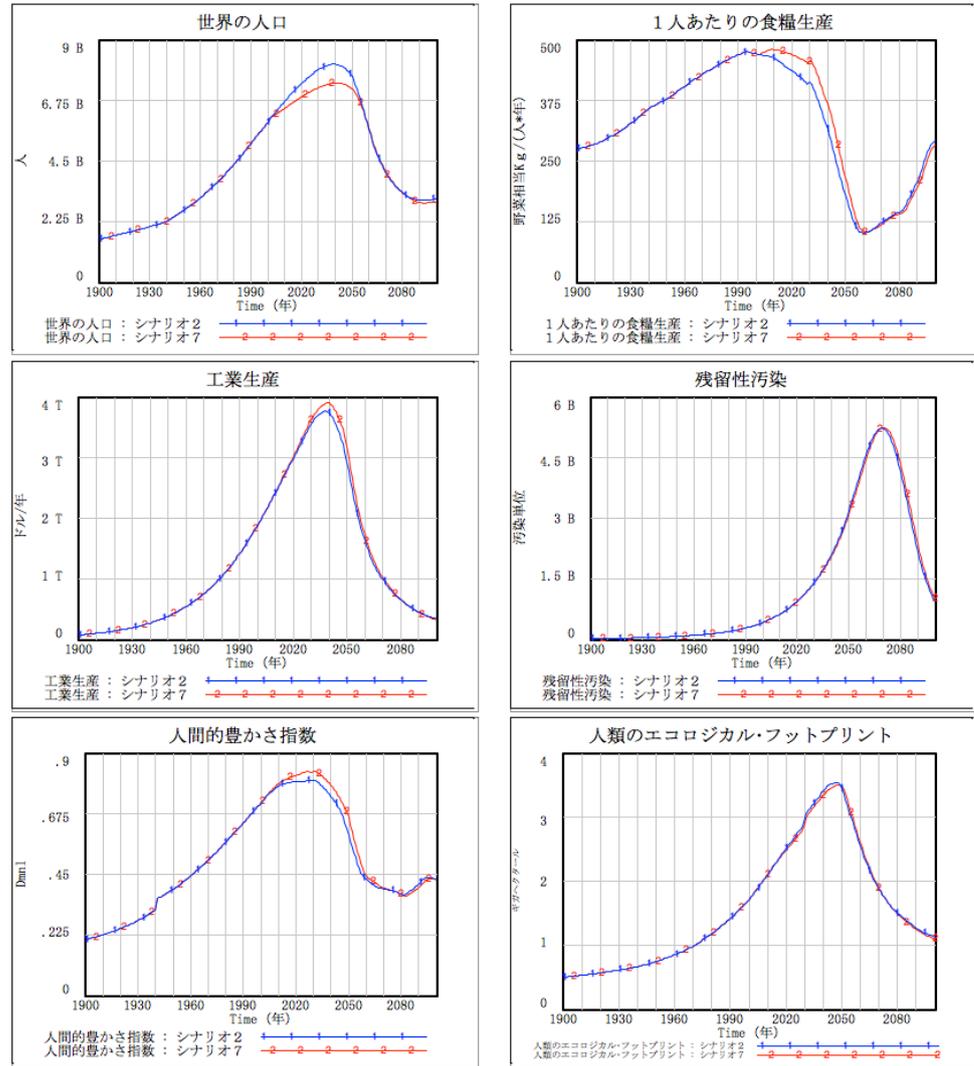


図 13.15 シナリオ 2 からシナリオ 7 へ

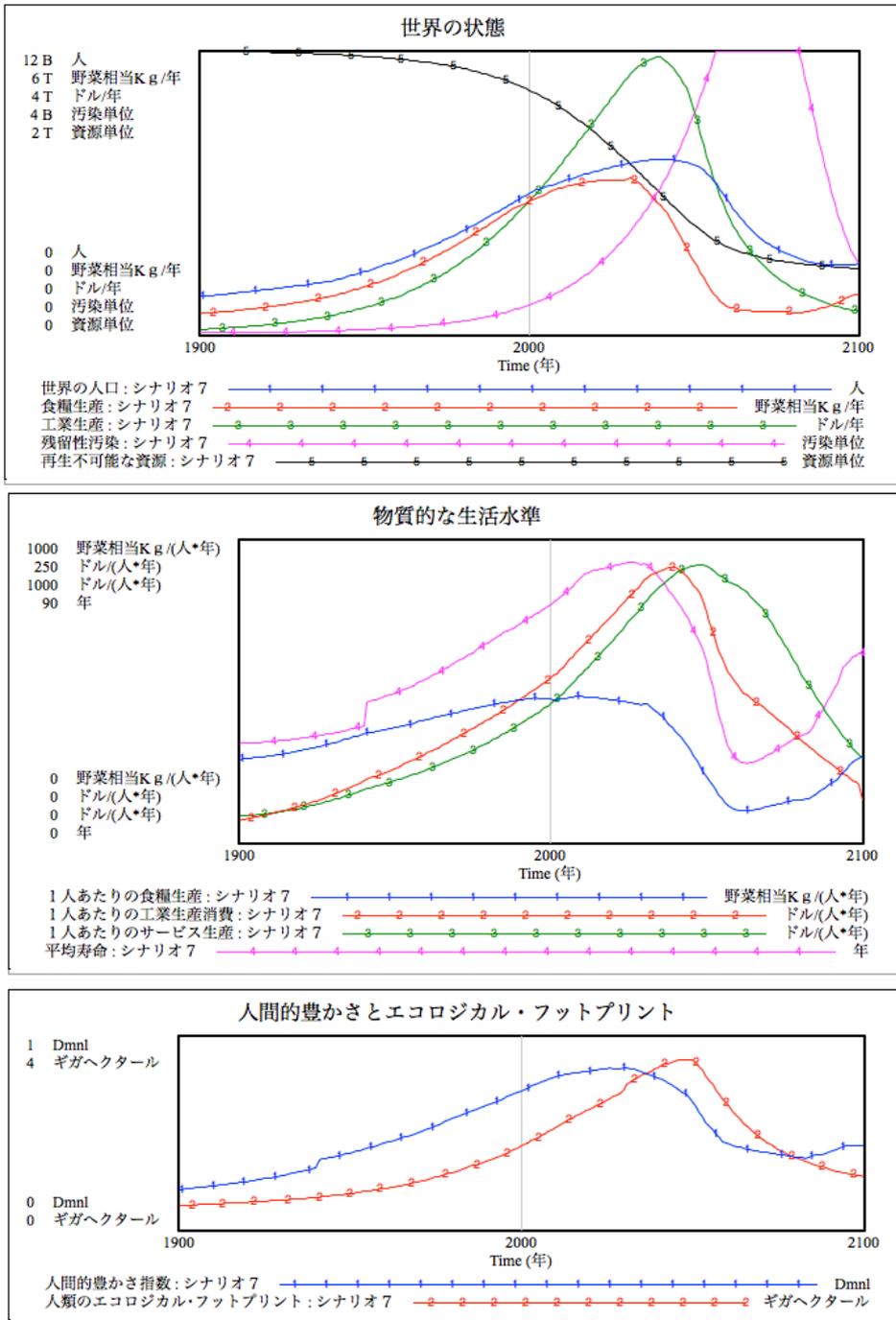


図 13.16 シナリオ7：シナリオ2+人口増加の抑制政策

13.8 シナリオ 8：シナリオ 7 + 工業生産の抑制政策

シナリオ 8 では、残留性汚染を減らすために工業生産を抑制します。そのために 1 人あたり最適工業生産を年間 400 ドルから 350 ドルに減らします。

1 人あたり最適工業生産：400 \Rightarrow 350

そしてその政策実施年度を 2002 年からとします。

工業社会均衡年：2100 年 \Rightarrow 2002 年

図 13.17 は、世界の人口、1 人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの 6 変数がシナリオ 8 でどのように変化したかをシナリオ 7 と比較した図です。6 つの変数全てに対して顕著な変化が観察されます。

シミュレーション課題

1 人あたり最適工業生産、または工業社会均衡年から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いてそれぞれ探求し、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図 13.18 は、このシナリオ 8 で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさとエコロジカル・フットプリントを図示したものです。シナリオ 7 に比べれば、持続可能な経路が 2020 年 - 40 年あたりの間で持続されますが、その後持続不可能となります。すなわち、人口抑制や工業生産の抑制といった社会的政策だけでは、持続可能な経路が実現されないということが判明しました。

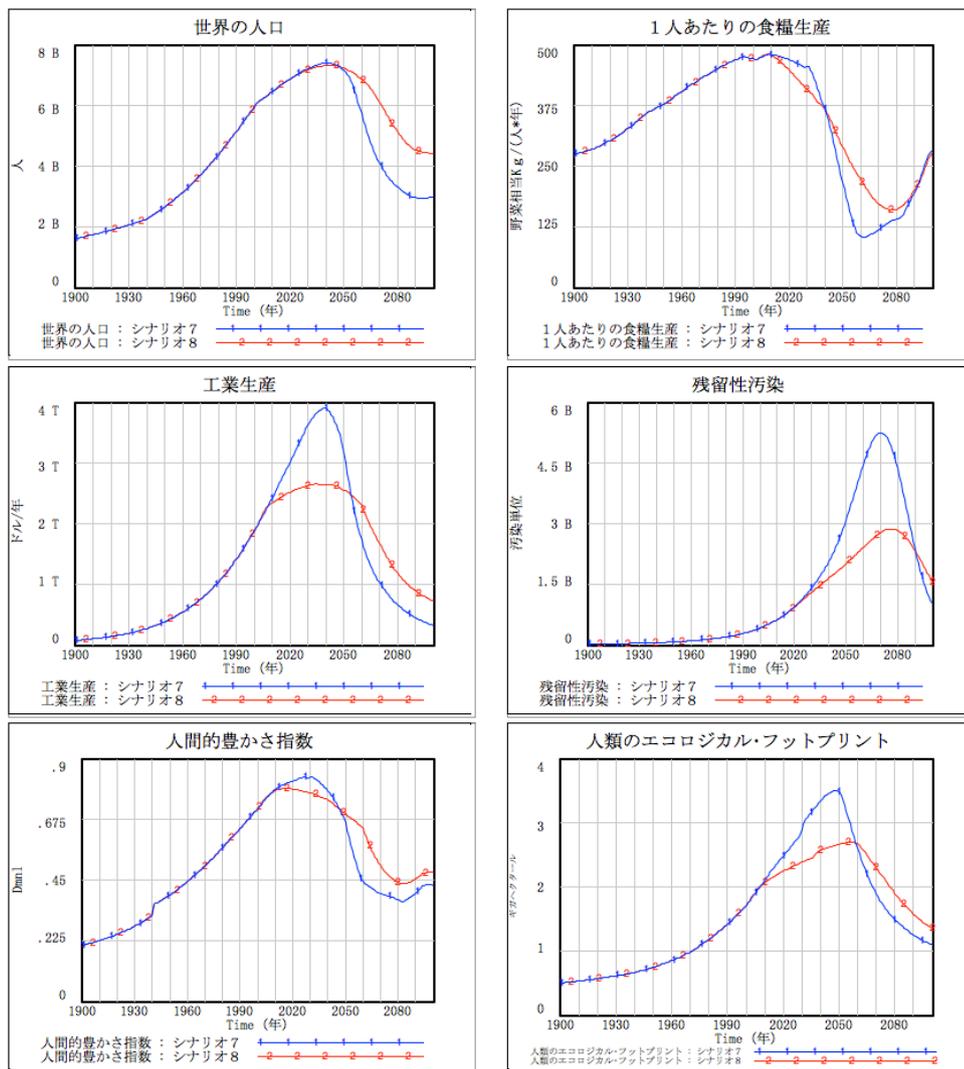


図 13.17 シナリオ 7 からシナリオ 8 へ

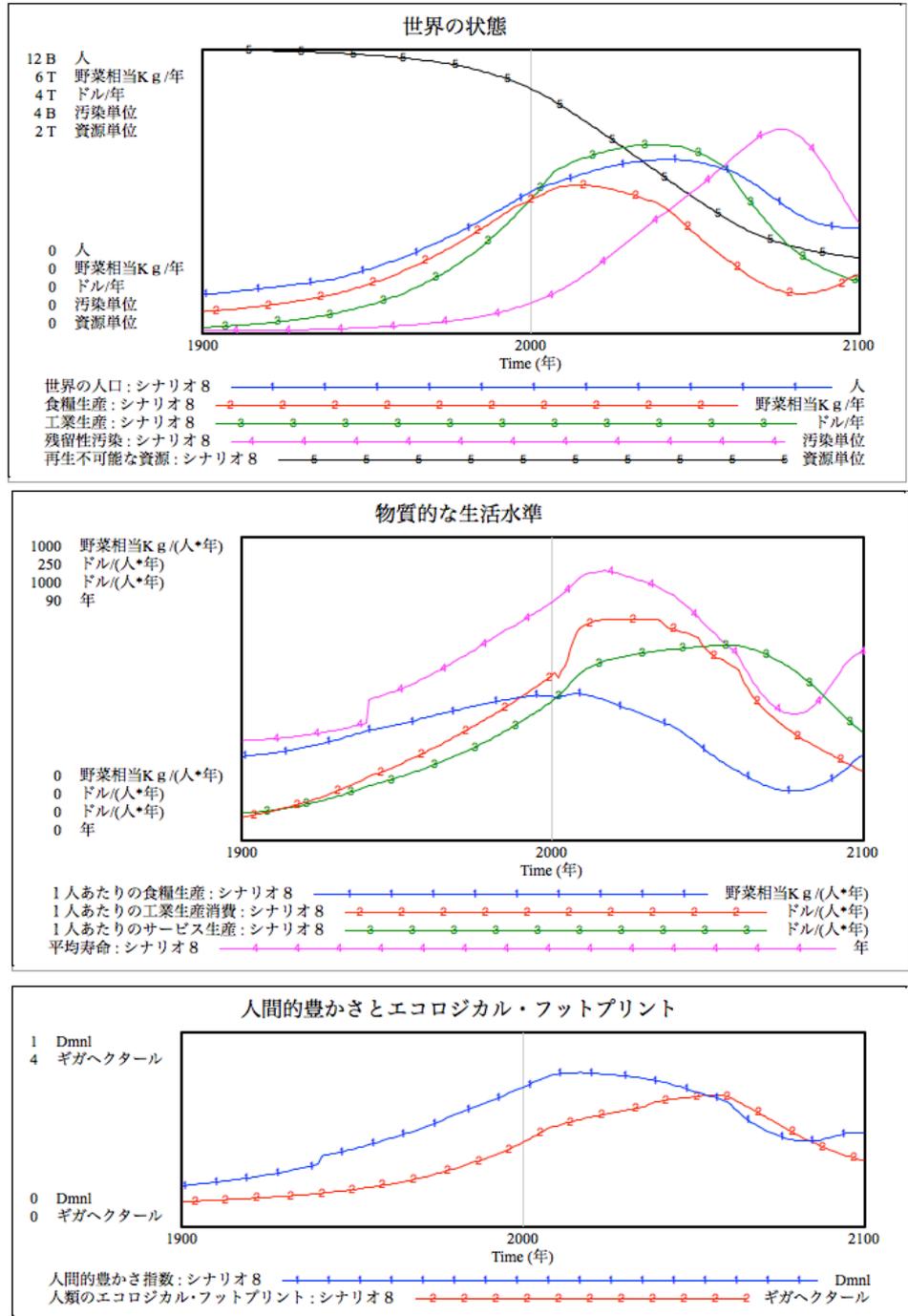


図 13.18 シナリオ 8: シナリオ 7 + 工業生産の抑制政策

13.9 シナリオ9：シナリオ6+シナリオ8

シナリオ9では、シナリオ6で導入したあらゆる技術的要因、およびシナリオ8で導入した人口や工業生産の抑制等の社会的要因 2002 年から実施するという目標を全て考慮に入れます。図 13.19 は、全シナリオ設定パラメータの一覧です。シナリオ9および10の参照にして下さい。

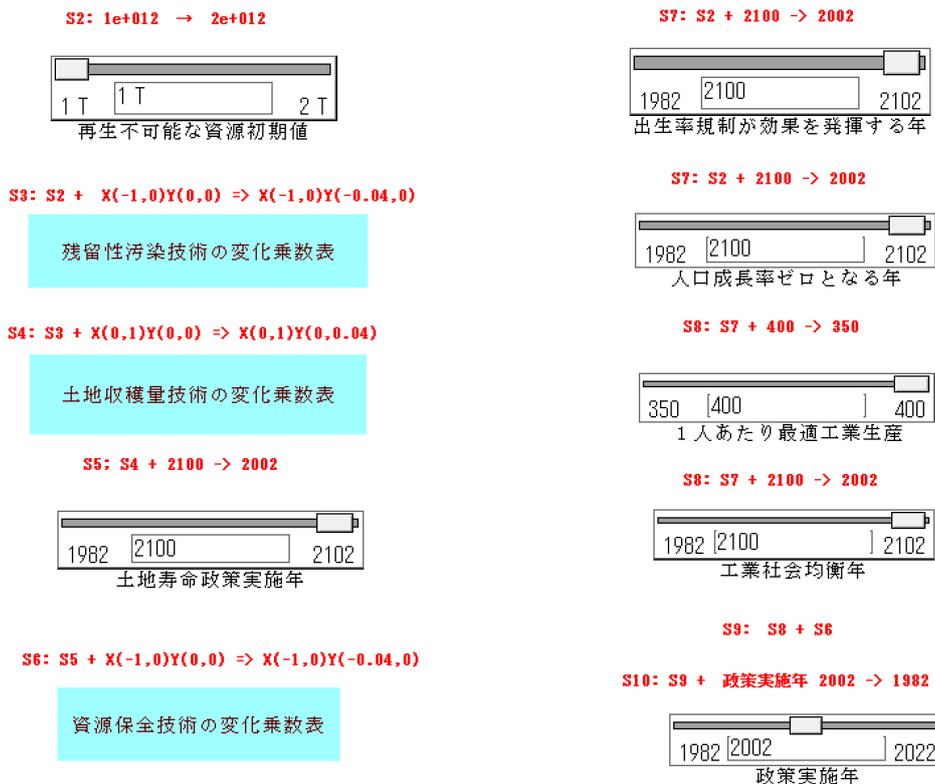


図 13.19 シナリオ2-9の設定パラメータ

図 13.20 は、世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの6変数がシナリオ9でどのように変化したかをシナリオ8と比較した図です。6つの変数全てに対して顕著な変化し、持続可能性が実現されるようになっているのが観察されます。

図 13.21 は、このシナリオ9で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさ、人類のエコロジカル・フットプリントを図示したものです。この結果、人類はやっと持続可能な経路を実現できるようになります。

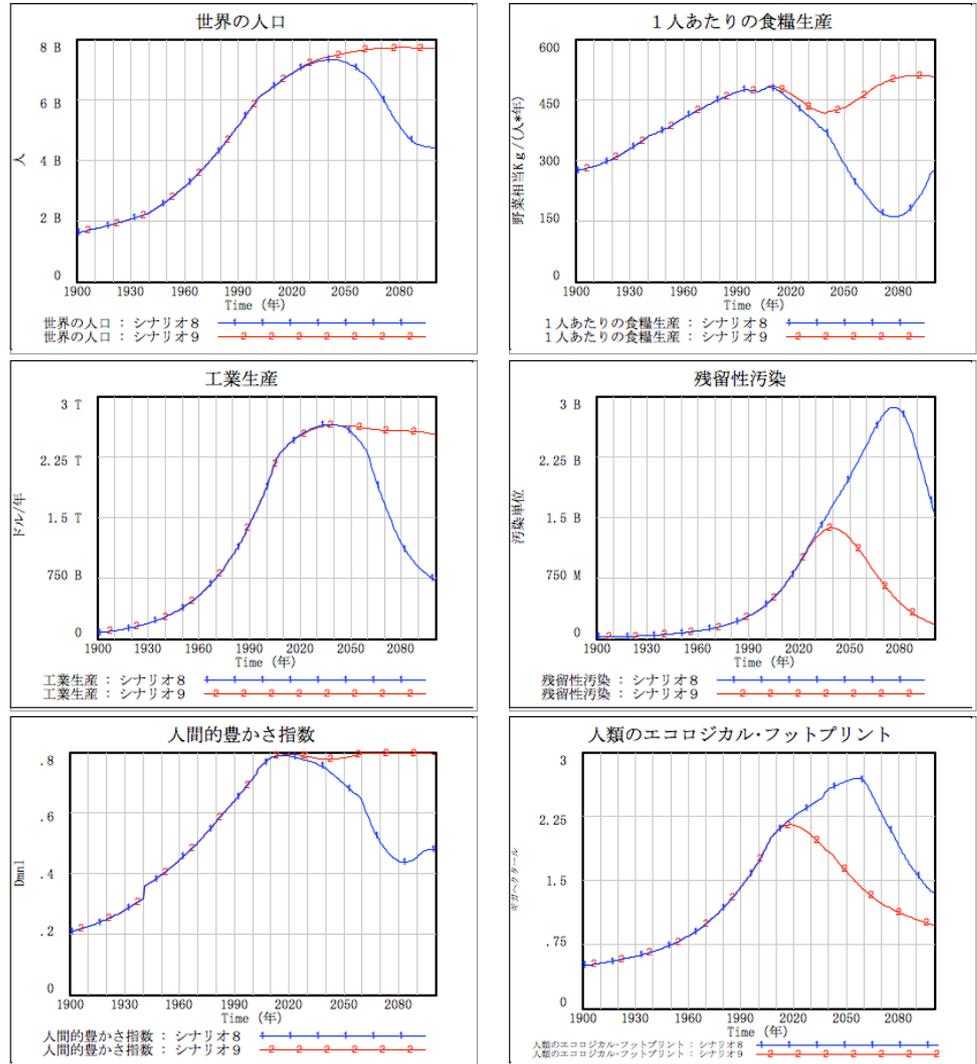


図 13.20 シナリオ 8 からシナリオ 9 へ

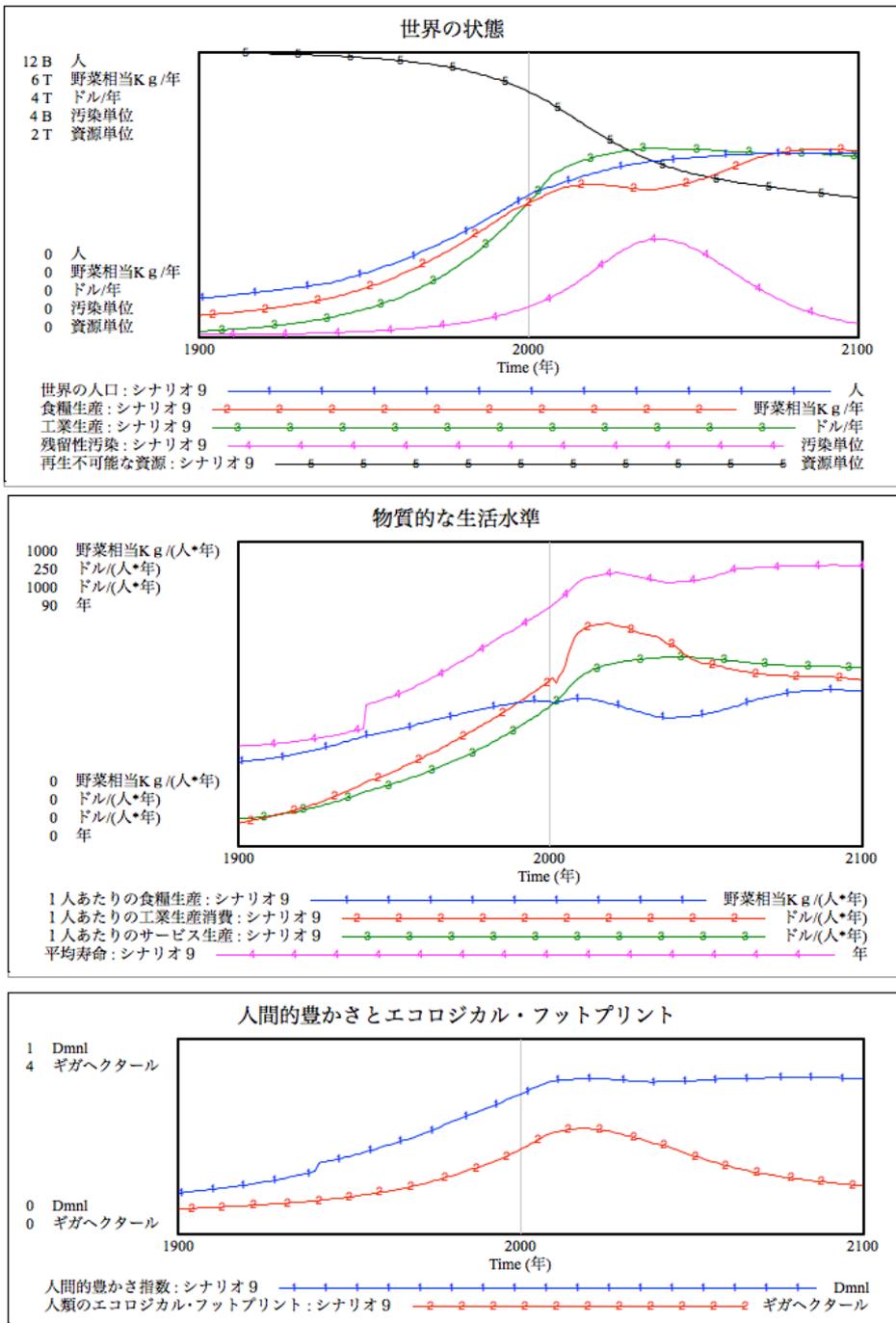


図 13.21 シナリオ9：シナリオ6+シナリオ8

13.10 シナリオ 10：シナリオ 9 を 20 年早く導入

シナリオ 10 では、シナリオ 9 を 20 年はやめて導入します。すなわち、その政策実施年度を 2002 年からとします。

工業社会均衡年：2100 年 ⇒ 2002 年

図 13.22 は、世界の人口、1 人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントの 6 変数がシナリオ 10 でどのように変化したかをシナリオ 9 と比較した図です。残留性汚染が減少し、人類のエコロジカル・フットプリントも減少して、環境への負荷も低減します。その他の指数も持続可能となっているのが観察されます。

シミュレーション課題 1

工業社会均衡年から人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリントへ至る経路を波及ツリーを用いてそれぞれシナリオ 8 と同様に再度探求し、20 年早くアクションを起こすと、なぜこのような変化が生じたのかを、グラフを持ちながら説明しなさい。

図 13.23 は、このシナリオ 10 で観察される、世界の状態、物質的な生活水準、人間的豊かさとエコロジカル・フットプリントを図示したものです。人類が賢明でシナリオ 9 の政策を 20 前の 1998 年に実施していた場合の持続可能経路です。

シミュレーション課題 2

本書執筆時点の 2016 年まで、この持続可能な政策実施が遅れた場合には、どうなったでしょうか。

シミュレーション課題 3

シナリオ 9 および 10 を 22 世紀末の 2200 年まで延長すれば、持続可能経路はどうなるのでしょうか。持続可能な社会は 22 世紀まで持続されるのでしょうか。

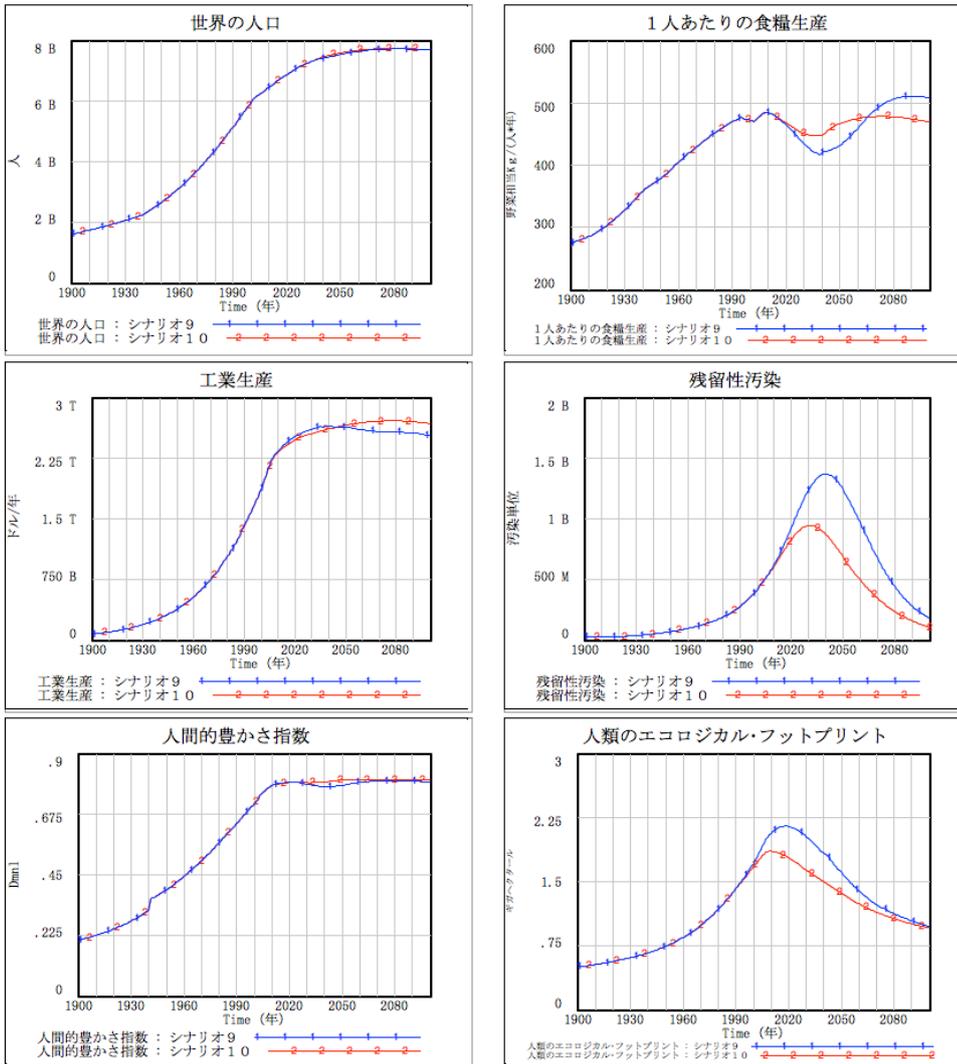


図 13.22 シナリオ9からシナリオ10へ

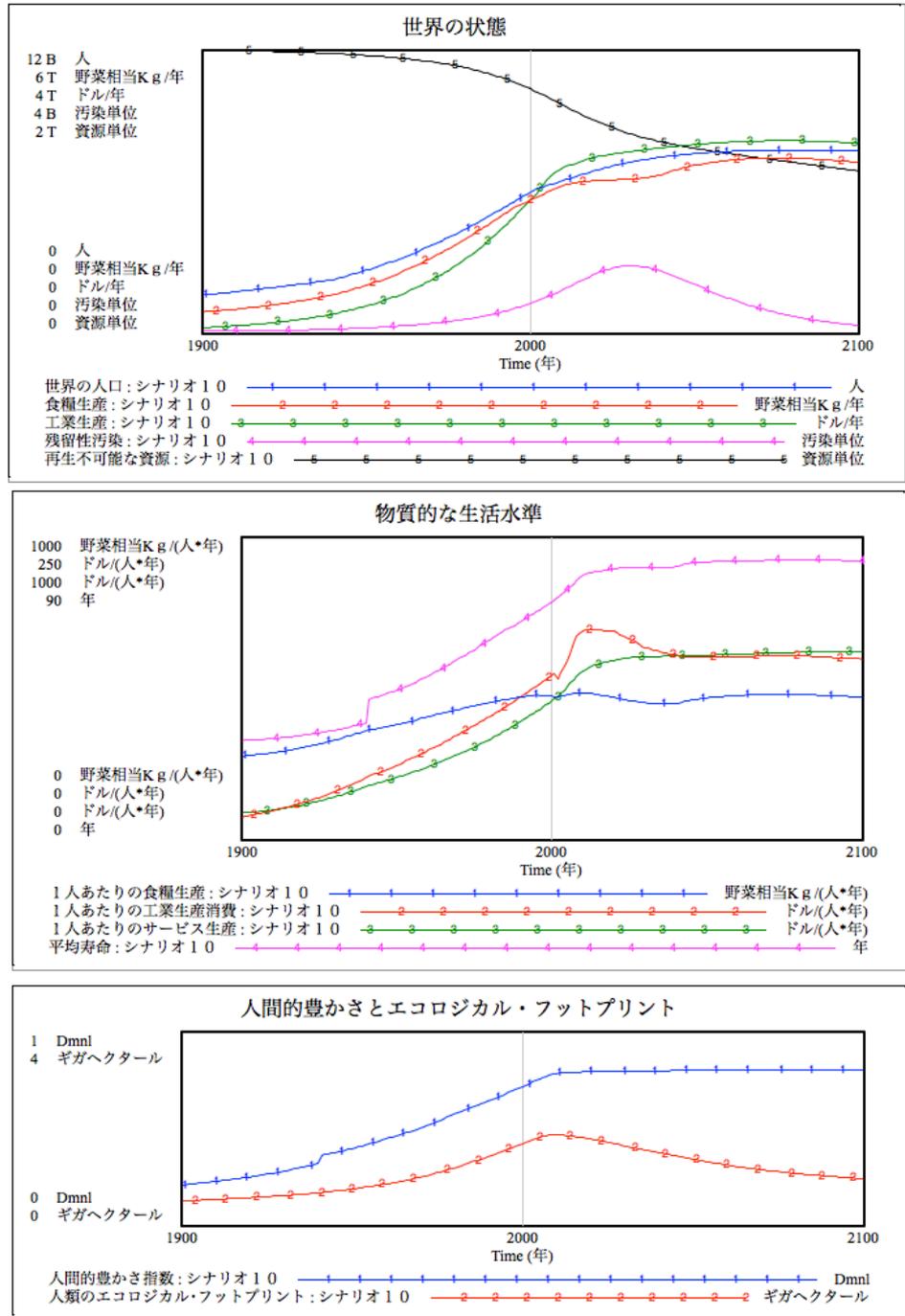


図 13.23 シナリオ1.0：シナリオ9を20年早く導入

13.11 全シナリオの比較分析

これまででは6つの変数（世界の人口、1人あたりの食糧生産、工業生産、残留性汚染、人間的豊かさ指標、人類のエコロジカル・フットプリント）について、各シナリオごとに比較分析してみました。ここでは、各変数についてシナリオ1から10まで経路の振る舞いを同時に比較し、各シナリオがどのようにダイナミックに変化して持続可能な経路が達成されてくるのかを鳥瞰的に観察してみましょう。

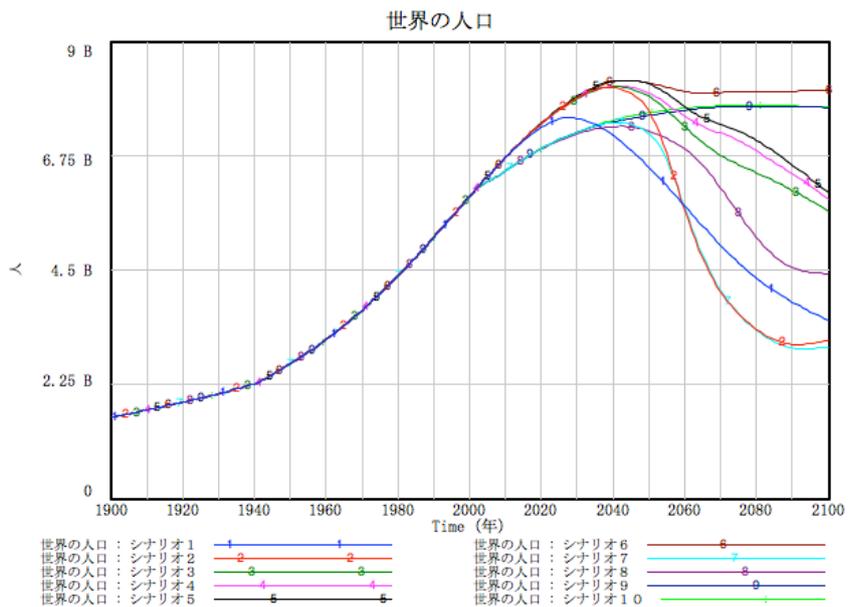


図 13.24 世界の人口

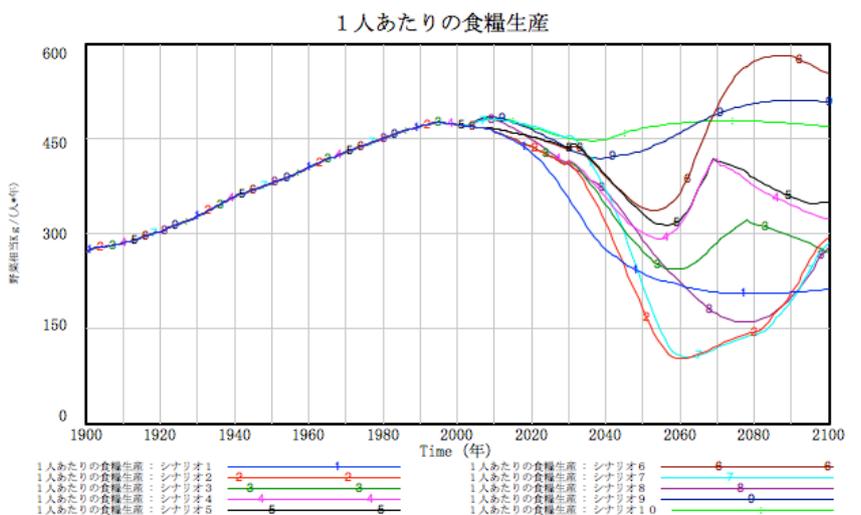


図 13.25 1人あたりの食糧生産

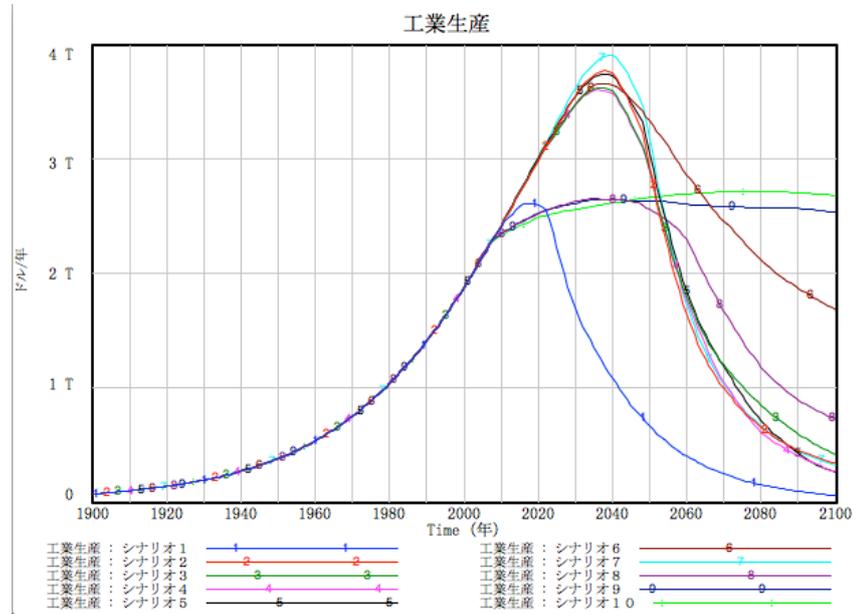


図 13.26 工業生産

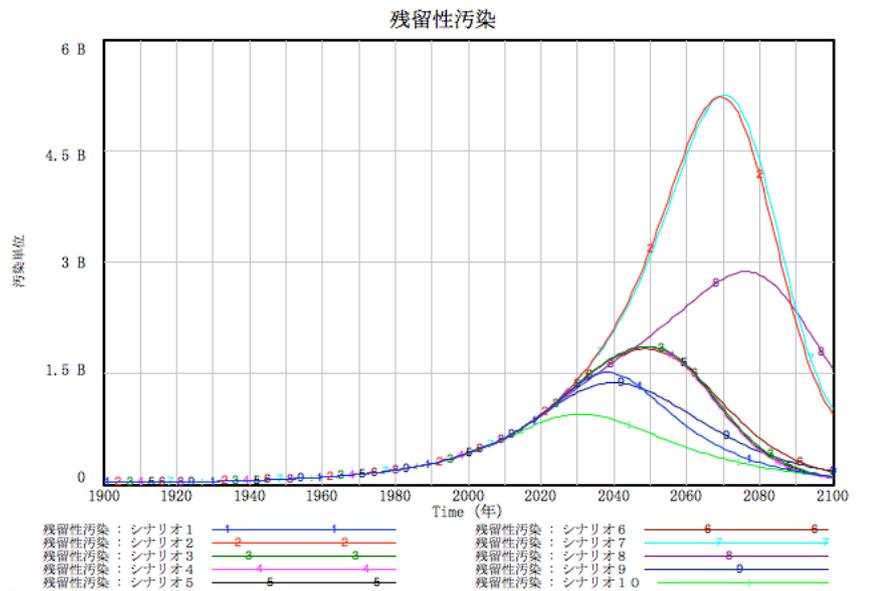


図 13.27 残留性汚染

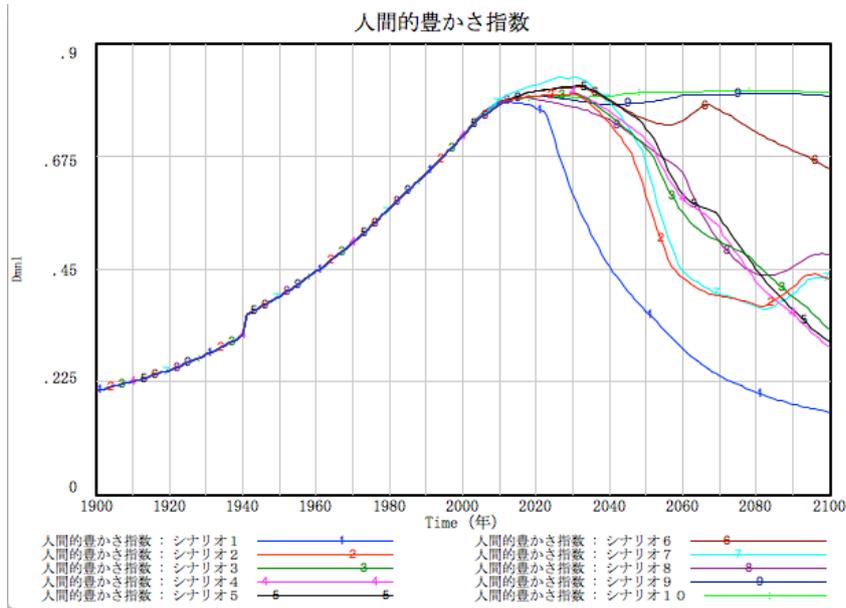


図 13.28 人間的豊かさ指標

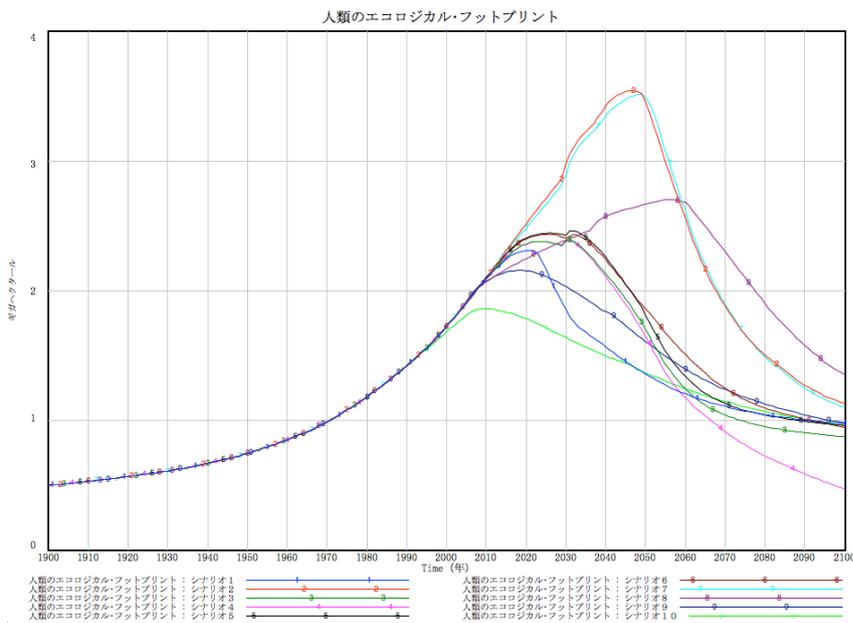


図 13.29 人類のエコロジカル・フットプリント

13.12 持続可能な社会 vs 資本主義社会

本書は持続可能な社会の条件を、マクロ経済の再生産過程（物的再生産、社会的再生産、エコロジカル再生産）としてとらえてステップバイステップで考えてきました。そして、そこで得られた持続可能なモデリングの基礎的知識をもとに、ワールド3モデルに挑戦してきました。世界の経済をマクロ経済として鳥瞰的に把握することが、持続可能な社会の条件を考えるのに、いかに重要であるかを学んできました。

しかしながら現実のマクロ経済の振る舞いはさらに複雑で、これまで考察してきた鳥瞰的な持続可能な社会の条件は、そうしたより複雑な現実のマクロ経済の動きの中のみで実現されなければならないのです。然るに、私たちは現在、資本主義社会と呼ばれる市場経済社会で生産や消費活動を営んでいます。この社会は、マネー中心の社会で、好況や不況、インフレやデフレ、失業、所得格差、人種差別、戦争、環境破壊等不条理な出来事が入り乱れて渦巻いている社会です。

私は近著「公共貨幣 (PUBLIC MONEY)」[? , 2015] で、資本主義社会はシステムとしてはデザイン欠陥であり、持続不可能な社会であると分析しました。そして持続可能な社会を実現するためには、そのシステムデザインの欠陥を除去した新しいシステムデザインが不可欠であると主張し、新しいシステムデザインに立脚した社会を「むらトピア」として提唱しました。

むらトピア社会は3つの大きな特徴を持っています。

1. 公共貨幣システム
2. 職場民主主義（自主経営）
3. 持続可能な社会

したがって、本書で考察してきた持続可能な社会を実現するためには、本書で分析の対象外としてきたマネー資本主義システムをその前段として考察することが不可欠となります。この論点がこれまでの多くのサステナビリティの議論で欠けている点です。本書を学習された読者の皆さんには、「公共貨幣 (PUBLIC MONEY)」を是非ともその姉妹編として、お読みいただければと願っています。

著者紹介

やまぐち かおる
山口 薫

NPO 法人日本未来研究センター理事長 (2002 年～)。岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻 非常勤講師。経済学博士 (Ph.D. カリフォルニア大学バークレー校)。兵庫県淡路島生まれ。関西学院大学経済学部卒。神戸大学大学院博士課程修了。大阪外国語大学 (現大阪大学)、カリフォルニア州立大学ハイワード校、サンフランシスコ大学、ハワイ大学等で教鞭をとり、2004 年 4 月より同志社大学大学院ビジネス研究科教授、2009 年同総合政策科学研究科博士課程教授を兼任 (～2013 年 3 月)。世界未来研究会 (WFSF) フェロー、システムダイナミクス学会経済学チャプター元会長、同日本支部元理事。

主な著書に、Beyond Walras, Keynes and Marx – Synthesis in Economic Theory Toward a New Social design (Peter Lang, 1988)、Sustainable Global Communities in the Information Age (Adamantine, 1997, Editor)、Handbook of Sustainable Development Planning – Studies in Modeling and Decision Support (Elgar, 2004, 2013, Contributor)、Money and Macroeconomic Dynamics (Japan Futures Research Center, 2013) 等がある。その他 50 を越える英文研究論文あり (www.muratopia.org 参照)。

サステナブル

持続可能な社会を考えるガイダンス

システムダイナミクスによる環境モデリング入門&ワールド3モデル

2018年7月 (ドラフト版バージョン 1.1 発行)

著者 山口 薫
発行者 出口 恒
日本未来研究センター
システムダイナミクス グループ

発行所
〒547-0046
大阪市平野区平野宮町1-1-19
日本未来研究センター 大阪オフィス

ISBN 978-4-907291-03-7
192C00040***